



INSTYTUT PODSTAWOWYCH
PROBLEMÓW TECHNIKI

Polska Akademia Nauk

NAUKI TECHNICZNE

u progu
XXI
wieku

*Wizja rozwoju wybranych dyscyplin
z perspektywy IPPT PAN*

M **G** DRUKARNIA
BRACI GRODZICKICH

Nauki techniczne u progu XXI wieku.
Wizja rozwoju wybranych dyscyplin z perspektywy IPPT PAN

Wydanie okolicznościowe
z okazji 50-lecia IPPT PAN
pod redakcją **Michała Kleibera**

Komitet Doradczy Obchodów

Andrzej M. Brandt
Leszek Filipczyński
Władysław Fiszdron
Witold Gutkowski
Stanisław Kajfasz
Aleksandra Królikowska
Ignacy Malecki
Jerzy Mossakowski
Marek Sokołowski
Wojciech Szczepiński



Redakcja techniczna: Zofia Krawczyk
Korekta językowa: Ewa Dworżańska
Korekta redakcyjna: Zofia Krawczyk
Skład i łamanie tekstów: Piotr Kowalczyk
Projekt okładki i opracowanie graficzne: Ewa Jaczyńska
Druk i oprawa: Drukarnia Braci Grodzickich, Piaseczno, ul. Geodetów 47A

ISBN: 83-917926-1-7

Copyright © Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2002.

SPIS TREŚCI

Wstęp	5
Problemy mechaniki nowych materiałów (Zenon Mróz, Henryk Petryk)	7
Materiały sprężyste (Józef Ignaczak, Marek Matczyński, J. Joachim Telega, Ryszard Wojnar)	21
Rola nowoczesnych metod matematycznych — wariacyjnych i asymptotycznych — w modelowaniu materiałów kompozytowych i konstrukcji (J. Joachim Telega i Barbara Gambin)	33
Rola biomechaniki w biologii i jej znaczenie dla medycyny i społeczeństwa (J. Joachim Telega)	41
Mechaniczne badania materiałów (Lech Dietrich)	53
Akustyka w inżynierii materiałowej (Feliks Rejmund)	85
Ultradźwiękowe badania materiałów (Julian Deputat)	99
Inżynierskie projektowanie optymalne (Witold Gutkowski)	107
Kompozyty o matrycach kruchych (Andrzej M. Brandt)	117
Współczesne wyzwania mechaniki płynów (Tomasz Kowalewski, Stanisław Drobnik, Andrzej Bogusławski)	133
Struktura polimerów i modelowanie procesów technologicznych (Andrzej Ziabicki)	155
Przewidywane kierunki badań w zakresie ultradźwiękowej diagnostyki medycznej w ZU IPPT (Andrzej Nowicki)	173
Nowoczesne technologie informatyczne — bezpieczeństwo danych (Zbigniew Kotulski)	181

Przetwarzanie obrazów, wizja komputerowa oraz graficzna reprezentacja wiedzy (Mariusz Nieniewski, Leszek Chmielewski, Zenon Kulpa)	211
Technologie inteligentne (Jan Holnicki-Szulc)	229
Roboty mobilne a transport przyszłości (Adam Borkowski)	239
Komputerowe metody pozyskiwania wiedzy w inżynierii lądowej (Janusz Kasperkiewicz, Adam Borkowski)	255
Eko-budownictwo jako problematyka badawcza (Wojciech Dzieniszewski)	269
Stochastyczne modele zjawisk w przyrodznawstwie i technice (Kazimierz Sobczyk)	275
Nieliniowe modelowanie matematyczne w technice i naukach przyrodniczych. Zagadnienia całkowalności i symetrii (Jan J. Sławianowski)	295
Nauki obliczeniowe (Michał Kleiber)	303

WSTĘP

Celem niniejszego tomu jest próba zarysowania wizji rozwoju nauki w wybranych dyscyplinach badawczych reprezentowanych w IPPT PAN. Przystępowaliśmy do pracy nad przedkładanym obecnie opracowaniem w przekonaniu, że poziom badań prowadzonych w Instytucie, jego 50-letnia historia i zdobyta w tym okresie w szeregu dyscyplin badawczych pozycja czołowego ośrodka naukowego w kraju i, w niektórych obszarach, także w nauce światowej upoważnia nas do podjęcia takiego zadania.

Badania naukowe są dzisiaj istotnym elementem szybkiego, stabilnego, obliczonego na wiele lat rozwoju kraju. W istocie, obok inwestycji w kapitał ludzki, tj. bardzo szeroko rozumianą edukację społeczeństwa, inwestycji w nowoczesną infrastrukturę (szczególnie informatyczną) kraju oraz wprowadzenia dalekowzrocznych uregulowań prawnych, sprzyjających społecznej kreatywności trudno dzisiaj znaleźć właściwszy od nauki obszar do inwestowania publicznych pieniędzy. Pod warunkiem oczywiście, że towarzyszyć takim inwestycjom będzie stała, krytyczna refleksja decydentów i uczonych co do priorytetów badawczych, relacji pomiędzy środkami wydawanymi na badania poznawcze a przeznaczonymi na badania prowadzone na rzecz gospodarki państwa oraz efektywności wydatkowanych środków.

Michał Kleiber

PROBLEMY MECHANIKI NOWYCH MATERIAŁÓW

Zenon Mróz, Henryk Petryk

1 Wstęp

Niniejsze opracowanie dotyczy perspektyw rozwoju mechaniki i zakresu badań nowych materiałów, stanowiących podstawę nowoczesnych technologii. Klasyczne materiały, takie jak stal, beton, cegła, drewno czy stopy metali są powszechnie używane w konstrukcjach inżynierskich lub elementach maszyn. Współczesna wiedza o tych materiałach jest dostatecznie obszerna, aby umożliwić ich racjonalne stosowanie w różnorodnych konstrukcjach. Zarówno procesy mikromechaniczne jak i własności makroskopowe były przedmiotem wieloletnich badań, które stworzyły racjonalne podstawy do opisu procesów deformacji i własności materiałów, a także do ustalenia związków pomiędzy mikrostrukturą a własnościami wytrzymałościowymi.

Nowe materiały są wynikiem rozwoju i potrzeb współczesnych technologii, a w szczególności potrzeby podniesienia zakresu wysokich temperatur pracy maszyn i urządzeń cieplnych, uzyskania wysokiego stosunku wytrzymałości do jednostkowego ciężaru materiału lub elementu konstrukcji, uzyskania dużej odporności na korozję i dużej wytrzymałości zmęczeniowej. Nowe perspektywy stwarzają również stopy z pamięcią kształtu, materiały adaptacyjne i biomateriały, których wewnętrzna struktura dostosowuje się do zadanej historii obciążenia. Obecnie wymienimy typy nowych materiałów, których rozwój i zastosowanie stanowić będzie podstawę rozwoju nowych technologii w XXI wieku a mianowicie:

- kompozyty;
- materiały ceramiczne;
- związki intermetaliczne;
- stopy z pamięcią kształtu;
- nanomateriały;
- materiały gradientowe;
- materiały inteligentne, biomateriały.

Omówimy krótko podstawowe problemy badawcze mechaniki nowych materiałów, wskazując na możliwości ich realizacji w najbliższym okresie. Obszerne studium aktualnych problemów badawczych w zakresie wytwarzania, własności i modelowania nowych materiałów zawarte jest w Europejskiej Białej Księdze (*European White Book on Fundamental Research in Material Science, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, 2001, http://www.mpg.de/doku/wb_materials/*)

2 Problemy badawcze mechaniki nowych materiałów

2.1 Kompozyty

Materiały kompozytowe znalazły już szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym (elementy samolotów, satelitów, itp.) i samochodowym. Obecnie planuje się zastosowanie ich w konstrukcjach inżynierskich, takich jak estakady, mosty, dźwigary powierzchniowe, itp., zaś przygotowywane realizacje konstrukcji mają charakter studialny.

Kompozyty możemy podzielić na następujące grupy:

- **Kompozyty polimerowe (PMC)** o osnowie z żywic termoutwardzalnych lub termoplastów, zaś włóknach szklanych lub ceramicznych.
- **Kompozyty metalowe (MMC)** typu osnowa metalowa – włókna metalowe (np. miedź-wolfram, aluminium-bor), osnowa metalowa – włókna ceramiczne, np. tytan – węgiel krzemu (T/SiC).
- **Kompozyty ceramiczne (CMC)** z długimi lub krótkimi włóknami ceramicznymi.
- **Kompozyty hybrydowe (HC)** łączące kilka materiałów, np. osnowę polimerową zbrojoną włóknami szklanymi i jednocześnie cienkimi warstwami metalu (np. Al). Kompozyty te łączą cechy wysokiej wytrzymałości z dużą ciągliwością.

Podstawowe parametry charakteryzujące kompozyt to stosunek wytrzymałości do gęstości σ_c/ρ i stosunek sztywności do gęstości E/ρ . W stosunku do stali, aluminium, czy tytanu, stosunki te są wielokrotnie większe, np. dla kompozytów polimerowych o włóknach szklanych stosunek σ_c/ρ jest 6-8 razy większy zaś dla włókien grafitowych od 9 do 11 razy większy w stosunku do stali.

Kompozyty w wyniku swej struktury charakteryzują się anizotropią modułów sprężystych. Dużo bardziej złożony jest charakter rozwoju uszkodzeń. Wskutek warstwowej struktury możemy wyróżnić następujące formy uszkodzeń: a) pękanie włókien i związany z tym ich lokalny poślizg, b) pękanie osnowy w kierunku prostopadłym do ułożenia włókien, c) delaminacja poszczególnych warstw. Makroskopowo efekty pękania i poślizgu widoczne są przez zmianę modułów sztywności i rozwoju trwałych odkształceń plastycznych.

Jako główne zagadnienia badawcze można zatem wymienić:

1. Rozwój mechaniki uszkodzeń oraz teorii plastyczności kompozytów i związanie efektów mikro czy makromechanicznych ze strukturą kompozytu.
2. Projektowanie i optymalizacja kompozytów dla określonych typów konstrukcji oraz analiza ich własności wytrzymałościowych.

Brak jest w Polsce wyspecjalizowanych ośrodków badawczych w zakresie mechaniki materiałów kompozytowych. Dlatego też należałoby rozwinąć badania w tym zakresie szczególnie, że istnieje w Ośrodku Mechaniki i Informatyki Stosowanej IPPT-PAN zespół pracujący nad zagadnieniami kompozytów o kruchej osnowie (BMC).

2.2 Materiały i kompozyty ceramiczne

Materiały ceramiczne znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach techniki ze względu na charakterystyczne własności mechaniczne i termiczne: wysoka wytrzymałość na ściskanie, duża sztywność i twardość, odporność na ścieranie, a w szczególności odporność na pękanie w wysokich temperaturach. Materiały te (np. MgO , Al_2O_3) mogą być użyte w postaci jednofazowej (ceramika monolityczna), lub wielofazowej (cermetale, kompozyty z włóknami krótkimi lub długimi, cienkie pokrycia elementów metalowych, itp.). Typowymi przykładami zastosowań są supertwarde narzędzia do skrawania, warstwy wierzchnie elementów konstrukcyjnych, elementy urządzeń elektronicznych, implanty biologiczne, elementy statków kosmicznych, itp.

Bardzo istotną cechą materiałów ceramicznych jest ich kruchość i mała odporność na propagację szczelin. Zniszczenie występuje zazwyczaj przy małych odkształceniach i zależy istotnie od początkowej mikrostruktury i temperatury. Odporność na zniszczenie można podnieść przez zmianę kształtu ziaren krystalicznych i zmniejszenie gęstości defektów w strukturze początkowej, a także przez wprowadzenie włókien zbrojenia.

Podstawowym problemem badawczym w zakresie mechaniki materiałów ceramicznych jest zbadanie wpływu mikrostruktury materiałów na jego odporność na pękanie, opracowanie właściwych modeli makroskopowych opisujących proces odkształcenia i rozwoju uszkodzeń, mechanika cienkich warstw ceramicznych współpracujących z elementami metalowymi, a także mechanika ceramiki zbrojonej włóknami. W IPPT-PAN istnieje zespół badawczy zajmujący się identyfikacją uszkodzeń w materiałach ceramicznych metodą emisji akustycznej, prowadzone są również prace dotyczące mechaniki uszkodzeń materiałów kruchych.

2.3 Związki międzymetaliczne (intermetale)

Związki międzymetaliczne, stanowią fascynującą grupę nowych materiałów będących połączeniem tytanu i aluminium w prawie jednakowych udziałach. Wynikowa struktura związku jest całkiem inna od struktury składników. Tak więc związek γ -TiAl na bazie tytanu z dodatkiem 48% Al, 2% Cr, 2% Nb ma strukturę płasko-centryczną ($L1_0$), natomiast związek α_2 -Ti₃Al ma strukturę heksagonalną ($D019$). Intermetale tworzą struktury warstwowe o wyraźnej anizotropii, dla których poślizg krystaliczny nie zachodzi według prawa Schmid'a, natomiast głównym mechanizmem deformacji jest bliźniakowanie. Związki charakteryzują się niskim ciężarem właściwym $\rho = (3,7-3,9) \text{ g/cm}^3$, oraz wysoką granicą plastyczności $\sigma_p = (350-600) \text{ MPa}$ i wytrzymałością na rozciąganie $\sigma_c = (450-700) \text{ MPa}$, a także małym pęzaniem przy wysokich temperaturach (do 950°C). Charakterystyczną cechą jest wzrost granicy plastyczności i modułu wzmocnienia plastycznego wraz z temperaturą (poniżej temperatury krytycznej). Związki międzymetaliczne ze względu na niski ciężar właściwy i dobre własności zachowane w wysokich temperaturach doskonale nadają się do wytwarzania łopatek turbin, zaworów i innych elementów wysokotemperaturowych.

Z punktu widzenia badawczego mechaniki materiałów istnieje potrzeba zbudowania modelu deformacji tych materiałów wychodząc ze struktur warstwowych i uwzględniając anizotropię własności oraz mechanizm bliźniakowania. Brak jest do tej pory jednolitej teorii opisującej procesy deformacji międzymetali, określającej zależność tych procesów od mikrostruktury.

2.4 Stopy z pamięcią kształtu

Stop niklu i tytanu o zadziwiających właściwościach został odkryty w 1962r. w Naval Ordnance Laboratory (Washington) i uzyskał nazwę NITINOL (skład 45–51% Ni). Pręt lub sprężyna z nitinolu w próbie rozciągania wykazuje duże odkształcenia resztkowe, natomiast po ogrzaniu pręt „pamięta” początkowy kształt i natychmiast do niego powraca, zaś odkształcenia resztkowe znikają. Przyczyną tego zjawiska jest deformacja związana z przemianą martenzytyczną stopu, przy ogrzaniu zaś następuje spontaniczny powrót do struktury austenitycznej. Przy odkształcaniu powyżej temperatury spontanicznej przemiany austenitycznej zachodzić może przemiana martenzytyczna wymuszona naprężeniem, przy odciążeniu zaś materiał może wrócić do struktury austenitycznej, tworząc charakterystyczną pętlę na wykresie naprężenie–odkształcenie. Efekt ten nazwany jest *nadsprężystością* stopu, gdyż przemiany fazowe austenit–martenzyt i odwrotnie martenzyt–austenit są wywołane procesem odkształcenia i zachodzą w zakresie znaczących odkształceń (ok. 10%). Mechanika stopów z pamięcią kształtu jest jednym z bardzo aktualnych obszarów badań ze względu na wielorakie zastosowania tego efektu w wielu urządzeniach. Liczne urządzenia wykorzystują zjawisko pamięci kształtu, efekt nadsprężystości wywołany przemianą fazową lub efekt nadsprężystości martenzytu. Wymienimy tu takie urządzenia jak: filtr żylny, wkładki rozszerzające żyły, połączenia rur, wyłączniki temperaturowe, tłumiki, oprawki okularów, igły dentystyczne, instrumenty chirurgii laparoskopowej, zaczepty ścięgien i kości, itp.

Problemy badawcze to w pierwszym rzędzie opis procesów deformacji i przemiany fazowej, zbadanie własności stopów w stanach złożonych naprężeń i ich zachowania przy deformacji cyklicznej, a także kryteriów zmęczenia i zniszczenia. Efektem badań będzie dalszy rozwój zastosowań tych stopów. Obecnie istnieje ok. 4.000 patentów w tej dziedzinie, ale jedynie 40 zostało wykorzystanych do konkretnych urządzeń. Istnieją zatem olbrzymie możliwości w zastosowaniu tych stopów. W IPPT PAN prowadzone są badania dotyczące modelowania własności stopów z pamięcią kształtu przy jednoosiowych i złożonych stanach naprężenia.

2.5 Nanomateriały

Materiały te charakteryzują się wymiarami ziaren rzędu $L < 100$ nm tworzących tak zwane atomowe klastry o dużym udziale atomów brzegowych. Tak np. przy $L = 5$ nm na brzegu klastra znajduje się od 30 do 50% atomów. Podstawowe własności wynikają z małych wymiarów ziaren, a więc brak ruchu dyslokacji wewnątrz ziaren, poślizg występujący na granicach ziaren wspomagany porowatością brzegową. Istnieją różnorodne metody wytwarzania nanomateriałów, takie jak metoda skraplania gazowego, napylenia w komorze próżniowej ($p = 10^{-3}$ torów), wyżarzanie laserowe, oddziaływanie kontaktowe, itp.). Podstawowe własności mechaniczne nanomateriałów to: wzrost twardości i wytrzymałości, wzrost odporności na zużycie powierzchni kontaktowych, wzrost ciągliwości nanomateriałów kruchych. Wzrost granicy plastyczności można zinterpretować stosując równanie Halla-Petcha,

$$\sigma_y = \sigma_0 + k L^{-\frac{1}{2}},$$

gdzie σ_0 jest granicą plastyczności dużego ziarna, L jest wymiarem (średnica) ziarna, k parametrem materiałowym. Tak np. dla ziarna niklu o wymiarze $L = 12 \mu\text{m}$ otrzymamy twardość $H_c = 0.9$ Pa, a dla ziarna o wymiarze $L = 12$ nm otrzymamy $H_c = 6.9$ GPa. Podobnie różnie odporność na pęknięcie i zużycie.

Przy teoretycznym opisie własności nanomateriałów należy uwzględnić fazę objętościową i powierzchnię i uwzględnić takie zjawiska jak dyfuzja i wzrost pustek, poślizg i obrót granic ziaren, natomiast procesy zachodzące wewnątrz ziaren grają mniejszą rolę.

Nanomateriały odgrywają już znaczną rolę w nowoczesnych technologiach. W ostatnich latach obserwujemy znaczny rozwój badań w tym kierunku i powstanie specjalistycznego czasopisma (Journal of Nanomaterials). W Polsce tematyka badawcza wokół nanomateriałów nie jest rozwinięta, brak również własnych metod wytwarzania tych materiałów. W IPPT PAN i na Politechnice Krakowskiej prowadzone są prace teoretyczne dotyczące mechaniki nanomateriałów.

2.6 Materiały gradientowe

W literaturze angielskiej materiały te noszą skrót FGM (functionally graded materials). Wytwarzanie struktur, których własności zmieniają się bardzo silnie z położeniem elementu stało się możliwe w ostatnich latach. Dotyczy to w pierwszym rzędzie warstw powierzchniowych, stanowiących barierę termiczną o dużej odporności na pęknięcie i zużycie. Istnieje wiele metod wytwarzania warstw gradientowych takich jak: termiczny natrysk, osadzanie fazy parowej, metody metalurgii proszkowej, itp. Cechą warstw gradientowych jest duża zmienność modułu sprężystości i współczynnika przewodzenia ciepła w kierunku normalnym do powierzchni. Optymalny rozkład uzyskujemy analizując odporność na propagację szczeliny przy działaniu skokowo zmiennej temperatury na brzegu. Okazuje się, że przy właściwym doborze zmiany parametrów warstwy w kierunku normalnym do powierzchni współczynnik intensywności naprężeń można zredukować kilkakrotnie. Aktualny obszar zastosowań to głównie pokrycia ceramiczne łopatek turbin i innych elementów pracujących w wysokich temperaturach, umożliwiające podnoszenie ich trwałości. Z punktu widzenia badawczego istnieje cały szereg problemów mechaniki materiałów gradientowych, takich jak określenie optymalnych zmienności cech mechanicznych i termicznych, analiza rozwoju uszkodzeń i propagacji szczelin, wzajemne oddziaływanie warstw gradientowych, itp. Duża liczba prac na ten temat w ostatnim okresie świadczy o koncentracji wysiłków badawczych. W Polsce tematyka materiałów gradientowych jest słabo rozwinięta, jakkolwiek prace doświadczalne tym zakresie są prowadzone (Politechnika Warszawska).

2.7 Materiały inteligentne, biomateriały

Przykładem materiałów inteligentnych są biomateriały mające zdolność tworzenia struktur przystosowujących się do charakteru obciążeń. Tak np. struktura kości ulega zmianie przy zmianie obciążenia, zgodnie z tzw. prawem Wolfa, tworząc ukierunkowaną strukturę porowatą. Przedstawimy krótko porównanie biomateriałów i materiałów inżynierskich:

Biomateriały:

- monitoring w czasie rzeczywistym,
- samonaprawialność,
- adaptacyjność do obciążenia,
- zdolność tworzenia struktur optymalnych.

Materiały inżynierskie:

- własności uzyskane drogą prób i błędów,
- brak monitoringu i samonaprawialności.

Wysiłek badawczy w wielu ośrodkach skoncentrowany jest na poznaniu i opisanu mechanizmów adaptacyjnych biomateriałów, a zwłaszcza mechaniki kości i współpracy z implantami. Badania pozwolą na stworzenie podstaw inżynierii materiałów inteligentnych poszczególnych generacji. Możemy teoretycznie opisać (wyodrębnić) te generacje w następujący sposób:

Generacja 1

- zastosowanie sensorów i aktywnego sterowania,
- zewnętrzne przetwarzanie danych i modelowanie,
- projektowanie struktury materiału dla zadanych obciążeń;

Generacja 2

- hybrydowe mikrosensory i sterowanie,
- generowanie wewnętrznej wiedzy,
- adaptacyjna modyfikacja struktury;

Generacja 3

- molekularny poziom projektowania struktury (nanopoziom),
- adaptacyjność struktury do przyłożonych obciążeń.

Problemy materiałów inteligentnych przyciągają uwagę wielu badaczy i stanowią niewątpliwie wyzwanie dla mechaniki XXI wieku. Zwłaszcza badania w zakresie biomechaniki mogą stworzyć racjonalne podstawy do rozwoju kolejnych generacji materiałów inteligentnych. W IPPT PAN prowadzone są badania teoretyczne dotyczące mechaniki kości i współpracy z implantami.

3 Mikromechanika materiałów

Ważnym działem badawczym wspomagającym inżynierię materiałową w poszukiwaniach nowych materiałów o pożądanych właściwościach jest mikromechanika materiałów. Jej siła polega, między innymi, na dostarczeniu narzędzi umożliwiających przewidywanie zachowania się jeszcze nieistniejących materiałów, ułatwiając tym samym optymalne ukierunkowanie niezbędnych badań doświadczalnych. Nowoczesne metody doświadczalne oraz modelowanie fenomenologiczne przedstawione są w innych opracowaniach zawartych w niniejszym tomie, dlatego też w tym rozdziale omawiane jest głównie podejście mikromechaniczne.

3.1 Ogólna charakterystyka i trendy badawcze

Mikromechanika materiałów zajmuje się określaniem wzajemnych powiązań pomiędzy właściwościami ciał stałych w różnych skalach wymiarowych. Zasadniczą cechą odróżniającą podejście mikromechaniczne od tradycyjnego modelowania fenomenologicznego jest odejście od traktowania elementu materiału jako jednorodnego i odkształcanego równomiernie. Jako przykładowy obiekt badań można podać materiał kompozytowy, który w skali mikro jest silnie niejednorodny, a wyznaczeniu podlegają jego makroskopowe własności efektywne. Materiały o złożonej strukturze wewnętrznej znajdują we współczesnej technice coraz szersze zastosowanie, stąd też wzrastające zainteresowanie możliwościami określania ich właściwości makroskopowych, mechanizmów deformacji i zniszczenia, oraz optymalnej mikrostruktury i własności składników.

Istotną zaletą podejścia mikromechanicznego jest *przewidywanie makroskopowych właściwości materiałów* niejednorodnych na podstawie założeń konstytutywnych umiejscowionych na poziomie mikro, gdzie podstawy fizyczne mechanizmów deformacji są lepiej poznane. Można więc stosować to podejście jako wspomagające przy tworzeniu całkowicie nowych materiałów o pożądanych właściwościach, podczas gdy modele fenomenologiczne w zasadzie nie wykraczają poza opis już badanych materiałów. Metody mikromechaniki materiałów stosuje się do różnorodnych kompozytów o znanej lub losowej strukturze wewnętrznej, do polikryształów metali, materiałów spekań lub z mikropustkami, jak również do materiałów o strukturze wewnętrznej zmieniającej się wskutek przemian fazowych. Pojęcia skali mikro i makro są względne i silnie zależą od rodzaju materiału i problemu badawczego. W obecnej dobie miniaturyzacji różnego rodzaju urządzeń, a także w wyniku potrzeby wnikięcia możliwie głęboko w fizyczne mechanizmy przemian zachodzących w materiałach, wymiary w skali mikro nierzadko mierzone są w nanometrach.

Jako ilustrację rozpatrzmy próbkę materiału, która w skali makroskopowej może pozornie wyglądać na jednorodną i izotropową, lecz w rzeczywistości posiada złożoną strukturę wewnętrzną. Typowa polikrystaliczna próbka metalowa stanowi spójny agregat dużej liczby różnorodnie zorientowanych ziaren. Z kolei same ziarna, z których każde jest pojedynczym, anizotropowym kryształem, zawierają już na wstępie wiele defektów strukturalnych. W skali odmierzanej w nanometrach, można się spodziewać wakansów, dyslokacji bądź błędów ułożenia. W nieco większej skali mogą występować mikropustki i mikropełnięcia. Domieszki mogą być rozmieszczone w sieci krystalograficznej, gromadzić się przy granicach ziaren lub innych defektach względnie łączyć się w postaci wtrąceń. Gdy materiał jest obciążany, wzajemne oddziaływanie wymienionych powyżej elementów mikrostruktury daje w wyniku obserwowane makroskopowe cechy materiału. W miarę wzrostu naprężenia, po początkowo czysto sprężystej dystorsji sieci krystalograficznej następuje przemieszczanie się dyslokacji prowadzące do plastycznego odkształcenia i umocnienia materiału. Równoczesny wzrost istniejących pustek i mikropełnień wraz z powstawaniem nowych może prowadzić do stopniowej degradacji funkcjonalnych właściwości materiału. Procesy te można rozpatrywać w różnych skalach obserwacji w przestrzeni i w czasie, stąd dobór skal mikro i makro nie jest jednoznaczny nawet dla konkretnego materiału i może zależeć od celu prowadzonych badań. Należy podkreślić znaczenie odpowiedniego doboru obszarów i procedur uśredniania nie tylko w przestrzeni, lecz również względem czasu.

Podstawowym zagadnieniem mikromechaniki materiałów jest określanie makroskopowych właściwości mechanicznych materiałów niejednorodnych na podstawie znajomości struktury wewnętrznej i własności materiału w odpowiednio dobranej skali mikro. W szczególności, celem

takich badań może być przewidywanie makroskopowych właściwości nowych materiałów o złożonej strukturze wewnętrznej (kompozytów, polikryształów, materiałów splekanych i wielofazowych) przed przeprowadzeniem badań doświadczalnych, co jest pomocne dla optymalnego ukie-
runkowania eksperymentów. Podejście mikromechaniczne umożliwia głębsze wniknięcie w istotę przemian zachodzących w materiale oraz uzyskanie modeli materiału dokładniejszych i wymagających zwykle mniejszej liczby stałych materiałowych niż makroskopowe modele fenomenologiczne. Przy obecnym szybkim wzroście możliwości obliczeń komputerowych, złożoność modeli mikromechanicznych wynikająca z uwzględnienia skomplikowanej struktury wewnętrznej materiału nie jest już barierą dla prowadzenia efektywnych symulacji numerycznych.

Innym zadaniem mikromechaniki materiałów jest *określenie zmian zachodzących w materiale w skali mikro* wskutek przyłożenia obciążeń zewnętrznych. Makroskopowe właściwości materiału w zakresie odkształceń niesprężystych są związane ze zmianami mikrostruktury materiału, których wyznaczenie jest zagadnieniem odrębnym od czysto sprężystego przejścia mikro-makro. Przebieg procesu odkształceń plastycznych lub przemian fazowych w skali mikro pod działaniem zewnętrznych obciążeń mechanicznych lub termicznych silnie wpływa na charakterystyki makroskopowe materiału. Przewidywanie rozwoju mikrouszkodzeń i możliwości zniszczenia materiału odgrywa zasadniczą rolę przy ocenie trwałości i niezawodności urządzeń i konstrukcji. Podejście mikromechaniczne, uwzględniające niejednorodność materiału w obszarze propagacji szczelin i wstępną nierównomierność rozkładu mikronaprężeń i mikroodkształceń, stanowi istotne wzbogacenie klasycznej mechaniki pęknięcia materiałów.

Teoretycznym i numerycznym badaniom z zakresu mikromechaniki materiałów towarzyszą badania doświadczalne właściwości materiałów określanych na próbkach o szerokim zakresie wymiarowym oraz obserwacje mikrostruktury materiałów. Odniesienie przewidywań teoretycznych i symulacji numerycznych do badań przeprowadzonych na materiałach rzeczywistych jest oczywiście konieczne dla weryfikacji poczynionych założeń modelowych. Z drugiej strony, mikromechanika dostarcza inżynierii materiałowej narzędzi badawczych ułatwiających interpretację obserwacji doświadczalnych, głębsze zrozumienie mechanizmów przemian zachodzących w materiałach oraz przewidywanie zachowania się nowych materiałów.

Centralnym pojęciem mikromechaniki materiałów jest reprezentatywny element objętościowy, dla którego dokonuje się przejścia mikro-makro i określa *właściwości efektywne* materiału w skali makroskopowej, korzystając z metod uśredniania. Do najbardziej znanych metod należy tu określanie dolnych i górnych oszacowań efektywnych modułów sztywności przy pomocy metod wariacyjnych, wyznaczanie makroskopowej odpowiedzi materiału przy użyciu jednego z wariantów metody wewnętrznie-zgodnej (*self-consistent*), oraz określanie efektywnych właściwości kompozytów periodycznych poprzez wyznaczenie rozwiązania dla komórki podstawowej (*unit cell*) metodą elementów skończonych.

Istotnym problemem może być dobór rozmiarów elementu reprezentatywnego w ośrodkach o losowej mikrostrukturze, tak aby wyznaczone właściwości efektywne miały sens fizyczny. Pomocny może tu być stochastyczny *opis mikrostruktury*, w szczególności tzw. promień korelacji. Bada się również minimalny wymiar niejednorodnego elementu materiału, powyżej którego nie-lokalne efekty w wynikowym makroskopowym związku konstytutywnym mogą być pominięte.

Rozwijana jest *teoria homogenizacji* zajmująca się ustanowieniem ścisłych relacji pomiędzy polami w skali mikro i makro bez odwoływania się do konkretnych pomiarów fizycznych. Teoria ta jest zwykle stosowana do pól periodycznych, dla których otrzymano szereg istotnych rezultatów,

również o znaczeniu praktycznym. Rozszerzenie na pola losowe jest atrakcyjne od strony matematycznej lecz mniej efektywne w zastosowaniach. Matematyczna teoria homogenizacji bazuje na *przejściu asymptotycznym* od zagadnienia wyjściowego, zawierającego w swoich równaniach mały parametr określający charakterystyczny wymiar niejednorodności w odniesieniu do wymiarów rozpatrywanego ciała materialnego, do zagadnienia dla zastępczego ośrodka jednorodnego o poszukiwanych właściwościach efektywnych. Rozwiązanie tzw. zagadnienia na komórce (dla ośrodków periodycznie niejednorodnych) prowadzi do określenia takich właściwości efektywnych. Twierdzenia stanowiące jądro teorii homogenizacji precyzują, w jakim sensie rozwiązania zagadnień początkowo-brzegowych dla ośrodka zastępczego stanowią (bądź nie) graniczne rozwiązanie zagadnienia wyjściowego.

Aktualne trendy badawcze na świecie w zakresie mikromechaniki materiałów charakteryzuje dążenie do możliwie *kompleksowego opisu* badanego materiału. Nie wystarcza już pojęcie dwuskalowego continuum o zadanej mikrostrukturze; zasadniczym problemem jest również wyznaczenie *ewolucji mikrostruktury* w procesie obciążania, co wymaga głębszego wniknięcia w przebieg procesów w skali mikro. Prowadzi to do konstruowania *hierarchicznych modeli wieloskalowych*, sięgających nawet do skali atomowej. Przykładowo, hierarchiczny model sprężysto-plastycznego polikryształu może obejmować następujące skale analizy:

- polikryształ jako agregat różnorodnie zorientowanych kryształów,
- kryształ jako sprężysta sieć z dużą liczbą ruchomych dyslokacji,
- ruchoma dyslokacja jako obiekt analizowany metodą dynamiki molekularnej.

W przypadku modelowania procesu rozwoju uszkodzenia materiału zamiast wielu dyslokacji, choć w nieco większej skali, można rozpatrywać dużą liczbę mikropęknięć. W materiałach podlegających przemianom fazowym rolę ruchomego elementu mikrostruktury przejmuje granica rozdziału faz w skali mikro. W stopach intermetalicznych i materiałach z pamięcią kształtu istotnym obiektem analizy w skali mikro mogą być ruchome granice bliźniacze. Wymienione powyżej elementy mikrostruktury mogą oczywiście być rozpatrywane łącznie. We wszystkich przypadkach, celem podstawowym jest wyznaczenie powiązań między fizycznymi mechanizmami zmian mikrostruktury a makroskopowymi charakterystykami materiału.

W materiałach kruchych w zakresie monotonicznego wzrostu naprężeń makroskopowych przyjmuje się, iż rozwój mikropęknięć zachodzi równomiernie w reprezentatywnej objętości materiału. Umożliwia to wyznaczenie makroskopowych właściwości materiału poprzez wykorzystanie pojęcia zastępczego ośrodka ciągłego. Takie podejście przestaje być stosowne wraz z osiągnięciem pewnej krytycznej gęstości defektów, kiedy to może nastąpić ich zorganizowane łączenie się w jedno dominujące pęknięcie lub pasmo zlokalizowanego uszkodzenia. Do wyznaczenia takiej krytycznej gęstości defektów wykorzystuje się tzw. *metody sieciowe*, stanowiące dział fizyki statystycznej.

Jest oczywiste, iż rozwój metod obliczeniowych mikromechaniki materiałów jest związany z rozwojem ogólnych *metod komputerowych* mechaniki. Przykładowo, dostępność programów metody elementów skończonych wraz z implementacją złożonych, nieliniowych modeli konstytutywnych dla dużych deformacji niesprężystych w istotny sposób rozszerza możliwości przewidywania zachowania się nowych materiałów o skomplikowanej strukturze wewnętrznej.

3.2 Kierunki badań w IPPT PAN

IPPT PAN posiada znaczny potencjał badawczy, umożliwiający i uzasadniający kontynuowanie i rozwijanie wielokierunkowych badań z zakresu mikromechaniki materiałów w placówce, przy współpracy z innymi ośrodkami naukowymi w kraju i za granicą. Biorąc pod uwagę perspektywiczne kierunki badań w obszarze mikromechaniki materiałów rozwijane obecnie w wiodących ośrodkach badawczych na świecie oraz dotychczasowe osiągnięcia w IPPT PAN, celowe wydaje się zintensyfikowanie prac badawczych w grupach problemowych wymienionych poniżej. Wyodrębnić można dwie klasy zagadnień, z których jedna związana jest z analizą i modelowaniem konkretnych materiałów, w szczególności nowych materiałów omawianych powyżej w punkcie 2, a druga dotyczy rozwoju samych metod badawczych, niezależnie od obszaru ich zastosowań.

Mikromechanika nowych materiałów

Mikromechanika kompozytów

Makroskopowe zachowanie się kompozytów można przewidywać na podstawie znajomości ich struktury wewnętrznej oraz lokalnych równań konstytutywnych dla poszczególnych komponentów i na powierzchniach rozdziału faz. Efektywną metodą jest homogenizacja kompozytu przy założeniu jego periodycznej struktury, poprzez wyznaczenie rozwiązania na komórce jednostkowej metodą elementów skończonych. Takie podejście umożliwia uwzględnienie skomplikowanych procesów fizycznych zachodzących w kompozycie w trakcie obciążeń mechanicznych lub termicznych. Jako przykład można wymienić analizę kompozytów zbrojonych o osnowie metalicznej (np. SiC/Ti), z uwzględnieniem odspajania włókien od osnowy oraz efektów sprężysto-plastycznych, lepkich i termicznych w osnowie polikrystalicznej. Metoda wewnętrznie-zgodna, stosowana w różnych wariantach, bazuje na rozwiązaniu Eshelby'ego dla elipsoidalnego wtrącenia w nieskończonej macierzy. Może ona być stosowana zarówno do oszacowania makroskopowych parametrów całego kompozytu, jak również właściwości samej osnowy polikrystalicznej na podstawie równań konstytutywnych dla pojedynczych kryształów. To drugie podejście stanowi przypadek modelu wieloskalowego, który może być wzbogacony o prowadzoną w skali mikro analizę delaminacji na powierzchniach połączeń elementów kompozytu względnie propagacji mikroszczelin w osnowie. Innym istotnym zagadnieniem jest poszukiwanie oszacowań właściwości kompozytów nieliniowych przy braku informacji o ich konkretnej mikrostrukturze. W ogólności, znajomość powiązań pomiędzy cechami mikrostrukturalnymi kompozytu a jego właściwościami efektywnymi jest niezbędna do poszukiwania kompozytów o optymalnych właściwościach w założonej klasie.

Własności efektywne i rozwój mikrouszkodzeń w materiałach ceramicznych

Celem badań jest modelowanie mikromechaniczne stopniowej utraty sztywności materiału wskutek rozwoju mikropeknięć. Przyjęcie izotropowego bądź innego określonego doświadczalnie rozkładu orientacji początkowych mikroszczelin, wykorzystanie jednego ze znanych kryteriów propagacji pojedynczej szczeliny, a następnie zastosowanie procedury uśredniania prowadzi do określenia makroskopowych właściwości materiału traktowanego jako zastępczy ośrodek ciągły. Uwzględniona przy tym anizotropia uszkodzeń generowanych przy obciążaniu daje w wyniku

model anizotropowy z pamięcią obciążeń maksymalnych. Planowane jest uzyskanie na tej drodze nie tylko oszacowań wytrzymałości materiałów ceramicznych przy obciążeniach monotonicznych, lecz również przewidywanie zachowania się materiału przy złożonych drogach obciążania. Zastosowanie metod sieciowych, w tym teorii perkolacji, prowadzi do oszacowań zakresu stosowalności koncepcji zastępczego ośrodka ciągłego oraz umożliwia symulacje rozwoju uszkodzeń aż do całkowitego rozdzielenia próbki materiału na części.

Modelowanie procesu bliźniakowania w stopach intermetalicznych

W stopach intermetalicznych, w szczególności TiAl, odkształcenia plastyczne wynikające z typowego przemieszczania się dyslokacji są utrudnione, a rolę podstawowego mechanizmu odkształceń niesprężystych przejmuje bliźniakowanie. W dwufazowych stopach o strukturze warstwowej, które jak stwierdzono posiadają optymalne właściwości funkcjonalne w zakresie podwyższonych temperatur, bliźniakowanie umożliwia zachowanie zgodności odkształceń pomiędzy sąsiadującymi ziarnami bez wystąpienia niepożądanych spiętrzeń mikronaprzeżeń. Aktualnym problemem badawczym jest określenie warunków nukleacji bliźniaków w obszarach lokalnych koncentracji naprzeżeń w otoczeniu defektów struktury kryształu, w szczególności dyslokacji. Innym istotnym zagadnieniem jest określenie warunków nagłego powstawania warstw bliźniaczych o określonej grubości biegnących w poprzek całego kryształu. Analiza stateczności mikrostruktury, przy zastosowaniu podejścia termodynamicznego z uwzględnieniem energii sprężystej, błędu ułożenia i dyssypacji, stanowi atrakcyjne narzędzie badawcze do rozwiązywania takich problemów.

Mikromechanika materiałów z pamięcią kształtu

Podstawowym celem jest tu badanie ewolucji struktur martenzytycznych indukowanych napreżeniowo w materiałach z pamięcią kształtu. Na podstawie znajomości własności termomechanicznych fazy macierzystej (austenit) i produktu bezdyfuzyjnej przemiany fazowej (martenzyt) oraz przy zastosowaniu termodynamicznego kryterium powstawania i transformacji odwrotnej płytek martenzytu, określone zostają przyrosty udziału objętościowego poszczególnych wariantów martenzytu w funkcji zewnętrznego odkształcenia. Procedura homogenizacji powstającego w ten sposób kompozytu o zmiennej mikrostrukturze prowadzi do oszacowań makroskopowych właściwości termomechanicznych pojedynczych kryształów, a po kolejnym uśrednieniu, także polikryształów stopów z pamięcią kształtu. Na tej drodze uzyskuje się powiązanie makroskopowych właściwości materiału ze zmianami jego mikrostruktury. Obok rezultatów poznawczych i głębszego zrozumienia zachodzących przemian, można w ten sposób określić również dane wyjściowe do budowy modeli fenomenologicznych w zakresie trudno osiągalnym w badaniach doświadczalnych. Możliwe jest także bezpośrednie wykorzystanie modeli mikromechanicznych do przewidywania zachowania się prostych konstrukcji z efektem pseudosprężystości lub pamięci kształtu.

Mechanika nanomateriałów

Mikromechanika materiałów w skali mierzonej w nanometrach wymaga zastosowania narzędzi badawczych przynajmniej częściowo odmiennych od tych stosowanych w standardowej mecha-

nice kontinuum. Istotniejszą rolę odgrywają tu efekty powierzchniowe, pojedyncze defekty struktury, jak również dyskretna struktura atomowa materiału. Symulacje w skali atomowej, w szczególności dynamika molekularna, pozwalają modelować ruch pojedynczej dyslokacji, frontu przemiany fazowej lub wierzchołka szczeliny. Wyniki takich symulacji można wykorzystać do opracowania odpowiednich modeli opisujących ruch takich obiektów w nieco większej skali, w której podejście kontynualne jest już lepiej uzasadnione. Z kolei śledzenie ruchu defektów struktury kryształu pod wpływem obciążania oraz wzajemne oddziaływanie wielu defektów prowadzi do opisu właściwości nano-ziarna. W szczególności, symulacja ruchu układu wielu dyslokacji daje w wyniku model plastycznego odkształcenia kryształu. Kompleksowe zastosowanie wymienionych podejść prowadzi do wieloskalowych modeli nanomateriałów.

Modelowanie mikromechaniczne materiałów biologicznych

Właściwości mechaniczne materiałów biologicznych, zarówno kości jak i tkanki miękkiej, mogą być określane jak dla kompozytów lub materiałów porowatych o szczególnie złożonej strukturze. Przy zastosowaniu podejścia mikromechanicznego istotnym problemem jest identyfikacja najważniejszych cech mikrostrukturalnych oraz właściwości mechanicznych poszczególnych składników, co jest trudnym wyzwaniem zwłaszcza dla organizmów żywych. Odrębnym zagadnieniem jest analiza przystosowywania się materiałów biologicznych do obciążenia zewnętrznego poprzez zmianę ich mikrostruktury w czasie. Uwzględnienie zjawiska przyrostu lub ubytku masy w miarę upływu czasu wymaga wzbogacenia modeli kompozytów o nowe prawa konstytutywne. Przy obecnym stanie wiedzy, istniejące modele mikromechaniczne są z konieczności często bardzo uproszczone w odniesieniu do rzeczywistych układów biologicznych. Tematyka ta jest bardzo przyszłościowa, a badania, prowadzone we współpracy ze środowiskiem lekarskim, będą odgrywały ważną rolę społeczną.

Rozwój metod mikromechaniki

Mikromechanika cienkich warstw

Aktualnym zagadnieniem badawczym, intensywnie rozwijanym obecnie na świecie, jest mikromechanika cienkich warstw, takich jak warstwy epitaksjalne, pokrycia ceramiczne, warstwy rozdzielające dwa różne materiały, warstwy kontaktowe. Fenomenologiczne, jednoskalowe modele takich warstw mogą nie opisywać dobrze złożonych efektów związanych z naprężeniami wewnętrznymi, mikropeknięciami, niejednorodnością, pamięcią obciążeń maksymalnych bądź wpływem niesprężystych odkształceń podpowierzchniowych. Celowe jest więc rozwijanie wieloskalowych modeli cienkich warstw uwzględniających wewnętrzną mikrostrukturę rozpatrywanej warstwy oraz występowanie różnych skal mikronierówności powierzchni, w analogii do modeli mikromechanicznych objętościowego elementu materiału. Modelowanie warstw różnego typu niewątpliwie wymaga zastosowania różnorodnych podejść z uwagi na odmienne cechy fizyczne. Tym niemniej, poszukiwanie i wykorzystanie istniejących analogii może ułatwić zbudowanie adekwatnych modeli, a tam gdzie jest to możliwe, rozwinięcie jednolitego podejścia do szerszej klasy zagadnień.

Wieloskalowe modele komputerowe

W niniejszym opracowaniu wielokrotnie wskazywano na możliwości zastosowań hierarchicznych, wieloskalowych modeli, stanowiących atrakcyjne narzędzie badawcze, w szczególności dla nowych materiałów o złożonej strukturze wewnętrznej. Praktyczne zastosowanie takich modeli wiąże się z koniecznością opracowania niestandardowych algorytmów numerycznych i implementacji komputerowych, umożliwiających wzajemne interakcje procesów obliczeniowych prowadzonych w różnych skalach. Przykładowo, powiązanie symulacji metodą dynamiki molekularnej z modelem ruchu pojedynczej dyslokacji w ośrodku ciągłym, a następnie z uśrednieniem prowadzącym do kontynualnego opisu niesprężystych odkształceń kryształu, a w dalszej kolejności polikryształu lub kompozytu, jest niewątpliwie zagadnieniem złożonym. Zsynchronizowany dobór metod obliczeniowych na poszczególnych poziomach modelowania wraz z zapewnieniem ich stabilności i wystarczającej dokładności stanowi istotny problem badawczy z zakresu rozwoju metod mechaniki komputerowej, w pewnym stopniu niezależny od konkretnego zastosowania. Można się spodziewać, iż wraz ze wzrostem pojemności i szybkości komputerów, wieloskalowe modele materiałów będą znajdowały coraz szersze zastosowanie.

Modele stochastyczne materiałów niejednorodnych

Założeniem często przyjmowanym w analizie kompozytów jest przyjęcie, iż mają one wewnętrzną strukturę periodyczną. Jednakże, mikrostruktura materiałów rzeczywistych nie jest w ogólności deterministyczna. Do opisu mikrostruktury materiału oraz jego właściwości celowe jest więc wykorzystywanie metod analizy pól losowych, poczynając od pojęć podstawowych (wariancja, funkcja korelacji, itp.), a w miarę możliwości stosując bardziej zaawansowane narzędzia. W szczególności, określenie promienia korelacji dla badanej mikrostruktury jest pomocne przy definiowaniu reprezentatywnego elementu objętościowego, do którego odnoszone są właściwości efektywne materiału. Wprowadzenie małego parametru jako stosunku długości charakterystycznych w skali mikro i makro umożliwia zastosowanie teorii homogenizacji. Zastosowanie stochastycznych modeli propagacji mikroszczelin prowadzi z kolei do stochastycznego opisu degradacji właściwości funkcjonalnych materiału. Pole potencjalnych zastosowań jest szerokie, a ważnym wyzwaniem jest określenie możliwości empirycznego wyznaczenia charakterystyk probabilistycznych badanego materiału niejednorodnego.

Termodynamika i stateczność materiałów o zmiennej mikrostrukturze

Celem badań jest sformułowanie i analiza termodynamicznych warunków zachodzenia przemian mikrostrukturalnych w ciałach stałych. Atrakcyjnym wyzwaniem jest jednolite ujęcie szerokiej klasy problemów, obejmującej rozwój odkształceń plastycznych, mikropeknięć i przemian fazowych, w spójny formalizm termodynamiki procesów nieodwracalnych. Przykładowym efektem takiego podejścia jest uzyskanie kryterium zachodzenia przemian martenzytycznych w materiałach z pamięcią kształtu. Istotnym zagadnieniem jest analiza stabilności zachodzących w materiale przemian, gdyż właśnie utrata stateczności w skali mikro jest prawdopodobnie odpowiedzialna za szereg dotychczas niewystarczająco zbadanych a obserwowanych doświadczalnie efektów spontanicznych przemian mikrostrukturalnych.

Modelowanie polikryształów metali w zakresie plastycznym

Istnieje potrzeba rozszerzenia badań z zakresu mikromechaniki polikryształów plastycznych na zaawansowane materiały, np. stale podlegające martenzytycznym przemianom fazowym przy obciążaniu mechanicznym (*TRIP steels*). Istniejące modele fenomenologiczne niewystarczająco dokładnie opisują zachowanie się typowych polikryształów metali w zakresie plastycznym przy nieproporcjonalnych drogach obciążania. Wynika to m. in. ze skomplikowanego oddziaływania pomiędzy sobą poszczególnych ziaren, trudnego do ujęcia w analitycznych związkach makroskopowych. Modele mikromechaniczne pokonują tę trudność poprzez uwzględnienie niejednorodności materiału w sposób bezpośredni, a właściwości makroskopowe określa się na podstawie umotywowanych fizycznie związków konstytutywnych opisujących plastyczne deformacje pojedynczego kryształu. Podejście takie, choć od dawna stosowane, nie zostało dostatecznie wyeksploatowane, częściowo ze względu na niewystarczającą w przeszłości moc komputerów. Obecnie otwarte są nowe możliwości mikromechanicznej symulacji zachowania się polikryształów w odniesieniu do praktycznych zagadnień przeróbki plastycznej.

Matematyczne zagadnienia homogenizacji

Opis tych zagadnień zawarty jest w odrębnym rozdziale opracowanym przez J.J. Telegę.

MATERIAŁY SPRĘŻYSTE

Józef Ignaczak, Marek Matczyński, J. Joachim Telega, Ryszard Wojnar

Teoria sprężystości jest ważną dziedziną nauki o materiałach. Ponadto jest to teoria piękna z matematycznego punktu widzenia. Dlatego słuszne jest hasło: „*Elasticity is one of the crowning achievements of Western culture*” (por. [1]), choć niepotrzebne jest tu odniesienie teorii sprężystości tylko do kultury zachodniej. Rozszerzając to hasło można powiedzieć, że teoria sprężystości jest jednym ze szczytowych osiągnięć światowej cywilizacji. Teoria ta stała się podstawą rozwoju takich dziedzin mechaniki ciała stałego jak: (a) wytrzymałość materiałów, (b) teoria konstrukcji inżynierskich, (c) teoria pękania materiałów, (d) inżynieria materiałowa, (e) mechanika górotworu, (f) mechanika ośrodków porowatych, (g) mechanika sieci krystalicznych i mechanika defektów (nanomateriały), (h) termomechanika ciał odkształcalnych, (i) biomechanika, (j) zastosowania ultradźwięków, i inne.

Teoria sprężystości jest zatem jednym z podstawowych działów mechaniki ciała stałego stosowanym w różnych dziedzinach nauki i techniki, zaś misją jej twórców jest porządkowanie wiedzy o materiałach, konstrukcjach i ich odkształceniach pod wpływem wymuszeń zewnętrznych. Lininowa teoria sprężystości stanowi podstawową dziedzinę mechaniki materiałów, a jej niezwykła użyteczność jest wciąż aktualna.

1 Rys historyczny

Elementy teorii sprężystości znajdują się w pracach uczonych XVII i XVIII wieku. Wymienić tu należy takie nazwiska jak Robert Hooke (prawo sprężystości, 1676), Leonard Euler (zjawisko wyboczenia, 1778). Swój rozkwit teoria sprężystości zawdzięcza pracom uczonych XIX w. takich jak G. Green (teoria potencjału), C.L.M.H. Navier (teoria belki), G. Lamé (teoria fal sprężystych), J.M.C. Duhamel (termosprężystość), J.C. Maxwell (teoria zjawiska elastooptycznego) oraz W. Voigt, J.S. Fiedorow, J. Curie i P. Curie (teoria kryształów).

W wieku XX zachodzi porządkowanie zdobytego materiału (por. podręcznik A.E.H. Love'a) i dalszy rozwój teorii. Pojawiają się nowe dziedziny: zmienna zespolona w teorii sprężystości (G.W. Kołosow – N.I. Muscheliszwili), teoria dyslokacji i defektów (V. Volterra, J.M. Burgers), ośrodki deterministycznie i stochastycznie niejednorodne, ośrodki poddane dużym odkształceniom (I.S. Sokolnikoff, L.R.G. Treloar), nieliniowa teoria płyt (T. v. Kármán).

2 Stan obecny

Ogólne pojęcie o stanie obecnym teorii sprężystości i termosprężystości można sobie wyrobić na podstawie znanych monografii z drugiej połowy XX wieku, takich jak [2–10], i inne.

Na stan ten składają się również wyniki ogłaszane w czasopismach takich jak: *Journal of Applied Mechanics*, *International Journal of Engineering Science*, *Archive of Mechanics*, *Journal of*

Thermal Stresses, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Journal of Elasticity, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Applied Mathematics and Mechanics, i inne.

Pionierskie prace wykonane w IPPT PAN dotyczą przede wszystkim liniowej teorii sprężystości, a także pól połączonych: termosprężystości, lepkosprężystości, magneto-sprężystości i sprężystoplastyczności.

3 Wyniki uzyskane w latach 1998–2001

Wymienimy teraz ważniejsze wyniki z teorii sprężystości i termosprężystości uzyskane ostatnio, a wychodzące poza zakres liniowych zagadnień klasycznych. Wyniki te porządkują wiedzę o materiałach, pozwalają racjonalnie wykorzystać wyniki pomiarów doświadczalnych, a także pozwalają opisać zachowanie się konstrukcji materiałowych poddanych nagłym obciążeniom cieplnym.

3.1 Teoria sprężystości

Z teorii przedstawień dla grup wynika, że tensor dowolnego skończonego rzędu, szczególnie tensor czwartego rzędu jakim jest tensor sprężystości, może być rozłożony na sumę tensorów nieprzywiedlnych. Rozwinięto prostą metodę wykonania takiego rozkładu dla tensorów dwu i trójwymiarowych, porównaj [11]. Wyniki te znajdują między innymi zastosowanie w zagadnieniach homogenizacji, szczególnie przy wyznaczaniu modułów zastępczych kompozytów.

3.2 Termosprężystość

W teorii fenomenologicznej dla wyznaczenia własności dynamicznych układu konieczna jest znajomość funkcji odpowiedzi. Jeżeli zmienność czasowa sił termodynamicznych przekracza pewną wartość krytyczną, odpowiedź prądów (np. strumienia ciepła) na działanie sił (np. gradientu temperatury) jest na ogół opóźniona w stosunku do tych sił. Przy rozważaniu takich zjawisk przechodzimy od klasycznej termodynamiki zjawisk nieodwracalnych do termodynamiki rozszerzonej.

W ramach dynamicznej sprzężonej termosprężystości podano szereg nowych wyników dla modeli L-S, G-L, H-I, G-N oraz C-T. (Skróty L-S, G-L, H-I, G-N, C-T pochodzą od nazwisk twórców modeli rozszerzonej termoelastodynamiki.)

W przypadku modelu C-T, czyli niejednorodnego anizotropowego sztywnego przewodnika ciepła z dwoma czasami relaksacji (dual-phase-lag model of rigid heat conductor) zachodzi twierdzenie o jednoznaczności oraz twierdzenie o obszarze wpływu. Twierdzenie o jednoznaczności jest słuszne, gdy: tensor przewodnictwa ciepła jest dodatnio określony, ciepło właściwe jest dodatnie oraz oba czasy relaksacji są nieujemne. Twierdzenie o obszarze wpływu wiąże się z falowym charakterem przewodzenia ciepła w przewodniku. Twierdzenie to jest słuszne, gdy tensor przewodnictwa ciepła oraz ciepło właściwe spełniają te same założenia co w twierdzeniu o jednoznaczności, zaś czas relaksacji gradientu temperatury jest mniejszy od czasu relaksacji strumienia ciepła. Otrzymany wynik implikuje, że maksymalna prędkość fali termicznej w niejednorodnym anizotropowym sztywnym przewodniku ciepła z dwoma czasami relaksacji jest nie mniejsza niż maksymalna prędkość fali termicznej w hiperbolicznym modelu przewodnika ciepła typu Cattaneo, porównaj [12].

W przypadku modelu L-S maksymalne prędkości fal termosprężystych w niejednorodnym ciele anizotropowym są dane wzorami

$$C_1 = \sup_{B, |m|=1} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_0}{\rho c_E} \right)^{1/2} |M| + \left\{ |A| + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\theta_0}{\rho c_E} \right)^{1/2} |M| \right]^2 \right\}^{1/2} \right\},$$

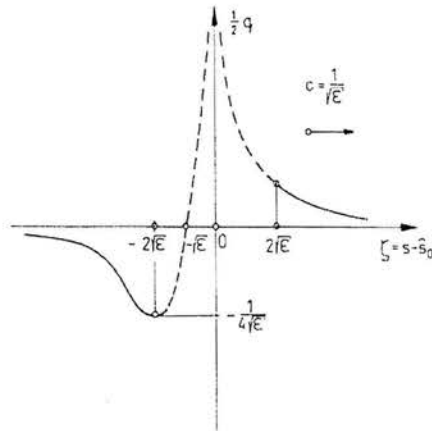
$$C_2 = \sup_B \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_0}{\rho c_E} \right)^{1/2} |M| + \left\{ \frac{|K|}{t_0 c_E} + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\theta_0}{\rho c_E} \right)^{1/2} |M| \right]^2 \right\}^{1/2} \right\}.$$

Maksymalna prędkość w ośrodku o „słabej” akustyce i „małym” przewodnictwie ciepła wynosi

$$C_0 = \sup_B \left\{ \left(\frac{\theta_0}{\rho c_E} \right)^{1/2} |M| \right\}.$$

We wzorach tych θ_0 oznacza temperaturę odniesienia, t_0 czas relaksacji, ρ gęstość ośrodka, c_E jego ciepło właściwe, K tensor przewodnictwa ciepła, A tensor akustyczny oraz M tensor naprężeniowo-temperaturowy. Ponadto m jest wektorem jednostkowym oraz B obszarem zajmowanym przez ciało, porównaj [13].

W przypadku modelu H-I, korzystając z przybliżonego układu równań nieliniowych, słusznego w zakresie niskich temperatur, zbadano dwie szybko biegnące termosprężyste fale solitonopodobne w ośrodku nieograniczonym. W każdej z tych fal w otoczeniu ruchomego frontu ujawnia się „efekt fontanny”, zaś z dala od frontu panuje stan bliski równowagi termodynamicznej, porównaj [14, 15].



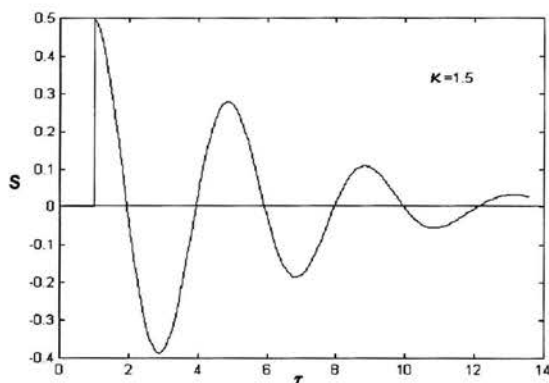
Rys. 1. Fontanna strumienia ciepła propagująca się z prędkością c , przy czym $s = x - ct$ oraz ϵ jest parametrem materiałowym

3.3 Elastodynamika kompozytów

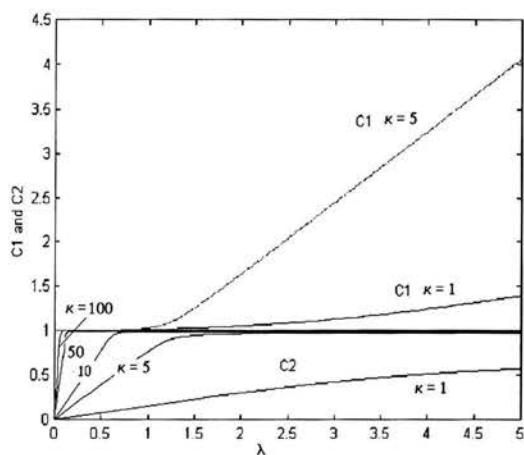
W ramach uśrednionej elastodynamiki z mikrostrukturą zbadano (i) propagację transjentalnych fal naprężenia w mikroperiodycznie uwarstwionej półprzestrzeni, oraz (ii) płaskie fale naprężenia w nieograniczonym mikroperiodycznie uwarstwowionym ośrodku sprężystym.

Rysunek 2 przedstawia transjentalną falę naprężenia w mikroperiodycznie uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej wywołaną impulsowym ciśnieniem na brzegu, dla określonego przekroju. Parametr κ jest określony przez uśrednione moduły sprężystości rozważanej półprzestrzeni. Rysunek ten pokazuje oscylujący i tłumiony charakter fali transjentalnej na osi czasu.

Rysunek 3 pokazuje zależność prędkości c_1 i c_2 płaskich harmonicznycch fal naprężenia w nieograniczonym mikroperiodycznie uwarstwowionym ośrodku sprężystym od długości fali.



Rys. 2. Naprężenie S jako funkcja bezwymiarowego czasu τ ($0 < \tau < 14$) w przekroju $\xi = 1$ dla $\kappa = 1.5$



Rys. 3. Prędkości c_1 i c_2 jako funkcje długości fali λ ($0 < \lambda < 5$) dla ustalonych wartości κ

Ilościowa analiza tych fal wskazuje na to, że fala szybsza jest prawie bezdyspersyjna w zakresie fal krótkich, zaś fala wolniejsza jest prawie bezdyspersyjna dla fal długich; poza tymi obszarami obie fale są silnie dyspersyjne, porównaj [16].

4 Kierunki rozwoju teorii sprężystości

4.1 Nieliniowa teoria sprężystości

Gdy obciążenia działające na jakieś ciało materialne lub konstrukcję stają się zbyt duże wchodzi w zakres sprężystości zjawisk nieliniowych. Pojęcia teorii sprężystości zjawisk nieliniowych są podstawą innych dziedzin mechaniki ciała stałego. Znaczenie teorii sprężystości zjawisk nieliniowych gwałtownie wzrosło z rozwojem przemysłu tworzywo sztucznych, a zwłaszcza materiałów gumopodobnych. W ramach tej teorii analizuje się układy prętowe, płytowe i powłokowe.

Nowych wyników należy się spodziewać dla nieliniowych ośrodków anizotropowych, jeszcze mało zbadanych. Opisanie materiałów anizotropowych zajmowano się od stuleci wykorzystując liniową teorię sprężystości. Wyniki ostatnich badań dotyczące struktury tensora sztywności i tensora stanu granicznego stworzyły możliwość dokładniejszego opisu anizotropowych własności materiałów; w szczególności pojęcia sprężystych stanów własnych mogą być wykorzystane w przyszłości do sformułowania energetycznych warunków wyężenia dla materiałów anizotropowych, porównaj [17, 18].

Po przekroczeniu granicy sprężystości ciało przechodzi w zakres plastyczności lub zostaje zniszczone. Lecz nawet w zakresie plastycznym teoria nieliniowej sprężystości okazuje się użyteczna: jedną z metod rozwiązywania zagadnień plastyczności jest tzw. metoda przybliżeń sprężystych.

Liniowa teoria sprężystości jest również podstawowym narzędziem w badaniu zjawisk zniszczenia względnie osłabienia materiałów i konstrukcji. Z początkiem zeszłego stulecia, na podstawie klasycznej teorii sprężystości, a w szczególności prac Inglisa (1913), Griffitha (1920), Orowana (1952) oraz Irwina (1957) rozwinęła się mechanika pękania. Obecnie mechanika pękania zajmuje się przede wszystkim zagadnieniami wzrostu i propagacji szczelin w materiałach piezoelektrycznych, ferromagnetycznych i dielektrykach biorąc również pod uwagę sprzężenie pól magnetycznych lub elektromagnetycznych z polem naprężeń mechanicznych. Również w ramach mechaniki pękania analizowane są zagadnienia wzrostu względnie zamykania się szczelin o gładkich lub chropowatych powierzchniach w jednorodnych i niejednorodnych ośrodkach sprężystych pod wpływem działania temperatury i zewnętrznych obciążeń. Innymi problemami z dziedziny mechaniki pękania są dynamiczne zagadnienia propagacji szczelin, porównaj [19–23].

Warto podkreślić, że nieliniowa sprężystość korzystnie wpłynęła na rozwój pewnych działów matematyki stosowanej, a w szczególności nowoczesnych metod wariacyjnych i numerycznych. W biomechanice tkanek miękkich, takich jak mięśnie szkieletowe, mięsień sercowy, chrząstka, oko, uwzględnienie nieliniowo-sprężystego zachowania się tych tkanek stanowi zasadniczy krok w opisie ich zachowania się pod wpływem obciążenia. Ma to znaczenie także w praktyce klinicznej, por. Rozdział „Biomechanika” niniejszego tomu.

Dysponując modelami materiałów nieliniowo sprężystych, przechodzimy do badania innych materiałów, np. materiałów porosprężystych, w których faza stała, czyli szkielet, ulega dużym odkształceniom oraz takich materiałów, w których występują zjawiska niesprężyste: lepkie i pla-

styczne. Pełny opis materiałów gumopodobnych i tkanek miękkich opiera się na nieliniowej teorii materiałów porowatych lepkosprężystych.

Istotny postęp w zastosowaniach i rozwoju nieliniowej sprężystości nastąpił po wprowadzeniu do obliczeń komputerów o dużej pamięci. Pozwoliło to wykorzystać w praktyce inżynierskiej zaproponowane w ostatnich dziesiątkach lat modele nieliniowych ciał sprężystych. Symulacje numeryczne pozwalają często unikać badań doświadczalnych, z reguły drogich, a w przypadku zjawisk biologicznych często niemożliwych do przeprowadzenia. Co roku na świecie ukazuje się wiele prac z zakresu nieliniowej sprężystości, teoretycznych i aplikacyjnych, i dziedzina ta nabiera szybko wyspecjalizowanego charakteru. Wymaga ona umiejętności korzystania z wyników badań doświadczalnych i dostępu do odpowiedniego oprogramowania, oraz dobrej znajomości zaawansowanych działów matematyki stosowanej, takich jak teoria przedstawień funkcji tensorowych i teoria niezmienników tensora sprężystości, porównaj [24, 25].

W Polsce badania nad zagadnieniami nieliniowej sprężystości mają długą tradycję, szczególnie w IPPT i w niektórych innych ośrodkach naukowych. Obecnie badane są te zjawiska nieliniowe, które wiążą się z poszukiwaniem nowych materiałów, odpornych na gwałtowne zmiany temperatury i wytrzymałych na bardzo duże obciążenia. Szczególne znaczenie mają zagadnienia dynamiczne, dotyczące propagacji i oddziaływania fal nieliniowych. W tym zakresie można wskazać jako strategiczne następujące tematy:

- oddziaływania rezonansowe nieliniowych fal sprężystych i magnetosprężystych,
- rozchodzenie się nieliniowych fal powierzchniowych,
- przejścia fazowe, fale uderzeniowe i ich stateczność,
- dynamika mięśni i tkanek biologicznych, oraz
- matematyczne modele arytmii serca,

porównaj [26, 27].

Warto dodać, że w roku 2002 w IPPT PAN przedstawili swoje wyniki, w ramach działalności Centrum Doskonałości „Zaawansowane Materiały i Konstrukcje”, światowej klasy specjaliści zajmujący się nieliniową sprężystością.

4.2 Dynamiczna teoria sprężystości i termosprężystości materiałów kompozytowych

Teoria ta pozwala określać moduły zastępcze ośrodków niejednorodnych oraz opisywać zjawiska falowe w takich ośrodkach, jak również opisywać kompozyty typu ciało sprężyste-ciecz (materiały porowate nasycone cieczą). Z ważnych zagadnień tego typu należy wymienić więc następujące zagadnienia: homogenizacja, dynamiczna termosprężystość ośrodków nieliniowych, teoria quasi-kryształów, rozchodzenie się fal w kompozytach termosprężystych i ośrodkach porowatych, ruch inkluzji w ciele termosprężystym, porównaj [28].

4.3 Tensorowy opis elastodynamiki i jego zastosowania

Naprężeniowe sformułowanie elastodynamiki niekompatybilnej jest naturalnym opisem ruchu dyslokacji w ciele sprężystym. Pożądane jest rozwijanie tej teorii i podanie jej nowych zastosowań np. przy projektowaniu materiałów o żądanych własnościach, takich jak własności wytrzymałościowe i ciepłne metali nanofazowych, własności optyczne przezroczyc ciekłokrystalicznych, własności piezoelektryczne ceramiki, itp. Tematyka ta winna przyciągnąć uwagę nie tylko matematyków i fizyków teoretycznych, lecz również specjalistów z dziedziny inżynierii materiałowej, porównaj [29].

4.4 Nieklasyczna dynamiczna termosprężystość

Zagadnienia propagacji fal solitonopodobnych w nieliniowym sztywnym przewodniku ciepła oraz w nieliniowym ciele termosprężystym w niskich temperaturach wymagają uogólnienia na problemy dotyczące nieliniowych modeli termomechanicznych dopuszczających klasyczne termiczne i termosprężyste fale solitonowe. Ponadto, dla potrzeb przemysłu lotniczego pilnego zbadania wymagają:

- wybuchowe niestateczności w przepływie ciepła;
- odkształcenia nierównowagowe wywołane w cienkich warstwach przez femtosekundowe impulsy laserowe;
- sprzężenia termomechaniczne podczas ogrzewania metalowych kompozytów przez femtosekundowe impulsy laserowe (oddziaływanie fonon-elektron, pojemność cieplna oraz przewodnictwo gazu elektronowego i sieci krystalicznej).

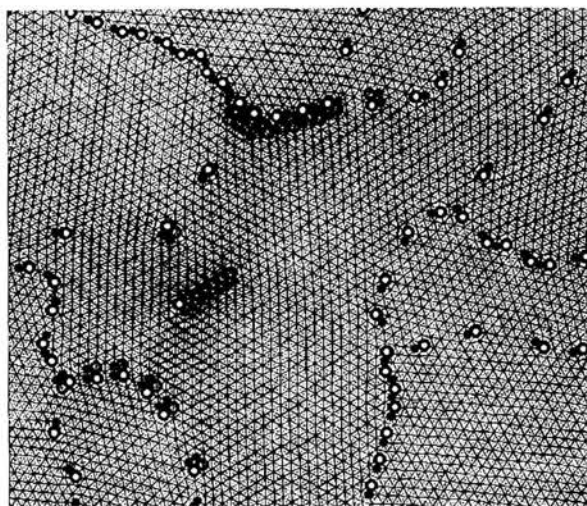
4.5 Komputerowa symulacja krystalizacji ciał sprężystych

Jak na to wskazuje zjawisko elastoptyczne obserwowane w świetle spolaryzowanym, pierwotnie jednorodny i izotropowy ośrodek sprężysty poddany małym odkształceniom staje się niejednorodnym ośrodkiem anizotropowym, por. Rys. 4.



Rys. 4. Pierwotnie izotropowa przezroczysta płytka kołowa staje się anizotropową po obciążeniu

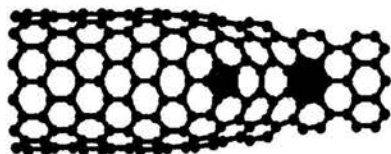
Na poziomie makro ośrodek ten może być analizowany w ramach liniowej teorii sprężystości ciała izotropowego i jednorodnego. Jednak obserwacja deformacji ciała sprężystego na poziomie mikro, w szczególności obserwacja ruchu dyslokacji w procesie krystalizacji tego ciała wskazuje na nieliniową i nielokalną zależność pomiędzy deformacją a naprężeniem. W ramach liniowej teorii sprężystości na poziomie makro ciało o symetrii heksagonalnej jest równoważne ciału o symetrii izotropowej. Natomiast na poziomie zjawisk mikroskopowych dyslokacje poruszają się wzdłuż wyróżnionych kierunków i ciało należy traktować jako nieliniowe i anizotropowe, Rys. 5. Wyniki pokazane na Rys. 5 otrzymano za pomocą symulacji komputerowej zjawiska krystalizacji ciała sprężystego metodą siatek Woronoja (w literaturze anglosaskiej „Centroidal Voronoi”). W przyszłości metoda ta winna znaleźć zastosowanie przy opisie przejść fazowych w nanokryształach typu fullerenów, porównaj punkt 4.6.



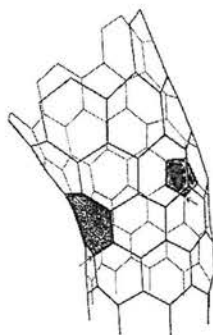
Rys. 5. Ruch dyslokacji w ziarnach podczas krystalizacji dwuwymiarowego kryształu. Sieć krystalizacyjna każdego ziarna jest sześciokątna. Atomy znajdują się w węzłach sieci. Na granicach ziaren gromadzą się dyslokacje (pary pięcio- i siedmiokątów oznaczone odpowiednio przez czarne kółka i pierścienie) [30]

4.6 Nanomateriały

Makroskopowe własności zwykłych materiałów (np. współczynniki sprężystości czy pojemność cieplna) są w zasadzie takie same zarówno dla mikrometrowej, jak i milimetrowej skali obserwacji. Ziarna materiałów polikrystalicznych mają średnice rzędu $1\ \mu\text{m}$ do $1\ \text{mm}$, dzięki czemu można mówić o makroskopowych własnościach tych ziaren. Istnieją jednak również materiały polikrystaliczne o średnim wymiarze ziaren rzędu $40\text{--}150\ \text{nm}$ nazywane submikrokryształicznymi, a także materiały nanokryształiczne ze średnim wymiarem ziaren mniejszym niż $40\ \text{nm}$. Duże zainteresowanie materiałami nanokryształicznymi wynika z ich niezwykłych własności mechanicznych,



Rys. 6. Złącze nanorurek typu zygzak



Rys. 7. Nanorurka typu łokieć

takich jak bardzo duża twardość i wytrzymałość, która jest ściśle związana ze stosunkowo małą liczbą dyslokacji w ziarnach o średnicy mniejszej niż 50 nm.

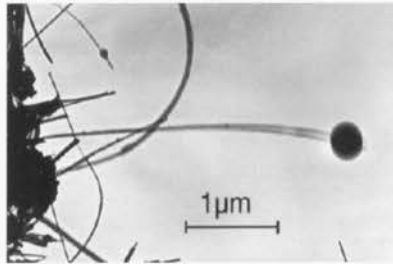
W nanomateriałach polikrystalicznych, zarówno w zakresie sprężystym jak i plastycznym, pojawia się tzw. strukturalny efekt skali. W zakresie małych odkształceń do opisu tego efektu można wykorzystać wiele istniejących już opracowań. Uwzględnienie tego efektu w zakresie dużych odkształceń wymaga zmodyfikowania istniejącej teorii termosprężystości.

Typowym przykładem tej nowej klasy materiałów są fullereny. Fulleren jest to cząsteczka węgla, w której atomy węgla są ułożone na powierzchni sferycznej: sfera składa się z 12 pięciokątów i pewnej liczby sześciokątów. Tworzą one pustą sferę, walec lub inną podobną figurę. Cząsteczka fullereny o kształcie kulistym C_{60} zawiera 12 pięciokątów i 20 sześciokątów; ma średnicę nieco większą niż 1 nm.

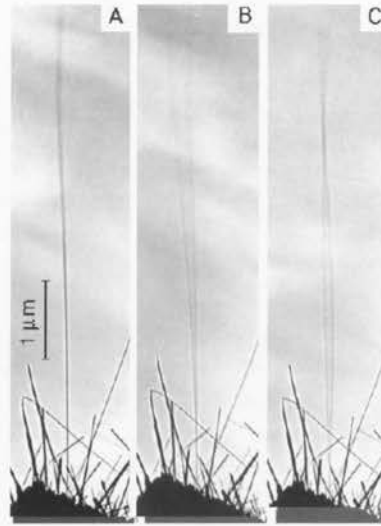
Ważną dziedziną nowej technologii jest wytwarzanie nanorurek, układów o wyjątkowych właściwościach mechanicznych i elektrycznych, por. Rys. 6 i 7. Zauważmy, że zmianę przekroju nanorurki osiąga się przez wprowadzenie do sieci sześciokątnej dyslokacji w postaci pięcio- i siedmiokątów. Podobnie dyslokacje w dwuwymiarowym kryształce heksagonalnym są parami pięcio- i siedmiokątów, por. Rys. 5.

Obecnie można ze zwykłych metali trójwymiarowych otrzymywać izolowane nanometaliczne grona (klastery, ang. cluster) atomowe o średnicy od 1 do 100 nm. Oprócz gron atomowych istnieją grona molekularne. Na przykład cząsteczki C_{60} krystalizują w temperaturze pokojowej w grona o gęsto upakowanej centrowanej powierzchniowo sześcienniej sieci krystalicznej. Grona te, czyli makroskopowe próbki fullereny C_{60} nazywane są fullerytami. Są to kryształy molekularne, których cząsteczki C_{60} posiadają w temperaturze pokojowej dodatkowe wewnętrzne obrotowe stopnie swobody. Te dodatkowe stopnie swobody zanikają w niskich temperaturach. Z fenomenologicznego, makroskopowego punktu widzenia można więc uważać fulleryty za termosprężyste ośrodki Cosseratów, i to takie, których obrotowe stopnie swobody zależą od temperatury.

Z najnowszych badań wynika, że wiele własności nanoklasterów nie przypomina ani własności atomów lub cząsteczek, z których zostały zbudowane, ani własności ciał stałych zbudowanych z tych samych cząsteczek.



Rys. 8. Nanowaga: częstość drgań rezonansowych węglowej nanorurki pozwala wyznaczyć masę przymocowanej kulki węgla. Masa kulki wynosi 22 ± 6 femtogramów



Rys. 9. Drgania rezonansowe nanorurek

Zarówno z przewidywań teoretycznych, potwierdzonych przez modelowanie komputerowe, jak i z obserwacji doświadczalnych wynika, że istnieje pewien przedział temperatur, w którym nanocząstka z ustaloną liczbą atomów ma własności zarówno ciała stałego, jak i cieczy. Obserwowany jest także termodynamiczny efekt skali tzn. zjawisko redukcji temperatury topnienia nanocząstek jako funkcji malejącego średniego wymiaru cząstki cieczy. Tak więc zarówno w przypadku makroskopowych próbek nanokrystalicznych, jak i w przypadku izolowanych nanocząstek, nanomateriały wymagają zmodyfikowania teorii termosprężystości, tak aby teoria ta pozwoliła na uwzględnienie rozmaitych przejawów nie tylko efektu skali, a nawet i efektu kształtu, porównaj [31, 32].

Mówiąc o nanomateriałach mamy do czynienia z jednej strony z zagadnieniem ich powstawania i budowy, w szczególności z zagadnieniem ruchu dyslokacji (Rys. 5), z drugiej strony pojawia się zagadnienie opisu odkształceń nanomateriałów jako modeli. Wiąże się z tym zagadnienia sprężystości materiałów biologicznych, porównaj [33, 34].

Pojawiają się także zadania praktyczne. Na Rys. 8 i 9 pokazano „nanowagę” i drgania rezonansowe nanorurek. Za pomocą takiej wagi można ważyć wirusy, porównaj [35].

4.7 Elektro-magneto-termosprężystość

W związku z wykryciem nowych materiałów piezoelektrycznych i rozwojem nowych sterowanych materiałów zachodzi potrzeba opracowania teorii konstrukcji (w tym niejednorodnych) wykonanych ze składników piezoelektrycznych. Również budowa nowych przetworników fal ultradźwiękowych wymaga rozwoju teorii kompozytów piezoelektrycznych.

5 Podsumowanie

Reasumując stan obecny i kierunki rozwoju wiedzy o materiałach sprężystych widzimy, że znajduje się ona w głównym nurcie badań podstawowych wielu dziedzin nauki, takich jak mechanika, termodynamika, elektronika, chemia i inżynieria materiałowa, badań prowadzonych w Polsce i na świecie. Jako dziedzina interdyscyplinarna nauki, trudna a zarazem skuteczna i płodna winna się cieszyć szerokim uznaniem i wsparciem czynników miarodajnych.

Bibliografia

1. Gould P.L., *Introduction to Linear Elasticity*, p. vii, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 1983.
2. Timoshenko S., Goodier J.N., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York 1951.
3. Green A.E., Zerna W., *Theoretical Elasticity*, Oxford University Press, London 1954.
4. Sokolnikoff I.S., *Mathematical Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York 1956.
5. Nowacki W., *Teoria Sprężystości*, PWN, Warszawa 1970.
6. Gurtin M.E., *The linear theory of elasticity*, [in:] *Handbuch der Physik*, Flügge S. [ed.], Band VIa/2 *Festkörpermechanik*, Truesdell C. [vol. ed.], Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1972.
7. Rychlewski J., „CEIINOSSSTTUV” *Matematyczeskaja struktura uprugich tel*, Instytut Problemów Mechaniki AN ZSRR, IPPT PAN, Moskwa 1983.
8. Nowacki W., *Thermoelasticity*, PWN – Polish Scientific Publishers, Warszawa; Pergamon Press, Oxford–New York–Toronto–Sydney–Paris–Frankfurt 1986.
9. Lurie A.I., *Nonlinear Theory of Elasticity*, North Holland, Amsterdam 1990.
10. Kleiber M., Woźniak C., *Nonlinear Mechanics of Structures*, PWN – Kluwer Acad. Publ., Warszawa–Dordrecht–Boston–London 1991.
11. Zou W.-N., Zheng Q.-S., Du D.-X., Rychlewski J., *Orthogonal decompositions of tensors of high orders*, *Math. Mech. Solids*, **6**, 249–267, 2001.
12. Ignaczak J., *Dual-phase-lag model of rigid heat conductor revisited*, *Proceedings of the Fourth Intern. Congr. on Thermal Stresses*, Osaka (Japan) June 8–11, 2001.
13. Ignaczak J., *Domain of influence results in generalized thermoelasticity – a survey*, *Appl. Mech. Rev.* **44**, 375–382, 1991.
14. Hetnarski R.B., Ignaczak J., *Soliton-like waves in a low-temperature nonlinear thermoelastic solid*, *Int. J. Eng. Sci.* **34**, 1767–1787, 1996.
15. Hetnarski R.B., Ignaczak J., *Nonclassical dynamical thermoelasticity*, *Int. J. Solids and Structures* **37**, 215–224, 2000.
16. Ignaczak J., Mrówka-Matejewska E., *Stress waves in a microperiodic layered elastic solid revisited*, *Int. J. Math. and Math. Sci.* **28**, 653–661, 2001.
17. Rychlewski J., *Unconventional approach to linear elasticity*, *Arch. Mech.* **47**, 2, 149–171, 1995.
18. Ostrowska-Maciejewska J., Rychlewski J., *Generalized proper states for anisotropic elastic materials*, *Arch. Mech.*, **53**, 4–5, 501–518, 2001.
19. Matczyński M., *Thermoelastic problem of two collinear cracks*, *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, **27**, 175–191, 1997.
20. Matczyński M., Martyniak R., Krysztafowicz A., *Contact problem of a crack filled with heat conducting gas*, *Proceedings of the Third Intern. Congr. on Thermal Stresses*, June 13–17, 1999, Cracow, Poland, 127–134.
21. Kostrov B.V., *Self-similar problems of propagation of shear cracks*, *J. Appl. Math. Mech. (PMM)*, **28**, 1077–1087, 1964.

22. Rosakis A.J., Samudrala O., Coker D., *Cracks faster than the shear wave speed*, Science 284, 1337–1340, 1999.
23. Abraham F.F., Guo H., *How fast can cracks propagate*, Phys. Rev. Lett. **84**, 3113–3116, 2000.
24. Boehler J.P., *On irreducible representations for isotropic functions*, ZAMM **57**, 323–327, 1977.
25. Zhang Q.S., Rychlewski J.M., *Structural tensors for anisotropic solids*, Arch. Mech. **42**, 267–277, 1990.
26. Domański W., *Weakly nonlinear elastic plane waves in a cubic crystal*, [in:] Contemporary Mathematics, vol. 255, pp. 45–61, J. Bona, K. Saxton, R. Saxton [eds.], American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 2000.
27. Domański W., Jabłoński T.F., *On resonances of nonlinear elastic waves in a cubic crystal*, Arch. Mech. **53**, 91–104, 2001.
28. Wojnar R., *Dynamical growth of a spherical inclusion in thermoelastic medium*, Material Physics and Mechanics **3**, 52–58, 2001.
29. Ignaczak J., Rao C.R.A., *Stress characterization of elastodynamics with continuously distributed defects*, J. Elasticity **30**, 219–250, 1993.
30. Lissowski A., Wojnar R., *Computer simulation of Bragg-Nye model of crystalization*, [in:] Structured Media, B.T. Maruszewski [ed.], pp. 159–168, Poznań University of Technology 2002.
31. Trzęsowski A., *Nanomaterial clusters as macroscopically small size-effect bodies, Part I*, Arch. Mech. **52**, 159–178, 2000.
32. Trzęsowski A., *Nanomaterial clusters as macroscopically small size-effect bodies, Part II*, Arch. Mech. **52**, 179–197, 2000.
33. Zorski H., Infeld E., *Continuum dynamics of a peptide chain*, Int. J. Nonlinear Mech. **32**, 769–801, 1997.
34. Lipniacki T., *Torsional travelling waves in DNA*, J. Nonl. Math. Phys. **8** Suppl. 188–194, 2001.
35. Poncharal P., Wang Z.L., Urgate D., de Heer W.A., *Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes*, Science **283**, 1513, 1998.

ROLA NOWOCZESNYCH METOD MATEMATYCZNYCH — WARIACYJNYCH I ASYMPTOTYCZNYCH — W MODELOWANIU MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH I KONSTRUKCJI

J. Joachim Telega i Barbara Gambin

1 Materiały kompozytowe

Kompozyty, czyli materiały złożone występują zarówno w przyrodzie jak i są wytwarzane przez człowieka. Większość metali ma strukturę kompozytową. Gdy przełamiemy pręt metalowy struktura polikrystaliczna uwidacznia się poprzez nierówności powierzchni złomu. Martenzyt — typowy materiał z pamięcią kształtu — posiada strukturę warstwową, w której naprzemiennie pojawiają się dwa różne warianty martenzytu. Pewne skały, takie jak piaskowce, posiadają strukturę ziarnistą. Inne skały, takie jak granit, są agregatami kryształów. W skałach porowatych pory są wypełnione wodą lub ropą naftową. Badania materiałów porowatych i złożonych w kontekście geologicznym są ważne dla przemysłu naftowego jak też pomagają przy analizie wstrząsów sejsmicznych. Materiały konstrukcyjne takie jak drewno czy beton mają również strukturę złożoną. Kość jest materiałem porowatym o strukturze hierarchicznej. Kompozyty włókniste o osnowie szklanej i lekkie włókniste kompozyty węglowe znalazły zastosowanie zarówno w przemyśle lotniczym, jak i w masowej produkcji sprzętu sportowego.

Zawiesiny koloidalne, emulsje, pianki, muły i gliny są również przykładami kompozytów. Chmury, mgła, grad i deszcz złożone są z powietrza i wody. Wysoko wzniesione chmury są mieszaniną powietrza i kryształów lodu. Zawiesiny pyłów wulkanicznych w wyższej części atmosfery odpowiadają za zmiany temperatury przy powierzchni Ziemi. Samo powietrze jest niejednorodnym ośrodkiem z fluktuującą gęstością, wskutek tego obserwujemy np. migotanie gwiazd. Lody oceaniczne są kompozytem lodu i kieszeni wypełnionych wodą morską, a modelowanie ich własności jest niesłychanie ważne w przewidywaniu zmian klimatycznych. Wełna i bawełna są mieszaninami włókien i powietrza. Kompozytami są ceramiki. Stałe paliwo raketowe jest mieszaniną cząstek aluminium w utleniającej się osnowie. Nawet lody czekoladowe są kompozytem. Reasumując, kompozyty są materiałami, w których niejednorodności mają skalę długości dużo większą, niż skala atomowa, co umożliwia zastosowanie opisu fizyki klasycznej w skali opisującej niejednorodności, ale w skałach o długości makroskopowej, lub innej pośredniej, są w samej rzeczy statystycznie jednorodne.

Przyczyn, dla których prowadzone są badania nad opisem zachowania się materiałów złożonych jest wiele. Oczywiście ich wartość aplikacyjna jest niewątpliwa i będzie omówiona poniżej. Ale wartość poznawcza dla szeroko rozumianej nauki jest równie istotna. Dzięki zrozumieniu i precyzyjnemu opisaniu własności w skali makroskopowej rozpoznajemy lepiej np. takie zjawiska jak turbulencja, czy strukturalne przemiany fazowe w ciałach stałych. Przy modelowaniu zjawisk w materiałach złożonych pojawiło się szereg istotnych problemów matematycznych, na które odpowiedź posuwa jakościowo rozwój najnowocześniejszej techniki.

Badania materiałów złożonych poprzez wprowadzenie odpowiednich modeli mają długą historię. Wielu sławnych uczonych zajmowało się tym problemem. Poczynając od Poissona, który modelował indukcję magnetyczną jako pole pojawiające się w mieszaninie przewodzących kul włożonych w nieprzewodzący materiał, poprzez Faradaya, który zaproponował model materiału dielektrycznego jako osnowy izolatora z wtrąceniami metalicznych globulek. Następnie Maxwell rozwiązał zagadnienie efektywnej przewodności rzadkiego rozkładu kul przewodzących w przewodzącej matrycy (osnowie), a Rayleigh rozwiązał układ liniowych równań opisujących siatkę kwadratową cylindrów i kubiczną kul w celu wyznaczenia efektywnej przewodności materiału złożonego. Eistein wyznaczył efektywne lepkie ścinanie zawiesziny sztywnych kul w cieczy.

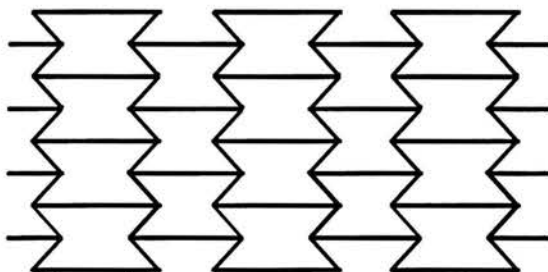
2 Istotne własności kompozytów

Szerokie zastosowania tego typu materiałów wynikają z połączenia własności poszczególnych składników kompozytu. Załóżmy na przykład, że mamy dane dwa izotropowe przewodzące materiały: metal z wysoką przewodnością i polimer, który jest elektrycznym izolatorem. Jeśli połączymy te materiały w laminat kładąc na przemian warstwy z obu tych materiałów otrzymujemy anizotropową strukturę, która ma przewodzące własności metalu w kierunku równoległym do warstw i własności izolujące w kierunku prostym do warstw.

Beton jest tani i relatywnie lekki, ale nie jest wytrzymały na rozciąganie. W przeciwieństwie do tego stal jest ciągliwa, ale droga i ciężka. Poprzez połączenie betonu z prętami wstępnie sprężonymi otrzymujemy materiał, który jest wytrzymały w kierunku włókien metalu, względnie tani, lekki i odpowiednio wytrzymały.

Drewno jest przykładem materiału, który jest wytrzymały w kierunku włókien, ale same włókna łamią się stosunkowo łatwo. Poprzez laminację krzyżową otrzymujemy materiał pracujący lepiej już w dwóch kierunkach.

Poprzez połączenie dwóch izotropowych materiałów sprężystych, które mają niski moduł ścisłości objętościowej i moduł ścinania ze sztywnym materiałem o wysokim module ścisłości i ścinaniu (poprzez odpowiednio dobraną mikrostrukturę) otrzymujemy materiał izotropowy, który ma moduł ścisłości objętościowej składnika podatnego i moduł ścinania składnika sztywnego. Takie materiały mają ujemny współczynnik Poissona. Przez lata trwała dyskusja, czy takie ma-



Rys. 1. Przykład struktury materiału z ujemnym współczynnikiem Poissona

teriału istnieją. Dzisiaj odpowiedź na to pytanie jest znana. Między innymi struktura materiału uogólnionego plastra miodu (tj. cienka konstrukcja wypełniona powietrzem), przedstawiona na Rys. 1, ma ujemny współczynnik Poissona przy rozciąganiu podłużnym.

Czasami własności kompozytu są diametralnie różne od własności składowych w mieszaninie. Poglądowym przykładem jest proste doświadczenie. Weźmy pustą szklankę i uderzmy ją niezbyt mocno metalowym nożem. Wydaje ona czysty dźwięk. Ten sam efekt uzyskamy, gdy naczynie wypełnione jest czystą wodą. Ale dodajmy do wody musującą tabletkę i dźwięk jest zupełnie inny. Własności akustyczne gazowanego płynu są zupełnie inne niż czystej wody i powietrza. Jednym z zastosowań płynów z bąbelkami powietrza jest maskowanie hałasu w łodziach podwodnych wydobywającego się z pracy silnika lub turbiny. Fakt ten objaśnia się w ten sposób, że oscylujące ciśnienie fali dźwiękowej ścisła i rozprzega pęcherzyki powietrza, co powoduje dyssypację energii fali dźwiękowej. W tym przypadku lepkość cieczy na ścinanie „przemienia” się w objętościowy moduł ściśliwości pęcherzykowego płynu. Inny przykład to przepiękne czerwone okna w witrażach starych kościołów. Ten kolor pojawia się, gdy szkło zostanie wymieszane z drobinami złota. Efekt wizualny wynika z efektywnego modułu zespolonej stałej dielektrycznej zawieszin złota na częstościach optycznych.

Poprzez połączenie dwóch materiałów z dodatnim współczynnikiem rozszerzalności termicznej można otrzymać kompozyt z ujemnym makroskopowym współczynnikiem rozszerzalności termicznej. Można również pokazać, że porowaty kompozyt ze znacząco większą rozszerzalnością termiczną może być otrzymany z mieszaniny dwóch zacznie „słabszych” składników. Decydującą rolę gra tu geometria połączeń.

Kompozyty piezoelektryczne będące mieszaniną składników: materiału piezoelektrycznego i czysto sprężystego, skonfigurowane w odpowiedni sposób, zachowują się makroskopowo korzystniej niż składniki, np. dając silniejszą odpowiedź elektryczną na hydrostatyczne ciśnienie. Czasami bada się materiały złożone, w których makroskopowe zachowanie jest rezultatem mikrostruktury hierarchicznej. Materiały biologiczne takie jak na przykład tkanka kostna i tkanki miękkie, posiadają skomplikowaną mikrostrukturę hierarchiczną.

Istotną klasę stanowi badanie makroskopowych własności kompozytów w zakresie niesprężystym jak i w zakresie dużych odkształceń. Jako przykład można podać konstruowanie kompozytów z dwu materiałów, z których jeden jest kruchy (np. materiał ceramiczny), a drugi ciągliwy, o „dobrych” własnościach plastycznych. Zbudowany z takich materiałów kompozyt będzie posiadał pożądane własności mechaniczne, niemożliwe do osiągnięcia w przypadku materiału jednorodnego.

Trudno jest dokładnie przewidzieć rozwój nauki, ale „projektowanie kompozytów”, gdzie mikrostruktura jest budowana w celu osiągnięcia pożądanych własności będzie z pewnością jedną z najszybciej i najowocniej rozwijających się dziedzin modelowania w ramach tzw. teorii ośrodków ciągłych.

3 Do czego służą metody homogenizacji oraz metody wariacyjne i asymptotyczne?

Metody wariacyjne są w mechanice znane od czasów braci Bernoullich. Zwięźle można powiedzieć, że są to metody pozwalające opisać jakies zjawisko fizyczne przy pomocy maksimum lub

minimum odpowiedniego funkcjonatu, a ogólniej przez poszukiwanie tzw. punktów stacjonarnych, czyli krytycznych. Te ostatnie są odpowiednikiem znikania pochodnej funkcji. Do metod wariacyjnych należy również bardzo popularna zasada prac przygotowanych, która w przypadku jednostronnych zagadnień kontaktowych z tarciami lub bez przyjmuje postać tzw. nierówności wariacyjnych. Użyteczność metod wariacyjnych jest ogromna, zarówno teoretycznie jak i w numerycznym rozwiązywaniu trudnych problemów mechaniki, w tym mechaniki ośrodków złożonych.

Z metodami asymptotycznymi mamy do czynienia tam, gdzie występuje mały parametr. W zagadnieniach mechaniki ma on zwykle precyzyjny sens fizyczny. Dla przykładu stosunek wymiaru porów do wymiaru badanego ośrodka jest mały. Podobnie w przypadku płyt i powłok cienkich stosunek grubości do wymiaru charakterystycznego jest również mały. W przypadku ośrodków złożonych, o których była już mowa, taki mały parametr charakteryzuje niejednorodności. Do nowoczesnych metod wariacyjnych należą również metody tzw. homogenizacji.

Podwaliny pod teorię homogenizacji zostały założone w połowie lat 70. ubiegłego wieku przez francuską i włoską szkołę matematyki stosowanej. Homogenizacja podaje metody na to jak ze wspomnianym wyżej małym parametrem przejść do zera. W przypadku ośrodków złożonych oznacza to „rozmywanie” niejednorodności, czyli budowanie tzw. modeli makroskopowych. Homogenizacja podaje również sposoby na to, jak w modelach makroskopowych uwzględnić ten mały parametr (efekt skali). Warto również zaznaczyć, że w literaturze istnieje wiele prac inżynierskich, ostatnio szczególnie numerycznych, w których używane (a właściwie nadużywane) jest słowo „homogenizacja”. Są to najczęściej prace nie mające wiele wspólnego z precyzyjnym pojęciem, jakim jest homogenizacja. Szczególnie zamieszanie panuje w przypadku homogenizacji stochastycznej, która przez środowisko inżynierów nie została jeszcze przyswojona.

W przypadku ośrodków złożonych, te trzy krótko przedstawione metody matematyczne są często ze sobą powiązane. W niniejszym opracowaniu mówimy głównie o tych metodach, które są ściśle i wymagają znajomości pewnych działów nowoczesnej matematyki stosowanej. Równocześnie metody te stanowią podstawę do analizy problemów inżynierskich dotyczących materiałów o złożonej strukturze i konstrukcji, sterowania optymalnego i rozwoju metod obliczeniowych.

Odrębną klasę zagadnień stanowią zagadnienia sterowania optymalnego ośrodkami, konstrukcjami (belki, płyty, powłoki), płynami i układami płyn–konstrukcja. Do bujnego rozwoju tej dziedziny, łączącej w sobie wyrafinowane metody matematyczne z potrzebami praktycznymi, przyczyniły się nowoczesne metody wariacyjne (i *vice versa*).

Klasa zagadnień sterowania optymalnego jest bardzo szeroka, jej podstawy matematyczne są dobrze ugruntowane. Intuicyjnie odpowiednie zagadnienia można sobie wyobrazić jako związane z minimalizacją pewnego tzw. funkcjonatu kosztów przy określonych warunkach. Jako przykład można podać minimalizację hałasu urządzeń technicznych, niepożądanych drgań oraz doprowadzenie badanego układu z danego stanu początkowego do pożądanego stanu końcowego. Innym konkretnym przykładem jest minimalizacja turbulencji przepływów burzliwych, tam gdzie jest niepożądana, lub jej maksymalizacja w przypadku procesów spalania. Już te przykłady dobitnie pokazują, że zagadnienia sterowania optymalnego mają duże znaczenie praktyczne.

4 Krótka charakterystyka badań światowych w zakresie zastosowania metod homogenizacji oraz metod wariacyjnych i asymptotycznych do mechaniki ciała stałego, a w szczególności do ośrodków złożonych i konstrukcji

Metody wariacyjne weszły bardzo głęboko w różne dziedziny mechaniki, począwszy od mechaniki analitycznej po mechanikę ośrodków złożonych i konstrukcji, a także do zagadnień sterowania optymalnego konstrukcji. Przyczynił się do tego m.in. rozwój tzw. metody bezpośredniej rachunku wariacyjnego. Metoda ta pozwala badać istnienie rozwiązań szerokiej klasy zagadnień nieliniowych dla ośrodków i konstrukcji, oraz zadań sterowania optymalnego. W przypadku mikromechaniki daje elegancko podejście do analizy mikrostruktur, mikromagnetyków, etc.

Metody wariacyjne przyczyniły się do ogromnego rozwoju mechaniki kontaktu, zarówno w przypadku małych jak i dużych odkształceń. Do metod tych należą tzw. nierówności wariacyjne i quasi-wariacyjne oraz nierówności hemiwariacyjne. Metody te dają podstawy do numerycznego rozwiązywania istotnych problemów inżynierskich związanych np. z konstrukcjami i formowaniem metali. Wspomniane metody pozwalają rozwiązywać konkretne zagadnienia kontaktowe, w których mamy do czynienia z kontaktem jednostronnym, tarcie i adhezją. Dotyczy to również zagadnień kontaktowych w stawach ludzkich przed i po implantacji, czyli po wstawieniu tzw. endoprotezy (sztuczny stawu, najczęściej biodrowego lub kolanowego).

Odłąbną klasę zagadnień stanowi tzw. zagadnienie odwrotne rachunku wariacyjnego, czyli poszukiwanie wariacyjnego sformułowania dla konkretnych zagadnień. W tym zakresie nastąpił znaczny postęp, nawet w przypadkach, które zazwyczaj uważa się za „niewariacyjne”. Wystarczy tutaj wspomnieć o konstrukcjach poddanych tzw. obciążeniom niepotencjalnym (niekonserwatywnym). Okazuje się, że zagadnienia, które uważane były za „niewariacyjne” można badać metodami wariacyjnymi, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia rozwoju odpowiednich metod obliczeniowych. W tym punkcie metody wariacyjne wiele zawdzięczają tzw. analizie wypukłej i niewypukłej, które stanowią nowoczesne działy analizy matematycznej.

Interesujące nas metody asymptotyczne dla ośrodków złożonych i konstrukcji można podzielić na dwie klasy. Klasa pierwsza związana jest ze ścisłym wyprowadzeniem równań opisujących pręty, belki, płyty i powłoki. Daje również możliwości analizy tzw. warstwy brzegowej, a więc precyzyjniejszego wyznaczania rozwiązań w otoczeniu brzegu, co ma istotny wpływ na zrozumienie odpowiedzi konstrukcji. Pozwala również badać osobliwości, np. w otoczeniu naroży.

Metoda tzw. wieloskalowych rozwinięć asymptotycznych stanowi podstawowe narzędzie homogenizacji pozwalając wyznaczać własności efektywne ośrodków złożonych. Właśnie ta metoda była i jest najczęściej stosowana w pracach z zakresu inżynierskich zastosowań homogenizacji. Istnieją również metody matematycznie bardziej wyrafinowane jak metody G-zbieżności, H-zbieżności i Γ -zbieżności oraz metoda dwuskalowej zbieżności. Dlaczego zbieżności? Odpowiedź jest prosta: poszukiwanie własności efektywnych ośrodków złożonych wiąże się z przejściem ze wspomnianym małym parametrem do zera. Piśmiennictwo w zakresie zastosowań wspomnianych metod homogenizacji do analizy ośrodków złożonych jest już bardzo bogate. Rozwój tych różnych metod homogenizacji wiąże się ściśle z rozwojem nowoczesnego rachunku wariacyjnego. Warto podkreślić, że to właśnie metody homogenizacji pozwalają zrozumieć, czym naprawdę zajmuje się mikromechanika. Tylko na gruncie homogenizacji można nadać precyzyjny

sens pojęciu własności efektywnych ośrodka złożonego. Niestety, świadomość tego faktu jest wśród inżynierów słaba (to samo dotyczy i Polski).

Metody homogenizacji, rozwijane głównie przez matematyków, weszły już bardzo głęboko do różnych działów mechaniki ciała stałego, cieczy, ośrodków porowatych i biomechaniki. Metody te można stosować wszędzie tam, gdzie materiał posiada mikrostrukturę i interesuje nas tzw. makroskopowa odpowiedź materiału na obciążenia mechaniczne (siły) bądź niemechaniczne, np. termiczne. Mikrostruktura w ośrodkach porowatych i materiałach biologicznych (tkanka kostna, tkanki miękkie) zadana jest w sposób naturalny. W materiałach tworzonych przez człowieka może ona być regulowana, czym zajmują się inżynieria materiałowa.

Zagadnienia optymalnego projektowania ośrodków i konstrukcji stanowią niezwykle interesujący obiekt badań. W tym przypadku istotna jest odpowiedź na trudne często pytanie, czy postawione zadanie posiada rozwiązanie. Jeszcze w latach 70. analizy czysto inżynierskie prowadziły do paradoksów, np. że sprężysta płyta cienka o minimalnej podatności zawiera nieskończenie cienkie pasma. Dopiero umiejętne zastosowania nowoczesnych metod wariacyjnych (tzw. relaksacja odpowiedniego funkcjonału) w powiązaniu z homogenizacją pozwoliły zrozumieć, że układy optymalne są często realizowane przez skomplikowane mikrostruktury. W świecie przyrody żywej dobrym tego przykładem jest tkanka kostna, której architektura jest bardzo złożona i oczywiście dostosowana do obciążeń fizjologicznych.

Szczególnym przypadkiem zagadnień projektowania optymalnego są zadania optymalizacji kształtu. Dobre podsumowanie dotychczas uzyskanych w tym zakresie wyników przedstawia monografia [1]. Przystudiowanie tej monografii pokazuje, jak wiele istotnych problemów z zakresu projektowania optymalnego pozostaje otwartych.

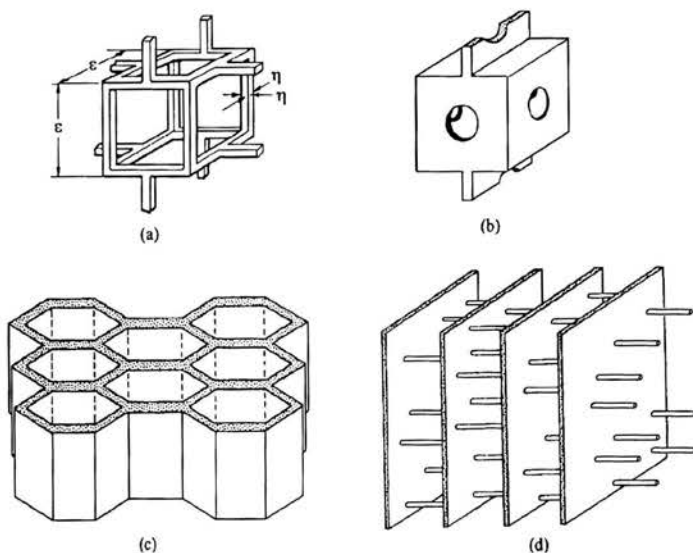
Odrębną dziedziną badań, wykorzystujących metody wariacyjne jest tzw. identyfikacja. O co tutaj chodzi? Często własności materiału są nieznane, ale możemy badać jego odpowiedź. Identyfikacja polega na wyznaczaniu własności materiału na podstawie jego odpowiedzi. Takie badania pozwalają np. wykryć pęknięcia istniejące w materiale.

5 Stan badań w Polsce

Głównymi ośrodkami w Polsce zajmującymi się interesującymi nas dziedzinami są Politechnika Warszawska (Wydział Inżynierii Lądowej) i IPPT PAN. Mówiąc o homogenizacji, nie będziemy mówić o tych grupach, które to, niby wzorując się na metodzie wieloskalowych rozwinięć asymptotycznych, wprowadzają wieloznaczne metody, nie mające nic wspólnego z precyzyjnymi metodami homogenizacji (Politechnika Łódzka, Politechnika Częstochowska).

Jeśli chodzi o nowoczesne metody wariacyjne, rozwijane głównie w IPPT PAN, to dotyczą one: 1) nierówności wariacyjnych i quasi-wariacyjnych oraz metod analizy wypukłej i niewypukłej do zagadnień kontaktowych bez tarcia i z tarciami w przypadku obciążeń statycznych, quasi-statycznych i dynamicznych, 2) poszukiwania sformułowań wariacyjnych dla zagadnień niepotencjalnych i zależnych od czasu, np. dynamicznych, 3) sterowania optymalnego.

Metoda bezpośrednia rachunku wariacyjnego była stosowana do rozwiązywania zagadnień istnienia dla płyt i powłok nieliniowych. Jeśli chodzi o metody asymptotyczne to we wspomnianych dwu ośrodkach warszawskich stosowano je do: 1) budowania modeli płyt i powłok bez mikrostruktury i z mikrostrukturą, 2) budowania modeli makroskopowych (por. Rys. 2) różnych ośrodków



Rys. 2. Przykłady struktur materiałów komórkowych

(porowatych z odkształcalnym szkieletem, termosprężystych w tym z dyfuzją, magnetosprężystych, termomagnetosprężystych i termopiezoelektrycznych, ośrodków i płyt spękanych, propagacji fal w sprężystym materiale gradowanym).

Ośrodek gdański stosuje metody wariacyjne do analizy powłok nieliniowych.

Stosowano również inne metody homogenizacji, w szczególności metodę dwuskalowej zbieżności, H- i Γ -zbieżności do: ośrodków plastycznych z mikrostrukturą, ośrodków porowatych, materiałów spękanych, dynamicznego zagadnienia sprężystości płyt i powłok z mikrostrukturą, nieliniowej elektromagnetosprężystości.

W ramach współpracy grupy z IPPT PAN z Politechniką Warszawską badano zagadnienia optymalnego projektowania konstrukcji, głównie na minimum podatności. Podsumowaniem wieloletniej współpracy IPPT PAN z Politechniką Warszawską stanowi obszerna monografia (ok. 750 stron), wydana w roku 2000 przez wydawnictwo World Scientific.

Znajomość nowoczesnych metod projektowania optymalnego pozwoliła jednemu z pracowników z IPPT PAN zaproponować nowy model przebudowy tkanki kostnej jako zagadnienia optymalnego projektowania kształtu z ewoluującą w czasie mikrostrukturą. W modelu tym można uwzględnić czynniki biologiczne. Inne podejście do tego samego zagadnienia, rozwijane w IPPT PAN, polega na stosowaniu metod sterowania optymalnego w powiązaniu z symulacją komputerową.

Ośrodek wrocławski rozwija bardziej praktyczne aspekty zastosowań homogenizacji do ośrodków porowatych.

Matematyczne zagadnienia identyfikacji są rozwijane głównie w Instytucie Informatyki UJ. Badaniom tym brak jednakże głębszego osadzenia w mechanice ciała stałego.

6 Perspektywy rozwoju w Polsce, a w szczególności w IPPT PAN

Mechanika ośrodków złożonych stanowi obecnie jeden z najszybciej rozwijających się działów mechaniki, zarówno ciała stałego jak i cieczy (zawiesiny, ciekłe kryształy). Znacznemu ograniczeniu uległy w Polsce badania związane z mechaniką konstrukcji, co należy przypisać rozwiązaniu około 10 lat temu Zakładu Teorii Konstrukcji w IPPT PAN. Zakład ten był nastawiony na analizę konstrukcji plastycznych. Obecnie najsilniejszą grupę stanowi zespół gdański z Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, którego badania są ograniczone do konstrukcji sprężystych. Duży wysiłek badawczy skierowany został na metody numeryczne, szczególnie w przypadku sprężystych powłok nieliniowych. Odczuwalny jest brak badań w zakresie analizy asymptotycznej powłok.

Sterowanie optymalne konstrukcji, kolejna potrzebna i nowoczesna dziedzina badań, w której metody wariacyjne odgrywają istotną rolę, zaczyna się w Polsce rozwijać, ale ograniczona jest do zagadnień praktycznych i brak jej szerszego oddechu, który cechuje odpowiednie badania prowadzone np. we Francji i St. Zjedn. Ameryki.

Niedostateczny jest rozwój metod identyfikacji. Na świecie metody te wiążą się z rozwojem sterowania optymalnego i tzw. materiałami inteligentnymi, por. [2] Tego typu badań w Polsce brak.

Przyswajanie nowoczesnych metod wariacyjnych przez środowisko polskich mechaników jest słabe i zasadniczo ograniczone do jednej grupy w IPPT PAN. Ta sama grupa rozwija zastosowanie metod homogenizacji do ośrodków złożonych, w tym do materiałów biologicznych, takich jak tkanka kostna. NATO przyznało kierownikowi tej grupy fundusze na zorganizowanie w roku 2003 konferencji NATO Advanced Research Workshop nt. „*Nonlinear Homogenization and Its Applications to Composites, Polycrystals and Smart Materials*”. Warsztaty te powinny dać istotny impuls do dalszego rozwoju homogenizacji i jej zastosowań do badania nowoczesnych materiałów w Polsce.

Na przeszkodzie szybszemu rozwojowi metod wariacyjnych, asymptotycznych i homogenizacji w zastosowaniu do modelowania ośrodków złożonych i konstrukcji stoi zarówno brak młodej kadry jak i brak zrozumienia dla nowoczesnej matematyki stosowanej (zaawansowanego rachunku wariacyjnego, stosowanej analizy funkcjonalnej, analizy wypukłej i niewypukłej, miar parametrycznych). Te dyscypliny badawcze powinny znaleźć właściwe sobie miejsce właśnie w IPPT. Niewątpliwie służyłoby temu otwarcie w tym Instytucie nowej specjalności dla doktorantów — matematyka stosowana. Świat nowoczesnych, skomplikowanych technologii i materiałów złożonych coraz bardziej wykorzystuje wspomniane zaawansowane metody matematyczne. Powinien to być jeden z istotnych kierunków działalności naukowo-dydaktycznej IPPT PAN. Bez takiego perspektywicznego myślenia również metody numeryczne nie będą dorównywać najlepszym standardom światowym.

Bibliografia

1. Allaire G., *Shape Optimization by the Homogenization Method*, Springer, New York 2002.
2. Banks H.T., Smith R.C., Wang Y., *Smart Material Structures – Modeling, Estimation and Control*, Wiley, Chichester 1996.

ROLA BIOMECHANIKI W BIOLOGII I JEJ ZNACZENIE DLA MEDYCYNY I SPOŁECZEŃSTWA

J. Joachim Telega

1 Czym jest biomechanika i nieco historii

Zwięźle można powiedzieć, że biomechanika to zastosowanie szeroko pojmowanej mechaniki do biologii, począwszy od komórki a skończywszy na globalnie pojmowanym układzie, jakim jest zwierzę lub człowiek. Świat biologiczny stanowi część otaczającego nas świata fizycznego, nie więc dziwnego, że stał się przedmiotem badań mechaniki.

Biomechanika stara się zrozumieć mechanikę żywych układów, a następnie spożytkować tę wiedzę dla dobra człowieka, o czym bardziej szczegółowo opowiemy w dalszym ciągu opracowania. Stanowi ona nowoczesny przedmiot badań, a jej korzenie sięgają starożytności. Obszar badań biomechaniki jest bardzo obszerny. Jedną z motywacji badań w zakresie biomechaniki jest świadomość, że biologii nie można dogłębnie zrozumieć bez mechaniki, podobnie jak powiedzmy lotu samolotu bez aerodynamiki. Dlatego też obecnie często używa się słowa „mechanobiologia” (ang. „mechanobiology”).

W przypadku organizmu biomechanika pomaga zrozumieć jego normalne funkcjonowanie, przewidzieć zmiany związane z oddziaływaniem czynników mechanicznych i wielu niemechanicznych jak i proponuje metody sztucznej interwencji. W ten sposób diagnostyka, chirurgia i endoprotezoplastyka (endoprotezy czasowe, np. stabilizatory, lub endoprotezy trwałe) są blisko związane z biomechaniką. Świadczą o tym liczne czasopisma z zakresu biomechaniki jak i czasopisma biomedyczne.

Pierwsze pojęcia mające związek z biomechaniką pochodzą prawdopodobnie od Arystotelesa (384–322 przed Chr.) i z chińskiej księgi *Nei Jing*, napisanej przez anonimowych autorów w latach 472–221 przed Chr. Jednakże rozwój biomechaniki w nowoczesnym rozumieniu tego słowa był ściśle związany z zakładaniem podwalin pod mechanikę. Zaczął się od Galileusza (1564–1642) i W. Harveya (1578–1658). Złożoność struktury zachowania się tkanek stwarza zapotrzebowanie na uwzględniające te fakty wyrafinowane modele teoretyczne. Często trudno osiągalne dane doświadczalne powodują, że istnieje wielkie zapotrzebowanie na nowe techniki eksperymentalne. Geometryczna złożoność komórek, tkanek i organów wymaga efektywnych i wydajnych metod obliczeniowych. Z punktu widzenia biomechaniki klinicznej, istnieje potrzeba ulepszenia metod diagnostycznych i technik leczenia. Wiele w tym zakresie uczyniono, ale powstały nowe wyzwania i stąd potrzeba dalszego rozwoju szeroko pojmowanej biomechaniki. Harvey jest uważany za odkrywcę układu krążenia krwi, do czego doszedł na drodze teoretycznego, logicznego rozumowania.

Za „ojca bioinżynierii” uważa się H. von Helmholtza (1821–1894), który był uczonym niezwykle wszechstronnym, bowiem zajmował się nie tylko tym, z czego jest powszechnie znany (optyka, akustyka, termodynamika, elektrodynamika), ale i fizjologią oraz medycyną. Warto dodać, że był on nie tylko utalentowanym fizykiem, ale i profesorem anatomii, fizjologii i patologii.

Wspomnijmy jeszcze o innych nazwiskach, znanych również inżynierom. I tak, fizjolog A. Fick (1829–1901) jest autorem znanego prawa opisującego transport masy. Hydrodynamicy D.J. Korteweg (1848–1941) i H. Lamb (1849–1934) opublikowali piękne prace z zakresu propagacji fal w naczyniach krwionośnych. O. Frank (1865–1944) opracował hydrodynamiczną teorię cyrkulacji. B. van der Pol (1889–1959) rozpatrywał modelowanie serca w postaci nieliniowych oscylatorów i zdołał przeprowadzić symulację pracy serca za pomocą czterech oscylatorów van der Pola i w ten sposób otrzymać realistycznie wyglądający elektrokardiograf.

Do biologii pojęcie komórki, jako elementarnej jednostki życia, wprowadził znany mechanikom uczony R. Hooke (1635–1703).

Bogatą historię posiada biomechanika kości. I tak C. Havers (1655–1702) zauważył, że kość ma strukturę porowatą. Właśnie od nazwiska tego badacza kanalik osteonu nosi nazwę kanału Haversa. W dalszych wiekach następowało głębsze zrozumienie fizjologii, funkcji, mechaniki i przebudowy kości. Wyczerpujące informacje na ten temat można znaleźć w dwu fundamentalnych dziełach [1, 2].

Biomechanika tkanki kostnej stanowi jeden z najlepiej rozwiniętych działów biomechaniki. W ostatnich dwu dekadach do badań nad tkanką kostną włączono genetykę.

Piękna i obszerna monografia [3] zawiera również uwagi historyczne na temat wprowadzania metod mechaniki ośrodków ciągłych i nowoczesnych metod obliczeniowych do badania układu sercowo-naczyniowego.

2 Jaki jest wkład biomechaniki do nauk o zdrowiu?

Biomechanika uczestniczyła szeroko w tym, co związane jest z postępowaniem nauk medycznych i technologii. Biologia molekularna może wydawać się dziedziną odległą od biomechaniki, jednakże w rzeczywistości musi się zrozumieć mechanikę formowania się molekuł jak i ich funkcjonowania i produkcji. Podobnie chirurgia wydaje się być działalnością nie związaną z mechaniką, jednakże leczenie i rehabilitacja są ściśle związane z odkształceniami i naprężeniami w tkance kostnej i odpowiednich tkankach miękkich.

Biomechanika pomogła rozwiązać problemy kliniczne związane z układem sercowo-naczyniowym (wynalazek i analiza sztucznych zastawek serca, urządzeń wspomagających serce, krążenie pozaustrojowe). Dochodzą do tego płucoserce i sztuczna nerka (dializator). Biomechanika odegrała istotną rolę w transplantacji serca. Pomogła także w rozwiązywaniu problemów związanych z obrzękami płucnymi, niedodmą płucną, analizą tętniczych pulsów falowych, fonoangiografią jak i z analizą hałasu turbulentnego, będącego wskazówką miażdżycy tętnic lub stenozy (zwężenia) w tętnicach.

Miażdżycza tętnic była (i jest) intensywnie badana jako zaburzenie hemodynamiczne, ponieważ umiejscowienie płytek miażdżycowych wydaje się korelować z cechami przepływu krwi. Wiele badań koncentruje się na naprężeniach działających na komórki śródbłonna i ich odpowiedzi na te naprężenia.

Chyba najbardziej rozwój biomechaniki jest związany z ortopedią, bowiem najczęściej na chirurgicznych salach operacyjnych pojawiają się pacjenci z problemami mięśniowo-szkieletowymi. W ortopedii biomechanika stała się już codziennym narzędziem. Badania podstawowe obejmują nie tylko chirurgię, protezy, biomateriały na implanty i sztuczne kończyny, ale i komórkowe oraz

molekularne aspekty leczenia w zakresie dotyczącym naprężeń i odkształceń. Istotną rolę zaczyna odgrywać inżynieria tkanki kostnej, chrząstki i ścięgien. Zapotrzebowanie na biomateriały jest bardzo duże. Nic dziwnego, że zarówno na świecie jak i w Polsce powstały specjalistyczne czasopisma poświęcone właśnie biomateriałom, jako nowoczesnej dyscyplinie inżynierii materiałowej. Wiele biomateriałów wymaga ulepszenia ich własności mechanicznych i trwałości. W szczególności dotyczy to sztucznych naczyń. Należy spodziewać się, że większą rolę będą odgrywać inteligentne biomateriały jak i nanobiotechnologie.

Biomechanika urazów, ran i uszkodzeń oraz rehabilitacja stają się coraz ważniejsze w nowoczesnych społeczeństwach. Wystarczy tutaj przywołać wypadki samochodowe, które często dotyczą młodych ludzi, co nie jest bez znaczenia z punktu widzenia kosztów i ekonomii.

Z dłuższej perspektywy najważniejszy wkład współczesnej biomechaniki do medycyny leży prawdopodobnie w promowaniu lepszego zrozumienia fizjologii. Metodologia i standardy mechaniki mogą być z pożytkiem stosowane do złożonych problemów nauk o zdrowiu i biotechnologii. Wystarczy tu wspomnieć o tym, że analiza systemowa, reologia tkanek biologicznych, transport masy przez membrany biologiczne, zjawiska na interfazach oraz mikrokrążenie przenikają coraz bardziej do badań medycznych. Nowoczesną dziedzinę badań stanowią tzw. silniki molekularne (proteinowe). Istotną rolę odgrywają tutaj badania cytoszkieletu komórek jako wstępnie sprężonych układów ciągnowo-prętowych (ang. tensegrity)

3 Krótka charakterystyka stanu badań biomechanicznych na świecie

Najbardziej szeroko i intensywnie biomechanika rozwijana jest w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, Japonii i Europie Zachodniej. Jednakże wydaje się, że badania w Stanach Zjednoczonych wyprzedzają w niektórych dziedzinach badania europejskie. W Europie brak odpowiednika uniwersyteckiego kształcenia biomechaników, który odpowiadałby systemowi amerykańskiemu. Jedynym wyjątkiem w Europie zaczyna być Holandia, a ściślej Uniwersytet w Eindhoven, gdzie powstał Wydział Inżynierii Biomedycznej. Aby się o tym naocznie przekonać, wystarczy uważnie przejrzeć dwa podstawowe czasopisma biomechaniczne: *Journal of Biomechanics*, *Journal of Biomechanical Engineering* oraz różne materiały konferencyjne.

Ciekawy jest przypadek małych krajów takich jak Irlandia, Holandia i Szwajcaria, gdzie powstały liczące się w świecie ośrodki badawcze zajmujące się głównie biomechaniką tkanki kostnej, biomechaniką ortopedyczną oraz tkankami miękkimi. Wiąże się to, między innymi, z tym, że w krajach tych istnieją dobrze prosperujące firmy produkujące sprzęt medyczny, czego brak w Polsce (mamy głównie dealerów). W krajach przodujących w biomechanice wielką rolę odgrywa sponsorowanie przez narodowe systemy ochrony zdrowia i programy badawcze, np. National Institutes of Health (USA). W Japonii istnieją priorytetowe programy badawcze z zakresu różnych dziedzin biomechaniki. Ważną rolę odgrywa oczywiście rozwój kadry. W USA biomechanika jest uprawiana na wielu uniwersytetach.

Tematyka prowadzonych na świecie badań jest bardzo szeroka i obejmuje:

- Biomechanikę komórki, a w tym modelowanie konstytutywne i mechaniczne własności komórek, wpływ efektów indukowanych przez przepływ na morfologię i funkcjonowanie

komórek, mechanobiologię podłoża komórka-substrat, interakcje komórka-substancja międzykomórkowa, molekularne i biofizyczne mechanizmy przetwarzania sygnałów mechanicznych. W ostatnich latach rozwijane jest modelowanie szkieletu komórki jako układu ścięgowego wstępnie sprzężonego (ang. tensegrity).

- Wpływ obciążeń na rozwój tkanek i organów. W tym punkcie jak i wielu innych, biomechanika spotyka się z biologią matematyczną.
- Mechanobiologię chrząstki i chondrocytów (komórek chrząstki). Prowadzone w tym zakresie badania są niezwykle istotne, ponieważ dotyczą możliwości regenerowania uszkodzonej chrząstki. Jeśli w przyszłości uda się umocować wyhodowaną zdrową chrząstkę na miejscu zniszczonej, jak np. w przypadku chorób reumatoidalnych, to doprowadzi do zrewolucjonizowania endoprotezoplastyki.
- Dynamikę i kinematykę układu mięśniowo-szkieletowego, a więc lokomocję zwierząt i człowieka, siły działające na układ kostny i mięśnie w warunkach normalnych i ekstremalnych (np. w przypadku zderzeń).
- Mechanikę tkanek kostnych i ich przebudowę, a w szczególności rolę komórek kostnych (osteocytów, osteoblastów i osteoklastów), obrazowanie architektury (mikrostruktury), mechaniczne własności kości zbitiej i gąbczastej, przepływ cieczy w kości, adaptację funkcjonalną kości do obciążeń zewnętrznych i zależność od czasu (wieku osobnika), zagadnienia kliniczne.
- Biomechanikę tkanek miękkich (tętnice i inne naczynia, aorty, mięśnie szkieletowe, oko, mięsień sercowy, ścięgna, więzadła). Badania prowadzi się zarówno na poziomie molekularnym jak i makroskopowym. W przypadku mięśni szkieletowych jak i w przypadku mięśnia sercowego istotną rolę odgrywa odpowiedź aktywna i pasywna, a więc odpowiedni rozkład naprężeń. Ze względu na swoją „wiotkość” badanie doświadczalne tkanek miękkich wymaga pomysłowości i konstruowania specjalnej aparatury. W ostatnich latach pojawiło się na świecie, głównie w USA, kilka nowych aparatów do badania tkanek miękkich poddanych złożonym obciążeniom i wpływowi pól termicznych.
- Biomechanikę układu sercowo-naczyniowego i układu oddechowego, a w szczególności mechanikę przepływu krwi i oddziaływania przepływ-pręteza.
- Biomechanikę ortopedyczną, w tym mechanikę złamań i stabilizatory zewnętrzne, mechanikę implantów i ich zamocowania, mechanikę interfazy implant-tkanka.
- Biomateriały (metale, tworzywa sztuczne i kompozyty) i ich biogodność.
- Biomechanikę dentystyczną, a więc projektowanie i analizę protez dentystycznych, mechanikę zużycia.
- Biomechanikę rehabilitacyjną (lokomocja, mechanika protez i protetyka).
- Biomechanikę stawów i płynu stawowego, a więc kinematykę i dynamikę stawów, zagadnienia smarowania w stawach normalnych i zdegenerowanych, np. przez choroby reumatoidalne i zwyrodnieniowe.

- Urazy mózgu i kręgosłupa.
- Wpływ drgań i uderzeń. Zarówno ta dziedzina badań jak i poprzednie są związane z rozwojem motoryzacji i bezpieczeństwem pracy.
- Zagadnienia termiczne: rozkład temperatury w tkankach miękkich w warunkach fizjologicznych oraz temperaturach obniżonych i kriogenicznych, wpływ temperatur podwyższonych, termiczne uszkodzenia tkanek i komórek, wpływ tarcia na rozkład temperatury w stawach normalnych, zdegenerowanych i po endoprotezoplastyce, wpływ polimeryzacji cementu kostnego na jakość płaszczki cementowego i rozkład temperatury w tkance kostnej w przypadku endoprotez cementowych.
- Badania doświadczalne. Prowadzone na świecie badania doświadczalne obejmują bardzo szeroki zakres: od poziomu molekularnego do badania własności makroskopowych jak i całych układów, takich jak np. kość długa, czy układ szkieletowo-mięśniowy. Wiele uwagi poświęca się badaniom biomechanicznym krwi i jej składników (erytrocyty, płytki itd.) jak i przepływowi krwi w sercu i naczyniach. W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się oddziaływaniom krew–naczynia, przy czym naczynia traktuje się jako odkształcalne, anizotropowe i niejednorodne materiały. Ten aspekt badań powinien doprowadzić do lepszego zrozumienia przyczyn różnych chorób układu sercowo-naczyniowego, takich jak np. zawały, zakrzepy.
- Metody obliczeniowe. Na rozwój metod obliczeniowych istotny wpływ wywarły metody elementów skończonych. Obliczenia wymagają często komputerów o bardzo dużej pamięci.
- Biomechanikę sportu. Ogólnie można powiedzieć, że odpowiednie badania idą w dwu kierunkach. Pierwszy dotyczy badań związanych z kinematyką i dynamiką organizmu jako całości lub jego elementów. Drugi kierunek to takie „sterowanie”, aby zawodnicy osiągalni jak najlepsze wyniki.

Z powyższej prezentacji można wysunąć prosty wniosek: biomechanika jest dziedziną badań łączącą wiele wątków, niezwykle silnie interdyscyplinarną.

Istotną rolę w prowadzonych badaniach odgrywa modelowanie, a więc opis matematyczny analizowanych zjawisk biomechanicznych. W większości przypadków mamy do czynienia z zagadnieniami silnie nieliniowymi, jak np. w przypadku reakcji tkanek miękkich na obciążenie. Jak zwykle w mechanice ciała stałego i cieczy, potrzebna jest znajomość tzw. stałych materiałowych, wyznaczanych doświadczalnie. W przypadku biomechaniki, w porównaniu z mechaniką, dodatkowa trudność bierze się stąd, że najczęściej można przeprowadzić jedynie badania *in vitro* z zachowaniem odpowiednich przepisów etycznych. Uzyskiwane wyniki zależą od osobnika i ich rozrzut bywa ogromny, dodatkowo jest zależny od stosowanej metody.

Ogromny postęp w rozwiązywaniu konkretnych zagadnień biomechaniki wniosły komputery i metody numeryczne. Dużą pomoc stanowią również metody wizualizacji pozwalające, na przykład, zobrazować przepływ krwi w naczyniach i zrozumieć hierarchiczną strukturę tkanki kostnej — *vide* mikrotomograf komputerowy. Niestety, są to zwykle bardzo kosztowne urządzenia.

Analiza literatury biomechanicznej pokazuje, że w najbliższych latach biomechanika zasymiluje część badań genetycznych, szczególnie tych, które dotyczą chrząstki i tkanki kostnej.

4 Stan badań w Polsce

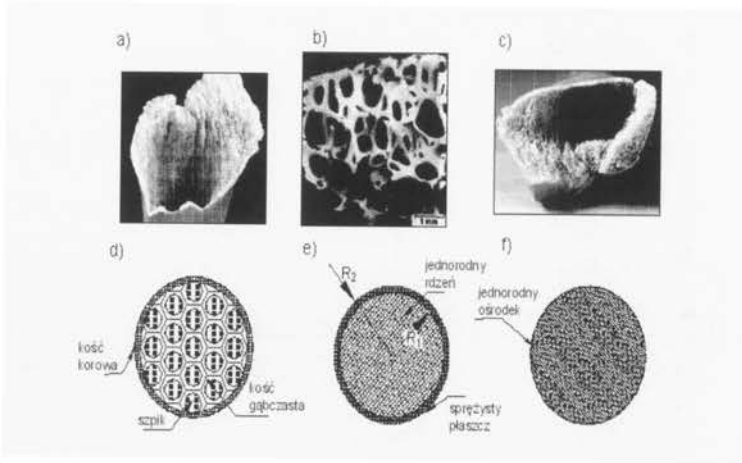
Biomechanika w Polsce różni się od biomechaniki światowej. Widać to wyraźnie na odbywających się w kraju konferencjach z zakresu biomechaniki, gdzie większość prac dotyczy biomechaniki inżynierskiej (ośrodki politechniczne) i sportu (AWF-y). Od kilku lat obraz ten został wzbogacony przez grupę z IPPT, która zajmuje się modelowaniem i konsekwentnym wprowadzaniem nowoczesnych metod mechaniki, w tym nieliniowej do badań biomechanicznych.

Badania w zakresie biomechaniki w Polsce rozpoczęły się w latach trzydziestych i były prowadzone w zakresie sportu i ortopedii. Warto podkreślić, że już w roku 1934 nakładem „Mathesis Polskiej” wydano książkę „Żywe maszyny” A.V. Hilla, jednego z twórców biomechaniki mięśni. Po wojnie do badań prowadzonych w zakresie sportu i medycyny dołączyli inżynierowie, rozpoczynając prace w dziedzinie biomechaniki inżynierskiej. Wyniki badań prezentowane są w Polsce na krajowych Konferencjach i Szkołach, Konferencjach SOLMECH, oraz za granicą na Kongresach Międzynarodowego Towarzystwa Biomechaniki (ISB) jak i Europejskiego Towarzystwa Biomechaniki (ESB) i wielu innych. W roku 1999 zostało powołane czasopismo Acta of Bioengineering and Biomechanics, będące organem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki. Od tegoż roku w czasopiśmie tym ukazują się obszernie tomy, jako suplementy, zawierające prace wygłaszane na krajowych konferencjach Polskiego Towarzystwa Biomechaniki; czasem dochodzą do tego bardziej specjalistyczne tomy.

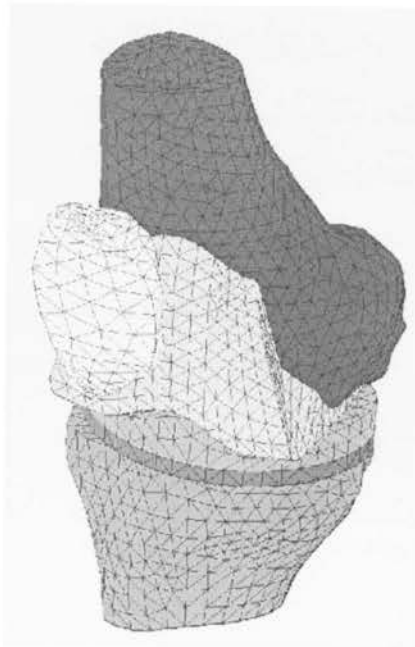
Aktualny stan badań prowadzonych w Polsce najlepiej oddaje tematyka badań prowadzonych w poszczególnych ośrodkach:

- *Ośrodek białostocki*: materiały dla endoprotezoplastyki, trybologia stawów i układu stomatologicznego, biomechanika zespoleń kości.
- *Ośrodek bydgoski*: badania ultradźwiękowe tkanki kostnej, kość jako materiał porospzężysty. W ośrodku tym stworzono laboratorium do badań ultradźwiękowych materiałów porowatych, a więc i tkanki kostnej.
- *Ośrodek gdański (AWF)*: biometrologia, geometria oraz inercja ciała, mechanika mięśni, lokomocja, ustalenie norm dla zdrowego człowieka pod względem budowy, sił i ruchu, ergonomia (w tym ergonomia sportu), biomechanika sportu, sądownictwo — rekonstrukcja wypadków drogowych, przecięcia pracownika na stanowisku pracy.
- *Ośrodek gliwicki*: przepływ krwi i sztuczne zastawki serca, metody numeryczne i algorytmy genetyczne, transport ciepła, modelowanie miednicy człowieka i mięśni, konstrukcja stabilizatorów do zespoleń kości, uszlachetnienie powierzchni implantów z biomateriałów metalicznych z oceną reakcji toksycznych i alergicznych, konstrukcja stołów do pionizacji i pionizatorów dla dorosłych i dzieci z porażeniem mózgowym lub niedowładem porowicznym, konstrukcja ekranów kompozytowych dla tłumienia pól elektromagnetycznych szkodliwych dla organizmu ludzkiego, lokomocja stawu skokowego i kolanowego, urazy powypadkowe kręgosłupa, optymalizacja konstrukcji sprzętu rehabilitacyjnego.
- *Ośrodek krakowski*: biomechanika stabilizatora Ilizarowa, zastosowanie czujników telemetrycznych do kontroli procesu wydłużania, biomateriały kości, implanty, aparaty ortopedyczne, bionika ruchu, stawy człowieka, przebudowa tkanki kostnej.

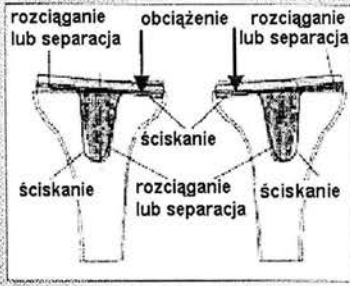
- *Ośrodek łódzki*: badania doświadczalne i numeryczne kręgosłupa i stawu biodrowego, implanty uszkodzonych kręęgów w części lędźwiowej i szyjnej kręgosłupa, badania syntetycznej protezy dysku międzykręgowego, stenty (protezy wzmacniające i udrażniające naczynia krwionośne), dynamika ludzkich strun głosowych, modelowanie pracy serca.
- *Ośrodki poznańskie*:
 - *AWF*: lokomocja, obciążenia — przeciążenia dynamiczne w wybranych strukturach ruchowych człowieka, badanie siły mięśniowej, badania nad czynnikami patogennymi człowieka, rehabilitacja.
 - *Samodzielna Pracownia Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN*: badanie ruchu oka, ocena stronności motorycznej kończyn górnych.
- *Ośrodek szczeciński*: modele analityczno-numeryczne biotrybologii.
- *Ośrodki wrocławskie*:
 - *AWF*: biomechaniczny identyfikator możliwości motorycznych człowieka, koordynacja działania mięśni antagonistycznych, energetyczne charakterystyki ruchów kończyny górnej, własności siłowo-prędkościowe mięśni szkieletowych człowieka, przeciążenia w gimnastyce, utrzymywanie równowagi w pozycji stojącej, koordynacja ruchowa.
 - *Politechnika Wroclawska*: badania doświadczalne i analiza numeryczna w zagadnieniach biomechaniki inżynierskiej, biomechaniczne aspekty alloplastyki stawu biodrowego i kolanowego, badanie układów stomatologicznych, stabilizacja i wydłużanie kończyn, implanty i stabilizatory kręgosłupa. W tym ośrodku stworzono unikatowe w skali kraju laboratorium do badań doświadczalnych, głównie z zakresu biomechaniki inżynierskiej.
- *Ośrodki warszawskie*:
 - *Politechnika Warszawska*: lokomocja zwierząt i owadów w celu budowy bionicznych układów maszyn i mili-maszyn kroczących, manipulatory i roboty antropomorficzne (konstrukcja, sterowanie, kalibracja), badanie doświadczalne i symulacja komputerowa układu człowiek–maszyna, w tym badanie i modelowanie wypadków komunikacyjnych i sportowych, projektowanie i wytwarzanie stabilizatorów jednostronnych oraz endoprotez, konstrukcja urządzeń do wspomagania chodu paraplegików.
 - *AWF*: pomiar momentów sił mięśniowych u osób z endoprotezami, modelowanie ruchu, ocena cech fizycznych u zawodników różnych konkurencji sportowych, porównania sprawności osób zdrowych i niesłyszących (12–16 lat), ocena związków pomiędzy typem budowy tułowia a wartościami momentów sił rozwijanych przez mięśnie tułowia.
 - *Instytut Sportu*: biomechanika sportu, urządzenia do pomiaru osiągnięć w sporcie.
 - *Centralny Instytut Ochrony Pracy*: wpływ trzech podstawowych czynników obciążenia, tj. pozycji ciała, siły wywieranej podczas pracy oraz częstotliwości powtórzeń na obciążenia układu ruchu (kręgosłupa, kończyn górnych i dolnych).



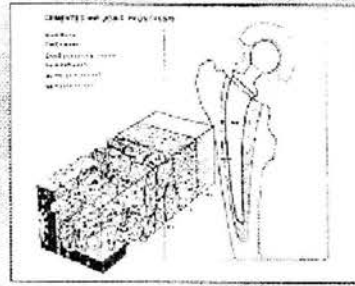
Rys. 1. Obrazy pokazujące komórkową strukturę kości gąbczastej — a,b,c; Trzypostopniowy proces modelowania makroskopowych własności skrętnych kości — d,e,f



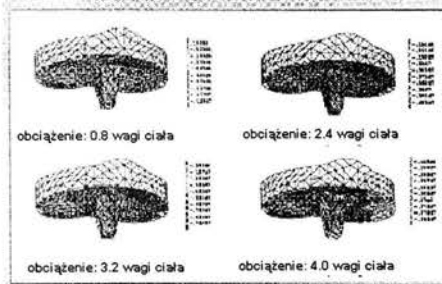
Rys. 2. Staw kolanowy z endoprotezą



Fizjologiczny rozkład obciążeń w stawie kolanowym

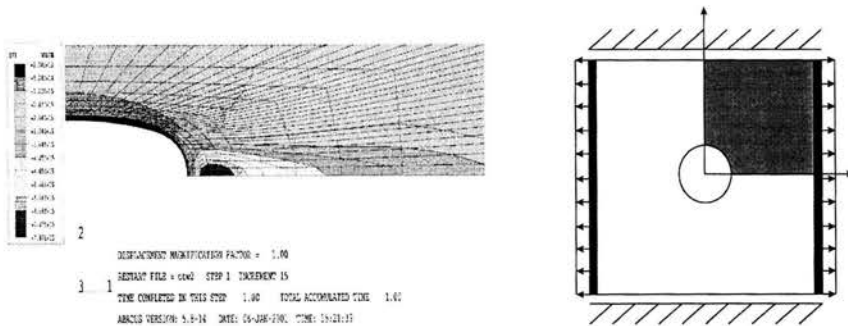


Struktura interfazy kość - cement



Ewolucja normalnych naprężeń kontaktowych, waga ciała = 2600 N

Rys. 3. Kontakt między endoprotezą a kością



Rys. 4. Początkowa i końcowa konfiguracja kwadratowego wycinka tkanki miękkiej (dane z aorty królika)

- *IPPT PAN*: biomechanika tkanki kostnej i jej przebudowa, modelowanie osteoporozy kości, kość gąbczasta jako materiał komórkowy, kość zbita jako materiał o mikrostrukturze hierarchicznej, wpływ szpiku na odpowiedź kości, modelowanie tkanek miękkich jako materiałów nieliniowych z uwzględnieniem pseudo-sprężystości, modelowanie skoliozy przed i po implantacji, zagadnienia kontaktowe w stawach po endoprotezoplastyce z uwzględnieniem tarcia i adhezji oraz transportu (dyfuzji) produktów zużycia, modelowanie interfazy kość-implant, metody optymalizacyjne w biomechanice, płyn stawowy jako substancja ciekłokrystaliczna, modelowanie chrząstki, zagadnienia termiczne w biomechanice, a w szczególności w problemach związanych z ortopedią. Oddzielna grupa badaczy zajmuje się badaniem kości gąbczastej i tkanek miękkich metodami ultradźwiękowymi.

5 Perspektywy rozwoju biomechaniki w Polsce, a w szczególności w IPPT PAN

Porównanie badań prowadzonych w Polsce i na świecie wyraźnie pokazuje, że w kraju dominuje biomechanika inżynierska i biomechanika sportu z akcentem na projektowanie, wytwarzanie i pomiary. Zupełnie brak badań z zakresu biomechaniki komórek i zaawansowanych badań materiałowych w złożonych stanach obciążenia. Kolejną słabość polskiej biomechaniki można określić jako brak w niej nowoczesnej mechaniki, w tym nieliniowej. Jedynie badania grupy z IPPT i Akademii Bydgoskiej silnie zakorzenione są we współczesnej zaawansowanej mechanice i mikromechanice. Dalszą słabą stroną są publikacje. Trzeba sobie otwarcie powiedzieć, że — w przeciwieństwie do np. mechaniki ciała stałego — wpływ prac z zakresu biomechaniki, po polsku rozumianej (a więc niezbyt szeroko) na piśmiennictwo światowe jest znikomy. Negatywny wpływ na możliwości rozwojowe biomechaniki w Polsce odgrywa zupełny brak sponsorowania przez instytucje powołane do ochrony zdrowia. Instytucje takie powinny mieć fundusze, o które mogliby ubiegać się biomechanicy. Pocięszające są jednakże dwa fakty: dynamiczne grupy mogą starać się o dołączenie do projektów europejskich, jak i o Centra Doskonałości; po drugie spora liczba młodych naukowców zajmujących się biomechaniką. Problem polega jednakże na tym, aby tego kapitału ludzkiego nie zmarnować. Młodzi adepci biomechaniki powinni cechować się dobrą znajomością nowoczesnej mechaniki i metod komputerowych, a także umieć redagować prace w języku angielskim. Konieczne jest również wysyłanie biomechaników, powiedzmy tuż po doktoracie, na długoterminowe staże naukowe do czołowych ośrodków w Europie Zachodniej, Japonii lub USA. Bez takiej szeroko zakrojonej akcji szkoleniowej i odpowiedniego finansowania obraz polskiej biomechaniki nie ulegnie zmianie. Należy również pomyśleć o tym, aby w Polsce powstała grupa badaczy zajmująca się biomechaniką komórki. Dyscyplina ta rozwija się coraz dynamiczniej i będzie odgrywać istotną rolę w biomechanice, co jest nieuniknione. Na przeszkodzie zaawansowanych badań doświadczalnych stoi niestety brak funduszy.

Rola IPPT w prowadzeniu badań z zakresu biomechaniki powinna wzrastać. Ten największy w Polsce instytut PAN ma duży potencjał naukowy, szczególnie w zakresie nowoczesnej mechaniki materiałów, dobrą bibliotekę, prowadzonych jest w nim wiele rozmaitych wykładów i seminariów. Instytut ten włącza się również do programów badawczych i szkoleniowych Unii Europejskiej. W takim, jak na warunki polskie wyjątkowym środowisku młody naukowiec chcący

zajmować się biomechaniką na poziomie światowym może uzyskać solidne podstawy, głównie w zakresie modelowania. W IPPT brak laboratorium biomechaniki, w którym można by prowadzić badania doświadczalne powiązane z modelowaniem i obliczeniami numerycznymi. I tu na przeszkodzie w zorganizowaniu takiego laboratorium stoi brak funduszy na zakup aparatury. Z punktu widzenia modelowania, dobrze rozwinięte w tym Instytucie badania metodami ultradźwiękowymi kości gąbczastej i tkanek miękkich dają jedynie ograniczone informacje. Do badań z zakresu biomechaniki włącza się Zakład Fizyki i Mechaniki Płynów w IPPT. Badania będą dotyczyły zarówno wizualizacji przepływów jak i ich modelowania. W IPPT PAN podjęto próbę integracji trzech grup zajmujących się: wspomnianymi już badaniami ultradźwiękowymi, przepływami i dość szeroko rozumianym modelowaniem z wykorzystaniem metod komputerowych, o czym była mowa na końcu poprzedniego punktu. Integracja ta ulegnie naturalnemu przyspieszeniu, bowiem wniosek tych trzech grup o przyznanie Centrum Doskonałości o nazwie Applied Biomedical Modelling and Diagnostics (ABIOMED) został pozytywnie oceniony przez Unię Europejską. Również wniosek badawczy, w ramach V. programu Unii Europejskiej, o dołączenie do projektów istniejących został zaakceptowany. Udział w takim projekcie europejskim zapewni biomechanikom z IPPT otrzymanie danych doświadczalnych i klinicznych z zakresu struktury i mikrostruktury tkanki kostnej i jej przebudowy zależnej od wieku i czynników farmakologicznych. Czynione są intensywne starania o współpracę w zakresie tworzonego VI. Programu Unii Europejskiej.

Bibliografia

1. Martin E.B., Burr D., *Structure, Function and Adaptation of Compact Bone*, Raven Press, New York, 1989.
2. Cowin S.C. [ed.], *Bone Mechanics Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 2001.
3. Humphrey J.D., *Cardiovascular Solid Mechanics — Cells, Tissues and Organs*, Springer, New York, 2002.

MECHANICZNE BADANIA MATERIAŁÓW

Lech Dietrich

1 Wstęp

Badania wytrzymałościowe określają przydatność i zakres zastosowań materiałów do konstrukcji, urządzeń i maszyn całego naszego współczesnego otoczenia technicznego. Pełne charakterystyki nowych materiałów powinny być zawsze wyznaczone przed ich zastosowaniem. Dążenie do oszczędności energii i materiałów zmusza do lepszego wykorzystania ich wytrzymałości, stosowania nowych technologii ich przetwarzania, zmniejszenia ciężaru wyrobów i ograniczenia stosowania materiałów drogiej. Wzrost odpowiedzialności za jakość wyrobów, zwłaszcza tych produkowanych w dużych ilościach jest również ważnym czynnikiem stymulującym zapotrzebowanie na badania wytrzymałościowe.

Rozwój współczesnych badań wytrzymałościowych cech materiałów i konstrukcji związany jest z rozwojem mechaniki ciał stałych i doskonaleniem metod analizy stanu naprężenia i odkształcenia, zwiększających zapotrzebowanie na wyniki badań doświadczalnych charakteryzujących zachowanie się materiałów pod wpływem różnorodnych i złożonych obciążeń. Z drugiej natomiast strony doskonalone są techniki badań doświadczalnych i stosowane urządzenia badawcze, które umożliwiają precyzyjne określenie cech materiałowych w różnych warunkach. W dziedzinie doświadczalnych badań materiałów obserwuje się ostatnio znaczący rozwój, który burzy dość powierzchowny i fałszywy, ale rozpowszechniony stereotyp o wystarczającym poznaniu cech materiałów konstrukcyjnych i o braku motywacji do rozwijania tej dziedziny. Istotnym czynnikiem wpływającym na te zmiany jest rozwój metod komputerowych umożliwiających, z jednej strony, analizę deformacji części maszyn i elementów konstrukcyjnych, a z drugiej stwarzających zupełnie nowe możliwości zbierania i przetwarzania danych pomiarowych, zwłaszcza programowania i sterowania przebiegiem badań w układzie pętli sprzężenia zwrotnego, w którym zmieniająca się, pod wpływem obciążeń, charakterystyka badanej próbki wpływa na zmiany charakterystyki maszyny wytrzymałościowej.

Rozwój mechaniki eksperymentalnej jest ściśle związany i uzależniony od postępu metod i urządzeń badawczych, wynika z rosnących wciąż potrzeb techniki, dążenia do efektywniejszego wykorzystania materiałów, stosowania nowych materiałów i nowych technologii ich przetwarzania. Jest to ciągły, iteracyjny proces postępu technicznego, w którym niestety ważną rolę stymulatora rozwoju spełniają katastrofy. Problemy katastroficznego zniszczenia konstrukcji i urządzeń mechanicznych są znaczącym elementem postępu technicznego, nie jako źródło unikatowych informacji o zachowaniu się konstrukcji inżynierskich, ale ze względu na zwiększenie nakładów na badania wskutek poszerzenia wyobraźni decydentów finansowych i poruszenie opinii społecznej.

Walące się mosty, wybuchy parowych zbiorników ciśnieniowych, czy wypadki kolejowe stanowiły stały element doniesień prasowych w XIX wieku. Była to dodatkowa, niezamierzona cena postępu technicznego, ale i konieczność zweryfikowania dotychczasowej wiedzy inżynierskiej. Statycznie pojmowana wytrzymałość materiałów oceniana na podstawie granicy plastyczności

i wytrzymałości przy jednoosiowym rozciąganiu nie mogły już wystarczyć do projektowania maszyn narażonych na zmienne obciążenia cykliczne, czy wyężonych konstrukcji inżynierskich. Doskonalenie procedur projektowych i badawczych nie było jednak ani proste, ani łatwe. Znaczącym impulsem rozwoju, który doprowadził do rozwoju mechaniki pęknięcia była seria katastrof okrętów typu Liberty, budowanych w stoczniach U.S.A. w trakcie Drugiej Wojny Światowej [1]. Były to pierwsze okręty o stalowej konstrukcji w całości spawanej, a zastosowanie tej nowej wówczas technologii wytwarzania było przyczyną 36 katastrof morskich (na ogólną liczbę 4694 wybudowanych jednostek). Początkowo katastrofy łączono z wydarzeniami wojennymi i okręty uważano za storpedowane. Dopiero pęknięcie na pół okrętu Schenectady zakotwiczonego w porcie¹, dało początek rzetelnej analizie przyczyn katastrofy. Doprowadziło to do rozwinięcia mechaniki pęknięcia i narzędzi badawczych do oceny odporności na pęknięcie materiałów konstrukcyjnych. Rozwinięcie prac Griffitha [2], Orowana [3] i Irwina [4] i przeniesienie koncepcji mechaniki pęknięcia na poziom projektowania inżynierskiego trwało jeszcze ponad 30 lat. Pierwsza norma określająca sposób i warunki wyznaczania odporności materiału na pęknięcie powstała w Anglii w 1972 roku [5], a w Polsce analogiczna norma została wprowadzona w 1987 roku [6].

W koncepcji Griffitha opublikowanej w 1920 roku przyjmuje się, że energia potrzebna do utworzenia nowej powierzchni związanej z powiększeniem się pęknięcia jest dostarczona z potencjalnej energii sprężystej, która jest proporcjonalna do kwadratu naprężenia i rośnie szybko ze wzrostem naprężeń. Pęknięcie może się rozwijać przy stosunkowo niewielkim poziomie naprężeń, nawet wówczas, gdy przy wierzchołku szczeliny powstanie obszar plastyczny, pochłaniający znaczną energię. Projektowanie wytrzymałościowe konstrukcji i elementów maszynowych nie może być oparte tylko na podstawie znajomości modułu sprężystości i granicy plastyczności materiału. Charakterystyka materiałów konstrukcyjnych musi być znacznie bogatsza, a w projektowaniu trzeba uwzględniać różne czynniki w zależności od przyszłych warunków eksploatacyjnych. Programy badań charakteryzujące zachowanie się materiałów w różnych warunkach powinny być i stopniowo są coraz bardziej wzbogacane.

Rzeczony mechaniki pęknięcia i jej wpływ na praktykę inżynierską jest znakomitym przykładem jakościowego, dynamicznego rozwoju wiedzy o materiałach konstrukcyjnych stosowanych przecież od wielu już lat. Jest to przykład tym bardziej interesujący, że zmiany te wprowadzane były na naszych oczach, za życia jednego pokolenia inżynierów. Dodatkową, ale jakże pouczającą i ważną korzyścią dorobku mechaniki pęknięcia było wyjaśnienie zatonięcia statku pasażerskiego Titanic w 1912 roku [7]. Statek zderzył się z górą lodową, ale dławczego zniszczenia były tak duże, że wodoszczelne grodzie nie zapobiegły tragedii i statek pękł na dwie części, tak, jak go znalazł na dnie oceanograf Bob Ballard w 1985 roku? Odpowiedź pozostawała zagadką przez ponad 70 lat, do momentu, gdy radziecki batyskaf podjął z głębokości ponad 3800 m kawałek blachy z konstrukcji Titanica. Przeprowadzone badania wykazały dużą zawartość siarki w stali, a badania udarności na młocie Charpy'ego ujawniły skłonność tej stali do kruchego pęknięcia. Uderzenie statku w górę lodową spowodowało pęknięcie kadłuba i wzrost sprężystej energii w całej konstrukcji, ale to mała odporność na pęknięcie stali użytej przy budowie statku była przyczyną rozwoju powstałego pęknięcia niemalże wzdłuż całej długości kadłuba i jego pęknięcia na dwie części.

W obu tych przypadkach jednym z czynników prowadzących do katastrofy były nowe technologie produkcyjne, wprowadzane zbyt pośpiesznie i bez poprzedzających badań. Titanic był

¹ 16 Stycznia 1943 o godz. 22.30 przy spokojnej i chłodnej pogodzie (temperatura wody — 3°C, powietrza 4°C)

pierwszym tak dużym statkiem pasażerskim o całkowicie stalowej konstrukcji, a statki typu Liberty były pierwszymi jednostkami o konstrukcji całkowicie spawanej. Technologie te stanowiły w późniejszym okresie podstawę rozwoju całej branży stoczniowej, ale należy pamiętać, że rozmiary tych katastrof mogłyby być znacznie mniejsze gdyby wykonano wcześniej odpowiednie badania materiałowe.

Mechanika pękania wprowadziła nowe procedury doświadczalnych badań materiałów, ale było to możliwe również dzięki stałemu doskonaleniu technik i urządzeń badawczych. Pod tym względem postęp jest równie imponujący, jeśli uświadomić sobie, że pomysł tensometru elektrooporowego został zrealizowany dopiero w 1938 roku, niezależnie przez Simondsa i Ruge [8]. Wprowadzenie tego niewielkiego urządzenia, tak powszechnie obecnie stosowanego w różnych postaciach do pomiarów odkształceń jest często uważane za początek rewolucji technicznej. Drugim, niesłychanie ważnym elementem współczesnych badań materiałów jest doskonalenie maszyn wytrzymałościowych, a zwłaszcza ich systemów sterowania. Rozwój ten jest ściśle związany z rozwojem elektroniki, a jej stopniowe wprowadzanie do układów sterowania maszyn wytrzymałościowych doprowadziło w rezultacie do powstania maszyny pracującej w pętli sprzężenia zwrotnego, w którym badana próbka jest częścią układu sterowania. Prototyp takiej maszyny powstał w U.S.A. w 1953 roku, a w latach 70. maszyny tego typu znalazły się w ofercie handlowej czołowych producentów tego typu wyposażenia. Specjalizowany układ elektronicznego zbierania i przetwarzania danych doświadczalnych w zastosowaniu do maszyn wytrzymałościowych powstał w 1972 roku [9], a połączenie w jednej maszynie tych dwóch systemów elektronicznych do sterowania i przetwarzania danych doświadczalnych dało początek współczesnym maszynom wytrzymałościowym. Ich historia nie jest długa, mimo, że badania wytrzymałościowe wykonywane były już od stuleci. Współczesne maszyny wytrzymałościowe to nie tylko poprawa jakości badań i ułatwienie ich realizacji, ale przede wszystkim stworzenie nowych możliwości badawczych, umożliwiających pełniejsze i dokładniejsze poznanie zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod obciążeniem w różnych warunkach. Stanowi to materiałną podstawę rozwoju badań doświadczalnych właściwości mechanicznych materiałów na najbliższe lata.

Współczesne maszyny wytrzymałościowe stwarzają nowe możliwości lepszego poznania cech konstrukcyjnych materiałów. Porównanie wcześniejszych badań materiałowych potwierdza ogólną zasadę wpływu sposobu badań i urządzeń badawczych na uzyskiwane wyniki. Drobnym, ale charakterystycznym przykładem jest fakt nieliniowości krzywej naprężenie–odkształcenie w początkowym zakresie naprężeń, uwidaczniany we wszystkich pracach doświadczalnych do lat pięćdziesiątych naszego stulecia. Fakt ten był pomijany w zastosowaniach inżynierskich, a moduł sprężystości określano bez uwzględnienia tego początkowego zaburzenia. Jednak ze względów poznawczych ten początkowy przebieg charakterystyki materiału miał istotne znaczenie, a kwestia odstępstwa od prawa Hooke'a była poważnie rozważana. Szereg prac poświęconych temu efektowi można znaleźć w amerykańskiej literaturze fachowej w latach 1944–1945. W pracach tych nie tylko wyznaczano równania aproksymujące dane doświadczalne dla tego silnie nieliniowego przebiegu wykresu σ – ϵ , ale przedstawiano również jego interpretacje fizyczną. Efekt ten nie występuje w żadnym poprawnie wykonanym badaniu przy użyciu współczesnych maszyn wytrzymałościowych, wyposażonych w hydrauliczne uchwyty próbek i ekstensometry do pomiaru odkształceń mocowane na części pomiarowej próbki. Nieliniowy przebieg wykresów σ – ϵ w początkowym zakresie był związany z kasowaniem luzów zamocowania próbki, sztywnością maszyny wytrzyma-

łościowej i jej wahadłowego układu pomiaru obciążenia oraz wyznaczaniem odkształceń próbki z przemieszczeń jej uchwytów.

Wykorzystanie współczesnych i już szeroko rozpowszechnionych metod komputerowego projektowania i szacowania wytrzymałości elementów konstrukcyjnych czy projektowania procesów obróbki plastycznej wymaga znajomości charakterystyki mechanicznej rozpatrywanego materiału. Podstawowe parametry cech wytrzymałościowych, wyznaczane na podstawie standardowych badań w jednoosiowych stanach naprężenia, nie wystarczą do racjonalnego wykorzystania możliwości obliczeniowych dostępnych programów metody elementów skończonych. Znajomość modułu sprężystości, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia całkowitego czy też odporności na zmęczenie mogą jedynie stanowić podstawę kwalifikacji materiału do określonego celu. Do obliczeń inżynierskich niezbędna jest znajomość modelu opisującego zachowanie się materiału w różnych, przewidywanych warunkach obciążenia i otoczenia zewnętrznego. Modelowanie charakterystyki mechanicznej wymaga znajomości parametrów funkcji opisujących przebieg naprężeń w zależności od odkształceń oraz ich ewolucji pod wpływem różnych czynników.

2 Kierunki rozwoju badań doświadczalnych materiałów

Badania doświadczalne cech mechanicznych materiałów są, jak to wskazano w powyższym wstępie, dziedziną kształtującą się na naszych oczach. Zmiany i kierunki rozwoju wynikają z jednej strony z rozwoju nowych koncepcji teoretycznych, z prawdziwej rewolucji metod projektowania inżynierskiego związanej z rozwojem metod komputerowych i potrzebami współczesnej techniki, motywowanymi koniecznością oszczędności energii i efektywniejszego wykorzystania materiałów konstrukcyjnych. Z drugiej natomiast strony, rozwój ten jest ściśle związany z doskonaleniem technik i urządzeń badawczych i ich przeniesieniem z poziomu laboratoriów badawczych na poziom zastosowań inżynierskich. Przewidywania rozwoju są szczególnie trudne, bowiem nie tylko są związane z rozwojem tych wskazanych dziedzin pokrewnych, ale są też uwarunkowane potrzebami praktyki inżynierskiej. Tym niemniej, analizując rozwijane obecnie kierunki badań i obserwując stały trend doskonalenia konstrukcji inżynierskich, dążenie do podniesienia efektywności maszyn i urządzeń poprzez zwiększanie obciążeń eksploatacyjnych (np. zwiększanie temperatur i ciśnień w instalacjach energetycznych, zwiększenie prędkości środków transportu), efektywniejsze wykorzystanie materiałów już stosowanych i wprowadzanie nowych materiałów, a zwłaszcza nowych technologii ich przetwarzania, czy wreszcie doskonalenie metod projektowania inżynierskiego, można przewidzieć zasadnicze kierunki doświadczalnych badań cech mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w następującym porządku:

- badania w złożonych stanach naprężeń z uwzględnieniem zmian parametrów wzmocnienia i anizotropii materiału dla różnej historii obciążeń,
- badania właściwości materiałów przy obciążeniach cyklicznych,
- badania rozwoju uszkodzeń materiałów,
- badania zachowania się materiałów na pełzanie i wzajemnego oddziaływania efektów pełzania i plastyczności,

- badania nowych materiałów, w tym materiałów funkcjonalnych nie tylko przenoszących określone obciążenie, ale reagujących w określony sposób na zewnętrzne warunki obciążenia,
- badania zmian cech materiałów w związku z wprowadzaniem nowych technologii produkcyjnych i poszerzaniem zakresu obciążeń eksploatacyjnych.

Wymienione kierunki dotyczą badań materiałów konstrukcyjnych stanowiących zasadniczy cel mechaniki doświadczalnej, ale postęp w tej dziedzinie jest ściśle związany z rozwojem metod badań i technik pomiarowych. Ta współzależność, uwidoczniła we wstępie na podstawie rozwoju dotychczasowego, będzie decydować również i w przyszłości o rozwoju badań doświadczalnych materiałów konstrukcyjnych. Rozwój metod badań i technik pomiarowych nie jest rozpatrywany w niniejszym opracowaniu z dwóch zasadniczych powodów. Po pierwsze są to osobne dziedziny wiedzy takie, jak elektronika, optyka czy sterowanie, a po drugie doskonalenie metod i technik pomiarowych wynika z potrzeb i przewidywanych kierunków rozwoju badań materiałów konstrukcyjnych. Wskazanie tych kierunków określa pośrednio cele rozwoju metod badań i technik pomiarowych.

3 Doświadczalne badania materiałów w złożonych stanach naprężenia

Rozwój metody elementów skończonych i ciągłe poszerzanie możliwości obliczeniowych komputerów typu PC umożliwiło szerokie wykorzystanie komputerowych metod projektowania inżynierskiego, w którym obliczenia wytrzymałościowe można wykonywać nie tylko w zakresie sprężystym, ale i plastycznym z uwzględnieniem lokalnych stref plastycznych spowodowanych istniejącymi w każdym elemencie i konstrukcji lokalnymi zmianami przekroju, powodującymi koncentrację naprężeń. Można też wykonywać obliczenia wytrzymałościowe z uwzględnieniem zmian temperatury, obciążeń cyklicznie zmiennych w czasie prowadzących do zmęczenia konstrukcji, czy też z uwzględnieniem anizotropowych cech materiału ukształtowanych w procesie plastycznej obróbki półfabrykatów. Anizotropia jest przecież tym czynnikiem, który bardzo silnie wpływa na przebieg dalszych procesów obróbki plastycznej, a zwłaszcza tłoczenia blach. Pomińnięcie anizotropowych cech materiału może powodować istotne dla jakości wyrobów rozbieżności pomiędzy przewidywanym i realizowanym przebiegiem tych procesów.

Podstawą modelowania charakterystyki mechanicznej materiałów konstrukcyjnych są wyniki badań doświadczalnych przeprowadzanych w warunkach złożonego stanu naprężenia. Wyznaczenie stałych czy funkcji materiałowych przyjętego modelu opisującego zachowanie się materiału pod obciążeniem również wymaga wykonywania badań doświadczalnych przy złożonych stanach naprężenia.

Badania doświadczalne w warunkach złożonych stanów naprężenia umożliwiające poznanie zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod obciążeniem w różnych warunkach prowadzone są od dawna w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Wyniki takich badań są szeroko omawiane w monografiach i encyklopediach z dziedziny mechaniki i badań doświadczalnych. Poczynając od 1931 roku, w którym wydrukowano uznawaną obecnie za klasyczną i pierwszą współczesną pracę naukową w dziedzinie badań doświadczalnych mechaniki plastycznego płynięcia

metali w warunkach złożonego stanu naprężenia [10], opublikowano setki prac prezentujących zachowanie się wielu materiałów pod różnorodnym obciążeniem w złożonym stanie naprężenia i w różnych warunkach zewnętrznych. Były to prace poznawcze, a ich wyniki wykorzystywano do formułowania różnych koncepcji teoretycznego opisu mechanicznych właściwości materiałów konstrukcyjnych. Z wielu różnorodnych i szczegółowych problemów badawczych rozpatrywanych w tych pracach można wyodrębnić następujące grupy zagadnień:

- Określenie zakresu sprężystego i początku uplastycznienia materiałów w zależności od stanu obciążeń.
- Wyznaczenie postaci prawa plastycznego płynięcia materiałów i weryfikacja doświadczalna jego podstawowych założeń.
- Badanie wpływu odkształceń na zakres sprężysty, uplastycznienie i wzmocnienie materiałów oraz weryfikacja doświadczalna hipotez wzmocnienia materiałów. W tej bardzo licznie reprezentowanej w literaturze światowej grupie badań można wyodrębnić badania zmian zakresu sprężystego i początku uplastycznienia materiałów pod wpływem odkształceń plastycznych uzyskiwanych przy różnych rodzajach obciążeń, takich jak:
 - monotonicznie rosnących,
 - stałych, wywołujących pełzanie materiału,
 - cyklicznie zmiennych.
- Wyznaczenie zakresu sprężystego i początku uplastycznienia materiałów w różnych warunkach otoczenia, a zwłaszcza przy obniżonych i podwyższonych temperaturach.
- Wyznaczenie zakresu sprężystego i początku uplastycznienia materiałów przy dużych prędkościach deformacji.
- Wyznaczenie zakresu i warunków zniszczenia materiału w zależności od stanu obciążeń.
- Wyznaczenie zakresu pełzania ustalonego w zależności od stanu obciążeń, związane z prowadzeniem badań pełzania w warunkach złożonego stanu naprężenia i wymagające rozwiązania wielu problemów techniki takich badań.
- Wyznaczenie zakresu i warunków zniszczenia zmęczeniowego w zależności od stanu obciążeń, związane z koniecznością prowadzenia długotrwałych obciążeń cyklicznych przy złożonych stanach naprężenia i uwzględnienia wielu specyficznych problemów takich badań, a zwłaszcza problemu przesunięcia fazowego składowych obciążeń.

W wielu dotychczasowych pracach z tej dziedziny istotną część stanowił opis techniki doświadczalnej i stosowanych urządzeń badawczych często o specjalnej i unikatowej konstrukcji. Problemy związane ze sposobem realizacji złożonego stanu naprężenia, z mocowaniem próbki i doborem jej kształtu i wymiarów, z techniką pomiaru składowych obciążeń i odkształceń były rozwiązywane indywidualnie w każdej pracy. Dopiero od niedawna, bo od początku lat 80., firmy produkujące sprzęt do badań wytrzymałościowych włączyły do swoich ofert produkcyjnych urządzenia do badań w warunkach złożonego stanu naprężenia. Był to niewątpliwie postęp ze względu na jakość samych badań i łatwiejszy sposób ich realizacji.

Poszerzenie ofert handlowych firm produkujących wyposażenie do badań wytrzymałościowych o urządzenia umożliwiające realizację złożonych stanów naprężenia wynikało nie tylko ze wzrostu znaczenia badań właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w złożonym stanie naprężenia, ale również ze zwiększonego zapotrzebowania na wyniki badań weryfikacyjnych przeprowadzanych na elementach konstrukcyjnych przy obciążeniach symulujących obciążenia eksploatacyjne. Związane to było z doskonaleniem metod projektowania inżynierskiego i wprowadzeniem numerycznych technik obliczeń wytrzymałościowych, a zwłaszcza metody elementów skończonych, dzięki którym można stosunkowo łatwo wykonać obliczenia dla różnych wariantów kształtu elementu, obciążeń i charakterystyk materiałowych. Uzyskane w ten sposób dane projektowe wymagały weryfikacji doświadczalnej przy złożonych obciążeniach. Wprowadzenie do produkcji siłowników obrotowych umożliwiło, wraz z wykorzystaniem siłowników ruchu liniowego, realizację bardzo złożonych stanowisk badawczych do weryfikacji doświadczalnej wytrzymałości elementów konstrukcyjnych. Umożliwiło to również budowę urządzeń do realizacji złożonych stanów naprężenia w zakresie stosowanym do badań charakterystyki mechanicznej materiałów.

Postęp związany z urządzeniami do badań w warunkach złożonego stanu naprężenia był ściśle związany z doskonaleniem urządzeń elektronicznych do sterowania maszyn wytrzymałościowych oraz do pomiarów i rejestracji uzyskanych wyników doświadczalnych. Możliwości wykorzystania technik komputerowych, wynikające z powstania i rozpowszechnienia komputerów typu PC, pozwoliły na dalsze ulepszenie techniki badań wytrzymałościowych, zwłaszcza w warunkach złożonych stanów naprężenia i to w takim stopniu, że badania takie mogą być obecnie wykonywane nie tylko jako badania poznawcze, ale również jako badania praktyczne do konkretnych zastosowań inżynierskich.

Badania doświadczalne materiałów można podzielić umownie na trzy podstawowe grupy:

- badania poznawcze, prowadzone w celu poznania i opisanie zachowania się materiałów w różnych warunkach obciążenia i otoczenia zewnętrznego,
- badania charakteryzujące zachowanie się materiałów pod obciążeniem prowadzone w celu wyznaczenia stałych materiałowych bądź funkcji materiałowych związanych z określonym modelem materiału,
- badania weryfikujące, prowadzone w celu sprawdzenia zachowania się w przewidywanych warunkach obciążeń elementów konstrukcji, zaprojektowanej dla modelu materiału wyznaczonego na podstawie wcześniejszych badań poznawczych, oraz dla stałych materiałowych wyznaczonych z badań doświadczalnych określających charakterystykę mechaniczną przyjętego modelu materiału.

We wszystkich tych trzech rodzajach badań doświadczalnych niezbędna jest realizacja złożonych stanów naprężenia. Podstawowe założenia teoretycznego opisu materiału, nawet dla bardzo zawężonej klasy zastosowań wynikają zawsze z badań doświadczalnych, przeprowadzanych wcześniej w warunkach złożonego stanu naprężenia. Zakres sprężystego zachowania się materiałów przy różnych stanach obciążeń, określający jednocześnie początek uplastycznienia materiałów, zwany warunkiem plastyczności, i wykorzystywany we wszystkich obliczeniach wytrzymałościowych może być określony tylko na podstawie badań w złożonych stanach naprężenia.

Stosowane w obliczeniach hipotezy plastycznego płynięcia, czy zależności określające wpływ ciśnienia hydrostatycznego na wytrzymałość są również ściśle związane z badaniami w złożonym stanie naprężenia.

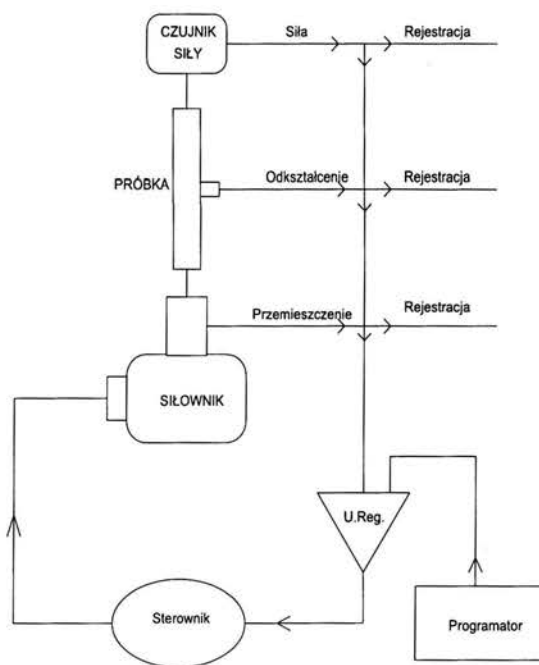
Wyznaczenie stałych i funkcji materiałowych wymaga zwykle badań w złożonych stanach naprężenia, jeśli przyjmujemy do obliczeń bardziej złożone koncepcje opisu materiału.

Badania weryfikujące poprawność przyjętych założeń opisu teoretycznego i programów obliczeniowych wymagają realizacji w warunkach złożonych stanów naprężeń, nawet w odniesieniu do prostych elementów konstrukcyjnych narażonych zwykle na działanie obciążeń złożonych. Badania weryfikujące dla bardziej złożonych układów konstrukcyjnych wymagają specjalistycznych i skomplikowanych systemów realizacji obciążeń zewnętrznych wywołujących w badanych elementach złożony stan naprężenia.

Badania w warunkach złożonego, płaskiego stanu naprężenia są często realizowane na cienkościennych próbkach rurkowych obciążanych jednocześnie siłą osiową i momentem skręcającym.

Badania doświadczalne przeprowadza się na specjalnych maszynach wytrzymałościowych wyposażonych w dwa siłowniki hydrauliczne i umożliwiających obciążanie próbek siłą osiową i momentem skręcającym.

Zasadę działania współczesnej maszyny wytrzymałościowej pokazano na Rys. 1. Jej podstawową cechą jest praca w pętli sprzężenia zwrotnego, w którym sygnał pomiarowy jednej z mierzo-

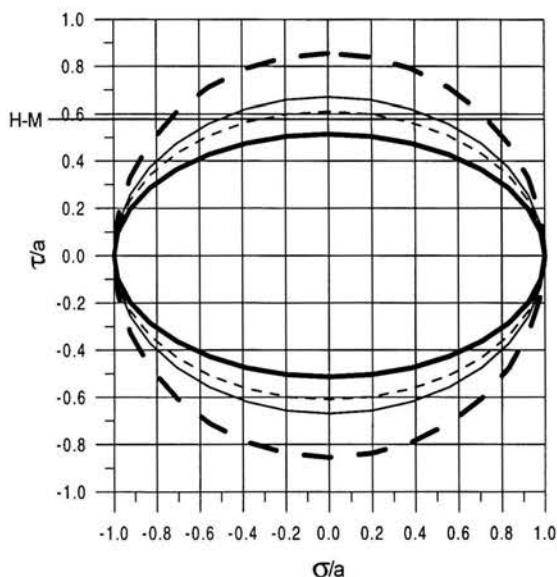


Rys. 1. Schemat blokowy współczesnej maszyny wytrzymałościowej

nych wielkości fizycznych, siły, odkształcenia czy przemieszczenia jest wprowadzany do układu regulacji, a sygnał do wysterowania serwozaworu siłownika hydraulicznego jest funkcją różnicy pomiędzy żądaną i zrealizowaną wartością w danej chwili. Układ regulacji pętli sprzężenia zwrotnego służy do dopasowania (wystrojenia) odpowiedzi maszyny do charakterystyki badanego materiału tak, że złe wystrojenie maszyny może powodować znaczne błędy lub wręcz zniszczenie próbki. Parametry strojenia maszyny wytrzymałościowej w istotny sposób wpływają na dokładność realizacji żądanego programu obciążeń i mają wpływ na rozdzielczość pomiarową.

Podstawową charakterystyką materiału są krzywe naprężenie–odkształcenie dla różnych stanów obciążenia. Wykresy takie charakteryzują zachowanie się materiału pod obciążeniem dla danego stanu naprężenia i umożliwiają wyznaczenie podstawowej charakterystyki materiału w postaci warunku plastyczności rozgraniczającego zakres sprężystego i plastycznego zachowania się materiału. Warunek Hubera–Misesa, przyjmowany zwykle w obliczeniach inżynierskich, nie zawsze opisuje zachowanie się rzeczywistych materiałów inżynierskich z dostateczną dokładnością. Porównanie kształtu graficznego zobrazowania warunku plastyczności wyznaczonego doświadczalnie przy różnych stanach obciążeń wywołanych różnymi kombinacjami siły osiowej i momentu skręcającego dla czterech materiałów zilustrowano na Rys. 2. Krzywe zamknięte, pokazane na tym rysunku, obrazują przekroje warunku dla rozpatrywanych stanów obciążeń, są znormalizowane względem większej półosi elipsy tak, że można łatwo porównać ich kształt i odchylenie od elipsy Hubera–Misesa, dla której mniejsza półoś jest zaznaczona linią cienką ($b = 0,577a$).

Linia gruba, ciągła obrazuje przekrój warunku plastyczności dla stopu aluminium PA6. Linia cienka, przerywana odnosi się do mosiądzu M058, a leżąca wyżej linia ciągła, cienka przedsta-



Rys. 2. Porównanie kształtów powierzchni plastyczności dla czterech materiałów konstrukcyjnych z zaznaczoną rzędną powierzchni teoretycznej Hubera–Misesa

wia przekrój warunku plastyczności dla stali 45. Zewnętrzna linia gruba, przerywana przedstawia zachowanie się stopu NiTi w zakresie reorientacji struktury krystalicznej, gdy deformacja powstaje w wyniku bliźniakowania struktury krystalograficznej, a nie odkształcenia poślizgowego. Odchylenia kształtu rzeczywistych warunków plastyczności, zwanych też warunkami wyężenia, od kształtu teoretycznego warunku Hubera–Misesa są wyraźnie widoczne i można jedynie określić stopień przybliżenia, z jakim warunek teoretyczny opisuje zachowanie się materiałów konstrukcyjnych.

W przypadku stopu z pamięcią kształtu stosowanego już w praktyce inżynierskiej, warunek rozwinięcia deformacji nie może być, nawet w przybliżeniu aproksymowany warunkiem Hubera–Misesa. Dane doświadczalne pokazane na Rys. 2 wskazują, że stosunek osi głównych jest bliski 1 tak, że obraz geometryczny tego warunku jest bliższy koła, a nie elipsy.

Przekroje graficznego zobrazowania warunku plastyczności pokazane na Rys. 2 dotyczą materiału w stanie wyjściowym i umożliwiają ocenę zasadności przybliżeń czy uproszczeń opisu teoretycznego wykorzystywanego w obliczeniach inżynierskich. Badania w warunkach złożonych stanów naprężenia umożliwiają również ocenę zmian właściwości mechanicznych materiałów w trakcie procesów wytwórczych (obróbka plastyczna, cieplna), czy pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Badania tego typu umożliwiają ocenę zmian parametrów wzmocnienia i anizotropii materiału dla różnej historii obciążeń [11].

Warunek Hubera–Misesa nie powinien być przyjmowany z góry w obliczeniach inżynierskich. Postać warunku przejścia ze stanu sprężystego do plastycznego zależy od rodzaju materiału i jego stanu wyjściowego zależnego od rodzaju zastosowanej obróbki w procesie wytwarzania, ale też zmienia się pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych i czasu. Warunek ten powinien być wyznaczony na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzanych w warunkach złożonego stanu naprężenia, a nie powinien być określany jedynie na podstawie granicy plastyczności wyznaczonej w próbie jednoosiowego rozciągania.

Badania zachowania się materiałów pod obciążeniem wywołującym złożone stany naprężenia mają istotne znaczenie poznawcze stanowiąc podstawę modeli i opisów teoretycznych mechaniki ciał odkształcalnych, ale mają też bezpośrednie znaczenie dla praktyki inżynierskiej jako niezbędny element analizy deformacji sprężysto-plastycznej, umożliwiając racjonalne wykorzystanie współczesnych metod projektowania inżynierskiego maszyn, konstrukcji i procesów obróbki plastycznej. Badania w złożonym stanie naprężenia prowadzone są od wielu lat w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki i stanowią znaczący wkład do dorobku światowego w zakresie rozwoju metod badawczych oraz poznania i opisu zachowania się metali pod obciążeniem. Prace z tego zakresu, zapoczątkowane opracowaniem oryginalnej metod badań [12] i systematycznym doskonaleniem technik badawczych, doprowadziły w rezultacie do zbudowania wyspecjalizowanego i dobrze wyposażonego laboratorium mechaniki doświadczalnej, zdolnego do realizacji różnorodnych programów badań materiałowych w złożonych stanach naprężeń. Zakres prowadzonych badań obejmował zagadnienia o istotnym znaczeniu poznawczym i ważne dla praktyki inżynierskiej. Lista zrealizowanych projektów obejmowała:

- wyznaczanie postaci warunków uplastycznienia materiałów konstrukcyjnych i jej zmian pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych,
- analizę deformacji materiałów przy obciążeniach cyklicznych dla proporcjonalnych i nieproporcjonalnych ścieżek,

- analizę wzajemnego oddziaływania efektów pełzania i plastyczności,
- analizę zmian parametrów wzmocnienia i anizotropii plastycznej dla różnej historii obciążeń,
- analizę deformacji nowej klasy materiałów funkcjonalnych charakteryzujących się przemianami fazowymi indukowanymi zmianami naprężeń i temperatury.

Wyniki badań były wielokrotnie cytowane w literaturze światowej, a ich zestawienie przytoczono w monografii wydanej w polskiej i angielskiej wersji językowej [13].

Badania w złożonych stanach naprężeń będą rozwijane w laboratoriach badawczych, ale też będą przenoszone w coraz większym stopniu do praktyki inżynierskiej, nie tylko ze względu na konieczność badań nowych materiałów, ale i ze względu na zasób dostarczanych przez nie informacji o materiałach. Materiały konstrukcyjne są ciągle ulepszone, a nowe techniki badawcze są zazwyczaj istotnym elementem wprowadzanych ulepszeń. Rozwinięcie metod badań odporności na pękanie dało podstawy do wprowadzenia nowych gatunków stali o zwiększonej odporności na pękanie.

Konieczność prowadzenia badań materiałowych w warunkach złożonych stanów naprężeń jest oczywista przy wprowadzaniu nowych materiałów, zwłaszcza w przypadku materiałów o specjalnych i celowo ukierunkowanych właściwościach, jak np. dla szerokiej klasy kompozytów zbrojonych włóknami o różnej strukturze.

4 Badania właściwości materiałów przy obciążeniach cyklicznych

Zachowanie się materiałów konstrukcyjnych przy obciążeniach cyklicznych ma zasadnicze znaczenie przy kwalifikacji przydatności materiału do określonych konstrukcji inżynierskich, zwłaszcza w przemyśle maszynowym, gdzie obciążenia eksploatacyjne mają zawsze charakter cykliczny. Jeszcze do niedawna obciążenia cykliczne były utożsamiane wyłącznie ze zmęczeniem metali, a obciążenia monotoniczne były kojarzone z plastycznością, w której rozpatrywano, co najwyżej jeden cykl obciążenia i odciążenia. Były to dwie różne dziedziny wiedzy inżynierskiej. Stosowana wówczas technika doświadczalna ograniczała zakres badań do obciążeń jednoosiowych, a przy obciążeniach cyklicznych nie rejestrowano zmian naprężeń jako funkcji odkształceń w kolejnych cyklach obciążania, ograniczając się jedynie do liczby cykli do zniszczenia próbki przy danej amplitudzie obciążenia, co umożliwiało wyznaczenie podstawowej charakterystyki zmęczenia materiału w postaci krzywej Wöhlera.

Pojęcie zmęczenia niskocyklowego pojawiło się stosunkowo niedawno i określa zachowania się materiałów przy obciążeniach cyklicznych w zakresie niewielkiej liczby cykli. Jest to faza przejściowa od obciążeń doraźnych do zakresu krzywej Wöhlera. Badania w zakresie niskocyklowego zmęczenia są już ściśle związane i w podobny sposób prowadzone jak badania wchodzące w zakres plastyczności cyklicznej. W obu tych dziedzinach analizuje się zmiany przebiegu krzywej naprężenia–odkształcenie jako funkcję liczby cykli obciążenia. Celem cyklicznej plastyczności jest określenie właściwości materiałów przy obciążeniach cyklicznych, a następnie modelowanie tych właściwości. Natomiast badania niskocyklowego zmęczenia mają na celu określenie trwałości zmęczeniowej w tym zakresie obciążeń.

Badania doświadczalne przy obciążeniach cyklicznych prowadzono głównie w jednoosiowych stanach naprężenia, najczęściej przy cyklach rozciągania–ściskania, zarówno w zakresie niskocyklowego zmęczenia jak i cyklicznej plastyczności. Badania doświadczalne przeprowadzane przy cyklicznych obciążeniach w warunkach złożonych stanów naprężenia są znacznie skromniej reprezentowane w literaturze światowej. Są to wprawdzie badania znaczne trudniejsze i kosztowniejsze, ale też umożliwiają dokonanie pełnej oceny zachowania się materiałów przy obciążeniach cyklicznych z uwzględnieniem wpływu kierunku naprężeń głównych. Badania takie stanowią niezbędną podstawę modelowania właściwości mechanicznych materiałów przy obciążeniach cyklicznych. Wyróżnić tu można badania prowadzone przy proporcjonalnych i nieproporcjonalnych obciążeniach. Termin obciążenia proporcjonalne oznacza tu, że składowe obciążenia narastają proporcjonalnie do parametru obciążenia, którym jest najczęściej czas. Stosunek poszczególnych składowych obciążenia jest stały w trakcie całego procesu obciążania. Odmienna sytuacja jest przy nieproporcjonalnych obciążeniach, które charakteryzują się zmianą kierunku obciążania i zmiennym stosunkiem poszczególnych składowych obciążenia w trakcie jednego cyklu procesu obciążania. Jedną z odmian obciążeń nieproporcjonalnych jest zmiana jednej ze składowych obciążenia według funkcji sinus, podczas gdy druga zmienia się według funkcji cosinus, co prowadzi do tak zwanej kołowej deformacji, przy której droga parametrów sterujących zakreśla okrąg w rozpatrywanej przestrzeni składowych stanu odkształcenia, jeśli składowe odkształcenia są wybrane jako parametry sterujące przebiegiem obciążenia próbki.

Badania przeprowadzane w warunkach złożonego stanu naprężenia przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych uwiadcniają nowe aspekty zachowania się metali. Pojawia się, zaobserwowany po raz pierwszy w 1978 roku [14], efekt dodatkowego wzmocnienia charakteryzujący się rosnącą spiralą odpowiedzi materiału w przestrzeni naprężeń, przy wymuszeniach o stałej amplitudzie odkształcenia wypadkowego. Z drugiej natomiast strony, ten typ obciążenia może prowadzić do obniżenia trwałości zmęczeniowej [15]. Efekty te są znaczące i stanowią ważny element charakterystyki materiałowej.

5 Wyniki badań przy proporcjonalnych obciążeniach cyklicznych

Materiały konstrukcyjne mogą wykazywać efekt cyklicznego umocnienia bądź osłabienia w zależności od rodzaju materiału. Obserwujemy wówczas malejącą bądź rosnącą amplitudę odpowiedzi materiału w kolejnych cyklach na wymuszenia o stałej amplitudzie. Po pewnej liczbie cykli nie obserwuje się już dalszych zmian amplitudy odpowiedzi materiału. Osiągamy stan nasycenia i stabilizację zachowania się materiału pod wpływem stałego, cyklicznie zmiennego sygnału wymuszającego. Zwrotne punkty ustalonej dla takiego stanu nasycenia pętli histerezy przy danej amplitudzie wymuszenia wyznaczają nam punkty tak zwanej cyklicznej krzywej umocnienia. Definicja ta określa sposób wyznaczania cyklicznej krzywej umocnienia stanowiącej podstawową charakterystykę cyklicznego zachowania się materiałów konstrukcyjnych. Sposób ten jest jednak bardzo pracochłonny i wymaga użycia wielu próbek do wyznaczenia cyklicznej krzywej naprężenie–odkształcenie. W praktyce często korzysta się z uproszczonych schematów wyznaczania krzywej cyklicznej z wykorzystaniem tylko jednej próbki przy stopniowo zmienianej amplitudzie obciążeń. Sposoby te były zwykle stosowane przy jednoosiowych stanach naprężenia, najczęściej przy cyklach rozciąganie–ściskanie. Zbiory takich krzywych cyklicznych dla różnych materiałów można

znaleźć w literaturze nawet w postaci monograficznej [16]. Natomiast badania w warunkach złożonych stanów naprężeń umożliwiające ocenę wpływu kierunku stanu naprężenia na właściwości mechaniczne materiałów przy cyklicznych obciążeniach są znacznie skromniej reprezentowane w literaturze światowej.

Ilustracją nowych możliwości badawczych wynikających z prowadzenia badań przy cyklicznych obciążeniach dla różnych, złożonych stanów naprężeń są przykładowe wyniki badań doświadczalnych dla stali 18G2A i stopu aluminium PA6 wykonane w IPPT. Badania realizowano na cienkościennych próbkach rurkowych obciążanych różnymi kombinacjami jednocześnie działającej siły osiowej i momentu skręcającego. Każda z próbek obciążana była cyklicznie przy stałej proporcji składowych obciążenia, parametrami sterującymi były składowe odkształceń osiowych i postaciowych. W pierwszej części o stałej amplitudzie odkształceń osiągnano stan nasycenia i pętla histerezy stabilizowała się. Druga część programu obciążeń cyklicznych wykorzystywana była do wyznaczenia cyklicznej krzywej umocnienia dla kolejnych stanów naprężenia. Po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych wyznaczano warunek plastyczności dla każdej z próbek przy wykorzystaniu metody sekwencyjnego obciążania próbki do osiągnięcia granicy plastyczności zdefiniowanej określoną wartością intensywności odkształceń plastycznych. Program badań umożliwił określenie:

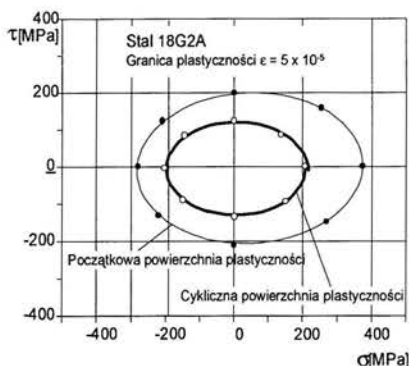
- charakteru cyklicznego umocnienia badanych materiałów,
- wpływu kierunku obciążenia na zachowanie się badanego materiału przy cyklicznych obciążeniach,
- cyklicznej krzywej umocnienia dla różnych stanów naprężeń,
- zmiany właściwości plastycznych pod wpływem deformacji cyklicznej, realizowanej dla różnych stanów naprężeń.

Uzyskuje się w ten sposób pełne informacje o właściwościach mechanicznych przy cyklicznych obciążeniach, które umożliwiają podjęcie próby racjonalnego modelowania zachowania się materiału przy cyklicznych obciążeniach. Uzyskane wyniki wskazują wyraźnie, że na podstawie jedynie badań jednoosiowych nie jest możliwe właściwe modelowanie cech materiału odzwierciedlające rzeczywiste zachowanie się materiału. Szczegółowe wyniki badań podano w pracy [17], a zasadnicze cechy badanych materiałów przy obciążeniach cyklicznych zilustrowano na kolejnych rysunkach.

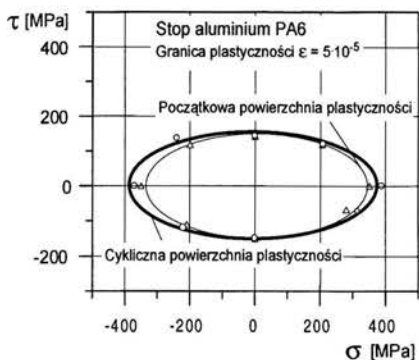
Znajomość cyklicznych krzywych umocnienia dla różnych stanów naprężenia umożliwia wyznaczenie cyklicznego warunku plastyczności odzwierciedlającego sumaryczne cechy cyklicznej plastyczności dla różnych stanów naprężeń. Jest to pojęcie odpowiadające warunkowi plastyczności przy obciążeniach monotonicznych.

Porównanie tych dwóch rodzajów warunków plastyczności przedstawiono na Rys. 3 dla stali 18G2A i na Rys. 4 dla stopu aluminium PA6. Efekt cyklicznego osłabienia jest tu wyraźnie widoczny dla stali, natomiast efekt cyklicznego wzmocnienia dla stopu aluminium jest zależny od kierunku obciążenia i związany z teksturą półwyrobu, ukształtowaną w procesie wytwórczym.

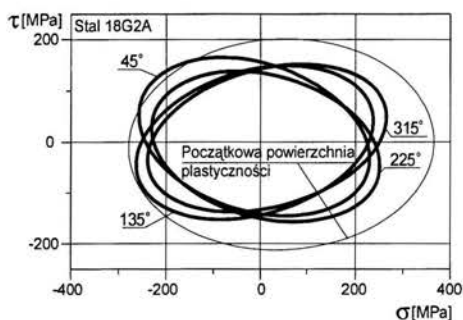
Cykliczne obciążenia wprowadzają zmiany właściwości plastycznych badanych materiałów, które można ocenić na podstawie obrazu wtórnej powierzchni plastyczności, otrzymanej po zakończeniu programu obciążeń cyklicznych. Kierunkowe obciążenie cykliczne jest traktowane jako



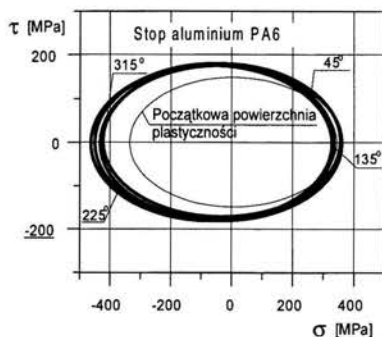
Rys. 3. Porównanie początkowego i cyklicznego warunku plastyczności dla stali 18G2A



Rys. 4. Porównanie początkowego i cyklicznego warunku plastyczności dla PA6



Rys. 5. Wtórne warunki plastyczności dla stali po obciążeniach cyklicznych w kierunkach 45, 135, 225 i 315 stopni



Rys. 6. Wtórne warunki plastyczności dla PA6 po obciążeniach cyklicznych w kierunkach 45, 135, 225 i 315 stopni

wstępna deformacja ukierunkowana w stosunku do głównych osi anizotropii początkowej związanej z obróbką plastyczną tak, że wyznaczając następnie wtórny warunek plastyczności możemy ocenić zmianę właściwości plastycznych pod wpływem tej wstępnej deformacji. Sumaryczne wyniki przedstawiono na Rys. 5 dla stali 18G2A, a na Rys. 6 dla stopu aluminium PA6, ograniczając się tylko do pokazania wpływu kierunku obciążania cyklicznego dla badanych materiałów.

Właściwości plastyczne ulegają zmianie pod wpływem ukierunkowanych obciążeń cyklicznych. Wymiary i położenie wtórnych warunków plastyczności zależą od kierunku wstępnej deformacji cyklicznej. W przypadku stali 18G2A warunki plastyczności dla stanu po deformacji cyklicznej leżą wewnątrz warunku początkowego, wyznaczonego dla materiału w stanie dostawy. Obserwuje się efekt osłabienia plastycznego materiału pod wpływem deformacji cyklicznej. Odwrotna sytuacja występuje dla stopu aluminium PA6. Materiał ulega w tym przypadku plastycznemu wzmocnieniu pod wpływem deformacji cyklicznej. Warunki plastyczności w stanie po de-

formacji cyklicznej w różnych kierunkach zobrazowane elipsami na Rys. 6 otaczają z zewnątrz elipsę obrazującą warunek plastyczności w stanie wyjściowym. Charakterystyczna jest też zależność położenia elips wtórnego warunku plastyczności od kierunku wstępnej deformacji cyklicznej. Efekt ten występuje dla obu badanych materiałów. Dla stali obserwujemy obrót elips obrazujących wtórny warunek plastyczności zależnie od kierunku wstępnych obciążeń cyklicznych, a dla stopu aluminium elipsy wtórnego warunku mają osie główne pokrywające się osiami wstępnej anizotropii niezależnie od kierunku wstępnej deformacji cyklicznej.

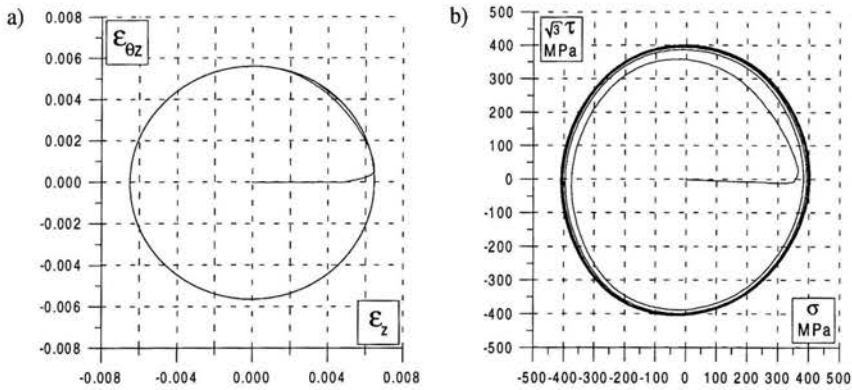
Przedstawione wyniki badań wpływu cyklicznego obciążenia realizowanego przy proporcjonalnych drogach wskazują na skomplikowany i złożony charakter odpowiedzi materiału na zadany program obciążeń. Odpowiedź ta jest ściśle związana z rodzajem materiału i technologią procesu wytwórczego, który kształtuje właściwości mechaniczne w stanie wyjściowym. Czynniki te wpływają w sposób decydujący na kierunkowość struktury i właściwości materiałów konstrukcyjnych, co w połączeniu z różnorodnością parametrów obciążenia, a głównie jego amplitudą i kierunkiem w stosunku do głównych kierunków anizotropii materiału prowadzi do takiej różnorodności reakcji materiału na taki sam program obciążeń cyklicznych. Komplikuje to w sposób zasadniczy modelowanie zachowania się materiałów konstrukcyjnych, które zawsze powinno być poprzedzone odpowiednimi badaniami doświadczalnymi w warunkach złożonych stanów naprężeń. Badania doświadczalne w złożonych stanach obciążeń cyklicznych, tak ważne dla stopów metali, są szczególnie istotne w przypadku całej klasy kompozytów zbrojonych włóknami o celowo ukierunkowanych właściwościach wytrzymałościowych.

Charakterystyczną cechą zachowania się materiałów konstrukcyjnych, a zwłaszcza metali przy proporcjonalnych obciążeniach cyklicznych, jest utrzymanie w fazie zmian naprężeń i odkształceń.

6 Badania przy obciążeniach nieproporcjonalnych

Nieproporcjonalne obciążenia cykliczne charakteryzują się ciągłą zmianą kierunku obciążenia w stosunku do ukształtowanych głównych osi anizotropii badanego materiału. Powoduje to powstanie efektu dodatkowego wzmocnienia charakteryzującego się rosnącą spiralą odpowiedzi materiału w przestrzeni naprężeń, przy wymuszeniach o stałej amplitudzie odkształcenia wypadkowego. Badania doświadczalne w złożonych stanach naprężeń przy nieproporcjonalnych obciążeniach są intensywnie rozwijane w ostatnich latach. Są to jednak badania trudne, wymagające nowoczesnej aparatury badawczej, w której konieczna jest możliwość precyzyjnego sterowania i programowania przebiegiem obciążeń.

Opis zachowania się metali przy nieproporcjonalnych obciążeniach i efekty dodatkowego umocnienia przy złożonych obciążeniach cyklicznych przesuniętych w fazie w zakresie zmęczenia niskocyklowego, prowadzące do obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej w zakresie długotrwałych obciążeń cyklicznych, mają istotne znaczenie z inżynierskiego punktu widzenia ze względu na częste występowanie tego typu obciążeń w rzeczywistych konstrukcjach i urządzeniach. Obserwowane zmiany ilościowe przy nieproporcjonalnych drogach obciążeń zależą nie tylko od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy składowymi odkształceniami, od ich amplitudy, ale również od kształtu drogi obciążenia w przestrzeni odkształceń [18]. Dane doświadczalne są wciąż niewystarczające do określenia postaci równań konstytutywnych, a podejmowane próby uwzględnienia



Rys. 7. Przebieg nieproporcjonalnego obciążenia cyklicznego, (a) zmiany sygnału wymuszającego, (b) odpowiedź materiału w naprężeniach

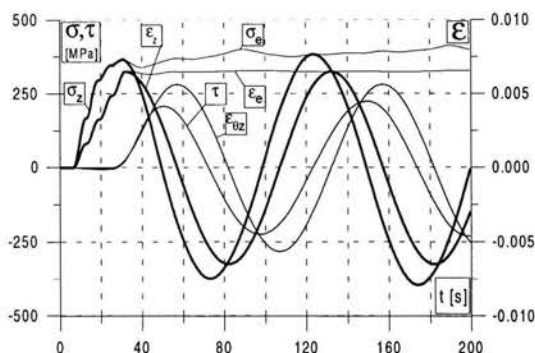
dotkowego umocnienia przy nieproporcjonalnych obciążeniach w opisie teoretycznym nie są jeszcze dostatecznie zweryfikowane doświadczalnie.

Przykładowe wyniki badań doświadczalnych, przedstawione niżej, wykonano w IPPT na cienkościennych próbkach rurkowych z mosiądzu przy jednoczesnym obciążaniu na rozciąganie-ściskanie i dwukierunkowe skręcanie o sinusoidalnie zmiennych w czasie składowych poszczególnych odkształceń przesuniętych w fazie o 90° . Koniec wektora odkształceń zakreśla w każdym cyklu pełny okrąg w przestrzeni składowych odkształceń, a zmiany poszczególnych składowych odkształceń są nieproporcjonalne do siebie. Efekt dodatkowego wzmocnienia uwiadcza się w postaci rosnącego promienia spirali, jaką zakreśla wektor naprężeń w przestrzeni składowych naprężeń w kolejnych cyklach obciążenia (Rys. 7). Przyjmuje się, że dodatkowe wzmocnienie jest wywołane dużą liczbą czynnych systemów poślizgu, tworzonych przy złożonym obciążeniu o ciągłej zmianie kierunku obciążenia.

Wyniki badań zachowania się metali przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych są zwykle ilustrowane przy pomocy pokazanych wyżej wykresów spiralnego narastania odpowiedzi materiału w naprężeniach przy wymuszeniu zadawanym w odkształceniu, albo w postaci wykresów poszczególnych składowych naprężeń jako funkcji odpowiadających składowych odkształceń.

Przedstawienie zarejestrowanych zmiennych tego procesu w postaci parametrycznej, jako funkcji czasu uwypukla wyraźne przesunięcie fazowe składowych naprężeń w stosunku do odpowiadających składowych odkształceń. Fakt ten nie był eksponowany w dotychczasowej literaturze naukowej, a stanowi istotę zjawiska dodatkowego wzmocnienia metali przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych, w porównaniu do obciążeń o proporcjonalnych zmianach obu składowych odkształceń.

Przebieg tego doświadczenia w takiej właśnie, parametrycznej postaci przedstawiono na Rys. 8 dla początkowego etapu obciążenia, obejmującego cykl dojścia do kołowej drogi obciążenia i pierwszy cykl zmian obciążenia. Zaznaczono przebiegi składowych odkształceń osiowych i postaciowych, które były zmiennymi sterującymi przebiegiem obciążenia próbki. W pierwszym



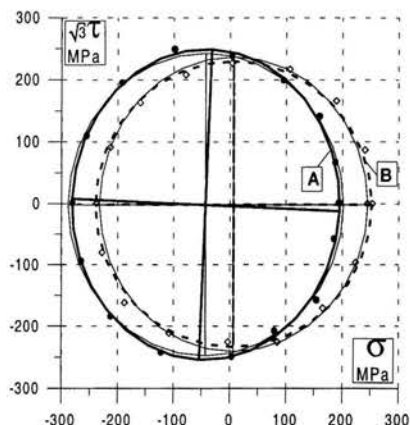
Rys. 8. Parametryczne przedstawienie przebiegu pierwszego cyklu nieproporcjonalnego obciążania

etapie jednoosiowego rozciągania, z chwilą osiągnięcia żądanej wartości odkształceń równych 0,65%, naprężenie osiowe osiąga synchronicznie z odkształceniem wartość maksymalną. Materiał jest już w stanie plastycznym. Dalsze zmiany składowych odkształceń zapewniają obciążanie próbki po kołowej drodze. Następuje odciążanie w kierunku osiowym i narastanie składowej wynikającej ze skręcania próbki. Składowe odkształcenia osiowego i postaciowego są przesunięte względem siebie w fazie o 90° , przy zachowaniu stałej wartości efektywnych odkształceń całkowitych.

Z chwilą osiągnięcia kołowej drogi deformacji obserwuje się wyraźne przesunięcie fazowe składowych naprężeń w stosunku do odpowiadających składowych odkształceń. Naprężenie osiowe jest opóźnione w stosunku do przebiegu odkształcenia osiowego i naprężenie postaciowe jest również opóźnione w stosunku do odkształcenia postaciowego. Jest to widoczne na Rys. 8, zwłaszcza w zwrotnych punktach cyklicznie zmieniających się sygnałów pomiarowych. Kąt opóźnienia składowych naprężeń w stosunku do odpowiadających składowych odkształceń jest największy przy wejściu na kołową ścieżkę obciążenia i w rozpatrywanym przypadku osiąga wartość 34, w momencie, gdy odkształcenie postaciowe jest największe. W kolejnych punktach szczytowych stopniowo maleje i od drugiego cyklu kołowego ustala się na wartości około 26. Wartości zmierzone dla obu składowych obciążenia różnią się bardzo nieznacznie między sobą.

Fakt wystąpienia opóźnienia fazowego między naprężeniami i odkształceniami wskazuje na pozorne, lepko-plastyczne zachowanie się materiału przy kołowej drodze deformacji próbki. Wpływ tej pozornej lepkości manifestuje się w sposób wyraźny i określa zachowanie się materiałów metalicznych przy nieproporcjonalnych drogach obciążenia. Podkreślić należy, że przy cyklicznych, proporcjonalnych obciążeniach w jednoosiowych i złożonych stanach naprężenia o takiej samej amplitudzie i prędkości obciążeń te same materiały nie przejawiają takich cech i nie obserwuje się wówczas przesunięcia fazowego naprężeń w stosunku do odpowiadających odkształceń.

Następnym etapem było wyznaczenie na tej samej próbce warunku plastyczności dla materiału po uprzedniej deformacji kołowej o amplitudzie efektywnych odkształceń równej 0,65%. Obraz tego warunku i jego porównanie z poprzednio wyznaczonym warunkiem plastyczności materiału w stanie dostawy umożliwiła ocenę zmian właściwości plastycznych materiału pod wpływem cy-



Rys. 9. Warunek plastyczności, A: stan dostawy, B: po cyklicznej kołowej deformacji

klicznej deformacji kołowej. Wyniki pomiarów obrazu warunku plastyczności przedstawiono linią przerywaną na Rys. 9 razem z początkowym warunkiem plastyczności. Krzywa obrazująca zakres sprężysty i uplastycznienie przesuwa się do początku układu współrzędnych pod wpływem nieproporcjonalnej deformacji cyklicznej. Wymiary krzywej warunku plastyczności nie ulegają wyraźnej zmianie w stosunku do wymiarów w stanie początkowym, a ich charakter jest taki sam. Podstawowa różnica związana jest z poziomem naprężeń resztkowych, obrazowanych przesunięciem środka krzywej uplastycznienia w stosunku do początku układu współrzędnych.

Ważnym efektem nieproporcjonalnej deformacji cyklicznej jest redukcja naprężeń resztkowych i sprowadzenie warunku plastyczności do początku układu współrzędnych. Badany materiał jest dobrze opisany warunkiem plastyczności Hubera–Misesa, przedstawionym graficznie na Rys. 9 w postaci okręgu wykreślonego linią cienką.

Wyróżniającą cechą nieproporcjonalnych obciążeń cyklicznych jest zmiana kierunku naprężenia w stosunku do osi próbki w jednym cyklu obciążenia. Jest to bardzo ważne, zwłaszcza z punktu widzenia zastosowań inżynierskich, i daje możliwość oceny wpływu zmiany kierunku obciążeń na właściwości wytrzymałościowe materiałów konstrukcyjnych. Badania doświadczalne przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych są systematycznie rozwijane w wielu laboratoriach badawczych, a tematyka ta jest ważnym punktem tematycznych konferencji naukowych [19, 20]. Jest wielce prawdopodobne, że badania przy nieproporcjonalnych obciążeniach cyklicznych będą, w niedalekiej już przyszłości, krytycznym testem materiałowym umożliwiającym syntetyczną ocenę wytrzymałościową materiału, uwzględniającą wzajemne oddziaływanie wielu systemów poślizgu uruchamianych w zależności od kierunku naprężenia.

7 Badania rozwoju uszkodzeń materiałów

Proces kumulacji uszkodzeń prowadzący do zniszczenia materiałów jest, z oczywistych względów jednym z najważniejszych czynników projektowania elementów maszyn i konstrukcji. Pro-

ces ten związany jest ze zmiennymi obciążeniami, na jakie narażona jest zdecydowana większość konstrukcji inżynierskich. Wpływ zmiennych obciążeń na zniszczenie konstrukcji został dostrzeżony już blisko dwieście lat temu (rok 1838, prace Alberta), a szersze badania procesu zmęczenia metali pod wpływem obciążeń cyklicznych zapoczątkowane były pracami Wöhlera w 1860 roku. Problemy zniszczenia i zmęczenia metali stanowią od lat podstawowy problem współczesnej techniki, jest to jedna z gałęzi mechaniki doświadczalnej bezpośrednio związana z zastosowaniami inżynierskimi i rozwijana intensywnie na całym świecie. Liczba publikowanych corocznie prac naukowych z tego zakresu znacznie przewyższa publikacje ze wszystkich innych gałęzi inżynierii mechanicznej.

Zmęczenie metali jest główną przyczyną zniszczenia elementów maszyn i konstrukcji podlegających cyklicznie zmiennym obciążeniom eksploatacyjnym. Procedury projektowania powinny zapewnić bezpieczne użytkowanie, ale każda niepewność metod obliczeniowych powoduje konieczność wprowadzania dużych współczynników bezpieczeństwa. Przewymiarowanie konstrukcji powoduje zwiększenie jej ciężaru, obniżenie sprawności działania, ale nie chroni przed rozwojem uszkodzeń zmęczeniowych i w konsekwencji katastroficznym zniszczeniem. Doskonalenie materiałów konstrukcyjnych i technologii ich przetwarzania nie stanowi rozwiązania problemu, jeśli nie potrafimy w pełni wykorzystać ich właściwości mechanicznych w procesie projektowania. Rozwój techniki związany z efektywniejszym wykorzystaniem materiałów, zwiększeniem efektywności i obciążeń eksploatacyjnych wymaga opracowania odpowiednio czułych technik badawczych umożliwiających obserwację procesu zniszczenia.

Badania doświadczalne procesu zniszczenia materiałów konstrukcyjnych zmierzały najpierw do określenia wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. Rozwój mechaniki pękania doprowadził do rozwoju technik doświadczalnych umożliwiających wyznaczenie krytycznych parametrów rozprzestrzeniania się pojedynczej i sztucznie utworzonej szczeliny. Wyniki badań doświadczalnych tego typu dostarczają danych porównawczych i umożliwiają klasyfikację materiałów konstrukcyjnych pod względem ich odporności na kruche pęknięcie. Doskonalenie teoretycznego opisu procesu zniszczenia materiałów i wprowadzenie tego opisu do programów obliczeń inżynierskich związane jest z możliwością precyzyjnej obserwacji rozwoju zniszczenia we wszystkich jego fazach, od powstawania wad struktury poprzez ich stabilny rozwój do katastroficznego rozprzestrzeniania się szczeliny dominującej. Badania takie w połączeniu z oceną stopnia degradacji cech wytrzymałościowych materiałów pod wpływem cyklicznych obciążeń będą niewątpliwie intensywnie rozwijane w najbliższym czasie.

Doskonalenie metod pomiarowych i poszukiwanie dobrze określonej i mierzalnej miary uszkodzenia materiału, określanie trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie czasu i prędkości rozwoju uszkodzeń w poszczególnych fazach procesu zniszczenia będzie wytyczać zasadnicze kierunki badań doświadczalnych w zakresie uszkodzeń struktury materiału i zniszczenia pod wpływem różnorodnych obciążeń eksploatacyjnych.

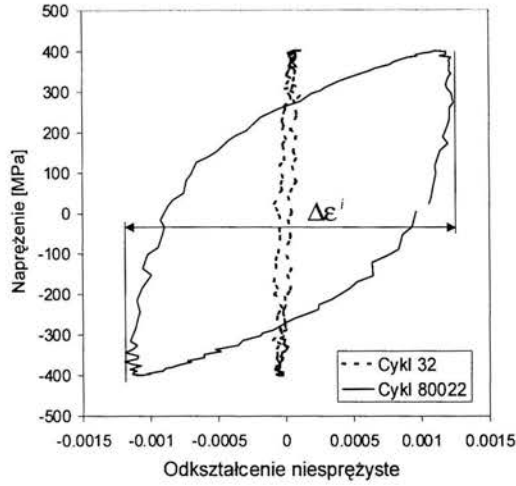
Akumulacja uszkodzeń zmęczeniowych i degradacja cech wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych w trakcie eksploatacji stanowi od lat istotny problem praktyki inżynierskiej nierozłącznie związany ze zwiększaniem zakresu obciążeń cyklicznie zmiennych, wynikających z rosnących prędkości pojazdów czy poszerzaniem dopuszczalnych parametrów pracy maszyn i urządzeń. W całym procesie uszkodzenia można wyróżnić: (1) okres początkowy, w którym materiał pracuje w zakresie sprężystym z lokalnymi obszarami plastycznymi w otoczeniu koncentracji naprężeń, (2) okres powstawania, powiększania się i łączenia małych pęknięć i wad struktury

prowadzących do utworzenia pęknięcia dominującego, (3) trzeci okres — rozprzestrzenianie się ukształtowanego już pęknięcia w całym przekroju konstrukcji.

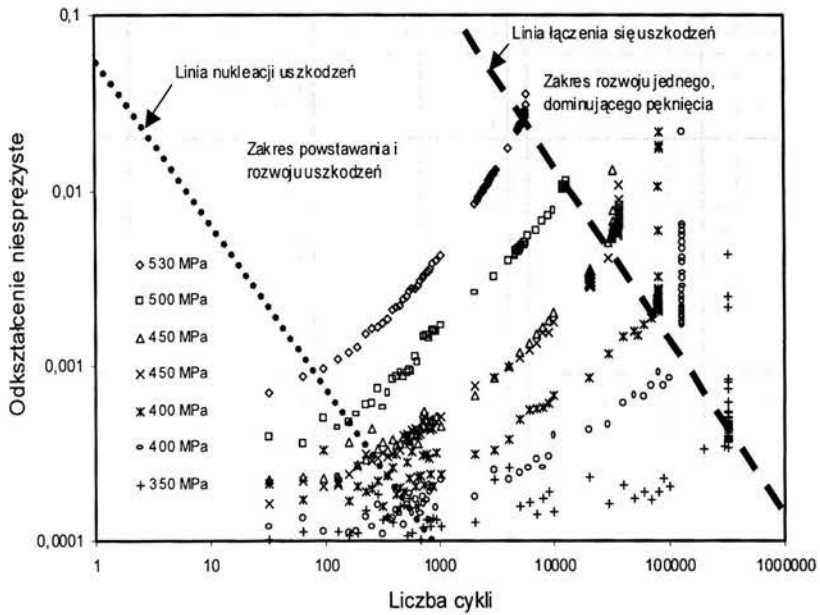
Obserwacja doświadczalna rozwoju uszkodzeń w każdym z tych trzech okresów wymaga innych technik pomiarowych. Miara uszkodzeń przyjmowana w rozważaniach teoretycznych, a zaproponowana przez Kaczanowa jako stosunek objętości pustek do całej objętości materiału, nie jest wygodna w badaniach doświadczalnych, w których stosuje się różne odmiany metod optycznych, czy obserwacje zmian pola elektrycznego, magnetycznego, temperatury lub właściwości mechanicznych (np. modułu sprężystości, gęstości). Metody te nie mają uniwersalnego charakteru i są dobrane w zależności od badanego okresu rozwoju uszkodzeń. Obiecującą i sprawdzoną już w badaniach doświadczalnych jest propozycja definiowania parametru uszkodzenia na podstawie pomiaru niesprężystych odkształceń generowanych w cyklu obciążenia [21]. Odkształcenia niesprężyste związane są z lokalnymi obszarami plastycznymi wokół pęknięć i są mierzalne od początku drugiego okresu powstawania i stabilnego wzrostu uszkodzeń. Technika ta, podobnie jak pomiary zmiany podatności próbki, umożliwia ciągłą rejestrację rozwoju uszkodzeń w całym zakresie żywotności próbki i stanowi dobre narzędzie analizy procesu zniszczenia i degradacji właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w trakcie eksploatacji.

Dobrym przykładem wykorzystania pomiarów niesprężystych odkształceń przy cyklicznym obciążaniu były badania [22] procesu zniszczenia zmęczeniowego pewnego gatunku stali. Mała próbka klepsydryczna zamocowana była w specjalnie zaprojektowanym uchwycie zapewniającym osiowe przenoszenie obciążeń z maszyny wytrzymałościowej i umożliwiającym obciążanie przy symetrycznych cyklach rozciągania i ściskania. Mierzono zmianę średnicy próbki w trakcie cyklu obciążania, a rejestracja tych zmian jako funkcji liczby cykli umożliwiła śledzenie rozwoju uszkodzeń. Pomiar zmian średnicy daje w rezultacie sumaryczną ocenę rozwoju uszkodzeń w całym, najmniejszym przekroju próbki. Odkształcenia niesprężyste związane z rozwojem odkształceń plastycznych wokół powiększanych i nowopowstałych pęknięć uzyskuje się z odjęcia odkształceń sprężystych od mierzonych odkształceń całkowitych, a ich typowy przebieg w dwóch wybranych cyklach dla amplitudy naprężeń równej 400 MPa przedstawiono na Rys. 10. Zestawienie wyników doświadczalnych dla różnych wartości amplitudy naprężeń przedstawiono we współrzędnych logarytmicznych na Rys. 11.

Zmierzone wartości odkształceń niesprężystych, przedstawione jako funkcje bieżącej liczby cykli, układają się wyraźnie wzdłuż linii charakterystycznych dla trzech zakresów żywotności próbki, krótkiego zakresu bez przyrostów odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach, najdłuższego zakresu stabilnych przyrostów odkształceń niesprężystych i krótkiego zakresu gwałtownego wzrostu odkształceń niesprężystych bezpośrednio poprzedzającego zniszczenie próbki. Punkty graniczne poszczególnych zakresów dla różnych amplitud naprężeń wyznaczają linie obszarów powstawania i stabilnego wzrostu uszkodzeń i wzrostu jednego, dominującego pęknięcia. Zaletą przedstawionego sposobu badań procesu zniszczenia jest możliwość śledzenia różnych faz powstania i rozwoju uszkodzeń naturalnych, a nie tylko sztucznie inicjowanych. Dane doświadczalne umożliwiają określenie zależności aproksymujących rozwój uszkodzeń w poszczególnych jego fazach, jak i granice poszczególnych obszarów. Technika ta jest spójna z innymi sposobami oceny właściwości wytrzymałościowych materiałów, dając wartości graniczne zgodne z danymi krzywej Wöhlera, czy wytrzymałości doraźnej wyznaczonej z krzywej jednoosiowego rozciągania.



Rys. 10. Pętle odkształceń sprężystych dla cyklu 32 i 80022 przy stałej amplitudzie naprężenia



Rys. 11. Trzy fazy rozwoju uszkodzeń mierzonych szerokością pętli odkształceń niesprężystych jako funkcji liczby cykli dla różnych amplitud naprężenia

Najważniejszą jednak zaletą tej techniki jest możliwość rozszerzenia badań na inne jednoosiowe i złożone stany naprężeń z uwzględnieniem nieproporcjonalnych ścieżek obciążeń. Umożliwi to prowadzenie badań doświadczalnych przy zmiennych kierunkach naprężeń w jednym cyklu obciążenia. Zmiana kierunku naprężenia będzie uaktywniać różnie ukierunkowane w stosunku do osi próbki uszkodzenia, stwarzając w rezultacie krytyczne warunki rozwoju uszkodzeń w objętości próbki. Nieproporcjonalne obciążenia cykliczne będą stanowić krytyczny test rozwoju uszkodzeń ukształtowanych w procesie wytwórczym półwyrobu. Badania te będą rozwinięciem próby śledzenia rozwoju sztucznie utworzonego, pojedynczego pęknięcia oraz próby rozwoju uszkodzeń w wybranej płaszczyźnie związanej z zadaniem i stałym kierunkiem naprężenia w cyklu.

Rozwój badań doświadczalnych procesu zniszczenia materiałów konstrukcyjnych będzie koncentrował się, z jednej strony na dalszym poszukiwaniu właściwej, mierzalnej miary uszkodzeń umożliwiającej ocenę stopnia uszkodzenia i degradacji właściwości wytrzymałościowych oraz na doskonaleniu technik pomiarowych w tym zakresie. Wykorzystanie zmian odkształceń niesprężystych i podatności próbki do oceny rozwoju uszkodzenia materiałów będzie w dalszym ciągu rozwijane. Z drugiej natomiast strony, badania procesów zniszczenia materiałów będą w znacznie szerszym stopniu prowadzone w złożonych stanach naprężenia przy stałych i zmiennych kierunkach naprężenia w cyklu.

8 Badania zachowania się materiałów na pełzanie i wzajemnego oddziaływania efektów pełzania i plastyczności

Badania doświadczalne zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod wpływem stałych, ale długotrwale działających obciążeń wywołujących pełzanie, czyli ciągły przyrost deformacji, aż do zniszczenia, są nieodłącznie związane z rozwojem techniki. Zjawisko pełzania obserwuje się dla wszystkich materiałów, a jego intensywność zależy od zakresu obciążeń i temperatury. Pełzanie materiałów jest szczególnie istotne w przemyśle energetycznym dla instalacji ciśnieniowych pracujących w podwyższonych temperaturach.

Związek badań pełzania materiału z rozwojem techniki jest równie silny jak w przypadku badań zmęczenia i zniszczenia materiału. Rozwój maszyn parowych i instalacji energetycznych, nieodłącznie związany z katastroficznymi zniszczeniami zbiorników ciśnieniowych pracujących w wysokich temperaturach, doprowadził do powstania specjalnych laboratoriów badań pełzania materiałów konstrukcyjnych. Ciągły wzrost ciśnień i temperatur czynnika roboczego urządzeń energetycznych i doskonalenie materiałów konstrukcyjnych stosowanych w tych ekstremalnych warunkach pracy są główną motywacją znaczenia i rozwoju badań doświadczalnych procesu pełzania.

Proces pełzania prowadzi do zniszczenia materiału, ale jego przebieg można podzielić na trzy etapy. Pierwszy z nich charakteryzuje się malejącą prędkością odkształceń w czasie. Etap drugi przebiega przy stałej prędkości odkształceń, a w trzecim etapie jest rosnącą prędkością odkształceń, aż do zniszczenia materiału. Bezpieczny zakres pracy urządzeń i instalacji energetycznych narażonych na pełzanie ograniczony jest do drugiego etapu pełzania. Wyznaczenie bezpiecznego zakresu pracy przy pełzaniu w określonych warunkach eksploatacyjnych jest podstawowym zadaniem badań doświadczalnych pełzania materiałów konstrukcyjnych. Większość badań pełzania prowadzonych w wielu laboratoriach na całym świecie ma bezpośredni związek z zastosowaniami

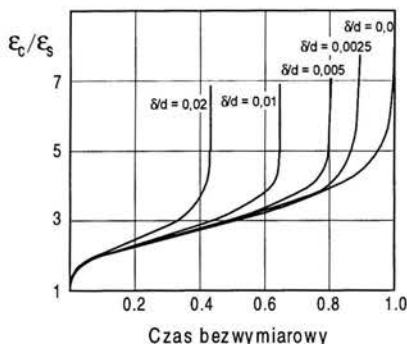
technicznymi i podobnie jak badania zmęczenia materiału prowadzona jest przy jednoosiowym stanie naprężenia. W przypadku badań pełzania tego typu stosuje się niemal wyłącznie proste rozciąganie próbek. Badania przy innych stanach naprężenia, w tym w złożonych stanach naprężenia, są wykonywane znacznie rzadziej, mimo że są to badania niezbędne do prawidłowego opisanie zachowania się materiału w warunkach pełzania i do wyznaczenia rodzaju i parametrów modelu teoretycznego, niezbędnego do obliczeń wytrzymałościowych i projektowania inżynierskiego elementów konstrukcyjnych pracujących w podwyższonych temperaturach i przy obciążeniach wywołujących pełzanie.

Rozwój badań pełzania będzie w dalszym ciągu bardzo ściśle związany z zastosowaniami inżynierskimi, w których systematyczne zwiększanie obciążeń mechanicznych i termicznych wynikające z doskonalenia sprawności urządzeń energetycznych będzie stymulować zapotrzebowanie na badania pełzania w różnych warunkach eksploatacyjnych. Rozwój badań pełzania będzie związany, z jednej strony z doskonaleniem technik badawczych zapewniających precyzyjne dane doświadczalne dla badanego materiału, a z drugiej strony będzie dotyczył rozszerzenia zakresu badań na złożone stany naprężenia umożliwiające doskonalenie opisu teoretycznego zjawiska pełzania niezbędnego do racjonalnego wykorzystania nowoczesnych technik obliczeń wytrzymałościowych i projektowania inżynierskiego.

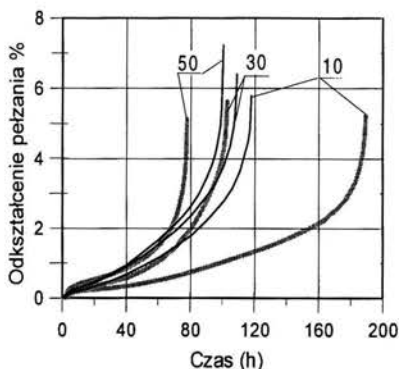
Badania zachowania się materiałów konstrukcyjnych w zakresie pełzania jest trudne i pracochłonne. Są to przede wszystkim badania długotrwałe, wyznaczenie charakterystyki pełzania w typowym zakresie 10000 godzin to ponad 400 dni utrzymania stałego obciążenia jednej próbki w stałej temperaturze. Podwyższone temperatury stwarzają nie tylko dodatkowe trudności z pomiarem zmian odkształceń próbki, ale przede wszystkim z zapewnieniem jednorodnego pola odkształceń na długości pomiarowej próbki. Związane jest to z zaburzeniami jednorodności rozkładu temperatury wzdłuż długości próbki, wynikającymi z odprowadzenia ciepła przez układ zamocowania próbki oraz z zaburzeniami jednorodności pola odkształceń próbki wynikającymi z dodatkowych więzów układu do zamocowania ekstensometru do pomiaru zmian długości próbki.

Zapewnienie jednorodnego stanu odkształcenia na długości pomiarowej próbki jest podstawowym warunkiem wyznaczenia charakterystyki materiału na pełzanie. Szczególnie ważne jest zapewnienie osiowości przyłożonej siły i minimalizacja wpływu wspomnianego wyżej usztywnienia próbki w miejscach zamocowania ekstensometru do próbki. Każdy z tych czynników ma istotne znaczenie na przebieg próby pełzania, a w wielu przypadkach uniemożliwia wyznaczenie cech materiałowych. Wyniki badań nie określają wówczas zachowania się materiału, a jedynie charakterystykę badanej próbki i stosowanego urządzenia badawczego. Wpływ sposobu i warunków badań został określony stosunkowo niedawno, a ilościowe wyniki badań doświadczalnych poświęconych tym efektom wskazują na konieczność bardzo starannego przygotowania badań pełzania [23–25]. Wpływ nieosiowości zamocowania powodującej zginanie próbki zilustrowano na Rys. 12 dla próbki ze stali stopowej [23]. Nieosiowość definiowano jako procentową różnicę odkształceń po przeciwnych stronach na powierzchni próbki. Niewielkie błędy w osiowym przyłożeniu obciążenia mają istotny wpływ na prędkość pełzania i czas trwania poszczególnych okresów pełzania.

Dodatkowe więzy, jakie powstają z powodu umieszczenia małego występu na części pomiarowej próbki służącego do zamocowania urządzenia do pomiaru odkształceń w trakcie badań pełzania mają równie silny wpływ na rejestrowaną charakterystykę. Efekt ten zilustrowano na Rys. 13 przedstawiającym zmiany odkształceń części pomiarowej próbek z tego samego materiału, ale



Rys. 12. Wpływ niewspółosiowości układu obciążającego na czas do zniszczenia przy pełzaniu

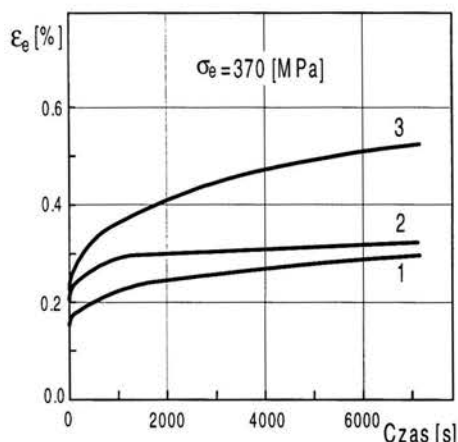


Rys. 13. Porównanie krzywych pełzania dla pełnych (linie cienkie) i poprzecinanych występów (linie grube) do mocowania ekstensometrów

z różnie ukształtowanymi występami do zamocowania ekstensometru [24]. Zmiany prędkości pełzania i czasu trwania poszczególnych okresów zależą bardzo silnie od stopnia zakłócenia jednorodności stanu odkształcenia na części pomiarowej. Linie ciągłe odnoszą się do próbek o długościach części pomiarowych równych odpowiednio 10, 30 i 50 mm z pełnymi występami na całym obwodzie próbki służącymi do zamocowania ekstensometru. Linie przerywane dotyczą próbek o takich samych długościach części pomiarowej, ale z występami wyfrezowanymi na obwodzie, zmniejszającymi ich sztywność obwodową. Wszystkie próbki były obciążone taką samą siłą rozciągającą. Wyniki pomiarów wskazują na silny wpływ długości pomiarowej próbki i konstrukcji występów wykorzystywanych do zamocowania ekstensometru. Wpływ ten będzie zawsze zakłócał wynik pełzania, a w skrajnych przypadkach prowadzi do zafałszowania wyników, które dotyczą jedynie zachowania się określonej próbki przy pełzaniu i nie mogą być odnoszone do materiału.

Podobny wniosek dotyczy również wpływu złego zamocowania próbki wywołującego jej zginanie w trakcie pełzania. Istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg pełzania jest również prędkość przykładania obciążenia w trakcie rozpoczęcia badań. Przytoczone wyniki są tylko ilustracją problemu jakości badań, co w przypadku pełzania jest szczególnie istotne ze względu na długotrwałość i koszt badań, ale też na fałszywy opis zachowania się materiałów przy długotrwałych obciążeniach. Techniki i urządzenia badawcze są doskonałe w sposób ciągły we wszystkich rodzajach badań materiałowych. Również i w badaniach pełzania można przewidywać rozwój zmierzający do poprawy jakości i wiarygodności wyników badań przy długotrwałych obciążeniach wywołujących pełzanie materiałów konstrukcyjnych.

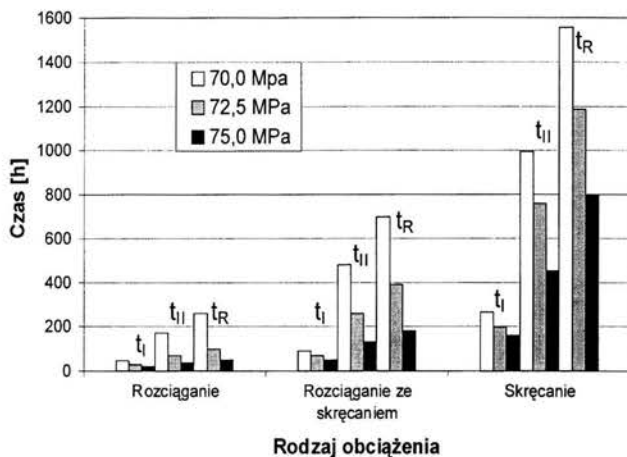
Zasadniczy kierunek rozwoju badań pełzania materiałów konstrukcyjnych w najbliższym czasie będzie związany z uwzględnieniem wpływu rodzaju stanu naprężenia na zachowanie się materiałów przy długotrwałych obciążeniach. Badania w złożonych stanach naprężenia mają podstawowe znaczenie dla rozwoju teoretycznych opisów pełzania, ale nie mogą być pominięte w zagadnieniach inżynierskich. Badania pełzania w złożonych stanach naprężenia są znacznie trudniejsze od powszechnie wykonywanych badań w jednoosiowych stanach naprężenia. Realizacja złożonego stanu naprężenia wymaga projektowania specjalnych układów obciążających, a konieczność



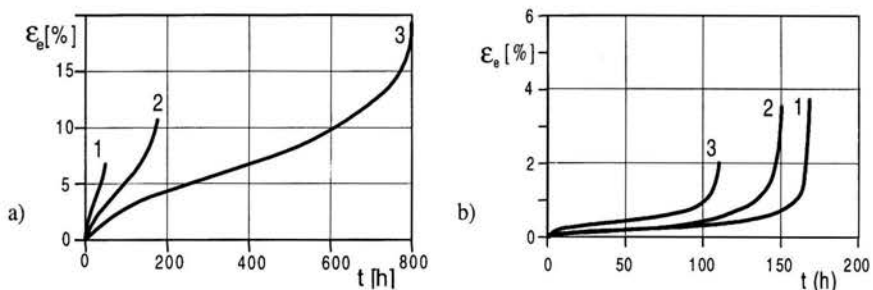
Rys. 14. Porównanie krzywych pełzania dla stali 15HM przy takim samym ekwiwalentnym naprężeniu 370 MPa, ale przy trzech różnych stanach naprężenia, przy rozciąganiu (1), skręcaniu (3) i rozciąganiu ze skręcaniem (2)

zapewnienia stałości obciążeń w długim okresie czasu i eliminacji wzajemnego wpływu układów obciążeniowych, czy zapewnienia osiowości obciążenia złożonego stwarza dodatkowe trudności. Badania pełzania przeprowadzane w warunkach złożonego stanu naprężenia są znacznie skromniej reprezentowane w literaturze światowej, ale wszystkie prezentowane wyniki wskazują na istotne znaczenie rodzaju i kierunku stanu naprężenia na pełzanie materiałów konstrukcyjnych. Wpływ stanu naprężenia na pełzanie był często obserwowany w przypadku materiałów wykazujących izotropowe właściwości w zakresie plastycznym, przy wyznaczaniu doraźnych cech wytrzymałościowych. Ogólny wniosek wynikający z badań dotychczasowych wskazuje na znacznie silniejszy wpływ stanu naprężenia na pełzanie materiału w porównaniu do plastyczności. Wpływ ten przejawia się zależnością odkształceń i prędkości pełzania oraz czasu trwania poszczególnych okresów pełzania od stanu naprężenia. Zależność charakterystyki pełzania od rodzaju stanu naprężenia ilustrują dane doświadczalne dla stali kotłowej 15HM przedstawione na Rys. 14 [26]. Różnice w wartościach odkształceń pełzania i prędkościach pełzania w zależności od rodzaju stanu naprężenia są znaczne i nie mogą być pominięte w zastosowaniach inżynierskich. Dane przedstawione na Rys. 14 dotyczą pełzania przy dużych wartościach naprężenia ekwiwalentnego, nieco poniżej górnej granicy plastyczności równej 375 MPa. Krzywe pełzania ograniczone są do ustalenia prędkości pełzania, co w rozpatrywanym przypadku obserwuje się po dwóch godzinach.

Podobnie znaczący wpływ złożonego stanu naprężenia obserwuje się dla wszystkich zakresów pełzania i dla różnych materiałów. Zmiany czasu trwania poszczególnych okresów pełzania dla miedzi przy trzech różnych poziomach ekwiwalentnych naprężeń otrzymane przy jednoosiowym rozciąganiu ($\Theta_\sigma = 0^\circ$), rozciąganiu ze skręcaniem ($\Theta_\sigma = 45^\circ$) i przy czystym skręcaniu ($\Theta_\sigma = 90^\circ$) przedstawiono na Rys. 15 [27]. Doświadczenia przeprowadzono w temperaturze 523K, a wyniki potwierdzają istotny wpływ stanu naprężenia na charakterystyczne parametry krzywej pełzania materiałów konstrukcyjnych. Wpływ ten jest zawsze wyraźny, ale w zależności od rodzaju materiału może przybierać różne formy. Porównanie kształtu i położenia krzywych



Rys. 15. Porównanie czasów trwania trzech okresów pełzania dla miedzi przy trzech wartościach ekwiwalentnych naprężeni i przy trzech różnych stanach naprężenia, przy rozciąganiu, skręcaniu i rozciąganiu ze skręcaniem



Rys. 16. Krzywe pełzania przy trzech różnych stanach naprężenia, przy rozciąganiu (1), skręcaniu (3) i rozciąganiu ze skręcaniem (2); (a) dla miedzi w temperaturze 523 K przy takim samym ekwiwalentnym naprężeniu 75 MPa, (b) dla stopu aluminium w temperaturze 423 K przy takim samym ekwiwalentnym naprężeniu 320 MPa

pełzania miedzi i stopu aluminium (Rys. 16 [28, 29]) wskazuje na różną wrażliwość materiałów konstrukcyjnych na złożony stan naprężenia. Kolejność krzywych pełzania dla stopu aluminium (Rys. 16b) jest podobna jak dla stali kotłowej (Rys. 14). Największe odkształcenia ekwiwalentne obserwuje się dla tych materiałów przy skręcaniu, a najmniejsze przy rozciąganiu. Natomiast dla miedzi kolejność krzywych pełzania (Rys. 16a) jest odwrotna. Przy rozciąganiu występują największe odkształcenia pełzania, a przy rozciąganiu najmniejsze.

Złożony stan naprężenia ma istotny wpływ na pełzanie materiałów konstrukcyjnych, a stopień wrażliwości pełzania na stan naprężenia zależy od rodzaju materiału. Efekty te nie wynikają z rozważań teoretycznych i mogą być określone jedynie na podstawie danych doświadczalnych. Badania doświadczalne pełzania materiałów konstrukcyjnych w warunkach złożonego stanu na-

prężenia będą się niewątpliwie rozwijały w najbliższym czasie, pomimo istotnych trudności w ich wykonaniu.

Drugim ważnym czynnikiem stymulującym rozwój badań pełzania będzie doskonalenie technik badawczych, rozwijanie systemów pomiarowych i weryfikacja wiarygodności uzyskiwanych danych doświadczalnych.

9 Badania nowych materiałów, w tym materiałów funkcjonalnych nie tylko przenoszących określone obciążenie, ale reagujących w określony sposób na zewnętrzne warunki obciążenia

Własności mechaniczne materiałów nowej generacji zwanych materiałami funkcjonalnymi, które mają zdolność dostosowania swoich właściwości do warunków obciążenia, są bardzo skomplikowane w porównaniu ze standardowymi materiałami konstrukcyjnymi. Znajomość zachowania się takich materiałów pod wpływem różnych, termomechanicznych rodzajów obciążeń ma podstawowe znaczenie dla ich inżynierskich zastosowań. Ważną grupę materiałów funkcjonalnych stanowią materiały podlegające przemianom fazowym pod wpływem zmian temperatury i obciążeń zewnętrznych. Materiały te cechują się zdolnością pamięci kształtu umożliwiającą powrót pod wpływem zmian temperatury do stanu wcześniej utrwalonego, mimo poprzedzających deformacji wywołanych obciążeniami mechanicznymi. Cecha ta stwarza zupełnie nowe możliwości wykorzystania tego rodzaju materiałów z pamięcią kształtu, a zakres ich zastosowań technicznych jest ciągle powiększany.

Charakterystyka termomechaniczna materiałów z pamięcią kształtu określona jest zależnością granicznych naprężeń i temperatur przemian fazowych. Zależności te wyznaczone są doświadczalnie, a większość badań przeprowadzana była przy jednoosiowych stanach naprężenia, zwykle przy prostym rozciąganiu. Badania tego typu nie dają żadnych podstaw do oceny wpływu rodzaju stanu naprężenia, czy choćby tylko kierunku stanu naprężenia w stosunku od osi próbki na zachowanie się takich materiałów pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Ocena taka jest podstawą wykorzystania tych nowych materiałów w zastosowaniach technicznych i stanowi punkt wyjścia do opisu teoretycznego i modelowania zachowania się materiału w różnych warunkach obciążenia.

Badania w złożonych stanach naprężenia dla nowo wprowadzanych materiałów konstrukcyjnych o nowych cechach wytrzymałościowych będą niewątpliwie intensywnie rozwijane w najbliższym czasie nie tylko ze względu na ważne i istotne wymogi weryfikacji założeń teoretycznych, ale przede wszystkim ze względu na istotny wpływ kierunku i rodzaju stanu naprężenia na charakterystykę tych materiałów. Wpływ stanu naprężenia na zachowanie się stopów z pamięcią kształtu jest już udokumentowany doświadczalnie i fakt ten nie może być pominięty w planowaniu dalszych badań i przy wprowadzaniu nowych materiałów.

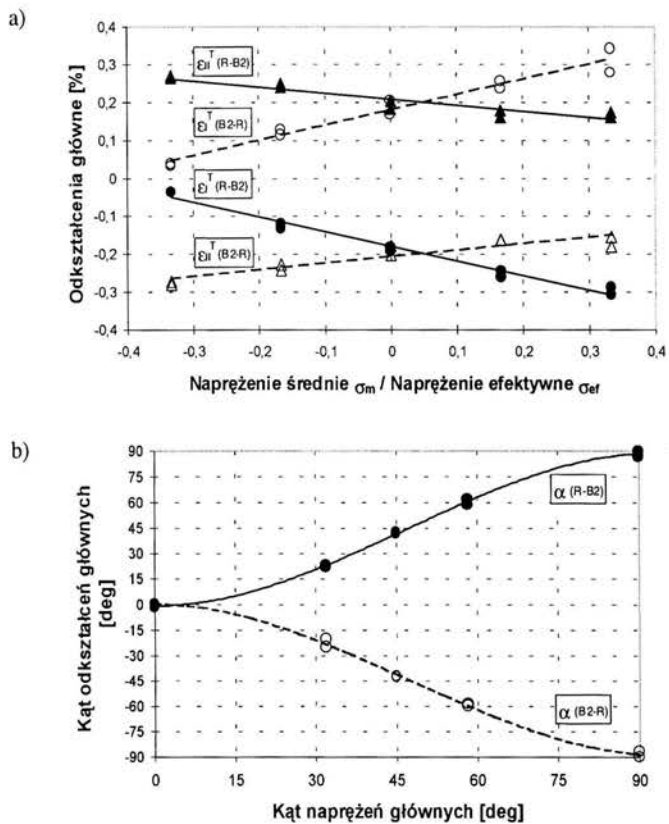
Dobrą ilustracją znaczenia badań w złożonych stanach naprężenia dla materiałów z pamięcią kształtu są wyniki badań doświadczalnych [30] odkształceń przemian fazowych indukowanych termicznie przy różnych stanach naprężenia wywołanych w cienkościennej próbce rurkowej przez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego. Próbka rurkowa wykonana ze stopu TiNi była obciążana przy pięciu różnych stanach naprężenia do ustalonej wartości naprężeń ekwiwalentnych, następnie była ogrzewana do temperatury 373 K, chłodzona do temperatury 270 K i ponownie ogrzewana do 373 K. Cykle zmian temperatury realizowano dla próbki w stanie swo-

bodnym, przy zerowych naprężeniach, dla pięciu proporcjonalnych ścieżek obciążenia (jednoosiowe rozciąganie, czyste skręcanie, jednoosiowe ściskanie, rozciąganie ze skręcaniem i ściskanie ze skręcaniem) przy dwóch wartościach naprężenia ekwiwalentnego równego 50 i 100 MPa. Wykonano jedenaście pomiarów zmian składowych odkształceń generowanych przemianą fazową pod wpływem zmian temperatury dla różnych stanów naprężenia uprzednio nałożonych na próbkę i utrzymywanych w całym cyklu termicznym. W trakcie chłodzenia próbki ma miejsce przemiana austenitu w fazę R, a przy ogrzewaniu faza R przechodzi w austenit. Zmiany fazowe obserwowano jako zmiany składowych odkształceń mierzonych wzdłuż osi i obwodu próbki oraz wzdłuż linii nachylonych pod kątem $+45^\circ$ i -45° do osi próbki. Odkształcenia mierzono za pomocą czterech tensometrów elektrooporowych, naklejonych pod różnymi kątami na powierzchni próbki. Składowe odkształceń przemiany fazowej obliczano z zarejestrowanego sygnału, po wyeliminowaniu zmian wywołanych wrażliwością tensometru na zmiany temperatury i rozszerzalnością termiczną samej próbki w stanie austenicznym. Wyznaczone w ten sposób zmiany składowych odkształceń przemian fazowych zachodzących w cyklu termicznym umożliwiły określenie charakterystycznych wartości temperatur przemian fazowych zachodzących przy różnych stanach naprężenia oraz określenie głównych składowych odkształceń przemiany fazowej i kąta ich nachylenia w stosunku do osi próbki przy pięciu rodzajach stanów naprężeń.

Stan odkształceń przemian fazowych zachodzących pod wpływem zmian temperatury przy nałożonych pięciu różnych stanach naprężenia przedstawiono na Rys. 17. Wartości dwóch składowych odkształceń głównych przedstawione są na Rys. 17a jako funkcje stosunku naprężenia średniego do naprężenia efektywnego, określającego współczynnik trójosiowości stanu naprężenia. Punkty doświadczalne dla obu przemian zachodzących odpowiednio przy chłodzeniu i grzaniu próbki są dobrze opisane liniami prostymi. Stosunek σ_m/σ_{ef} dla różnych stanów naprężenia przyjmuje wartości: -0.33 dla ściskania, -0.16 dla ściskania ze skręcaniem, 0 dla czystego skręcania, 0.16 dla rozciągania ze skręcaniem i 0.33 dla rozciągania. Składowe główne odkształceń transformacji fazowej powstałej przy zmianie temperatury są liniową funkcją stosunku σ_m/σ_{ef} nałożonego stanu naprężenia. Wartość głównej składowej odkształceń ε_T^T przy ścisaniu odpowiadająca składowej obwodowej ε_θ^T jest równa wartości odkształceń transformacji fazowej otrzymanej przy zerowym stanie naprężeń (próbka tylko ogrzewana).

Kąt naprężeń głównych przedstawiony na Rys. 17b wynosi 0° , 31.7° , 45° , 58.3° i 90° odpowiednio dla ścieżki rozciągania, rozciągania i skręcania, czystego skręcania, ściskania ze skręcaniem i ściskania. Odpowiadające wartości kątów głównych odkształceń transformacji wynoszą 0° , $\pm 23^\circ$, $\pm 41.5^\circ$, $\pm 60^\circ$ i $\pm 90^\circ$, gdzie znak $+$ dotyczy transformacji $R \rightarrow B2$ zachodzącej przy grzaniu próbki, a znak $-$ odnosi się do transformacji $B2 \rightarrow R$ zachodzącej przy chłodzeniu. Małe, ale regularne rozbieżności w wartościach kierunków głównych odkształceń transformacji fazowej i kierunku głównych naprężeń nałożonych przed cyklem termicznym wskazują, że kierunki główne odkształceń przemiany fazowej i kierunki główne naprężeń nie pokrywają się. Różnice są dobrze widoczne na Rys. 17b.

Przedstawione wyniki badań doświadczalnych mają charakter poznawczy i dostarczają danych o podstawowym znaczeniu dla opisu zachowania się tego materiału pod wpływem obciążeń. Dane takie można uzyskać jedynie na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych w złożonym stanie naprężenia. Stwierdzenie faktu, że główne odkształcenia transformacji fazowej generowanej zmianą temperatury zależą liniowo od średniej wartości nałożonego stanu naprężenia ma podstawowe znaczenie przy modelowaniu właściwości termomechanicznych tego rodzaju ma-



Rys. 17. (a) Odkształcenia główne przemian fazowych indukowanych termicznie jako funkcja stosunku nałożonego naprężenia średniego i efektywnego; (b) kąty kierunków głównych odkształceń przemian fazowych indukowanych termicznie jako funkcje kąta kierunku głównego nałożonych naprężeń

teriału. Istotne jest ujawnienie zależności kierunku odkształceń głównych transformacji fazowej zachodzącej pod wpływem zmian temperatury od kierunku nałożonego stanu naprężenia.

10 Badania zmian cech materiałów w związku z wprowadzaniem nowych technologii produkcyjnych i poszerzaniem zakresu obciążeń eksploatacyjnych

Rozwój badań doświadczalnych mechanicznych właściwości materiałów konstrukcyjnych był zawsze ściśle związany z rozwojem techniki, a zwłaszcza z nowymi technologiami, ulepszeniami procesów technologicznych, doskonaleniem ich sprawności i zwiększaniem zakresu obciążeń eksploatacyjnych. Postęp techniki stworzył zapotrzebowanie na badania wytrzymałościowe i doskonalenie technik badawczych i pomiarowych.

Podniesienie temperatury czynnika roboczego o 50°C w instalacjach energetycznych, a tym samym zwiększenie ich wydajności wymaga nie tylko rozszerzenia zakresu badań materiałowych, ale również dokonania przeglądu i oceny wytrzymałościowej instalacji istniejących. Operacje takie wykonywane były już wielokrotnie na przestrzeni ostatnich stu lat.

Wprowadzanie do praktyki inżynierskiej, w coraz szerszym stopniu technologii laserowych, a zwłaszcza laserowego spawania wymaga przeprowadzenia doświadczalnej weryfikacji wytrzymałościowej. Badania takie podejmowano ostatnio w wielu ośrodkach naukowych, w tym również w programach badawczych Unii Europejskiej.

Innym ważnym przykładem jest systematyczne powiększanie prędkości pociągów. Wprowadzenie prędkości przekraczającej 250 km/godz. wymagało opracowania nowych technik i procedur badań nieniszczących zestawów kołowych dla kontroli rozwoju uszkodzeń. Przykłady podobne można mnożyć z różnych dziedzin techniki. Istotne jest wzajemne powiązanie rozwoju techniki i rozwoju badań wytrzymałościowych, ściśle związanego z rozwojem technik i urządzeń badawczych i pomiarowych.

Kierunki rozwoju badań materiałów konstrukcyjnych związanych z wprowadzaniem nowych technologii i powiększaniem zakresu obciążeń eksploatacyjnych będą wynikać z rozwoju poszczególnych dziedzin techniki. Tym niemniej ważny jest rozwój badań wytrzymałościowych w tym zakresie i zapewnienie możliwości sprostania zwiększonemu zapotrzebowaniu na badania doświadczalne.

Bibliografia

1. Quinton Bowles C., *Fracture and Structure*, ASTM Handbook, vol. 19, *Fatigue and Fracture*, Section 1: *Introduction*, pp. 5–14, ASM International, 1996.
2. Griffith A.A., *The phenomena of rupture and flow in solids*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 221, 163–198, 1920.
3. Orowan E., *Zeitschrift der Physik*, 89, 605, 1934.
4. Irwin G.R., *Fracture dynamics*, Trans. ASM, 40A, 147–166, 1948.
5. *Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing*, DD 19: 1972, British Standards Institution.
6. *Metoda badania odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia* — PN-87/H-04335.
7. Gannon R., *What really sank the Titanic*, Popular Science, 45, Feb. 1995.

8. Kobayashi A.S., *Handbook on Experimental Mechanics*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
9. Mumford P.M., *Application of microcomputers to mechanical testing of materials*, *Metal Progress*, **118**, 3, 46–50, 1980.
10. Taylor G.I., Quinney H., *The plastic distortion of metals*, *Trans. Roy. Soc. London* 1931, Ser. A, **230**, 323–362.
11. Dietrich L., Kowalewski Z.L., *Experimental investigation of an anisotropy in copper subjected to predeformation due to constant and monotonic loadings*, *Int. J. Plasticity* **13**, 12, 87–109, 1997.
12. Szczepiński W., *On the effect of plastic deformation on yield condition*, *Arch. Mech.* **15**, 2, 275–296, 1963.
13. Szczepiński W., Dietrich L., Miastkowski J., *Plastic properties of metals*, [in:] Part one: Experimental Methods in Mechanics of Solids, W. Szczepiński [ed.], Elsevier Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, 1990.
14. Lamba H.S., Sidebottom O.M., *Cyclic plasticity for nonproportional paths*, *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, **100**, 96–110, 1978.
15. McDiarmid D.L., *Fatigue under out-of-phase bending and torsion*, *Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct.*, **9**, 6, 457–475, 1987.
16. Boller Ch., Seeger T., *Materials data for cyclic loading. Part A: Unalloyed Steels*, *Materials Science Monographs*, 42A, Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, Elsevier 1987.
17. Dietrich L., Kowalewski Z.L., *On the cyclic surface of some engineering materials under complex stress conditions*, *Arch. Mech.*, **50**, 5, 1998.
18. Calloch S., Marquis D., *Additional hardening due to tension–torsion nonproportional loadings: Influence of the loading path shape*, *Symposium on Multiaxial Fatigue and Deformation Testing Techniques*, Denver, Colorado, May 15, 1995, ASTM PCN 04-012800-30, Philadelphia, 1997.
19. Dietmann H., Bhongbhibhat T., Schmidt A., *Multiaxial behaviour of steels in the in-phase and out-of-phase loading, including different wave forms and frequencies*, [in:] *Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading*, pp. 449–464, K. Kussmaul, D. McDiarmid, D. Socie [eds.], Mechanical Engineering Publications, London, 1991.
20. Döring R., Hoffmeyer J., Seeger T., Vormwald M., *Elastic-plastic deformation under cyclic nonproportional loading as prerequisite for fatigue life prediction*, *Proceedings of the Eighth International Fatigue Congress*, 3–7 June 2002, Stockholm, A.F. Blom [ed.], vol. 1/5.
21. Fatemi A., Yang L., *Cumulative fatigue damage and life predictions theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials*, *Int. J. Fatigue*, **20**, 1, 9–34, 1998.
22. Socha G., *Experimental investigation of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel*, *Int. J. Fatigue*, (w druku).
23. Hayhurst D.R., *The effects of test variables on scatter in high-temperature tensile creep rupture data*, *Int. J. Mech. Sci.*, **16**, 829, 1974.
24. Kowalewski Z.L., Lin J., Hayhurst D.R., *Experimental and theoretical evaluation of a high-accuracy uni-axial creep testpiece with slit extensometer ridges*, *Int. J. Mech. Sci.*, **36**, 751–769, 1994.
25. Kowalewski Z.L., Lin J., Hayhurst D.R., *Investigation of a high accuracy uni-axial creep testpiece with slit extensometer ridges*, *Arch. Mech.*, **47**, 2, 1995.
26. Kowalewski Z.L., *An influence of the constant and monotonic loading on subsequent biaxial behaviour of 15HM boiler steel*, *Eng. Trans.*, **44**, 2, 181–206, 1996.
27. Kowalewski Z.L., *Experimental evaluation of the influence of stress state type on creep characteristics of copper at 523K*, *Arch. Mech.*, **47**, 13–26, 1995.
28. Kowalewski Z.L., *Biaxial creep study of copper on the basis of isochronous creep surfaces*, *Arch. Mech.*, **48**, 1, 89–109, 1996.
29. Kowalewski Z.L., *Creep rupture analysis of metals under complex stress conditions*, *Proc. Conf. On Anisotropic Behaviour of Damaged Materials ABDM-2002*, Kraków, wrzesień 2002 (w druku).
30. Socha G., Dietrich L., *Analysis of thermally induced phase transformation strain state for TiNi shape memory alloy under a complex stress state*, *Journal of Strain Analysis*, **36**, 2, 1–11, 2002.

AKUSTYKA W INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Feliks Rejmund

1 Wstęp

W okresie 50-letniego rozwoju akustyki z problematyki wchodzącej w zakres badań jako najważniejsze kierunki można wymienić:

- przedstawienie pola akustycznego z uwzględnieniem opisu kwantowego i teorii sprzężenia pól akustycznych i elektromagnetycznych;
- rozwój metod wyznaczania parametrów akustomechanicznych materiałów niejednorodnych i zdefektowanych materiałów technicznych oraz cieczy lepkich. Badania te stanowiły podstawę rozwoju nieniszczących metod oceny materiałów, akustycznej prospekcji geologicznej i kontroli olejów;
- projektowanie i wykonywanie prototypowej aparatury pomiarowej, głównie do pomiaru prędkości, tłumienia i rozkładu przestrzennego fal ultradźwiękowych.

Do szczególnie aktualnych tematów należy opracowanie podstaw opisu i weryfikacja doświadczalna właściwości akustycznych materiałów porowatych, głównie materiałów ceramicznych przy pomocy modeli: „poprzeczników zespolonych”, ośrodka zawierającego pory sferyczne czy sferoidalne. Umożliwia to uzyskiwanie dokładniejszych korelacji pomiędzy prędkością i tłumieniem fal ultradźwiękowych a zawartością i strukturą mikroporów w ośrodkach stałych. Problematyka porowatości, związana z procesem technologicznym zagęszczania tworzywa w procesie wypalania, posiada podstawowe znaczenie dla własności materiałów ceramicznych. Od zawartości fazy gazowej i kształtu porów zależą własności tworzywa, takie jak: wytrzymałość mechaniczna, dielektryczna, stałe sprężystości, odporność na nagłe zmiany temperatury, współczynnik przenikania ciepła, współczynniki dyfuzji cieczy i gazów itp. Ultradźwiękowe metody pomiaru porowatości i jej parametrów oparte są przede wszystkim na pomiarach zmiany prędkości propagacji fal ultradźwiękowych. Pomiar tłumienia znajdują zastosowanie szczególnie do wykrywania obszarów z naprężeniami wewnętrznymi, a zwłaszcza tych, które powstają na granicach obszarów o różnej budowie strukturalnej.

W latach 1990–2000 nastąpił znaczny postęp w zakresie poznania zjawiska i zastosowania metody emisji akustycznej (EA), jako narzędzia badań związanego z inżynierią materiałową. Rozwinięto analizę porównawczą deskryptorów EA i opracowano nowe techniki pomiarowe [1, 2]. W badaniach przeprowadzonych w IPPT na uwagę zasługują następujące osiągnięcia:

- Monitorowanie przebiegu i technologii wytwarzania mas ceramicznych. Głównie dotyczyło to analizy zachodzących w czasie wypalania przemian fazowych i polimorficznych oraz określania mechanizmów tych przemian i warunkujących je czynników.
- Badanie zmian struktury i mikrostruktury materiału pod działaniem szoku termicznego.

- Monitorowanie zachowania się elementów i konstrukcji z tworzyw ceramicznych w warunkach zbliżonych do panujących w czasie długotrwałej eksploatacji. Przede wszystkim dotyczyło to oceny stopnia degradacji struktury tych obiektów pod działaniem okresowo zmiennych naprężeń termomechanicznych. Głównym obiektem badań były ceramiczne izolatory liniowe wysokiego napięcia.
- Analizę parametrów mechanicznych i termomechanicznych tworzyw ceramicznych. W szczególności dotyczyło to różnic między rzeczywistymi właściwościami tych materiałów a modelem ośrodka idealnie kruchego lub idealnie sprężystego, przez uwzględnienie efektów plastyczności i pseudoplastyczności.

Prace z dziedziny akustyki ujawniają wciąż nowe możliwości wszechstronnego badania mechanicznych i fizykochemicznych właściwości materiałów. Jako szczególnie perspektywiczne i interesujące pod względem naukowym i jednocześnie stwarzające możliwości zastosowań technicznych uznano wybrane poniżej omówione tematy, które powinny stanowić kluczowe punkty powiązania badań akustycznych z przyszłymi kierunkami rozwoju inżynierii materiałowej.

2 Wpływ efektów pseudoplastyczności i lepkości na moduły sprężystości współczesnych materiałów ceramicznych

Efekt określany jako plastyczność, w odniesieniu do materiałów ceramicznych składa się łącznie z dwóch mechanizmów: właściwej plastyczności, polegającej na nieodwracalnych odkształceniach materiału poddanego naprężeniom mechanicznym przy zachowaniu ciągłości ośrodka, odkształcenia nieodwracalnego, powodowanego powstawaniem i wzrostem mikropeknięć. Dla większości obecnie stosowanych materiałów ceramicznych drugi mechanizm ma decydujące znaczenie. Problem polega na tym, że przy pomiarach, rozdzielenie udziałów obu mechanizmów jest bardzo trudne. Dlatego celowe wydaje się badanie eksperymentalne sumarycznego efektu obu mechanizmów, dla którego przyjęto termin „pseudoplastyczność”. O efekcie pseudoplastyczności decydują: przebieg charakterystyki naprężenie–odkształcenie powyżej granicy liniowości, trwałe nieodwracalne odkształcenie pozostające po zdjęciu odkształcenia i płynięcie materiału. Ostatni czynnik jest do pominięcia dla większości materiałów ceramicznych. Metoda emisji akustycznej może okazać się efektywną dla określania wkładów obu wyżej wymienionych czynników. W standardowych testach technicznych moduł sprężystości Younga traktowany jest z uproszczeniem, gdyż odnoszony jest generalnie do warunków statycznych. Materiały rozpatrywane są zwyczajowo jako doskonale sprężyste. W odniesieniu do tworzyw ceramicznych definicja ta odnosi się jednak tylko do bardzo ograniczonego zakresu odkształceń. Powyżej granicy sprężystości następują złożone i zupełnie specyficzne procesy, które mimo dużej liczby prac badawczych i zainteresowania ze strony producentów i użytkowników nie są dotychczas w pełni wyjaśnione. Najbardziej popularne jest przyjęcie modelu krucho-sprężystego tworzywa, w którym zakłada się bardzo szybkie zniszczenie próbki po przekroczeniu naprężenia granicznego. Jak wykazują najnowsze badania i doświadczenia eksploatacyjne, na sumaryczne własności materiałów ceramicznych znaczący wpływ mają jednak stosunkowo niewielkie odchylenia od modelu sprężysto-kruchego. Są one wywoływane poprzez efekty pseudoplastyczne i lepkosprężyste. Przy uwzględnieniu obu tych

efektów moduł Younga traktować należy jako wieloparametrową liczbę zespoloną. Zbadanie wartości i mechanizmu powstawania efektu pseudoplastycznego jest przedmiotem prowadzonych już od szeregu lat badań w Zakładzie Akustyki Fizycznej IPPT PAN. W latach 1997–1999 realizowany był projekt badawczy KBN pt. „Zastosowanie metody emisji akustycznej do wyznaczania parametrów trwałości materiałów ceramicznych”. Badania te przyniosły obiecujące wyniki [3]. Stwierdzono bowiem korelacje parametrów wytrzymałościowych tworzyw z ich właściwościami pseudoplastycznymi. Uzyskane zależności dotyczyły jednak ograniczonej i dosyć specyficznej grupy materiałów ceramicznych, ponadto stwierdzono duży rozrzut wyników pomiarów. Stąd też, ustalone korelacje mają jedynie przybliżony charakter. W celu uściślenia wspomnianych zależności konieczna jest dalsza kontynuacja prowadzenia prac w trzech kierunkach:

- zwiększenie zakresu badań tworzyw ceramicznych, z uwzględnieniem materiałów o wyraźnym oraz średnim efekcie pseudoplastycznym;
- uściślenie metodyki pomiarów zarówno pod względem precyzji, usprawnienia jak i podwyższenia wiarygodności średnich ważonych uzyskiwanych wyników;
- uściślenie wzorów analitycznych charakteryzujących wpływ pseudoplastyczności na parametry wytrzymałościowe tworzyw.

Należy mieć nadzieję, iż uzyskane wyniki pozwolą na lepsze wyjaśnienie mechanizmu powstawania odkształceń pseudoplastycznych w materiałach ceramicznych. Może to stanowić istotną wskazówkę technologiczną w opracowaniu nowych materiałów.

Projektowane jest rozpoczęcie nieprowadzonych dotychczas w Instytucie badań nad lepkosprężystymi parametrami tworzyw ceramicznych. Prace dotyczyć będą w szczególności wpływu składowej lepkosprężystej na dynamiczną wartość modułu Younga przy różnych szybkościach wzrostu naprężenia. Przy zastosowaniu metody ultradźwiękowej odpowiada to określeniu zależności występowania maksimum tłumienia fali odniesionej do jej długości od częstotliwości.

Dane doświadczalne będą otrzymywane zarówno poprzez pomiar prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych, jak i deskryptorów emisji akustycznej. Technika ultradźwiękowa dostarcza informacji o zachowaniu się tworzyw ceramicznych jako ośrodków ciągłych. Pseudoplastyczność traktowana jest tu zatem analogicznie do plastyczności metali, z uwzględnieniem jednak składowej urojonej tej wielkości. Pomiary deskryptorów emisji akustycznej stanowią przede wszystkim metodę detekcji powstających w materiale i ulegających propagacji nieciągłości (mikropęknięć). Wspólna analiza wyników badań akustycznych pozwoli na ocenę stopnia w jakim efekt pseudoplastyczności różni się od klasycznie pojętej plastyczności tworzywa.

3 Pomiar rozkładu rozmiarów i koncentracji cząstek w zawiesinach na podstawie rozpraszania światła w strumieniu akustycznym

W praktyce naukowej i przemysłowej spotykamy się z koniecznością określenia różnych charakterystyk zawiesin zawierających cząstki o mikroskopowej wielkości. W pierwszej kolejności należy określić rozkład rozmiarów cząstek oraz ich sumaryczną koncentrację z możliwie dużą rozdzielczością, w drugiej — otrzymać informację o kształcie i strukturze wewnętrznej elementów fazy zawieszony. Taka informacja jest niezbędna do kontroli przebiegu licznych procesów

technologicznych (dodatki w olejach specjalnych o zmniejszonym tarcu i stopniu uszkodzenia powierzchni, przy produkowaniu specjalnych warstwowych pokryć, przy produkowaniu polimerów itd.), przy kontroli zanieczyszczenia środowiska itd.

Najbardziej praktyczną, dotychczas stosowaną, metodą określenia charakterystyk zawiesin jest wykorzystanie zjawiska rozpraszania światła na cząstkach. Metoda ta praktycznie nie wpływa na stan obiektu pomiaru; pozwala otrzymać wyniki w czasie wykonania pomiaru i w zasadzie aparatura pomiarowa nie jest skomplikowana i za jej pomocą można wykonać pomiary zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i bezpośrednio w warunkach eksploatacyjnych. Istniejące warianty tej metody, oparte na teorii Mie, w przypadku pomiarów indykatrysy (charakterystyki katowej) rozpraszania i całkowitego współczynnika ekstynkcji w wyniku nakładania się na siebie światła rozpraszane przez cząstki o różnych rozmiarach i różnych kształtach prowadzą do niestabilności i niejednoznaczności rozwiązania odwrotnego problemu dyfrakcji (tzn. określenia parametrów zawiesiny rozpraszane światła). Ze względu na zwykle przyjmowane, w pewnym sensie arbitralne założenia interpretacji wyników pomiarów, badania tymi metodami mają małą dokładność i małą zdolność rozdzielczą. W efekcie obecne metody praktycznie nie dają zadawalającej dokładności określenia ani rozkładu rozmiarów cząstek zawiesiny wieloskładnikowej, ani też całkowitej koncentracji domieszek. Przy uwzględnieniu szybkiego rozwoju nowoczesnych technologii materiałowych obecne metody i przyrządy nie spełniają wymagań ani przemysłu, ani nauki.

W 1997 r. została zaproponowana nowa metoda rejestracji rozpraszane przez zawiesiny światła [4]. Proponowana metoda opiera się na rejestracji rozseparowanych sygnałów rozpraszania od cząstek o różnych rozmiarach. Zdolność rozdzielcza tej metody jest przede wszystkim określona odpowiednimi układami elektronicznymi i wydaje się możliwe jej obniżenie co najmniej do 1%. Z praktycznego punktu widzenia powinno to być wystarczające.

Istota metody polega na tym, że pojemnik z zawiesiną poddaje się jednocześnie działaniu wiązki światła laserowego i strumienia pola akustycznego. Dotychczas w literaturze zjawisko było analizowane tylko dla fal stojących. Fala ultradźwiękowa powoduje grupowanie cząstek w węzłach, prowadząc do dyfrakcji strumienia światła, tzw. dyfrakcja Ramana-Natha. Wpływ fali biegnącej na rozpraszanie światła przez cząstki zawiesiny nie był analizowany. Pod wpływem pola biegnącej fali akustycznej cząstki zawiesiny wykonują oscylacje. Amplituda oscylacji zależy od rozmiaru cząstki. Amplituda oscylacji cząstek o małych rozmiarach jest prawie równa amplitudzie oscylacji molekuł gazu zawiesiny (prędkości oscylacyjnej gazu), natomiast amplituda dużych cząstek powinna być praktycznie równa zeru. Dla cząstek o pośrednich rozmiarach amplituda będzie zmieniała się w tych granicach w zależności od rozmiaru cząstki. Oscylacje cząstek powinny powodować modulację częstotliwości rozpraszane światła na skutek efektu Dopplera. Częstotliwość modulacji dla wszystkich cząstek jest jedna i ta sama i równa częstotliwości strumienia akustycznego. Natomiast dewiacja częstotliwości (tzn. głębokość modulacji częstotliwościowej) zależy od amplitudy oscylacji cząstki rozpraszającej, tzn. od jej rozmiaru. Za pomocą odpowiedniego fazowo-częstotliwościowego detektora można rozdzielać te sygnały i rejestrować jako oddzielne dla cząstek o różnych rozmiarach.

Podjęcie opracowania eksperymentalnego i teoretycznego proponowanego zagadnienia w wydaje się być uzasadnione. W ostatnich latach następuje znaczny postęp w rozwoju teorii rozpraszania światła przez cząstki o skomplikowanych kształtach. Opracowanie metody i modelu przyrządu pomiarowego na pewno można uznać jako jeden z podstawowych problemów naukowo-technicznych.

Zjawisko rozpraszania światła przez cząstki o mikroskopijnych rozmiarach było po raz pierwszy analizowane przez Rayleigha jeszcze w XIX wieku. Następnie, w 1908 r., Mie opracował teorię rozpraszania światła przez cząstki kuliste. Otrzymane wzory mają kształt bardzo wolno zbieżnych szeregów, a każdy wyraz szeregu jest iloczynem funkcji Bessela i stowarzyszonego wielomianu Legendre'a. Konkretnie obliczenia cyfrowe z wykorzystaniem tych szeregów były bardzo trudne i zostały wykonane tuż przed II Wojną Światową. Z teorii wynika, że indykatrisa rozpraszania (tzn. wykres kierunkowości rozpraszanego światła) i przekrój całkowity rozpraszania zależy od rozmiaru cząstki (i, odpowiednio, od jej kształtu). W monodispersyjnych zawiesinach daje to możliwość określenia rozmiaru cząstek i ich koncentracji. Jednak w zawiesinach, w skład których wchodzi cząstki różnych rozmiarów, nie jest możliwe rozdzielenie wkładów od cząstek różnych rozmiarów wskutek nakładania się ich charakterystyk kątego rozpraszania. Ponieważ przekrój całkowity rozpraszania w sposób skomplikowany zależy od rozmiaru cząstki a : jak a^4 dla małych cząstek, jak a^2 dla średnich i jak a^0 dla dużych, to w rezultacie nie tylko nie jest możliwe określenie rozkładu rozmiarów cząstek, ale również ich sumarycznej koncentracji.

Do najbardziej znanych firm produkujących przyrządy do określenia parametrów zawiesin należą: Coulter Inc. (USA), Malvern Instruments GmbH (England), Brookhaven Instruments Corporation (USA). Przyrządy tych firm działają na podobnej zasadzie, a mierzone parametry oraz ich dokładność jest zbliżona, różnice istnieją tylko w szczegółowych rozwiązaniach technicznych. Przyrządy powyższych firm są bardzo starannie opracowane i ich dokładność pomiarowa zbliża się do teoretycznie możliwych granic. Dalsze doskonalenie tych przyrządów, bez zmiany zasady pomiaru, nie może doprowadzić do polepszenia ich możliwości. Czułość tych przyrządów przy pomiarze koncentracji zmienia się od $\sim 0,001\%$ do $\sim 40\%$ a przy określaniu rozmiarów cząstek od $\sim 0,2 \mu\text{m}$ do $\sim 100 \mu\text{m}$. Przyrządy powyższych firm znajdują duże zastosowanie jednak ich zdolność rozdzielcza jest nie najlepsza i nie może zadośćuczynić obecnym wymaganiom praktyki. Z przedstawianych w literaturze eksperymentalnych wykresów widać, że przy pomiarach zawiesiny, zawierającej cząstki tylko jednego rozmiaru, szerokość linii (tzn. zdolność rozdzielcza przyrządu) zajmuje obszar w przybliżeniu $\pm 40\%$ rzeczywistego rozmiaru cząstek. Przy takiej zdolności rozdzielczej separacja wkładów nawet dwóch rozmiarów cząstek w zawieszynie o jednakowych koncentracjach i stosunku promieni 1:2 jest niemożliwa. Z praktycznego punktu widzenia taka zdolność rozdzielcza przyrządu pomiarowego jest niewystarczająca.

Proponowana nowa metoda eksperymentalnego określania parametrów cząstek zawiesiny metodą rozpraszania światła z jednoczesnym wprowadzeniem ultradźwięku wydaje się być metodą, która pozwalałaby określać rozkład rozmiarów cząstek występujących w wieloskładnikowej zawieszynie z wysoką zdolnością rozdzielczą (rzędu 1%). Czułość metody i zakres identyfikacji rozmiarów cząstek powinny być w przybliżeniu takie, jak dla przyrządów produkowanych przez wymienione powyżej czołowe firmy światowe. Takie parametry pomiarowe można otrzymać dzięki temu, że dodatkowo wprowadzona do zawiesziny fala akustyczna, powodująca częstotliwościową modulację rozpraszanego światła, daje możliwość rejestracji oddzielnych sygnałów od cząstek o różnych rozmiarach. Zjawisko pokrywania się wkładów rozpraszania od cząstek o różnych rozmiarach nie zachodzi.

Proponowana metoda jest oryginalna, wprowadza w badanym ośrodku, jakim jest zawieszyna nowe oddziaływania fizyczne, stwarzając możliwość doprowadzenia do znacznego powiększenia rozdzielczości pomiaru jednego z podstawowych parametrów potrzebnego w zastosowaniach przemysłowych i w laboratoriach naukowych. Ze względu na sensowność przyjmowanych mody-

fikacji oddziaływań fizycznych w zawiesinie, mających stanowić zasadę pomiaru, jak i praktyczne wymagania nowoczesnych technologii materiałowych sformułowane cele są zagadnieniem aktualnym.

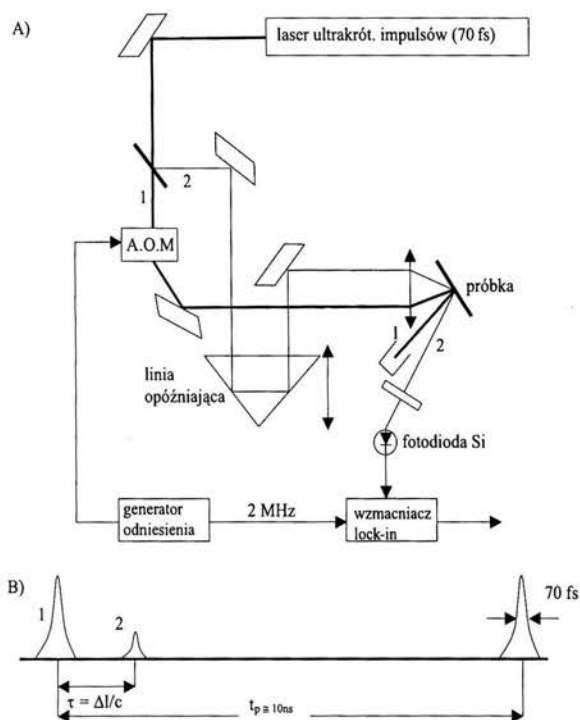
Idea metody określenia parametrów cząstek w zawiesinie jest następująca: Na zawiesinę oprócz promieniowania optycznego, które ulega rozpraszaniu, jednocześnie powinna działać fala ultradźwiękowa. Cząstki w zawiesinie, razem z cząsteczkami płynu, biorą udział w ruchu drgającym, wywołanym przez falę akustyczną. Amplituda drgań cząstek oraz ich prędkość zależą od masy. Małe cząstki zawiesiny w zasadzie poruszają się prawie tak samo, jak cząsteczki cieczy. Natomiast duże, z powodu dużej bezwładności, pozostają prawie nieruchome. Prędkość ruchu cząstek o średniej masie jest proporcjonalna do masy. Ruch drgających cząstek spowoduje, że w wyniku zjawiska Dopplera, światło rozproszone ulegnie modulacji częstotliwościowej. Głębokość modulacji (dewiacja częstotliwości) będzie przy tym zależeć od wielkości cząstki rozpraszającej, a częstotliwość modulacji będzie równa częstotliwości ultradźwięku. Dla rozdzielania sygnałów od cząstek o różnych rozmiarach, na fotodetektor (fotopowielacz) jednocześnie z rozpraszonym światłem podaje się sygnał odniesienia (bezpośrednio lub za pomocą zwierciadła) ze źródła światła (lasera). Między wiązkami światła (rozpraszanego i porównawczego) w wyniku interferencji powstają dudnienia. Wskutek nieliniowej charakterystyki fotokatody zachodzi proces przemiany częstotliwości i w prądzie wystąpi sygnał częstotliwości różnicowej. Sygnał ten zawiera modulację częstotliwościową, przeniesioną z zakresu optycznego do zakresu częstotliwości radiowych. Zastosowanie specjalnego detektora fazo-częstotliwościowego powinno umożliwiać wydzielenie sygnałów o określonej dewiacji częstotliwościowej. Na podstawie natężenia sygnałów o różnej dewiacji możliwe byłoby określenie rozkładu rozmiarów cząstek. Zdolność rozdzielcza takiego układu zależy głównie od szerokości pasma przepuszczania filtra, który powinien znajdować się na wyjściu detektora. Jednoczesny pomiar ekstynkcji promienia przechodzącego przez zawiesinę, przy znajomości rozkładu rozmiarów cząstek, umożliwia określenia ich sumarycznej koncentracji. Stanowisko do pomiaru rozkładu rozmiarów cząstek i koncentracji, według zasady przedstawionej powyżej, powinno zawierać następujące podstawowe elementy:

- kuwetę zawierającą badaną zawiesinę,
- laser średniej mocy, np. He-Ne,
- generator drgań ultradźwiękowych,
- fotopowielacz szerokopasmowy z zasilaczem,
- układ elektroniczny z detektorem częstotliwościowym i innymi elementami,
- oscyloskop cyfrowy,
- komputer dla dokładnego opracowania wyników pomiarów i uwzględnienia wpływu indykatory,
- ławę optyczną z kompletem elementów optycznych i precyzyjnych elementów optyczno-mechanicznych.

Badania eksperymentalne powinny doprowadzić do określenia optymalnego schematu optycznego układu, optymalnej konstrukcji kuwety, doboru optymalnej częstotliwości i mocy pola akustycznego, opracowania metody dopasowania frontów fazowych, wyboru optymalnego schematu detektora fazowo-częstotliwościowego i pozostałych elementów elektronicznych.

4 Akustyczne i optyczne badania struktur nanowarstwowych

W ostatnich latach obserwuje się znaczny postęp w dziedzinie technologii otrzymywania struktur nanowarstwowych. Za szczególnie ważne należy uznać rozwój nowych technologii pozwalających na wytwarzanie elementów i podzespołów do nanourządzeń, funkcjonujących na poziomie molekularnym, które stają się łącznikiem metod inżynierii materiałowej, mechanicznej i molekularnej. Takie technologie (m.in. MBE — molecular beam epitaxy) zostały między innymi wykorzystane do wytwarzania złożonych nanowarstw metalicznych (Cu/Co, V/Au, Fe/Ag) na podłożach dielektrycznych. Metoda MBE opiera się na wykorzystaniu jednorodnych wiązek atomów i molekuł w procesie wytwarzania nanowarstw. W wymienionych warstwach wykryty został efekt gigan-



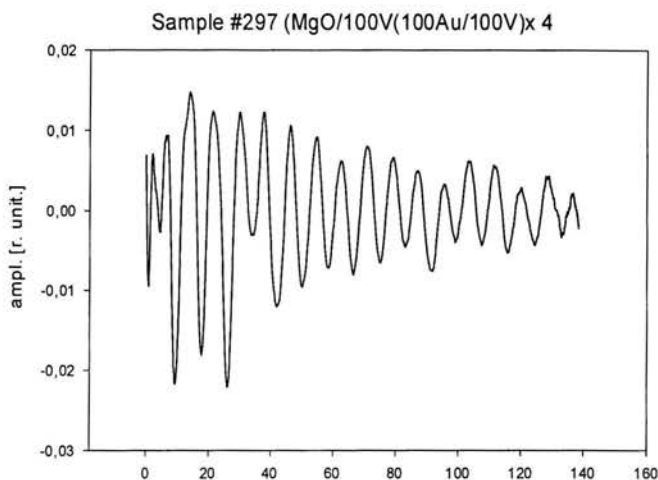
Rys. 1. Schemat akustyczno-laserowego układu pomiarowego do pomiaru własności sprężystych nanowarstw (A), impulsy laserowe: pobudzający – 1 i sondujący – 2 (B); AOM — akustyczny modulator wiązki laserowej

tycznego magnetooporu. Z tego powodu struktury te są m.in. bardzo interesujące ze względu na możliwość wykorzystania ich do budowy nośników informacji o ogromnej gęstości upakowania. (o dwa rzędy wyżej w stosunku do obecnie stosowanych). Poza tym, struktury charakteryzują się silną anizotropią własności magnetycznych. Ważne jest więc poznanie ich własności sprężystych i ich wpływu na własności magnetyczne w zależności od parametrów nanostruktur. Badania wykonane we współpracy z Uniwersytetem im. P. i M. Curie (Paryż) w 2000 roku wykazały, że możliwe jest wpływanie na parametry sprężyste nanostruktur poprzez proces technologiczny. Opracowana została nowa metoda pomiaru stałych sprężystych tego typu nanostruktur poprzez pobudzenie fali akustycznej o częstotliwości setek GHz za pomocą femtosekundowych ($70 \cdot 10^{-12}$ s) impulsów laserowych i następnie pomiar małych zmian współczynnika odbicia sondującej wiązki laserowej od powierzchni nanowarstwy. Schemat laserowego układu pomiarowego podany jest na Rys. 1 [5].

Dalsze badania powinny dotyczyć zarówno zagadnień eksperymentalnych jak i opracowań teoretycznych. Celem badań powinny być struktury nanowarstwowe typu metalicznego i organicznego (np. ciekłokrystaliczne). Główne kierunki to:

- badanie własności sprężystych i optycznych nanowarstw naniesionych na różne podłoża dielektryczne,
- opracowanie teoretycznych modeli oddziaływania fali akustycznej z nanowarstwami.

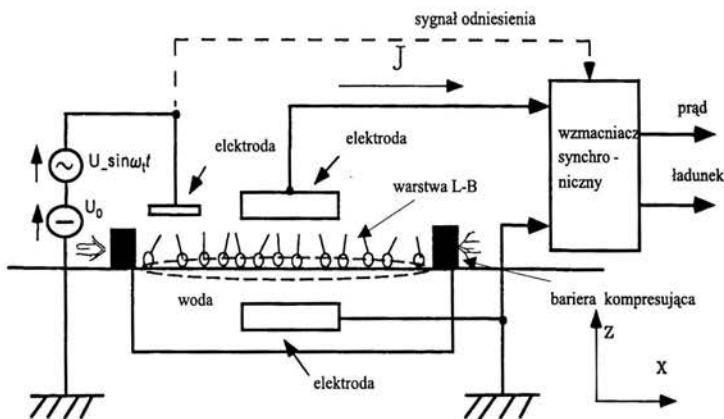
Przewiduje się, że stosując tą metodę pomiarową dla konfiguracji nanowarstw o różnych parametrach warstw składowych (grubości i rodzaju materiału) da się określić granicę przejścia własności materiałowych typu „bulk” (objętościowych) i „dwuwymiarowych” a w konsekwencji możliwości programowania własności sprężystych nanostruktur. Na Rys. 2 pokazana jest zależność współczynnika odbicia wiązki laserowej od czasu opóźnienia wiązki sondującej względem pobudzającej w pikosekundach dla próbek Au/V naniesionych na podłożu MgO. Parametry struktury stanowią przemienne



Rys. 2. Zależność współczynnika odbicia wiązki laserowej od czasu opóźnienia wiązki sondującej względem pobudzającej w pikosekundach dla próbek Au/V naniesionych na podłożu MgO

warstwy Au/V o grubości 200 Å (złota 100 Å i wanadu 100 Å). Łączna grubość całej struktury wynosiła 800 Å. Występujące na rysunku oscylacje wskazują na wzbudzenie modu akustycznego w badanej strukturze. Częstotliwość oscylacji wynosi 100 GHz. Występowanie modu akustycznego powierzchniowego związane jest z periodycznością struktury warstwowej i znaczącą różnicą impedancji akustycznych dla podwarstw złota i wanadu. Na podstawie powyższego zjawiska możliwe jest wykonywanie filtrów częstotliwości akustycznych w nanourządzeniach.

Drugi kierunek badań także wiąże się z nową dziedziną nauki i techniki jaką jest nanotechnologia. Rozwój mikroelektroniki wykorzystującej technologię krzemową doprowadził do wytworzenia elementów półprzewodnikowych o wymiarach rzędu 0,1 μm . Dalsza miniaturyzacja wydaje się niemożliwa bez zasadniczej zmiany technologii związanej z przejściem w procesie wytwarzania elementów elektronicznych na poziom molekularny. Zbudowano już modele laboratoryjne diod i tranzystorów, składające się z kilku molekuł. Jedną z metod otrzymywania warstw monomolekularnych jest metoda Langmuira-Blodgetta (L-B). Klasycznym sposobem określania własności takich warstw jest metoda, w której rejestruje się prąd Maxwella wytwarzany przez dipole tworzące nanowarstwę poddawaną równomiernemu ścisnieniu przez ruch dwóch barier na powierzchni wody. W 2000 roku we współpracy Zakładu Akustyki Fizycznej IPPT PAN z Tokyo Institute of Technology opracowano zmodyfikowany model teoretyczny dla opisu oddziaływania akustycznej fali powierzchniowej z monomolekularną warstwą [6]. Modyfikacja polega na wzbudzeniu na powierzchni wody stojących fal akustycznych. Dipole nanowarstwy, znajdujące się na oscylującej powierzchni wody, dają dodatkowy wkład do mierzonego prądu Maxwella. Tak zmodyfikowana metoda prądu Maxwella powinna umożliwiać jednoczesny i natychmiastowy pomiar zarówno prądu Maxwella, jak i ładunku płynącego w obwodzie. W klasycznej metodzie prądu Maxwella, bez stojącej fali akustycznej, wyznaczanie ładunku indukowanego w obwodzie jest bardzo utrudnione. Schemat zmodyfikowanego układu do pomiaru prądu Maxwella przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Zmodyfikowany układ do pomiarów prądu Maxwella; ruch wody wzbudzany falą akustyczną z częstotliwością $\omega = \omega_t$ moduluje prąd i ładunek w obwodzie

5 Ultradźwiękowe czujniki chemiczne na fale powierzchniowe z supramolekularnymi nanowarstwami chemoczułymi

W nauce, technice i przemyśle w ostatniej dekadzie wzrasta zapotrzebowanie na czujniki: małe, niezawodne oraz tanie. Dużą grupę wśród nich stanowią czujniki ultradźwiękowe, wykorzystujące własności fal ultradźwiękowych.

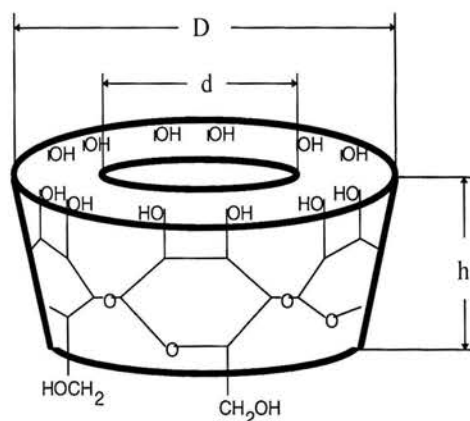
Fale ultradźwiękowe mogą być generowane i odbierane przy wykorzystaniu różnych efektów, a mianowicie: piezoelektrycznego, magnetostrykcyjnego, elektrostatycznego, elektromagnetycznego, optycznego, termicznego i innych. Najczęściej wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne, a materiały piezoelektryczne są używane jako podłoża przy wytwarzaniu czujników ultradźwiękowych. Ze względu na cechy materiałowe, w tym głównie sprzężenie elektromechaniczne, tego rodzaju czujniki są mniejsze, bardziej niezawodne, czulsze, stabilniejsze i tańsze niż czujniki innego rodzaju.

Różne parametry fizyczne, chemiczne lub fizykochemiczne substancji występujących w otoczeniu mogą być mierzone poprzez nałożenie na podłoże piezoelektryczne cienkiej warstwy materiału wrażliwego na określony czynnik. Podczas oddziaływań fizycznych lub chemicznych mierzonego czynnika z warstwą zachodzą w niej zmiany o charakterze akustycznym, mechanicznym lub elektrycznym, które modyfikują wielkości charakteryzujące pole ultradźwiękowe. Zmiany tych wielkości są z kolei zamieniane na sygnał elektryczny przez przetwornik ultradźwiękowy. Parametry tego sygnału, a w szczególności częstotliwość, napięcie i natężenie mogą być łatwo i z dużą dokładnością mierzone. Stosowana technologia czujników ultradźwiękowych jest kompatybilna z technologią obwodów scalonych, co umożliwia wytwarzanie zwartych układów pomiarowych o dużym stopniu integracji. W konstrukcji najbardziej rozpowszechnionych czujników ultradźwiękowych wykorzystuje się warstwy: trójtlenku wolframu do detekcji i pomiarów stężenia siarkowodoru, siarczku kadmu do wykrywania i określania stężenia dwutlenku siarki, złota do pomiarów stężenia rtęci w wodzie, poliamidu do wykrywania pary wodnej, rozmaitych polimerów do detekcji i pomiarów stężenia szeregu gazów i par substancji organicznych.

Czujniki, w których wykorzystuje się fale powierzchniowe są bardziej czułe na obecność analizowanego czynnika od czujników z falami objętościowymi, co wiąże się z większymi częstotliwościami pracy i skupieniem energii fali akustycznej w warstwie przypowierzchniowej.

Ze względu na właściwości związków supramolekularnych (wielkocząsteczkowych), między innymi dużą selektywność wobec ściśle określonych związków chemicznych podlegających wykrywaniu i pomiarom, tj. analitów, ich zastosowanie do wytwarzania warstw chemoczułych jest bardzo obiecujące. Dzięki swojej budowie cząsteczkowej oddziałują one tylko z takimi analitami, których cząsteczki są komplementarne pod względem elektronowym lub przestrzennym z wnęką danego związku supramolekularnego. Przykładem związków o takich oddziaływaniach są cyklodekstryny.

Cyklodekstryny to cykliczne węglowodany zbudowane z połączonych jednostek glukopiranozowych w ilości 6, 7 i 8 odpowiednio dla α -, β - i γ -cyklodekstryny. Odnaczają się one wyjątkową konfiguracją przestrzenną (Rys. 4). Ich cząsteczka ma postać torusa i jej sfera zewnętrzna ma własności hydrofilowe, natomiast wnęka (pustka) ma charakter hydrofobowy i niepolarny. Wymiary tej wnęki rosną w miarę zwiększania się liczby jednostek glukopiranozowych. Wnęka cząsteczki



Rys. 4. Schematyczny rysunek cząsteczki α -cyklodekstryny: $d = 0,57$ nm, $D = 1,37$ nm, $h = 0,78$ nm

cyklodekstryny (gospodarza) jest miejscem, do którego może się wbudować cząsteczka lub jej fragment (gość) głównie na skutek oddziaływań niepolarnych [8].

W wyniku tych oddziaływań powstają kompleksy inkluzyjne (włączeniowe), w których siły wiążące nie wynikają z wiązania chemicznego, ale są rezultatem wielokrotnych, stosunkowo słabych, fizycznych oddziaływań van der Waalsa między cząsteczką gospodarza i gościa. Ta cecha cyklodekstryn jako warstwy sensorowej jest bardzo korzystna ze względu na wymóg odwracalności pracy czujnika. Naturalna wysoka selektywność cyklodekstryny, związana z wymiarami wnętrza, może być znacznie zwiększona poprzez zmianę podstawników w jej cząsteczce. Na przykład, cyklodekstryny (α , β i γ) lub ich pochodne selektywnie wiążą różne węglowodory alifatyczne i aromatyczne, cholesterol, substancje powierzchniowo czynne z alkilowymi łańcuchami węglowodorowymi i fluorowęglowymi, pewne substancje farmakologiczne oraz barwniki. Ta chemiczna selektywność jest cechą wybitnie korzystną ze względu na selektywność samej warstwy chemoczułej. Duże możliwości modyfikacji cząsteczki cyklodekstryny powinny umożliwić wykonanie z niej warstwy o pożądanych własnościach chemicznych, mechanicznych i ultradźwiękowych.

Przykładami innych związków supramolekularnych mogących służyć do wytwarzania warstw chemoczułych są etery koronowe, które selektywnie kompleksują jony metali oraz kawitandy i kaliksareny tworzące selektywne kompleksy inkluzyjne z różnymi substancjami chemicznymi.

Grubość i uporządkowanie nanoszonej warstwy jest podstawowym czynnikiem określającym parametry pracy czujnika. Metoda Langmuira–Blodgett (L-B) poprzez umożliwienie wytwarzania i kolejnego nanoszenia warstw dokładnie monomolekularnych, tj. o grubości równej długości cząsteczki substancji tworzącej warstwę, pozwala na kontrolę całkowitej grubości nanowarstwy, a zatem w rezultacie obciążenia powierzchni podłoża czujnika. Ponadto metoda L-B umożliwia uzyskanie wysokiego stopnia uporządkowania cząsteczkowego i zachowanie go podczas nakładania na podłoże. To pozwala z kolei na lepsze eksponowanie fragmentu cząsteczki substancji tworzącej nanowarstwę na oddziaływania z cząsteczką analitu — następstwem tego jest wzrost czułości. Wszystko to sprawia, że metoda L-B znajduje coraz większe zastosowanie do wytwarzania m.in. warstw chemoczułych czujników ultradźwiękowych [9].

Warstwy supramolekularne otrzymywane metodą L-B powinny odznaczać się bardzo wysoką czułością i selektywnością ze względu na powinowactwo analizowanych substancji do wnęk odpowiednich związków supramolekularnych. To powinowactwo wynika ze zwielokrotnienia oddziaływań van der Waalsa oraz warunku geometrycznego dopasowania między wnęką związku supramolekularnego oraz zainkludowanej cząsteczki lub jej fragmentu.

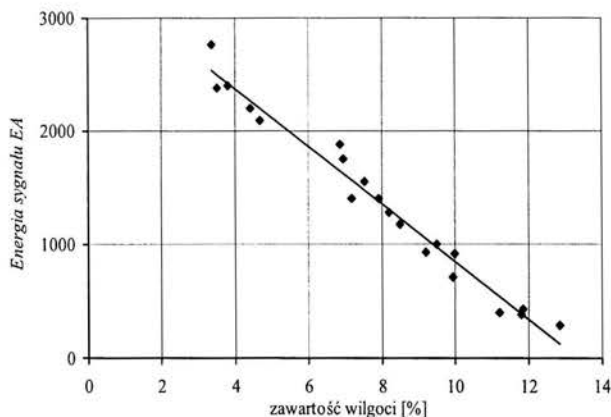
Według dostępnych źródeł literaturowych nanowarstwy utworzone ze związków supramolekularnych otrzymywane metodą L-B w zastosowaniu do chemicznych czujników ultradźwiękowych nie były do tej pory przedmiotem opracowań i badań w Polsce, natomiast na świecie badania te znajdują się w fazie początkowej.

Podjęcie powyższej tematyki zmierzałoby do uzyskania unikalnych nanowarstw chemoczułych wykonanych ze związków supramolekularnych metodą Langmuira–Blodgett i przeznaczonych do pracy w środowisku gazowym i ciekłym. Czujniki wyposażone w te warstwy powinny posiadać własność selektywnego wykrywania i mierzenia stężenia niektórych organicznych związków chemicznych (np. chloroform, perchloroetylen, ksyleny, aceton, benzen, toluen, heksan, tetrahydrofuran) oraz jonów metali. Wspomniane warstwy należałoby także poddać badaniom istotnym zarówno pod względem poznawczym (oddziaływania związków supramolekularny — substancja analizowana oraz wpływ tych oddziaływań na mechanizm uczulania czujników ultradźwiękowych; rodzaj związku supramolekularnego a selektywność i czułość warstwy) jak i praktycznym (charakterystyki metrologiczne warstw — stabilność, powtarzalność, niezawodność oraz czas odpowiedzi). Zagadnienia te są istotne w związku z przewidywanymi zastosowaniami w przemyśle (deteckcja i pomiary stężenia organicznych rozpuszczalników), ochronie przeciwpożarowej (wykrywanie par palnych rozpuszczalników oraz paliw, śledzenie ich stężenia ze względu na granice wybuchowości) oraz ochronie środowiska naturalnego (monitorowanie czystości powietrza i wody ze względu na związki organiczne, w tym silnie toksyczne np. pochodne benzenu). Zastosowanie czujników z nowego rodzaju warstwami powinno przynieść efekty ekonomiczne poprzez umożliwienie wykrywania i pomiary stężeń podanych substancji, zwiększenie bezpieczeństwa i usprawnienie pomiarów.

Powyżej wymienione możliwości detekcji i pomiaru stężeń związków organicznych, a także podane przykładowe perspektywiczne zastosowania jak i własności jakimi odznaczają się generalnie czujniki ultradźwiękowe uzasadniają celowość prowadzenia i rozwijania takich badań.

6 Badania jakości produktów spożywczych z zastosowaniem emisji akustycznej

W ostatnich latach w wielu krajach znacząco wzrosła produkcja i konsumpcja takich produktów, jak pieczywa chrupkie, chrupki kukurydziane, chipsy ziemniaczane oraz susze owocowo-warzywne. Producenci tych wyrobów kładą duży nacisk na badania własności smakowych oraz ich zmiany w zależności od jakości procesu wytwórczego, okresu i miejsca przechowywania. Ze względów na higroskopijność omawianych wyrobów łatwo dochodzi do utraty szeroko reklamowanej ich cechy określanej jako „chrupkość” (crispiness, crunchiness). Klasyczne metody badań mechanicznych omawianych wyrobów (pomiar wytrzymałości na zginanie i modułu Younga) nie są zadawalające. Stąd zainteresowanie analizą sygnałów akustycznych generowanych w trakcie 3-punktowego zginania lub testów polegających na lokalnym zginiataniu produktów chrupkich



Rys. 5. Zależność energii sygnałów emisji akustycznej od wilgotności próbek pieczywa chrupkiego

i jednoczesnej rejestracji sygnałów akustycznych. Metody takiej analizy są rozwijane w wielu koncernach spożywczych przy współpracy instytutów naukowych. Istnieje obszerna bibliografia prac badawczych z omawianej dziedziny. Jako przykłady takich prac można wymienić [10, 11].

W naszym kraju przemysł spożywczy produkuje znaczące ilości produktów chrupkich najwyższej jakości. Wydziały Inżynierii Żywności Akademii Rolniczych wykazują zainteresowanie omawianą tematyką. Wspólnie z Zakładem Akustyki Fizycznej prowadzone są prace nad doskonaleniem metod pomiaru i analizy parametrów EA do oceny chrupkich produktów żywnościowych. Na Rys. 5 przedstawiono zależność energii sygnałów akustycznych w funkcji wilgotności dla próbek pieczywa chrupkiego. Badania przeprowadzono metodą 3-punktowego zginania na maszynie wytrzymałościowej Zwick 1445, obciążając próbki ze stałą prędkością przyrostu odkształcenia 20 mm/min. Do pomiaru sygnałów akustycznych zastosowano akcelerometr firmy Brüel & Kjaer 4370V. Sensor akustyczny tego typu umożliwiał rejestrację sygnałów w zakresie częstotliwości 0,1–15 kHz. Z przetwornika sygnał był transmitowany do 20 dB wzmacniacza, a następnie po próbkowaniu cyfrowym był rejestrowany. We współczesnej literaturze naukowej i technicznej dotyczącej badań żywności chrupkiej brak jest parametrów opartych na widmowych charakterystykach sygnałów akustycznych. Stąd uzasadnione są badania zmierzające w kierunku opracowania nowych parametrów, głównie związanych z kształtem widma mocy sygnałów akustycznych, wytwarzanych w trakcie zginania bądź punktowego zginięcia próbek chrupkiej żywności. W przeciwieństwie do energii akustycznej charakterystyki te nie zależą od objętości próbki.

Metoda pomiaru emisji akustycznej ostatnio zaczyna być stosowana w nowych obszarach badań materiałów i obiektów, jak np. węzły tarcia rakiet i samolotów, obiekty mikromechaniczne, ze szczególnym uwzględnieniem szerokiej klasy napędów dysków komputerowych. W niektórych przypadkach niemożliwe jest sprzężenie klasycznego sensora emisji akustycznej z obiektem poddawany diagnostyce. W związku z tym rozwijane są metody zdalnego pomiaru generowanych fal sprężystych, wykorzystujące metody laserowej wibrometrii dopplerowskiej i różnicowej. Sensory laserowe rejestrują sygnał generowany w wybranym miejscu na powierzchni badanego obiektu

lub dokonują procesu skanowania powierzchni całego obiektu, co jest przydatne np. w analizie modalnej drgań obiektu poddanego próbom dynamicznym. Wysoki koszt laserowych wibrometrów dopplerowskich implikuje potrzebę rozwijania korzystniejszych ekonomicznie rozwiązań, opartych na *wibrometrii różnicowej*. Podjęcie takiej tematyki planowane jest w Pracowni Analizy Emisji Akustycznej Zakładu Akustyki Fizycznej IPPT.

Bibliografia

1. Malecki I., Ranachowski J., *Methods and applications of acoustic emissions*, Arch. Acoust., **19**, 371–415, 1993.
2. Malecki I., Ranachowski J., *Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania*, Wydawnictwo Biuro PASCAL, 1994.
3. Polesiński Z., Malecki I., Rzeszotarska J., *Application of acoustic method for evaluation of elastodynamic and pseudoplastic parameters of ceramics*, Key Engineering Materials, 206–213, 771–774, 2002.
4. *Metoda i stanowisko pomiarowe do określania wielkości oraz rozkładu rozmiarów cząstek występujących w zawiesinach polidyspersyjnych*, Polski Patent A1(21)320900 (22) 97 06 30 6(51) G01N 15/02, Biuletyn Urzędu Patentowego, N1(653), 1999.
5. Aleksiejuk M., Mitjuricz G., Szuba M., Rogozienko V., *Photoacoustic transformation in magnetoactive superlattice. Long-wave approximation*, 30th Winter School on Molecular & Quantum Acoustics, 101–109, 2001.
6. Kielczyński P., Iwamoto M., *Charge measurement in the modified Maxwell displacement current method*, Journal of Colloid and Interface Science, **224**, 429–430, 2000.
7. Ballantine D.S. et al., *Acoustic wave sensors. Theory, design and physico-chemical applications*, Academic Press, 1997.
8. Szejtli J., *Cyclodextrins and their inclusion complexes*, Akademiai Kiado, Budapest 1982.
9. Nomura T., Takebayashi M., Saitoh A., *Chemical sensor based on surface acoustic wave resonator using Langmuir-Blodgett film*, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr., **45**, 1261, 1998.
10. Vickers Z.M., *Food sounds: How much information do they contain?*, Journal of Food Science, **45**, 1980.
11. Roudault G. et al., *Influence of water on the crispness of cereal-based foods*, Journal of Texture Studies, **29**, 1998.

ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA MATERIAŁÓW

Julian Deputat

1 Metoda ultradźwiękowa

Konstruktorzy i użytkownicy budowli, środków transportu, narzędzi, maszyn i instalacji przemysłowych byli zawsze zainteresowani wiarygodną oceną jakości materiałów, z których wykonane były elementy tych konstrukcji. Odpowiedzi na pytania, czy użyty materiał ma oczekiwane własności w całej objętości, czy nie zawiera ukrytych wad, czy i jak długo jeszcze będzie można bezpiecznie wykorzystywać konstrukcję, kiedy należy dokonać naprawy i które elementy wymienić na nowe, mają zasadnicze znaczenie dla bezawaryjnej i bezpiecznej eksploatacji. Jeszcze do niedawna do odpowiedzi na takie pytania musiały wystarczać wyniki oględzin, opukiwania, badań próbek materiału pobranych z konstrukcji czy niszczących badań modeli. Nie było metod badania własności materiałów, które nie powodowałyby uszczerbku dla ich przydatności eksploatacyjnej.

Dopiero w pierwszej połowie XX wieku pojawiły się bardziej zaawansowane metody nieniszczących badań materiału. Opracowane metody: magnetyczna, proszkowa i penetracyjna pozwoliły wykrywać niewidoczne pęknięcia na powierzchni odpowiedzialnych elementów konstrukcji. Możliwość wykrywania objętościowych wad wewnętrznych w materiałach nieprzezroczystych dla światła pojawiła się wraz z odkryciem promieni rentgena i promieniowania jądrowego. Wprowadzona w latach czterdziestych ubiegłego wieku metoda ultradźwiękowa pozwala nie tylko wykrywać, lokalizować, oceniać kształt i rozmiary wad w postaci pęknięć, obcych wtrąceń i ubytków korozyjnych, ale także badać mikrostrukturę, własności sprężyste, wytrzymałość i stan odkształcenia materiału. Obecnie ultradźwiękowe badania stanowią w wielu dziedzinach przemysłu integralną część systemów zabezpieczenia jakości produkcji i ważne narzędzie oceny stanu technicznego eksploatowanych maszyn i instalacji.

Badania ultradźwiękowe mogą dostarczyć tak wielu informacji o badanym materiale dzięki temu, że do oceny wykorzystuje się cały szereg zjawisk związanych z propagacją różnych typów fal ultradźwiękowych. Samo badanie polega na wprowadzeniu do materiału kontrolowanego obiektu krótkich impulsów sprężystych fal o częstotliwości ultradźwiękowej, analizie otrzymanych ech od granic elementu i ewentualnych wad wewnętrznych, a także na pomiarach współczynnika tłumienia i prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.

Wykorzystywane są fale powierzchniowe, objętościowe podłużne i poprzeczne o różnej polaryzacji oraz różne mody fal prowadzonych. Długości fal wzbudzone w badanym materiale zawierają się w granicach od ułamków milimetra do wielu centymetrów. Wiązki fal objętościowych można wprowadzać do materiałów badanych obiektów w różnych kierunkach. Amplituda echa wad materiałowych i przebieg zmian amplitudy podczas przemieszczania głowicy ultradźwiękowej zawierają informacje o rozmiarze i charakterze wady. Zmierzona zmiana amplitudy impulsu na znanej drodze w badanym materiale pozwala wyznaczyć współczynnik tłumienia fal. Pomiar czasu przejścia impulsów przez znaną drogę w badanym materiale są podstawą do wyznaczania prędkości fal, a w materiałach o znanej prędkości służą do wyznaczania głębokości, na której

znajdują się wady i do pomiarów grubości jednostronnie dostępnych elementów. Wartość współczynnika tłumienia zależy od struktury materiału i w wartości współczynnika tłumienia zawarte są informacje o rozmiarze, kształcie, orientacji i stanie granic ziaren, obecności i koncentracji porów i mikroszczelin, a także o gęstości i wzajemnym oddziaływaniu dyslokacji i defektów punktowych. Pomiary prędkości fal są wykorzystywane do wyznaczania wartości stałych sprężystości, do oceny wytrzymałości materiałów kruchych i do badania stanu odkształcenia i naprężenia materiału. Kierunkowe rozkłady prędkości fal ultradźwiękowych odzwierciedlają anizotropię własności sprężystych i korelują się z rozkładami zdolności do odkształcenia plastycznego metali konstrukcyjnych.

Początki i rozwój ultradźwiękowych badań materiałów w Polsce są bezpośrednio związane z IPPT PAN. Tu powstały pierwsze polskie defektoskopy, betonoskopy i mierniki grubości. Badania prowadzone w IPPT zaowocowały pierwszymi wdrożeniami. W pierwszym okresie prace poświęcone były rozwojowi aparatury i opracowaniu metod wykrywania, oceny rozmiarów i badaniu szkodliwości wad w postaci nieciągłości (pęknięcia, obce wtrącenia, słabe połączenie).

Aby sprostać rosnącym wymaganiom jakości, niezbędne jest ciągłe zwiększanie wykrywalności wad i rozszerzanie zakresu uzyskiwanych informacji o stanie materiału. Istnieje potrzeba opracowywania sposobów badania nowych wyrobów, często wykonanych z materiałów o niespotykanych dotychczas własnościach i przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach. Potrzebna szybkość badania i obiektywizacja oceny wymagają automatyzacji badań, standaryzacji procedur i ujednoczenia wymagań w stosunku do prowadzących badania i oceniających wyniki.

Na kierunku rozwoju ultradźwiękowych badań materiałów mają wpływ z jednej strony aktualne i spodziewane potrzeby różnych dziedzin gospodarki, a z drugiej osiągnięcia z dziedziny fizyki, elektroniki, technik komputerowych, inżynierii materiałowej, robotyki i wielu innych dziedzin nauki.

Ultradźwiękowymi badaniami materiałów zajmuje się obecnie w IPPT siedmioosobowa pracownia. Wyznacza to skalę podejmowanych zadań. Prace koncentrują się na badaniach struktury i własności materiałów oraz na rozwoju opracowanej w IPPT techniki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń własnych.

2 Ultradźwiękowe badania naprężeń własnych

Naprężenia własne w materiale elementów konstrukcyjnych powstają bądź w czasie produkcji, bądź w eksploatacji, w wyniku niejednorodnych odkształceń plastycznych. Naprężenia te sumują się z naprężeniami eksploatacyjnymi. Silne naprężenie rozciągające jest groźne, gdyż przyspiesza powstanie i rozwój pęknięć. Naprężenie ściskające przeciwdziała powstawaniu i hamuje rozwój pęknięć, ale może niebezpiecznie obniżać odporność elementu na wyboczenie. Do niedawna informacje o obecności i wartości naprężeń własnych można było uzyskać tylko przez pomiar odkształcenia spowodowanego uwolnieniem naprężenia, co oznacza zniszczenie badanego elementu. Na podstawie precyzyjnych pomiarów czasu przejścia różnych typów fal ultradźwiękowych przez stały odcinek drogi w materiale badanego elementu (± 1 ns) możliwe są szybkie, nieniszczące pomiary wartości naprężeń własnych i to zarówno w bliskiej powierzchni warstwie materiału, jak i w jego objętości.

Opracowane w IPPT metody i zbudowana aparatura (seria DeBro) uzyskały uznanie jednostek kwalifikacyjnych w zastosowaniu do pomiarów naprężeń własnych powstających w procesie kształtowania na zimno elementów stalowych (gięcie, prostowanie) i naprężeń własnych powstających w wyniku nierównomiernych rozkładów temperatury w pracujących elementach konstrukcji. Aparaty te są stosowane do pomiaru naprężeń podłużnych w szynach i do monitorowania rozwoju obwodowych naprężeń własnych, powstających w kołach kolejowych w wyniku uderzeń cieplnych przy hamowaniu. Normy i zalecenia określają graniczne wartości dopuszczalnych naprężeń własnych w szynach i w wieńcach monoblokowych kół kolejowych.

Potrzebne jest poszerzenie zakresu zastosowań, zwiększenie dokładności, rozdzielczości i szybkości pomiarów. Perspektywiczne są następujące kierunki prac:

Opracowanie sposobów wyznaczania rozkładów naprężenia w objętości badanych elementów. Istniejące techniki ultradźwiękowe pozwalają mierzyć średnią wartość naprężenia na drodze fali branej pod uwagę przy pomiarze prędkości fal. Znajomość rozkładu naprężenia własnego w objętości badanego elementu i możliwość oceny skuteczności zabiegów odprężających pozwala na określenie warunków bezpiecznej eksploatacji, a także umożliwić uzyskanie wyrobów o ściśle określonym i stabilnym w eksploatacji kształcie. Dotyczy to zarówno takich elementów jak wielkogabarytowe odkuwki cylindryczne na wały okrętowe, jak i małych elementów o złożonym kształcie dla przemysłu lotniczego i mikromechaniki.

Opracowanie skutecznego sposobu pomiaru naprężeń cieplnych w szynach kolejowych w torze. Zmiany temperatury mogą powodować powstanie silnych naprężeń ściskających, które są przyczyną niebezpiecznych wyboczeń toru. Wzrost szybkości, natężenia ruchu i obciążeń kół pociągów sprawia, że problem ten jest szczególnie aktualny. Zaproponowana przez IPPT metoda, opierająca się na pomiarach czasu przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych rozchodzących się wzdłuż bocznej powierzchni szyny, przeszła próby przeprowadzone w różnych warunkach klimatycznych i uzyskała pozytywne rekomendacje jako najbardziej obiecująca. Należy zbudować prototyp urządzenia pomiarowego, przeprowadzić niezbędne badania walidacyjne i opracować system, który mógłby pracować w sieci kolejowej. Wspólnie z Instytutem Badań Nieniszczących w Saarbrücken podjęto starania o przeprowadzenie takich badań na silnie obciążonej linii kolejowej na terenie Niemiec. W trakcie planowanych badań aparatura budowana w IPPT będzie mierzyć temperaturowe zmiany naprężeń podłużnych w szynie, a aparatura zbudowana w Saarbrücken będzie monitorować zmiany struktury w bocznych obszarach główki szyny. Spodziewamy się uzyskać system diagnostyczny, pozwalający w porę uprzedzić o niebezpieczeństwie wyboczeń toru i o groźącym pękaniu szyn. Zastosowanie proponowanych rozwiązań na inne rodzaje urządzeń (np. rurociagi) jest wysoce prawdopodobne.

Opracowanie sposobu badania naprężeń własnych w elementach hartowanych, a w szczególności w walcach hutniczych. Niekorzystne naprężenia własne w hartowanych walcach hutniczych są przyczyną skrócenia czasu eksploatacji, a czasem powodują pęknięcie nowych walców. Straty z tego powodu są ogromne. Dotychczasowe próby opracowania skutecznej techniki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń własnych w walcach nie doprowadziły do zadowalających rozwiązań. Trudności uzyskania informacji o wartości naprężenia wynikają z silnych zmian własności materiału w kierunku radialnym. Badania propagacji fal ultradźwiękowych rozchodzących się w materiale hartowanych walców hutniczych mogą wskazać korzystne rozwiązanie.

Automatyzacja pomiarów naprężenia. Zastosowanie pomiarów naprężeń własnych w linii produkcyjnej wymaga automatyzacji pomiaru zarówno ze względu na potrzebną szybkość wykonania pomiaru, jak też dla pełnej obiektywizacji oceny badanego elementu. Nowoczesne systemy jakości wymagają wykluczenia niepewności, wynikających z błędów personelu wykonującego pomiar. Automatyzacja pomiarów prowadzonych przy wykorzystaniu fal podłużnych jest sprawą technicznie prostą. Wprowadzenie automatycznych pomiarów naprężenia na podstawie zjawiska dwójłomności akustycznej wymaga postępu w technice sprzęgania akustycznego głowic z badanym materiałem i opracowania sposobu uwzględniania lokalnych różnic anizotropii akustycznej materiału.

Opracowanie sposobów pomiaru naprężeń własnych w odlewach, materiałach ceramicznych, skałach i w kompozytach. To zupełnie nowe i otwarte pola potencjalnych zastosowań techniki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń. Znaczna niejednorodność struktury i własności sprężystych tych materiałów stanowi dla dotychczas stosowanych technik analizy wyników badań ultradźwiękowych przeszkodę, uniemożliwiającą wydobycie ilościowych informacji o polu naprężeń. Zaproponowanie bardziej skutecznych nieniszczących sposobów badania i bardziej efektywnych metod analizy wyników wymaga szerokich badań własności akustycznych i mechanicznych tych materiałów. Perspektywiczne jest wykorzystanie różnych typów fal ultradźwiękowych przechodzących przez ten sam obszar badanego materiału i zaawansowanych metod analizy impulsów. Wielokrotnie podkreślana potrzeba opracowania skutecznej nieniszczącej techniki badania naprężeń własnych w odlewach, ceramice, skałach i w kompozytach uzasadnia podjęcie badań w tym kierunku.

3 Supertwarde kompozyty

Badania ultradźwiękowe mogą służyć do wykrywania powstających w produkcji i w czasie eksploatacji wad w różnego rodzaju materiałach kompozytowych, do charakteryzowania własności sprężystych, a w niektórych przypadkach mogą dostarczać ważnych informacji o własnościach eksploatacyjnych konstrukcji wykonanej z kompozytu. Możliwość oceny własności mechanicznych kompozytów na podstawie badań ultradźwiękowych jest przedmiotem prac prowadzonych w Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów. Opracowywane modele opisujące propagację fal w wieloskładnikowym materiale sprawdzają się w praktyce. Dotychczas przeprowadzone badania wskazują na możliwość oceny spodziewanego czasu pracy narzędzi wykonanych z supertwardych kompozytów na bazie diamentu i azotku boru. Zmierzone wartości współczynnika tłumienia i prędkości fal ultradźwiękowych korelują się z własnościami eksploatacyjnymi tych kompozytów. Praktyczne wykorzystanie możliwości ultradźwiękowych badań narzędzi kompozytowych wymagają precyzyjnych pomiarów współczynnika tłumienia i prędkości fal ultradźwiękowych o częstotliwościach powyżej 20 MHz i opracowania modeli opisujących oddziaływanie fal ultradźwiękowych ze składnikami struktury, uwzględniających pomijane dotychczas zjawiska, a między innymi występującą w tych kompozytach anizotropię własności sprężystych. Rozpoczęto przygotowania do podjęcia badań w tym zakresie. Trwają prace nad doskonaleniem modelu propagacji fal. Kompletowana jest aparatura.

4 Akustoplastyczność i badanie pełzania

Pomiary prędkości i współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych, w szczególności kierunkowe rozkłady wartości tych wielkości są źródłem niedostępnych na innej drodze informacji o mechanizmach odkształcenia plastycznego monokryształów. Dobierając rodzaj, kierunek propagacji i kierunek polaryzacji fal można obserwować zmiany w sieci dyslokacji w wybranych układach poślizgu. Podobnie śledzenie zmian prędkości i współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych w odkształcanym plastycznie metalu polikrystalicznym dostarcza informacji o mechanizmach czynnych w poszczególnych etapach procesu odkształcenia plastycznego. Informacje te są szczególnie interesujące, gdyż pochodzą z wnętrza badanych próbek. Porównanie przebiegów zmian prędkości i współczynnika tłumienia zarejestrowanych w czasie odkształcania próbek z przewidywanymi przez modele, zakładające różne mechanizmy odkształcenia, pozwala na weryfikację tych modeli. Ultradźwiękowe badania mechanizmów odkształcenia plastycznego są szczególnie obiecujące w przypadku stopów metali. Zainteresowanie wynikami badań w zakresie akustoplastyczności wynika także z tego, że mogą one wskazać sposób oceny stopnia odkształcenia plastycznego materiału w odpowiedzialnych elementach konstrukcji. W IPPT rozpoczęto przygotowania do badań zmian parametrów akustycznych metali konstrukcyjnych w procesie pełzania. Proponuje się interesujące dla przemysłu badania zmian prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych w procesie pełzania nowych gatunków stali, przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach i stopów lekkich stosowanych w lotnictwie. Celem badań jest bliższe poznanie mechanizmów pełzania i próba znalezienia ultradźwiękowego kryterium oceny stopnia utraty własności wytrzymałościowej przez materiał pracujący w warunkach pełzania.

5 Wykorzystanie efektów nieliniowych

Nieniszcząca ocena wytrzymałości doraźnej materiałów kruchych jak beton, żeliwo czy porcelana opiera się na korelacyjnej zależności między wytrzymałością na ściskanie i prędkością fal ultradźwiękowych. W przypadku stali i wielu innych stopów metali takiej zależności nie ma. Potrzebna jest szybka, nieniszcząca ocena własności wytrzymałościowych materiałów technicznych zarówno w stanie dostawy, jak też w pracujących elementach konstrukcji. Uzasadnione nadzieje są związane z wykorzystaniem efektów nieliniowych. Nieliniowość zależności napężenie-odkształcenie wpływa na propagację fal w materiale, powodując między innymi powstawanie drgań harmonicznych w stosunku do rozchodzącego się impulsu fal ultradźwiękowych, czy zależność prędkości fal od napężenia. Ta ostatnia zależność, nazywana zjawiskiem elastoakustycznym, jest wykorzystywana do wyznaczania stałych sprężystości trzeciego rzędu, charakteryzujących stopień nieliniowości sprężystej materiału. Stałe te wylicza się na podstawie wyznaczonych doświadczalnie zmian prędkości różnych typów fal w wyniku jednoosiowego napężenia, któremu poddawana jest próbka. W metalach technicznych zmiany prędkości fal pod wpływem napężenia są małe. W najbardziej korzystnym przypadku fal podłużnych, rozchodzących się w stali w kierunku napężenia, przyrost napężenia rozciągającego o 10 MPa powoduje zmniejszenie prędkości o około 0,65 m/s, co stanowi zaledwie 0,01%. W Pracowni Nieniszczących Badań Materiałów IPPT zbudowano aparaturę ultradźwiękową, pozwalającą na prowadzenia wystarczająco dokładnych pomiarów zmian prędkości fal i opracowano technikę wyznaczania stałych sprężystości trze-

ciego rzędu. Perspektywiczne są badania związków między stałymi sprężystości trzeciego rzędu i wytrzymałością materiałów konstrukcyjnych.

6 Wykorzystanie przetworników elektromagnetyczno-akustycznych

W automatycznych badaniach ultradźwiękowych istotne jest utrzymanie jednakowego sprzężenia akustycznego między głowicą i powierzchnią badanego elementu podczas przemieszczania głowicy. Wymóg niezmienności sprzężenia jest szczególnie ważny, gdy do oceny wykorzystuje się zmierzone wartości czasu przejścia fal ultradźwiękowych. Zaletą elektromagnetyczno-akustycznych przetworników jest ich zdolność do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych bez potrzeby stosowania cieczonej warstwy sprzęgającej między głowicą i powierzchnią badanego elementu. Przy badaniu naprężeń i wyznaczaniu stałych sprężystości trzeciego rzędu niezbędna jest dokładność pomiaru czasu przynajmniej ± 1 ns. Przy takiej dokładności pomiaru istotne stają się różnice faz między składowymi impulsu ultradźwiękowego wzbudzonymi przez głowicę elektromagnetyczno-akustyczną w wyniku działania siły elektrodynamicznej na wzbudzone w materiale prądy wirowe i wyniku zjawiska magnetostrykcji. Zbadanie udziału tych dwóch mechanizmów wzbudzania fal pozwoli wyjaśnić różnice wyników uzyskiwanych podczas badania tej samej próbki falami ultradźwiękowymi wytworzonymi przez przetworniki piezoelektryczne i elektromagnetyczno-akustyczne.

7 Rozpoznawanie rodzaju wad

W stosowanych procedurach oceny wykrytych wad w postaci nieciągłości, ustalenie ich rozmiarów i charakteru opiera się na pomiarach amplitudy echa i na parametrach obwiedni echa wyznaczanych podczas przesuwania głowicy. Ustalenie kształtu, rodzaju i rozmiarów wady ma podstawowe znaczenia dla oceny stopnia jej szkodliwości. Przy znacznym zawansowaniu techniki ultradźwiękowych badań materiałów nie jest rozwiązany problem rozróżniania charakteru wykrytych wad w postaci nieciągłości. Uzyskiwana trafność oceny rodzaju wady jest niewystarczająca. Perspektywiczne jest zastosowanie metod analizy impulsu ultradźwiękowego odbitego czy ugiętego na krawędziach wady, metod rozpoznawania wzorca i technik wizualizacji wykrytych nieciągłości. Warunkiem skuteczności prac w tym kierunku jest poprawa wyposażenia pracowni w nowoczesną aparaturę ultradźwiękową, pozwalającą na wykonywanie pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości i temperatur, na bardziej efektywne zbieranie danych i stosowanie zawansowanych metod obróbki wyników.

8 Potrzeba współpracy z przemysłem

Ostatecznym odbiorcą wyników prac w zakresie ultradźwiękowych badań materiałów jest przemysł i miarą efektywności tych prac są wdrożenia. Opracowywane metody badań, budowana aparatura i proponowane sposoby oceny wyników muszą odpowiadać potrzebom i warunkom laboratorium przemysłowego czy linii produkcyjnej i muszą spełniać stosowne wymagania jednostek klasyfikacyjnych. Dlatego potrzebne są kontakty i współpraca z przemysłem, począwszy

od formułowania zadań badawczych, przez weryfikację założeń nowych rozwiązań do prób walidacyjnych i eksploatacyjnych. Wiele badań nad propagacją fal ultradźwiękowych w ośrodkach niejednorodnych, oddziaływań fal z polami naprężeń własnych, czy badań wpływu odkształceń plastycznych na własności akustyczne materiałów konstrukcyjnych, można wykonać tylko na udostępnionych próbkach takich jak: wielkogabarytowe odkuwki stalowe, wały okrętowe, zbiorniki, rurociągi, czy walce hutnicze. Pracownia Ultradźwiękowych Badań Materiałów utrzymuje i zamierza dbać o kontakty z laboratoriami i przemysłem metalowym wielu krajów. Istotnym elementem współpracy z przemysłem jest działalność szkoleniowa, normalizacyjna i konsultacyjna. Pracownia organizuje seminaria poświęcone przeglądowi osiągnięć w zakresie nieniszczących metod badań, uczestniczy we wprowadzaniu europejskiego systemu szkolenia i certyfikacji personelu wykonującego badania nieniszczące, a także konsultuje działalność normalizacyjną.

INŻYNIERSKIE PROJEKTOWANIE OPTYMALNE

Witold Gutkowski

1 Wstęp

Projekt i projektowanie to pojęcia bardzo pojemne w swych znaczeniach. Z tego względu w poniższych rozważaniach ograniczę się do *projektowania inżynierskiego (engineering design)*. Bez wdawania się w ścisłe określenie tego pojęcia, będę je rozumiał jako proces poszukiwania, tworzenia, planowania i przygotowywania tego wszystkiego, co niezbędne do materialnej realizacji zamierzonego przez projektanta obiektu. Może nim być: konstrukcja, maszyna, urządzenie techniczne, proces technologiczny, system informatyczny itp.

Projektowanie, jako proces, nie leży obecnie bezpośrednio w polu naszych zainteresowań badawczych. Zajmujemy się zwykle, wprawdzie dość szczegółowo, ale tylko jego elementami, które dają się sformalizować matematycznie i wyrazić liczbowo przy pomocy odpowiednich programów komputerowych. Ponieważ jednak, liczba elementów projektów, dających się sformalizować, dość szybko rośnie, powinniśmy sobie zdawać sprawę, że zasięg naszych dociekań będzie się znacznie poszerzał. Z tego względu pozwoliłem sobie na te kilka słów wstępu.

Głównym zadaniem projektanta jest sporządzenie *dokumentacji* niezbędnej dla realizacji zamierzonego przedsięwzięcia inżynierskiego. Dokumentacja określa w pierwszej kolejności, czym zamierzony obiekt ma być i jakie ma spełniać funkcje. Współczesna dokumentacja projektowa charakteryzuje się czterema głównymi cechami:

- *złożonością projektu (complexity of design)* — trzeba gromadzić wiedzę, z różnych dziedzin nauki, stosować różne urządzenia i narzędzia itp.,
- *kompromisem sprzecznych kryteriów (trade-off)* — trzeba pogodzić jakość z ceną, z czasem wykonania, itp.,
- *odstępstwami projektu od obiektu docelowego (design gap)* — uzyskany obiekt, wskutek złożoności projektu i potrzeby kompromisów, zwykle odbiega mniej lub więcej od projektu wyjściowego.,
- *ryzykiem (risk)* — jeżeli bowiem odstępstwa obiektu od projektu będą znaczne, całe przedsięwzięcie może okazać się nieudane. Oczywiście w ramach ryzyka leży przede wszystkim trafienie w wymagania potencjalnego nabywcy.

W procesie projektowania schodzą się dwa różne kierunki postępowania: *analiza i synteza*. Analiza obejmuje głównie modele fizyczne, zachowania się projektowanego obiektu inżynierskiego. Jest to główny obszar naszego zainteresowania. Z kolei synteza jest procesem wywołania takich potrzeb analizy i wykorzystywania nagromadzonej dotychczas wiedzy.

Podstawą projektowania większości obiektów inżynierskich jest *analiza i optymalizacja parametrów*. Analiza parametrów, określających projektowany obiekt, oparta jest w zarysie na trzech

elementach. Pierwszy z nich to *identyfikacja* podstawowych parametrów, mających wpływ na postać i zachowanie się obiektu. Drugi element polega na kształtowaniu postaci (formy) obiektu. Trzecim elementem jest sprawdzenie czy proponowana postać fizyczna spełnia warunki konieczne, aby obiekt spełniał zamierzony cel. Te trzy elementy, przedstawione w bardzo ogólnym zarysie, stanowią trzy kroki w pętli iteracyjnej, stopniowego poprawiania projektu.

Coraz częściej do tego procesu poszukiwania właściwych parametrów włączana jest *teoria optymalizacji*. Stąd wynika, główna myśl tego opracowania.

2 Przewidywany postęp w projektowaniu inżynierskim

Sięgając pamięcią 50 lat wstecz oraz obserwując obecne zmiany zachodzące w projektowaniu, można podjąć próbę przewidzenia rozwoju metod projektowania inżynierskiego. Zaczę od stwierdzenia, iż nie ma wyraźnie zarysowanej spójności w metodach projektowania w różnych dziedzinach techniki. Postęp zwykle pochodzi z przemysłu zbrojeniowego, lotniczego i samochodowego, które przeznaczają stosunkowo najwięcej środków na badania i rozwój. Nie mniej można wyśrodkować, pewne wspólne cechy projektów we wszystkich dziedzinach techniki. Oto niektóre z nich, które będą miały wpływ na rozwój technologiczny i metody projektowania w najbliższych dekadach:

2.1 Wzrost wiedzy

W pierwszej kolejności, istotny wpływ na metody projektowania będzie miał wzrost naszej wiedzy. Znacznie więcej wiemy, niż pół wieku temu, na temat mechanicznych zachowań się konstrukcji i wszelkiego rodzaju urządzeń. Wzrasta nasza wiedza na temat elektroniki chemii i sterowania. Szczególnie istotne znaczenie dla dalszego postępu technologicznego będą miały badania interdyscyplinarne, ukierunkowane na rozwiązywanie poszczególnych problemów. Przykładem takiego zagadnienia są oczyszczalnie ścieków, gdzie spotykają się chemia, biologia, mechanika płynów i elektronika.

2.2 Rozwój elektroniki, informatyki, komputerów

Już dzisiaj elementy elektroniki, informatyka i coraz sprawniejsze komputery pozwalają na rozwiązywanie całego szeregu złożonych problemów. Jedną z głównych cech tych trzech składników jest możliwość zbierania, przetwarzania i wykorzystywania informacji, w czasie rzeczywistym. Dalszy postęp w tych dziedzinach pozwoli „panować” nad licznymi urządzeniami, poprzez stosowne systemy sterowania.

2.3 Projektowanie we współpracy (collaborative design)

Wspomnianemu wyżej postępowi w zakresie elektroniki, informatyki i komputerów, towarzyszyć będą istotne zmiany w organizacji samego projektowania. Dotychczasowe zintegrowane systemy projektowania, zgromadzone w olbrzymich korporacjach przemysłowych, zostaną stopniowo rozproszone, również geograficznie, na wyspecjalizowane zespoły połączone sieciami internetu. Już pierwsze takie próby zostały podjęte przez Airbus SAS i Renault. Będą one obejmowały nie tylko

sam proces projektowania, ale będą jednocześnie sprzężone z wykonawcami poszczególnych składowych urządzeń, stanowiących cel wspólnego przedsięwzięcia. Spowoduje to zwiększenie szans na udział w projektowaniu stosunkowo małych, ale wyspecjalizowanych i prężnych zespołów badawczych, oferujących zastosowania najnowszych wyników prac naukowych.

2.4 Symulacja

W przeszłości, znaczną funkcję w procesie tworzenia nowych obiektów technicznych miało doświadczenie. Na podstawie projektu, wykonywano fizyczny obiekt, lub jego model w skali i porównywano otrzymane wyniki z założeniami projektowymi. Skromniejsza wiedza, bardzo skromne, w porównaniu z dzisiejszymi, możliwości obliczeniowe, powodowały konieczność wprowadzenia istotnych zmian. Zmian kosztowych, szczególnie w części eksperymentalnej. Dzisiejsze możliwości informatyczno-komputerowe, a w szczególności odtwarzanie procesów w czasie rzeczywistym, umożliwiają znacznie precyzyjniejszą weryfikację projektu przed jego realizacją fizyczną. Wystarczy powiedzieć, że samoloty Boeinga, odbywają dziesiątki lotów symulowanych, zanim projekt przejdzie do „metalowego” wykonania. Niemniej, nie wydaje się, aby prawnicy zgodzili się na zupełne wyeliminowanie prób prototypów, tam gdzie wchodzi w grę ochrona ludzkiego życia lub zdrowia. Symulacja znacznie ogranicza „przerwę projektową” (design gap) pomiędzy pomysłem wyjściowym, a jego fizyczną realizacją. Zagadnienie symulacji, ze względu na jej wagę, jest tematem odrębnego rozdziału niniejszego opracowania.

2.5 Sterowanie

Jak wiadomo, pierwsze praktyczne zastosowania sterowania sięgają tysiąca lat przed naszą erą, gdy zbudowano zegar wodny. Początki teorii sterowania można umieścić w czasie, na przełomie XIX i XX wieku. Zastosowania praktyczne odnotowujemy dopiero w technice zbrojeniowej, głównie raket, w połowie ubiegłego stulecia. Decydującym elementem w zastosowaniach sterowania jest możliwość zastosowania sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym. Uruchamia to przebogata gama zastosowań. W pierwszej kolejności miało to znaczenie dla robotów przemysłowych, głównie w przemyśle motoryzacyjnym. Stopniowe zastosowanie sterowania obserwujemy w budownictwie, w postaci konstrukcji inteligentnych (smart structures), w sprzęcie medycznym, np. dozującym insulinę, w sprzęcie gospodarstwa domowego, w procesach chemicznych i w wielu innych obiektach. Trudne do przecenienia znaczenie będzie miało pojawienie się bezprzewodowej komunikacji (wireless communication) przy zastosowaniu „Bluetooth technology”. W chwili obecnej grupa firm japońskich, finansowana przez rządową agendę d.s. badań rozwoju, pracuje nad prototypem nowego zegarka ręcznego. Za pomocą technologii Bluetooth zegarek będzie mógł, bezprzewodowo łączyć się z komputerem osobistym, internetem i telefonią komórkową.

2.6 Procesy stochastyczne

Większość dotychczas wykonywanych projektów, a więc i wytwarzanych obiektów, oparta jest na analizie deterministycznej. Z drugiej strony, znacząca część konstrukcji, urządzeń i procesów technologicznych działa przy stochastycznym charakterze parametrów. Zarówno cechy materiałowe, procesy degradacji i zniszczenia materiałów jak i, a może przede wszystkim, wszelkiego

rodzaju czynniki zewnętrzne (siły, pola, temperatury prędkość wiatru, wody itp.) mają charakter stochastyczny. Wzrasta znaczenie parametrów o zmiennych losowych w projektach inżynierskich i ich optymalizacji. Zagadnieniom stochastycznym w inżynierii i przewidywanym kierunkom badawczym, w tym zakresie, poświęcono jest odrębny rozdział niniejszego tomu.

2.7 Bezpieczeństwo i ekologia

Należy przewidzieć wzrost wymagań poszczególnych państw, w postaci uregulowań prawnych, w zakresie bezpieczeństwa i ekologii. Bezpieczeństwo jest wyrażane stosownymi współczynnikami, wynikającymi między innymi z analizy niezawodności. W obszarze ochrony środowiska można oczekiwać wymagań co najmniej w dwóch kierunkach: ograniczenie zanieczyszczeń w procesach technologicznych i ograniczenie czynników oddziaływujących bezpośrednio na człowieka, w postaci hałasu, drgań i wszelkiego rodzaju pól fizycznych (temperatury, magnetycznych, itp.). Pojawi się też niewątpliwie trzeci kierunek, dotychczas niemal nie uwzględniany w projektach. Chodzi o wymogi, nakazujące objęcie projektem tego, co się stanie z obiektem po zakończeniu jego użytkowania. Projektanci będą zmuszeni uwzględnić proces likwidacji zaprojektowanego obiektu, po zakończonej eksploatacji tak, aby minimalizować zanieczyszczenie środowiska i maksymalizować wykorzystanie materiałów, kończącego żywot obiektu. Może to spowodować znaczną reorientację w badaniach materiałów. Materiały nie tylko będą musiały jak najlepiej spełniać swoją funkcję, ale dodatkowo będą musiały być łatwo przetwarzane lub degradowane.

2.8 Koszty i ryzyko

Problem kosztów i ryzyka, ewentualnego niepowodzenia w realizacji zamierzonego przedsięwzięcia, był i będzie centralnym punktem każdego projektu inżynierskiego. Wobec wzrastającej wiedzy i możliwości algorytmizacji poszczególnych elementów projektu należy przewidywać wzrost łączenia poszczególnych obszarów projektu (projekt wstępny, analiza i optymalizacja fizyczna, proces technologiczny) w jedną całość. Przez to wzrosną możliwości uzyskania produktów bardziej zbliżonych do zamierzonych. Zwiększą się możliwości badań rynku, z punktu widzenia zaspokojenia potrzeb klientów. Już dziś powstają algorytmy oparte na wiedzy z zakresu psychologii, pozwalające określać zainteresowanie klientów, a więc możliwe zmniejszenie ryzyka, że wytworzony obiekt nie znajdzie nabywców.

3 Optymalizacja inżynierska obiektów

Dotychczasowa wiedza na temat metod optymalizacji i szybko rosnące możliwości komputerowego rozwiązywania praktycznych zadań optymalizacji składają do stwierdzenia, iż najbliższe dziesięciolecie będą się charakteryzowały niemal lawinowym wzrostem zastosowań optymalizacji w projektowaniu inżynierskim. Obecna sytuacja w praktycznym wykorzystaniu optymalizacji może być porównana do praktycznego wykorzystania analizy z przed niemal pół wieku. Wtedy to metody analizy, głównie MES, były w powijakach. Metoda elementów skończonych była bardziej przedmiotem dociekań naukowych niż zastosowań praktycznych. Jednakże, z biegiem lat,

obserwowaliśmy niemal lawinowy wzrost zainteresowania analizą komputerową. Powstały dziesiątki profesjonalnych oprogramowań metody. Obecnie, nie można sobie wyobrazić poważnego projektu inżynierskiej konstrukcji bez trójwymiarowej analizy z zastosowaniem MES. Dziś sytuacja w zakresie optymalizacji jest w pewnym sensie podobna. Istnieje dość ograniczona liczba profesjonalnych programów optymalizacyjnych. Prace koncentrują się na pracach badawczych w środowiskach naukowych. Należy się jednak spodziewać, że w nadchodzących dziesięcioleciach, proces stosowania optymalizacji w projektowaniu inżynierskim rozwinie się dynamicznie. Jak wiadomo, optymalizacja wymaga znacznie więcej wiedzy, informacji i czasu obliczeniowego niż analiza. Niezbędne jest ustalenie wszelkiego rodzaju ograniczeń, zbiorów dopuszczalnych rozważanych parametrów itp. Z tego względu sam proces optymalizacji jest o wiele bardziej intelektualnie i czasowo pracochłonny niż analiza. Z drugiej zaś strony obserwujemy podwajanie się mocy komputerów, co kilka lat. Sprawi to, że optymalizacja stanie się praktycznie i powszechnie możliwa. Jednym słowem, tak jak dzisiaj nie można sobie wyobrazić projektu bez analizy komputerowej, np. za pomocą MES, za kilka dziesięcioleci trudno będzie sobie wyobrazić projekt bez prostszej lub bardziej złożonej optymalizacji.

- Praktycznie niemożliwe jest wymienienie obiektów inżynierskich, które będą mogły być optymalizowane. Jeżeli przez obiekt przyjmiemy wspomniane we wstępie pojęcie związane ze wszystkim, co inżynierowie projektują, to można powiedzieć, że wszystkie obiekty będą podlegały optymalizacji. Tempo tego procesu będzie głównie zależało od poznawania zjawisk związanych z danym obiektem, możliwością ich algorytmizacji..

- Przyjrzyjmy się przykładowej konstrukcji, jaką jest most. Optymalizacja może być podzielona niejako na elementy. Można odrębnie traktować ciężar jako funkcję celu i odrębnie traktować jako funkcję celu minimalizację drgań przy zastosowaniu stosownego sterowania. Kolejnymi funkcjami celu, traktowanymi odrębnie, mogą być: stopień degradacji konstrukcji, niezawodność, koszt eksploatacji i wreszcie koszt całego przedsięwzięcia.

4 Zasięg optymalizacji

Przez szeroki zasięg będę rozumiał możliwość objęcia procesem optymalizacji możliwie szerokiej liczby funkcji celu i ograniczeń w jeden algorytm optymalizacyjny.

4.1 Funkcje celu

Ze wzrostem naszej wiedzy będzie możliwe wprowadzenie coraz to nowych wymagań optymalizacyjnych, w postaci szerszego spektrum funkcji celu. W tym wypadku, przez wzrost wiedzy należy rozumieć między innymi możliwość przedstawienia analitycznego funkcji celu w powiązaniu ze zmiennymi decyzyjnymi i ograniczeniami. Dzisiaj najbardziej rozpowszechnione są funkcje celu związane z rozpoznawanymi już procesami fizycznymi. W przytoczonym przykładzie mostu, funkcja celu związana z minimum ciężaru związana jest z dość dobrze rozpoznaną wiedzą o mechanicznych własnościach mechanicznych. W chwili obecnej w projektowaniu (nie w badaniach), w wypadku zastosowania optymalizacji z reguły uwzględniana jest jedna funkcja celu. Wiązanie wyników optymalizacji przy zakładaniu kilku funkcji celu odbywa się metodami heurystycznymi.

4.2 Optymalizacja wielokryterialna

Projekt inżynierski będzie tym lepszy im więcej funkcji celu będzie jednocześnie zawartych w procesie optymalizacji. Jednym słowem, im więcej kryteriów optymalizacji będzie można rozpatrywać jednocześnie, tym projekt będzie lepszy. Szczególnie trudne będą takie procesy optymalizacyjne, w których nie ma przejścia w postaci analitycznej zależności z jednego kryterium na drugie. W chwili obecnej, jako zagadnienie wielokryterialne, a w zasadzie dwukryterialne, rozpatruje się funkcje celu o charakterach mechanicznych, na przykład minimalizacja ciężaru przy minimalizacji przemieszczeń. Jak wspomniałem, ze wzrostem naszej wiedzy, możliwości obliczeniowych i zastosowaniem projektowania we współpracy, będzie możliwe uwzględnienie coraz większej liczby funkcji celu. Należy się spodziewać, że przy projektowaniu „we współpracy”, do optymalizacji będzie można również włączyć materiał. Na przykład, w przypadku dużych konstrukcji inżynierskich, może się opłacać zamawiać u wytwórcy cement przygotowany według specjalnej, dla danej konstrukcji, receptury.

4.3 Sterowanie optymalne

Znacząca większość obiektów inżynierskich jest projektowana dla warunków dynamicznych, a więc zmiennych w czasie, przy często nie dokładnie określonych obciążeniach. Szeroki dostęp do systemów sterowania, ze sprzężeniem zwrotnym, działających w czasie rzeczywistym, pozwoli na opanowanie w znacznym stopniu różnic pomiędzy sygnałami wejścia i wyjścia. Będzie więc możliwe stawianie w projektowaniu wymagań, związanych z indeksami jakości, zwykle w postaci ich optymalizacji. Indeksy mogą mieć różnorodny charakter, np. związany z minimum potrzebnej energii, minimalizacją drgań maszyn i konstrukcji, minimalizacją odstępstwa pomiędzy zamierzonym i rzeczywistym dozowaniem składników w procesach chemicznych, itp. Zaistnieje więc potrzeba rozwiązywania problemów, z kilkoma, a z czasem i kilkunastoma indeksami jakości, lub mówiąc inaczej, z kilkoma funkcjami celu.

5 Metody optymalizacji

Trudno jest przewidzieć, szczególnie mnie, nie-matematycy, rozwój metod optymalizacji. Jedno jest pewne, że rozwój tych metod będzie wynikał, między innymi z potrzeb optymalnego projektowania inżynierskiego. Kilka poniższych spostrzeżeń ukierunkowanych jest właśnie na taki rozwój wymuszony przez zastosowania.

5.1 Metody wariacyjne

Znaczenie klasycznych metod wariacyjnych w projektowaniu, opartych na pracach Lagrange’a i Eulera, w znacznym stopniu osłabło po pojawieniu się metod programowania matematycznego, bardziej odpowiadających metodom numerycznym. Niemniej klasyczne metody wariacyjne nie znikną i będą stosowane zapewne do uproszczonych modeli, projektów wstępnych, gdy zechcemy analitycznie szacować zmiany parametrów, efekty dynamiczne itp.

Powstałe przed mniej więcej półwieczem dwie metody wariacyjne, a mianowicie: programowanie dynamiczne Belmana i zasada minimum Pontriagina, będą nadal stanowiły podstawy ste-

rowania optymalnego. Jak wspomniałem wcześniej, sterowanie optymalne coraz częściej pojawia się w projektach inżynierskich, a w szczególności sterowanie optymalne z przełączeniami i opóźnieniami czasowymi. Wykorzystanie metod Belmana i Pontriagina do złożonych systemów jest na razie ograniczane numerycznie. Stąd należy się spodziewać dalszego rozwoju metod numerycznych.

5.2 Programowanie nieliniowe

Od ponad półwiecza znane jest i stosowane programowanie nieliniowe, związane głównie z nazwiskami Kuhna i Tuckera. Daje ono formalne podstawy do rozwiązywania zagadnień ze skończoną liczbą zmiennych decyzyjnych (w granicy przechodzi w zagadnienie wariacyjne). Przez ten fakt, jak i przez stosunkowo prosty zapis, uwzględniający ograniczenia równościowe jak i nierównościowe, programowanie nieliniowe jest jakby stwarzane do metod numerycznych. Przez to zapewne będzie dalej stanowić podstawę inżynierskiego projektowania optymalnego. Ograniczenie w zastosowaniach obiektów o wielu parametrach decyzyjnych będzie zależało w znacznym stopniu od rozwoju metod numerycznych, które będą poszerzały swój zasięg z rozwojem komputerów.

5.3 Dyskretne programowanie nieliniowe

Zmieniając ciągle zbiory dopuszczalne parametrów projektowania na zbiory dyskretne (skończone) przechodzimy do zagadnień różnych jakościowo. Wszelkie rozważania oparte na rachunku różniczkowym tracą tu sens. Pozostajemy w obszarze zagadnień kombinatorycznych. Zagadnienia programowania dyskretnego nabierają i należy się spodziewać, że będą dalej nabierały inżynierskiego znaczenia. Wiele parametrów projektów inżynierskich zadanych jest w skończonej liczbie. Prostem przykładem są profile walcowane, podane w katalogu hutniczym, z których projektant musi wybrać zestaw, zapewniający optymalną konstrukcję.

Istnieje szereg metod poszukiwania optimum dyskretnego. Pojęciowo najprostszą z nich jest oczywiście przegląd wszystkich możliwych kombinacji, jakie wynikają z liczb dopuszczalnych parametrów i elementów obiektu, którym te parametry należy przypisać. Jednakże, już przy stosunkowo prostych projektach liczba kombinacji jest tak duża, że przekracza dzisiejsze i przyszłe możliwości obliczeniowe. Wystarczy wyobrazić sobie dziesięć parametrów dopuszczalnych i dziesięć elementów obiektu. W tym przypadku liczba kombinacji wynosi 10^{10} . Gdyby sprawdzanie jednej kombinacji (sprawdzanie równań stanu, ograniczeń) zajęło 0,01 sekundy, to sprawdzanie wszystkich kombinacji zajęłoby około 3 lat.

W czasie ostatniego półwiecza powstało szereg metod przeznaczonych do obliczania optimum dyskretnych. Mamy więc do dyspozycji między innymi metodę płaszczyzn odcinających, opartą na programowaniu liniowym, bądź metodę podziału i ograniczeń. Niestety jednak, gdy przechodzi się do zadań praktycznych o wspomnianej liczbie kombinacji, metody te zawodzą. Jednym słowem zadania optymalizacji dyskretniej czekają ciągle na efektywne i ścisłe metody. Warto obserwować rozwój tego, ważnego dla optymalnego projektowania inżynierskiego, działu matematyki, do którego, co należy przyznać, środowiska matematyków przywiązują istotne znaczenie.

5.4 Optymalizacja wielokryterialna

Niewątpliwie, z punktu widzenia inżynierskiego projektowania optymalnego, wzrosło znaczenie optymalizacji wielokryterialnej. Wiąże się ona w rzeczywistości ze wspomnianymi metodami jednokryterialnymi. W którym kierunku pójdzie rozwój optymalizacji wielokryterialnej, w stosunku do znanych metod, a szczególnie metod Pareto-optymalnych nie potrafię powiedzieć. Jedno jest pewne, że będą rosły zapotrzebowania na te metody i przez to zapewne się rozwiną.

5.5 Metody numeryczne optymalizacji

Przy olbrzymiej różnorodności problemów optymalizacyjnych, trudno oczekiwać jednej lub kilku metod o charakterze ogólnym. Tego typu metody, oparte na postaciach przybliżających funkcje i ograniczenia funkcjami kwadratowymi chyba słabo zdały egzamin. Należy raczej spodziewać się, zarówno w programowaniu ciągłym, jak i dyskretnym rozwoju metod problemowo zorientowanych. Metod o solidnych podstawach, ale dostosowanych do pewnej klasy problemów inżynierskich. Przykładem takich metod może być przeszukiwanie kontrolowane, polegające na eliminowaniu znaczących liczb kombinacji, na podstawie wiedzy o problemie. Podobne zjawisko metod problemowo zorientowanych zaobserwowaliśmy przypadku analizy MES.

5.6 Metody przybliżone

Wobec trudności znajdowania rozwiązań ścisłych, dla wielu złożonych problemów optymalizacji są stosowane i w najbliższym dziesięcioleciu będą stosowane metody przybliżone. We wszystkich zagadnieniach wyniki metody przybliżonej mogą służyć jako punkt wyjścia do stosowania metod ścisłych, które jak wiadomo są czułe na startowe wartości parametrów. Ponadto w wielu przypadkach w dalszym ciągu nie będą dostępne formalne lub numeryczne rozwiązania. Należy się jednak spodziewać w najbliższym czasie dalszych korzyści z metod stochastycznych, w rodzaju optymalizacji ewolucyjnej. Często tylko te metody mogą przybliżyć nas stosunkowo blisko do globalnego rozwiązania ciągłego czy dyskretnego. Należy jedynie bronić się przed zbytnim fetysyzowaniem tych metod, co ma miejsce w ostatnich latach. Obok metod stochastycznych istotną rolę będą dalej odgrywały przybliżone metody zorientowane na określony projekt.

6 Uwagi końcowe

Reasumując zamieszczony tekst, można przewidzieć znaczący rozwój optymalnego projektowania inżynierskiego. Będzie to wymuszane przez następujące czynniki:

- Wzrost naszej wiedzy o poszczególnych elementach projektu inżynierskiego. Takie procesy, jak metalurgia czy napędy hydrauliczne, które jeszcze pół wieku temu należały do rzemiosła, stały się przedmiotami badań naukowych. Wyniki tych badań umożliwią włączenie wiedzy o nich do formalnych matematycznych modeli. Z drugiej strony, wzrost mocy obliczeniowej komputerów wraz z rozwojem elementów elektroniki (czujniki, pędniki, itp.) umożliwią w znacznym stopniu zastosowanie naszej wiedzy w zakresie teorii sterowania.

- Powyższe możliwości pociągną za sobą zapotrzebowanie na optymalizację projektów inżynierskich, w znacznie szerszym zakresie niż dzisiaj. Spadnie zainteresowanie inżynierów jednostkowymi, wąsko specjalistycznymi zadaniami optymalizacji. Wzrośnie natomiast zainteresowanie łączną optymalizacją elementów, które są dzisiaj rozpatrywane odrębnie. Optymalny materiał, w optymalnej konstrukcji, przy optymalnym tłumieniu drgań, przy stochastycznych i różnorodnych obciążeniach, to będą zadania z kilkoma funkcjami celu. Stawia to również przed badaniami wyprzedzającymi nowe wyzwania, a co najmniej zrozumienie, iż procesy zachodzące w projektowaniu są równie nieuchronne i szybkie, jak w modelowaniu mechanicznym, którym się zajmujemy.
- Należy zwrócić uwagę na rozwój „projektowania we współpracy” (collaborative design) i „badań we współpracy” (collaborative research), dających możliwości włączenia się do takiego projektu z najnowszymi pomysłami naukowymi. Włączanie takie wymagać będzie stosownego rozpowszechniania naszych wyników i możliwości badawczych, głównie na instytucyjnej stronie internetowej.

KOMPOZYTY O MATRYCACH KRUCHYCH

Andrzej M. Brandt

1 Wprowadzenie

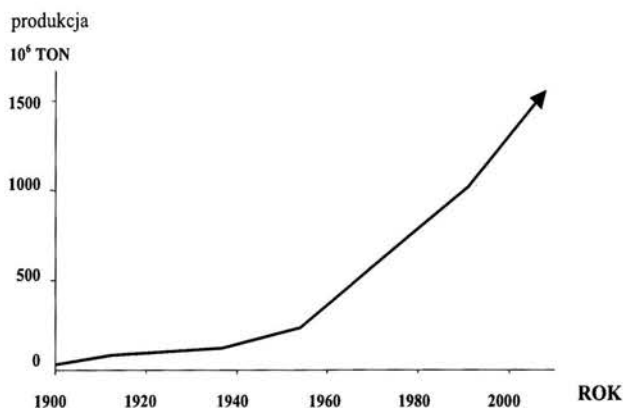
Nauki inżynierskie związane z budownictwem ze swej natury rozwijają się w sposób bardziej powolny i przewidywalny niż inne dyscypliny wiedzy, ponieważ ludzkie potrzeby w dziedzinie infrastruktury budowlanej są konserwatywne, a tylko trochę szybciej rosną potrzeby w dziedzinie infrastruktury transportowej. Tym niemniej, następuje znaczny rozwój w obu tych dziedzinach i znaczne przyspieszenie tego rozwoju w ostatnich kilkudziesięciu latach.

Nie tylko potrzeby, ale również postępy w dziedzinie nauk podstawowych: w fizyce i chemii, wpłynęły na powstanie nowych możliwości w inżynierii budowlanej. Skuteczne metody analizy konstrukcji, rozwój technik obliczeniowych i nowe metody wykonawcze pozwoliły na poprawienie jakości i niezawodności konstrukcji budowlanych. Nie bez znaczenia był również nieznanym poprzednio potencjał przemysłowego wytwarzania produktów o znacznym stopniu skomplikowania, przy zapewnieniu wysokiej jednorodności i relatywnie niskich kosztów, a więc dostępnych do masowego stosowania dla społeczeństw większości krajów.

Szczególne znaczenie ma tworzenie i wykorzystywanie nieznanymi wcześniej materiałów. Rozwój cywilizacji jest umownie dzielony na epoki związane z zastosowaniem głównych materiałów i mówi się o epokach kamienia, żelaza i brązu, co wskazuje na decydujące znaczenie materiałów w rozwoju ludzkości. Dopiero po uzyskaniu i opanowaniu nowego materiału można myśleć o zastosowaniach konstrukcyjnych i innych; wiele jest przykładów na poparcie tej tezy. Również obecnie rozwój materiałów budowlanych determinuje możliwość wznoszenia konstrukcji, odpowiadających obecnym potrzebom, takim jak wielkie platformy wiertnicze, mosty o znacznych rozpiętościach, wysokie budynki, itd.

W dziedzinie materiałów stosowanych w budownictwie rozwój następuje zarówno w materiałach konstrukcyjnych, betonach i metalach, jak i wykończeniowych, izolacyjnych, instalacyjnych i innych. Niniejszy rozdział ograniczony jest do kompozytów o matrycach kruchych ze spoiwem cementowym, czyli do tzw. materiałów betonopodobnych, wśród których największe znaczenie mają różnego rodzaju betony. Jest to niewątpliwie najważniejszy materiał konstrukcji budowlanych, którego światowa produkcja już w 1997 roku osiągnęła średnio ponad 1 m³ na głowę ludności i nadal szybko rośnie — tylko woda pitna jest zużywana w większej ilości, Aitcin [1]. Wzrost produkcji cementu portlandzkiego począwszy od 10 mln. ton w 1900 roku pokazany jest na Rys. 1.

Wzrost jakości i różnorodności materiałów betonowych, obserwowany w ostatnich latach, będzie kontynuowany w przyszłości, a próba wskazania kierunków badań w dziedzinie nowoczesnych kompozytów cementowych jest tematem niniejszego opracowania.



Rys. 1. Rozwój światowej produkcji cementu portlandzkiego, według [1]

2 Kompozyty cementowe stosowane w budownictwie

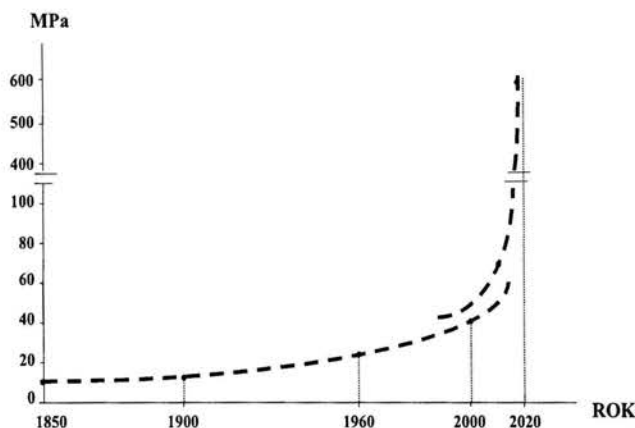
Kompozyty cementowe to betony o matrycy wykonanej ze spoiwa z cementu portlandzkiego, zaprawy (bez grubego kruszywa), zaczyny (bez kruszywa) i fibrobetony, utworzone z materiałów poprzednio wymienionych, uzbrojonych włóknami rozproszonymi.

Od początków wytwarzania betonów we współczesnym rozumieniu tej nazwy z cementów portlandzkich, piasku, żwiru i wody w XIX wieku (J. Aspdin wynalazł cement portlandzki w 1824 roku) dążenie do coraz wyższej wytrzymałości na ściskanie było wyznacznikiem postępu. Obecnie wiadomo, jakim uproszczeniem jest charakteryzowanie betonu tylko jedną wielkością, ale jest to nadal stosowane dla wygody i uproszczenia. Wzrost tej wytrzymałości był powolny, bo wynikał z wielu drobnych kroków na drodze poznania technologii i właściwości materiału, jest to widoczne na Rys. 2. Dolna krzywa wskazuje właśnie ten powolny rozwój, w wyniku którego 50 lat temu uzyskanie wytrzymałości rzędu 30 MPa na budowie było traktowane jako dobre osiągnięcie techniczne. Dalszy rozwój nie odbywał się jednak według dolnej krzywej, nastąpiły bowiem ważne odkrycia, pogłębienie wiedzy o strukturze betonu oraz wprowadzenie nieznanymi poprzednio składników, głównie plastyfikatorów i superplastyfikatorów. Rozwój ten można przedstawić w postaci nieciągłości i górnej krzywej na Rys. 2.

Okazuje się, że nieciągły rozwój charakteryzuje także inne dziedziny nauk technicznych, w których po okresach powolnych udoskonaleń następują skokowe zmiany wiedzy i technologii.

W przypadku betonów cementowych nieciągłość wyraziła się zasadniczą przemianą z materiału o niskich właściwościach mechanicznych, znacznym ich rozrzucie i bardzo prymitywnych sposobach produkcji w wysokowartościowy materiał kompozytowy, choć utworzony zasadniczo z tych samych składników. Jednak ich racjonalny dobór, wprowadzenie rozmaitych domieszek i dodatków, dokładne zaprojektowanie składu i ścisłe przestrzeganie opracowanej technologii wykonania doprowadziło do zasadniczej zmiany.

Obecny rozwój betonów cementowych i badań prowadzonych w tej dziedzinie dobrze charakteryzuje zmiana nazw, choćby tylko w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie — wiele



Rys. 2. Ewolucja charakterystycznej wytrzymałości betonu na ściskanie [2]

konstrukcji już wykonano z betonów o wytrzymałości rzędu 140 MPa i wyżej, a wyniki laboratoryjne sięgają nawet 800 MPa, White [3]; są to betony wysokowytrzymałe (*high strength concretes HSC*). Do tego dochodzi zapewnienie wysokiej jakości także w sensie innych właściwości i powstanie pojęcia betonów wysokowartościowych BWW (*high performance concretes HPC*). Zmiany te nastąpiły także w Polsce: na przykład ostatnio oddawane do użytku mosty drogowe wykonane zostały z betonów o wytrzymałości 55–60 MPa, a wieżowiec WCF w Warszawie — z betonu 55 MPa.

Nowa nazwa wskazuje na ważne właściwości tych materiałów: nie tylko wysoka wytrzymałość, ale także, a może raczej przede wszystkim, wysoka jakość dostosowana do wymagań. Oznacza to, że betony wysokowartościowe są projektowane i wykonywane na konkretne zamówienie, a ich właściwości muszą temu zamówieniu odpowiadać. Są to więc przede wszystkim materiały o dobrej urabialności, wysokiej szczelności i trwałości na określone oddziaływania chemiczne, odporne na wysoką temperaturę. Mają także inne określone cechy, z których jedną często jest wytrzymałość. Taki kierunek określa potrzeby prowadzonych badań, a także pozwala przewidywać dalszy rozwój, Aitcin [1].

Trzeba dodać, że poziom badań betonu prowadzonych w tym okresie i kontynuowanych obecnie oraz zakres stosowanych metod niemal w pełni odpowiada stosowanym w mechanice kompozytów.

Fibrobetony (*fibre reinforced concretes*) to grupa materiałów, w których do kruchej matrycy wprowadzono jako uzbrojenie rozproszone włókna. Włókna z różnych materiałów o rozmaitych właściwościach spełniają różne funkcje w matrycy. Przede wszystkim ograniczają powstawanie i propagację rys i mikrorys, które są zjawiskiem nieuniknionym, lecz bardzo złożonym, zachodzącym w różnych okresach dojrzewania kompozytu. Ograniczenie rys i ich kontrolowanie jest niezbędne, aby przeciwdziałać wystąpieniu stanów granicznych, w których sprawdzane jest bezpieczeństwo i użyteczność konstrukcji, Brandt [4], Kucharska [5]. Włókna są stosowane jako jedyny rodzaj uzbrojenia, albo równocześnie z klasycznymi prętami, siatkami i cięgnami sprężającymi.

Kompozyty bezcementowe o wysokich wytrzymałościach typu FRP (*fibre reinforced plastics*) weszły do stosowania w budownictwie stosunkowo niedawno, pierwsze publikacje pojawiły się około 1990 roku. Są to włókna szklane, aramidowe lub węglowe, łączone żywicami termoplastycznymi lub termoutwardzalnymi. Powstają w ten sposób elementy kompozytowe o różnych kształtach: cienkich taśm i laminatów, prętów podobnych do tradycyjnych stalowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach żelbetowych, oraz ciągien analogicznych do stalowych kabli sprężających, Brandt [6].

Elementy FRP są przedmiotem intensywnych badań, które niewątpliwie dalej będą kontynuowane; nie są one uwzględnione w niniejszym opracowaniu.

3 Wymagania i oczekiwania

Można przewidywać, że prowadzone badania w dziedzinie kompozytów cementowych będą wynikały z rosnących wymagań użytkowników, z rozwijających się stale możliwości badawczych, a także z ważnego czynnika rozwoju badań, jakim jest ciekawość badaczy. Nie należy jednak przypuszczać, że całość czy nawet większość produkcji betonów i zapraw, to będą materiały najwyższej jakości. Przeciwnie — większość to zwykłe materiały, przeznaczone do budowy ochronionych od wpływów czynników korozyjnych i skrajnych oddziaływań, i tam wymagania inne niż wysokich parametrów wytrzymałościowych są decydujące.

Tradycyjnie stawiane wymagania coraz większej wytrzymałości betonu na ściskanie w wieku 28 dni, określanej w standardowych warunkach, nabiera powoli znaczenia symbolicznego. Wielkość ta to jeden z parametrów, które decydują o jakości materiału, ale współczesne wymagania dotyczą wielu parametrów. Trzeba więc określać np. również wytrzymałość po 3 lub 7 dniach, jeśli tempo wznoszenia konstrukcji tego wymaga. W innych przypadkach natomiast potrzebna jest określona wytrzymałość dopiero po 90 dniach, co pozwala na zasadnicze zmiany w kompozycji materiału i uzyskanie dodatkowych korzyści, m.in. przez redukcję ilości cementu i zmniejszenie ciepła hydratacji.

We wszystkich konstrukcjach wystawionych na działania czynników klimatycznych dominującym wymaganiem jest obecnie trwałość. Znaczenie trwałości niewątpliwie będzie rosło w następnych latach ze względu m.in. na następujące czynniki:

- wzrost korozyjnych wpływów otoczenia,
- wydłużenie projektowanego okresu użytkowania budowli,
- konieczność ograniczania kosztów.

Łatwo jest przewidzieć, że będą wzrastały rozmaite szczególne wymagania, stawiane przez inwestorów w odniesieniu do właściwości betonów. Mogą one dotyczyć odporności na określone czynniki korozyjne, estetycznego wyglądu betonu bezpośrednio po zdjęciu form i wybranego przez użytkownika koloru, wysokiej odporności na mechaniczne ścieranie, lokalne uderzenia lub oddziaływania termiczne, itd. Każde z tych wymagań, a najczęściej kilka z nich równocześnie, wynikają z warunków eksploatacji konstrukcji i na ogół mogą być spełnione przy małym podniesieniu kosztu. Prowadzi to do projektowania betonów na podstawie określonych licznych parametrów, stosownie do zamówienia, Brandt, Kucharska [7]. Niewiele materiałów oznacza się tak znaczną elastycznością w dostosowaniu do potrzeb, jak betony i zaprawy cementowe.

Oprócz właściwości mechanicznych i innych, które powinny mieć kompozyty stosowane w budownictwie w najbliższych 20 latach, muszą one spełniać wymagania stawiane przez dążenie do tzw. zrównoważonego rozwoju (*sustainability*). Według najkrótszej definicji zrównoważony rozwój współczesnych generacji nie powinien ograniczać możliwości przyszłych generacji zaspakajania własnych potrzeb (Bruntland Report, 1987). Stąd wyprowadzone wymagania odnoszą się do zużycia energii i podstawowych dóbr: surowców, wody, powietrza i ziemi.

Wymagania powyższe zastosowane do betonów cementowych będą nieuchronnie realizowane w najbliższych latach przez:

- stosowanie w jak największym zakresie kruszyw z materiałów wtórnych, aby zmniejszyć istniejące i stale rosnące hałdy odpadów przemysłowych,
- wykorzystywanie kruszyw naturalnych (piasek, żwir i kruszywo łamane) także mniej odpowiednich rodzajów i gorszych gatunków, aby nie powiększać ilości kruszyw uznanych za odpady ze względu na skład mineralogiczny i nieoptymalne uziarnienia.

Te wymagania są tym bardziej istotne, że do produkcji betonów zużywa się znaczne ilości surowców mineralnych, spożytkowanie odpadów dotyczy więc wielkich mas w skali regionu i kraju.

Wymagania powyższe mogą być spełnione w wyniku rozwiązania szeregu kolejnych zagadnień. Jedną z grup niezwykle ważnych kierunków badań w najbliższej przyszłości właśnie polega na poszukiwaniu odpowiedzi na pytania: przy użyciu jakich dodatków chemicznych, przy jakich proporcjach wszystkich składników i przy wykorzystaniu jakich technologii produkować betony o potrzebnej jakości ze składników pochodzących z materiałów odpadowych? Przy tym minimalizowanie emisji szkodliwych gazów, zanieczyszczenia wód i zużycia energii z pewnością będzie także w Polsce objęte przez odpowiednie przepisy, które w kilku krajach są już wprowadzane: inwestor w pełni odpowiada materialnie za odpady i zanieczyszczenia powstałe w czasie budowy. Okazuje się przy tym, że wszystkie ograniczenia narzucone przez wymagania ekologiczne można spełniać w sposób oszczędny pod warunkiem stosowania odpowiedniej technologii, Valraven [8].

Koncentracja przewidywanych badań na kilku kierunkach uzasadniona jest potrzebami kraju. Zarówno wielkość Polski, jak położenie geograficzne, wskazują na celowość ograniczenia (ale nie całkowitego zaniechania) badań związanych z budownictwem asejsmicznym czy z konstrukcją wielkich mostów i tuneli podmorskich. Natomiast ogromne potrzeby w dziedzinie mieszkalnictwa, transportu drogowego i kolejowego decydują o konieczności prac badawczych związanych z tym potrzebami. Co więcej, trzeba przewidywać zarówno rozbudowę, jak i utrzymanie obecnej infrastruktury przez odpowiednie prace naprawcze, rekonstrukcje i modernizacje, przy zachowaniu wymagań ekologicznych w szerokim ich rozumieniu, co wymaga rozwijania specjalnych kierunków badań.

4 Nowe rodzaje betonów i fibrobetonów

Powstają nowe rodzaje betonu, których właściwości odpowiadają specjalnym zastosowaniom. Oto kilka przykładów takich betonów, które są przedmiotem badań, ale już także licznych zastosowań.

Betony samozagęszczające się (*self compacting concretes SCC*), które w warunkach gęsto rozłożonego uzbrojenia wypełniają formy bez wibrowania i innych zabiegów.

Betony samopoziomujące (*self leveling concretes SLC*), stosowane do wykonania podłóg przemysłowych i podobnych konstrukcji w taki sposób, że można uzyskać gładką powierzchnię poziomą bez dodatkowych zabiegów technologicznych. Obie te odmiany betonów wykonywane są przy dużej zawartości drobnych frakcji kruszywa, drobnoziarnistych dodatków mineralnych oraz upłynniaczy nowych generacji. Przy znacznym rozplywie mieszanki betonowej zachowany jest niski współczynnik w/c , co zapewnia uzyskiwanie wysokich wytrzymałości i odpowiedniej szczelności stwardniałego kompozytu.

W betonach z reaktywnych drobnych cząstek (*reactive powder concrete RPC*) matryca składa się z drobnego piasku, pyłów krzemionkowych i mikrokrzemionki o ziarnach 40–80 μm przy wysokiej zawartości cementu i zastosowaniu obróbki termicznej. Nieodzowny dodatek superplastifikatorów zapewnia odpowiednią płynność. Wobec niewielkiej ilości wody, znaczna część ziaren cementu nie jest zhydratyzowana i pełni rolę twardych inkluzji. Konieczne jest uzbrojenie rozproszone, aby kontrolować kruchość; stosowane są mikrowłókna stalowe aż do $V_f = 10\%$ lub włókna węglowe. Wytrzymałość dochodzi do 400 MPa i wyżej, a odkształcenia sprężyste są niemal liniowe aż do maksymalnego obciążenia. Zastosowanie takich betonów to specjalne elementy obciążone mechanicznie lub termicznie.

Betony o szczególnie niskim cieple hydratacji to takie, w których proces hydratacji przebiega powoli wskutek odpowiednio dobranej kompozycji cementu portlandzkiego z innymi spoiwami. Wydzielane ciepło może być rozproszone bez powodowania lokalnych gradientów temperatury i dodatkowych naprężeń. Betony takie są stosowane w elementach o znacznych rozmiarach, a zwłaszcza wykonywanych w okresach wysokich temperatur otoczenia.

Betony wałowane (*roller compacted concretes RCC*) są stosowane przy budowie dróg, zapór i innych konstrukcji hydrotechnicznych. Mieszanki wyjątkowo gęste, nie wykazujące tzw. opadu stożka, są rozkładane i zagęszczane przy użyciu ciężkiego sprzętu, używanego przy robotach ziemnych. Zarówno rodzaj składników jak i ich kompozycja są specjalnie dobierane ze względu na sposób zagęszczania, Lawrence [9].

Oddzielną grupę stanowią betony zaliczane do tzw. materiałów inteligentnych, które same mogą monitorować stany naprężeń, odkształceń lub przemieszczeń w elementach konstrukcji w celu dostosowywania się do nieprzewidzianych oddziaływań, Chung [10]. Do takich można zaliczyć betony wysokowartościowe nie wymagające pielęgnacji w okresie dojrzewania, ponieważ w ich strukturze umieszczone są w lekkim porowatym kruszywie odpowiednie zapasy wilgoci, niezbędnej do procesu hydratacji cementu, Weber i Reinhardt [11]. W ten sposób, materiał jak gdyby wyczuwa niedomiar wody potrzebnej do hydratacji spoiwa i czerpie tę wodę z ziaren kruszywa.

Inny przykład to przeciwdziałanie powstawaniu w betonach wysokowartościowych nadmiernych naprężeń w warunkach pożaru. Na skutek podwyższonej szczelności woda zamieniona w parę nie może wydostać się na zewnątrz i wywołuje niszczące ciśnienie. W strukturze betonu rozmieszcza się równomiernie włókna polipropylenowe w ilości od 1 do 2 kg na 1 m^3 . W przypadku pożaru i znacznego wzrostu temperatury, włókna te ulegają stopieniu, co stwarza odpowiednie kanały do ujścia pary wodnej pod ciśnieniem, Aïtcin [1]. Zapobiega to powstawaniu dodatkowych naprężeń i odpupywaniu warstw wierzchnich betonu. Betony wyposażone w takie zabezpieczenia są stosowane coraz częściej w słupach i stropach wysokich budynków, w których właśnie ochrona przeciwpożarowa ma szczególne znaczenie. Takie dodatki do betonu zastosowano m.in. we Frankfurcie przy budowie Centrum Japońskiego, Breitenbücher [12].

W nowych odmianach fibrobetonów zastosowane technologie pozwalają uzyskać materiały silnie uzbrojone, przy czym często włókna uzupełniają tradycyjne uzbrojenie; stosowane są również różne typy włókien równocześnie (*hybrid fibres*). Oto kilka odmian:

- SIFCON (*slurry infiltrated fibre concrete*) — włókna stalowe układane są w formach, a następnie zalewane zaczynem cementowym o dużej płynności. Objętość włókien może dochodzić do 20%.
- SIMCON (*slurry infiltrated mat concrete*) — w odróżnieniu od SIFCON włókna są układane w postaci mat, często rozwijanych z rulonów. Również stosowane są wysokie objętości uzbrojenia. Zastosowanie obu tych rodzajów kompozytów obejmuje tracone formy, przegrody i osłony, naprawy nawierzchni drogowych i lotniskowych w szczególnych warunkach, itp.
- HPFRC (*high performance fibre reinforced concrete*) — ogólna nazwa kompozytów o różnym składzie matrycy, uzbrojonych włóknami, które na wykresie obciążenie–ugięcie uzyskują wzrost nośności po wystąpieniu pierwszej rysy.
- UHPFRC (*ultra high performance fibre reinforced concrete*) — ogólna nazwa kompozytów opisanych powyżej, ale o jeszcze wyższych wytrzymałościach. Uzbrojenie stanowią mikrowłókna stalowe, np. 0,15×6 mm, ale także stosowane jest uzbrojenie hybrydowe w postaci włókien z różnych materiałów i o różnych rozmiarach.
- ECC (*engineered cementitious composites*) — ogólna nazwa kompozytów o matrycy cementowej, uzbrojonych najczęściej mikrowłóknami o właściwościach mechanicznych dostosowanych do określonych wymagań. Kompozyty takie osiągają wysokie wytrzymałości, przy zapewnionym równomiernym rozłożeniu mikrorys i zwiększonej trwałości w warunkach specjalnych obciążeń, wynikających np. z uderzeń lub zjawisk sejsmicznych.

Materiały wymienione powyżej mogą osiągać niezwykle wytrzymałości na ściskanie rzędu 400–600 MPa, także wysoką wytrzymałość na rozciąganie i dużą odkształcalność, dobrą przyczepność do włókien oraz kontrolę rys i mikrorys, prowadzącą do niemal plastycznych właściwości. Kompozyty takie mogą zachowywać się w sposób zbliżony do metali, a zastosowania obejmują także np. części maszyn, elementy obudowy pojazdów, itp. Wszystkie te zastosowania poprzedzone są wielostronnymi pracami badawczymi, niezbędnymi do prawidłowego i ekonomicznego projektowania tych materiałów, niezawodnego wykonania i przeprowadzenia wszystkich koniecznych sprawdzeń, Brandt [13].

Wymienione i inne nowe rodzaje betonów i fibrobetonów są już stosowane w praktyce, ale dalsze prace badawcze są niezbędne, zwłaszcza w celu osiągnięcia w Polsce przynajmniej częściowej niezależności od zagranicznych ośrodków badawczych. Badania takie na różnych poziomach i różnymi metodami prowadzą do niezawodnych receptur i technologii, a także do odpowiednich sposobów kontroli na każdym etapie.

5 Trwałość kompozytów betonowych

Warunkiem trwałości betonu jest jego szczelność, która może być rozumiana w dwóch znaczeniach. Szczelny beton to taki, którego struktura nie zawiera nadmiernej ilości porów połączonych,

przez które ciecze i gazy mogą się przedostawać do wnętrza materiału wraz ze szkodliwymi czynnikami chemicznymi. W tym sensie szczelność jest ściśle związana z trwałością konstrukcji betonowych. Na przykład, w betonach szczelnych proces karbonatyzacji zachodzi powoli i można oczekiwać, że zewnętrzna warstwa otuliny będzie chroniła stal zbrojeniową przed korozją przez cały okres przewidzianej eksploatacji konstrukcji, Brandt, Kucharska [7].

Szczelność struktury betonu wymaga zastosowania kruszywa o prawidłowym uziarnieniu i dostatecznej ilości drobnych cząstek, uwzględniając tu także niezhydratyzowane ziarna cementu i innych składników spoiwa. Najważniejszym warunkiem jest jednak mała ilość wody zarobowej i niskie wartości współczynnika woda/cement w celu ograniczenia porowatości zaczynu w sensie porów kapilarnych. Konieczna jest także dobra urabialność mieszanki i właściwe zagęszczenie, aby uniknąć zarówno makroporów, czyli tzw. raków, jak i rozsegregowania świeżego betonu przez nadmierne wibrowanie, zbyt wczesne usuwanie form lub inne błędy technologiczne.

Wymagania szczelności są na ogół spełnione w betonach wysokowartościowych (BWW), ponieważ wynikają ze wszystkich innych warunków stawianych tym betonom.

Inny warunek dotyczy rys w betonie. Uważa się powszechnie, że zarysowanie o rozwartości powyżej 0,1 mm może pozwalać na wnikanie wilgoci i czynników agresywnych do wnętrza elementów betonowych; zależnie od warunków lokalnych ta wartość graniczna może być nieco łagodzona.

Zapobieganie powstawaniu rys polega na ich kontrolowaniu przez odpowiedni skład i odpowiednie zabiegi technologiczne. Trzeba równocześnie ograniczyć przyczyny powstawania rys, np. skurczowych i termicznych, zastępować makrorysy przez układy mikrorys o rozwartości poniżej 0,1 mm, zapewnić osiągnięcie odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie przed wystąpieniem zarysowania i wreszcie kontrolować powstawanie i propagację rys przez zastosowanie uzbrojenia rozproszonego w postaci włókien lub siatek. Badania powstawania i propagacji rys i mikrorys w fibrobetonach prowadzone są w IPPT od dawna. Metody ilościowej analizy układu rys na podstawie komputerowej analizy odpowiednio przygotowanych obrazów struktur są od kilku lat również rozwijane, Glinicki, Litorowicz [14].

Beton szczelny w drugim znaczeniu oznacza taki beton, z którego można wykonywać przewody, zbiorniki lub tunele bez szczególnych warstw uszczelniających i z których płyny nie będą wyciekały na zewnątrz lub dostawały się do wnętrza konstrukcji. Takie warunki mogą być spełnione przez odpowiednio zaprojektowane i wykonane BWW. Oprócz wymagań opisanych powyżej stosowane są specjalne domieszki, które powodują uszczelnienie struktury betonu dwiema drogami: przez wprowadzenie dodatkowych drobnych cząstek i przez wykorzystanie związków chemicznych, które uszczelniają pory kapilarne i inne, Neville [15].

Stosowanie impregnacji przypowierzchniowej lub skrośnej albo powłok z innych materiałów w celu zapewnienia szczelności poważnie zwiększa koszt. W przypadku BWW zabiegi takie można ograniczyć do wyjątkowych przypadków agresji chemicznej.

W polskich warunkach klimatycznych trwałość betonowych konstrukcji inżynierskich, poddanych działaniu czynników klimatycznych, zależy przede wszystkim od odporności na cykle zamrażania i rozmrażania. Odporność masywnych elementów uzyskuje się przez wprowadzenie systemu drobnych porów powietrznych do struktury stwardniałego betonu. Natomiast uszkodzenia powierzchniowe w postaci postępującego łuszczenia stanowią nadal problem, wymagający rozwiązania. Badania takie prowadzone są w IPPT w ramach Projektu NATO, Brandt, Józwiak-Niedźwiedzka [16].

6 Projektowanie konstrukcji ze względu na całkowity koszt

Znaczne koszty eksploatacji budowli o niedostatecznej trwałości powodują powolne zmiany w ekonomicznych podstawach projektowania konstrukcji, polegające na uwzględnieniu całego kosztu konstrukcji wraz z jej utrzymaniem, naprawami, a nawet rozebraniem po zakończeniu eksploatacji. W takich założeniach okazuje się np., że droższe materiały mogą przynosić oszczędności przez zmniejszenie kosztu napraw i wydłużenie okresu eksploatacji. Otwiera to nowe perspektywy wprowadzania do praktyki budowlanej materiałów o wyższych właściwościach i wyższych cenach jednostkowych.

Koszt i uciążliwość napraw podczas normalnego użytkowania prowadzą do przyjmowania koncepcji projektowania konstrukcji w całym cyklu użytkowania (*life cycle design*), a więc z uwzględnieniem kosztów eksploatacji, napraw i w końcu rozbiórki, wraz z zagospodarowaniem pozostałych materiałów odpadowych. Takie projektowanie konstrukcji będzie w najbliższych latach istotnym czynnikiem wymuszającym rozwój badań w dziedzinie materiałów budowlanych, przy zachowaniu oszczędności przedstawianych symbolem $e^3 = \text{energia} \times \text{ekologia} \times \text{ekonomia}$, Sarja [17]. Jest to jednym z elementów wymagań zrównoważonego rozwoju (*sustainable development*) w dziedzinie budownictwa, Rostam [18], Penttala [19]. Można przewidywać, że szersze uwzględnienie wymagań ekonomicznych wznoszenia konstrukcji pociągnie za sobą daleko idące i pozytywne zmiany w budownictwie, prowadzące w niedługiej przyszłości do podejmowania nowych kierunków badań.

7 Badania w dziedzinie betonów cementowych

7.1 Cele i zakresy badań

Przewidywania w dziedzinie betonów cementowych obejmują zagadnienia, dotyczące projektowania ich składu i struktury, opracowania technologii na budowie i w wytwórni, zakresu prowadzonych pomiarów i badań w celu poznania i sprawdzenia ich właściwości. Natomiast z przyczyn oczywistych tylko skrótowo wspomniano tu rozległe i wielostronne prace badawcze prowadzone w dziedzinie chemii cementów i domieszek, technologii kruszyw, a także zagadnień organizacji i zarządzania przemysłem betonów i materiałów składowych, chociaż przemysł ten odgrywa ważną rolę w poszczególnych regionach Polski.

Badania obejmują tematy związane z wymienionymi poprzednio nowymi odmianami betonów, a także z ogólnym zagadnieniem trwałości konstrukcji.

W rozwoju badań materiałów betonopodobnych ważne znaczenie ma okoliczność, że można je traktować jako kompozyty, wykorzystując wiedzę nagromadzoną w tej dziedzinie. Zarówno w stanie świeżej masy, jak i po stwardnieniu, można w nich odróżnić oddzielne fazy, których współdziałanie wpływa na właściwości, a więc można w szerokim zakresie wykorzystywać efekty synergistyczne.

7.2 Badania dotyczące składu i technologii betonów

Podstawowy składnik betonu — cement portlandzki — przechodzi widoczne modyfikacje w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Dalszy rozwój jakości cementów jest związany z badaniami w celu bliż-

szego wyjaśnienia i znalezienia dobrych rozwiązań wobec kilku sprzeczności, charakteryzujących ten rozwój.

Jedną z nich jest wzrost mialkości i powierzchni właściwej cementu, co powoduje szybką hydratację i osiąganie przez beton wysokich wytrzymałości w krótkim czasie. W wielu przypadkach pozwala to na przyspieszenie postępu budowy lub na lepsze wykorzystanie form przy prefabrykacji elementów betonowych. Łączy się to jednak ze zmniejszeniem zdolności do wzrostu wytrzymałości w późniejszych okresach, ogranicza możliwość zarastania mikrorys przez produkty hydratacji i w wyniku zmniejsza trwałość konstrukcji betonowych. Przyspieszenie hydratacji powoduje szybsze wydzielanie ciepła, co musi być odpowiednio kontrolowane, a odprowadzenie ciepła — uwzględnione już podczas projektowania konstrukcji i technologii jej wykonania.

Inna sprzeczność wymagająca badań zachodzi między dążeniem do ograniczania ilości alkaliu w cemencie, m.in. aby zmniejszyć zagrożenie reakcją z niektórymi odmianami kruszyw aktywnych chemicznie, a wysokim kosztem produkcji takich cementów. Podobnie kłopotliwe dla producentów jest zmniejszanie udziału C_3A w cemencie, wymagane przez użytkowników ze względu na trwałość konstrukcji bezpośrednio narażonych na wpływy czynników klimatycznych.

Nie w pełni wyjaśnione jest znaczenie i rola w hydratacji cementu tzw. składników śladowych, poza głównymi składnikami, jakimi są tlenki krzemu, wapnia, aluminium i żelaza. Uniknięcie tych składników śladowych nie jest możliwe w warunkach produkcji przemysłowej cementu, ponieważ występują one w niewielkich ilościach w podstawowych surowcach. Obecność ich dawniej była mniej zauważana, natomiast obecnie stwierdza się czasami ich wpływ na niespodziewane objawy niezgodności ze stosowanymi powszechnie domieszkami chemicznymi. Szkodliwe te zjawiska są na ogół trudne do uniknięcia na drodze gotowych recept, więc stosowane są najprostsze próby doświadczalne, najczęściej bez wyjaśniania przyczyn stwierdzonej niezgodności, Kucharska [5].

Warto również wspomnieć o intensywnych badaniach nad przebiegiem procesów przemysłowych w produkcji cementów, aby osiągnąć jak największą jednorodność produkowanego cementu, o ustalonych w danej partii parametrach i wymaganiach. Tymczasem produkcja odbywa się przy wykorzystaniu surowców naturalnych, dostarczanych w sposób ciągły do pieców obrotowych. Zmienność jakości tych surowców jest nieunikniona i musi być rejestrowana w czasie rzeczywistym, aby w sposób ciągły modyfikować te parametry produkcji, które są kontrolowane, jak np. temperatura w piecach cementowych, czas trwania kolejnych operacji, proporcje składników i ilości dodatków.

Poza poszukiwaniami w dziedzinie jakości i technologii cementu, obszerny zakres przyszłych badań dotyczyć będzie dodatków mineralnych i domieszek chemicznych oraz innych spoiw, stosowanych łącznie z cementem. Niezależnie od różnic terminologicznych, są to dodatkowe składniki cementów i betonów, wprowadzane bądź podczas produkcji klinkieru i cementu, bądź później podczas wytwarzania betonu. Jest ich coraz więcej i odgrywają decydującą rolę w rozwoju jakości betonów. Najważniejsze grupy to:

- domieszki uplastyczniające i zmniejszające ilość potrzebnej wody zarobowej, tzw. plastyfikatory, superplastyfikatory i upłynniacze kolejnych generacji,
- domieszki napowietrzające, zwiększające mrozoodporność,
- dodatki mineralne, zwiększające szczelność,
- domieszki przyspieszające lub opóźniające hydratację cementu.

Obecnie wiele nowych produktów kolejnych generacji pojawia się na rynku i z pewnością dalsze badania będą rozwijane, aby uzyskiwać lepsze rezultaty, redukując negatywne skutki uboczne i zmniejszając koszty.

Inne spoiwa poza cementem to naturalne i sztuczne pucolany oraz pyły dymnicowe i sili-konowe. Używanie cementów z dodatkiem popiołów i mielonych żużli jest obecnie niemal powszechne. Uważa się przy tym, że spoiwa złożone z trzech lub nawet czterech umiejętnie dobranych składników będą stosowane w najbliższych latach w coraz większym zakresie. Wymaga to przeprowadzenia wielostronnych badań i opracowywania receptur do różnych zastosowań, Mehta [20, 21].

Kierunek rozwoju w ostatnim okresie to betony samozagęszczające się (*self compacting concretes* — SCC). Dzięki starannie dobranej kompozycji przy zastosowaniu składników o dużym rozdrobieniu (tzw. mikrowypełniaczy) i odpowiednich domieszek chemicznych można wykonywać betony, które nie wymagają mechanicznego zagęszczania, aby wypełnić formy nawet przy gęstym uzbrojeniu. Uzyskuje się materiał szczelny, o wysokich wytrzymałościach i zwiększonej trwałości, ale stawiający poważne wymagania w stosunku do jego projektantów i wykonawców, Khayat *et al.* [22].

Podstawowym tematem badań, ważnym wobec mnogości rozmaitych domieszek i dodatków przy wzroście wymagań w stosunku zarówno do świeżej mieszanki, jak i stwardniałego kompozytu, stało się racjonalne dobieranie składów betonów i ich optymalizacja stosownie do potrzeb [23]. Komputerowe programy do projektowania i optymalizacji betonów powstają od lat 90. Jednak przy rozwoju liczby i rodzajów składników dotychczasowe programy nie wystarczają i tworzone będą nowe. Co więcej, w miarę komplikowania się tego zadania, okazuje się konieczne stosowanie innych metod, aby móc uwzględniać niepełne dane i rozmyte oceny właściwości materiałów, a także nieostro określone kwalifikacje wykonawców i warunki klimatyczne. Prace w zakresie niekonwencjonalnych metod komputacyjnych (m.in. zastosowanie sztucznych sieci neuronowych i uczenia maszynowego) prowadzone są w IPPT od kilku lat. Były przedmiotem dwóch projektów badawczych KBN, obejmując zagadnienia sztucznych sieci neuronowych i metody uczenia maszynowego. Obecnie w ramach Projektu NATO Sfp Nr 97 1888 metody tzw. sztucznej inteligencji są wykorzystywane do diagnozowania i projektowania betonów w konstrukcjach o wysokich wymaganiach. Tematyce tej poświęcono m.in. publikacje Kasperkiewicz [24–28], Kasperkiewicz, Alterman [29–30].

7.3 Badania struktury betonów

Analiza struktury dojrzałego betonu, jest podstawową metodą badania, prowadzącego np. do:

- oceny wykonanych elementów, jeżeli powstają wątpliwości co do ich jakości i zgodności z wymaganiami,
- oceny jakości konstrukcji naprawianych lub modernizowanych,
- wniosków technologicznych lub eksploatacyjnych.

Analiza taka pozwala określić z dostateczną dokładnością skład betonu, wyznaczyć jego przewidywaną trwałość i rozmaite właściwości mechaniczne. Stanowi niekiedy ważny element rozstrzygnięcia sporów: kto zawinił w przypadku niskiej wytrzymałości, powstałych rys, pęknięć czy innych uszkodzeń, a także umożliwia podjęcie racjonalnej decyzji o dalszym postępowaniu.

Nowoczesne metody analizy struktury obejmują szereg specjalistycznych procedur, poczynając od odpowiedniego przygotowania próbek i pobieranych z konstrukcji rdzeni, przez uzyskiwanie obrazów z wyodrębnionymi elementami struktury, aż do komputerowej oceny ilościowej tych obrazów. Możliwy jest automatyczny pomiar np. długości rys, ich gęstości, rozmiarów porów powietrznych, ziaren kruszywa, itd. Dane to pozwalają na wykonanie ilościowych porównań między różnymi próbkami, na ocenę jakości materiału, na ocenę wytrzymałości lub przewidywanie trwałości. Takie możliwości są szczególnie przydatne przy analizie próbek pobranych z takich konstrukcji, o których brak jest danych co do składu, a konieczna jest ocena ich przydatności do użytkowania.

W wyniku badań, które realizuje się przy rozmaitym poziomie obserwacji — w skali makro, mezo (np. mikroskop stereoskopowy i zglądy betonu), mikro (mikroskopy optyczne, TEM i SEM oraz cienkie szlify i próbki napyłane) oraz nano, można określić ilość i jakość użytych składników, poprawność kompozycji i jakość wykonania. Na tej podstawie można wnioskować zarówno o właściwościach wytrzymałościowych, jak i przewidywać trwałość i odporność na oddziaływania zewnętrzne. Szczególne znaczenie ma ocena warstwy przejściowej między ziarnami kruszywa a zaczynem, która często decyduje o szczelności i wytrzymałości betonu. Stosowane nowoczesne metody pozwalają na badanie mikrostruktury materiału i na wyjaśnienie przyczyn obserwowanych właściwości. W przyszłości także badania nanostruktury, obecnie dopiero rozpoczęte w kilku ośrodkach na świecie, mogą okazać się niezbędne przy wyjaśnianiu zjawisk, zachodzących w podstawowych elementach składowych materiału w różnych warunkach.

W IPPT (PPO OM) badania z zakresu automatycznej analizy obrazu w zastosowaniu do tworzyw betonowych podjęto w r. 1990, korzystając z nowoczesnego wówczas systemu *Morphopercolor*. Interesujące wyniki z zakresu oceny struktury uziarnienia i jej związków z energią pęknięcia uzyskano w latach 1991-1999, Brzezicki [31, 32], Brzezicki, Kasperkiewicz [33, 34].

Ostatnio zespół PPO uzyskał nowoczesny system do automatycznej analizy obrazów, *Image Pro-Plus*, sprzężony z mikroskopem stereoskopowym i automatycznym stolikiem o wysokiej jakości kontroli przemieszczeń, umożliwiający dalsze badania o dużym znaczeniu teoretycznym i użytkowym (np. Załocha, Kasperkiewicz [35, 36]). Opisywane metody znajdują zastosowanie m.in. przy projektowaniu betonów do konstrukcji odpowiadających takim specjalnym wymaganiom, jak odporność na korozję chemiczną lub wyjątkowa długotrwałość, np. w obiektach inżynierskich, wybudowanych w rejonie cieśnin duńskich w 2000 roku, Henrichsen, Selst [37]. Można przewidywać znaczny rozwój tych metod we wszelkich konstrukcjach narażonych na oddziaływanie klimatyczne lub inne szczególne warunki eksploatacji.

Dalsze metody badania jakości obejmują rejestrowanie emisji akustycznej podczas rozmaitych oddziaływań na próbki betonowe: ściskanie, zginanie, rozciąganie bezpośrednie, a także ogrzewanie lub chłodzenie (zamrażanie i odmrażanie), badanie lokalnej mikrotwardości matrycy, analiza cech akustycznych ośrodka, badania energii wiązań, metody rezonansu magnetycznego itd. Oddziaływania lokalne można wywierać nie tylko przez klasyczne wgniatanie, jak np. przy badaniu twardości węgelnikiem Vickersa, ale także przez oddziaływanie laserem o odpowiednio wysokiej energii.

Wszelkie informacje, zebrane na drodze jednoczesnych badań struktury i właściwości kompozytów betonowych służą do przygotowania oceny materiału, która powinna być poprawna i szybka. Jednak najczęściej te informacje są niepełne, a niektóre mogą być wyrażane w postaci tzw. wielkości nominalnych, np. określeń słownych, często o znaczeniu rozmytym. Analiza takich danych wymaga specjalnych i niekonwencjonalnych technik. Nowe sposoby oceny wyników i formułowania wniosków opierają się na łącznym stosowaniu różnych metod, utożsamianych najczęściej z terminem „sztuczna inteligencja”, (por. 7.2).

7.4 Badania w dziedzinie fibrobetonów

Początek badań nad zastosowaniem włókien w betonach i zaprawach cementowych można przyjąć na rok 1970, nie licząc wcześniejszych prób i patentów. Od tego czasu temat był rozwijany w IPPT i w wielu ośrodkach badawczych, okazał się niezmiernie atrakcyjny poznawczo i ważny dla zastosowań w budownictwie. Najnowsze badania w zakresie mechaniki i technologii fibrobetonów rozwijają się głównie w kilku wybranych kierunkach:

- kontrola rys skurczowych w świeżym betonie przy użyciu niskomodulowych włókien z tworzyw sztucznych;
- poprawa odporności podłóg przemysłowych, nawierzchni lotniskowych i specjalnych odcinków dróg na obciążenia lokalne przez ograniczenie rys i mikrorys, przy zastosowaniu włókien stalowych o rozmaitych kształtach i właściwościach, Glinicki *et al.* [38];
- uzbrojenie rozproszone w cienkich płytach i okładzinach, stosowanych na elewacjach i pokryciach dachowych budynków, także w celu zastąpienia poprzednio stosowanych włókien azbestowych, przy czym w tych przypadkach stosowane są zarówno mikrowłókna stalowe, jak włókna szklane i węglowe, Glinicki [39];
- lokalne uzbrojenie elementów narażonych na uderzenia, wybuchy, wpływy termiczne i inne oddziaływania, przez rozmieszczenie rozmaitych włókien lub mat równocześnie z uzbrojeniem klasycznym lub sprężeniem;
- tzw. uzbrojenie hybrydowe, złożone z różnych typów włókien, Kucharska, Brandt, Logoń [40].

Badania fibrobetonów zostały podjęte w IPPT jako jedne z pierwszych w kraju, i w dalszym ciągu są rozwijane, ponieważ materiały te są coraz częściej stosowane w wielu obiektach budownictwa przemysłowego, użyteczności publicznej i w konstrukcjach inżynierskich.

8 Wnioski i uwagi ogólne

Zastosowanie nowoczesnych kompozytów o kruchych matrycach cementowych wzrasta wraz rozwojem prac nad rozbudową i modernizacją infrastruktury we wszystkich rozwijających się krajach. Wymaga to intensywnych badań i prac wdrożeniowych, które będą decydowały o nowoczesności budownictwa.

Badania prowadzone w IPPT w zakresie materiałów betonowych warunkują rozwój infrastruktury kraju, niezbędny do uzyskania odpowiedniego poziomu w najbliższych latach. Nie można programować rozwoju kraju, zarówno w sensie gospodarczym, jak kulturalnym, naukowym i cywilizacyjnym, bez zaspokojenia podstawowych potrzeb w dziedzinie budownictwa mieszkaniowego, przemysłowego i użyteczności publicznej, sprawnego transportu i zapewnienia odpowiedniego środowiska. O tym wszystkim decyduje infrastruktura, tworzona i utrzymywana na miejscu, w odróżnieniu od wytworów innych dziedzin, które można importować. Liczne wykonywane ekspertyzy wskazują na rosnącą przydatność tych badań.

Prowadzone obecnie badania określają najwyższy poziom w Polsce i są zauważane na świecie. Są one przy tym ściśle związane z wieloma ośrodkami naukowymi i technicznymi, uczestnicząc we wspólnych pracach, szkoleniach i konferencjach.

Na podstawie dotychczasowych rezultatów można przewidywać dalszy rozwój grupy badawczej z dobrze wyposażonym laboratorium w IPPT, która będzie prowadziła wyspecjalizowane badania poznawcze i aplikacyjne kompozytów cementowych w zakresie unikatowym w kraju, a także będzie kontynuowała tradycję wspólnych projektów badawczych z najlepszymi ośrodkami na świecie.

Bibliografia

1. Aitcin P.C., *Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow*, Cement and Concrete Research, **30**, 1349–1359, 2000.
2. Brandt A.M., Kucharska L., *Developments in cement-based composites*, Proc. Int. Sem. on Extending Performance of Concrete Structures, Dundee 1999, Dhir R.K., Tittle P.A.J. [eds.], Th. Telford, London, 17–32, 1999.
3. White R.N., *Design and construction of concrete structures in the 21st century*, Proc. 2nd Int. Conference on Concrete under Severe Conditions CONSEC'98, Tromsø, E & FN Spon, London, 27–44, 1998.
4. Brandt A.M., *Cement-Based Composite Materials. Mechanical Properties and Performance*, Chapman and Hall/Spon, London, October 1994.
5. Kucharska L., *Katastrofy, awarie i uszkodzenia, a beton i jego rozwój*, XX Konf. „Awarie Budowlane”, Międzydroje, 89–118, 2001.
6. Brandt A.M., *New engineering materials in construction and rehabilitation of civil infrastructure*, [in:] Construction Materials — Theory and Application, H.W. Reinhardt zum 60. Geburtstag, 453–465, Eligehausen R. [ed.], ibidem-Verlag, Stuttgart, 1999.
7. Brandt A.M., Kucharska L., *New trends in designing the durability of concrete*, Proc. 3rd Int. Conference on Concrete under Severe Conditions CONSEC'01, Vancouver BC, June 18–20, 2001, 797–810, E & FN Spon, London, 2001.
8. Valraven J., *The evolution of concrete*, Structural Concrete, **1**, 3–11, 1999.
9. Lawrence D., *Rolling in a new concrete technology*, ASTM Standardization News, 26–28, July 1988.
10. Chung D.D.L., *Composites get smart*, Materials Today, 30–35, January 2002.
11. Weber, Reinhardt H.W., *A new generation of high performance concrete: concrete with autogeneous curing*, Advanced Cement Based Materials, Elsevier, Amsterdam, 59–68, 1997.
12. Breitenbücher R., *High strength concrete C105 with increased fire resistance due to polypropylene fibres*, Proc. 4th Int. Symp. on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, **2**, 571–577, 1997.
13. Brandt A.M., *Nowe generacje betonów konstrukcyjnych*, Materiały Budowlane, **9**, 182–188, 2001.

14. Litorowicz A., Glinicki M.A., *Cyfrowa analiza rys w betonie wywołanych przez działanie termiczne*, XVIII Konf. „Beton i Prefabrykacja”, Jadwisin, 112–119, kwiecień 2002.
15. Neville A., *The question of concrete durability: we can make a good concrete today*, Concrete International, 21–25, July 2000.
16. Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiedzka D., *Uszkodzenia powierzchni betonu spowodowane zamrażaniem i odmrażaniem*, 47 Konf. KILiW PAN i KN PZITB, 1, 277–284, Krynica 2001.
17. Sarja A., *Durability design of concrete structures — Committee report 130-CSL*, Materials and Structures, 33, 14–20, Jan.–Feb. 2000.
18. Rostam S., *Service life design — the European approach*, Concrete International, 24–32, July 1993.
19. Penttala V., *Concrete and sustainable development*, ACI Materials Journal, 94, 5, 409–416, 1997.
20. Mehta P.K., *Durability — critical issues for the future*, Concrete International, 27–33 (and discussion), July 1997.
21. Mehta P.K., Burrows R.W., *Building durable structures in the 21st century*, Concrete International, 57–63, March 2001.
22. Khayat K.H., Ghezal A., Hadri M.S., *Utility of statistical models in proportioning self consolidated concrete*, Materials and Structures, RILEM, 33, 333–334, June 2000.
23. Brandt A.M. [ed.], *Optimization Methods for Material Design of Cement-Based Composites*, 2nd ed., Thomson Professional (Chapman and Hall/Spon), London 1998.
24. Kasperkiewicz J., Racz J., Dubrawski A., *HPC strength prediction using artificial neural network*, Journal of Computing in Civil Engineering, 9, 4, 279–284, October 1995.
25. Kasperkiewicz J., *Sztuczne sieci neuronowe w projektowaniu i optymalizacji betonu*, XLII Konf. Nauk. KILW PAN i KN PZITB, 4, 53–60, Krynica 1996.
26. Kasperkiewicz J., *Prediction of concrete properties using neural networks*, Engineering Transactions, 45, 2, 251–263, 1997.
27. Kasperkiewicz J., *The applications of ANNs in certain materials analysis problems*, Journal of Materials Processing Technology, 106, 74–79, 2000.
28. Kasperkiewicz J., *Artificial neural networks in engineering materials design*, Proc. of Conference „Challenges in Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, vol. I, 103–126, Ciesielski R. et al. [eds.], Wrocław, 1997.
29. Kasperkiewicz J., Alterman D., *Artificial intelligence in predicting properties of brittle matrix composites*, 6th Int. Symp. on Brittle Matrix Composites BMC6, Warsaw, Woodhead (Cambridge)/ ZTurek(Warsaw), 485–496, October 2000.
30. Kasperkiewicz J., Alterman D., *Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji przy projektowaniu mieszanek betonowych*, 47 Konf. KILiW PAN i KN PZITB, 1, 331–338, Krynica 2001.
31. Brzeżicki J., Kasperkiewicz J., Marks M., *Stereology and image analysis in evaluation of aggregate grading in hardened concrete*, Proc. IV Int. Conf. STEREMAT'94, 333–338, Wojnar L. [ed.], Fotobit Design, Kraków, 1994.
32. Brzeżicki J., *Wpływ kształtu ziaren kruszywa na charakter pęknięcia betonu*, Rozprawa doktorska, IPPT, 1997.
33. Brzeżicki J., Kasperkiewicz J., *Automatic image analysis in evaluation of aggregate shape*, ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, 123–130, 1999.
34. Brzeżicki J., Kasperkiewicz J., *Automatic image analysis in complex macro- and meso-scale measurements on concrete composites*, Archives of Civil Engineering, XLIV, 1, 57–78, 1998.
35. Kasperkiewicz J., Załocha D., *Automatyczna analiza obrazów w ocenie napowietrzania betonu*, 46 Konf. KILiW PAN i KN PZITB, 2, 199–206, Krynica 2000.
36. Załocha D., Kasperkiewicz J., *Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzonym*, Drogi i Mosty, 2, 107–118, 2002.

37. Henrichsen A., van Selst R., *Concrete production plants and practice: past, present and future trends*, Proc. Int. Sem. on Utilizing ready-mixed concrete and mortar, Dundee 1999, 145–155, Dhir R.K., Limbachiya M.C. [eds.], Th. Telford London, 1999.
38. Glinicki M.A., Litorowicz A., Zieliński M., *Interpretacja badań odporności fibrobetonów na pękanie przy zginaniu*, 47 Konf. KILiW PAN i KN PZITB, 1, 307–314, Krynica 2001.
39. Glinicki M.A., *Mechanizmy kruchości i trwałość kompozytów cementowych z włóknami szklanymi*, Prace IPPT, 11, 1999.
40. Kucharska L., Brandt A.M., Logoń D., *Hybrid fibre reinforcement — is superposition of effects of different fibres always valid?* Proc. Int. Symp. „Non-Traditional Cement and Concrete”, Brno, 376–386, June 2002.

WSPÓŁCZESNE WYZWANIA MECHANIKI PŁYNÓW

Tomasz Kowalewski

przy współpracy Stanisława Drobnika i Andrzeja Bogusławskiego (P.Cz.)

1 Czym jest mechanika płynów?

Pytanie może powinno brzmieć, jakie zjawiska nie są związane z mechaniką płynów? Właściwie niemal wszystko, co otacza człowieka jest w dużej części płynem i rządzi się prawami mechaniki płynów. Już starożytni intuicyjnie zauważyli, że spośród czterech podstawowych pierwiastków struktury wszechświata (powietrze, ogień, woda i ziemia), trzy są płynami. Czwarty, ziemia, też w rzeczywistości jest płynem za wyjątkiem cienkiej skorupy stałej.

Wydaje się, że jest w tej uproszczonej odpowiedzi na nasze pytanie dużo prawdy. Znaczenia mechaniki płynów dla zrozumienia praw rządzących naturalnym środowiskiem człowieka jak i jego życiowymi funkcjami nie trzeba uzasadniać. Również wiele, jeśli nie większość, procesów przemysłowych opiera się na mechanice płynów. Często niedostrzeganie roli mechaniki płynów wiąże się ze specyfiką danej dziedziny, odmienną nomenklaturą lub wąskim zakresem jej zastosowań. Ale poczynając zarówno od opisu huraganów, wybuchów wulkanów, wybuchów na słońcu, jak i procesów oddychania, przepływu krwi, transportu węgla czy odlewania metali, wszystkimi tego typu procesami rządzi w rzeczywistości jedno podstawowe równanie mechaniki płynów, równanie Naviera–Stokesa.

Mogłoby się wydawać, że jest to znakomite ułatwienie. W rzeczywistości rozwiązanie tego równania dla istotnej klasy przepływów, przepływów turbulentnych, pozostaje ostatnim nie rozwiązany ważkim problemem fizyki klasycznej. Jednocześnie tak się składa, że niemal wszystkie spotykane wokół nas przepływy są turbulentne. Typowe przykłady to opływ samochodu, ruchy atmosfery, konwekcja w pomieszczeniu i różnego rodzaju przepływy przemysłowe. Ze względu na te trudności rozwój mechaniki płynów na przestrzeni wieków odbywał się stosunkowo powoli i właściwie dopiero w ostatnim 50-leciu możemy mówić o znaczącym postępie, głównie dzięki pracom genialnego obserwatora przepływów Ludwiga Prandtla [1]. Ale prawdziwy przełom w mechanice płynów dokonuje się właśnie teraz. Postęp w rozwoju techniki komputerowej i rozwój nowych metod obliczeniowych spowodował, że od kilku lat jesteśmy świadkami tego, co jeszcze kilkanaście lat temu wydawało się niemożliwe: numerycznego symulowania ruchu turbulentnego bez żadnych założeń upraszczających, wykorzystując jedynie podstawowe równanie mechaniki płynów — tzw. DNS — Direct Numerical Simulation [2]. Z perspektywy tego wydarzenia i kolejnych kroków milowych, jakie się dokonały w metodach analizy, symulacji i pomiarów w mechanice płynów, chcielibyśmy spróbować w tym krótkim przeglądzie spojrzeć w przyszłość i przewidzieć, które z od dawna czekających na rozwiązanie problemów i nowych wyzwań staną się siłą napędową mechaniki płynów w najbliższym dziesięcioleciu.

2 Aktualny stan wiedzy

Rozwój mechaniki płynów związany był zawsze z aktualnymi potrzebami techniki i możliwościami wyjścia naprzeciw tym potrzebom. Patrząc na to historycznie, chyba najstarsze aplikacje wykorzystujące wiedzę dotyczącą przepływów związane były z systemami irygacyjnymi i transportem wodnym. W miarę rozwoju mechaniki płynów, wraz ze zrozumieniem jej odrębności i specyfiki nastąpiła wyraźna dywersyfikacja specjalności, zarówno pod względem fizycznych charakterystyk jak i ich znaczenia utylitarnego. Obecnie, możemy mówić przynajmniej o kilkunastu podstawowych kierunkach badań. Wymienimy tutaj kilka z nich wraz z ich krótką charakterystyką. Poniższa lista nie jest oczywiście kompletna, obejmuje te kierunki, które wydają się nam odgrywać najważniejszą rolę we współczesnym świecie. Omawiane tematy staraliśmy się uszeregować według wagi danego działu we współczesnym świecie. Ocena wagi danej dziedziny oparta jest na jej znaczeniu dla potencjału przemysłowego, środowiska czy innych dziedzin nauki. Poszczególne działy oczywiście zająają się i to często bardzo poważnie, niemniej specyfika metod i zakres badań pozwala na ogół na taki podział współczesnej mechaniki płynów.

W niniejszym opracowaniu nie rozdzielono dziedzin zastosowań od używanych metod, gdyż dotychczasowe obserwacje wykazują, że rozwój metod badawczych wytycza także nowe kierunki badań. Przykładowo, rozwój nowych algorytmów cyfrowej obróbki sygnału doprowadził do odkrycia struktur koherentnych i stworzył w ten sposób nowy kierunek badawczy, bardzo popularny w latach osiemdziesiątych. Innym przykładem sprzężenia między rozwojem metod i kreowaniem tematyki badawczej jest numeryczna mechanika płynów (CFD), w której powstanie metod DNS czy LES (Large Eddy Simulations) umożliwiło włączenie do obszaru zainteresowań np. przepływów stacjonarnych. Stwierdzić zatem można, że w mechanice płynów w większym chyba stopniu niż w innych dziedzinach nauki rozwój nowych metod badawczych nie tylko służy weryfikacji poprawności dotychczasowych prac, lecz także wytycza nowe kierunki badań.

2.1 Przepływy ściśliwe, aerodynamika

Przepływy ściśliwe, tzn. takie dla których ściśliwość ośrodka odgrywa istotną rolę, to przede wszystkim aerodynamika i spalanie — dwa najbardziej burzliwie rozwijające się, bezpośrednie zastosowania mechaniki płynów. Przepływy ściśliwe obok aeronautyki, spotykamy przede wszystkim w takich dziedzinach jak techniki laserowe, zastosowania technologii plazmowych, wysoko temperaturowa obróbka materiałów, reaktory i turbiny gazowe czy modele dynamiki przepływów intergalaktycznych [3–7]. Występowanie charakterystycznych dla tych przepływów dużych prędkości, często znacznie przekraczających prędkość dźwięku, wysokich temperatur, powstawanie fal uderzeniowych, jonizacji gazu i silnych oddziaływań mechanicznych przepływ–obiekt powoduje, że zarówno analiza tych przepływów jak i ich zastosowania napotykają na duże trudności poznawcze i technologiczne. Tym niemniej postęp, jaki się dokonał w tej dziedzinie, jest widoczny dla każdego. Zawdzięczane mechanice płynów osiągnięcia w projektowaniu obiektów latających, zarówno cywilnych jak i militarnych oraz wysokowydajnych *silników* napędowych przyczyniło się do zmian stylu i jakości życia w dużej części naszego globu. Wagę rozwoju aeronautyki, jako elementu stymulującego rozwój dzisiejszej cywilizacji, podkreśla Komisja Europejska w swojej strategicznej wizji rozwoju do 2020 roku [8], oceniając konieczność przeznaczenia 100 mld Euro w najbliższym dwudziestolecu na badania w tej dziedzinie.

Szczególnym wyzwaniem dla aerodynamiki jest pojawienie się projektów silników superstrumieniowych [9], które mogłyby stanowić źródło napędu dla samolotów poruszających się z prędkościami od 10 do 18 razy większymi od prędkości dźwięku. Badania w tej dziedzinie prowadzą do powstania nowej generacji płatowców zintegrowanych z silnikami napędowymi, co w perspektywie może doprowadzić do pojawienia się nowych generacji powietrznych środków transportu.

Bardzo istotnym działem mechaniki płynów, który wywodzi się zasadniczo z aerodynamiki, jest aktywna kontrola przepływu [10–12]. Niestabilności przepływu, odrywanie się warstw przyściennych, fluktuacje i wywołane nimi drgania, są przyczyną zwiększenia oporów czy nawet destrukcji materiałów. Badania nad zachowaniem się systemów dynamicznych stworzyły podstawy do projektowania i realizowania systemów pasywnego i aktywnego kontrolowania zachowania się przepływu ściśliwego w pobliżu opływanych ścianek obiektów. Aktywne kontrolowanie pojawiania się wyrzutów niestabilności („burstings”) w warstwie przyściennej przez odpowiednie manipulowanie rozkładami ciśnienia i deformacji powierzchni jest już obecnie możliwe i prowadzi do znacznej redukcji oporów i zmniejszenia generacji hałasu w urządzeniach lotniczych. Z kolei celowe zakłócanie przepływu przez odpowiednie modyfikacje geometrii jest stosowane do intensyfikacji procesów mieszania turbulentnego, problemu istotnego np. dla procesów spalania. Ważną dziedziną aktywnego oddziaływania na przepływ jest sterowanie procesami spalania i wektorem ciągu silników odrzutowych, będące jednym z priorytetów działalności badawczej w Office of Naval Research w USA [13]

Postępy w mikroelektronice przybliżają wizję aktywnych paneli sterowanych elektromechanicznymi procesorami pokrywającymi duże fragmenty powierzchni np. skrzydeł samolotu [14–16]. Czujniki tych procesorów analizują fluktuację ciśnienia i automatycznie dostosowują mechaniczną mikrostrukturę powierzchni do zmieniających się warunków przepływu. Dla skonstruowania takiej aktywnej powierzchni konieczna jest koncentracja rzędu 20 tys. mikroelementów na cm^2 , mamy więc doczynienia z komputerem o olbrzymiej mocy obliczeniowej, pokrywającym kilkunasto mikronową warstwą swoich procesorów całą opływaną powierzchnię. Obecnie produkowane mikro systemy mechaniczno-elektroniczne (MEMS) mają jeszcze wymiar rzędu 1mm. Jest to więc poważne wyzwanie dla mechaniki płynów, elektroniki i mechaniki materiałów, ale jego realizacja wydaje się być już bliska.

2.2 Turbulencja, niestabilności przepływów, dynamika wirów

Choć intuicyjnie często używamy słowa turbulentny i jest ono rozumiane jako proces burzliwy, trudny do przewidzenia czy nieokreślony, to precyzyjne zdefiniowanie przepływu turbulentnego jest trudne. Mówi się więc o przepływach turbulentnych raczej opisowo, wymieniając [17–19] jako ich główne charakterystyki nieregularność, chaotyczność, rozpiętość skal (wiry), dyfuzyjność (mieszanie), duże prędkości i duże wymiary charakterystyczne opływanych obiektów (liczba Reynoldsa). Przepływy turbulentne zmieniając w sposób przypadkowy kierunek, prędkość czy temperaturę cząsteczek cieczy są antonimem przepływów laminarnych, których parametry są jednoznacznie zdeterminowane warunkami brzegowymi. Dodatkowo wiemy, że turbulencja z natury jest zjawiskiem czasoprzestrzennym, tzn. do jej opisu konieczna jest analiza procesów zmiennych w czasie i w trójwymiarowej przestrzeni, co znacznie utrudnia wszelkiego rodzaju badania teoretyczne i eksperymentalne. Z drugiej strony, jak już wcześniej wspomniano, analizując jakikolwiek przepływ możemy z dużym prawdopodobieństwem spodziewać się, że mamy do czynienia

z przepływem turbulentnym. Wydzielanie turbulencji jako specyficznego działu mechaniki płynów może się więc wydawać sztuczne. Wynika to jednak z olbrzymich trudności poznawczych jakie stwarza turbulencja i konieczności stworzenia specyficznych metod matematycznych do jej analizy.

Konieczność rozwiązywania konkretnych problemów technicznych czy też zagadnień dotyczących otaczającego nas środowiska spowodowała powstanie wielu uproszczonych opisów przepływów turbulentnych, opartych na danych empirycznych i dodatkowych równaniach parametryzujących, tzw. modelach turbulencji, zapoczątkowanych jeszcze przez obserwacje Prandtla [20]. Mimo swych ograniczeń, takie uproszczone modele pozwoliły na lepsze zrozumienie fizyki przepływów turbulentnych i umożliwiły wykonywanie obliczeń numerycznych, a więc projektowanie i kontrolę przepływów w wielu praktycznych zastosowaniach. Istotnym krokiem milowym stało się zrozumienie kaskadowej struktury transportu ruchu turbulentnego, w którym duże struktury wirów przekazują energię coraz mniejszym strukturom, aby wreszcie te w najmniejszej skali zamieniły swoją energię kinetyczną w energię wewnętrzną w drodze dyssypacji lepkiej [21]. Zastosowanie teorii systemów dynamicznych i chaosu stanowi ostatni etap klasycznych badań turbulencji [22, 23]. Równolegle, w tzw. numerycznej mechanice płynów dokonał się przełom, który stworzył zupełnie nowe narzędzia i perspektywy. Temu tematowi ze względu na jego wagę dla dalszego rozwoju mechaniki płynów warto jednak poświęcić osobny paragraf.

2.3 Przepływy turbulentne z reakcjami chemicznymi, turbulentne spalanie

Przepływy turbulentne stanowią same w sobie nierozwiązany problem fizyki. Uwzględnienie w tych przepływach reakcji chemicznych, w szczególności egzotermicznych, takich jak spalanie, wyzwalających znaczne ilości ciepła powodującego powstawanie silnych gradientów temperatury oraz zmienność własności fizycznych płynu, w znacznym stopniu komplikuje zadanie modelowania przepływu [24, 25]. Znakomita większość reakcji chemicznych w technicznych zastosowaniach związana jest przy tym z przepływem turbulentnym. Okazuje się jednak, że najczęściej charakterystyczna skala czasu reakcji chemicznej jest znacznie mniejsza niż skale czasowe pola przepływu. W przypadkach takich z powodzeniem zastosować można regułę „mixed is burnt”, a o jakości modelu takiego przepływu decyduje przede wszystkim prawidłowość opisu intensywności mieszania, prawidłowość zamodelowania przepływu turbulentnego, nawet przy stosunkowo uproszczonym modelu reakcji chemicznej. Najistotniejszym wyzwaniem modelowania przepływów turbulentnych z reakcjami chemicznymi jest obecnie zastosowanie metody LES uzupełnionej odpowiednim modelem reakcji chemicznej. Autorzy projektu badawczego MOLECULES — „Modelling of Low Emission Combustors using Large Eddy Simulators”, którego celem jest zamodelowanie przy pomocy metody LES komory spalania silnika lotniczego, oczekują 80% redukcji tlenków azotu w silnikach projektowanych na podstawie nowej metodyki modelowania przepływów turbulentnych. Świadczy to wyraźnie o roli, jaką numeryczna mechanika płynów odgrywa w rozwoju inżynierii chemicznej, a w szczególności w optymalizacji procesu spalania.

Równie intensywnie badane są obecnie procesy spalania wodoru, co wymuszone jest przewidywanymi wyzwaniami technicznymi występującymi zarówno w silnikach superstrumieniowych jak i nowych generacjach silników wewnętrznego spalania.

2.4 Numeryczna mechanika płynów

Numeryczna mechanika płynów jest stosunkowo młodym działem w mechanice płynów. Wywodzi się, jak sama nazwa wskazuje, od zastosowań metod numerycznych do obliczeń przepływów. Zastosowania metod numerycznych początkowo miały niewielki zasięg, ograniczając się głównie do rozwiązywania uproszczonych równań przepływu (tzw. równania Eulera dla płynów idealnych) w aerodynamice. Rozwój technik numerycznych a przede wszystkim pojawienie się szybkich komputerów o dużych pamięciach operacyjnych umożliwiło rozwiązywanie coraz bardziej złożonych zagadnień — prowadząc do powstania nowego działu mechaniki płynów Computational Fluid Mechanics [26, 27]. Ogromny postęp, jaki dokonał się w ostatnim dziesięcioleciu w dziedzinie metod numerycznych oraz wzrost możliwości obliczeniowych komputerów spowodował, że dziś metody CFD są stosowane praktycznie we wszystkich możliwych dziedzinach przemysłu: od aerodynamiki lotniczej poprzez przemysł samochodowy aż po przemysł spożywczy, włókienniczy, czy zastosowania biomedyczne. Ogromna konkurencja pomiędzy producentami oprogramowania komercyjnego dla CFD spowodowała, że kody komercyjne są bardzo uniwersalne, obejmując praktycznie wszystkie zagadnienia fizyki przepływu, a ich ceny nie stanowią już bariery nawet dla małych i średnich przedsiębiorstw. Komercyjne oprogramowanie zainstalowane na komputerze klasy PC pozwala już dziś prowadzić obliczenia złożonych, trójwymiarowych przepływów przemysłowych.

Na podobieństwo eksperymentalnej mechaniki płynów, numeryczna mechanika płynów pozwala na modelowanie przepływów dla zadanych, interesujących nas parametrów i warunków brzegowych. Opracowanie nowych, dokładnych metod numerycznych rozwiązywania pełnych równań Naviera–Stokesa, bez uproszczeń, dodatkowych założeń czy modeli pomocniczych, pozwoliło na symulację chaotycznego, nieprzewidywalnego zjawiska przepływu turbulentnego [2], co wydawało się przez dziesięciolecie niemożliwe. Mimo, że otrzymane dokładne rozwiązania dotyczą prostych przypadków, wiadomo już, że ruch turbulentny można opisać deterministycznymi równaniami Naviera–Stokesa, jeśli nie dla każdego przypadku, to przynajmniej dla większości interesujących nas praktycznie. Przy istniejącym nadal braku matematycznego zaplecza dla takiego stwierdzenia, ten empiryczny wniosek otworzył nowe perspektywy dla rozwoju metod numerycznych. Wykorzystanie dotychczasowej wiedzy o strukturze turbulencji pozwoliło na stworzenie metod hybrydowych, takich jak LES (Large Eddy Simulations) i TRANS (Transient Reynolds Averaged Navier–Stokes), pozwalających na ograniczenie czasochłonnych obliczeń dokładnych (DNS) tylko do obszarów istotnych w kaskadowym procesie przekazywania energii ruchu wirowego [28–30]. Postęp, jaki się dokonał w tym zakresie powoduje wypieranie eksperymentu na rzecz symulacji numerycznych, nie tylko przy planowaniu, projektowaniu i kontroli zagadnień przemysłowych, ale nawet w badaniach podstawowych. Przykładem tego ostatniego są powszechne już analizy charakterystyk statystycznych turbulencji przez „pomiar” parametrów przepływu wygenerowanego metodą dokładną, czyli metodą Direct Numerical Simulation.

2.5 Metody eksperymentalne w mechanice płynów

Podobnie jak numeryczna mechanika płynów, rozwój metod eksperymentalnych dotyczy całości zastosowań mechaniki płynów. Rola eksperymentu w mechanice płynów trudna jest do przecenienia, wynika to ze wspomnianej wcześniej, matematycznej trudności znalezienia ogólnego rozwiązania równań przepływu, a więc dostarczenia jednoznacznego opisu interesujących nas prak-

tycznie zjawisk przepływowych. Także i w dziedzinie eksperymentu zachodzą obecnie bardzo istotne zmiany wywołane zarówno rozwojem technologii elektronicznych jak i potrzebami badań prowadzonych w różnych dziedzinach mechaniki płynów. Przykładowo, w miejsce najpowszechniejszych do niedawna pomiarów punktowych, z których rekonstruowano przybliżony opis całego przepływu, pojawiły się pomiary charakterystyk całego pola. Wymuszone to zostało powstaniem nowych metod opisu numerycznego, dla weryfikacji których konieczne jest uzyskanie jednocześnie informacji o całej strukturze pola. Dla weryfikacji poprawności założeń nowych metod opisu przepływu (zwłaszcza turbulentnego) konieczne stało się opracowanie nowego typu prac eksperymentalnych. Celem tych eksperymentów jest najczęściej pomiar bardzo złożonych wielkości, takich jak np. wirowość czy dyssypacja, a do ich realizacji niezbędne jest stosowanie złożonej aparatury i metod przetwarzania sygnału. Warto tu również zauważyć, że rozwój techniki i dostępność komputerów stymuluje burzliwy rozwój nowych metod eksperymentalnych. Klasyczne metody wizualizacji przepływów zastąpiła cyfrowa analiza obrazów [31], umożliwiającą precyzyjny opis zmiennych w czasie dwu i trójwymiarowych pól prędkości (anemometria obrazowa PIV). Metody optyczne oparte na interferometrii holograficznej, laserowych metodach fluorescencji rezonansowej, ciekłych kryształach, tomografii elektrycznej czy rezonansie magnetycznym, to techniki umożliwiające pomiar rozkładu temperatury czy koncentracji dla całych trójwymiarowych pól przepływu, często w ekstremalnych warunkach spotykanych np. podczas spalania. Ze względu na złożoność zjawisk, zastosowanie metod eksperymentalnych to często jedyny sposób weryfikacji założeń teoretycznych optymalizacji przepływu.

Przez dziesiątki lat badania doświadczalne dostarczały też wiedzę umożliwiającą budowanie i weryfikację modeli upraszczających opis matematyczny zjawisk przepływowych. W ostatnich latach jednak sytuacja się tutaj nieco zmieniła, metody Direct Numerical Simulation pozwalają wierzyć w możliwość dokładnego symulowania przepływów, a więc budowania wzorców numerycznych do testowania modeli uproszczonych. Ogólny postęp w rozwoju metod numerycznych stworzył też nowe narzędzia projektowania i analizy przepływów w praktycznych zastosowaniach, eliminując często konieczność prowadzenia kosztownych i żmudnych badań laboratoryjnych. Metody komputerowej wizualizacji symulacji numerycznych przepływu w połączeniu z szybkimi komputerami doprowadziły do utworzenia wirtualnych tuneli aerodynamicznych, w których badacz interaktywnie obserwuje oddziaływanie przepływu z badanym modelem, w sposób niemal identyczny jak to ma miejsce w laboratorium.

Mogłoby to sugerować utratę znaczenia metod eksperymentalnych. Okazuje się jednak, że nawet najprecyzyjniejsze obliczenia nie dadzą gwarancji poprawności przyjętych w takim modelu założeń fizycznych, możliwości oceny wpływu uproszczeń geometrycznych (choćby wskutek dyskretyzacji), uproszczeń warunków brzegowych czy parametrów fizycznych płynów [32]. Obserwowane rozbieżności rezultatów symulacji numerycznych i fizycznej realizacji przepływu spowodowały gwałtowne zapotrzebowanie na precyzyjne opisy eksperymentalne, które mogą służyć jako wzorce (tzw. benchmark) do weryfikacji modeli numerycznych. Szczególną rolę odgrywają tu nowe techniki eksperymentalne, umożliwiające jednoczesny pomiar globalnych charakterystyk mierzonych pól. Znaczenie, jakie przypisuje się tworzeniu takich wzorców eksperymentalnych odzwierciedla powstawanie kolejnych europejskich sieci tematycznych, takich jak FLOWNET, TRANSPRETURB czy PIVNET, poświęconych zbieraniu, analizie i katalogowaniu eksperymentalnych wzorców przepływów, gromadzących dane na podstawie pełnej, często trójwymiarowej analizy eksperymentalnej dobrze zdefiniowanego przepływu modelowego.

2.6 Środowiskowa mechanika płynów (atmosfera, oceany, geofizyka)

Rozwój mechaniki płynów wiązał się zawsze z problemami środowiska naturalnego otaczającego człowieka. Prądy morskie, wylewy rzek, wybuchy wulkanów czy zjawiska atmosferyczne decydowały i decydują nadal o życiu lub śmierci całych grup ludzkich. Zrozumienie w ostatnich latach wpływu efektów działalności człowieka na perturbacje czy długofalowe zmiany środowiska naturalnego dodatkowo spotęgowało rozwój stosowanych w mechanice płynów metod analizy i symulacji wielkoskalowych przepływów [33–36]. Albowiem to, co wyróżnia tematykę środowiskowej mechaniki płynów od innych jej działów, jest konieczność operowania w niespotykanych gdzie indziej zakresach skal przestrzennych i czasowych, zmuszająca do bardzo zgrubnych opisów zjawisk i do stosowania metod bardzo przybliżonych. Jednym z takich przybliżeń, powszechnie stosowanym w badaniach atmosferycznych, jest pojęcie atmosferycznej warstwy przyściennej, do której ograniczają się zjawiska atmosferyczne odpowiedzialne za transport energii i masy. Warstwa taka może mieć grubość kilku kilometrów lub całkowicie zaniknąć dla silnie zaburzonych stanów atmosferycznych (sztormy itp.), przepływy w tej warstwie charakteryzują się silną turbulencją i często intensywną wymianą energii i masy w kierunkach pionowych. Ta warstwa oddziałuje bezpośrednio na otoczenie człowieka a jej zachowanie czy struktura wpływa na klimat i transport zanieczyszczeń w najbliższym nam otoczeniu. Pozostała część atmosfery, w takim przybliżeniu, odgrywa rolę olbrzymiego zbiornika, w którym przyprływy reguluje rozkład energii potencjalnej ciśnienia i siły Coriolisa. Oddziaływanie obu tych warstw jest złożonym, nieliniowym procesem i jego modelowanie mimo uproszczeń sprawia poważne trudności. Przyziemna warstwa atmosferyczna jest permanentnie turbulentna a zakres skal turbulencji, które należy uwzględnić przy jej modelowaniu nadal przekracza możliwości istniejących mocy obliczeniowych. Tak więc, mimo olbrzymich nakładów finansowych i zaangażowania wielu ośrodków naukowych, nadal nie można z całą pewnością odpowiedzieć na podstawowe dla nas pytanie: czy i jak działalność człowieka wpływa na zmiany trendów klimatycznych [37, 38].

Konieczność budowania modeli teoretycznych dla parametryzacji zjawisk przepływowych w atmosferze stwarza zapotrzebowanie na duże ilości różnorodnych danych empirycznych, pochodzących z bezpośrednich badań atmosfery. Mimo olbrzymiego postępu w dziedzinie metrologii atmosfery, systemu stałego monitorowania olbrzymich połaci globu przez laboratoria satelitarne, nadal brak dostatecznie precyzyjnej i „gęstej” informacji czasoprzestrzennej jest jedną z głównych przeszkód w budowaniu wiarygodnych modeli prognostycznych klimatu [39].

Problemy analogiczne do atmosferycznych i zbliżone metody analizy spotykamy w badaniach zachowania się drugiego podstawowego rezerwuaru płynu na Ziemi, czyli zbiorników wodnych. Konieczność sprzężenia zjawisk atmosferycznych z globalnymi efektami w oceanach i w strefach polarnych jest jedną z dodatkowych trudności modelowania klimatycznego [40–42]. Jednak mimo tych trudności, postęp w tym dziale mechaniki płynów jest olbrzymi, w dużej części dzięki lepszemu zrozumieniu zjawiska turbulencji jak również za sprawą rozwoju technik komputerowych. Olbrzymie nakłady finansowe, jakie przeznacza się w niektórych krajach na badania atmosferyczne i oceanograficzne, przyniosły wymierne rezultaty. Już obecnie sprawdzalność kilkunastogodzinnych prognoz jest w wielu miejscach Ziemi niemal stuprocentowa a jej rezultaty często pozwalają zapobiec czy zminimalizować skutki katastrof zarówno naturalnych jak i wygenerowanych przez człowieka. Zrozumienie olbrzymiego znaczenia prognozowania i kontroli zjawisk przepływowych w otoczeniu człowieka dla gospodarki i bezpieczeństwa stanowi siłę napędową

kolejnych dużych programów badawczych prowadzonych w przodujących krajach uprzemysłowionych.

2.7 Przepływy wielofazowe, przepływy ze swobodną powierzchnią

Przepływy ze swobodną powierzchnią to, ogólnie mówiąc, przepływy ograniczone dynamicznie zmieniającą się granicą. Do takich zaliczymy praktycznie wszystkie typowe przepływy wielofazowe, tzn. takie, w których występuje jednocześnie więcej niż jedna faza, jak i szczególne przypadki przepływów quasi-jednofazowych, jak falowanie powierzchni cieczy w zbiornikach, strugi i krople w gazach, filmy cieczowe na powierzchniach stałych, w których dynamika „drugiej fazy” ogrywa rolę pasywną przy dominacji zjawisk powierzchniowych na granicy faz [43–46]. Warto zauważyć, że większość przepływów ma charakter wielofazowy. Z przepływem zawieszin, pęcherzyków, kropeł mamy do czynienia we wszelkiego typu systemach hydraulicznego transportu w przemyśle przetwórczym czy wydobywczym, w reaktorach chemicznych i jądrowych, krystalizatorach czy wymiennikach ciepła. Do przepływów wielofazowych zaliczamy zjawisko kawitacji, niszczącego rezultatu oddziaływania pól przepływu i sił napięcia powierzchniowego [47]. Badania nad przepływami wielofazowymi mają więc wiele praktycznych aspektów. Na przykład, w ostatnich latach duże nakłady finansowe przeznaczono w wielu europejskich programach naukowych na badania procesów rozpylania strug paliwa, tak by w konsekwencji doprowadzić do powstania nowych generacji silników spalinowych czy palników w elektrowniach i ciepłowniach.

Zasadniczą specyfiką przepływów wielofazowych jest pojawienie się, nieznaney *a priori*, powierzchni granicznej dynamicznie zmieniającej się w czasie. Konieczność spełnienia warunków brzegowych na nieznaney powierzchni poważnie komplikuje opis matematyczny problemu. Występowanie oddziaływań wielocząstkowych, warunków brzegowych na wielu powierzchniach stwarza problem nierozwiązalny klasycznymi metodami mechaniki płynów. Jeśli do tego dodamy wszechobecną w przepływach turbulencję, jest jasne, że możemy mówić o węzłowym problemie mechaniki płynów, bardzo ważnym praktycznie a niemal beznadziejnie trudnym do analizy teoretycznej. Niemniej osiągnięcia w modelowaniu turbulencji zaczynają przynosić widoczne korzyści w modelowaniu przepływów wielofazowych i pierwsze próby opisu takich przepływów metodami Direct Numerical Simulation mają już miejsce [48, 49].

Obecność wielu cząstek w przepływie powoduje konieczność stosowania metod statystycznych do opisu przepływów wielofazowych. Stosowanie tych metod utrudnia jednak niedoskonałość opisu teoretycznego wielocząstkowych oddziaływań hydrodynamicznych. Efekty napięcia powierzchniowego, dominujące dynamikę granicy faz, są wciąż trudne do modelowania. Dla zrozumienia występujących tu zjawisk zaprzęga się ostatnio metody dynamiki molekularnej. Opis dyskretny dla zespołu kilkudziesięciu czy nawet miliona oddziaływujących w prosty sposób ze sobą i ze ściankami molekuł [50] umożliwia stworzenie modeli komputerowych symulujących zjawiska fizyczne odpowiedzialne za oddziaływania ciecz–ciało stałe w obecności fazy gazowej (zwilżanie), oddziaływanie dwóch powierzchni międzyfazowych (koalescencja), procesy rozrywania powierzchni (cienkie filmy, rozpad strug cieczy), czy mikro przepływy np. w ośrodkach porowatych. Problem mikro przepływów, który pośrednio znalazł się w tej grupie zjawisk, odgrywa ostatnio bardzo ważną rolę w związku z rozwojem mikrosystemów mechaniczno-elektronicznych (MEMS) i zagadnieniami chłodzenia mikroelektroniki [51, 52].

2.8 Przepływy z wymianą masy i ciepła

Szybko rosnące wymagania technologiczne i wyzwania środowiskowej mechaniki płynów generują nowe, coraz bardziej specjalistyczne wymagania dotyczące opisu i modelowania zjawisk towarzyszących przepływowi. Szereg nowych możliwości, jakie pojawiły się w tej dziedzinie to zrozumienie źródeł niestabilności i możliwość aktywnej kontroli przepływu tak, by pojawiające się niestabilności opóźnić lub zminimalizować. Dotyczy to w szczególności zastosowań związanych ogólnie z obróbką materiałów, gdzie gradienty temperatury i koncentracji masy decydują o jakości i efektywności produkcji [53, 54]. Wymagania wysokiej czystości i precyzji budowy kryształów półprzewodnikowych, czy ostatnio kryształów struktur biologicznych, stworzyły całą gałąź wiedzy dotyczącej kontrolowania procesów wymiany masy i ciepła, uciekając się również do modyfikowania wpływu grawitacji przez wykorzystanie laboratoriów orbitalnych. Podobnego znaczenia nabierają problemy związane z kontrolowaniem procesów tworzenia na podłożu mikrowarstw metodą kondensacji par, procesu bardzo ważnego przy tworzeniu obwodów półprzewodnikowych czy światłowodów [55].

Oddziaływania konwekcji wymuszonej i konwekcji naturalnej (wywołanej efektami wypornościowymi) jest powodem wielu zakłóceń przepływu, łącznie z efektami oderwania się warstwy termicznej [56]. Zjawiska takie obserwuje się zarówno w przepływach atmosferycznych i w oceanach, jak w mniejszej skali przy wentylacji pomieszczeń czy w przemysłowych procesach krzepnięcia, np. przy wytopie metali. Tak zwana penetrująca konwekcja, czyli prądy wstępujące, pojawia się przy dużych gradientach temperatur, powodując na przykład niekontrolowane rozprzestrzenianie się pożarów lasów, czego jesteśmy świadkami każdego lata w wielu krajach [57]. Negatywny efekt wzajemnego oddziaływania pól termicznych i koncentracji składników płynu oraz konwekcji wymuszonej dał impuls do dokładniejszej analizy tych złożonych, wzajemnie sprzężonych zjawisk. Znaczący postęp dokonał się w modelowaniu zjawisk towarzyszących przemianie fazowej, jak solidyfikacja czy procesy wrzenia [58]. Jednak precyzja tego opisu często zawodzi w zetknięciu z praktyką, z powodów podobnych jak to ma miejsce w przepływach wielofazowych. Wciąż konieczne jest stosowanie w obecnych modelach uproszczonego opisu teoretycznego takich podstawowych procesów, jak tworzenie się pęcherza pary, zarodka kryształu czy czynników fizycznych wpływających na kształt i szybkość zmiany powierzchni międzyfazowej. W większej skali zjawisk, wszechobecna turbulencja komplikuje modelowanie procesów transportu masy i ciepła, zmieniając często jakościowo charakter opisywanych zjawisk.

2.9 Biomechanika przepływów, przepływy biologiczne, minimalizacja oporów przepływu w przyrodzie

Zarówno zewnętrzne środowisko jak i budowa organizmów żywych oparte są na przepływach wody i powietrza, z tego powodu oczywista jest olbrzymia rola mechaniki płynów w zrozumieniu procesów biologicznych i rozwijania sposobów ich kontrolowania czy modyfikowania. Zakres zmian parametrów przepływów biologicznych jest bardzo szeroki. W przypadku człowieka mamy doczynienia z mikrocyrkulacją krwi w kapilarach, przepływami turbulentnymi w arteriach, sercu czy płucach, występowaniem przepływów wielofazowych, przepływów z wymianą masy i energii, przepływami w ośrodkach porowatych [59–61]. Niemal wszystkie dziedziny mechaniki płynów mają tutaj zastosowanie. Najbardziej aktywnie rozwijają się oczywiście zagadnienia

związane bezpośrednio z życiem i zdrowiem człowieka. Plaga współczesnej cywilizacji, arterioskleroza, jest klasycznym problemem przepływowym, analizowanym przez mechaników płynów od kilku dziesięcioleci. Mimo dokonanych postępów, obecny stan wiedzy nadal nie pozwala nam uzyskać jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, jakie miejsca w arteriach będą zaatakowane tym schorzeniem i jak temu zapobiec.

Inne pole głębokiego zaangażowania mechaniki płynów to drogi oddechowe, skomplikowany układ przepływowy w elastycznych naczyniach transportujących gaz i ciecz, odpowiedzialny za podstawową dla życia wymianę masy [62]. Wzajemne oddziaływania ciecz-gaz w tym systemie kryje nadal wiele niewiadomych. Ostatnie badania pokazały na przykład, jak ważną rolę odgrywają pojawiające się często w drogach oddechowych mechaniczno-przepływowe niestabilności, jak i wskazały na istotny wpływ substancji powierzchniowo czynnych na cyrkulację płynów w górnych drogach oddechowych. Trudności, jakie napotyka tutaj mechanika płynów, są typowe dla wszystkich systemów biologicznych, niezliczone sprzężenia zjawisk chemicznych, biologicznych i mechanicznych ze zjawiskami przepływowymi utrudniają budowanie sprawdzalnych w naturze modeli teoretycznych i numerycznych. Tym niemniej wiele pytań, jakie pojawiają się na przykład przy operacjach naczyń krwionośnych i serca, przy budowie sztucznych zastawek i sztucznych nerek, znalazło odpowiedź dzięki wykorzystaniu w medycynie rezultatów badań przepływów biologicznych, prowadzonych intensywnie w wielu ośrodkach. Olbrzymią rolę w tych badaniach odgrywają metody diagnostyki przepływu, wśród których należy podkreślić znaczenie takich technik jak anemometria ultradźwiękowa i laserowa, wizualizacja tomograficzna (MR) oraz metoda anemometrii obrazowej (PIV) [63].

Nieco inną grupą problemów, związanych z biologią i budzących od kilku dziesięcioleci żywe zainteresowanie mechaniki płynów, są zjawiska towarzyszące przemieszczaniu się w płynach „obiektów żywych”. Już od dawna frapowała człowieka wydajność aparatu ruchowego ptaków, umożliwiającą precyzyjne sterowanie ich lotem i przemierzanie olbrzymich odległości przy minimalnych nakładach energii [64]. Podobne obserwacje ruchu rekinów doprowadziły do powstania całej nowej dziedziny mechaniki płynów, zajmującej się analizą towarzyszących tym zjawiskom przepływów i próbą wykorzystania zdobyczy natury w opanowaniu podstawowych dla mechaniki płynów problemów: minimalizacji oporów przepływu przy jego maksymalnej kontroli. Wiadomo już obecnie, że jedną z tajemnic natury jest „inteligentne” wykorzystanie drobnych modyfikacji opływanego profilu dla sterowania procesami generacji turbulencji i odrywania się warstw granicznych przepływu, co ma istotne znaczenie dla minimalizacji oporów. Zaobserwowane na skórze rekinów drobne, regularne nierówności powierzchni w kształcie rowków okazały się naturalną metodą tłumienia turbulencji. Wykorzystanie tego zjawiska ma już miejsce w pokryciach powierzchni samolotów czy statków. Nadal wiele emocji budzą, niemal ekwilibrystyczne, zdolności sterowania ruchem obserwowane u różnego typu owadów, krabów czy mikro-organizmów żyjących w oceanach [65–67]. Wyjaśnieniu mechanizmów pozwalających na takie sterowanie przepływem służą prowadzone w wielu ośrodkach na świecie badania modelowe i eksperymentalne mechaniki ruchu mikroorganizmów.

2.10 Płyny nie-newtonowskie

Znajdujące się powyżej stwierdzenie, że większość występujących w praktyce przepływów dotyczy przepływów wielofazowych, można dokończyć: i płynów nienewtonowskich, tzn. pły-

nów o nieliniowej charakterystyce przepływowej [68–70]. Wszelkiego rodzaju zawiesiny, płyny o nieco bardziej skomplikowanej budowie molekularnej, wykazują anizotropię charakterystyk mechanicznych i nieliniową zależność przemieszczeń od przyłożonych naprężeń zewnętrznych, klasyfikując się jako płyny reologiczne. Efekty reologiczne nabierają szczególnego znaczenia w przypadku przepływów polimerów, ale występują również w różnym nasileniu w większości przepływów biologicznych i przemysłowych. Dodatkowe nieliniowości wywołane efektami reologicznymi mogą czasem prowadzić do pozytywnych zmian przepływu, zmniejszając jego opory i tłumiąc turbulencję. Zjawisko często obserwowane w przepływach biologicznych. Uwzględnienie efektów reologicznych w modelowaniu przepływu stanowi jednak poważny problem. Nie tylko dlatego, że komplikuje to i tak już silnie nieliniowy opis zjawisk przepływowych, ale z powodu trudności znalezienia ogólnego opisu charakterystyk płynów nienewtonowskich [71]. W praktyce uniemożliwia to stworzenie modelu teoretycznego bez detalicznych badań empirycznych charakterystyk reologicznych danego płynu, a to nie zawsze jest łatwe do wykonania i zapewnia wystarczająco precyzyjną odpowiedź.

2.11 Gazy rozrzedzone, dynamika molekularna

Szczególne zainteresowanie dynamiką gazów rozrzedzonych pojawiło się w momencie realizacji lotów kosmicznych, budowy raket balistycznych i laboratoriów orbitalnych. Odmienność tematyki wynika z konieczności stosowania zupełnie odmiennego opisu ośrodka, który dotąd umownie nazywaliśmy płynem. W warunkach gazów rozrzedzonych odległości między molekułami gazu większe niż kilkanaście ich średnic sprawiają, że ruch płynu nie może już być rozpatrywany jako ruch ośrodka ciągłego — ale jako superpozycja oddziaływań wielu molekuł [72]. Trudności opisu takiego ośrodka metodami klasycznej mechaniki przyczyniły się do rozwoju nowych technik symulacji przepływu takich jak metoda Monte Carlo i techniki hybrydowe łączące mechanikę kontinuum z dynamiką molekularną [73]. Osiągnięcia modeli numerycznych przepływu gazów rozrzedzonych zostały wykorzystane do budowania na ich podstawie modeli dyskretnych przepływu „zwykłych cieczy i gazów” w mikrokanalach, gdzie molekularny wymiar kanału powoduje „dyskretyzację” własności znajdującego się w nim płynu. Konieczność stosowania molekularnego opisu procesów przepływowych pojawiła się wraz z postępującą miniaturyzacją urządzeń, zwłaszcza elektronicznych. Symulacja procesu chłodzenia mikroprocesorów przez przepływ w kanalikach średnicy mikronów wymaga uwzględnienia molekularnej struktury cieczy chłodzącej. Inna dynamicznie rozwijająca się dziedzina zastosowań dynamiki molekularnej wynika z rozwoju nanotechnologii, technik związanych z wytwarzaniem mikro systemów mechaniczno-elektronicznych (MEMS) i materiałów o wymiarach charakterystycznych rzędu setek nanometrów [74,75].

2.12 Magnetohydrodynamika, przepływy plazmy

Wpływ pola magnetycznego na przepływ gazu zjonizowanego jest głównym tematem prac prowadzonych w magnetohydrodynamice. Jednym z elementów motywujących te badania jest chęć zogniskowania plazmy w polu magnetycznym tak, by doprowadzić do temperatur zapoczątkowujących kontrolowaną reakcję syntezy nuklearnej. Zjawiska elektromagnetyczne w górnych warstwach atmosfery, w przestrzeni kosmicznej i na słońcu mają istotny wpływ na występujące tam

przepływy materii [76]. Nowe kierunki badań nad oddziaływaniem pól elektromagnetycznych z przepływem dotyczą m.in. wykorzystania pól elektromagnetycznych do kontroli i tłumienia turbulencji, mechanizm praktycznie już wykorzystywany przy solidyfikacji metali czy w procesach hodowli kryształów [77]. Szereg światowych ośrodków prowadzi intensywne badania nad wykorzystaniem zjawisk magnetohydrodynamicznych w procesach plazmowej obróbki materiałów czy do budowy nowej generacji plazmowych silników raketowych.

2.13 Hydrodynamika

Omawiając problemy mechaniki płynów nie sposób nie wymienić klasycznej hydrodynamiki, nauki zajmującej się analizą przepływów wokół dużych obiektów wodnych, ich oddziaływaniem z falami i problemem stabilizacji ruchu i minimalizacji oporów przepływu. Szczególnego znaczenia nabrały w ostatnich latach badania wynikające z konieczności budowy dużych, ekonomicznych statków transportowych, czy też potężnych konstrukcji wiertniczych wznoszących się na oceanach [78].

3 Strategiczne problemy mechaniki płynów

Jakie działy mechaniki płynów będą przeżywać najbardziej intensywny rozwój w najbliższym dziesięcio- czy dwudziestoleciu? Takie pytanie pojawia się często z oczywistych powodów wśród autorytetów uprawiających obecnie mechanikę płynów [8, 79, 80]. Biorąc pod uwagę burzliwy rozwój komputerowych metod analizy, transmisji i przetwarzania danych, rola mechaniki płynów w „erze informatyki” wiąże się niewątpliwie z pokonaniem kolejnych barier ograniczających jeszcze numeryczną mechanikę płynów. Czy dojdziemy do etapu w którym równanie Naviera–Stokesa będzie rozwiązywane przy pomocy „cudownej czarnej skrzynki”, która zastąpi naukę o przepływach tak jak teraz podręczny kalkulator wyparł naukę tabliczki mnożenia? Tak trochę ironicznie prorokuje Gad-el-Hak [80]. Chyba jednak nie będzie to jeszcze możliwe, nawet przy zastosowaniu nieistniejących jeszcze superkomputerów opartych o łańcuchy DNA. Ale z pewnością będziemy obserwować dążenie do maksymalnego upowszechnienia i uproszczenia metod symulacji numerycznej, tak by stały się one podstawowym narzędziem wszędzie, gdzie rozwiązanie problemu technicznego czy poznawczego wiąże się z ruchem płynu.

Możemy zadać sobie kolejne pytanie, rozwiązanie jakich problemów możemy uznać za najbardziej istotne. Obserwując obecny rozwój mechaniki płynów, generalnie można chyba stwierdzić, że jej strategicznym celem jest **aktywna kontrola przepływu**. Elementy tej kontroli to opanowanie metod symulacji i analizy złożonych przepływów, tak by na podstawie informacji o przepływie aktywnie modyfikować jego parametry i optymalizować kontrolowany proces. Nieliniowość zjawisk przepływowych jest tutaj z jednej strony przeszkodą poważnie komplikującą problem, z drugiej strony może być wykorzystana by przez niewielką modyfikację warunków brzegowych czy początkowych zainicjować duże zmiany w oczekiwanym kierunku. Jest to już obecnie często praktykowane przy zastosowaniu metod analizy zjawisk chaotycznych. Rozwój aerodynamiki i loty kosmiczne są obecnie podstawowym motorem stymulującym rozwój metod aktywnej kontroli przepływu. Ale formułując zagadnienie bardziej ogólnie, problem kontroli przepływu to cel większości aktualnych zastosowań mechaniki płynów o których mówiliśmy na wstępie. Osiągnię-

cie tego celu wymaga dalszego rozwoju wielu dziedzin nauki a w szczególności wiąże się, naszym zdaniem, z intensyfikacją rozwoju wybranych poniżej działów mechaniki płynów.

Numeryczna mechanika płynów będzie niewątpliwą podstawą i warunkiem dalszego rozwoju innych dziedzin mechaniki płynów i dziedzin stosujących mechanikę płynów. Dalszy rozwój metod obliczeniowych związany jest zastosowaniem Direct Numerical Simulation (DNS) w połączeniu z wyżej wymienionymi metodami LES i TRANS. Praktyczne zastosowanie tych metod wymaga przyspieszenia procesu obliczeń o kilkanaście rzędów wielkości. Rozwój nowych, bardziej efektywnych i dokładnych technik obliczeniowych jest tutaj podstawowym zadaniem numerycznej mechaniki płynów. Jednym z podstawowych kierunków to rozwój nowych metod dyskretyzacji obszarów obliczeniowych, tak aby z jednej strony uzyskać dokładne odwzorowanie geometrii, zarówno obszarów ograniczających przepływ jak również obszarów istotnych zmian parametrów przepływu (fale uderzeniowe, silne gradienty, granice faz itp.). Dalszy rozwój adaptacyjnych metod generacji siatek obliczeniowych jest konieczny dla zoptymalizowania procesu obliczeniowego i ułatwia zastosowanie metod hybrydowych. Innym aktualnym problemem decydującym o efektywności metod numerycznych w mechanice płynów jest sposób określenia pola ciśnienia, szczególnie w przepływach o małej liczbie Macha. Bardzo istotny postęp jaki dokonał się w ostatnich latach w tej dziedzinie pozwala oczekiwać na znaczne podwyższenie efektywności obliczeniowej wynikającej z zastosowania tzw. metod gęstościowych uzupełnionych metodami „preconditioningu” [81]. Niemniej istotnym problemem, nad którym prowadzone są bardzo intensywne badania jest wpływ warunków brzegowych na efektywność obliczeniową [82]. Drugim nie mniej istotnym kierunkiem rozwoju metod dyskretyzacji, związanym z koniecznością zrównoleglenia procesów obliczeniowych, jest dekompozycja obszarów dyskretyzacji. Pozwala to na rozdzielanie zadania na wiele procesorów czy sprzężonych ze sobą komputerów, jedyna droga, by przy obecnych stanie techniki rozwiązać w skończonym czasie złożone zagadnienie. Jednak nawet najdoskonalsza dekompozycja geometrii ma swoje granice i dalsze przyspieszanie procesu obliczeń jest możliwe tylko przy zastosowaniu innych, bardziej rewolucyjnych metod redystrybucji zadań obliczeniowych. Celem jaki aktualnie stawia sobie wiele ośrodków badawczych jest skorzystanie z doświadczeń matematyków, którzy potrafili „zaprząć do pracy” miliony anonimowych komputerów rozproszonych na świecie dla znalezienia struktur białkowych, dekodowania kluczy kryptograficznych czy analizy sygnałów kosmicznych (system GRID). Takie rozdzielanie procesów obliczeniowych w mechanice płynów wydaje się na razie niemożliwe, mówi się już jednak o dekompozycji czasowej, zastosowaniu automatów komórkowych czy też metod dynamiki molekularnej. Opracowanie efektywnej metody zrównoleglenia obliczeń na miliony podprocesów będzie z pewnością jednym ze strategicznych celów metod numerycznych mechaniki płynów.

Środowiskowa mechanika płynów to przede wszystkim związana silnie z modelowaniem numerycznym mechanika atmosfery i oceanów. Konieczność kontroli przemieszczania się zanieczyszczeń wymaga rozwoju modeli ich rozprzestrzenienia się. Pałący problem to globalne symulacje procesów przepływowych na naszej planecie i w jej otoczeniu. Obok pytań o globalne zmiany klimatu i symulacje ich wpływu na dalszy rozwój ziemi, coraz bardziej istotne stają się przewidywanie i ewentualne minimalizowanie skutków katastrof naturalnych dla skupisk cywilizacyjnych. Wraz z rozwojem cywilizacyjnym i powiększaniem się obszarów o gęstej populacji ludności, znaczenie krótko i długo terminowych prognoz meteorologicznych dla rozwoju gospodarczego świata jest coraz większe. Dzięki wykorzystaniu programów symulujących przepływy w atmosferze i zbiornikach wodnych, już obecnie możliwość przewidywania wpływu różnego

rodzaju inwestycji przemysłowych może przynieść znaczne oszczędności przy planowaniu lokalizacji i sposobu utylizacji szkodliwych dla środowiska produktów ubocznych. Strategicznym zadaniem realizowanym w wielu krajach przy dużych nakładach finansowych jest obok rozwoju metod obliczeniowych, rozwój światowych systemów monitorowania i prognozowania. Jest oczywiste, że jednym z podstawowych elementów symulacji numerycznych są precyzyjne dane przekazywane w czasie rzeczywistym dla możliwie gęstej i równomiernej siatki pomiarowej pokrywającej Ziemię. Stworzenie takich sieci wiąże się z rozwojem nowych technik pomiarowych, przede wszystkim technik pozwalających na zdalny pomiar rozkładów pól prędkości, temperatury, wilgotności i koncentracji wtrąceń. Obok obserwacji satelitarnych w różnych zakresach widmowych, duże znaczenie mają tutaj metody laserowej i ultradźwiękowej diagnostyki dużych obszarów atmosfery. Wraz z dalszym rozwojem nowych technik pomiarowych produkujących gigabajty informacji na minutę, nabiera coraz większego znaczenia rozwój nowych metod analizy danych. Obok rozwijania metod specyficznych dla badań atmosferycznych, znajduje tu zastosowanie szereg metod analizy sygnałów i analizy obrazów rozwijanych w mechanice płynów. Należy oczekiwać, że rozwój tych metod będzie dominować w najbliższym dziesięcioleciu.

Jednym z czynników hamujących rozwój szybkich algorytmów symulacji procesów wielkoskalowych w atmosferze i oceanach jest brak poprawnych modeli parametryzacji zjawisk lokalnych, takich jak rodzaj podłoża, zabudowa, wegetacja roślin, zanieczyszczenia, konfiguracja terenu czy dodatkowe źródła energii w miastach i gęsto zaludnionych obszarach. Dotychczasowa praktyka parametryzowania równań transportu turbulentnego opiera się na analizie obserwacji i eksperymentów laboratoryjnych. Ograniczone możliwości obserwacyjne i dysproporcja skali w przypadku badań laboratoryjnych stanowią dużą przeszkodę w uzyskaniu jednoznacznej odpowiedzi na pytanie jak zmodyfikować globalny model aby uwzględniał możliwie dokładnie wpływ złożonych efektów lokalnych. Rozwój dokładnych metod numerycznych, jak DNS i LES pozwoli w najbliższej przyszłości na zastąpienie danych fizycznych zbieranych w trudnych do kontrolowania warunkach naturalnych przez pełne informacje numeryczne uzyskane dla wybranych konfiguracji i warunków brzegowych.

Turbulencja pozostanie w najbliższych latach tematem numer jeden klasycznej mechaniki. Powszechność zjawiska turbulencji w przepływach determinuje konieczność dalszego rozwoju teorii przepływów turbulentnych i badań nad rolą turbulencji nie tylko w transporcie masy i energii, lecz także i w bardziej podstawowych aspektach. Olbrzymim wyzwaniem dla analizy przepływów turbulentnych jest brak dowodu istnienia i jednoznaczności równania Naviera–Stokesa dla przestrzeni trójwymiarowych. Ilustruje to niezbędność prowadzenia w tej dziedzinie dalszych prac badawczych dotyczących również bardziej podstawowych aspektów zjawiska turbulencji. Postęp ten warunkuje możliwość dalszego rozwoju wielu praktycznie stosowanych technologii, gdyż przykładowo metody aktywnego sterowania charakterystykami przepływu, kontroli turbulencji dla optymalizacji oporów przepływu czy intensyfikacji reakcji chemicznych wymagają opracowywania modeli matematycznych, zapewniających szybkie i wiarygodne obliczenia numeryczne. Dotychczas stosowane statystyczne metody analizy przepływów turbulentnych prowadzą zawsze do powstania większej liczby niewiadomych niż będących do dyspozycji równań. W efekcie wymagają one wprowadzania hipotez zamykających o wątpliwej najczęściej uniwersalności. Rozwiązaniem problemu będą z pewnością metody DNS i LES umożliwiające bezpośrednie rozwiązanie równań Naviera–Stokesa, chociaż należy oczekiwać, że mimo intensywnych badań jego rozwiązanie nie będzie szybkie. Badania podstawowe z zakresu turbulencji muszą jednak udzielić

odpowiedzi na pytania dotyczące sposobu formułowania warunków brzegowych oraz dynamiki najmniejszych skali ruchu turbulentnego. Pewną pomocą stają się obecnie metody numeryczne, pozwalające symulować prostsze przepływy turbulenty. Umożliwia to przeprowadzanie „wirtualnych eksperymentów”, co znacznie ułatwia analizę struktur przepływu i wykonanie dużej liczby badań parametrycznych. Należy się liczyć, że rozwój tego kierunku badań będzie w najbliższych latach odgrywał pierwszoplanową rolę w badaniach turbulencji.

Metody eksperymentalne stanowią obecnie podstawę uwiarygodnienia (validation) modeli teoretycznych i numerycznych. Taka rola eksperymentu wymaga powstania nowych metod analizy badanych zjawisk, tak by w niezaburzony sposób uzyskać precyzyjne informacje o całych polach prędkości, temperatury, ciśnienia czy koncentracji w przepływie w szerokim zakresie zmian warunków (wysokie i bardzo niskie prędkości, temperatury, ciśnienia czy koncentracje). Powstało już szereg metod, głównie optycznych, pozwalających na uzyskanie takiej informacji dla wybranych przypadków. Warto tu wymienić powszechnie stosowaną anemometrię obrazową (PIV) czy dopplerowską anemometrię przestrzenną (GDA) do pomiaru pól prędkości oraz metody pobudzonej selektywnie fluorescencji laserowej (LIF, PLIF i odmiany), metody holograficzne, tomograficzne, rejestracji w podczerwieni, z wykorzystaniem substancji ciekłokrystalicznych stosowane do pomiarów temperatury. Dalszy rozwój tych metod poprzez powszechne stosowanie cyfrowych metod rejestracji i analizy obrazów umożliwia ilościową analizę złożonych przepływów w trójwymiarowej przestrzeni. Konieczność weryfikacji symulacji numerycznych w warunkach przemysłowych stwarza potrzebę wyjścia poza metody czysto optyczne. Zastosowanie metod diagnostyki ultradźwiękowej, tomografia elektryczna, rentgenowska czy elektro-magnetyczna pozwala penetrować nieprzezroczyste ścianki komór spalania czy rurociągów dostarczając niezbędnych informacji o temperaturze, koncentracji i prędkości. Dalszy rozwój tego typu metod jest niezbędny aby eksperymentalna mechanika płynów wyszła ze sterylnych warunków laboratoryjnych i umożliwiła kontrolowanie procesów przemysłowych.

Aerodynamika jest od niemal 100 lat główną siłą napędową rozwoju mechaniki płynów. Jej znaczenie dla transportu przyszłości będzie nadal rosło. Dzieje się tak nie tylko ze względu na wciąż istotne zamówienia militarne, ale również z uwagi na olbrzymi efekt wtórny rozwoju lotnictwa na gospodarkę krajów. Zaobserwowano, że podobnie jak kiedyś przemysł motoryzacyjny, przemysł lotniczy przyczynia się do znaczącego przyrostu nowych miejsc pracy i stymuluje rozwój całych gałęzi przemysłu. Zarówno USA jak i Unia Europejska stawiają sobie dalszy rozwój transportu lotniczego jako strategiczny cel na najbliższe kilkanaście lat. Podstawowe zadania to zwiększenie efektywności transportu lotniczego przez zmniejszenie oporów przepływu i wzrost wydajności silników oraz zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Na ten cel będą kierowane duże środki finansowe, które jak się oczekuje szybko się zwrócą. Przewiduje się, że przy spodziewanym wzroście efektywności transportu o 20%, powstały zysk pozwoli na kilkudziesięciokrotny zwrot nakładów, jakie są potrzebne dla zrealizowania tego celu. Istotnym zagadnieniem, ściśle związanym z rozwojem lotnictwa, będzie rozwój procesów wytwarzania i konwersji energii, zmierzający do istotnej poprawy efektywności maszyn energetycznych w zastosowaniach poza lotniczych, jak np. nowe rozwiązania wydajnych i ekologicznych turbin gazowych stosowanych coraz powszechniej do napędu w przemyśle a w przyszłości z pewnością również w transporcie lądowym.

Przepływy biologiczne są tematem badań mechaniki płynów od przeszło 50 lat. Rola mechaniki płynów w wyjaśnieniu mechanizmów transportu masy i energii i ich roli dla procesów życio-

wych człowieka, w szczególnie trudnych obszarach jak mózg, serce, układy filtracyjne (nerki, wątroba) jest bardzo istotna. Diagnostyka medyczna pozwala w wielu przypadkach opisać przyczyny zaburzeń chorobowych układu krwionośnego czy oddechowego. Znalazienie jednak efektywnych metod operacyjnych czy farmakologicznych pozwalających na usunięcie czy zminimalizowanie skutków takich zaburzeń opiera się jeszcze w dużej części na doświadczeniu i intuicji lekarza. Poprawa znajomości zjawisk jest konieczna dla optymalizacji leczenia i konstrukcji implantatów. Jednym z ważnych celów rozwoju mechaniki płynów jest więc opracowanie metod analizy, symulacji i optymalizacji procesów leczenia układów przepływowych człowieka, szczególnie układu krwionośnego i oddechowego. Optymalizacja lokalizacji i konstrukcji mechanicznej by-passów, czy przewidzenie słabych punktów systemu u badanego pacjenta, mogą ułatwić pracę chirurgowi i zagwarantować skuteczność operacji. Symulacje numeryczne przepływów umożliwiają już obecnie konstrukcje zastawek, sztucznych nerek czy sztucznego serca. Stosunkowo powolny postęp w zastosowaniach metod mechaniki płynów do przepływów biologicznych wiąże się ze złożonością problemu i materiałów biologicznych. I tak, na przykład, modelowanie przepływu krwi wymaga uwzględnienia reologicznych własności zawiesiny polidispersyjnej aktywnych chemicznie cząstek, uwzględnienia turbulencji, a w kapilarach układu krwionośnego efektów molekularnych, rozwiązywania problemów transportu ośrodka wielofazowego w elastycznych naczyniach o zmiennych w czasie i przestrzeni charakterystykach materiałowych. Interdyscyplinarność problematyki wymaga ścisłej współpracy mechaników płynów, lekarzy, farmakologów i stosowania specjalnych metod diagnostycznych i pomiarowych. Atrakcyjność tematyki ze względu na jej znaczenie dla człowieka stymuluje prowadzenie zarówno badań podstawowych jak i *in vivo* w wielu światowych ośrodkach i będzie ona wspólnie z biomechaniką aktualnym i szybko rozwijającym się zadaniem mechaniki w najbliższej przyszłości.

Procesy przepływowe występujące w zaawansowanych metodach obróbki materiałów odgrywają olbrzymią rolę w dzisiejszej technice. Rozwój metod pozwalających wytwarzać nowe materiały czy materiały o wysokiej czystości jest celem strategicznym wielu laboratoriów przemysłowych na świecie. Kontrolowanie procesu tworzenia kryształów półprzewodnikowych czy nadprzewodnikowych, kryształów DNA, wytwarzanie światłowodów, tworzenie nowych materiałów ceramicznych czy stopów wiąże się z koniecznością precyzyjnego kontrolowania zjawisk przepływowych. Ze względu na duże znaczenie gospodarcze tej problematyki należy oczekiwać jej dalszego, intensywnego rozwoju w najbliższym dziesięcioleciu.

Elektrohydrodynamika i przepływy plazmy. Ważną, perspektywiczną dziedziną zastosowania mechaniki płynów jest elektrohydrodynamika, a w tym w szczególności elektroeologia [83]. Możliwość sterowania własnościami lepkosprężystymi dielektrycznej cieczy z zawieszonymi mikrocząstkami poprzez natężenie pola elektrycznego ma ogromne możliwości zastosowań technicznych w przemyśle samochodowym, w robotyce, w hydraulice. Znane perspektywy aplikacyjne ma także aerodynamika plazmy, gdyż ten typ przepływu znajduje coraz nowe obszary zastosowań technologicznych. Przykładami może tu być technologia nakładania powłok o bardzo wysokiej twardości, czy też technologie konstrukcji palników dla przemysłu energetycznego, gdzie zastosowanie stabilizacji płomieni plazmą przynieść może rozszerzenie zakresu stabilnej pracy kotłów opalanych pyłem węglowym. Konieczne jest jednak doskonalenie metod opisu tego typu przepływów, gdyż charakteryzują się one występowaniem bardzo dużych strumieni ciepła i gradientów temperatury, które przekraczają znacznie zakresy, dla których opracowano dotychczasowe modele wymiany ciepła i masy.

4 Które z tych problemów mają szczególne znaczenie dla polskiego środowiska mechaniki płynów?

Należy się spodziewać, że **numeryczna mechanika płynów** będzie w najbliższym dziesięcioleciu najszybciej rozwijającą się grupą tematyczną i zdominuje niemal wszystkie aplikacje związane z mechaniką płynów. We współczesnym przemyśle, praktycznie w żadnej dziedzinie, nie można wyprodukować urządzenia czy stworzyć technologii, która sprostałaby konkurencji na rynku międzynarodowym, bez zastosowania zaawansowanych metod obliczeniowych mechaniki płynów (CFD). Konieczne są nie tylko nadzwyczajne działania pozwalające przygotować kadre na uczelniach, ale także dodatkowe bodźce powodujące transfer tej techniki do polskiego przemysłu. Polskie środowisko ma szansę aktywnie uczestniczyć w tym rozwoju. Wydaje się jednak, że podstawowym problemem dzisiejszej mechaniki płynów w Polsce jest zaplecze (a raczej jego brak) numerycznej mechaniki płynów (CFD). Poważne opóźnienie w tej dziedzinie wiąże się z brakiem specjalistów. W związku z tym szkoły wyższe poświęcają zbyt małe środki, by wykształcić przyszłą kadre potrafiącą skutecznie korzystać z istniejących zdobyczy i rozwijać nowe metody numeryczne mechaniki płynów. Kontrastuje to poważnie z sytuacją w krajach gospodarczo rozwiniętych, gdzie z kolei opanowanie metod numerycznych jest podstawą wykształcenia przyszłych inżynierów. Niestety (dla nas) akurat ta dziedzina mechaniki płynów przeżywa bardzo dynamiczny rozwój, zarówno ze względu na wzrost mocy obliczeniowych jak i duże zainteresowanie rozwojem nowych, efektywnych metod obliczeniowych (komputery równoległe, wektorowe). To stanowi poważne wyzwanie i zagrożenie dla polskiego środowiska, może być powodem małej konkurencyjności naszych ofert na rynku europejskim, i ograniczeniem naszej roli do podwykonawców. Tylko szybka i wielokierunkowa mobilizacja w tym kierunku może przyczynić się do „wyprodukowania” wystarczającej kadry, by mimo nieuniknionego drenażu, stworzyć warunki dla intensywnego rozwoju CFD w kraju. Barierą w upowszechnianiu metod CFD w nowych dziedzinach przemysłowych, blokującą ich postęp, oddalającą perspektywę potencjalnie możliwych oszczędności materiałów i energii, obniżenia kosztów produkcji oraz przyspieszenia cyklu projektowego, nie są już dziś ani koszty oprogramowania, ani koszty sprzętu komputerowego, a jedynie poziom przygotowania kadry inżynierskiej. Świadomość ta jest również nowa w Europie zachodniej, co stwarza dla Polski bardzo istotną szansę na zaistnienie na tym bardzo dynamicznie rozwijającym się rynku pracy. Stworzenie odpowiednich warunków stymulujących to już dyskusja dla ostatniego podrozdziału tego opracowania.

Badania związane ze **środowiskową mechaniką płynów** wydają się mieć szczególne znaczenie w dzisiejszym i przyszłym planowaniu nauki. Modelowanie, prognozowanie, wykorzystywanie energii i ewentualne sterowanie procesami związanymi z ruchami atmosfery ma szczególne znaczenie i rola tych badań będzie rosła. Globalny charakter problematyki wymusza współpracę międzynarodową, zapewniając światowy poziom i znaczenie badań. Polskie środowisko ma tutaj pewne osiągnięcia, ale są one mało widoczne — a rozbicie problematyki na wiele grup nie jest katalizatorem rozwoju. Wydaje się, że Polska ma tutaj szansę na osiągnięcie światowego poziomu. Rozwój badań środowiskowych ma duże znaczenie praktyczne dla Polski, co pokazuje chociażby zaskakująca wszystkie ośrodki naukowe i decyzyjne wielka powódź z 1997 roku. Możliwość wykorzystania funduszy europejskich na realizację tzw. „projektów środowiskowych” jest

dotatkowym argumentem na skoncentrowanie środków osobowych i finansowych na rozwój tej gałęzi mechaniki płynów.

Można by powiedzieć, że podobnie jak matematyka jest królową nauk, **turbulencja** niewątpliwie jest królową mechaniki płynów. Przepływ laminarny, jedyny który potrafimy dzisiaj dobrze opisać, jest niestety wyjątkiem a nie regułą w rzeczywistych przepływach. Dlatego rozwój wiedzy o turbulencji ma żywotne znaczenie dla niemal wszystkich pozostałych grup tematycznych mechaniki płynów. Niemały wkład polskiego środowiska w tej dziedzinie powinien zostać wykorzystany dla stworzenia silnych grup zajmujących się zarówno teorią jak i „wdrożeniem” turbulencji do problemów praktycznych. Bez tego nie jest możliwe uzyskanie poważnego postępu zarówno w zastosowaniach przemysłowych jak i przepływach środowiskowych. Poznanie mechanizmów przejścia przepływu laminarnego w turbulentny wykorzystując nie tylko eksperymenty, ale w coraz większym stopniu również symulacje numeryczne metodami dokładnymi (DNS), warunkuje możliwość prawidłowego opisu przepływów niestacjonarnych i odejście od stosowanych obecnie sztucznych hipotez.

5 Sugestie na temat programu wdrożenia strategicznych celów i systemu wdrożeń

Podstawowym strategicznym celem rozwoju mechaniki płynów powinna być konieczność wyrównania poziomu jego rozwoju, przynajmniej w tych trzech wyżej wymienionych działach, ze średnim poziomem europejskim. Zasadniczo jest tylko jedna metoda osiągnięcia takiego celu, ścisła współpraca międzynarodowa. Polskie środowisko jest zbyt małe aby można było oczekiwać szybkiego rozwoju indywidualnych „szkół” tematycznych, skupiających naukowców wokół kilkunastu wybitnych indywidualności, tak jak to miało w przeszłości miejsce w odizolowanym od reszty świata Związku Radzieckim. Dlatego wydaje nam się, że jedyną alternatywą pozostaje jak najściślejsza współpraca polskiego środowiska z silnymi ośrodkami zagranicznymi, a biorąc pod uwagę uwarunkowania polityczne, przede wszystkim współpraca z europejskimi ośrodkami badawczymi.

Rozpatrując zagadnienie długoplanowo, najważniejszym wydaje się obecnie stworzenie warunków dla „wyhodowania” nowej kadry, przez zwiększenie atrakcyjności tematyki wśród studiującej młodzieży i umożliwienie jej łatwego dostępu do światowych zasobów wiedzy — zarówno pośredniego, głównie poprzez Internet jak i bezpośredniego przez intensyfikację dłuższych pobytów w czołowych laboratoriach zagranicznych. Wbrew pozorom realizacja takiego celu nie jest aż tak kosztowna. Dostęp internetowy do większości bibliotek światowych, możliwość korzystania „online” z zasobów literaturowych, jest od wielu lat standardem w większości krajów. W Polsce niestety, choć notuje się pewien postęp, daleko jeszcze do upowszechnienia takiego sposobu zdobywania wiedzy. Stworzenie warunków, ale i wymuszenie takiego korzystania ze światowych zasobów, powinno być zadaniem priorytetowym ośrodków akademickich i badawczych.

Uczestniczenie młodej kadry w konferencjach międzynarodowych, kursach specjalistycznych organizowanych przez czołowe ośrodki europejskie (np. von Kármán Institut, CISM czy Chalmers) jest najprostszym i najszybszym sposobem zapoznania jej z nową tematyką i umożliwienia nawiązania osobistych kontaktów. Wykonywanie prac magisterskich czy doktorskich we współpracy z zagranicznym ośrodkiem jest najlepszą metodą „transferu wiedzy” do Polski. Sprawa wy-

jazdów, zarówno studenckich, jak i młodych pracowników nauki, zawsze budziła i budzi obawy o „drenaż mózgów”. Jest oczywiste, że zjawiska tego nie da się uniknąć, ale nie mamy innej alternatywy jeśli chcemy by młode pokolenie wniosło ożywienie do mechaniki płynów, poznało nowe tematy, problemy czy metody.

Nie czekając jednak na pojawienie się nowej kadry, co bez silnego impulsu sterującego może nie nastąpić szybko, dojrzałe środowisko naukowe ma podobne szanse wykorzystania wiedzy europejskiej przez intensyfikację kontaktów międzynarodowych. Już obecnie obserwujemy pierwsze pozytywne skutki włączenia się Polski do programów naukowych Unii Europejskiej. Mimo, że jest to udział nieproporcjonalny do potencjału naszego środowiska, udział w takich programach tematycznych jak ERCOFTAC czy QNET-CFD pozwala już w znaczący sposób korzystać z doświadczeń europejskich w dziedzinie metod numerycznych i modelowania turbulencji, czy z nowoczesnych metod eksperymentalnych weryfikacji takich obliczeń (PIVNET).

Powinniśmy również rozpocząć budowanie krajowych sieci tematycznych, stworzyć mechanizmy zmuszające do intensywnej wymiany informacji i doświadczenia poprzez inicjowanie wspólnych projektów — tak by możliwie skoncentrować rozproszoną w Polsce wiedzę. Przyspieszenie rozwoju numerycznej mechaniki płynów, wymienione jako priorytetowy cel dla naszego środowiska, może być stosunkowo łatwo realizowany takim systemem sieci tematycznej. Ułatwienie wzajemnego dostępu do komputerów i programów powinno stymulować szybką propagację informacji i idei. Znaczącą jednak indywidualistyczne cechy naszych rodaków, niezbędne obok ciepłych słów są konkretne stymulacje. Powierzenia wykonania takiego zadania specjalnie wytypowanej czy wybranej grupie badawczej, mającej stosunkowo szerokie uprawnienia i niezbędny autorytet, mogłoby stać się takim stymulatorem.

Zaangażowanie się naszych ośrodków naukowych w realizację dużych projektów europejskich powinno być traktowane nie tylko jako sposób na uzyskanie dostępu do nowych metod i idei — ale również, a może przede wszystkim, jako najprostsza metoda promowania naszego środowiska na arenie międzynarodowej. Udział naszych ośrodków naukowych w badaniach międzynarodowych uwiarygodnia ich poziom w oczach przemysłu, często jeszcze nieufnego co do naszych możliwości rozwiązywania praktycznych problemów. Powstające w trakcie realizacji projektów kontakty z przemysłem uzmysławiają jakie problemy są istotnym celem badań naukowych i będą z pewnością sprzyjały pobudzeniu takich związków również w Polsce. Dlatego jeśli uznamy, że mamy szanse przekształcić się w przyszłości z „konsumenta” wiedzy w jej „producenta”, należy poprzeć wszystkie działania zmierzające do intensyfikacji udziału polskiej grupy mechaników w projektach europejskich, nawet jeśli czasem odbywa się to kosztem budżetu krajowego.

Planowanie wymaga również stworzenia mechanizmów sterujących, które ukierunkowują rozwój i stymulują podejmowanie nowych wyzwań. Zaproponowanie takiego mechanizmu wykracza jednak poza zamiary tego eseju. Z pewnością jednym ze sposobów stymulowania byłoby stworzenie warunków międzynarodowego konkursu tematów i osób, przy tworzeniu nowych czy weryfikowaniu istniejących grup badawczych. Takie mechanizmy istnieją w wielu krajach, ale trudno powiedzieć czy zastosowanie ich już teraz w Polsce jest możliwe. Patrząc na ewolucję kryteriów przyznawania grantów badawczych KBN, nastąpił raczej regres i szybko zrezygnowano z międzynarodowej oceny poziomu badań. Miejmy nadzieję, że jest to tylko okres przejściowy i nasze „otwarcie się” na płaszczyźnie międzynarodowej, przynajmniej w takich uniwersalnych dziedzinach jak mechanika, poszerzy się wkrótce.

Bibliografia

1. Wieghardt K., *Ludwig Prandtl and his Kaiser-Wilhelm-Institut*, Annu. Rev. Fluid Mech., **19**, 1–25, 1987.
2. Moin P., Mahesh K., *Direct numerical simulation: a tool in turbulence research*, Annu. Rev. Fluid Mech., **30**, 539–578, 1998.
3. Agarwal R., *Computational fluid dynamics of whole-body aircraft*, Annu. Rev. Fluid Mech., **31**, 125–169, 1999.
4. Labrujre T.E., Slooff I.J.W., *Computational methods for aerodynamic design of aircraft components*, Annu. Rev. Fluid Mech., **25**, 183–214, 1993.
5. Hucho I.W., Sovran G., *Aerodynamics of road vehicles*, Annu. Rev. Fluid Mech., **25**, 485–537, 1993.
6. Canuto V.M., Christensen-Dalsgaard J., *Turbulence in astrophysics: stars*, Annu. Rev. Fluid Mech., **30**, 167–198, 1998.
7. Dowling T.E., *Dynamics of Jovian atmospheres*, Annu. Rev. Fluid Mech., **27**, 293–334, 1995.
8. *European Commission, European aeronautics: A vision 2020*, Report of the group of personalities, January 2001.
9. Rogers R.C., Shih A.T., Tsai C.Y., Foelsche R.O., *Scramjet tests in a shock tunnel at flight Mach 7, 10, 15 conditions*, AIAA, 3241, 2001.
10. Joslin R.D., *Aircraft laminar flow control*, Annu. Rev. Fluid Mech., **30**, 1–29, 1998.
11. Gad-el-Hak M., Pollard A., Bonnet J.-P. [eds.], *Flow Control. Fundamentals and Practice*, LNP M53, Springer 1998.
12. Gad-el-Hak M., *Modern developments in flow control*, Appl. Mech. Rev., **49**, 365–379, 1996.
13. Roy G.D., *Deflagrative and detonative combustion flows: research accomplishments and challenges in a new decade*, V ISAIIF Proc., Gdańsk, IFFM Publications, 2001.
14. Gad-el-Hak M., *Innovative control of turbulent flows*, AYAH Paper 93-3268, AYAH Shear Flow Conference, Orlando 1993.
15. Gad-el-Hak M., *The fluid mechanics of microdevices — the Freeman scholar lecture*, J. Fluids Eng., **121**, 1999.
16. Ho C.-M., Tai Y.-Ch., *Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows*, Annu. Rev. Fluid Mech., **30**, 579–612, 1998.
17. Tennekes H., Lumley J., *A First Course of Turbulence*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972.
18. Chorin A., *Vorticity and Turbulence*, Springer, New York 1995.
19. Majda A.J., *Real world turbulence and modern applied mathematics*, [in:] Mathematics: frontiers and perspectives, Arnold V. et al. [eds.], pp. 137–151, AMS 2000.
20. Rogallo R.S., Moin P., *Numerical simulation of turbulent flows*, Annu. Rev. Fluid Mech., **16**, 99–137, 1984.
21. Yaglom A.M., *A.N. Kolmogorov as a fluid mechanician and founder of a school in turbulence*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 1–22, 1994.
22. Ottino J.M., *Mixing, chaotic advection, and turbulence*, Annu. Rev. Fluid Mech., **22**, 207–253, 1990.
23. Sreenivasan K.R., *Fractals and multifractals in fluid turbulence*, Annu. Rev. Fluid Mech., **23**, 539–600, 1991.
24. Warnatz J., Mass U., Dibble R.W., *Combustion-Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, Springer, 2001.
25. N. Peters, *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000.
26. Ferziger J.H., Peric M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
27. Chung T.J., *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge CUP 2002.
28. Lesieur M., Metais O., *New trends in large-Eddy simulations of turbulence*, Annu. Rev. Fluid Mech., **28**, 45–82, 1996.

29. Rodi W., Ferziger J.H., Breuer M., Pourquie M., *Status of large Eddy simulation: results of a workshop*, Transactions ASME, **119**, 248–262, 1997.
30. Knight D., Zhou G., Okongo N., Shukla V., *Compressible large eddy simulation using unstructured grids*, AIAA paper, 98-0535, 1998.
31. Adrian R.J., *Particle-imaging techniques for experimental fluid-mechanics*, Annu. Rev. Fluid Mech., **23**, 261–304, 1991.
32. Roache P.J., *Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics*, Annu. Rev. Fluid Mech., **29**, 123–160, 1997.
33. Wyngaard J.C., *Atmospheric turbulence*, Annu. Rev. Fluid Mech., **24**, 205–233, 1992.
34. Emanuel K.A., *The theory of hurricanes*, Annu. Rev. Fluid Mech., **23**, 179–196, 1991.
35. Neelin J.D., Latif M., Jin F.-F., *Dynamics of coupled ocean–atmosphere models: The tropical problem*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 617–659, 1994.
36. Griffiths R.W., *The dynamics of lava flows*, Annu. Rev. Fluid Mech., **32**, 477–518, 2000.
37. Lindzen R.S., *Climate dynamics and global change*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 353–378, 1994.
38. Dijkstra H.A., Burgers G., *Fluid dynamics of El Niño variability*, Annu. Rev. Fluid Mech., **34**, 531–558, 2002.
39. Krishnamurti T.N., *Numerical weather prediction*, Annu. Rev. Fluid Mech., **27**, 195–224, 1995.
40. Rhines P.B., *Vorticity dynamics of the oceanic general circulation*, Annu. Rev. Fluid Mech., **18**, 433–497, 1986.
41. Gargett A.E., *Ocean turbulence*, Annu. Rev. Fluid Mech., **21**, 419–451, 1989.
42. Squire V.A., Dugan J.P., Wadhams P., Rottier P.J., Liu A.K., *On ocean waves and sea ice*, Annu. Rev. Fluid Mech., **27**, 115–168, 1995.
43. Stone H.A., *Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 65–102, 1994.
44. Chang H.-C., *Wave evolution on a falling film*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 103–136, 1994.
45. Sarpkaya T., *Vorticity, free surface, and surfactants*, Annu. Rev. Fluid Mech., **28**, 83–128, 1996.
46. Koch D.L., Hill R.J., *Inertial effects in suspension and porous-media flows*, Annu. Rev. Fluid Mech., **33**, 619–647, 2001.
47. Blake J.R., Gibson D.C., *Cavitation bubbles near boundaries*, Annu. Rev. Fluid Mech., **19**, 99–123, 1987.
48. Crowe C.T., Troutt T.R., Chung J.N., *Numerical models for two-phase turbulent flows*, Annu. Rev. Fluid Mech., **28**, 11–43, 1996.
49. Scardovelli R., Zaleski S., *Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow*, Annu. Rev. Fluid Mech., **31**, 567–603, 1999.
50. Koplik J., Banavar J.R., *Continuum deductions from molecular hydrodynamics*, Annu. Rev. Fluid Mech., **27**, 257–292, 1995.
51. Gad-el-Hak M., *The MEMS Handbook*, CRC Press, 2000.
52. Fang Y., Liou W.W., *Computations of flow and heat transfer in microdevices using DSMC with implicit boundary conditions*, J. Heat Transfer, **124**, 338–345, 2002.
53. Glicksman M.E., Coriell S.R., McFadden G.B., *Interaction of flows with the crystal–melt interface*, Annu. Rev. Fluid Mech., **18**, 307–335, 1986.
54. Steen P.H., Karcher Ch., *Fluid mechanics of spin casting of metals*, Annu. Rev. Fluid Mech., **29**, 373–397, 1997.
55. Jensen K.F., Einset E.O., Fotiadis D.I., *Flow phenomena in chemical vapor deposition of thin films*, Annu. Rev. Fluid Mech., **23**, 197–232, 1991.
56. Siggia E.D., *High Rayleigh number convection*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 137–168, 1994.
57. Tieszen S.R., *On the fluid mechanics of fires*, Annu. Rev. Fluid Mech., **33**, 67–92, 2001.

58. Dhir V.K., *Boiling heat transfer*, Annu. Rev. Fluid Mech., **30**, 365–401, 1998.
59. Skalak R., Ozkaya N., Skalak T.C., *Biofluid mechanics*, Annu. Rev. Fluid Mech., **21**, 167–204, 1989.
60. Ku D.N., *Blood flow in arteries*, Annu. Rev. Fluid Mech., **29**, 399–434, 1997.
61. Berger S.A., Jou L-D., *Flows in stenotic vessels*, Annu. Rev. Fluid Mech., **32**, 347–382, 2000.
62. Grotberg J.B., *Pulmonary flow and transport phenomena*, Annu. Rev. Fluid Mech., **26**, 529–571, 1994.
63. Ramuzat A., Riethmuller M.L., *Steady and unsteady PIV investigation of flows within a 3D lung bifurcation model*, PIV'01 CD ROM Proceedings, pp. 1137.1–11, Goettingen DLR, 2001.
64. Bushnell D.M., Moore K.J., *Drag reduction in nature*, Annu. Rev. Fluid Mech., **23**, 65–79, 1991.
65. Pedley T.J., Kessler J.O., *Hydrodynamic phenomena in suspensions of swimming microorganisms*, Annu. Rev. Fluid Mech., **24**, 313–358, 1992.
66. Denman K.L., Gargett A.E., *Biological–physical interactions in the upper ocean: The role of vertical and small-scale transport processes*, Annu. Rev. Fluid Mech., **27**, 225–255, 1995.
67. Triantafyllou M.S., Triantafyllou G.S., Yue D.K.P., *Hydrodynamics of fishlike swimming*, Annu. Rev. Fluid Mech., **32**, 33–53, 2000.
68. Nadolink R.H., Haigh W.W., *Bibliography on skin friction reduction with polymers and other boundary-layer additives*, Applied Mech. Rev., **48**, 351–459, 1995.
69. Bird R.B., Wiest J.M., *Constitutive equations for polymeric liquids*, Annu. Rev. Fluid Mech., **27**, 169–193, 1995.
70. Suen J., Joo Y.L., Armstrong R.C., *Molecular orientation effects in viscoelasticity*, Annu. Rev. Fluid Mech., **34**, 417–444, 2002.
71. Ottinger H.-C., *Stochastic Processes in Polymeric Fluids: Tools and Examples for Developing Simulation Algorithms*, Springer-Verlag, Berlin 1996.
72. Muntz E.P., *Rarefied gas dynamics*, Annu. Rev. Fluid Mech., **21**, 387–417, 1989.
73. Oran E.S., Oh C.K., Cybyk B.Z., *Direct simulation Monte Carlo: Recent advances and applications*, Annu. Rev. Fluid Mech., **30**, 403–441, 1998.
74. Wang X., Xu X., *Molecular dynamics simulation of heat transfer and phase change during laser material interaction*, J. Heat Transfer, **124**, 265–274, 2002.
75. Cahill D.G., Goodson K., Majmdar A., *Thermometry and thermal transport in micro/nanoscale solid-state devices and structures*, J. Heat Transfer, **124**, 223–241, 2002.
76. Hughes D.W., Proctor M.R.E., *Magnetic fields in the Solar convection zone: Magnetoconvection and magnetic buoyancy*, Annu. Rev. Fluid Mech., **20**, 187–223, 1988.
77. Davidson P.A., *Magneto-hydrodynamics in materials processing*, Annu. Rev. Fluid Mech., **31**, 273–300, 1999.
78. Faltinsen O.M., *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, CUP, Cambridge 1990.
79. Lumley J.L., Acrivos A., Leal L.G., Leibovich S. [eds.], *Research trends in fluid dynamics*, AIP Press, New York, 1996.
80. Gad-el-Hak M., *Fluid mechanics from the beginning to the third millenium*, Proc. of Forum on Advances in Fluid Eng. Education, ASME 1998.
81. Turkel E., *Preconditioning techniques in computational fluid dynamics*, Ann. Rev. Fluid Mech., **3**, 385–416, 1999.
82. Poinot T.J., Lele S.K., *Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows*, Journal of Computational Physics, **101**, 104–129, 1992.
83. Gono P., Foule J.N., Boissy P., Atten C., *Particle–particle interactions in electrorheological fluids based on surface conducting particles*, J. Applied Physics, **86**, 7160, 1999.

STRUKTURA POLIMERÓW I MODELOWANIE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH

Andrzej Ziabicki

1 Polimery jako materiały

Zasadniczą cechą polimerów organicznych jest różnorodność własności fizycznych przy jednokowym (lub zbliżonym) składzie chemicznym. Własności tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych — metali, stopów, materiałów ceramicznych — uwarunkowane są ich składem. Znając skład chemiczny stopu, z dobrym przybliżeniem można ocenić jego własności. Jeżeli w stopie żelaza znajdziemy 3% węgla, 2% krzemu i niewielkie domieszki manganu i fosforu to z pewnością mamy do czynienia z *żeliwem* — materiałem przeznaczonym na odlewy. Stop żelaza zawierający 1% węgla i 12% wolframu (z dodatkiem chromu, manganu i wanadu), tworzy *stal narzędziową*.

Polimery organiczne odróżnia od metali i ich stopów oraz materiałów ceramicznych znacznie mniejszy ciężar właściwy i mniejsza sztywność. Własności mechaniczne polimerów są silnie *nie liniowe* i zależą nie tylko od składu lecz również od wielu cech strukturalnych, takich jak *masa cząsteczkowa* i *uporządkowanie nadmolekularne*. *Polietylen* — polimer zbudowany z łańcuchów grup etylenowych o budowie chemicznej $[-CH_2-CH_2-]_N$ może przybierać różne własności w zależności od długości łańcucha. Miarą długości łańcucha jest *stopień polimeryzacji* N , czyli liczba jednostek chemicznych (merów) w łańcuchu, lub proporcjonalna do N *masa cząsteczkowa* M . Polietylen o masie cząsteczkowej $M = 980$ ($N = 35$) ma własności *wosku*. Z polietylenu o stopniu polimeryzacji $N = 35000$ i masie cząsteczkowej bliskiej miliona ($M = 9,8 \cdot 10^5$), można otrzymać *włókna o wytrzymałości stali*. Materiały polimerowe oferują szerokie widmo własności fizycznych, które można modyfikować poprzez zmiany stuktury nadmolekularnej.

2 Współczesne tendencje rozwojowe w przemyśle polimerów

Na początku swojej historii przemysł polimerów rozwijał się w sposób ekstensywny. Jeszcze w latach 50.–70. XX wieku co roku syntetyzowano wiele nowych polimerów o podobnych własnościach i zastosowaniach. Obecne tendencje innowacyjne koncentrują się na materiałach o *specjalnych* (z góry zaplanowanych) *własnościach*. Dotyczy to polimerów przewodzących, fotoczułych, piezoelektrycznych, polimerów odpornych na wysokie temperatury i włókien o wysokim module i wytrzymałości przeznaczonych do zbrojenia kompozytów. Polimery specjalne produkowane są w stosunkowo niewielkich ilościach. Wielkotonażowa produkcja materiałów konstrukcyjnych i włókien o masowym zastosowaniu ogranicza się do kilku podstawowych typów: poliolefiny (polietylen i polipropylen), poliamidy (Nylon 6, Nylon 66), poliestry (głównie politereftalan etylenowy, PET), polistyren, pochodne kwasu poliakrylowego i kauczuki syntetyczne na bazie polienów (polibutadien).

Postęp w przemyśle polimerów wielkotonażowych dotyczy *metod wytwarzania* (nowe metody polimeryzacji, nowe katalizatory, nowe surowce), subtelnej *modyfikacji chemicznej* (rozga-

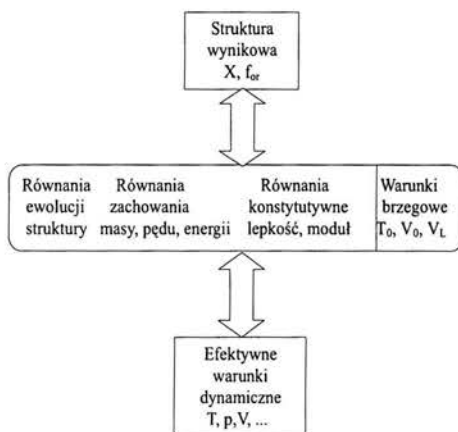
łączenia łańcucha, stereoregularność, kopolimeryzacja), a także *modyfikacji własności fizycznych* przez stosowanie mieszanek i kształtowanie struktury nadmolekularnej. Mieszanie składników i obróbka termomechaniczna pozwalają otrzymać materiały o szerokim widmie własności i zastosowań z ominięciem nowych syntez.

3 Modelowanie procesów formowania polimerów

W przemyśle polimerów dużą wagę przywiązuje się do *modelowania procesów*. Eksperymenty przemysłowe są czasochłonne i kosztowne już w skali laboratoryjnej, a tym bardziej w skali półtechnicznej i produkcyjnej. Zastąpienie badań doświadczalnych symulacją komputerową ma olbrzymie znaczenie technologiczne i ekonomiczne. Wnioski z obliczeń modelowych wykorzystać można do optymalizacji procesów, sprawdzania hipotez roboczych i rozwoju nowych technologii.

Model matematyczny procesu technologicznego obejmuje układ równań różniczkowych lub różniczkowo-całkowych. Standardowy układ takich równań zawiera *równania zachowania* (masy, pędu i energii), *równania konstytutywne* wiążące własności materiału z dynamiką procesu i *warunki brzegowe* określone przez geometryczne i kinematyczne warunki procesu. W przypadku polimerów własności fizyczne są bardzo czułe na zmieniającą się w procesie formowania *strukturę materiału*. Z tego względu, układ równań dynamicznych uzupełniają *równania ewolucji struktury*. Na Rys. 1. pokazano wzajemne powiązania poszczególnych grup równań ze strukturą materiału i efektywnymi warunkami dynamicznymi (pola temperatur, naprężeń, prędkości). Wiarygodność przewidywań opartych na modelowaniu zależy jednak w dużym stopniu od stanu wiedzy o własnościach i strukturze polimeru.

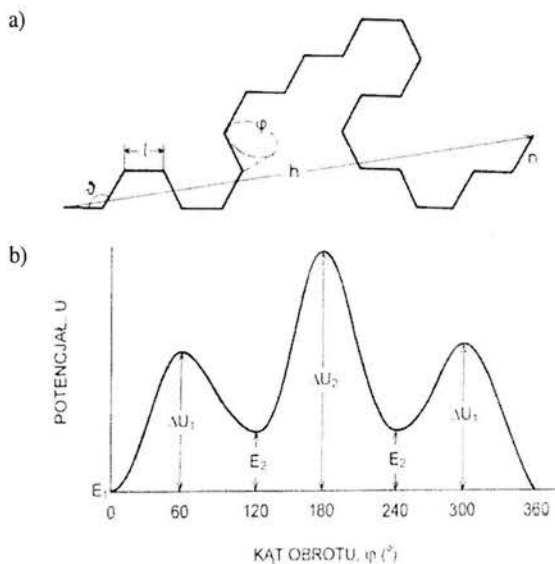
Obecna wiedza o kształtowaniu się struktury polimerów nie pozwala jeszcze na *ilościowe przewidywanie* dynamiki procesów. To, co możemy osiągnąć, to *zrozumienie* ważniejszych *mechanizmów* rządzących procesem, *półilościowe oszacowanie* niektórych efektów, uszeregowanie ich znaczenia i *określenie* dopuszczalnych *granicy* procesu.



Rys. 1. Schemat równań dynamicznych opisujących model procesu

4 Struktura i własności polimerów

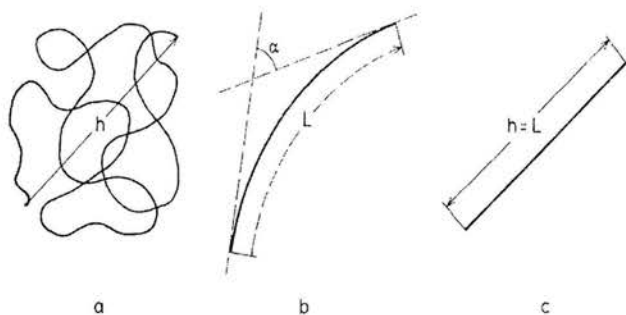
Cząsteczki polimeru (*makrocząsteczki*) zbudowane są z wielkiej liczby (10^2 – 10^5) jednakowych elementów (*merów*). Fakt ten ma istotne konsekwencje fizyczne. Po pierwsze — pojedyncza makrocząsteczka posiada znaczną liczbę wewnętrznych stopni swobody i tworzy *układ statystyczny*. W typowym łańcuchu polimeru (Rys. 2) kąt ϑ pomiędzy wiązaniami („kąt wartościowości”) jest praktycznie stały, natomiast sąsiednie wiązania mogą obracać się względem siebie po powierzchni stożka o kącie wierzchołkowym $2(\pi - \vartheta)$.



Rys. 2. Schemat łańcucha polimerowego; a) łańcuch wiązań o stałym kącie wartościowości ϑ i obrotach dokoła kąta φ , b) potencjał obrotu wiązań $U(\varphi)$

Obrót dokoła kąta φ związany jest ze zmianą potencjału U . Najbardziej trwale są konfiguracje odpowiadające minimum potencjału („izomery rotacyjne”). Obrót wiązania i przejście z jednej konfiguracji w drugą wymaga pokonania bariery potencjalnej ΔU . Jeżeli bariera jest mała w porównaniu z energią ruchów termicznych, $\Delta U/kT \ll 1$, to makrocząsteczka oscyluje dokoła najbardziej prawdopodobnego (odpowiadającego maksimum entropii) kształtu *kłębka*. (Rys. 3a). Pośrednie wartości stosunku $\Delta U/kT$ charakteryzują makrocząsteczki *półsztywne* (Rys. 3b). W skrajnym wypadku ($\Delta U/kT \rightarrow \infty$) mamy do czynienia z *idealnie sztywną pałeczką* (Rys. 3c). Giętkość łańcucha charakteryzuje też stosunek średniego kwadratu odległości końców, $\langle h^2 \rangle$, do kwadratu *długości konturowej* L , czyli długości całkowicie wyprostowanego łańcucha. W całym zakresie sztywności obowiązuje zależność wyprowadzona przez Breslera–Frenkla [1] i Kratky’ego–Poroda [2],

$$\frac{\langle h^2 \rangle}{L^2} = x \left[1 - \frac{x}{2} \left(1 - \exp\left(\frac{-2}{x}\right) \right) \right]; \quad x \in (0, \infty). \quad (1)$$



Rys. 3. Kształty makrocząstek o różnej sztywności; a) giętki kłębek, b), cząsteczka półsztywna, c) idealnie sztywna pałeczka

Parametr sztywności, $x = a/L$, jest stosunkiem stałej molekularnej, a , zwanej *długością persystentną* do długości konturowej L . Przy małych wartościach x (giętki kłębek), wzór (1) redukuje się do zależności, jaka wynika z teorii przypadkowego błędzenia,

$$\left(\frac{\langle h^2 \rangle}{L^2}\right)_{\text{kłębek}} = x = \frac{a}{L} \propto \frac{1}{N}. \quad (2)$$

Dla giętkiego kłębka średni kwadrat odległości końców $\langle h^2 \rangle$ jest proporcjonalny do liczby merów w łańcuchu (liczby kroków) N , a kwadrat długości konturowej, niezależnie od sztywności, jest proporcjonalny do N^2 . Przy nieskończenie dużej wartości x otrzymujemy wynik charakteryzujący idealnie sztywną pałeczkę

$$\left(\frac{\langle h^2 \rangle}{L^2}\right)_{\text{pałeczka}} = 1, \quad (3)$$

dla której odległość końców jest równa długości konturowej.

Bezpośrednią konsekwencją giętkości makrocząstek jest *entropia konfiguracyjna* i typowe dla polimerów *własności elastyczne*. Sztywne makrocząsteczki wykazują natomiast zdolności do *orientacji* i *samouporządkowania* (ciekłe kryształy, biopolimery).

Drugą cechą charakterystyczną polimerów jest *wysoka energia kohezji*. Jakkolwiek *gęstość oddziaływań* międzycząsteczkowych w polimerach jest niewielka, to *sumaryczna energia oddziaływań* przypadająca na makrocząsteczkę jest bardzo duża. Dlatego też, polimerów nie można przeprowadzić w stan gazowy. Już dla łańcucha polietylenu o małej masie cząsteczkowej ($M = 2520$) i stopniu polimeryzacji $N = 90$ sumaryczna energia kohezji wynosi ok. 1900 kJ/mol, podczas gdy do zerwania jednego wiązania C–C w łańcuchu głównym wystarcza 335 kJ/mol. Dla dłuższych łańcuchów rozbieżność ta jest znacznie większa.

Trzecią cechą charakterystyczną dla substancji o dużych cząsteczkach są *ograniczenia swobody ruchów molekularnych*. Procesy kinetyczne angażujące duże jednostki strukturalne są powolne, gdyż wymagają pokonania dużych barier potencjalnych. Lepkość stopionych polimerów i stężonych roztworów jest więc wysoka, a czasy relaksacji bardzo długie. Długie czasy relaksacji, a także więzy przestrzenne wykluczające wiele konfiguracji powodują, że polimery na ogół znajdują się w stanie dalekim od *równowagi termodynamicznej*. Procesy ewolucji struktury nabierają

szczególnego znaczenia, gdyż aktualna struktura nie wynika jednoznacznie ze stanu końcowego, lecz jest określona przez całą historię procesu. Znajomość związków pomiędzy strukturą i własnościami polimeru jest niezbędna dla optymalizacji procesów wytwarzania i stosowania materiałów polimerowych.

Struktura atomowa i molekularna

Jednostkami strukturalnymi makrocząsteczki są atomy i grupy atomów powiązane wiązaniami walencyjnymi C–C, C–H, C–O itp. Promienie atomowe i odległości wiązań, podobnie jak w innych cząsteczkach organicznych, są rzędu 0,1 nm. Budowa chemiczna pojedynczego ogniwa łańcucha polimeru decyduje o reaktywności chemicznej, rozpuszczalności, własnościach elektrycznych, sorpcyjnych, a także zdolności do krystalizacji i orientacji molekularnej.

Rysunek 4 przedstawia model molekularny polietylenu. Wiązania C–C w łańcuchu mają stałą odległość 0,154 nm i stały kąt walencyjny $\vartheta = 109^\circ$. Obrót dokoła wiązania C–C charakteryzuje się stosunkowo niewielką barierą potencjalną $\Delta U = 11.5$ kJ/mol, co definiuje polietylen jako polimer zdecydowanie *giętki*. Dla porównania, obrót dokoła sztywnego wiązania C=C w *poliacetylenie* wymaga pokonania bariery $\Delta U = 164$ kJ/mol.

Metody chemiczne, spektrofotometria w podczerwieni i widma Ramana pozwalają zidentyfikować wiązania i grupy chemiczne, a także określić potencjały rotacji i sztywność łańcucha.



Rys. 4. Model molekularny polietylenu. Kule oznaczają atomy (węgla i wodoru)

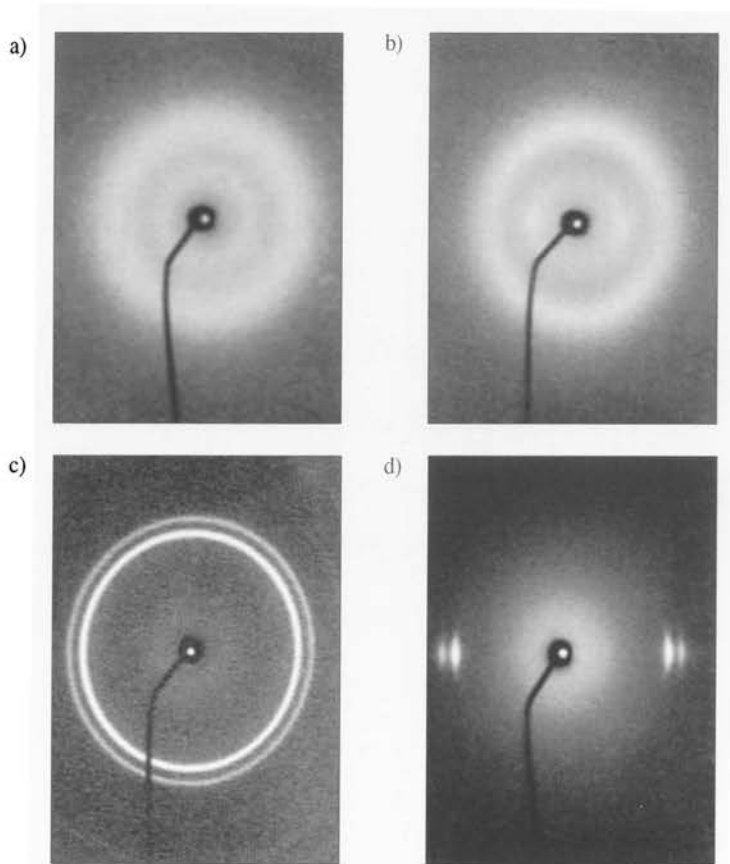
Struktura makromolekularna

Ze względu na znaczną liczbę jednostek strukturalnych ($N = 100\text{--}100\,000$) zawartych w jednej makrocząsteczce, jej wymiary daleko wykraczają poza zakres wymiarów atomowych. Średnia długość konturowa makrocząsteczki L wynosi $10\text{--}10^4$ nm. Wymiary takie przybiera idealnie sztywny łańcuch. Łańcuch giętki w równowadze przybiera kształt kłęбка o średnicy rzędu 3–100 nm. Średnie wymiary makrocząsteczek i ich rozkłady odgrywają zasadniczą rolę w kształtowaniu się dynamicznych i reologicznych własności polimerów. Badania roztworów polimerów dostarczają informacji o średniej masie cząsteczkowej i jej rozkładzie.

Analiza rozproszenia światła, neutronów i promieni rentgenowskich w rozcieńczonych roztworach pozwala określić kształt, wymiary izolowanych makrocząsteczek i dynamikę ruchów molekularnych. Metody optyczne, densytometryczne i kalorymetryczne umożliwiają mierzenie *średnich charakterystyk strukturalnych*, takich jak stopień krystaliczności, czy stopień orientacji molekularnej.

Struktura krystaliczna

Większość polimerów łańcuchowych wykazuje zdolność do krystalizacji. Obszary krystaliczne mają wymiary rzędu 1–10 nm. Kształt, wymiary i rozkład orientacji takich kryształów wpływa na własności mechaniczne, cieplne i optyczne. W odróżnieniu od metali i substancji nieorganicznych, krystalizacja polimerów nigdy nie przebiega do końca. Własności polimerów zależą



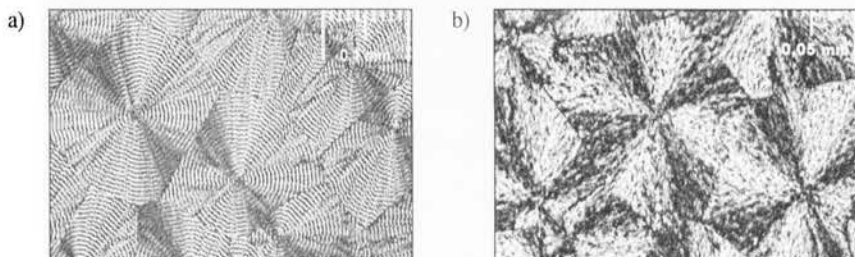
Rys. 5. Szerokokątowe rentgenowskie obrazy dyfrakcyjne polietylenu, $M = 3 \cdot 10^6$; a) niezorientowany stop, b) stop pod naprężeniem, c) niezorientowany polimer krystaliczny, d) zorientowane włókno krystaliczne

więc również od *stopnia krystaliczności*, czyli ułamka materiału przekształconego w stan krystaliczny i współistniejącego z fazą niezakryształowaną (amorficzną). Bezpośrednich informacji o budowie sieci przestrzennej, wymiarach i orientacji kryształów dostarczają badania rozproszenia i dyfrakcji promieni rentgenowskich, a także badania rozproszenia neutronów i elektronów. Na Rys. 5 pokazano rentgenowskie obrazy dyfrakcyjne polietylenu o różnym uporządkowaniu krystalicznym. Położenie refleksów i rozkład ich intensywności pozwalają na określenie struktury sieci przestrzennej, orientacji kryształów, stopnia krystaliczności i wymiarów kryształów.

Struktura nadmolekularna

Kryształy polimerowe nie stanowią największych jednostek uporządkowanych w polimerach krystalicznych. W mikroskopie optycznym, obserwuje się anizotropowe struktury o uporządkowaniu radialnym lub pierścieniowym zwane *sferolitami* (Rys. 6). Sferolity nie są kryształami: w ich skład wchodzi zarówno obszary krystaliczne, jak i amorficzne. Obecność sferolitów, których wymiary wahają się od 10^3 nm do 10^6 nm, wpływa na własności optyczne i termiczne polimeru, odporność na ścieranie i własności udarowe. Obok sferolitów, w zakresie mikroskopowym ($1\mu\text{m}$ – 1mm) obserwuje się wiele innych struktur, takich jak *hedryty*, *aksjality*, *struktury rzędowe* („row structures”) i in.

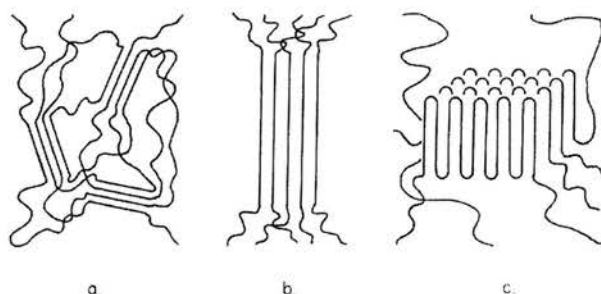
Mikroskopia elektronowa stosująca promieniowanie o znacznie krótszych falach, a także analiza rozproszenia światła pod małymi kątami pozwalają na charakteryzowanie drobniejszych elementów uporządkowania w zakresie 0,1–10 nm. Do takich elementów należą m.in. twory włókniste zwane *fibrylami*.



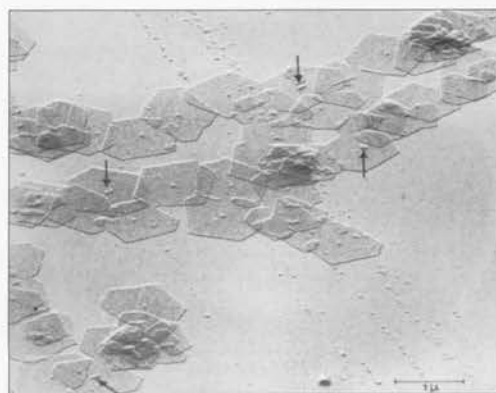
Rys. 6. Obrazy mikroskopowe krystalicznego poliadypinianu etylenowego; a) sferolity pierścieniowe, b) sferolity radialne

Morfologia krystalizacji

Podstawowe poglądy na strukturę polimerów krystalicznych kształtowały się w początku XX wieku, kiedy to Staudinger sformułował koncepcję makrocząsteczki jako łańcucha powtarzających się elementów (merów), a Meyer i Mark [3] zaobserwowali w polimerach obrazy dyfrakcji rentgenowskiej typowe dla kryształów. Zagadkę stanowiła budowa wewnętrzna — wymiary kryształów były o kilka rzędów wielkości mniejsze od długości wyprostowanej makrocząsteczki. Hermann, Gerngross i Abitz [4] założyli, że w skład kryształu polimerowego wchodzi fragmenty



Rys. 7. Budowa kryształów zbudowanych z długich łańcuchów polimerowych; a) model wielołańcuchowy („micela frędzlowa”), b) model wielołańcuchowy, z wyprostowanymi łańcuchami, c) model wewnątrzłańcuchowy — łańcuch regularnie sfaldowany



Rys. 8. Monokryształ polietylenu wykryształizowany z roztworu w ksylenie. Obraz w mikroskopie elektronowym

wielu łańcuchów, a jeden łańcuch przechodzi przez różne kryształy i obszary amorficzne (Rys. 7a). Model takiej *miceli frędzlowej* („fringed micelle”) przyjmowany był powszechnie do końca lat pięćdziesiątych XX wieku, kiedy to Keller [5] oraz Peterlin i Fischer [6] wystąpili z oryginalną koncepcją *kryształów o sfaldowanych łańcuchach* („folded-chain crystals”) (Rys. 7c). Koncepcję tę uzasadniało odkrycie *monokryształów polimerowych*. Powstające w rozcieńczonych roztworach i obserwowane w mikroskopie elektronowym izolowane monokryształy miały wymiary rzędu 100–500 nm, a więc znacznie mniejsze niż długość wyprostowanego łańcucha polimeru (Rys. 8). Model micelarny nie mógł wyjaśnić takiej struktury. Przyjęto więc, że w skład monokryształu wchodzi całe łańcuchy polimeru w postaci *regularnie sfaldowanej*. W polimerach o krótkich makrocząsteczkach zaobserwowano również powstawanie kryształów z *wyprostowanymi łańcuchami* (Rys. 7b), a w literaturze opisano wiele innych struktur o uporządkowaniu niepełnym lub pośrednim.

5 Teoria kształtowania się struktury polimerów

O ile metodyka obserwacji i modelowy opis różnych form strukturalnych doczekały się obszernej literatury, to teoria kształtowania się struktury jest znacznie bardziej ograniczona. Brak ilościowego opisu rozmaitych struktur morfologicznych, nie mówiąc już o termodynamice i kinetyce ich powstawania. Modele morfologiczne nie wyjaśniają związku pomiędzy budową i warunkami powstawania struktury. O ile powstawanie kryształów o sfalowanych łańcuchach w rozcieńczonych roztworach wydaje się oczywiste, to znacznie trudniej zrozumieć przyczyny samorzutnego faldowania się łańcuchów w polimerach stopionych, zwłaszcza w przepływie lub pod naprężeniem.

Jeżeli chodzi o kinetykę tworzenia struktur, to dostępne są obecnie podstawy *krystalizacji i orientacji molekularnej*. Dlatego, w modelowaniu procesów technologicznych uwzględnia się przede wszystkim dwie dobrze określone cechy strukturalne: *stopień krystaliczności i średni stopień orientacji*.

W odróżnieniu od prostych substancji chemicznych, krystalizacja polimerów jest powolna, rzadko prowadzi do stanu równowagi, jest czuła na temperaturę i naprężenia. Kinetyczna teoria krystalizacji opiera się na ogólnej termodynamice przemian fazowych i statystyczno-geometrycznym modelu Kołmogorowa–Avramiego–Evansa [7–9] opartym na procesach zarodkowania i wzrostu kryształów. W ciągu ostatnich 50 lat dokonano znacznego postępu w teorii zarodkowania kryształów [10–13], kinetyki krystalizacji w warunkach nieizotermicznych [14–16] i teorii kształtowania się orientacji molekularnej [17–19]. Słabą stroną jest brak danych doświadczalnych dotyczących krystalizacji w przepływie i pod naprężeniem. Trudności doświadczalne związane są z dużą szybkością krystalizacji pod naprężeniem. Sprzężenie krystalizacji z własnościami reologicznymi ma zasadnicze znaczenie dla dynamiki procesów technologicznych [20–22]. Niezbędne wydaje się rozwinięcie kinetycznej teorii krystalizacji tak, aby mogła ona objąć zmienne w czasie pola temperatur, przepływu, naprężeń, itp., a także uwzględnić możliwość powstawania różnych struktur morfologicznych. Konieczne jest też opracowanie nowych metod pomiarowych i nagromadzenie wiarygodnych danych doświadczalnych.

6 Perspektywy rozwoju badań w IPPT PAN

Rozwijane w IPPT badania nad polimerami dotyczą kształtowania się struktury w złożonych warunkach zewnętrznych i zastosowania uzyskanych wyników do modelowania procesów technologicznych. Główny nacisk kładziono na poznanie mechanizmów rządzących badanymi zjawiskami i uzupełnienie empirycznej wiedzy typu *know-how*, elementami poznawczymi (*know-why*). Przewiduje się rozwijanie następujących kierunków badań:

1. termodynamiczno-kinetyczna teoria kształtowania się nadmolekularnej (morfologicznej) struktury polimerów dopuszczająca superpozycję struktur i struktury o uporządkowaniu pośrednim,
2. statystyczna teoria zarodkowania kryształów polimerów w polach potencjalnych (pole przepływu, pole grawitacyjne i in.),
3. kinetyczna teoria powstawania struktur w złożonych warunkach zewnętrznych,

4. nowe metody doświadczalne badania krystalizacji i równoczesnych zmian własności reologicznych w przepływie, pod naprężeniem itp.,
5. proste równania konstytutywne i równania ewolucji struktury jako elementy dynamicznego modelowania procesów technologicznych,
6. modelowanie procesów technologicznych z uwzględnieniem ewolucji struktury polimeru.

6.1 Termodynamiczno-kinetyczna teoria kształtowania się nadmolekularnej struktury polimerów

Badania zmierzające do opracowania teorii morfologicznej budowy polimerów muszą opierać się na ogólnych podstawach termodynamiki i kinetyki makromolekularnej. Powstawanie określonej struktury jest wynikiem czynników *energetycznych* (zależnych od konformacji łańcucha), czynników *probabilistycznych* (prawdopodobieństwo znalezienia właściwych dla danego procesu jednostek), oraz czynników *kinetycznych* związanych z ruchliwością molekularną i jej ograniczeniem przez bariery potencjalne. Nieodzwonne wydaje się rozważanie wielu możliwych struktur i ich superpozycji. W układach o wielu strukturach istotną rolę może odgrywać *entropia mieszania*. Należy przeanalizować struktury najbardziej prawdopodobne termodynamicznie (o minimum energii swobodnej) a także struktury dla których istotnym ograniczeniem są również (lub głównie) czynniki kinetyczne. Prosty model termodynamicznie optymalnej struktury złożonej dyskutowano w pracach [10, 12].

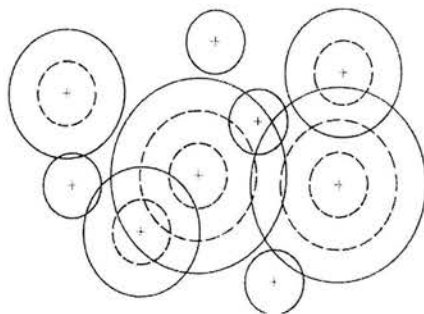
6.2 Statystyczna teoria zarodkowania kryształów polimerowych w polach potencjalnych

Opracowaną w latach osiemdziesiątych wielowymiarową teorię zarodkowania przemian fazowych [11] będziemy wykorzystywać do rozwiązywania różnych zagadnień szczegółowych. Jednym z takich zagadnień jest *zarodkowanie* (i krystalizacja) polimerów w *potencjalnych polach hydrodynamicznych* (polach przepływu). W latach ubiegłych skonstruowaliśmy prosty model takiego procesu oparty na orientacji i agregacji *szttywnych* asymetrycznych cząsteczek [10, 12]. Model ten należy rozwinąć uwzględniając elastyczną energię deformacji makrocząsteczki i czynniki kinetyczne związane z ruchami łańcuchów w ośrodku o dużej lepkości. Trzeba będzie przy tym uwzględnić topologiczne oddziaływania łańcuchów w stopionym polimerze (*splątania*). Z zagadnieniem tym wiąże się też problem *relaksacji orientacji* i *deformacji molekularnej* [23].

Uogólniona teoria zarodkowania [10, 11] przewiduje występowanie nowych, dotychczas nie obserwowanych zjawisk. Jednym z nich jest *wpływ pola grawitacyjnego* na zarodkowanie (np. w ultrawirówce), innym — zarodkowanie w wyniku usuwania defektów i *doskonalenia struktury wewnętrznej* („*healing*”) [13]. Pożądane jest rozwinięcie teorii takich procesów i próby weryfikacji doświadczalnej. Wprowadzenie do teorii zarodkowania pojęcia *uogólnionego przekroju czynnego* [24] można będzie zapewne wykorzystać do opisu *reakcji stereochemicznych*, odgrywających dużą rolę w biochemii i biofizyce (np. reakcje enzymatyczne).

6.3 Kinetyczna teoria powstawania struktur w złożonych warunkach zewnętrznych

Praktyczne zastosowanie wiedzy o strukturze polimerów wymaga znajomości procesów kształtowania się struktury w zmiennych polach temperatur, ciśnień, naprężeń i przepływów. Jakkolwiek istnieją już pewne rozwiązania [14–20], dalszy rozwój teorii powinien doprowadzić do bardziej adekwatnych i dokładnych modeli kinetycznych.



Rys. 9. Statystyczny model krystalizacji obejmujący zarodkowanie i wzrost przenikających się ziaren nowej fazy (wg. Evansa [9])

W przypadku kinetyki krystalizacji, model geometryczny Kołmogorowa, Avramiego i Evansa [7–9] opisuje przemianę fazową jako wynik zarodkowania i wzrostu nowej fazy (Rys. 9). Powstawanie i wzrost ziaren nowej fazy opisywane są jako niezależne procesy statystyczne, w związku z czym „ziarna” (koła na Rys. 9) mogą się wzajemnie przenikać. Nie powoduje to rozbieżności wyników probabilistycznych, gdyż stopień przemiany, $X(t)$, określa wzór

$$X(t) = 1 - \exp[-E(t)]; \quad X \in (0, 1); \quad E \in (0, \infty); \quad (4)$$

e^{-E} oznacza prawdopodobieństwo, że dowolnie wybrany punkt materiału w chwili t pozostaje poza zasięgiem wszystkich ziaren nowej fazy.

Gdy zarodki nowej fazy powstają sporadycznie z szybkością $\dot{N}(t)$, a ich objętość rośnie z szybkością dv/dt , funkcję $E(t)$ definiuje całka

$$E(t) = \int_0^t \dot{N}(s) ds \int_s^t \frac{dv}{dz}(z) dz. \quad (5)$$

Druga całka oznacza objętość ziarna, którego zarodek powstał w chwili s i rósł do chwili bieżącej t . Często zakłada się, że wzrost następuje w n wzajemnie prostopadłych kierunkach z szybkościami liniowymi $G_i(t)$. Wówczas równanie (5) przybiera postać

$$E(t) \cong \text{const} \cdot \int_0^t \dot{N}(s) ds \prod_1^n \left[\int_{z=s}^{z=t} G_i(z) dz \right]. \quad (6)$$

Gdy proces przemiany polega na wzroście stałej liczby N_0 uprzednio utworzonych zarodków, otrzymuje się

$$E(t) = N_0 \cdot \int_0^t \frac{dv}{ds}(s) ds \quad (7)$$

W warunkach stałych w czasie szybkości zarodkowania i wzrostu, równania (4)–(7) redukują się do prostej postaci zwanej *równaniem Avramiego*,

$$E(t) = K_m t^m. \quad (8)$$

Wykładnik m zależy od liczby kierunków wzrostu n i charakteru zarodkowania. Gdy zarodkowanie ma charakter sporadyczny ze stałą szybkością $\dot{N}(t)$,

$$m = n + 1; \quad K_m = C\dot{N} \prod_{i=1}^n G_i, \quad (9)$$

a gdy krystalizacja oparta jest na stałej liczbie zarodków N_0 ,

$$m = n; \quad K_m = C'N_0 \prod_{i=1}^n G_i. \quad (10)$$

Podstawy teorii orientacji (i deformacji) łańcuchów polimerów zostały stworzone w latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku przez Kuhna i Grüna [25] w odniesieniu do giętkich łańcuchów, oraz Kratky'ego [26] i Okę [27] dla układu sztywnych pałeczek. Ostatnio opracowano też asymptotyczne modele orientacji wieloosiowej [18, 19]. Modele te należy rozszerzyć na procesy nieustalone. W pracy na temat kształtowania się struktury w procesach przetwórstwa polimerów [17] zwrócono uwagę na odmienne mechanizmy dominujące w orientacji idealnie giętkich i idealnie sztywnych cząsteczek. Rozwój teorii powinien doprowadzić do opisu orientacji *makrocząsteczek o dowolnej sztywności*. Problemem wciąż wymagającym głębszej analizy jest dopuszczalność szeroko stosowanego założenia o *afinicznym odkształceniu łańcuchów*.

6.4 Nowe metody doświadczalne

Metody doświadczalnego badania struktury polimerów są ograniczone. Niezbędne jest opracowanie wiarygodnych metod śledzenia kinetyki krystalizacji w przepływie i pod naprężeniem. Problemem wymagającym rozwiązania teoretycznego i doświadczalnego jest sprzężenie efektów *strukturalnych i reologicznych*. Trzeba będzie opracować nowe metody rejestracji szybkich zmian krystaliczności w przepływie i kinetyki towarzyszących krystalizacji zmian własności reologicznych [22].

6.5 Proste równania konstytutywne i równania ewolucji struktury

Realistyczne modelowanie procesów technologicznych, takich jak formowanie włókien, folii, formowanie wtryskowe, wymaga znajomości *równań konstytutywnych* opisujących relacje (*warunki + struktura*) \Rightarrow *własności*, oraz *równań ewolucji* charakteryzujących zależności (*warunki*) \Rightarrow *struktura*. Równania takie muszą być dostatecznie proste, aby mogły stanowić elementy modelu dynamicznego, a równocześnie muszą pozwalać na doświadczalne wyznaczenie odpowiednich charakterystyk materiałowych.

We wczesnych badaniach nad procesami krystalizacji [14, 28] wprowadziliśmy uproszczone, półempiryczne zależności opisujące kinetykę krystalizacji polimerów. Niezależny pomiar szybkości zarodkowania $\dot{N}(t)$, i wzrostu $G_i(t)$ jest trudny i mało wiarygodny. Wbrew rozpowszechnionym poglądom, mikroskopowe badania zarodkowania i wzrostu *sferolitów* nie dają wiarygodnej informacji o kinetyce powstawania i wzrostu *kryształów*. Sferolity są strukturami złożonymi z wielu kryształów i obszarów niekryształicznych, a ich wzrost nie jest identyczny ze wzrostem kryształów. Ponadto, krystalizacji polimerów nie zawsze towarzyszy powstawanie sferolitów. Z tego względu, do modelowania procesów technologicznych, podwójną całkę we wzorach Kołmogorowa (równania (5)–(6)) zawierającą niezależne funkcje $\dot{N}(t)$ i $G_i(t)$ zastąpiono całką jednej funkcji czasu, $K(t)$ w potęgde odpowiadającej wykładnikowi m we wzorze Avramiego,

$$E(t) \cong \left[\int_0^t K(s) ds \right]^m. \quad (11)$$

Gdy szybkość krystalizacji jest stała, funkcja K redukuje się do *stałej Avramiego* K_m ,

$$K \rightarrow (K_m)^{1/m}. \quad (12)$$

W warunkach zmiennej szybkości, równania (4) i (11) dają

$$K(t) = \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt}[E(t)]^{1/m}, \quad (13)$$

gdzie $P(t)$ jest nieliniową miarą stopnia krystaliczności,

$$P(t) = \left[\ln \frac{1}{1 - X(t)} \right]^{1/m} = [E(t)]^{1/m}; \quad P \in (0, \infty). \quad (14)$$

Podobny model zwany *izokinetycznym* zaproponowali też Nakamura, Watanabe, Katayama i Amano [15], a także inni autorzy.

Zdefiniowaną wzorem (13) szybkość krystalizacji w warunkach stacjonarnych aproksymowano empiryczną funkcją temperatury T i stopnia orientacji molekularnej f_{or} [28],

$$K_{st}(T, f_{or}) = \begin{cases} K_{\max} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(T - T_{\max})^2}{D^2} \right] \cdot \exp(Af_{or}^2) & \text{dla } T_g < T < T_m, \\ 0 & \text{dla } T \geq T_m \text{ lub } T \leq T_g. \end{cases} \quad (15)$$

Funkcja Gaussa z parametrami K_{\max} , T_{\max} i D , obcięta do zera w temperaturze topnienia T_m i w temperaturze zeszklenia T_g , dobrze opisuje zależność temperaturową w układzie nieorientowanym. Potwierdzają to dane doświadczalne dla różnych polimerów. Druga funkcja wykładnicza wprowadza wpływ orientacji molekularnej. f_{or} oznacza drugi moment jednoosiowego rozkładu orientacji segmentów łańcucha, a A jest parametrem empirycznym charakteryzującym czułość szybkości krystalizacji na orientację (naprężenie). Wpływ orientacji we wzorze (15) jest ograniczony do niezbyt dużych czynników f_{or} (niezbyt dużych odkształceń łańcucha). W tym zakresie czynnik orientacji osiowej jest proporcjonalny do różnicy naprężeń normalnych

$$f_{or} = \frac{3}{2} \langle \cos^2 \vartheta \rangle - \frac{1}{2} \cong p_{33} - p_{11}. \quad (16)$$

Czynnik orientacji można też wyrazić za pomocą parametru charakteryzującego stopień odkształcenia łańcucha, λ . Dla łańcucha zbudowanego z N segmentów.

$$f_{or} \cong \frac{1}{5N} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right); \quad \lambda^2 = \frac{\langle h^2 \rangle}{\langle h^2 \rangle_0} \ll N. \quad (17)$$

Współczynnik deformacji molekularnej λ (różny od makroskopowego odkształcenia próbki) nie jest jednak wielkością mierzalną. Równocześnie istnieje bardzo niewiele danych doświadczalnych dotyczących krystalizacji orientowanej, które by pozwalały na weryfikację funkcji orientacji i wyznaczenie współczynnika A we wzorze (15). W cytowanych niżej pracach na temat modelowania procesu formowania włókien [29, 30] wykorzystaliśmy dane dla politereftalanu etylenowego (PET) otrzymane przez Smitha i Stewarda [31] oraz Alfonso *et al.* [32]. Pilnym zadaniem wydaje się opracowanie metod doświadczalnych i nagromadzenie informacji o kinetyce krystalizacji orientowanej różnych polimerów. Proste równania opisujące szybkość krystalizacji należy uzupełnić przez wprowadzenie efektów niestacjonarnych i nieizotermicznych.

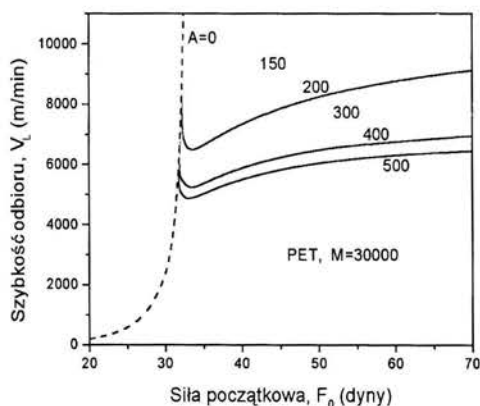
Ważnym problemem konstytutywnym jest zmiana własności reologicznych stopionego polimeru pod wpływem krystalizacji. Zagadnienie to budzi ostatnio duże zainteresowanie [20–22]. W dyskusji nad kinematyką deformacji polimeru w procesie formowania włókien Ziabicki [33] zaproponował prosty model empiryczny opisujący lepkość polimeru jako funkcję temperatury i stopnia krystaliczności. Lokalna lepkość polimeru w punkcie z

$$\eta(z) = \begin{cases} \eta_0 [T(z)] \cdot \left[\frac{1}{1 - X(z)/X_{kr}} \right]^\alpha & \text{dla } X < X_{kr}, \\ \infty & \text{dla } X \geq X_{kr}. \end{cases} \quad (18)$$

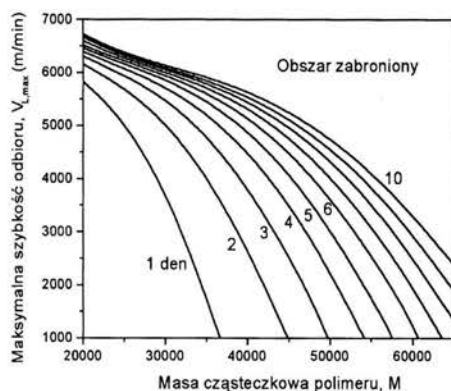
Pierwszy czynnik we wzorze (18) opisuje temperaturową zależność lepkości niezakrystalizowanego stopu η_0 . Zależność tę aproksymuje się często wzorem *Arrheniusa*, albo *Williamsa-Landela-Ferry'ego* (WLF). Postać czynnika zależnego od stopnia krystaliczności X zaproponowano wykorzystując teorię sieciowania polimerów. Jeżeli przyjmiemy, że wprowadzony do stopu agregat krystaliczny (zarodek? krystalit?) pełni rolę *fizycznego węzła*, to po osiągnięciu krytycznej gęstości węzłów (odpowiadającej krystaliczności $X = X_{kr}$) układ traci płynność i lepkość osiąga wartość nieskończoną. Ze względu na rolę, jaką własności reologiczne odgrywają w procesach formowania polimerów, wpływ krystalizacji wymaga dalszych intensywnych badań teoretycznych i doświadczalnych.

6.6 Modelowanie procesów technologicznych z uwzględnieniem ewolucji struktury polimeru

Wstępne prace nad modelowaniem procesu formowania włókien z krystalizujących polimerów [29, 30] wykorzystujące uproszczone równania konstytutywne i równania ewolucji wykazały znaczny wpływ krystalizacji na dynamikę procesu, a także, ograniczenia warunków, w jakich otrzymanie włókien jest w ogóle możliwe. Rysunek 10 przedstawia zależność pomiędzy szybkością formowania włókna V_L i siłą początkową F_0 , wyliczone z modelu uwzględniającego orientowaną krystalizację (wzór (15)) i zależną od krystaliczności lepkość (wzór (18)). W warunkach krystalizacji nieorientowanej ($A = 0$), zależność między V_L i F_0 jest wzajemnie jednoznaczna. Przy dużych A natomiast obserwuje się *bifurkację* rozwiązań. Szybkość formowania osiąga maksimum,



Rys. 10. Zależność szybkości formowania włókna PET V_L od siły początkowej F_0 [34]. Parametr przyspieszenia krystalizacji orientowanej, A , podano przy krzywych



Rys. 11. Zależność maksymalnej szybkości formowania włókna PET $V_{L,max}$ od średniej masy cząsteczkowej polimeru M [34]; $A = 500$

a następnie spada naskutek indukowanej przez orientację krystalizacji i gwałtownego wzrostu lepkości.

Pojawianie się maksimów szybkości na Rys. 10 oznacza, że *szybkość formowania włókien jest ograniczona*. Rysunek 11 przedstawia *maksymalną szybkość formowania* jako funkcję masy cząsteczkowej polimeru (PET) i grubości elementarnego włókienka [34]. Formowanie cienkich włókien wymaga stosowania niższych szybkości, lub niższej masy cząsteczkowej polimeru.

Kontynuowane będą prace nad nowymi modelami procesów technologicznych włączającymi udoskonalone równania konstytutywne i równania ewolucji struktury.

Prowadzona od wielu lat współpraca z laboratoriami naukowymi i przemysłowymi w Europie, USA i Japonii sugeruje utworzenie *międzynarodowego konsorcjum badawczego*, które zajęłoby się organizacją badań podstawowych o dużym znaczeniu dla technologii. Niedawna inicjatywa kilku instytutów europejskich i stowarzyszeń naukowych (Dutch Polymer Institute, Deutsche Textilinstitut, European Polymer Federation, International Polymer Processing Society) zmierza do utworzenia wirtualnej organizacji pod nazwą Europejskie Laboratoria Polimerowe [35]. W skład konsorcjum weszła by również Pracownia Fizyki Polimerów IPPT PAN.

Bibliografia

1. Bresler S.E., Frenkel J.I., [niepublikowana praca (1939), cytowana w:] Landau L.D., Lifshitz E.M., *Fizyka Statystyczna* (rozdz.143, str.472), Moskwa 1951.
2. Kratky O, Porod G., *Rec. Trav. Chim.*, **68**, 1106, 1949.
3. Meyer K.H., Mark H., *Ber. Deutsch. Chem. Ges.*, **61**, 593, 1939, 1928.
4. Hermann K., Gerngross O., Abitz W., *Z. Phys. Chemie*, **10**, 371, 1930.
5. Keller A., *Phil. Mag.*, **2**, 1171, 1957.
6. Peterlin A., Fischer E.W., *Z. Physik*, **159**, 272, 1960.
7. Kolmogoroff AN, *Izvestiya Akad. Nauk SSSR, Ser. Math.* **3**, 335, 1937.
8. Avrami M, *J. Chem. Phys.*, **7**, 1103, 1939.
9. Evans UR, *Trans. Faraday Soc.*, **41**, 365, 1945.
10. Ziabicki A., *Multidimensional theory of crystal nucleation*, [in:] *Mathematical modelling for polymer processing*, Capasso V. [ed.], Springer Verlag (w druku).
11. Ziabicki A., *J. Chem. Phys.*, **85**, 3042, 1985.
12. Ziabicki A., [in:] *Flow-induced crystallization of polymers*, Titomanlio G. [ed.], pp. 37–62, Univ. of Salerno, 2001.
13. Ziabicki A., *Nucleation of polymer crystals with internal structure*, [in:] *Crystallization of polymers*, Dosière M., [ed.], pp. 463–474, Kluwer Academic Publ., Dordrecht–London, 1993.
14. Ziabicki A., *Appl. Polymer Symposia*, **6**, 1, 1967.
15. Nakamura K., Watanabe T., Katayama K., Amano T., *J. Appl. Polymer Sci.*, **16**, 1077, 1972.
16. Ziabicki A., *Colloid and Polymer Sci.*, **274**, 209, 705, 1996; Ziabicki A., Sajkiewicz P., *Colloid and Polymer Sci.*, **276**, 680, 1998.
17. Ziabicki A., *Development of structure in processing polymers composed of flexible vs. rigid molecules*, [in:] IUPAC International Symposium *Polymers for Advanced Technologies*, Jerusalem, August 1987, Lewin M. [ed.], 580–601, VCH, Weinheim–New York, 1988.
18. Jarecki L., Ziabicki A., *Polymer*, **43**, 2549, 2002.

19. Jarecki L., Ziabicki A., *Polymer*, **43**, 4065, 2002.
20. Symposium *Flow-Induced Crystallization of Polymers*, Salerno, Italy, November 2000.
21. International Conference *Flow Induced Crystallization of Polymers*, Salerno, Italy, October 14–17, 2001.
22. Ziabicki A., Jarecki L., Sorrentino A., *The role of crystallization in melt spinning*, International Symposium *Schmelzspinnen von Polymeren und Glas in der Polymerforschung*, Dresden, Maj 2002.
23. Ziabicki A., Alfonso G.C., *Macromol. Symposia*, **185**, 211, 2002.
24. Ziabicki A., Jarecki L., *J. Chem. Phys.*, **101**, 2267, 1994; *Macromol. Symposia*, **90**, 31, 1995.
25. Kuhn W., Grün F., *Kolloid Z.*, **101**, 242, 1942.
26. Kratky O., *Kolloid Z.*, **64**, 213, 1933.
27. Oka S., *Kolloid Z.*, **86**, 243, 1939.
28. Ziabicki A., *Fundamentals of Fibre Formation*, Wiley, London, 1976.
29. Ziabicki A., Jarecki L., Wasiak A., *Comput. Theor. Polym. Sci.*, **8**, 143, 1998.
30. Jarecki L., Ziabicki A., Blim A., *Comput. Theor. Polym. Sci.*, **10**, 92, 2000.
31. Smith F.S., Steward R.D., *Polymer*, **15**, 283, 1974.
32. Alfonso G.C., Verdone M.P., Wasiak A., *Polymer*, **19**, 711, 1978.
33. Ziabicki A., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **30**, 157, 1988.
34. Jarecki L., Ziabicki A., [w przygotowaniu do publikacji].
35. Lemstra P.J., Meijer H.E.H. *European Polymer Laboratories*, Project, May, 2002.

PRZEWIDYWANE KIERUNKI BADAŃ W ZAKRESIE ULTRADŹWIĘKOWEJ DIAGNOSTYKI MEDYCZNEJ W ZU IPPT

Andrzej Nowicki

Ultradźwiękowa diagnostyka medyczna stanowi obecnie istotną część całego kompleksu stosowanych technik diagnostyki obrazowej (radiologia, rezonans magnetyczny, PET, medycyna nuklearna i inne). Po niespełna czterdziestu latach od pierwszych nieśmiałych zastosowań ultrasonografii wartość sprzedaży aparatury ultrasonograficznej w Europie wyniosła blisko 34 % całkowitej wartości sprzedanej aparatury obrazowej (2001 r.). Na aparaturę radiologiczną, która czterdzieści lat temu była jedyną aparaturą obrazową, przypadło też około 34 %, reszta to rezonans magnetyczny, PET, medycyna nuklearna i inne.

W ostatnim dziesięcioleciu nastąpił jakościowy przełom w ultrasonografii i echokardiografii. Pojawiły się całkiem nowe technologie szerokopasmowych ultradźwiękowych przetworników obrazujących, cyfrowe przetwarzanie sygnałów prawie całkowicie zastąpiło techniki analogowe, coraz częściej w algorytmie diagnostycznym stosuje się środki kontrastujące pozwalające wyróżnić z obrazowanych narządów obszary z upośledzonym krążeniem. Kontrasty bez wątpienia umożliwią dokładniejszą ocenę ukrwienia mięśnia sercowego. Innym przyszłościowym zastosowaniem kontrastów jest synergistyczne współdziałanie terapeutycznych i diagnostycznych środków kontrastujących wykazujących własności „wzmacniające” echogeniczność tkanek i w tym samym czasie będących nośnikiem leków, swoistych dla pewnych zmian patologicznych. Ultrasonografia harmoniczna, wykorzystująca nieliniowe własności propagacji ultradźwięków w tkankach to kolejny przełom technologiczny, który w krótkim, bo zaledwie dwuletnim okresie pozwolił obrazować pewne narządy z niespotykaną dotychczas dokładnością. W badaniu jamy brzusznej oczekiwanymi zaletami obrazowania harmonicznego będą: redukcja artefaktów, mniejsze zniekształcenia na granicy tkanek, pełna kontrola widma ech, znacznie lepszy kontrast obrazów, co w rezultacie znakomicie zwiększy wartość diagnostyczną ultrasonografii. Bez wątpienia, właśnie obrazowanie harmoniczne i jego pewne mutacje, włączając w to ultrasonografię kodowaną stanowić będzie obszar intensywnych badań naukowych i nowych wdrożeń aparaturowych.

Kolejnym kierunkiem rozwoju diagnostyki ultradźwiękowej jest elastografia — obejmująca obrazowanie różnic w lepkościach tkanek. Przewidywane zastosowania to sonomamografia, ze szczególnym naciskiem na różnicowanie cyst i zmian „twardych” oraz wczesna diagnostyka złośliwych i łagodnych przerostów prostaty.

W Polsce, mimo znanych kłopotów Służby Zdrowia, ultrasonografia przedstawia się całkiem dobrze. Nie do przecenienia jest tu rola, jaką odegrał w rozwoju ultradźwiękowych metod w medycynie Zakład Ultradźwięków IPPT. Badania w tej dziedzinie zostały zapoczątkowane na początku lat sześćdziesiątych przez prof. Leszka Filipczyńskiego i już w kilka lat później pojawił się pierwszy polski ultrasonograf — w tym czasie badania takie prowadzone były tylko w kilku laboratoriach USA, Anglii, Holandii i Niemiec. Lata sześćdziesiąte i siedemdziesiąte zaznaczyły się znacznym wkładem polskiego zespołu do piśmiennictwa światowego, szczególnie w zakresie obrazowa-

nia w położnictwie, kardiologii i okulistyce. Pionierskie też były badania w zakresie teorii i metod pomiarowych dawek promieniowanych do ciała pacjenta ultradźwięków. W końcu lat siedemdziesiątych zainicjowano badania nad technikami dopplerowskimi w diagnostyce układu krążenia.

Badacze objawiają zwykle skłonność do jednostronnego upodobania, bądź to w kierunku badań czysto teoretycznych, nie zważając na zastosowania lub nawet je lekceważąc, bądź też w kierunku dociekań z uwagi na określone zastosowania. Zakład Ultradźwięków zawsze cechowała równowaga między badaniami teoretycznymi i ich aspektem aplikacyjnym. Wyrazem zrozumienia dla wagi aplikacji, szczególnie w trudnych latach siedemdziesiątych, była inicjatywa prof. L. Filipczyńskiego powołania przy IPPT PAN Zakładu Doświadczalnego TECHPAN, w którym wdrażano małoseryjną produkcję urządzeń opracowywanych w akustycznych laboratoriach IPPT. Sukces tego przedsięwzięcia był nadzwyczajny, zwłaszcza w zaspokojeniu potrzeb szpitali w zakresie wyposażenia w ultrasonografy i mierniki przepływu krwi różnych typów. Jednocześnie Zespół aktywnie uczestniczył w szkoleniu (kursy pod auspicjami Centrum Medycznego Kształcenia Podyplomowego CMKP i Polskiego Towarzystwa Ultrasonograficznego PTU) lekarzy ultrasonografistów w zakresie fizyki ultradźwięków, tak, aby jak najlepiej wykorzystać diagnostyczne możliwości stosowanej instrumentacji.

Lata osiemdziesiąte to w dziedzinie ultrasonografii, niestety, szybko powiększający się dystans technologiczny do krajów zachodnich. Warunki ograniczające wkład ZU w badania technologiczne w tym okresie zdeterminowały natomiast powstanie znaczących prac teoretycznych z zakresu propagacji fal ultradźwiękowych w tkankach, badania przetworników i spowodowały poszukiwanie „nisz” badawczych nieopaniowanych jeszcze przez konsorcja „przemysł – laboratoria naukowe” na Zachodzie. Kierunek został właściwie wybrany. Restytucji lub sanacji, tak organizacyjnej jak i technologicznej, uległ Zakład Doświadczalny działający w Puławach pod nową nazwą ECHO-SON S.A. (o kapitale pracowniczym i IPPT — 49%). Wyniki prywatyzacji były widoczne już w pierwszym roku działania nowej firmy. Wielokrotnie większa produkcja, bardziej niż przyzwoity europejski standard, całkowite opanowanie polskiego rynku ultrasonograficznego w klasie aparatów dla gabinetów prywatnych i małych szpitali oraz rozwijający się obecnie eksport. Obecnie ECHO-SON produkuje ponad 250 ultrasonografów rocznie i ponad 1000 głowic sektorowych. Pracownicy Zakładu Ultradźwięków czynnie współpracują z ECHO-SONem (wspólne projekty ultrasonografów, grant celowy) traktując to jako poligon doświadczalny do szybkiego wdrażania nowych pomysłów dotyczących głowic ultradźwiękowych, przetwarzania obrazów ultrasonograficznych, jak również ustawicznego kształcenia pracowników ECHO-SONU.

Druga część aktywności Zakładu Ultradźwięków, ukierunkowana na badania przepływu krwi, zakończyła się utworzeniem (wraz z 20% kapitałem IPPT PAN) spółki Sonomed będącej obecnie monopolistą urządzeń dopplerowskich w Polsce. Aktualna produkcja obejmuje aparaty do badania przepływu w mózgu, naczyniach obwodowych i pomiarów śródoperacyjnych.

W nadchodzących latach bez wątpienia intensywne badania poświęcone będą rozwojowi metod diagnostyki klinicznej rokujących nadzieje wczesnego wykrywania chorób noszących znamiona chorób cywilizacyjnych jak również związanych z pojęciem „starzejącego się społeczeństwa” uwzględnionym w priorytetach Unii Europejskiej. Doświadczenie zespołu ZU rokuje uzasadnione nadzieje, że udział IPPT w tych interdyscyplinarnych badaniach może być znaczący.

Z tematyki znajdującej się na styku ultrasonografii, instrumentacji klinicznej i informatyki Zakład Ultradźwięków włączy do perspektywicznych kierunków badań rozwijanych w najbliższym dziesięcioleciu w IPPT następujące tematy szczegółowe:

Ultradźwiękowa diagnostyka kości

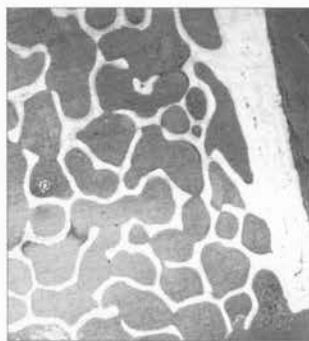
W ciągu ostatnich 10 lat osteoporoza została uznana za jedno z głównych zagrożeń klinicznych ze względu na powszechność występowania, stopień zagrożenia życia pacjenta w wyniku złamań osteoporotycznych i wielkość obciążenia finansowego publicznych środków ochrony zdrowia. Szczególne znaczenie w leczeniu ma wczesne diagnozowanie zagrożenia osteoporozą. Dlatego ważne jest rozwijanie prostych, nieinwazyjnych i tanich metod oceny stanu kości, w szczególności kości beleczkowej, które mogłyby być stosowane w badaniach przesiewowych i w monitorowaniu leczenia. Takimi metodami są techniki ultradźwiękowe.

Od kilku lat prowadzone są w ZU prace nad kompleksowym opisem stanu kości beleczkowej za pomocą ultradźwiękowych fal przechodzących i fal rozproszonych. Badania prowadzone są na sztucznej kości, na próbkach kości piętowej i *in vivo*, na ochotnikach i na pacjentach Warszawskiego Centrum Osteoporozy.

W ramach badań wyznaczane były takie parametry kości jak współczynnik opisujący zależność tłumienia od częstotliwości — BUA i prędkość dźwięku — SOS. Jednocześnie prowadzone są intensywnie badania nad wykorzystaniem informacji zawartej w fali rozproszonej w kości gąbczastej i zjawisku dyspersji prędkości fali w kości. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały dużą przydatność fal rozproszonych. Pokazano, że rozproszenie wsteczne energii fali ultradźwiękowej zależy od mikroarchitektury kości gąbczastej i opisuje stopień jej złożoności.

Dotychczas ultrasonografia stosowana była w diagnostyce tkanek miękkich. Kości, ze względu na ich dużo większą, niż dla tkanek miękkich, impedancję akustyczną i tłumienie fali akustycznej, stanowiły dotychczas jedynie przeszkodę w badaniach. Ultradźwiękowe badanie kości jest więc całkowicie nowym wykorzystaniem parametrów fali akustycznej rozchodzącej się w tkankach „twardych”.

W najbliższych latach badania skoncentrowane zostaną nad systemem do parametrycznego obrazowania, czyli obrazowania wyliczonych rozkładów własności kości piętowej. Zastosowanie



Rys. 1. Próbką to wycinek kości biodrowej pobrany metodą biopsji. Na obrazie widoczny jest obszar kości beleczkowej wraz z wycinkiem kości zbitej (po prawej stronie). Obraz otrzymany został za pomocą skanującego mikroskopu akustycznego pracującego w modzie odbiciowym przy częstotliwości 200 MHz. Rozdzielczość poprzeczna mikroskopu przy tej częstotliwości wynosi ok. 7 mikrometrów. Obrazowany obszar ma wymiary 3 mm × 3 mm. Zmiany jasności w obszarze kości odpowiadają zmianom impedancji akustycznej, która to z kolei łączy się ze zmianami mechanicznych własności beleczek kostnych.

technik obrazowania i fal rozproszonych doprowadzi w niedalekiej przyszłości do rozwoju metod badania kości bełeczkowej, analogicznych do tak popularnej obecnie ultrasonografii tkanki miękkiej.

Ultrasonografia o zwiększonym zakresie penetracji

Polepszenie ultrasonograficznej wykrywalności zmian w tkankach, przy określonym poziomie szumów odbiornika, wymaga wzrostu energii sygnału. Wzrost ten jest w praktyce możliwy jedynie przez zwiększenie długości impulsów nadawczych, ich amplituda jest bowiem ograniczona, ze względu na bezpieczeństwo badań, przez dopuszczalną moc szczytową nadajnika. Z kolei rozdzielność obserwowanych obiektów będzie tym lepsza, im echo będzie krótsze. Rozróżnione mogą być jedynie te obiekty, od których echa są przesunięte względem siebie o czas większy niż długość impulsów sondujących. Im więc sygnały te będą krótsze tym lepsza jest ich rozdzielność. A zatem jednocześnie zapewnienie przez system ultrasonograficzny najlepszej rozdzielności i wykrywalności obiektów prowadzi do przeciwstawnych sobie wymagań w stosunku do sygnału sondującego, bowiem im dłuższy sygnał nadawczy tym lepsza wykrywalność, natomiast rozdzielczość jest tym lepsza im krótsze są echa. Rozwój ultrasonografii obejmie m.in. nowe techniki, dotychczas stosowane w telekomunikacji, polegające na kodowaniu długich sekwencji nadawczych i odpowiedniego dekodowania ech. Najpoważniejsze ośrodki naukowe na świecie poświęcają temu zagadnieniu dużo uwagi.

W IPPT rozwijane będą dwie techniki kodowania transmisji i przetwarzania sygnałów odbiorczych. Pierwsza dotyczyć będzie kompresji ech z liniową modulacją częstotliwości za pomocą filtracji dopasowanej. Druga i w zasadzie główna część badań zostanie poświęcona opracowaniu systemów nadawczo/odbiorczych z binarną modulacją fazy. Dzięki zastosowaniu metod optymalizacji dokonany zostanie odpowiedni wybór kodów transmisyjnych, wg. których przebiega zmiana fazy i następnie kompresja ech (splot ech z repliką sekwencji nadawczej). Wykorzystane zostaną m.in. znane z telekomunikacji i dopplerowskich technik radarowych systemy cyfrowej, binarnej modulacji paczek falowych za pomocą kodu Barkera (o długości 7, 11 lub 13) i podwójnych kodów z eliminacją listków bocznych zwanych kodami Golaya. Prace te będą prowadzone we współpracy z Uniwersytetem Drexela w Filadelfii

Obrazowanie nieliniowe — harmoniczne

Jakość ultradźwiękowej aparatury medycznej służącej zarówno do diagnostyki jak i do terapii różnego rodzaju patologicznych struktur w tkankach ciała ludzkiego w decydującej mierze zależy od jej rozdzielności, czyli rozmiarów przekroju generowanych wiązek ultradźwiękowych.

Techniką wizualizacji ultradźwiękowej mającą dużą przyszłość, pozwalającą polepszyć jakość uzyskiwanych ultrasonogramów, zwiększyć ich kontrast oraz zmniejszyć artefakty, jest technika wizualizacji harmonicznej oparta na wykorzystaniu wyższych harmonicznych powstających samoistnie na skutek nieliniowej propagacji impulsów ultradźwiękowych o wystarczająco dużych amplitudach. Również technika oparta na dużych przyrostach temperatury powstających podczas nieliniowej propagacji silnie ogniskowanych wiązek będzie w przyszłości ważnym kierunkiem badań (hipertermia do terapii nowotworów).

Powyższe zagadnienia wymagają opracowania użytkowych programów do modelowania rozkładów nieliniowych pól akustycznych wytwarzanych przez złożone głowice ultradźwiękowe, w zależności od dziedziny ich zastosowania oraz dla różnych warunków brzegowych.

Pomiar hematokrytu

Nieinwazyjne monitorowanie hematokrytu HCT krwi ma ważne znaczenie w czasie dializy. Jest ono również ważnym składnikiem algorytmu w postępowaniu z pacjentami w szoku pourazowym lub w czasie operacji na otwartym sercu. W planach zespołu znajduje się dalszy rozwój zapoczątkowanej przed dwoma laty metody przezskórnej oceny hematokrytu na podstawie dopplerowskiego pomiaru mocy sygnału rozproszonego na krwinkach. Dotychczasowe pomiary *in vitro* i *in vivo* były bardzo obiecujące (dokładność ± 5 HCT). Wśród nowych technologii podjęta zostanie próba opracowania wielobramkowej metody pomiaru hematokrytu w całym zakresie penetracji fali ultradźwiękowej. Badania te będą rozwijane wspólnie z Uniwersytetem we Florencji.

Powtarzalność wyników może doprowadzić do bardzo szerokiego stosowania tej metody wszędzie tam, gdzie potrzebna jest jak najszybsza informacja o hematokrycie.

Badanie elastyczności ścian naczyń krwionośnych

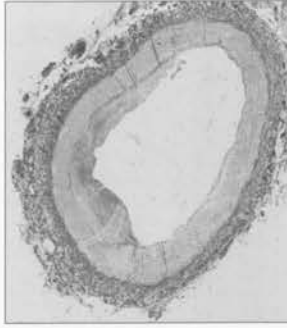
Problem związany jest z wczesnym rozpoznawaniem ryzyka wystąpienia miażdżycy. Powyższa tematyka rozwijana jest intensywnie na świecie. Podstawą oceny elastyczności ścian naczyń będzie, obok stosowanych obecnie współczynników podatności, rozszerzalności i sztywności, prędkość fali tętna wyznaczana nieinwazyjnie w kilkucentymetrowym odcinku naczynia krwionośnego, z uwzględnieniem zjawiska odbicia fali ciśnienia, przy różnych wartościach wejściowej impedancji naczyniowej. Dla realizacji tematu planuje się opracowanie nowej wersji aparatu ultradźwiękowego wraz z oprogramowaniem. Prace doświadczalne prowadzone będą na modelu oraz w warunkach klinicznych. Oczekuje się, że realizacja tematu pozwoli na nową ilościową ocenę elastyczności ścian naczyń krwionośnych, charakteryzującą się większą niż dotychczas dokładnością i powtarzalnością badań.

Mikroskopia ultradźwiękowa

Aktualnie prowadzone są badania nad wykorzystaniem i rozwojem technik mikroskopii akustycznej w zakresie częstotliwości 30 MHz–200 MHz.

Zbudowane w ZU mikroskopy z powodzeniem używane są do obrazowania tkanek miękkich i kości, a w badaniach nieniszczących do obrazowania wnętrza optycznie nieprzezroczystych materiałów i pomiarów własności warstw wierzchnich. Ostatnio opracowana została mikroskopowa technika różnicowania próbek z biopsji kości ze względu na rodzaj metabolicznej choroby kości pacjenta oraz prowadzone były badania podstawowe nad zjawiskiem nieliniowości powstającym przy silnej koncentracji fali ultradźwiękowej w ognisku soczewki mikroskopu.

Obecnie rozpoczęto badania teoretyczne i eksperymentalne nad systemem mikroskopu akustycznego do obrazowania trójwymiarowego (3D). Zastosowanie techniki 3D spowoduje z jednej strony kilkudziesięciokrotne skrócenie czasu zbierania informacji o badanym obiekcie, a z drugiej umożliwi prezentację obrazów badanych struktur w projekcjach nieosiągalnych przy tradycyj-



Rys. 2. Ultradźwiękowy obraz przekroju tętnicy otrzymany mikroskopem akustycznym pracującym przy częstotliwości 100 MHz. Obszar obrazowania wynosi 6 mm × 6 mm. Obrazowanie tkanki miękkiej pokazuje niesłyszalnie dużą czułość fal ultradźwiękowych, co umożliwia obrazowanie drobnych zmian własności tkanki. Bez stosowania barwienia (tak jak to jest stosowane w mikroskopii optycznej) w obrazie akustycznym widoczne są poszczególne warstwy składające się na ścianę tętnicy (intima, media, adventitia).

nym obrazowaniu. System obrazowania mikroskopowego 3D stanowić będzie jakościowy przełom w szeroko rozumianych badaniach nieniszczących materiałów stałych i biologicznych. Przestrzenne obrazy wad materiałowych pozwolą na wiarygodne określenie ich historii i przyczyn powstawania, zaś w przypadku materiałów biologicznych, takich jak przykładowo kość, na określenie jej przestrzennej mikrostruktury.

Rozwój tej techniki obrazowania w mikroskopii akustycznej umożliwi następnie wprowadzenie jej do innych ultradźwiękowych urządzeń diagnostycznych.

Ultrasonografia wielkiej częstotliwości

Głównym kierunkiem badań będzie rozwój techniki obrazowania i badania przepływu krwi z lepszą rozdzielczością, rzędu kilkudziesięciu mikrometrów. Wymagania takie można spełnić jedynie zwiększając znacznie częstotliwość skanującego pola ultradźwiękowego, powyżej 20 MHz. Wymagać to będzie dalszego rozwoju instrumentacji USG w.cz., jak również nowych przetworników piezoelektrycznych w.cz. o szerokim paśmie przenoszenia i długich strefach ogniskowania. Badania te powinny doprowadzić do rozwoju mikrosoneografii bardzo małych narządów, dotychczas pomijanych w badaniach ultrasonograficznych — skóra, warstwy wierzchnie oka, ścianki naczyń krwionośnych w procesie formowania się blaszek miażdżycowych.

Główce ultradźwiękowe

Rozwojowi metod i aparatury ultradźwiękowej nierozłącznie towarzyszy rozwój nadawczo-odbiorczych głowic ultradźwiękowych. Wiąże się on zarówno z wprowadzaniem specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych, jak i nowych materiałów piezoelektrycznych.

Badania prowadzone są pod kątem poprawy czułości układów nadawczo-odbiorczych, zmniejszenia listków bocznych promieniowanych wiązek oraz poszerzenia pasma przenoszenia, co umożliwi wprowadzanie nowych technik ultrasonograficznych, takich jak wizualizacja na drugiej harmonicznej.

W historii ultradźwiękowych głowic do diagnostyki medycznej można wyodrębnić kilka ważnych etapów, takich jak zastosowanie dopasowujących warstw ćwierćfalowych, opracowanie piezoelektrycznych materiałów kompozytowych, zastosowanie foliowych materiałów piezoelektrycznych do budowy głowic nadawczo-odbiorczych na wysokie (powyżej 30 MHz) częstotliwości. Instytut ma na tym polu duże osiągnięcia, o czym świadczą cztery doktoraty i jedna habilitacja.

Najbliższe prace nad głowicami ściśle związane są z nowymi technikami ultrasonograficznymi, które przynoszą stałą poprawę rozdzielczości. Ulega poszerzeniu zakres stosowanych częstotliwości zarówno w dolnym (kości), jak i górnym (skóra) zakresie. Istotne więc będzie opracowanie metody wykonywania szerokopasmowych przetworników ultradźwiękowych o długiej strefie ogniskowej i możliwości nadawania i odbioru impulsów w zakresie szerokiego pasma częstotliwości oraz opracowanie przetworników sandwiczowych.

Ultrasonografia 3D

Ultrasonografia trójwymiarowa (USG-3D) jest nową techniką wizualizacyjną, uznaną za wartościowe narzędzie w wielu zastosowaniach klinicznych. Niestety, wysokiej jakości obrazowanie trójwymiarowe nadal pozostaje dalekosiężnym celem badawczym. Jednym z obiecujących kierunków jest stworzenie nowego typu fazowych przetworników matrycowych, które umożliwiają nadawanie i odbiór ech z dwuwymiarowej matrycy elementów. Jednak najczęściej stosowana jest konwencjonalna technologia ultrasonografii dwuwymiarowej w celu akwizycji danych objętościowych. W technice tej trójwymiarowy zbiór danych tworzony jest z pewnej liczby dwuwymiarowych B-skanów, zbieranych jeden po drugim. Wiele technologii śledzenia położenia zostało zaadaptowanych z systemów wirtualnej rzeczywistości, gdzie znajdują najczęściej zastosowanie. Jednak wymagania stawiane tym technologiom w zastosowaniach obrazowania 3D są nieco inne np.: większa wymagana dokładność (około 1 mm) przy mniejszej niż w zastosowaniach wirtualnej rzeczywistości objętości pomiarowej (około 1 mm³). Częstotliwość pomiarów położenia musi być co najmniej równa częstotliwości przemiatań ultrasonografu (do kilkudziesięciu/sekundę).

W technice 3D Zakład Ultradźwięków rozpocznie badania nad alternatywnym systemem określania pozycji do zastosowań w akwizycji danych trójwymiarowych przy pomocy konwencjonalnych ultrasonografów. Dotychczas proponowane w literaturze rozwiązania określają w sposób bezwzględny (w stosunku do pewnego punktu stacjonarnego np. nadajnika) położenie głowicy w przestrzeni z sześcioma stopniami swobody. W naszym rozwiązaniu określamy jedynie położenie względne w jednym kierunku oraz położenie katowe w dwóch kierunkach. Ograniczenie pomiarowej liczby stopni swobody do trzech ma uzasadnienie w dwóch najczęściej wykorzystywanych trybach akwizycji danych trójwymiarowych. W proponowanym systemie zostanie zastosowane rozwiązanie hybrydowe mechaniczno-inercyjne, które umożliwi względne pozycjonowanie głowicy w czasie ruchu.

Wyżej wymienione problemy określają spektrum zainteresowań Zespołu, a poszukiwania badawcze ukierunkowane są na rozwiązania nowatorskie i maksymalnie wykorzystujące badania teoretyczne propagacji fal ultradźwiękowych w tkankach człowieka. Nie wyklucza to, oczywiście, podejmowania innych tematów badawczych, jak np. wykorzystanie ultradźwięków w badaniach genetycznych (DNA), w zależności od nawiązania współpracy z zainteresowanym ośrodkiem biomedycznym.

NOWOCZESNE TECHNOLOGIE INFORMATYCZNE — BEZPIECZEŃSTWO DANYCH

Zbigniew Kotulski

1 Wstęp

Wiek XIX i prawie cały wiek XX, okres gospodarki tradycyjnej, nazwać możemy czasem energii (mówiono: wiek pary, wiek elektryczności, wiek atomu). Burzliwy rozwój dziedzin nowej gospodarki, opartej na technologiach informatycznych, sprawia, że okres od połowy XX. wieku nazwać możemy czasem informacji. Nie będziemy tu definiować energii i informacji. Wspomnijmy tylko, że oba te pojęcia, a raczej wielkości fizyczne nazywane energią i informacją, mają pewne cechy wspólne, mają też cechy różniące je. Spróbujmy podać tutaj te cechy analogiczne i cechy odmienne. Zaczniemy od energii.

Energia jest w fizyce podstawowym elementem modelowania świata. Występują tam różne rodzaje energii: kinetyczna, potencjalna, elektromagnetyczna, chemiczna, jądrowa. Energię można przesyłać w czasie i w przestrzeni. Można zaprojektować (lub przynajmniej odkryć!) procesy energetyczne: przemiany jednego rodzaju energii w inny (uwzględniając zasadę zachowania energii), sposoby przechowywania energii oraz metody przesyłania energii. Można wreszcie energię zmierzyć, czyli wyrazić liczbowo jej ilość. Mimo tych wielu możliwości wykorzystania pojęcia energii do opisu fizycznej rzeczywistości, wobec skomplikowanej budowy świata (np. w jednym molu gazu jest liczba Avogadro, czyli $6,022 \cdot 10^{23}$ cząsteczek) nie wystarcza ono do tego celu. Dlatego też niezbędne było wprowadzenie pojęcia informacji jako uzupełnienia energetycznego opisanego świata.

Wprowadzając pojęcie informacji zauważmy, że są wykorzystywane dwa jej typy. Pierwszy to entropia, czyli wielkość fizyczna opisująca naszą niewiedzę o zjawisku. Drugi to po prostu informacja, opisująca wiedzę o procesie lub zjawisku. Pojęcie entropii stanowi immanentny składnik termodynamiki i tam zostało po raz pierwszy wykorzystane (Boltzmann). Funkcjonuje tam druga zasada termodynamiki, która mówi, że w układzie izolowanym entropia jest niemalejącą funkcją czasu, co oznacza że stan tego układu oddala się, w coraz bardziej nieprzewidywalny sposób, od stanu początkowego. To intuicyjne w fizyce pojęcie entropii dostało się w ręce matematyków, którzy w różny sposób próbowali je sformalizować, korzystając z pojęć rachunku prawdopodobieństwa. Najbardziej spójną i najszerzej stosowaną (także, a może przede wszystkim, poza fizyką) jest teoria Shannona, w której entropia zjawiska, reprezentowanego przez zmienną losową, jest po prostu wartością średnią z logarytmu rozkładu prawdopodobieństwa (funkcji gęstości lub funkcji rozkładu) tej zmiennej, wzięta z przeciwnym znakiem. Teoria ta stała się fundamentem nowej dziedziny matematyki nazwanej teorią informacji.

W teorii informacji natychmiast wprowadzono w sposób formalny pojęcie informacji wzajemnej, czyli tej „pozytywnej” informacji, którą posiada jedno zjawisko (czytaj: zmienna losowa) o innym zjawisku. W ramach teorii informacji, podobnie jak to było w przypadku energii, mogą występować różne rodzaje informacji. Informacja może być przesyłana w czasie i przestrzeni.

Możliwe jest również projektowanie procesów informacyjnych, czyli przemian jednego rodzaju informacji w inny, przechowywania i przesyłania informacji. W procesach tych obowiązuje odpowiednik drugiej zasady termodynamiki mówiący, że w procesach informacyjnych informacja zawsze maleje w czasie (jest funkcją monotoniczną). W naturalny sposób można również informację, jako funkcję rzeczywistą rozkładów prawdopodobieństwa, wyrażać w pewnych jednostkach, czyli mierzyć.

Podsumowując to wprowadzenie do powstania matematycznego pojęcia informacji, warto zauważyć, że nastąpiło zamknięcie pewnego cyklu. Pochodzące od fizycznego pojęcia entropii, matematyczne sformułowanie informacji (czyli informacji pozytywnej, mierzącej naszą wiedzę o zjawisku) powróciło do fizyki, stanowiąc podstawę fizyki informacyjnej (nazywanej też, dla podkreślenia występowania przepływu informacji we wszystkich zjawiskach fizycznych i jej oddziaływania na te zjawiska, dynamiką informacyjną). Ta gałąź fizyki jest rozwijana w kilku ważnych ośrodkach naukowych na świecie, na przykład w MIT. W Polsce miejscem takim jest Toruń, gdzie w pracach R. Ingardena z zakresu termodynamiki szeroko wykorzystywano pojęcia dynamiki informacyjnej. Również w dynamicznych zagadnieniach mechaniki pojęcie entropii informacyjnej i informacji stało się bardzo owocnym narzędziem zarówno obliczeniowym (zasada maksymalnej entropii w aproksymacji rozkładów prawdopodobieństwa), jak i koncepcyjnym. Ważne wyniki w tej dziedzinie są rezultatem prac K. Sobczyka w IPPT.

Wróćmy jednak do głównego przedmiotu tego opracowania, czyli informacji. Wszelka informacja, przesyłana, zgromadzona i przechowywana, stanowi podstawę wiedzy. Oznacza to, że informację należy traktować nie tylko jako pewien obiekt matematyczny lub fizyczny, wyrażany liczbowo (ilościowo), lecz również jako klasę danych posiadających pewne cechy składające się na wartość użytkową informacji i stanowiące jej treść. Aby informacja miała wartość użytkową, nie może być w trakcie przesyłania, gromadzenia, przechowywania i przetwarzania zniekształcana. Tę stabilność własności informacji i wszelkich procesów informacyjnych prowadzonych przez człowieka mogą zagwarantować tylko usługi ochrony informacji. O nich też będziemy mówić w dalszej części tej pracy.

2 Współczesne zastosowania bezpiecznego przesyłania i przechowywania informacji

Zanim przejdziemy do opisu współczesnych sposobów zapewnienia bezpieczeństwa informacjom, przedstawmy nieco faktów historycznych dotyczących ochrony informacji. Przede wszystkim, w przeszłości wiadomości były na ogół zapisane tekstem na papierze (pergaminie, itp.), zatem ich ochrona polegała po prostu na odpowiednim zaszyfrowaniu tekstu. Szyfrowanie polegało na przekształceniu tekstu według tajnego algorytmu (polegającego na wymieszaniu liter lub podstawieniu w ich miejsce innych liter lub znaków) do takiej postaci, aby mogły go odczytać tylko osoby uprawnione, znające algorytm odwrotny do szyfrowania (czyli algorytm odszyfrowania). Tak pojęte bezpieczeństwo informacji stało się domeną nauki nazwanej kryptologią. W ramach tej nauki znaleźli sobie miejsce zarówno ci, którzy chcieli bezpiecznie przesyłać informacje (kryptografowie) jak i ci, którzy te informacje, mimo wszelkich zabezpieczeń, chcieli w sposób nieuprawniony odczytać (kryptoanalitycy).

Oczywiście, bezpieczeństwo informacji nie ograniczało się tylko do zachowania jej tajności. Dokument z zaszyfrowanym tekstem musiał być dostarczony do adresata; adresat powinien mieć pewność, że zaszyfrowana treść dokumentu nie została zmieniona lub uszkodzona, czyli że zachowana została jej integralność (mogła to zagwarantować jedynie jakość papieru i atramentu), że nadawcą jest znana mu osoba (to można było potwierdzić odpowiednimi podpisami i pieczęciami). Jak z tego wynika, istotne znaczenie miała ochrona fizyczna dokumentu, także świadectwo posłańca potwierdzające nadawcy dostarczenie dokumentu do adresata.

Pozostaje jeszcze odpowiedź na naturalne pytanie o zastosowanie podanych wyżej metod ochrony informacji. Otóż w przeszłości korzystali z nich przede wszystkim wojskowi i dyplomaci, a więc przedstawiciele władzy, w zakresie dotyczącym wielkich spraw ówczesnego świata. Inne grupy osób prawie nie korzystały z metod kryptograficznych ochrony informacji, a Galileusz strzegący wyników swych badań (czy raczej praw autorskich do tych wyników) używając anagramów, był tu raczej wyjątkiem. O przestępcach i członkach tajnych stowarzyszeń nie będziemy tu wspominać, bo takie grupy z natury nie chcą ujawniać swych tajemnic i zamiarów. Postawmy tu jeszcze jedno pytanie: czy od tamtych czasów coś się zmieniło w dziedzinie ochrony informacji? Odpowiedź, na pozór prosta, nie jest jednak tak całkiem jednoznaczna.

Współcześnie mamy do czynienia z wielką różnorodnością przesyłanych informacji. Poza tradycyjnym tekstem przesyłany bywa obraz, głos oraz wielka ilość danych cyfrowych powstających we wszystkich dziedzinach życia gospodarczego i społecznego. Dodatkowym faktem mającym wpływ na bezpieczeństwo danych jest to, że, poza nielicznymi wyjątkami, są one przesyłane kanałami otwartymi: w Internecie, przez łącza telefoniczne lub w otwartej przestrzeni niesione przez fale elektromagnetyczne. Mimo całej różnorodności rodzajów przesyłanych danych i dróg ich przesyłania istnieje element wspólny, mający zasadnicze znaczenie dla metod ochrony informacji. Otóż, po odpowiednim zakodowaniu, każdy z rodzajów przesyłanych informacji może być sprowadzony do postaci cyfrowej, czyli zapisany w postaci ciągu bitów. Wszelkie algorytmy chroniące informacje mogą zatem przekształcać jeden ciąg bitów (na przykład ciąg reprezentujący zakodowany tekst) w inny ciąg bitów (powiedzmy: ten sam ciąg poddany procedurze szyfrowania). Taka możliwość zakodowania informacji doprowadziła do swoistej uniwersalizacji kryptologii: algorytmy kryptograficzne nie muszą uwzględniać cech narodowego języka szyfrowanej informacji (w przeszłości szyfr musiał uwzględniać częstotliwość występowania poszczególnych zgłosek, cechę charakteryzującą język narodowy). Można tu jeszcze wymieniać inne nowości odróżniające współczesne algorytmy kryptograficzne od historycznych, jednak najważniejszą z nich jest przyjęcie zasady, że stosowany algorytm kryptograficzny jest powszechnie znany. Algorytm taki, przekształcający jeden ciąg bitów (tekst jawny) w drugi ciąg (kryptogram) zależy od parametru, nazywanego kluczem. Zarówno do wykonania algorytmu prostego (szyfrowania), jak i algorytmu odwrotnego (odszyfrowywania) wymagana jest znajomości klucza. Czyli, jedynie posiadacz klucza (nazywanego tajnym kluczem, z racji funkcji, jaką pełni) może odszyfrować wiadomość zaszyfrowaną tym kluczem. Z drugiej strony, każdy (algorytm jest jawny) może badać własności algorytmu szyfrującego i bądź potwierdzić jego siłę, bądź też złamać algorytm, to znaczy wskazać drogę odszyfrowania tekstu w sposób inny niż to zakładali twórcy algorytmu.

Przekształcenie algorytmów kryptograficznych do postaci operacji na ciągach binarnych sprawiło, że kryptologia stała się działem matematyki. Z kolei, jawność algorytmu kryptograficznego zatarła podział kryptologii na antagonistyczne działy: kryptografię i kryptoanalizę. Dopuszczenie współczesnego algorytmu kryptograficznego do szerokiego użytku wymaga najpierw jego zapro-

jektowania (co jest rolą kryptografii) a następnie zbadania jego odporności na wszelkie możliwe ataki (tu mają pole do popisu kryptoanalitycy). Ścisłe współdziałanie obu grup badaczy (raczej: alternatywnych spojrzeń na szyfr) jest gwarancją sukcesu.

Dotychczas wspomnieliśmy o różnicach między tradycyjnym szyfrowaniem tekstów pisanych a szyfrowaniem informacji reprezentowanych binarnie. Teraz możemy wskazać także podobieństwa. Tak jak niegdyś szyfrowanie polegało na zamianie kolejności liter tekstu i podstawianiu w miejsce liter tekstu jawnego innych liter (znaków), tak i dziś większość algorytmów kryptograficznych działa na zasadzie permutacji i podstawień bitów lub sekwencji bitów (nazywanych w nawiązaniu do tradycji słowami). Reguły rządzące tymi operacjami wchodzi w skład algorytmu kryptograficznego, dodatkowo modyfikowanego przez wybór klucza (będącego ciągiem bitów o ustalonej długości). Również, podobnie jak w przeszłości, w stosunku do przesyłania informacji stosowane są usługi poufności (czyli szyfrowania), integralności (sprawienie, żeby dane po wysłaniu nie mogły zostać nielegalnie zmodyfikowane), autentyczności (potwierdzenie tożsamości nadawcy informacji) oraz niezaprzeczalności (zagwarantowanie, by nadawca nie mógł zaprzeczyć faktowi wysłania, a odbiorca — otrzymania wiadomości). Obecnie wszystkie te usługi (a nie tylko samo szyfrowanie, czyli usługa poufności) mogą być realizowane za pomocą algorytmów kryptograficznych. Ponadto, wszystkie te usługi obejmują cały przesyłany dokument, każdy jego bit (są realizowane przez funkcje, których dziedziną obejmuje wszystkie bity dokumentu), podczas gdy informacja przesyłana tradycyjnymi metodami jest, na przykład, podpisywana na ostatniej stronie i podpis jest przypisany do określonego miejsca dokumentu.

Zastosowanie zapisu binarnego i algorytmów zapewniających bezpieczeństwo przesyłanych informacji stworzyło nowe możliwości w tej dziedzinie. Pozwoliło to, z jednej strony, na burzliwy rozwój utrwalonych już sposobów przesyłania informacji, takich jak telekomunikacja, z drugiej zaś na rozwój nowych, których sztandarowym przykładem może być bankowość elektroniczna. Nie sposób tu wymienić wszystkich obszarów działalności ludzkiej związanej z przesyłaniem i przechowywaniem informacji, w których kryptograficzne usługi ochrony informacji odgrywają istotną rolę. Oprócz wspomnianych już dyplomacji i wojskowości (lub szerzej, wszelkich służb państwowych, tajnych i jawnych), nie mogłyby się bez tych usług obyć następujące dziedziny (przykłady tych dziedzin wymienimy w punktach, stosując w uzasadnionych przypadkach powszechnie stosowane nazwy angielskie):

- telekomunikacja stacjonarna i mobilna (niezbędna jest poufność i integralność danych),
- poczta elektroniczna (poufność, autentyczność),
- e-banking, e-money, e-business (najwyższy poziom bezpieczeństwa, wymagane wszystkie usługi bezpieczeństwa ze względu na bezpieczeństwo obrotu finansowego),
- sieci komputerowe i obliczenia rozproszone (w zależności od wagi i kosztu obliczeń stosowane są różne zabezpieczenia, najczęściej wykorzystujące specyficzne protokoły obliczeniowe),
- elektroniczne dokumenty (ważna autentyczność i integralność dokumentu),
- bazy danych, w tym statystyczne bazy danych (trudne zadanie: trzeba udostępnić dane legalnym użytkownikom w zaplanowanym zakresie, szybko i sprawnie, a równocześnie chronić je przed nieuprawnionym ujawnieniem, modyfikacją lub zniszczeniem),

- płatne usługi i serwisy (na przykład telewizja kodowana; naruszenie zasad dostępu wiąże się ze stratami poniesionymi przez operatora systemu).

W jaki sposób we wszystkich tych dziedzinach życia realizowane są usługi kryptograficzne przedstawimy w następnym rozdziale tego opracowania, starając się, w miarę możliwości, doprecyzować znaczenie terminów używanych dotychczas w ich potocznym znaczeniu.

3 Współcześnie stosowane usługi bezpieczeństwa i wykorzystywane w nich algorytmy

3.1 Wprowadzenie

Wspomnieliśmy, że kryptografia jest dziedziną matematyki. W istocie, jest to pewne jej zastosowanie, które korzysta z dorobku wielu tradycyjnych działów matematyki, niekiedy wpływając na znaczne ich ożywienie (jak to jest ostatnio choćby w przypadku teorii liczb). Kryptografię, czy szerzej, naukę o bezpieczeństwie informacji, można sobie wyobrazić jako piramidę, której podstawą są różne działy matematyki stanowiące bazę naukową stosowanych metod. Można do nich zaliczyć wymienioną już teorię liczb, jak również wiele innych działów matematyki, często częściowo pokrywających się: kombinatorykę, matematykę dyskretną, logikę, teorię ciał skończonych, teorię złożoności obliczeniowej czy, ostatnio, rachunek prawdopodobieństwa i statystykę matematyczną, teorię układów dynamicznych. Wyższym piętrzem piramidy są algorytmy kryptograficzne, wykorzystujące wiedzę zaczerpniętą z wymienionych działów matematyki i służące realizowaniu różnych zadań kryptograficznych. Algorytmy kryptograficzne, wykorzystywane w relacjach między stronami procesu bezpiecznej komunikacji, stanowią podstawę protokołów kryptograficznych. Protokoły (kolejny poziom, odpowiednio zaprojektowane i zestawione, składają się na usługi bezpieczeństwa (wieńczące piramidę), które wymieniliśmy już w poprzednim rozdziale, a więc poufność, integralność, autentyczność i niezaprzeczalność informacji.

W ramach tak krótkiego opracowania nie sposób w pełni przedstawić problematykę bezpieczeństwa informacji. Przedstawimy zatem kilka przykładów algorytmów kryptograficznych i ich zastosowań, aby w ten sposób wskazać wagę problemu oraz zachęcić do podjęcia badań zmierzających do rozwoju metod matematycznych (i nie tylko matematycznych) ochrony informacji.

Zacznijmy od zagadnienia w kryptografii najstarszego, a zarazem podstawowego, czyli zapewnienia poufności informacji.

3.2 Usługa poufności czyli szyfrowanie

Jak już zauważyliśmy, informacja (tekst) podlegająca szyfrowaniu to ciąg bitów, czyli zer i jedynek, często o ogromnej długości. Algorytm szyfrowania zamienia ten ciąg bitów w inny ciąg bitów, co widzimy jako zamianę każdego z bitów ciągu na bit przeciwny (0 na 1 lub 1 na 0) lub pozostawienie go bez zmiany. Sposób zmiany tych bitów stanowi o bezpieczeństwie szyfrowanej wiadomości. Jak można przedstawić ów sposób zamiany bitów tekstu jawnego (czyli naszej informacji) na kryptogram (czyli tekst zaszyfrowany)? Najprościej za pomocą ciągu bitów o tej samej długości, nazywanego strumieniem bitów i pełniącego rolę klucza. Szyfrowanie polegałoby na zamianie bitów według reguły: jeśli bit klucza jest równy 0, to odpowiadający mu bit

tekstu pozostawiamy bez zmiany, jeśli 1, to zmieniamy na przeciwny. Taka operacja, nazywana binarną operacją XOR i oznaczana symbolem \oplus , jest tożsama z dodawaniem liczb w ciele Z_2 (zawierającym dwa elementy, 0 i 1, z działaniami dodawania i mnożenia modulo 2), prowadzonym kolejno dla wszystkich par bitów. Odszyfrowywanie, czyli operacja odwrotna do szyfrowania, jest identyczne z szyfrowaniem, z tym, że przekształceniu poddajemy nie tekst jawny, a kryptogram. Tak zdefiniowana transformacja bitów jest praktycznie stosowanym szyfrem, nazywanym *szyfrem strumieniowym* lub *szyfrem Vernama* (pierwszy raz była zaproponowana w 1917 roku przez G.S. Vernama do szyfrowania treści telegramów zapisanych na papierowej taśmie perforowanej za pomocą kodu Baudota). Należy teraz zadać pytanie: czy taki prosty w swym pomysłu szyfr jak pomysł Vernama może być szyfrem dobrym? I jak rozumieć owe pozytywne cechy szyfru? Odpowiedź nie jest jednoznaczna.

Zacznijmy od zalet szyfru strumieniowego. Przede wszystkim, jest on bardzo szybki. Szyfrowanie jednego bitu ogranicza się do wykonania jednej operacji binarnej XOR. Ponadto udowodniono (Shannon), że szyfr ten jest całkowicie bezpieczny, jeśli tylko strumień klucza jest idealnym losowym ciągiem binarnym: bity z równym prawdopodobieństwem przyjmują wartości 0 i 1 oraz są od siebie statystycznie niezależne. Bezpieczeństwo to jest rozumiane w sensie *informacyjnym*, co oznacza, że szyfrogram nie dostarcza napastnikowi żadnej informacji, która pozwoliłaby go złamać, czyli odczytać zaszyfrowaną wiadomość. W dodatku jest to jedyny znany obecnie szyfr mający tę własność. O innych szyfrach możemy mówić, że są co najwyżej *bezpieczne obliczeniowo*, to znaczy wymagane zasoby (czas pracy komputera, niezbędna pamięć) niezbędne do złamania szyfru są zbyt duże, aby obecnie i w wystarczająco odległej (dla konkretnego zastosowania) przyszłości mogło nastąpić złamanie szyfru.

Opisany tu idealny szyfr Vernama, w zderzeniu z rzeczywistością, ma jednak pewną wadę. Problemem jego praktycznej realizacji jest konieczność posiadania, w dwóch miejscach (u nadawcy i u odbiorcy) tego samego losowego strumienia bitów pełniącego rolę klucza. Skąd wziąć taki ciąg? Stosunkowo łatwo uzyskać go można w jednym ustalonym miejscu, na przykład u nadawcy zaszyfrowanej informacji. Losowych bitów mogą dostarczać szumy urządzeń elektronicznych, zawartość rejestrów pracującego komputera lub inne urządzenia fizyczne, np. mierniki promieniowania. Problem powstaje, gdy chcemy taki ciąg (a pamiętamy, że ma on długość równą długości szyfrowanej informacji) przesłać w bezpieczny, czyli zapewniający tajność, sposób do odbiorcy wiadomości, który musi z kolei wykorzystać go w procesie odszyfrowywania. W przypadku stosunkowo krótkich informacji (np. depeszy dyplomatycznej) losowy strumień bitów można zapisać na dwóch taśmach magnetycznych i w bezpieczny sposób przekazać komunikującym się stronom. Co jednak zrobić, gdy przesyłamy ogromne zasoby danych w długim czasie (np. w telekomunikacji wymagana jest zdolność szyfrowania rzędu 1 GB/s przez kilka lat)? Wówczas pozostaje wytwarzanie strumienia klucza w sposób powtarzalny, to znaczy za pomocą pewnych algorytmów matematycznych możliwych do przeprowadzenia niezależnie i równocześnie w dwóch miejscach. Takie algorytmy nazywamy *generatorami liczb (bitów) losowych*, jeśli tylko uzyskany w ich wyniku strumień bitów nie może być metodami statystycznymi odróżniony od idealnego losowego ciągu bitów.

W praktyce stosowane są metody generacji strumienia bitów B wykorzystujące bardzo różnorodnie algorytmy matematyczne. Nie będziemy tu szczegółowo omawiać zagadnienia, odsyłając czytelnika do literatury, i ograniczymy się do jednego, dość ogólnego schematu. W metodzie tej najpierw ustalamy długość n ciągu (bloku) bitów, a następnie wybieramy odpowiednie

przekształcenie $\varphi(\cdot)$ odwzorowujące ciągi n -bitowe w ciągi n -bitowe, $\varphi : (Z_2)^n \rightarrow (Z_2)^n$. Następnie losujemy ciąg n bitów z_0 , nazywany ziarnem generatora, i wykonujemy kolejne iteracje funkcji φ , $z_i = \varphi(z_{i-1})$, $i = 1, 2, \dots$, wykorzystując w strumieniu bitów B uzyskane kolejno bloki z_i , wybrane z nich bity lub też, dla zwiększenia bezpieczeństwa szyfru, wynik działania nieliniowej funkcji boolowskiej (to znaczy, przyjmującej wartości z Z_2) na z_i . Jaką funkcję ϕ zastosować do generowania bitów? Nie podając konkretnych przykładów (tu ponownie odsyłamy do literatury) odpowiemy, że taką, która ma długi okres; funkcja działa w przestrzeni o skończonej liczbie elementów, więc po pewnej liczbie iteracji musi przyjąć wartość, którą już w przeszłości przyjmowała, zamykając tym samym cykl wartości. Znalezienie takiej funkcji nie zawsze jest proste, tym bardziej, że uzyskany z jej pomocą ciąg musi spełniać wszelkie kryteria losowości: niezależność bitów i zgodność z rozkładem równomiernym. W tym miejscu pojawia się problem znalezienia odpowiedniego zestawu testów statystycznych weryfikujących te własności. Nie mogą być one badane równocześnie: testy zgodności rozkładu wymagają, by próba losowa była próbą prostą (czyli złożoną z elementów niezależnych statystycznie), a badanie niezależności wymaga założeń o rodzaju rozkładu. Ponadto, każdy ciąg bitów używany w kryptografii musi być przed użyciem przetestowany, zatem testy nie mogą być zbyt długotrwałe. Na szczęście w praktyce udaje się sprostać tym wymaganiom i szyfry strumieniowe mogą bez przeszkód służyć tam, gdzie w trybie ciągłym przesyłane są duże potoki poufnych danych.

3.3 Szyfry blokowe

Kiedy już zdecydowaliśmy, że strumień bitów do szyfru Vernama będziemy wytwarzali za pomocą matematycznego algorytmu, w którym dokonuje się wielokrotnych operacji na bloku bitów, należy sobie zadać pytanie: czy nie można podobnych operacji wykonywać na blokach tekstu jawnego w taki sposób, by z otrzymanych bloków wyjściowych nie dawało się (w łatwy sposób) odgadnąć postaci bloków wejściowych? Okazuje się, że odpowiednio zaprojektowany algorytm przekształcający skończone ciągi bitów może stanowić alternatywny, bezpieczny obliczeniowo sposób szyfrowania. Jest on, z oczywistych względów, nazywany *szyfrem blokowym*.

Możemy teraz sformułować zadanie szyfrowania blokowego jako problem matematyczny. Załóżmy, że musimy zaszyfrować pewną wiadomość P (ciąg bitów o skończonej długości). W tym celu dzielimy ją na mniejsze bloki bitów P_i , $i = 1, 2, \dots, m$, każdy o długości n , w razie potrzeby uzupełniając ostatni blok losowo wybranymi bitami. Do szyfrowania każdego z bloków wykorzystujemy pewne odwzorowanie odwracalne $F(\cdot, \cdot)$ przyporządkowujące każdemu blokowi tekstu jawnego P_i blok szyfrogramu C_i . Odwzorowanie to zależy od parametru K nazywanego *tajnym kluczem* (niech będzie to ciąg k bitów), zatem może być przedstawione jako: $F(\cdot, \cdot) : (Z_2)^n \times (Z_2)^k \rightarrow (Z_2)^n$. Jak już wspominaliśmy, zgodnie z obowiązującymi obecnie zasadami, algorytm szyfru (czyli funkcja F) jest zazwyczaj powszechnie znany. Bezpieczeństwo szyfrowania, czyli uniemożliwienie nielegalnego odwrócenia funkcji F , zależy wyłącznie od zachowania poufności klucza K . Należy znów zapytać, jaka powinna być funkcja F , żeby ta zasada bezpieczeństwa mogła być spełniona? Wiadomo, że wszystkich funkcji odwzorowujących $(Z_2)^n$ w $(Z_2)^n$ jest 2^{2^n} , a odwzorowań różnowartościowych (odwracalnych) jest $2^n!$. Zaplanowanie szyfru blokowego, to wybór pewnej rodziny 2^k odwzorowań odwracalnych, numerowanych parametrem, który przyjmuje wszystkie możliwe wartości klucza K . Jak łatwo zauważyć, samo zapisanie takich funkcji może sprawiać problem, a tymczasem my oczekujemy dodatkowo, że

będą to funkcje bezpieczne kryptograficznie. Jak zatem w praktyce rozwiązywane jest zadanie konstruowania szyfrów blokowych? Dotychczas nie ma ścisłych zasad tworzenia szyfrów blokowych, są natomiast szeroko stosowane intuicyjne reguły, które funkcje używane do szyfrowania blokowego muszą spełniać. Są to zazwyczaj pary postulatów, z których każdy zapewnia realizację innej własności przekształcenia bloku bitów tekstu jawnego w blok bitów szyfrogramu.

Pierwszą taką parą warunków jest wymóg spełnienia przez przekształcenie własności *mieszania* i *rozpraszania*. Własność mieszania, zaproponowana przez Shannona, oznacza, że przekształcenie losowo i równomiernie rozprowadza bloki tekstu jawnego po zbiorze wszystkich możliwych bloków szyfrogramu (mamy tu pełną analogię z definicją mieszania wykorzystywaną w teorii dyskretnych układów dynamicznych). Rozpraszanie natomiast oznacza, że bity znajdujące się przed dokonaniem przekształcenia w bezpośrednim sąsiedztwie, po wykonaniu tego przekształcenia wpływają na bity odległe od siebie w bloku wyjściowym. Pierwszą z tych cech uzyskuje się w szyfrowaniu przez zastosowanie odpowiedniej sekwencji permutacji i podstawień, drugą przez wykorzystanie elementów nieliniowych, najczęściej tak zwanych skrzynek podstawieniowych.

Inną parą warunków jest *lawinowość* i *zupełność* szyfru. Lawinowość to żądanie, by zmiana jednego bitu w bloku tekstu jawnego wywoływała zmianę połowy bitów szyfrogramu. Zupełność z kolei, to wymóg, by istniał taki stan bloku wejściowego, w którym zmiana dowolnie wybranego bitu wejścia spowoduje zmianę wskazanego bitu wyjścia szyfru. W praktyce oznacza to, że każdy bit bloku wyjściowego (szyfrogramu) jest bardzo skomplikowaną funkcją wszystkich bitów bloku wejściowego (tekstu jawnego).

Wymagane jest również, by odwzorowanie szyfrujące spełniało warunki *dyfuzji* i *konfuzji*. W tym wypadku dyfuzja oznacza rozmycie wszelkich związków między bitami tekstu jawnego równomiernie w całym bloku kryptogramu (jest ona realizowana przez permutacje bitów). Konfuzja z kolei to maksymalne wymieszanie bitów bloku tajnego klucza z bitami bloku tekstu jawnego i uczynienie ich powiązania maksymalnie skomplikowanym.

Powyższe warunki wskazują nam, jakie własności powinno mieć odwzorowanie szyfrujące, czyli które z 2^{n2^n} możliwych odwzorowań (uwzględniając obecność klucza) $(Z_2)^n$ w $(Z_2)^n$ mogą pełnić rolę szyfru blokowego. Pozostaje jeszcze zapisanie takiego odwzorowania (jeżeli już je znamy) w możliwie prostej postaci. Oczywiście, wypisanie go w postaci tabeli nie wchodzi w grę, a nie możemy się spodziewać, że będzie ono funkcją elementarną. Jak zatem wygląda takie praktycznie stosowane przekształcenie szyfrujące? Współczesne szyfry blokowe działają w sposób iteracyjny (kaskadowy): blok wejściowy jest poddany działaniu pewnej stosunkowo prostej funkcji, nazywanej funkcją rundy; wyjście tej operacji staje się ponownie wejściem rundy (opcjonalnie z nieco zmienionymi parametrami, na przykład w każdej rundzie jest stosowany inny klucz, tzw. klucz rundowy). W różnych szyfrach iteracje wykonywane są od kilku do kilkunastu razy. Funkcja rundy z kolei zbudowana jest z kilku warstw (składających się z operacji elementarnych działających na bloki bitów: permutacji, podstawień, działań arytmetycznych modulo 2^n , XOR bitów przekształcanego bloku z bitami klucza, itp.). Każda z tych warstw ma zapewnić spełnienie przynajmniej jednego z wymienionych warunków gwarantujących jakość szyfrowania. Jak zatem widzimy, budowa takiej funkcji szyfrującej jest bardziej sztuką opartą na intuicji niż realizacją pewnego przygotowanego projektu. Dlatego też każdy szyfr blokowy przed dopuszczeniem do użycia musi być wszechstronnie przebadany. Kryptoanaliza szyfrów blokowych jest prowadzona również w czasie ich eksploatacji, prowadząc niekiedy do kompromitacji tych szyfrów lub wymuszając dokonanie modyfikacji zwiększających ich bezpieczeństwo.

Zagadnienia związane z projektowaniem szyfrów blokowych należą do klasycznych zadań kryptografii, dlatego też nie będziemy się nimi szerzej zajmować. Wspomnijmy jedynie, że bezpieczeństwo tak zaprojektowanych szyfrów jest bezpieczeństwem obliczeniowym. Uznaje się zatem, że szyfr jest bezpieczny, jeśli jest odporny na wszystkie znane ataki w stopniu gwarantującym nieopłacalność lub praktyczną niemożność przeprowadzenia takich ataków. Badanie przeprowadzane jest przez projektowanie ataków i szacowanie nakładów obliczeniowych niezbędnych do ich przeprowadzenia. Próba zbadania odporności na wszelkie (również nieznanne) ataki jest badaniem statystycznym szyfrów blokowych. Jeśli kryptogramy opuszczające szyfr blokowy są niemożliwe do odróżnienia od idealnych ciągów losowych (przypomnijmy, że taką cechę mają kryptogramy powstające w idealnym szyfrze Vernama), to możemy się spodziewać, że ten szyfr będzie trudny do złamania wszelkimi metodami. Stąd konieczność opracowywania coraz doskonalszych testów statystycznych dostosowanych do potrzeb kryptografii.

3.4 Bezpieczne obliczenia sieciowe

Znamy już metody przesyłania danych w sposób poufny, zarówno korzystające z trybu strumieniowego, jak i blokowego. Pozostaje tu jeszcze do rozwiązania podstawowy problem: w szyfrach strumieniowych obie komunikujące się strony powinny mieć to samo ziarno generatora bitów pseudolosowych, a w trybie blokowym — klucz, obie wielkości, dla zagwarantowania poufności szyfrów, tajne dla postronnych. Czy można sprawić, by dwie osoby, posługując się otwartym kanałem komunikacyjnym (obecnie: korzystając z sieci komputerowej), mogły wspólnie ustalić tajny klucz sesyjny (czyli ciąg bitów o ustalonej długości)? Zanim odpowiemy na to pytanie, zajmijmy się zagadnieniem prostszym, dotyczącym wspólnego ustalenia wartości jednego bitu.

Zagadnienie takie, odpowiadające losowaniu z pomocą rzutu monetą na odległość, nosi nazwę protokołu *zobowiązania bitowego*. Wyobraźmy sobie, że dwie osoby, A i B, chcą wspólnie ustalić losową wartość bitu w taki sposób, że:

- Strona A wybiera losowo wartość bitu.
- Po dokonaniu wyboru, A nie może już zmienić wartości tego bitu.
- Strona B może poznać wartość tego bitu jedynie za zgodą strony A.

Protokół zobowiązania bitowego może być zrealizowany w następujących krokach (zachowana jest tu symetria komunikujących się stron):

- Strona B generuje losowy ciąg bitów R_B i wysyła do A.
- Strona A generuje losowy ciąg bitów R_A i wysyła do B.
- A wybiera bit b_A i generuje losowy klucz K_A . Następnie szyfruje ciąg $P_1 = \{R_B \| b_A\}$ kluczem K_A i wysyła kryptogram $C_A = F(P_1, K_A)$ do B (dwuargumentowa operacja konkatenacji, oznaczona przez $\|$, polega na połączeniu dwóch ciągów bitów przez ich kolejne zapisanie).
- B wybiera bit b_B i generuje losowy klucz K_B . Następnie szyfruje ciąg $P_2 = \{R_A \| b_B\}$ kluczem K_B i wysyła kryptogram $C_B = F(P_2, K_B)$ do A. B wysyła klucz K_B do A.

- A odszyfrowuje kluczem K_B kryptogram C_B otrzymując ciąg $P_2 = \{R_A \| b_B\}$. Sprawdza zgodność R_A i uzyskuje b_B .
- A wysyła klucz K_A do strony B.
- B odszyfrowuje kluczem K_A kryptogram C_A otrzymując ciąg $P_1 = \{R_B \| b_A\}$. Sprawdza zgodność R_B i uzyskuje b_A . Obie strony obliczają bit losowy b z wzoru $b = b_A \oplus b_B$.

Warunkiem bezpieczeństwa tego protokołu (to znaczy zapewnienia uczciwości wyniku) jest, by w zastosowanym odwzorowaniu szyfrującym $F(\cdot, \cdot)$ dla każdego klucza K prawdopodobieństwo istnienia takiego klucza K' , że dla $R = R_A$ lub $R = R_B$, $F(\{R \| b\}, K) = F(\{R \| b \oplus 1\}, K')$, było bardzo małe.

Przedstawiony algorytm zobowiązania bitowego dotyczy elementarnego zadania dotyczącego uzgodnienia jednego tylko bitu, jednak jego przeprowadzenie wymaga zastosowania dość skomplikowanej metody, jaką jest szyfrowanie blokowe. Ponadto w metodzie tej wykorzystano randomizację przez użycie losowych ciągów bitów R_A i R_B , co w tym wypadku jest niezbędne dla zapewnienia bezpieczeństwa (obliczeniowego) algorytmu. Okazuje się, że również takie zadanie jak przesłanie w sposób tajny ustalonej wartości jednego bitu (czyli mówiąc wprost: zaszyfrowanie pojedynczego bitu) może być wykonane za pomocą metody randomizacji (przesyłany bit jest jednym z bitów losowego ciągu bitów). Odpowiednie rozwinięcie metod zrandomizowanego szyfrowania doprowadziło do sformułowania koncepcji *udowodnialnego bezpieczeństwa*. Mówimy, że algorytm kryptograficzny jest udowodnialnie bezpieczny, jeżeli można pokazać z dostatecznie dużym prawdopodobieństwem, że nie istnieje atak na ten algorytm o złożoności obliczeniowej mniejszej niż ustalona wielkość (zależna od pewnego parametru tego algorytmu, takiego jak długość bloku i długość klucza). Nakład pracy niezbędny do złamania algorytmu powinien wzrastać wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiaru tego parametru. Zatem wraz ze wzrostem możliwości obliczeniowych potencjalnego napastnika można tak zmodyfikować algorytm (na przykład, zwiększając odpowiednio długość klucza), by nadal pozostawał on bezpieczny obliczeniowo.

Wróćmy jednak do naszego wyjściowego zagadnienia uzgodnienia klucza sesyjnego. Odrzucając, jako zbyt pracochłonną, możliwość uzgadniania klucza sesyjnego bit po bicie za pomocą protokołu zobowiązania bitowego (tak zmodyfikowanego, by gwarantował poufność), musimy posłużyć się inną metodą. Może nią być, na przykład, *protokół uzgodnienia klucza Diffie–Hellmana*. Protokół taki pozwala obliczyć w sposób poufny (wynik znają tylko strony wykonujących obliczenie) i kolektywny (obie strony uczestniczą w obliczeniu na równych prawach) wspólną wartość elementu należącego do pewnej grupy skończonej. Grupą taką może być, na przykład, zbiór Z_n z operacją dodawania modulo n lub punkty krzywej eliptycznej nad ciałem Z_p z odpowiednio zdefiniowanym dodawaniem punktów (zainteresowani szczegółami powinni sięgnąć do współczesnych książek z kryptografii). Przedstawimy przykład protokołu uzgodnienia klucza w grupie adytywnej E ; w stosowanym zapisie przez mnożenie liczby naturalnej k przez element P grupy E będziemy rozumieli k -krotne dodawanie tego punktu. Uzgodnienie klucza między stronami A i B przebiega w następujących krokach:

- Strony wybierają wspólny element P grupy E .
- Strona A wybiera dużą liczbę naturalną c (tajną).

- Strona B wybiera dużą liczbę naturalną d (tajna).
- A oblicza cP i przesyła cP do B.
- B oblicza dP i przesyła dP do A.
- Strony wspólnie obliczają $Q = cdP$ (tajne).
- Informacja jawna: grupa E , element P , element cP , element dP .
- Wspólny sekret (uzgodniony klucz) jest równy $Q = cdP$.

Podobny protokół można skonstruować w grupie multiplikatywnej; wówczas mnożenie elementu grupy przez liczbę należy zastąpić przez potęgowanie elementu, czyli jego wielokrotne mnożenie przez siebie. Bezpieczeństwo protokołu Diffie–Hellmana wynika z faktu, że w grupie skończonej E , w której nie istnieje naturalny porządek, nie jest możliwe obliczenie wartości liczby c na podstawie znajomości elementu cP (elementu P^c w grupie multiplikatywnej) i elementu P .

W sytuacjach, gdy prowadzona jest bezpieczna komunikacja między n uczestnikami A_i , $i = 1, 2, \dots, n$, (telekonferencja, rozsyłanie poufnych dokumentów do wielu odbiorców, itp.), konieczne jest uzgodnienie klucza między wielu stronami. W tym celu można zastosować, na przykład, *protokół generowania klucza Justa–Vaudenaya*. Może być w nim wykorzystany protokół Diffie–Hellmana w ciele skończonym (wymagana jest tu możliwość obliczania elementu odwrotnego, czyli „dzielenia” elementów ciała skończonego) do generacji klucza między każdą parą uczestników o przypisanych im sąsiednich numerach. Realizacja protokołu przebiega w następujących krokach:

- W protokole uczestniczy n uczestników, A_i , $i = 1, 2, \dots, n$; przyjmujemy, że $A_0 \equiv A_n$, $A_{n+1} \equiv A_1$.
- Każda para uczestników (A_i, A_{i+1}) generuje wspólny klucz K_i , $i = 1, 2, \dots, n$.
- Uczestnik A_i , $i = 1, 2, \dots, n$ posiada dwa klucze: K_i oraz K_{i-1} , przy czym $K_0 \equiv K_n$.
- Uczestnik A_i , $i = 1, 2, \dots, n$ oblicza liczbę $R_i = K_i/K_{i-1}$ i wysyła wynik do wszystkich pozostałych stron protokołu.
- Każdy uczestnik jest w posiadaniu wszystkich R_i , $i = 1, 2, \dots, n$.
- Każdy uczestnik A_i , $i = 1, 2, \dots, n$ oblicza (indeksy są przyjmowane cyklicznie modulo n).
- $$K = K_{i-1}^n R_i^{n-1} R_{i+1}^{n-2} \dots R_{i-3}^2 R_{i-2} = K_{i-1}^n \frac{K_i^{n-1}}{K_{i-1}^{n-1}} \frac{K_{i+1}^{n-2}}{K_{i-1}^{n-2}} \dots \frac{K_{i-3}^2}{K_{i-4}^2} \frac{K_{i-2}}{K_{i-3}} =$$

$$= K_1 K_2 \dots K_n.$$
- K jest wspólnym tajnym kluczem stron protokołu A_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

Obliczenie wspólnej wartości tajnego klucza nie jest jedynym zastosowaniem bezpiecznych obliczeń sieciowych. Podobne protokoły mogą być użyte w innych praktycznych zagadnieniach, w których uczestniczy wiele stron, na przykład w głosowaniach, kolektywnym podejmowaniu decyzji czy po prostu wykonywaniu operacji arytmetycznych. Wspólnym wymogiem tych protokołów jest, by zapewniały one spełnienie takich kryteriów jak: *poufność* (wynik może być poznany jedynie przez uczestników protokołu), *kolektywność* (wszyscy uczestnicy mają równe prawo do poznania wyniku i równy wkład w jego uzyskanie), *uczciwość* (żaden z uczestników nie powinien zniweczyć kolektywnego wysiłku przez decydujący wpływ na końcowy wynik lub sekretne uniemożliwienie wykonania zadania), *poprawność* (wynik powinien być jednoznaczny i zgodny z przebiegiem algorytmu) i *efektywność* (algorytm powinien być możliwy do wykonania w wyznaczonym czasie i przy wykorzystaniu wskazanych środków). Ponadto, dobrze jest, jeśli algorytm jest *weryfikowalny*, to znaczy każdy z uczestników lub zaufana trzecia strona mogą sprawdzić poprawność wyniku i uczciwość wszystkich uczestników protokołu.

3.5 Algorytmy niesymetryczne

Uzgadnianie klucza jest procedurą skomplikowaną, wymagającą wymiany informacji między stronami i trudną do weryfikacji. Czy nie prościej byłoby samemu wygenerować klucz sesyjny i w bezpieczny sposób przesłać do odbiorcy? Wyobraźmy sobie następujący sposób postępowania. Nadawca (nazwijmy go stroną A) generuje klucz sesyjny. Następnie prosi odbiorcę informacji (stronę B) o zaproponowanie sposobu zaszyfrowania tego klucza. B wysyła do A otwartym kanałem komunikacyjnym swój klucz, nazwany kluczem publicznym, który umożliwia zaszyfrowanie klucza sesyjnego w taki sposób, że jedynie właściciel klucza publicznego (w tym wypadku — B) potrafi tę wiadomość odczytać. Dlaczego jest to możliwe? Ponieważ strona B posiada drugi klucz, tak zwany klucz prywatny, stanowiący parę z kluczem publicznym, pozwalający dokonać operacji odwrotnej do przeprowadzonej przez A operacji szyfrowania. W celu przeprowadzenia takiej operacji przesłania klucza potrzebny jest jednak specjalny algorytm szyfrowania asymetrycznego, w którym praktycznie każdy (klucz publiczny może być powszechnie znany) może informacje zaszyfrować, jednak informacja ta może być odszyfrowana jedynie przez posiadacza klucza prywatnego. W latach siedemdziesiątych dwudziestego wieku udało się skonstruować algorytmy tego rodzaju; wykorzystują one trudne obliczeniowo zagadnienia matematyczne, na przykład problem faktoryzacji (rozkładu na czynniki pierwsze) dużych liczb naturalnych lub problem obliczenia logarytmu dyskretnego (czyli znalezienia, dla danego b , $0 < b < p$, takiej liczby i , że $a^i = b \pmod{p}$). Jako przykład rozważmy system *szyfrowania asymetrycznego*, opracowany przez Rona Rivesta, Adi Shamira i Leonarda Adlemana w 1977 roku i nazwany od ich nazwisk *RSA*. Jest to najszerzej obecnie stosowany algorytm (amerykańska norma FIPS podaje go jako standard systemu klucza publicznego), umożliwiający stosowanie dowolnie długiego klucza, a więc zapewniający poziom bezpieczeństwa dostosowany do potrzeb każdego użytkownika.

Algorytm klucza publicznego RSA, jak zresztą każdy algorytm tego typu, składa się z dwóch kroków. Pierwszym z nich jest generowanie pary kluczy; klucza publicznego i klucza prywatnego. Czynność ta może być wykonana przez właściciela klucza prywatnego, jeśli RSA ma służyć jedynie jego prywatnym potrzebom, lub też przez zaufaną trzecią stronę, czyli autoryzowany urząd (*Urząd Certyfikacji*) wchodzący w skład *infrastruktury klucza publicznego*, jeśli klucze te mają

służyć świadczeniu usług bezpieczeństwa, takich jak *autentyczność* czy *niezaprzeczalność* informacji.

Generowanie pary kluczy w RSA polega na wykonaniu następujących czynności:

- Weź dwie duże liczby pierwsze p i q .
- Oblicz ich iloczyn $n = pq$, nazywany modułem algorytmu.
- Wybierz liczbę e , mniejszą niż n i względnie pierwszą z $(p-1)(q-1)$.
- Oblicz d będące odwrotnością liczby e modulo $(p-1)(q-1)$, to znaczy: $ed \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$.
- e jest publicznym wykładnikiem RSA.
- d jest prywatnym wykładnikiem RSA.
- Para liczb (n, e) jest *kluczem publicznym RSA*.
- Czynniki p i q muszą pozostać tajne (mogą być zniszczone po obliczeniu d).
- Para liczb (n, d) jest *kluczem prywatnym RSA*.

Bezpieczeństwo algorytmu RSA oparte jest na trudności faktoryzacji dużej liczby n (w praktyce korzysta się z liczb posiadających kilka tysięcy cyfr). Algorytm ten ma zastosowanie do szyfrowania wiadomości, co umożliwia na przykład bezpieczne przesyłanie klucza sesyjnego, oraz do potwierdzenia autentyczności. Nie ma praktycznego zastosowania w poufnym przesyłaniu długich tekstów, ponieważ jest znacznie wolniejszy od symetrycznych szyfrów blokowych i strumieniowych. Operacja szyfrowania w RSA polega na wykonaniu następujących działań:

- A chce wysłać wiadomość M do B z zachowaniem poufności.
- Korzystając z klucza publicznego (n, e) należącego do B, A tworzy kryptogram wiadomości postaci $C = M^e \pmod n$.
- B, posiadający swój klucz prywatny (n, d) , odszyfrowuje wiadomość otrzymaną od A obliczając $M = C^d \pmod n$.

Poprawność konstrukcji systemu RSA, czyli wzajemna odwracalność operacji szyfrowania i odszyfrowywania wynika z następującego twierdzenia Eulera: „Jeżeli $\text{NWD}(a, n) = 1$, to $a^{\varphi(n)} \equiv 1 \pmod n$ ” i z faktu, że dla $n = pq$ (iloczynu liczb pierwszych), $\varphi(n) = (p-1)(q-1)$. ($\varphi(n)$ oznacza wartość funkcji Eulera dla n , to znaczy liczbę takich liczb całkowitych a , $1 < a < n$, że $\text{NWD}(a, n) = 1$). Mamy bowiem $ed = 1 + x(p-1)(q-1) = 1 + x\varphi(n)$, zatem $M^{ed} = M \cdot M^{x\varphi(n)} = M \cdot (M^{\varphi(n)})^x = M \cdot 1^x \pmod n$, co dowodzi odwracalności algorytmu RSA. Algorytm RSA może służyć także do zapewnienia usługi autentyczności, a w połączeniu z zastosowaniem znacznika czasowego i wykorzystaniem certyfikatów odpowiednich urzędów, do usługi niezaprzeczalności. *Podpis cyfrowy*, bo o nim tu mówimy, może pełnić w stosunku do dokumentu elektronicznego wszystkie te funkcje, jakie pełni podpis odręczny na dokumencie papierowym, a ponadto zapewniać *integralność* dokumentu elektronicznego (czyli gwarantować, że

żaden fragment tego dokumentu nie został zmieniony po jego podpisaniu). Usługę integralności można zrealizować dzięki temu, że obliczona wartość podpisu cyfrowego jest funkcją wszystkich bitów dokumentu. W przypadku dokumentów bardzo długich podpisana jest wartość bezpiecznej kryptograficznie funkcji skrótu policzonej dla tego dokumentu. (*Funkcja skrótu* jest to odwzorowanie, które przekształca cały dokument binarny w ciąg bitów o ustalonej długości, np. 1024; bezpieczeństwo tej funkcji polega na tym, że dla ustalonej wartości funkcji skrótu obliczonej dla danego dokumentu jest praktycznie niemożliwe znalezienie innego dokumentu dającego tę samą wartość funkcji skrótu). Podpis cyfrowy jest realizowany za pomocą algorytmu RSA w następujących krokach:

- B chce wysłać podpisaną dokument M do A tak, aby zagwarantować jego autentyczność.
- B tworzy podpis cyfrowy $S = M^d \bmod n$ dokumentu M korzystając ze swojego klucza prywatnego (n, d) (dla długiego dokumentu, B podpisuje wartość funkcji skrótu $H(M)$).
- B wysyła do A parę dokumentów S i M .
- Wykorzystując klucz publiczny (n, e) nadawcy wiadomości, A oblicza $M' = S^e \bmod n$ (odpowiednio: $H'(M)$).
- W celu sprawdzenia autentyczności otrzymanej wiadomości, A porównuje obie wartości M i M' (oblicza $H(M)$ i porównuje z $H'(M)$).

Kończąc opis zastosowań algorytmu RSA w usługach bezpieczeństwa warto zauważyć, że RSA może być również wykorzystywane jako bezpieczny kryptograficznie (to znaczy nieprzewidywalny) generator liczb losowych, mający zastosowanie do tworzenia losowych kluczy sesyjnych. Generowanie liczb losowych metodą RSA przebiega w następujących krokach:

- Generujemy dwie duże liczby pierwsze p i q .
- Obliczamy moduł $n = pq$.
- Obliczamy wartość funkcji Eulera $\varphi(n) = (p - 1)(q - 1)$.
- Wybieramy losowo liczbę e z przedziału $1 < e < \varphi(n)$ tak, aby było $\text{NWD}(e, \varphi(n)) = 1$.
- Wybieramy ziarno X_0 . Dla $i = 1, 2, \dots$, generujemy ciąg liczb pseudolosowych $X_i = X_{i-1}^e \bmod n$. W celu zwiększenia bezpieczeństwa kryptograficznego generatora, do ciągu bitów klucza włącza się po jednym najmłodszym bicie z każdej wygenerowanej liczby losowej.

4 Perspektywy przyszłych badań

4.1 Paradoksy i sprzeczności w kryptografii

Informacja o stanie wiedzy w zakresie kryptograficznych metod ochrony informacji, rysująca jedynie podstawowe przykłady stosowanych metod, mogłaby sugerować, że najważniejsze problemy zostały już rozwiązane i istniejące algorytmy są w stanie zagwarantować wypełnienie podstawowych usług: poufności, autentyczności, niezaprzeczalności i integralności danych. Przedstawiony obraz jest jednak zmałowany przez fakt, że corocznie zwiększa się moc obliczeniowa

komputerów, którymi mogą dysponować również potencjalni napastnicy, zatem algorytm, który dzisiaj jest bezpieczny obliczeniowo, w niedalekiej przyszłości traci tę cechę. Powstaje konieczność, jeśli to możliwe, zwiększenia długości stosowanego klucza w dotychczasowym algorytmie (np. w RSA; tu powstaje potrzeba szybkiego znajdowania dużych losowych liczb pierwszych) lub opracowania nowego algorytmu (tak jest w przypadku szyfrów blokowych). Jednak zmagania obrońców poufności informacji z napastnikami nie są jedyną sprzecznością tkwiącą w metodach kryptograficznych. Znacznie poważniejsze problemy, mające swe konsekwencje w opracowywanych algorytmach i pozostawiające pole do popisu dla przyszłych badaczy, tkwią w sprzecznych wymaganiach, jakie muszą spełniać algorytmy kryptograficzne.

Pierwsza sprzeczność występuje już w podstawowej usłudze kryptograficznej, jaką jest zapewnienie poufności przesyłanych danych. Równie ważną cechą transmisji danych jest poprawność tej transmisji, czyli sprawienie, by otrzymana informacja nie zawierała błędów. Nie jest możliwe wyeliminowanie wszelkich zakłóceń w przesyłaniu ciągów binarnych, dlatego też stosowane są takie *kodowania* przesyłanych danych (to znaczy zapisu w postaci binarnej), które umożliwiają naprawę pewnych niewielkich błędów w otrzymanej informacji — stosowane tu mogą być *kody korygujące błędy*. Problem w tym, że taki kod przenosi więcej informacji niż jest to niezbędne, a zatem jest *kodelem nadmiarowym* (ten nadmiar informacji pozwala na korekcję błędów zapisu). Z drugiej strony, zgodnie z teorią Shannona, wszelki nadmiar informacji w przesyłanej wiadomości, nawet gdy jest ona zaszyfrowana, stanowi ułatwienie dla napastnika pozwalające złamać szyfr użyty do zapewnienia poufności danych. Projektant systemu komunikacyjnego staje tu przed niełatwym problemem pogodzenia obu wskazanych oczekiwań użytkownika.

Jeśli już mówimy o ujawnieniu treści poufnej informacji w sposób nie przewidziany przez twórców algorytmu szyfrującego (do takich należy przypadek złamania szyfru przez napastnika), warto wspomnieć o następującym ważnym problemie. Jak wiadomo, w wielu państwach dopuszczana jest możliwość, po wypełnieniu przewidzianych prawem procedur, kontrolowania treści przesyłanych informacji przez uprawnione władze. Powstaje teraz problem, jak zapewnić realizowanie tego wymogu w sytuacji, gdy informacje są szyfrowane a stosowane szyfry są trudne do złamania? Podobny problem powstaje, gdy sam właściciel traci tajny klucz (gubi, klucz jest zniszczony przypadkowo albo w wyniku przestępstwa), bądź też ulega awarii system szyfrowania dysków komputerowych. W celu zagwarantowania możliwości odczytania zaszyfrowanych informacji niezbędne jest zastosowanie kryptografii kontrolowanej, czyli warunkowego umożliwienia ujawnienia szyfrowanych danych lub odzyskanie tajnego klucza. Obecnie przewiduje się wykorzystanie trzech systemów kryptografii kontrolowanej. Są to:

- depozyt kluczy, czyli przekazanie kluczy do depozytu z narzuceniem warunku, że ich wydanie uprawnionym osobom może nastąpić w ściśle określonych okolicznościach,
- odtworzenie kluczy, czyli zapewnienie możliwości odtworzenia klucza na podstawie informacji dołączanej do szyfrowanej wiadomości (pliku) lub połączenia,
- wykorzystanie zaufanej trzeciej strony, czyli kryptografia wykorzystująca zarządzanie kluczami przez zaufaną trzecią stronę.

Wszystkie te proponowane systemy mają pewne cechy zapewniające ich przydatność w różnych obszarach zastosowań. Na przykład, kryptografia kontrolowana z depozytem kluczy jest odpowiednia w sytuacji, gdy niezbędna jest deszyfracja w czasie rzeczywistym kryptogramu (np.

rozmowy telefonicznej lub transmisji danych), najczęściej na żądanie władz sądowych. Systemy z dołączaniem informacji o kluczu mogą być użyteczne w transmisji danych w przedsięwzięciach biznesowych, pełniąc rolę zapasowego dostępu do danych. Proponowane systemy kryptografii kontrolowanej spełniać dodatkowo powinny pewne funkcje bezpieczeństwa, których nie mają tradycyjne kryptosystemy. Są to:

- odporność systemu na nadużycia ze strony użytkowników (np. zgłoszenie fałszywego klucza, zmiany w urządzeniach po zgłoszeniu),
- odporność na nadużycia ze strony służb uprawnionych (nielegalny podsłuch),
- elastyczność systemu ze względu na zmiany intensywności wykorzystania,
- elastyczność ze względu na włączone aplikacje (różnorodność produktów kryptograficznych),
- możliwość odpowiedniego reagowania przez uprawnione służby (deszyfracja w czasie rzeczywistym, archiwizacja, itp.).

W systemach kryptografii kontrolowanej widoczna jest sprzeczność pomiędzy tajnością a możliwością śledzenia przesyłanych informacji. Podejmowane były próby rozwiązania tej sprzeczności, jednak często kończyły się one niepowodzeniem (na przykład wprowadzenie i wycofanie *Clipper Chip*, rozwiązanie sprzętowego mającego zapewnić możliwość kontroli przez władze amerykańskie przesyłanych tajnych informacji). Zagadnienie to ciągle wymaga skutecznych rozwiązań, tym bardziej, że stosowane niegdyś ograniczenia eksportowe zaawansowanych technologii informatycznych okazały się całkowicie nieskuteczne (algorytmy matematyczne nie mogły być skutecznie opatentowane i chronione) i obecnie każdy może mieć dostęp do najsilniejszej nawet kryptografii.

Kolejną sprzecznością powstającą w trakcie stosowania usług kryptograficznych jest zapewnienie realizacji tych usług (a więc szyfrowania danych, potwierdzanie operacji, czyli realizacja usługi autentyczności, itd.) przy równoczesnym zapewnieniu wystarczającej szybkości transmisji danych. Mimo iż szybkość komputerów realizujących te usługi (np. szyfrowanie) rośnie bardzo szybko, to jeszcze szybciej zwiększa się ilość przesyłanych danych. Można wskazywać przykłady wielu różnych dziedzin, w których wymagana jest transmisja dużych strumieni poufnych danych (dobrym przykładem jest tu obraz uzyskiwany przez kamery z coraz większą rozdzielczością i lepszą jakością kolorów). W zilustrowaniu powstających trudności posłużymy się przykładem operacji finansowych. Niech to jednak nie będzie przepływ dokumentów bankowych (taki przepływ zwykle odbywa się w wewnętrznej sieci banku i rządzi się własnymi prawami), a operacje płatności elektronicznych odbywające się na styku wewnętrznego systemu bankowego i otwartej sieci udostępnionej dla klientów. Załóżmy, że posiadacz konta w e-banku (karty płatniczej) dokonuje zakupu w sklepie (także w sklepie internetowym). W takiej sytuacji, w celu zrealizowania płatności elektronicznej, muszą być zaangażowane następujące strony:

- kupujący (właściciel karty),
- wystawca (emitent) karty,

- instytucja obsługująca kartę płatniczą,
- sprzedawca,
- instytucja pośrednicząca (najczęściej bank),
- punkt certyfikacji (weryfikujący właścicieli kart i sprzedawców),
- serwer płatności (obsługujący dane przesyłane przez instytucję pośredniczącą).

Jak widać, operacja płatnicza generuje intensywny ruch w sieci między wskazanymi stronami, przy czym każda przesyłana informacja (odnosząca się przecież do przenoszenia praw majątkowych i podejmowania zobowiązań finansowych przez uczestniczące strony) musi spełniać wymogi poufności, autentyczności i niezaprzeczalności. Może się zatem okazać, że przy niewielkiej kwocie transakcji, koszt jej obsługi jest znacznie większy niż wartość samej operacji. Rozwiązaniem takiego problemu może być wyemitowanie przez bank elektronicznej gotówki, czyli odpowiednio zabezpieczonych ciągów binarnych, które przesyłane między stronami operacji (zgodnie z wymogami odpowiednio zaplanowanych *protokołów emisji, pobrania gotówki, płatności, depozytu i wydania reszty*) mogą pełnić taką samą rolę, jak tradycyjna gotówka i czeki gotówkowe. Jednak nawet w trakcie realizacji płatności elektroniczną gotówką mogą pojawić się zatory w transmisji danych, wynikające choćby ze specyfiki działania Internetu. Kiedy bowiem posiadacz elektronicznego banknotu zechce go wykorzystać do opłacenia dostępu do płatnych stron witryny internetowej, w której każde otwarcie pliku lub obrazu opłacane jest groszową kwotą pobieraną natychmiast po wykonaniu operacji, zastosowanie bezpiecznego protokołu płatności (zakładającego informowanie banku o każdej transakcji) mogłoby doprowadzić do zablokowania sieci. Potrzebny jest tu protokół mikropłatności, który będzie umożliwiał wydawanie drobnych monet z posiadanego banknotu cyfrowego bez każdorazowego absorbowania banku-emitenta, a równocześnie gwarantujący uczciwość kontrahenta (jednorazowe użycie każdej z monet i nie przekroczenie limitu, jakim jest wartość banknotu). Jak widać, w dziedzinie wykorzystania elektronicznego pieniądza w obecnych i przewidywanych zastosowaniach jest jeszcze wiele problemów do rozwiązania.

W związku z dokonywaniem elektronicznych transakcji finansowych musimy jeszcze wspomnieć w tym miejscu o problemie pojawiającym się w wyniku wprowadzenia inteligentnych kart chipowych, czyli o konieczności umieszczenia programów realizujących odpowiednie algorytmy kryptograficzne w ograniczonej pamięci tych kart. Powstaje tu problem optymalizacji kodów, a ponadto potrzeba wykorzystania takich algorytmów kryptograficznych, które w całości mogą być zrealizowane w układzie procesorowym karty. To wykonywanie obliczeń w karcie (na przykład w czasie identyfikacji posiadacza karty zlecającego systemowi bankowemu dokonanie przelewu) gwarantuje zapewnienie bezpieczeństwa informacji i chroni posiadacza konta przed nadużyciami ze strony pracowników banku. Zagrożeniem, podobnie jak w przypadku protokołów elektronicznej gotówki, jest dokonywanie nielegalnych operacji przez uprawnione strony wykonywanych procesów informacyjnych. Warto zatem zwrócić uwagę na istniejące (i spodziewane w przyszłości) możliwości przeciwdziałania nielegalnym oddziaływaniom na system przez użytkowników, projektantów, wykonawców i zarządzających.

4.2 Czynniki ludzkie w bezpieczeństwie informacji

Wieloletnie obserwacje wszelkich nadużyć powstałych w systemach informacyjnych prowadzących do utraty ich bezpieczeństwa pokazują, że podstawowym ich źródłem są celowe działania i błędy osób odpowiedzialnych za prawidłowe ich funkcjonowanie. Zapewnienie bezpieczeństwa tych systemów powinno zatem polegać również na stosowaniu takich algorytmów i procedur, w których rola człowieka jest zminimalizowana lub wręcz całkowicie wyeliminowana. Tak więc system komputerowy powinien automatycznie generować klucze, klucze powinny być przechowywane w miejscach niedostępnych dla użytkowników i, najlepiej, powinny nigdy nie być ujawniane. Wszelkie niezbędne procedury testujące algorytmy i urządzenia kryptograficzne (stanowiące w istocie metodę ich dogłębnej analizy, a więc, przy niewłaściwym użyciu osłabiające bezpieczeństwo) powinny być prowadzone w sposób automatyczny, tak, by pośrednie wyniki testów nie mogły posłużyć do kryptoanalizy testowanych zabezpieczeń. Użytkownik powinien uzyskiwać jedynie odpowiedź potwierdzającą poprawność lub negującą przydatność badanej metody. Również stosowane implementacje algorytmów kryptograficznych muszą gwarantować, że ich wykonanie może przebiegać wyłącznie zgodnie z projektem, czyli że nie zawierają w sobie niejawnych uproszczeń („tylnych wejść”, czyli opcji pozwalających na ich wykonanie lub kryptoanalizę w uproszczony sposób lub „koni trojańskich”, podprocedur wykonujących nielegalne operacje). Spełnienie wszelkich tych wymogów wymaga opracowywania nowych algorytmów kryptograficznych i nowych metod weryfikacji kodu wykonywalnego.

W dotychczasowych rozważaniach pisaliśmy o powszechnie stosowanych dwóch podstawowych rodzajach systemów kryptograficznych, to znaczy kryptosystemach klucza publicznego, gdzie podstawą bezpieczeństwa jest utrzymanie w tajemnicy jednego tajnego klucza niezbędnego do szyfrowania i odszyfrowywania wiadomości, oraz kryptosystemach klucza publicznego, w których używana jest para kluczy: jawny klucz publiczny (szyfrowanie) oraz tajny klucz prywatny (odszyfrowywanie). Oba te systemy są podatne na nadużycie polegające na ujawnieniu tajnego klucza. Okazuje się, że te dwa systemy nie wyczerpują wszystkich możliwości zapewnienia poufności danych. Można bowiem tak zaplanować strukturę dostępu do danych, że klucz albo nie jest nigdy ujawniany (nie tylko jest tajny, ale legalny użytkownik nigdy go nie pozna) albo też jest rozproszony między wielu użytkowników w taki sposób, że żaden z nich nie może tego klucza poznać. Przedstawimy teraz w skrócie te alternatywne metody zapewnienia bezpieczeństwa danych.

4.3 Inne systemy kryptograficzne

Jedną z metod służącą do bezpiecznego uwierzytelnienia może być dowód z wiedzą zerową. Metody tego rodzaju zostały zaproponowane w połowie lat osiemdziesiątych. Są one szczególnie przydatne do potwierdzania kart kredytowych, kart identyfikacyjnych, itp., czyli wszędzie tam, gdzie istnieje zagrożenie utraty poufności hasła w wyniku przesłania go do zewnętrznego urządzenia. Dowody takie wykorzystują na ogół *algorytmy probabilistyczne*, to znaczy takie, w których poprawny wynik jest uzyskiwany z dowolnie dużym prawdopodobieństwem, jednak nie gwarantującym stuprocentowej pewności. Często są w nich stosowane funkcje skrótu (nazywane niekiedy funkcjami jednokierunkowymi lub szyframi jednokierunkowymi, ponieważ nie jest możliwe policzenie ich odwrotności).

Dowód z wiedzą zerową jest protokołem, w którym strona A ma przekonać stronę B, że pewne stwierdzenie jest prawdziwe. Taki protokół musi spełniać trzy warunki:

- Jeśli stwierdzenie A jest prawdziwe, B powinien je zaakceptować.
- Jeśli stwierdzenie A jest fałszywe, B powinien odrzucić dowód niezależnie od postępowania A w trakcie dowodu.
- W trakcie realizacji protokołu, B otrzymuje jedynie informację, że stwierdzenie A jest prawdziwe.

Dotychczas opracowano szereg efektywnych algorytmów realizujących protokół dowodu z wiedzą zerową. Są to, między innymi, protokół Fiata–Shamira (1986), protokół Feige–Fiata–Shamira (1988) i protokół Guillou–Quisquatera (1988). Jako przykład zaprezentujemy pierwszy z nich. Realizacja protokołu składa się z dwóch etapów. Pierwszy polega na przygotowaniu danych niezbędnych do realizacji protokołu, drugi to etap weryfikacji. Do realizacji protokołu niezbędne jest wykorzystanie urzędu certyfikacji, czyli zaufanej trzeciej strony. W pierwszym etapie urząd wykonuje następujące czynności: Urząd publikuje dużą liczbę $N = pq$, gdzie p, q to liczby pierwsze, tajne.

- W systemie używana jest znana funkcja skrótu $f(\cdot, \cdot)$.
- Każdy użytkownik otrzymuje jednoznaczny jawny identyfikator I .
- Urząd wybiera małą liczbę j , taką, że $m = f(I, j)$ jest resztą kwadratową modulo N .
- Urząd oblicza najmniejszy pierwiastek kwadratowy modulo N z m i umieszcza go na karcie chipowej przeznaczonej dla użytkownika. Ten pierwiastek z m jest tajnym identyfikatorem użytkownika A.

Weryfikacja użytkownika A w protokole Fiata–Shamira przebiega w następujących krokach:

- A chce się uwierzytelnić przed B; udostępnia mu identyfikator I oraz liczbę j .
- B oblicza odpowiadający im skrót $m = f(I, j)$.
- A wybiera losowe s mod N , które oznaczamy jako \sqrt{t} , podnosi je do kwadratu modulo N , aby otrzymać t , które wysyła do B.
- B wysyła do A losowy bit e . A wysyła $p = \sqrt{t}\sqrt{m^e} \bmod N$ do B; mnożenie przez \sqrt{t} powoduje ukrycie tajnego \sqrt{m} .
- B weryfikuje wynik podnosząc do kwadratu otrzymane p . (znając t i m sprawdza, czy $p^2 = tm^e \bmod N$). Wielokrotne uzyskanie sukcesu w powtarzanych próbach pozwala stwierdzić, że A rzeczywiście jest tym, kto zna tajny identyfikator.

Inną metodą zwiększenia bezpieczeństwa klucza może być zastosowanie *schematów podziału sekretu*. Sekretem może być hasło, klucz dostępu, informacja niezbędna do podjęcia decyzji lub uruchomienia systemu. Można tu zaobserwować analogię do takich tradycyjnych sposobów zabezpieczania, jak: kilku kluczy do sejfu w banku, podział kodów uruchomienia rakiet, uprawnień do

podjęcia decyzji w firmie czy też wymóg kilku podpisów na czeku bankowym. Możliwa jest konstrukcja bezpiecznych kryptograficznie algorytmów podziału sekretu, czyli podziałów sekretów odpornych na ujawnienie. Systemy podziału można klasyfikować ze względu na wiele kryteriów, takich jak algorytm podziału, skład uczestników sekretu oraz wzajemne relacje całości sekretu i jego części. Najbardziej popularny jest schemat progowy podziału (t, w) , gdzie w jest liczbą uczestników podziału, a t liczbą uczestników schematu podziału niezbędnych do odtworzenia sekretu. Warunkiem bezpieczeństwa jest, by t uczestników mogło odtworzyć sekret, natomiast udziały $t - 1$ uczestników (lub mniejszej ich liczby) nie dawały żadnej informacji o całym secrecie. Jako przykład takiego schematu progowego podajemy algorytm zaproponowany przez Shamira, wykorzystujący wielomiany nad ciałem Z_p . Schemat składa się z trzech faz: inicjalizacji, rozdzielenia sekretu i ujawnienia sekretu.

Faza inicjalizacji

- D (dystrybutor sekretu) wybiera w różnych, niezerowych elementów Z_p , oznaczonych jako $x_i, 1 \leq i \leq w$ (wymagamy, by było $p \geq w + 1$). D przydziela punkty x_i udziałowcom sekretu $P_i, 1 \leq i \leq w$.

Podział sekretu

- Załóżmy, że D chce podzielić klucz $K \in Z_p$ w systemie progowym (t, w) .
- D w sposób losowy, wzajemnie niezależnie, wybiera $t - 1$ elementów a_1, a_2, \dots, a_{t-1} ciała Z_p . Dla $1 \leq i \leq w$, D oblicza wartości $y_i = a(x_i)$, gdzie $a(x) = K + \sum_{j=1}^{t-1} a_j x^j \pmod p$. D przydziela udziały y_i uczestnikom podziału sekretu $P_i, 1 \leq i \leq w$.

Ujawnienie sekretu

- Załóżmy, że t uczestników podziału (spośród w uczestników), na przykład P_1, P_2, \dots, P_t chce ujawnić sekret.
- Udziałowcy ci mogą utworzyć układ t równań liniowych dla współczynników $K, a_1, a_2, \dots, a_{t-1}$ i z niego wyznaczyć K .

$$\begin{aligned} y_1 &= K + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \dots + a_{t-1} x_1^{t-1} \pmod p \\ y_2 &= K + a_1 x_2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_{t-1} x_2^{t-1} \pmod p \\ &\vdots \\ y_t &= K + a_1 x_t + a_2 x_t^2 + \dots + a_{t-1} x_t^{t-1} \pmod p \end{aligned}$$

Inne popularne systemy podziału sekretu korzystają z wektorowego opisu hiperpowierzchni i znajdowania punktu będącego ich przecięciem (schemat Brickella) lub wielokrotnego dodawania modulo dwa współrzędnych wektorów binarnych (schemat Karnin–Greene–Hellman).

Schematy podziału sekretu zabezpieczają klucz przed ujawnieniem. Nie oznacza to jednak, że nie są podatne na żadne zagrożenia. W tym wypadku również najgroźniejszy jest przeciwnik wewnętrzny, czyli nieuczciwi udziałowcy sekretu, którzy chcieliby uzyskać udziały innych

uczestników lub też zniszczyć cały schemat przez sfalszowanie swego udziału. Można stworzyć taki schemat, który uniemożliwi atak tego rodzaju, a przynajmniej pozwoli wykryć sprawcę (w przypadku wielu nieuczciwych udziałowców nie jest to już możliwe). Mamy tu sytuację podobną do kolektywnego generowania klucza, gdzie również możliwe są nadużycia ze strony uczestników protokołu. W obu tych sytuacjach przeciwdziałanie jest podobne. Żeby uzyskać system weryfikowalny (*weryfikowalny system podziału sekretu, weryfikowalny protokół uzgodnienia klucza*), należy każdemu z uczestników udostępnić więcej informacji o udziałach innych uczestników niż to jest niezbędne do rekonstrukcji sekretu, tak, by z tego nadmiaru informacji uczciwi uczestnicy protokołu mogli uzyskać wiedzę demaskującą oszusta. Tu znowu pojawia się sprzeczność, o której mówiliśmy przy okazji kodowania i szyfrowania: wszelki nadmiar przesyłanej informacji to zagrożenie utraty poufności, a zatem osłabienie bezpieczeństwa kryptosystemu. Rozwiązaniem jest pewna optymalizacja stosowanego algorytmu lub zastosowanie rozwiązań organizacyjnych zwiększających bezpieczeństwo systemu przesyłania informacji. I w tym miejscu dochodzimy do nowego zagadnienia, jakim jest zarządzanie bezpieczeństwem.

4.4 Zarządzanie bezpieczeństwem systemów informacyjnych

Zarządzanie bezpieczeństwem w systemie informatycznym jest elementem większej całości, jaką jest *polityka bezpieczeństwa* instytucji-właściciela systemu. Nie jest naszym celem zajmowanie się tym zagadnieniem, obejmującym najszerzej rozumiane zagadnienia związane z bezpieczeństwem (nie tylko informatycznym) funkcjonowania przedsiębiorstwa. Samo zarządzanie bezpieczeństwem informatycznym (i komplementarne do niego zarządzanie ryzykiem) jest zagadnieniem obejmującym bardzo dużo problemów związanych z infrastrukturą techniczną (sprzęt będący w stanie realizować wszystkie przewidziane w systemie bezpieczeństwa usługi kryptograficzne), personelem (szkolenie i nadzór) oraz oprogramowaniem. Kryptograficzna ochrona informacji w praktyce przedsiębiorstwa to odpowiednie oprogramowanie, zakupione na ogół u wyspecjalizowanych producentów. Nie jest tu możliwe opisanie wszystkich elementów zarządzania bezpieczeństwem systemu informatycznego związanych z oprogramowaniem i wykorzystywanymi w nim algorytmami matematycznymi. Wspomnijmy tylko o dwóch rzeczach. Na etapie projektowania systemu należy uwzględnić fakt, że system zbudowany jest z bardzo różnorodnych algorytmów (choćby systemów uwierzytelnienia, szyfrowania danych zgromadzonych w bazach i wysyłanych na zewnątrz systemu, systemów generacji, uzgadniania i przesyłania kluczy, itd.). Wiadomo, że bezpieczeństwo całego systemu jest limitowane bezpieczeństwem najsłabszego jego elementu. Powstaje jednak pytanie, jak porównać te różnorodne komponenty występujące zarówno w pojedynczym komputerze, w sieci wewnętrznej, jak i w Internecie, obejmującym również systemy wewnętrzne innych organizacji? Potrzebne są do tego pewne wspólne kryteria bezpieczeństwa oraz metody oceny bezpieczeństwa algorytmów (pozwalające choćby ustalić długość klucza w systemie klucza publicznego i w systemie klucza prywatnego dających takie samo bezpieczeństwo).

Drugie zagadnienie o którym wspomniemy związane jest z etapem eksploatacji systemu bezpieczeństwa informatycznego. Wiadomo, że obok ciągłej pracy kryptografów przygotowujących nowe systemy ochronne, trwa także praca kryptoanalityków, wyszukujących słabych miejsc kryptosystemów. Należy zatem stale śledzić wyniki ich pracy, by móc ulepszyć swój system w razie gdyby któryś z jego elementów został skompromitowany (w praktyce przez złamanie sys-

temu rozumie się znalezienie takiej metody jego kryptoanalizy, która jest szybsza od przewidywanej przez projektantów o kilka rzędów wielkości). Spektakularnym przykładem kompromitacji kryptosystemu było odkrycie *kryptoanalizy różnicowej i liniowej* algorytmu *DES* (będącego standardem amerykańskim szyfru blokowego). Doprowadziło ono najpierw do zalecenia potrójnego DESa jako standardu w okresie przejściowym, a następnie do rozpisania konkursu na nowy algorytm i wprowadzenia szyfru *RIJNDAEL* jako przyszłościowego standardu szyfrowania.

5 Metody niekryptograficzne zapewnienia bezpieczeństwa i perspektywy ich rozwoju

Dotychczasowe rozważania pokazują, że kryptografia jest skutecznym i perspektywicznym sposobem realizacji usług bezpieczeństwa informacji. Oczywiście, nie jest metodą jedyną, chociaż niewątpliwie jest metodą najtańszą. Jej koszt ograniczony jest do przygotowania odpowiedniego oprogramowania (po uprzednim zaprojektowaniu i przetestowaniu algorytmów) oraz systemów komputerowych realizujących to oprogramowanie. Jakże zatem mogą być inne metody zapewnienia bezpieczeństwa informacji? O działaniach organizacyjnych wykorzystujących metody nauk o zarządzaniu już wspominaliśmy. Warto teraz przedstawić inne metody — okazuje się bowiem, że zdobywcze prawie każdej dyscypliny nauki można zastosować w celu zwiększenia bezpieczeństwa danych. Żeby nie szukać tych możliwości zbyt daleko, ograniczymy się tu do dziedziny nauk technicznych.

5.1 Metody wykorzystujące obrazy

W przeszłości, metodą przesyłania poufnych informacji, alternatywną do kryptografii (czyli szyfrowania), była *tajna komunikacja*, nazywana też *steganografią*. Poufność informacji wynikała z faktu, że nieupoważnione osoby po prostu nie wiedziały, że przesyłany dokument lub przedmiot zawiera w sobie informację przeznaczoną tylko dla wtajemniczonych. Na przykład, w przesyłanej książce niektóre litery (składające się na tajną informację) były zaznaczone małą kłębkiem wykonanymi cienką igłą. Ta metoda utajnienia była skuteczna, dopóki nikt nie wiedział o tajnej przesyłce; w chwili ujawnienia jej istnienia nic już nie chroniło treści tajnej informacji. Mimo iż steganografia nie gwarantuje pełnego bezpieczeństwa przesyłanych informacji, może znaleźć zastosowanie także i dzisiaj.

Weźmy typowy obraz cyfrowy, taki jak można zaobserwować na ekranie komputera, to znaczy o rozdzielczości 1024 na 768 pikseli, każdy reprezentowany przez ciąg 32 bitów wyrażających jego kolor. Jeżeli teraz najmłodszy bit każdego z pikseli zmodyfikujemy w sposób opisany przez czarno-biały obraz o takiej samej rozdzielczości (tzn. 1024 × 768 pikseli, każdy opisany przez jeden bit), na przykład dodając bity modulo 2, to w efekcie otrzymamy obraz niezauważalnie różniący się od oryginału, a zawierający w sobie tajny zapis innego obrazu (oczywiście, ten czarno-biały obraz może być dowolnym ciągiem binarnym o długości 768 kB). Przy ogromnej ilości przesyłanych obrazów, taki system może być wydajnym sposobem przesyłania tajnych informacji.

Jednak nie cele komunikacyjne są najważniejszym zastosowaniem steganografii. Wkomponowane tajne rysunki mogą pełnić rolę *znaków wodnych* z wszystkimi ich zastosowaniami znanymi z obrotu dokumentów papierowych. Taki znak wodny może zabezpieczać obraz graficzny (lub zawierające ten obraz oprogramowanie) przed nielegalnym kopiowaniem; ukryty znak wodny stanowić może indywidualne oznaczenie użytkownika. Znak wodny pozwala, w razie nielegalnego skopiowania i rozpowszechniania pliku zawierającego grafikę, ustalić źródło pochodzenia tego pliku. Służy to także ochronie praw autorskich i poświadczeniu własności pliku stanowiąc ukryty podpis. Z drugiej strony, ukryty podpis wpleciony w mapę bitową obrazu to dowód autentyczności dokumentu. Może on mieć praktyczne znaczenie także w obrazach czarno-białych, na przykład dokumentach przesyłanych telefaksem cyfrowym, w których dodanie lub usunięcie pewnej liczby czarnych punktów (zgodnie z algorytmem zdefiniowanym w systemie podpisu) nie wpływa na jakość przesyłanego obrazu, pozwala natomiast potwierdzić źródło jego nadania. Zauważmy jeszcze, że o ile tak rozumiane podpisanie pliku, w przypadku oprogramowania komputerowego, pozwala potwierdzić jego autentyczność, nie gwarantuje jednak, że w pliku tym nie dokonano pewnych szkodliwych zmian (celowe wprowadzenie błędnych fragmentów kodu, wirusów lub „koni trojańskich” wykonujących pewne operacje — często o charakterze szpiegowskim — wbrew woli właściciela oprogramowania). Tutaj pomocne może być zastosowanie podpisu cyfrowego, na przykład metodą RSA opisaną już w tej pracy, gwarantującego integralność pliku oprogramowania. (Znak wodny o pewnych cechach indywidualnych nazywany jest „odciskiem palca”, ang. „fingerprint”).

Z tajnym przesyłaniem obrazów związane jest jeszcze jedno pojęcie, które pojawiło się w ostatnich latach, a mianowicie *kryptografia wizualna*. W tym wypadku utajnienie obrazu polega na takiej jego dekompozycji na kilka niezależnych obrazów, że każda ze składowych przedstawia nieuporządkowany zbiór punktów (czarnych lub białych pikseli, lub też, w przypadku obrazów barwnych, kolorowych plam), natomiast po nałożeniu na siebie wszystkich części otrzymywany jest właściwy obraz. Efekt taki uzyskiwany jest przez odpowiednie rozbić białych i czarnych pikseli na części składowe (cztery, dziewięć, itd.), w przypadku obrazów czarno-białych, lub też rozłożenie pikseli barwnych na kilka części. Kryptografia wizualna może służyć we wszelkich kodowanych przekazach wizyjnych jako sposób zabezpieczenia obrazu.

Zarówno steganografia wykorzystująca cyfrowy zapis obrazu, jak i kryptografia wizualna wymagają stosowania metod matematycznych używanych zwykle w cyfrowej analizie obrazu. W porównaniu z tradycyjną kryptografią, uzyskane dotychczas efekty można uznać raczej za pokazanie możliwości zastosowań, niż bezpieczne rozwiązania praktyczne.

5.2 Metody biometryczne, czyli mój klucz noszę w sobie

Jedną z usług kryptograficznych jest *uwierzytelnienie*, czyli potwierdzenie tożsamości użytkownika. Zazwyczaj dokonywane to jest przez podanie tajnego hasła, a w przypadkach wymagających wysokiego bezpieczeństwa — przez protokoły zbliżone w formie do podpisów cyfrowych lub systemy certyfikatów. W tych bardziej zaawansowanych systemach wymagany jest udział zaufanej trzeciej strony (urzędu certyfikacji) oraz wykorzystanie elektronicznego nośnika klucza prywatnego (certyfikatu). Można jednak zastosować system identyfikacji użytkownika nie wymagający ani udziału innych osób w procesie uwierzytelnienia, ani stosowania dodatkowych nośników informacji, ani nawet pamiętania tajnego hasła. System taki korzysta z *metod biometrycznych*, czyli

ustalania tożsamości osoby na podstawie jej indywidualnych cech biologicznych, na przykład zapisu linii papilarnych palca, geometrii dłoni, wzoru tęczyówki lub obrazu siatkówki oka albo barwy głosu.

Wykorzystanie metody biometrycznej w procesie identyfikacji użytkownika systemu informacyjnego polega na wykonaniu dwóch operacji:

- odczytu cechy biometrycznej, utworzeniu jej wzorca cyfrowego i umieszczeniu tego wzorca w bazie systemu, oraz
- (powtarzanej wielokrotnie) operacji uwierzytelnienia, polegającej na odczytaniu cechy biometrycznej, jej digitalizacji i porównaniu z wzorcem znajdującym się w bazie.

Tak prosto wyglądający schemat w rzeczywistości nie jest prosty. Pomijając techniczny problem odczytu cechy biometrycznej (do tego potrzebne są odpowiednie kamery cyfrowe, skanery lub urządzenia rejestrujące dźwięki), najważniejszy jest wybór takich cech zarejestrowanego obrazu, które będą indywidualnym wyróżnikiem osoby użytkownika, a równocześnie dadzą się zapisać w ciągu binarnym długości rzędu stu bitów. Inne występujące tu problemy to bezbłędne porównanie kolejnych odczytów z zapisanym wzorcem (każdorazowe odczyty sensorów cechy biometrycznej mogą się nieco różnić; należy sprowadzić do minimum prawdopodobieństwo błędów obu rodzajów, to znaczy odrzucenia właściwej osoby i zaakceptowania osoby niewłaściwej) i odporność systemu na próby fałszerstwa (podstawienie utrwalonych wzorców cechy biometrycznej, na przykład fotografii tęczyówki oka). W metodach takich wykorzystywany jest dorobek tak odległych dziedzin wiedzy jak metody rozpoznawania obrazów i kryminalistyka.

Do metod biometrycznych identyfikacji osób należy zaliczyć również najbardziej rozpoznawalną, jaką jest *podpis odręczny*, czyli „nazwisko (i imię) napisane odręcznie” lub „potwierdzenie pisma, nadanie mu ważności przez napisanie własnego nazwiska”. W podpisie nie byłoby niczego ciekawego, gdyby nie możliwość wszechstronnej analizy nie tyle samego znaku graficznego podpisu, ale metody jego wykonywania. Rejestrując proces podpisywania za pomocą pisaka wyposażonego w odpowiednie czujniki można rejestrować: współrzędne końcówki pisaka (ich przemieszczenie, czyli kształt podpisu), nacisk pisaka na papier, kąt pochylenia, siłę i pozycję uchwytu, przyspieszenia w czasie wykonywania podpisu, itd. Zatem tak rozumiany podpis odręczny, z najbardziej zawodnej i łatwej do sfalszowania (także autofalszerstwa, w celu późniejszego zaprzeczenia wykonania podpisu) metody biometrycznej, może stać się metodą nowoczesną i trudną do podrobienia (wzorec podpisu nigdzie nie musi występować w postaci zapisu graficznego, rejestrowany jest jedynie cyfrowo zapis parametrów ruchu pisaka). Innymi słowy, badanie podpisu odręcznego to typowe zadanie z dziedziny mechaniki.

5.3 Nowe metody matematyczne w problemach bezpieczeństwa informacji

Jak już wspominaliśmy, praktycznie rozumiane bezpieczeństwo algorytmów kryptograficznych oparte jest na dużej złożoności obliczeniowej wszelkich możliwych ataków, tak więc algorytmy te polegają na wykonaniu zagadnień trudnych obliczeniowo. W przypadku szyfrów blokowych są to ogromne ilości elementarnych operacji binarnych; systemy klucza publicznego wykorzystują fakt złożoności obliczeniowej takich problemów jak faktoryzacja (rozkład na czynniki pierwsze) dużych liczb naturalnych lub problem logarytmu dyskretnego. W przyszłych badaniach można

wykorzystać inne zagadnienia trudne obliczeniowo, adaptując je do potrzeb bezpiecznego przesyłania informacji.

Przykładem takiej grupy metod matematycznych, dostarczających wielu zagadnień trudnych, mogą być zagadnienia w grafach. Struktura grafów jest bardzo złożona; liczba możliwych grafów o n wierzchołkach, rośnie wraz z n wykładniczo. Wiele problemów w grafach, takich jak ustalenie liczby chromatycznej grafu, n -kolorowanie grafu, m kolorowanie grafu n -kolorowalnego (dla $m > n$), wyszukiwanie ścieżek o określonych własnościach w grafie, badanie izomorfizmu grafów, jest zagadnieniem trudnym obliczeniowo (NP-trudnym). Zagadnienia takie mogą być (i już były) wykorzystane do celów kryptograficznych. Ciągle jeszcze jest tu wiele możliwości, zarówno w zastosowaniach do systemów klucza prywatnego, systemów klucza publicznego, podziału sekretu lub dowodów z wiedzą zerową.

Wśród metod matematycznych dotychczas mało stosowanych, a w przyszłości mogących stanowić dobre narzędzie w kryptologii warto zauważyć sieci neuronowe i algorytmy ewolucyjne. Odpowiednio „nauczona” sieć neuronowa może, na przykład, stanowić wzorzec nieliniowej funkcji boolowskiej, której dobre własności kryptograficzne można zadać za pomocą szeregu warunków (na przykład zrównoważenia, to znaczy dawania na wyjściu bloków bitów o zbliżonej liczbie zer i jedynek). Taka funkcja stanowi zwykle element poprawiający „losowość” uzyskiwanych algorytmicznie ciągów pseudolosowych. Sieć neuronowa może też stanowić potrzebny w kryptoanalizie aproksymowany wzorzec generatora bitów pseudolosowych lub szyfru blokowego; raz nauczona na podstawie przechwyconego tekstu jawnego i kryptogramu, pozwoli odczytywać kolejne uzyskane kryptogramy. Wreszcie, odpowiednio zaprojektowana komórkowa sieć neuronowa może posłużyć do analizy ciągów binarnych pod kątem ich *złożoności sekwencyjnej* (rozkładu serii zer i jedynek różnej długości) lub *złożoności liniowej* (równoważności z wyjściem rejestrów liniowych określonego rzędu). Widać, że możliwości zastosowań w kryptologii są bardzo szerokie.

5.4 Algorytmiczne metody niekryptograficzne

W roku 1998 Rivest zaproponował metodę zapewnienia poufności danych bez ich szyfrowania, nazywaną „*chaffing and winnowing*” co można przetłumaczyć jako „*zanieczyszczanie i odsiewanie*”. Mówiąc skrótowo, zabezpieczenie danych w tej metodzie polega na wykonaniu dwóch kroków. W pierwszym następuje podzielenie użytecznej informacji na krótkie bloki i podpisanie każdego z nich (za pomocą MAC, Message Authentication Code, czyli kluczowanej funkcji skrótu). W drugim kroku użyteczna informacja jest uzupełniana o bloki zanieczyszczające, podpisane w sposób błędny. Liczba tych bloków musi być na tyle duża, by ukryć informacje prawidłowe. Odbiorca, chcąc odzyskać tajną informację, sprawdza kolejno wszystkie bloki, obliczając ich MAC (zna tajny klucz użyty do podpisu) i akceptując bloki prawidłowo podpisane, a odrzucając pozostałe. Metoda ta przypomina trochę steganografię, stosowaną efektywnie do obrazów, ponieważ i w tym przypadku poufna informacja nie jest szyfrowana, a jedynie ukrywana wśród informacji bezużytecznych dla odbiorcy.

W podobny sposób można zapewniać bezpieczeństwo w wielkich bazach danych, rozpraszając i mieszając odpowiednio rekordy danych. Tego typu zabezpieczenia wspomagają bezpieczeństwo *statystycznych baz danych* (to znaczy takich baz, które powinny dostarczać informacji o uśrednionych parametrach danych, a nie o zawartości poszczególnych rekordów), w których główny

system bezpieczeństwa zawarty jest w strukturze dopuszczalnych zapytań dotyczących danych. Odpowiednie ukrycie danych pozwoli zapewnić im bezpieczeństwo w przypadku obejścia legalnego programu obsługi baz.

5.5 Zastosowanie nowych urządzeń do celów kryptograficznych

Powszechnie stosowane algorytmy kryptograficzne wykonywane są za pomocą komputerów, czyli są algorytmami cyfrowymi. Można sobie teraz zadać pytanie, czy do celów kryptograficznych można wykorzystać urządzenia techniczne (elektroniczne, mechaniczne lub realizujące pewne procesy fizyczne), czyli czy można wykonywać je w postaci analogowej? W pewnym sensie taką metodą jest analiza sygnałów losowych pochodzących z różnych podzespołów komputera lub źródeł promieniowania jądrowego i generowanie na ich podstawie ciągów bitów losowych, przeznaczonych do wykorzystania kryptograficznego. Ograniczeniem takiej metody jest niepowtarzalność uzyskanych wyników (stąd konieczność rejestracji wyników). Okazuje się, że jest możliwość wykorzystania zjawisk fizycznych, które są tak skomplikowane, jak procesy losowe i równocześnie możliwe do powtórzenia, pod warunkiem, że znane są dokładne wartości parametrów charakteryzujących te procesy. Mowa tu o *procesach chaotycznych*, czyli rozwiązaniach zagadnień opisanych przez układy dynamiczne (dyskretne i ciągłe w czasie), posiadających własność chaosu.

W matematycznym modelowaniu różnych zagadnień bezpiecznej komunikacji stosowane są zarówno układy dyskretne, jak i ciągłe. Układy dyskretne realizują algorytmy podobne do szyfrów blokowych. Dyskretny układ dynamiczny zależny od parametru pełniącego rolę tajnego klucza, w wyniku wielokrotnej iteracji, przekształca blok tekstu do postaci trudnej do powiązania z oryginałem bez znajomości dokładnej wartości tego parametru. Podobnie, odpowiednio iterowany układ dyskretny może być źródłem bitów losowych (znów mamy tu analogię z szyframi blokowymi). Ciągłe układy dynamiczne stosowane są do celów komunikacyjnych w dwojaki sposób. Mogą być źródłem „szumu” przykrywającego sygnał użyteczny; w takiej sytuacji do odbiorcy przesyłana jest informacja o niewielkiej amplitudzie (np. sygnał telegraficzny) z dodanym intensywnym szumem chaotycznym, tak że postronny obserwator nie jest w stanie odkryć przesyłanej tajnej informacji. Odbiorca, znając parametry procesu chaotycznego, może wygenerować odpowiedni sygnał, odjąć go od uzyskanej informacji i odzyskać użyteczny sygnał. Taka metoda nazywana jest *synchronizacją chaosu*. Inna metoda, nazywana *kontrolą chaosu*, polega na modulowaniu parametrów sygnału chaotycznego zgodnie ze wskazaniami sygnału binarnego użytecznej informacji (na przykład, dodając lub odejmując pewną niewielką liczbę, w zależności od wartości bitu). Odbiorca, posiadając modulowaną trajektorię i formułę procesu chaotycznego, może odtworzyć wysłany sygnał dostrajając proces chaotyczny do trajektorii zawierającej zakodowaną informację przez własną modulację parametrów.

Procesy chaotyczne mogłyby pozostać jeszcze jedną matematyczną metodą kryptograficzną gdyby nie fakt, że można je realizować fizycznie. Obecnie najciekawsze i najbardziej zaawansowane jest wykorzystanie laserów generujących chaotyczny, spolaryzowany sygnał świetlny. Sygnał ten, traktowany jako szum w metodzie synchronizacji, jest zaburzany sygnałem użytecznym. Po przesłaniu takiej wiązki do odbiorcy, w identycznym laserze, następuje synchronizacja promienia eliminująca sygnał użyteczny. Pozwala to uzyskać czysty szum możliwy do odjęcia od przesłanego sygnału (uprzednio częściowo zbocznikowanego celem umożliwienia odzyskania użytecznej informacji). Dodatkowym elementem wpływającym na bezpieczeństwo komunikacji

jest tu fakt, że promień laserowy jest przesyłany światłowodem, a więc medium odizolowanym od otoczenia przez osłonę gazową. Każda próba podsłuchu jest tu natychmiast wykryta w wyniku obserwowanego spadku ciśnienia gazu w osłonie.

Również inne procesy chaotyczne stosowane w kryptografii mają swoje odpowiedniki fizyczne, jednak dotychczas możliwość ich zastosowania w celach realizacji algorytmów kryptograficznych pozostaje w sferze projektów.

5.6 Nowe zjawiska fizyczne

Analiza cyfrowa danych jest w dużej mierze zdeterminowana przez binarność opisu. Bity, łatwo realizowalne fizycznie, czy to przez poziom napięcia elektrycznego (jest napięcie – nie ma napięcia), czy przez polaryzację magnetyczną (dodatnia – ujemna), czy wreszcie przez światło (białe – czarne), stanowią narzędzie efektywne rachunkowo, wprowadzają jednak istotne ograniczenie szybkości obliczeniowej. Wynika to z jednej strony z ograniczeń projektowych (osiągnięcie granic fotolitograficznych szerokości ścieżek układów scalonych), z drugiej zaś z problemu odprowadzenia ciepła z układu. Pojawia się tu znów związek między fizyką a teorią informacji, ujęty w postaci *zasady Landauera* mówiącej, że każde wykasowanie bitu informacji wiąże się ze zużyciem pewnej ilości energii. Zatem obliczenia binarne są procesem nieodwracalnym, wytwarzającym ciepło w ilości proporcjonalnej do liczby wykonywanych operacji. Trudności z odprowadzeniem ciepła z systemu obliczeniowego można uniknąć, jeśli uda się zastosować w układach scalonych odwracalne bramki logiczne (na przykład, zapamiętujące sytuację na wyjściu razem z sytuacją na wejściu, tak, by można było operację logiczną odwrócić). Najbliższą praktycznej realizacji tego pomysłu jest koncepcja *komputera kwantowego*, wykonującego obliczenia na *qubitach*, czyli wielkościach opisujących wynik kwantowego rzutu monetą (realizowanego na przykład w interferometrze Macha–Zehndera a opisanego przez cztery rozkłady prawdopodobieństwa). Komputer kwantowy jest, jako całość, układem odwracalnym, więc nie stwarza ograniczeń energetycznych przy zwiększaniu częstotliwości obliczeń. Uważa się, że fundamentalna dziś dla bezpieczeństwa kryptograficznego trudność rozkładu wielkich liczb na czynniki pierwsze nie będzie stanowiła problemu dla komputerów kwantowych, zatem łamiący szyfry uzyskają przewagę nad obrońcami tajemnic. Na szczęście dla kryptologów, fizyka kwantowa tu również może przyjść z pomocą. W ostatnich latach zaczyna być rozwijana *kryptografia kwantowa*, czyli sposób przesyłania informacji wykorzystujący, jako gwarancję bezpieczeństwa, *zasadę nieoznaczoności Heisenberga*, a zatem fakt, że każdy pomiar (a więc i „podglądanie” przesyłanych sygnałów) wpływa na wartość mierzonej wielkości. Uzgadniając klucz sesyjny (z wykorzystaniem qubitów) komunikujące się strony mogą odkryć, badając rozkłady prawdopodobieństwa bitów przesyłanego ciągu, czy nikt poza nimi nie zna ich wspólnej tajemnicy. Widzimy zatem, że rywalizacja między obu stronami, szyfrującymi i łamiącymi szyfry, wkroczy na wyższy poziom, nie uprzywilejowując nadmiernie żadnej ze stron.

5.7 Technologiczne możliwości zapewnienia bezpieczeństwa

Kończąc ten opis perspektyw przyszłych badań w dziedzinie ochrony informacji powróćmy z wyżyn rozważań fizyki kwantowej do realiów życia codziennego. Jak czytelnicy zapewne zauważyli, w prezentacjach zagadnień ochrony informacji problem bezpieczeństwa jest zazwyczaj przedsta-

wiony jako współzawodnictwo teoretyków-kryptografów, stosujących matematyczne algorytmy kryptograficzne do ochrony danych, i kryptoanalityków, korzystających z równie zaawansowanych algorytmów łamiących wszelkie zabezpieczenia. W praktyce problem niekiedy wygląda bardziej prozaicznie. Tajne informacje są ujawniane w wyniku niewłaściwego ustawienia monitorów komputerowych w źle zaprojektowanych pomieszczeniach, przechwytywania *ulotu elektromagnetycznego* pochodzącego z urządzeń informatycznych o podwyższonej emisji elektromagnetycznej (stanowiącej również zagrożenie zdrowia personelu), sygnału dodatkowo przenieszonego przez wewnętrzne instalacje budynków, na przykład sieć centralnego ogrzewania lub instalację elektryczną. Przyczyną utraty danych jest też brak izolowanych pomieszczeń, niezbędnych w przypadku pracy z danymi szczególnie wrażliwymi, oraz bezpiecznych łączy telekomunikacyjnych.

Jak widać z powyższego opisu, eliminacja elementarnych zagrożeń może znacznie poprawić stan bezpieczeństwa informacji: niemożność uzyskania danych do kryptoanalizy najlepiej chroni przed utratą poufności informacji. Tak jak w przypadku samolotu „niewidzialnego” dla radarów wykorzystano specjalne materiały i odpowiednio zoptymalizowane konstrukcje (zauważmy, że badania takich rozwiązań technologicznych znacznie odbiegały od tego, czym zazwyczaj zajmowano się w trakcie projektowania konstrukcji lotniczych, a więc aerodynamiki i wytrzymałości materiałów), tak również w interesującej nas dziedzinie dobre efekty można otrzymać opracowując właściwe materiały, na przykład do obudów urządzeń teletransmisyjnych, oraz projektując wszelkie elementy składowe konstrukcji systemów, od skali obiektów infrastruktury, do drobnych detali wielkości wyświetlaczy ciekłokrystalicznych stosowanych w zamkach szyfowych.

6 Możliwości uczestnictwa w badaniach prowadzonych w świecie

Przedstawione metody zapewnienia bezpieczeństwa informacji są w głównej mierze oparte na zastosowaniu odpowiednich algorytmów matematycznych, a w przypadku kryptografii kwantowej, wyników z dziedziny fizyki teoretycznej. Poza nielicznymi wyjątkami (obejmującymi raczej szczególne implementacje istniejących metod) algorytmy te są powszechnie znane, publikowane w czasopiśmie, materiałach konferencyjnych i, jeszcze przed oficjalnym wydrukowaniem, dostępne w serwerze preprintów. Jako rezultaty z zakresu podstawowych badań naukowych (w głównej mierze matematyki, a ostatnio również fizyki) nie mogą być patentowane, są więc praktycznie dostępne i dopuszczone do legalnego użycia przez wszystkich zainteresowanych. Zatem istnieją wszelkie przesłanki włączenia się do badań na najwyższym poziomie w dziedzinie ochrony informacji: można mieć dostęp do najnowszych wyników a podjęcie badań, polegających głównie na wysiłku intelektualnym, nie wymaga wielkich kosztów ponoszonych w innych dziedzinach na zakup specjalistycznej aparatury. Oczywiście, opracowanie produktów komercyjnych wiąże się już z kosztami prowadzonych testów czy przygotowania profesjonalnej implementacji. Wydaje się, że z racji możliwości praktycznych zastosowań uzyskanych wyników można tu będzie liczyć na wspomóżenie badań przez przyszłych użytkowników.

Dorobek polskich autorów w dziedzinach związanych z ochroną informacji jest znany w świecie i szeroko wykorzystywany. W tym kontekście zawsze należy wspomnieć o sukcesie, jakim było złamanie szyfru niemieckiej ENIGMY przez matematyków Mariana Rejewskiego, Henryka Zygalskiego i Jerzego Różyckiego. Będące rezultatem pracy Polaków wyniki z zakresu teorii liczb, zarówno Wacława Sierpińskiego, jak i obecnie pracujących, są wykorzystywane we współ-

czesnej kryptografii. Również inne działy matematyki, które mogą być wykorzystywane w konstrukcji metod ochrony informacji (i, oczywiście, ich łamanie, czyli jak byśmy ładnie powiedzieli, weryfikacji bezpieczeństwa algorytmów), są w Polsce, także w IPPT, reprezentowane przez liczne grono badaczy. Wspomnijmy tu choćby statystykę matematyczną i rachunek prawdopodobieństwa, algorytmy genetyczne, rozpoznawanie obrazów czy numeryczną analizę danych. Do zagadnień związanych z niekryptograficznymi metodami ochrony informacji mogą się również włączyć specjaliści z dziedziny mechaniki, nauki o materiałach, akustyki i budownictwa. Metody korzystające z dorobku tych dziedzin (znajdujące się jeszcze w fazie początkowej, a więc pozostawiające szerokie pole do włączenia się nowych badaczy) zostały omówione w poprzednim rozdziale. Wyniki uzyskane w tym zakresie mogą być dodatkowym impulsem rozwoju technologii, zwłaszcza w zakresie nowych materiałów i konstrukcji, zarówno o wielkiej skali (budynki) jak drobnej (elementy urządzeń służących do przesyłania informacji).

Instytut Podstawowych Problemów Techniki wydaje się być szczególnie predestynowany do prowadzenia badań w dziedzinie ochrony informacji. Zobowiązuje do tego zarówno tradycja (w poprzednich latach prowadzono intensywne badania związane z przesyłaniem informacji w dziedzinach, które były wówczas ważne; świadczy o tym chociażby praca w IPPT profesora Janusza Groszkowskiego, patrona cywilnych i wojskowych instytutów telekomunikacji), jak i obecne możliwości intelektualne Instytutu, gromadzącego pracowników z wielu specjalności naukowych mających zastosowanie w tej dziedzinie. Wyniki uzyskane dotychczas potwierdzają tę możliwość.

Bibliografia

Bibliografia zawiera tytuły prac, które były inspiracją do napisania powyższego tekstu oraz takich, które mogą stanowić źródło dodatkowych informacji na temat zaprezentowanych zagadnień.

1. Denning D.E., *Kryptografia i Ochrona Danych*, WN-T, Warszawa, 1992.
2. Denning D.E., *Wojna Informacyjna i Bezpieczeństwo Informacji*, WN-T, Warszawa, 2002.
3. Kippenhahn R., *Tajemne Przekazy. Szyfry, Enigma i Karty Chipowe*. Prószyński i S-ka, Warszawa, 2000.
4. Koblitz N., *Wykład z Teorii Liczb i Kryptografii*, WN-T, Warszawa, 1995.
5. Koblitz N., *Algebraiczne Aspekty Kryptografii*, WN-T, Warszawa, 2000.
6. Kotulski Z., Szczepański J., *Discrete chaotic cryptography — a unified approach*, *Annalen der Physik*, **6**, 5, 381–394, 1997.
7. Kotulski Z., Szczepański J., Górski K., Paszkiewicz A., Zugaj A., *Application of discrete chaotic dynamical systems in cryptography — DCC method*, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **9**, 6, 1121–1135, 1999.
8. Kotulski Z., *Generatory liczb losowych: algorytmy, testowanie, zastosowania*, *Matematyka Stosowana. Matematyka dla społeczeństwa*, **2**, 43, 32–66, 2001.
9. Kozaczuk W., *W Kręgu ENIGMY*, Książka i Wiedza, Warszawa, 1986.
10. Menezes A., van Oorschot P., Vanstone S.A., *Handbook of Applied Cryptography*, CRC Press, Boca Raton, 1996.
11. Milburn G., *Inżynieria Kwantowa*, Prószyński i S-ka, Warszawa, 1999.
12. Penfield P., *Information and entropy*, wykład prowadzony dla studentów fizyki w MIT, <http://www-mtl.mit.edu/Courses/6.095/>
13. Pipkin D.L., *Bezpieczeństwo Informacji. Ochrona Globalnego Przedsiębiorstwa*, WN-T, Warszawa, 2002.

14. Ribenboim P., *Mała Księga Wielkich Liczb Pierwszych*, WN-T, Warszawa, 1997.
15. Stokłosa J., Bilski T., Pankowski T., *Bezpieczeństwo Danych w Systemach Informatycznych*, PWN, Warszawa-Poznań, 2001.
16. Schneier B., *Kryptografia dla Praktyków. Protokoły, Algorytmy i Programy Źródłowe w Języku C*, wyd. II poprawione, WN-T, Warszawa, 2002.
17. Sobczyk K., Trębicki J., *Approximate probability distributions for stochastic systems: maximum entropy method*, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **168**, 91–111, 1999.
18. Sobczyk K., *Information dynamics; premises, challenges and results*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **15**, 3, 475–498, 2001.
19. Wobst R., *Kryptologia. Budowa i Łamanie Zabezpieczeń*, Wydawnictwo RM, Warszawa, 2002.

PRZETWARZANIE OBRAZÓW, WIZJA KOMPUTEROWA ORAZ GRAFICZNA REPREZENTACJA WIEDZY

Mariusz Nieniewski, Leszek Chmielewski, Zenon Kulpa

1 Definicja obszaru badań

Żyjemy obecnie w epoce rewolucji informatycznej. Dwie podstawowe technologie umożliwiające obsługę potrzeb wizualnych człowieka i społeczeństwa to: grafika komputerowa, której zadaniem jest wizualizacja i synteza złożonych zjawisk i obiektów oraz wizja komputerowa, mająca na celu automatyczną interpretację złożonych scen. Złożony strumień bajtów pozwala na transmisję wielu mediów, a w tym dźwięku, tekstu, obrazów quasi-statycznych oraz sekwencji video.

Zaprojektowanie uniwersalnego systemu wizyjnego jest zadaniem ogromnie trudnym, ponieważ wymaga wydobycia informacji z wielkiej liczby pikseli, które pojedynczo wzięte zawierają tej informacji bardzo mało. W większości systemów wizyjnych występują pewne typowe moduły, bez których trudno byłoby przeprowadzić interpretację obrazowanej sceny. Wśród modułów tych można wymienić: moduł organizacji percepcyjnej, lub inaczej moduł grupowania elementów, moduł detekcji krawędzi obiektów, moduł cieniowania, moduł stereo oraz moduł tekstury.

Operacje na obrazach, takie jak korekcja geometrii, rejestracja i restauracja obrazów pomagają człowiekowi w podejmowaniu decyzji. Jednak liczba obrazów, jakimi dysponujemy narasta lawinowo. W efekcie pojawia się konieczność automatycznej klasyfikacji obrazów i rozpoznawania wzorców w nich występujących.

Typowy system wizyjny wykonuje następujące funkcje: akwizycja obrazu, poprawa jakości obrazu, segmentacja obrazu, generacja opisu obszarów, generacja relacji między obszarami oraz identyfikacja obiektu oraz jego położenia.

Możliwości systemów wizyjnych mogą być znacznie rozszerzone przez zastosowanie zasady integracji. Integracja ta może obejmować kojarzenie danych pochodzących z różnych czujników, tworzenie mieszanek analizowanych cech, tworzenie mieszanych klasyfikatorów oraz integrację modułów wizji. Kojarzenie danych pochodzących z różnych czujników ma miejsce np. w przypadku obrazów multispektralnych, otrzymywanych przy różnych długościach fali świetlnej. Kojarzenie danych może mieć miejsce na poziomie sygnału, piksela, cechy lub symbolu. Przykładowo kojarzenie danych przestrzennych można przeprowadzać za pomocą modelowania obrazów przy użyciu pól losowych Markowa. Tworzenie mieszanki cech odnosi się np. do analizy tekstur, dla których z reguły istnieje wiele różnych modeli. Mieszając ze sobą cechy pochodzące z różnych modeli można spodziewać się lepszych rezultatów niż w przypadku użycia pojedynczego modelu. W wyniku takiego mieszania otrzymujemy jednak bardzo dużą liczbę cech i koniecznym staje się znalezienie, które z tych cech są wzajemnie niezależne i muszą być uwzględnione, a które można pominąć. Tworzenie mieszanych klasyfikatorów wynika z przeświadczenia, że każdy klasyfikator ma swoje wady i zalety. Żaden klasyfikator nie może efektywnie przetwarzać wszystkich typów danych, a zmieniając parametry klasyfikatora możemy dostać ciąg klasyfikatorów zamiast jednego. Przykładem generacji ciągu klasyfikatorów jest użycie sieci neuronowych z róż-

nyimi parametrami lub nauczonych na różnych zbiorach. Przykładami metod mieszania wyników z różnych klasyfikatorów jest głosowanie, przecięcie obszarów decyzyjnych, teoria Dempstera-Shafera, maksimum rankingu, adaptacyjne ważone średnie, metody Bayesa i inne. Integracja różnych modułów wizyjnych również może dać poprawę wyników, np. w celu uzyskania informacji 3-wymiarowej można wykorzystać moduły: kształt-z-cienia, kształt-z-tekstury, moduł stereo i moduł organizacji percepcyjnej.

W związku z olbrzymią liczbą pojawiających się algorytmów przetwarzania obrazów powstaje problem oceny ich wartości i eliminacji algorytmów. Zwykle jako kryterium przyjmuje się np. dokładność i szybkość działania, ale mogą występować i inne kryteria, które uwzględniają globalny efekt działania systemu, a nie tylko efekt danego algorytmu. W pewnych przypadkach, np. przy ocenie algorytmów do analizy obrazów medycznych, dużego znaczenia nabiera wybór wspólnych baz danych obrazowych, które będą użyte do testowania różnych algorytmów.

Przetwarzanie obrazów cyfrowych obejmuje pewną część zagadnień wizji komputerowej, ponieważ sprowadza się do zmiany postaci tych obrazów lub sygnałów tak, by łatwiejsza była ich interpretacja. Celem przetwarzania obrazów jest pomoc człowiekowi w podejmowaniu decyzji w różnych dziedzinach zastosowań, np. w pomiarach zdalnych, biometrii, interpretacji dokumentów, analizie obrazów biomedycznych, a także w automatycznym wykrywaniu obiektów przez robota, w nawigacji autonomicznej oraz automatycznej inspekcji wyrobów. W dalszym ciągu pojawia się również tendencja do transformacji obrazów w modele obiektów 3-wymiarowych. Przykłady takich zastosowań istnieją w procesach produkcyjnych oraz w planowaniu operacji chirurgicznych.

2 Aktualny stan badań

Przegląd aktualnego stanu badań w zakresie przetwarzania obrazów, wizji komputerowej i graficznej reprezentacji wiedzy będzie zilustrowany na kilku przykładach, które nie wyczerpując wszystkich możliwości stanowią próbkę osobistego doświadczenia autorów tekstu.

Jednym z zagadnień z dziedziny analizy obrazów medycznych jest *wykrywanie mas nowotworowych* w mammografii. Badania statystyczne dowodzą, że rak piersi jest główną przyczyną zgonów z powodu raka. Roczna śmiertelność z powodu raka piersi wynosi bez mała 50 000 osób w USA. Dotychczas nie wiadomo, jakie jest pochodzenie tej choroby i nie wyodrębniono pojedynczej dominującej przyczyny zachorowań na raka piersi. W tej sytuacji, mammografia rentgenowska jest podstawową techniką wykrywania małych zmian. Czułość tej metody jest rzędu 85–95%, co daje przynajmniej 30% spadek w liczbie zgonów z powodu raka piersi. Podstawowymi wczesnymi zmianami obserwowanymi w mammogramach są mikrozwapnienia oraz masy, zmiany w budowie piersi oraz asymetria piersi. Masy mogą być skupione, spikularne lub nieregularne. Zmiany w mammogramach są często niewielkie i słabo widoczne. W efekcie zdarzają się często pomyłki radiologa, który może stosować zmienne kryteria decyzyjne, może zasugerować się innymi cechami zauważonymi w obrazie, albo może po prostu przeoczyć poszukiwane zmiany. Ok. 30% zmian charakteryzuje się trudno uchwytnymi cechami złośliwości. W przypadku wątpliwości trzeba pobrać tkankę do biopsji. Okazuje się jednak, że tylko 20–30% biopsji dotyczy przypadków złośliwych. Z drugiej strony, 10–30% widocznych w mammogramach przypadków raka pozostaje nie wykrytych. Opracowanie możliwie niezawodnych komputerowych metod diagno-

zowania raka jest potrzebne ze względów ogólnospołecznych. W ostatnich kilku latach powstało wiele metod zarówno wykrywania jak i klasyfikacji mas jako zdrowych lub nowotworowych. Metody te używają różnych cech do klasyfikacji, obliczanych przy użyciu transformacji falkowych, fraktali, cech statystycznych oraz obliczanych z zastosowaniem modeli wizyjnych. Używane metody klasyfikacji opracowano z użyciem teorii zbiorów rozmytych, pól losowych Markowa, sieci neuronowych oraz dopasowywania wzorców. Mimo widocznego postępu ciągle jeszcze metody te są niewystarczające. Co dwa lata są organizowane konferencje — International Workshops on Digital Mammography. W 2002 roku odbyła się szósta. Na każdej jest przedstawiane 100–200 referatów, a problem wciąż jest aktualny.

Dziedzina analizy obrazów astrofizycznych wiąże się obecnie z zupełnie nowym i dość niespodziewanym pojęciem, jakim jest *obserwatorium wirtualne*. Wirtualne obserwatorium solarne jest to obserwatorium słońca zorganizowane w skali globu ziemskiego. Olbrzymia liczba teleskopów i innych instrumentów zainstalowanych na pojazdach kosmicznych prowadzi skoordynowaną obserwację aktywności słonecznej, takiej jak rozbłyski, wyrzuty masy z korony słonecznej, oscylacje, itd. Dzięki koordynacji obserwacji ten sam obiekt jest obserwowany przez różne instrumenty w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Przykładem takiej koordynacji jest współdziałanie amerykańskich satelitów misji SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), HESSI (High Energy Solar Spectroscopic Imager), TRACE (Transition Region and Coronal Explorer), a także japońskiego Yohkoh. Również na ziemi 45 instrumentów bierze udział w tym samym przedsięwzięciu. Z jednej misji można dostać 1 GB danych pierwotnych dziennie. Z danych tych trzeba wydobyć i przeanalizować dokładnie to, co nas interesuje. Oczywiście jest, że software do analizy danych powinien być kompletnie przezroczysty, to znaczy niezależny od tego, z jakiego instrumentu chcemy pobierać dane. Wyszukiwanie danych powinno odbywać się za pomocą jednego mechanizmu w skali globalnej, umożliwiającego pobranie danych przez internet niezależnie od tego, z jakiego instrumentu one pochodzą. Również analiza danych powinna być niezależna od tego, z jakiego instrumentu one pochodzą. Istnieją trzy rodzaje miejsc, z których można pobierać dane: archiwa danych pierwotnych, zawierające dane z indywidualnych instrumentów, archiwa synoptyczne, zawierające dane pierwotne pochodzące z różnych instrumentów, oraz magazyny naukowe, zawierające te same dane, co archiwa synoptyczne, oraz dane pochodne. Dane pierwotne w archiwach są przechowywane w formacie binarnym i są różnych typów, ale najczęściej występują jako tablice, obrazy, spektrogramy, zbiory audio lub video. W chwili obecnej coraz powszechniejszy jest format FITS (Flexible Image Transport System), do którego istnieje oprogramowanie dostępne w internecie. Systemy do wyszukiwania danych w archiwach danych pierwotnych przeważnie są zorganizowane chronologicznie, według daty i godziny. Nie istnieje jednak taki system, który pozwalałby np. odnajdywać klasy rozbłysków. Niektóre archiwa danych pierwotnych mają jednak swoje własne systemy zarządzania relacyjnymi bazami danych, co ułatwia poszukiwania użytkownikowi. Archiwa danych synoptycznych umożliwiają wyszukiwanie w pojedynczej operacji danych otrzymanych z różnych instrumentów, np. danych dla tej samej chwili czasowej. Przykładem archiwum synoptycznego jest archiwum SOHO. Magazyny danych naukowych są w fazie powstawania. Mają one gromadzić dane pochodne, tzn. dane przetworzone wstępnie, które będą w przyszłości używane do analizy danych w trybie on line. Myśl przewodnią jest następująca: poszczególni użytkownicy wyszukują dane, a następnie wykonują na nich wielokrotnie te same operacje. Można więc wykonać te operacje raz na zawsze i udostępniać wyniki. Celem analizy danych jest wydobyć informacji z danych. Analiza ta składa się z ciągu

wyborów i transformacji. Najczęstsze transformacje dotyczą analizy szeregów czasowych, dopasowania widmowego, dopasowania krawędzi dysku słońca, wizualizacji wyników, transformacji współrzędnych, itd. Tworzenie oprogramowania dla różnych instrumentów jest pracochłonne i istnieje tendencja do opracowania uniwersalnych algorytmów niezależnych od indywidualnych instrumentów. Przykładem takiego zintegrowanego oprogramowania jest Solarsoft, opracowany na bazie doświadczeń z SOHO, HESSI, Yohkoh i inn. Od strony koncepcyjnej dowolny system analizy danych słonecznych posiada ramę (framework), która stanowi abstrakcyjną klasę w języku programowania obiektowego. Klasa ta nie zawiera informacji o typach danych, algorytmach, itd. Typy danych i algorytmy są zdefiniowane w poszczególnych, konkretnych klasach i klasy te mogą być dodawane i modyfikowane. W tych klasach powinien mieścić się software już opracowany, lub mający dopiero powstać. Oczywiście jest, że opisywana globalizacja w dziedzinie oprogramowania dla obrazów słonecznych może mieć konsekwencje również w innych zastosowaniach przetwarzania obrazów.

Z analizą obrazów wiąże się często *zagadnienie detekcji i śledzenia ruchu*. Ruch jest jednym ze źródeł zmian czasowych w sekwencjach obrazów. Poruszać się mogą zarówno obserwowane obiekty w scenie 3-wymiarowej, jak i sama kamera. Jeżeli znane są parametry kamery, takie jak obrót, przesunięcie oraz ogniskowa, to zadanie jest prostsze — można wyznaczyć parametry ruchu obiektów. Ruch 3-wymiarowy kamery i obiektów powoduje ruch pozorny w 2-wymiarowej płaszczyźnie obrazu, zwany przepływem optycznym. Dzięki znajomości ruchu w obrazie możemy dokonać kompresji strumienia video, ponieważ zmiana rozkładu jasności w pikselach następuje w kierunku ruchu. W celu estymacji ruchu należy sformułować następujące trzy elementy: model ruchu, kryterium estymacji ruchu oraz strategię znajdowania parametrów ruchu, optymalizujących przyjęte kryterium. Przykładami prostych modeli ruchu 2-wymiarowego są modele: translacyjny, afiniczny, kwadratowy. Natomiast suport dla reprezentacji ruchu może obejmować cały obraz, może być gęsty, albo może odnosić się do bloków lub dowolnych obszarów. W przypadku kompresji video znajomość ruchu pozwala na usunięcie redundancji czasowej w danych, a tym samym na otrzymanie wysokiego stopnia kompresji obrazów. Np. kompensacja ruchu przy użyciu obszarów o dowolnym kształcie była zastosowana w standardzie MPEG-4. Najbardziej zaawansowanym modelem ruchu jest model hierarchiczny. W modelu tym ruch zgrubny jest reprezentowany na wyższych poziomach piramidy, a ruch drobny — na niższych. W zakresie kryteriów estymacji ruchu istnieje wiele możliwości. W najprostszym przypadku minimalizuje się błąd średniokwadratowy predykcji. Inna metoda polega na zastosowaniu kryteriów minimalizacji w dziedzinie transformaty Fouriera. Stosuje się również metody regularyzacyjne, w których wprowadza się dodatkowe ograniczenia, np. warunek gładkości ruchu. Najbardziej zaawansowanych metod, uwzględniających gładkość ruchu, dostarczają pola losowe Markowa. Procedury estymacji ruchu optymalizują wybrane kryterium względem parametrów ruchu. Przy niewielkiej liczbie parametrów stosuje się dopasowanie, tj. wybiera zestaw parametrów optymalnie spełniający wybrane kryterium. W przypadku gęstego pola ruchu liczba parametrów jest olbrzymia. Stosuje się wtedy metody relaksacyjne, w których generowany jest ciąg pól w ten sposób, że pole następne różni się od poprzedniego tylko w pojedynczym miejscu. Inne metody polegają na optymalizacji gradientu, technikach pola uśrednionego, a także optymalizacji hierarchicznej. Wymienione metody są ciągle udoskonalane, jednak nadal brak jest odpornych, uogólnionych metod estymacji ruchu.

Cyfrowa restauracja obrazów jest to dziedzina powstała w czasach wczesnych programów kosmicznych. Pierwsze zdjęcia systemu słonecznego oraz ziemi okazały się silnie zniekształcone

w wyniku niedoskonałych warunków optycznych, drgań urządzeń, obracania się satelity, niemożności utrzymania się w stałej pozycji przez astronautę wykonującego zdjęcia. Poprawa takich zdjęć stała się następnie możliwa dzięki rozwinięciu się teorii i praktyki cyfrowej restauracji obrazów. Główne dziedziny zastosowań restauracji obrazów to astronomia i medycyna. Najbardziej znany przypadek restauracji obrazów w astronomii to usunięcie zniekształceń w obrazach pochodzących z teleskopu kosmicznego Hubble'a, który w pierwotnej wersji charakteryzował się niedokładnościami wykonania zwierciadła. W medycynie restauracja obrazów jest stosowana do filtracji szumu o rozkładzie Poissona, np. pochodzącego od struktury ziarnistej filmów używanych w rentgenografii klatki piersiowej, mammogramach, w celu usuwania szumu addytywnego w obrazach z magnetycznego rezonansu jądrowego. Restauracja obrazów ma również zastosowanie w poprawianiu miernej jakości taśm video, np. przedstawiających scenę zbrodni lub tablicę rejestracyjną samochodu. Jednym z bardzo znanych przypadków restauracji takiej sekwencji była analiza taśmy przedstawiającej zastrzelenie prezydenta J. F. Kennedy'ego. Zasadniczym celem restauracji obrazu jest odtworzenie sceny oryginalnej na podstawie zdegradowanego obrazu. Techniki restauracji typowo posługują się jakimś modelem degradacji, np. rozmazania obrazu lub zaszumienia i stosują procedurę odwrotną w celu otrzymania aproksymacji sceny oryginalnej. Klasyczne metody restauracji obrazów zostały zaczerpnięte z takich dziedzin jak przetwarzanie sygnałów, teoria estymacji i analiza numeryczna i mogą być zarówno algorytmami deterministycznymi jak i stochastycznymi. Przykładami takich metod jest filtracja odwrotna, filtr Wienera, filtr min-kwadratowy z ograniczeniem, algorytm iteracyjny Tichonowa, filtry rekurencyjne, np. dyskretny filtr Kalmana. Metody klasyczne powodują powstawanie dwóch rodzajów artefaktów w obrazie wynikowym. Jednym z nich są oscylacje wokół krawędzi obiektów — zamiast pojedynczej krawędzi widzimy kilka, mniej więcej równoległych. Drugim rodzajem artefaktów jest pojawienie się fałszywej tekstury w obszarach płaskich w obrazie. Efekt ten jest wynikiem filtracji szumu występującego w obrazie. Metody rozwijane współcześnie mają na celu usunięcie wspomnianych artefaktów. Przykładem takich filtrów są filtry adaptacyjne, których działanie zależy od położenia w obrazie. W miejscach występowania krawędzi stosowany jest wtedy filtr zbliżony do filtru odwracającego, a w obszarach płaskich — filtr z nadregularyzacją. Metody probabilistyczne wykorzystujące maksimum *a posteriori* używają rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych w przestrzeni jako informacji *a priori* uwzględniającej niestacjonarność w obrazie. Osobnym problemem jest restauracja obrazów kolorowych, a także restauracja sekwencji obrazów. Nowsze algorytmy stosują sieci neuronowe, a także transformatę falkową. Dzięki dekompozycji falkowej obrazu można zastosować zmienną skalę rozdzielczości. Przykładem jest użycie wieloskalowego wygładzania Kalmana do współczynników transformaty falkowej o strukturze drzewa czwórkowego obliczonej dla obrazu zaszumionego. Dzięki zastosowaniu filtracji wstępnej uzyskuje się krawędzie, a dzięki adaptacyjnemu filtrowi Kalmana usuwa się szum. W wyniku powstaje obraz z zadowolającymi krawędziami i usuniętym szumem. Przyszłe prace w dziedzinie restauracji obrazów będą zależne od zastosowań. Jedną z dziedzin jest rynek produktów konsumenckich. Trzymana w rękę kamera wymaga cyfrowego ogniskowania oraz zmniejszenia skutków jej poruszenia, co może być osiągnięte przy użyciu ulepszonych metod restauracji obrazów. Drugą, ważną dziedziną zastosowań jest telemedycyna, pozwalająca na diagnozowanie chorób na podstawie obrazów przesyłanych za pośrednictwem telekomunikacji. Szczególnie istotnym jest problem zmiennego w przestrzeni rozmazania obrazu, co wymaga opracowania metod jego identyfikacji. Teoretyczne metody, które będą stosowane do rekonstrukcji obrazów to pola losowe Markowa oraz transformata falkowa.

Stereoskopowa komunikacja wizyjna jest dziedziną związaną z przyszłością systemów komunikacyjnych. Systemy te pozwolą osiągnąć obrazowanie stereoskopowe, 3-wymiarowe, z różnych punktów obserwacji w pełnej przestrzeni. W efekcie powstanie pełne wrażenie teleobecności, tj. obecności wewnątrz obserwowanej sceny. Poza rozgłośniami pojawią się zastosowania takie, jak telekonferencje, telemedycyna oraz przemysł rozrywkowy. Teleobecność będzie stanowiła rozszerzenie obecnych videokonferencji umożliwiając komunikację niewerbalną, np. kontakt wzrokowy, postrzeganie przestrzenne, przekazywanie gestów oraz wyrazu twarzy. Konkretnie możliwości teleobecności będą zależały od użytych czujników, takich jak kamery video, czujniki podczerwieni, systemy do śledzenia ruchu głowy, oczu, ciała i rąk. Współczesne dysплеje będą zastąpione przez dysплеje 3-wymiarowe w konfiguracji auto-stereoskopowej. Dysплеje takie będą optycznie dostosowywały się do każdego z oczu widza. W efekcie, dzięki śledzeniu położenia głowy, będzie możliwa identyfikacja punktu obserwacji indywidualnego widza, który będzie obserwował obraz stereoskopowy dostosowany do tego punktu. Od strony transmisji rozwinięte zostaną metody kompresji mające zastosowanie do stereo, obrazów 4-wymiarowych (3 wymiary przestrzenne i czas). Specjalne znaczenie przypisuje się kodowaniu obiektów (object-based coding). Kodowanie obiektów umożliwi parametryczny opis sceny 3-wymiarowej, a w konsekwencji dokładne jej modelowanie oraz rekonstrukcję. Kodowanie obiektowe wymaga skomplikowanych metod analizy obrazów, ponieważ wiąże się z ekstrakcją poszczególnych obiektów z obrazu, tj. znalezieniem ich krawędzi i tworzeniem modeli parametrycznych, np. twarzy, rąk i ciała.

Automatyzacja w analityce i diagnostyce medycznej możliwa była dzięki zastosowaniu *obrazowania medycznego*, łączącego w sobie kamerę cyfrową z mikroskopem. Należy się spodziewać, że w miarę postępu technologicznego i spadku cen kamer CCD, będą one wraz z komputerem należały do podstawowego instrumentarium lekarza, tak jak obecnie słuchawki i termometr. Badania krtani, uszu, oczu, skóry, itp. z zastosowaniem cyfrowego przetwarzania obrazów, porównywanie obrazów tej samej części ciała pacjenta w różnych okresach czasu, radykalnie zmienią metody diagnozowania. Celem jest tu obiektywizacja wyników obserwacji, będących obecnie w pewnym stopniu subiektywnymi. Jako przykłady można wymienić takie często spotykane elementy opisów wyników badań, jak „w granicach normy”, „nie zmieniło się”, „znacznie powiększone”, „dyskretne zmiany”, i tym podobne. Możliwość szybkiego przeprowadzenia dokładnego pomiaru interesujących cech obiektów i zjawisk obserwowanych w obrazach ułatwi diagnostykę i stanie się narzędziem wspierającym człowieka w podejmowaniu celniejszych decyzji. Ten kierunek rozwoju techniki obrazowania i przetwarzania jest już przesądzony. Tempo jego rozwoju jest kwestią nakładów finansowych na badania i wzrostu świadomości środowiska lekarskiego.

Systemy automatycznej inspekcji wizyjnej (Automated Visual Inspection) były intensywnie rozwijane w latach 90. i z pewnością prace nad nimi będą kontynuowane. Systemy takie częściej określa się mianem wizji maszynowej, a nie komputerowej. Różnych zastosowań przemysłowych systemów inspekcji wizyjnej są dosłownie dziesiątki, jeśli nie setki, i przedstawienie tutaj w miarę wyczerpującej listy mija się z celem. Przykładowo można jednak wymienić kontrolę jakości klocków hamulcowych, obwodów scalonych, obwodów drukowanych, sortowanie krewetek, kafelków ceramicznych, wiertel, drewna, monitorów telewizyjnych, papieru ściernego, opakowań, spawów, nalepek na videokasety, wyrobów tekstylnych, sortowanie cytrusów, kontrola smug na materiale dżinsowym, sklejkę, sortowanie drobiu, kontrola zderzaków samochodowych, powłok lakierowych na karoseriach samochodowych, wykrywanie defektów blachy walcowanej, odkuwek, puszek do piwa, śrub, identyfikacja warzyw w kasach supermarketów, detekcja defektów reaktorów

jądrowych i wiele innych. Przyszłe badania będą miały na celu zwiększenie szybkości działania systemów inspekcji wizyjnej, a w szczególności uelastycznienie systemów wizyjnych i usunięcie wielu ich ograniczeń, np. typowe systemy wizyjne były dotychczas opracowane do inspekcji pojedynczych obiektów, znajdujących się w ściśle określonym położeniu i odpowiednio oświetlonych. Dodatkowy wysiłek będzie skierowany na uproszczenie obsługi systemów inspekcji wizyjnej.

Odwzorowanie danych naukowych oraz informacji w obraz stanowi przedmiot *wizualizacji naukowej*. Odwzorowanie to często jest niedoceniane, tymczasem dobór częstości próbkowania, filtrów do rekonstrukcji, a także właściwości ludzkiego systemu wizyjnego mają zasadniczy wpływ na analizę i interpretację wyników. Większość danych przedstawia się przy użyciu dyskretyzacji w przestrzeni, w wartości i w czasie. Występują więc problemy właściwej filtracji, modelowania kolorów. Jednocześnie, ze względu na olbrzymią ilość danych występuje konieczność automatycznej ekstrakcji cech, kompresji oraz wizualizacji wieloskalowej.

Diagramatyka, czyli graficzna reprezentacja wiedzy jest bardzo młodą dziedziną nauki, której przedmiotem jest badanie graficznych form reprezentacji wiedzy i ich wykorzystania jako narzędzia gromadzenia, komunikacji i przetwarzania (wnioskowania) wiedzy i informacji przez ludzi i komputery. Jest to dziedzina wysoce interdyscyplinarna: opiera się na wynikach i dorobku wielu dziedzin nauki, techniki i innej działalności człowieka, od grafiki użytkowej, przez psychologię widzenia i psychologię kognitywną, do komputerowego przetwarzania obrazów i grafiki komputerowej.

Badania w diagramatyce koncentrują się obecnie w trzech podstawowych obszarach:

- Psychologii kognitywnej, gdzie bada się mechanizmy operowania informacją graficzną przez człowieka w różnych formach jego działalności.
- Teorii diagramów, gdzie opracowuje się teoretyczne i formalne modele i własności różnego rodzaju notacji diagramowych, języków wizualnych, a także procesów przetwarzania informacji w tej postaci.
- Zastosowań diagramów, gdzie analizuje się, ulepsza i projektuje różnorodne praktyczne systemy notacji diagramowych dla różnych dziedzin zastosowań, a także prowadzi się prace nad ich komputerowymi implementacjami.

W diagramatyce występuje ciągle jeszcze wiele nierozwiązanych problemów i całych słabo poznanych obszarów. Do najważniejszych z nich należą:

- Struktura języków wizualnych i systemów notacji diagramowych, zarówno od strony modeli formalnych, jak i metod implementacji komputerowych.
- Zasady i metody ścisłego wnioskowania diagramowego, w tym teoria błędów wnioskowania i sposobów ich unikania.
- Komputerowa implementacja efektywnych i praktycznie użytecznych systemów interakcyjnego operowania diagramową postacią informacji w systemach człowiek–komputer.

3 Problemy strategiczne

W zakresie przetwarzania obrazów i sygnałów wielowymiarowych istnieje wiele problemów strategicznych, które częściowo zostały rozwiązane, a w dużej części będą przedmiotem dalszych badań w najbliższych latach. W kraju o tak skromnych możliwościach jak Polska nie mamy szans podejmowania najbardziej newralgicznych badań strategicznych, wobec czego ograniczyć się trzeba tylko do tych problemów, w których mamy choćby niewielkie możliwości osiągnięcia jakichś wyników. Gwoli ciekawości wspomniany tu zostanie jedynie problem sztucznego oka. Przywrócenie wzroku niewidomemu od tysiącleci było uważane za cud. W chwili obecnej elektronicy, oftalmolodzy oraz biolodzy wspólnie pracują nad trzema możliwościami wspomaganie wzroku: a) poprawą wzroku, co oznacza przetwarzanie obrazu w celu uzyskania maksymalnej widoczności i przesłanie do działającej części siatkówki, b) protezą oczną umożliwiającą przetworzenie informacji wizyjnej i przesłanie jej do siatkówki wewnętrznej lub nerwów przekazujących informację za pomocą pobudzeń elektrycznych do mózgu, c) sztuczny wzrok, przetwarzający i interpretujący informację wizyjną i przekazujący wyniki człowiekowi za pomocą czujników niewizyjnych. Szacuje się, że prototypy protez ocznych powstaną ok. 2010 roku.

Wracając do bardziej osiągalnych w naszych warunkach celów można wymienić następujące problemy strategiczne do realizacji:

- opracowanie nowych transformacji obrazów,
- prace nad modelowaniem obrazów,
- prace nad filtracją i restauracją obrazów,
- prace nad estymacją ruchu,
- opracowanie wybranych metod kodowania obrazów i video,
- opracowanie obliczeniowych systemów obrazujących,
- zastosowanie metod przetwarzania obrazów w medycynie,
- zastosowanie metod przetwarzania obrazów w astrofizyce,
- zastosowanie metod przetwarzania obrazów w badaniu struktur materiałowych.

4 Przewidywane problemy do rozwiązania w IPPT

Dziedziny teoretyczne z zakresu przetwarzania obrazów, które będą kontynuowane bądź zostaną podjęte w IPPT to:

Morfologia matematyczna

W dziedzinie tej będą prowadzone prace w zakresie segmentacji obrazów, szczególnie z zastosowaniem metody wododziału (watershed). Zasadniczą trudność w zastosowaniach tej metody

stanowi fakt, że następuje nadsegmentacja obrazu. W związku z tym powstaje konieczność łączenia segmentów w większe obszary. Jednak samo łączenie segmentów nie wystarcza. Zwykle chodzi bowiem o ekstrakcję interesujących nas obiektów. Wobec tego proces łączenia powinien być prowadzony nie globalnie, a tylko w interesujących nas miejscach w obrazie. Opracowanie nowych metod i algorytmów do ekstrakcji obiektów jest silnie zależne od dziedziny zastosowań i będzie przedmiotem badań.

Rozmyte przetwarzanie obrazów

W zakresie rozmytego przetwarzania obrazów będą prowadzone w IPPT obszerne prace mające na celu opracowanie nowych metod segmentacji i filtracji obrazów oraz analizy stosunków przestrzennych między obiektami w obrazie. W szczególności są i będą rozwijane techniki logiki rozmytej w zastosowaniu do obrazów medycznych.

Wieloskalowa analiza obrazów z zastosowaniem falek oraz równań dyfuzji

W IPPT będą prowadzone prace nad zastosowaniem falek do klasyfikacji tekstur, detekcji defektów, ekstrakcji obiektów, rekonstrukcji i restauracji obrazów. Jednym z kierunków badań może być też opracowanie nowych modeli wizyjnych, tj. ciągów operacji niezbędnych do analizy obrazów. Modele takie zależą od typu obrazu. W obrazach klasycznych, np. produktów przemysłowych, stosuje się model wizyjny odnoszący się do bryły sztywnej, która jest widziana przez swą powierzchnię, a wykrywana jest przez detektor krawędzi. W niektórych typach obrazów, np. astronomicznych, medycznych, biologicznych, przepływów hydrodynamicznych występują obiekty rozproszone i rozmyte (diffused objects). Zastosowanie analizy wieloskalowej może ułatwić wykrywanie takich obiektów.

Modelowanie obrazów za pomocą pól losowych Markowa

Prace nad modelowaniem obrazów za pomocą pól losowych Markowa były prowadzone w latach poprzednich w związku z badaniami nad detekcją i śledzeniem ruchu. Można przewidywać, że prace związane z polami Markowa będą kontynuowane, np. w analizie wieloskalowej obrazów łącznie z dekompozycją falkową obrazu.

Statystyczne metody rozpoznawania wzorców

W wielu przypadkach celem jest nie tylko detekcja i ekstrakcja obiektu z obrazu, ale również klasyfikacja tego obiektu. Np. przy wykryciu masy guza w mammogramie potrzebne jest określenie jego cech, na podstawie których guz ten będzie zdiagnozowany jako złośliwy lub łagodny. Innym przykładem są bazy danych obrazowych, w których podstawowym problemem jest klasyfikacja obrazów w celu umożliwienia ich wyszukiwania. W zakresie statystycznych metod rozpoznawania wzorców i klasyfikacji obiektów podjęte będą próby zastosowania powstałych w ostatnich latach metod statystycznych, takich jak SVM (Support Vector Machines).

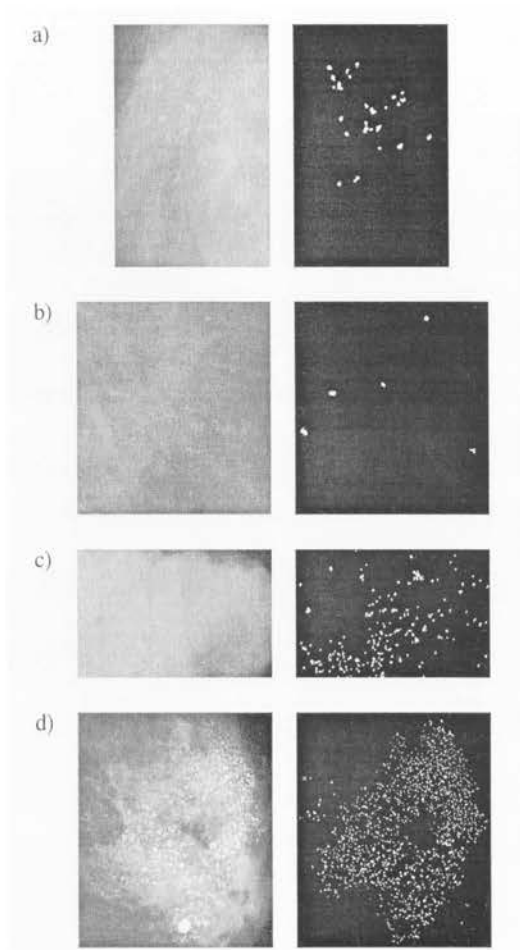
Zastosowania opracowanych metod przetwarzania i analizy obrazów są silnie zależne od dostępności obrazów, które często pochodzą z wyspecjalizowanych laboratoriów, poza IPPT, a nawet poza Polską. W takiej sytuacji w grę wchodzi prawa autorskie związane ze zdjęciami i trudno jest z całą pewnością przewidzieć rozwój sytuacji. Czasami koszt uzyskania zdjęć jest tak duży, że przedsięwzięcie staje się nieopłacalne. Poniżej omówiono te zastosowania, w odniesieniu do których mamy już bazę danych obrazowych lub wiadomo jest dokładnie, że baza taka będzie dostępna.

W następnych podrozdziałach zostaną omówione przewidywane dziedziny zastosowań przetwarzania obrazów.

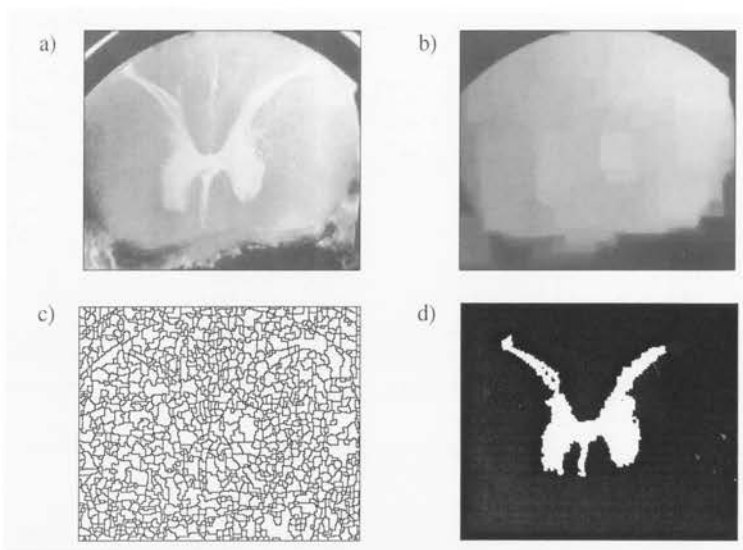
Analiza obrazów medycznych

Wspomagana komputerowo mammografia może przyczynić się do zautomatyzowania diagnozowania raka. Mikrozwapnienia wykrywane w mammografii stanowią najwcześniejszy objaw rozwijającej się choroby. Kilka przykładów wykrywania mikrozwapnień przy użyciu opracowanej uprzednio metody morfologicznej przedstawiono na Rys. 1. Przykłady te wzięto z bazy danych mammogramów opracowanej z materiałów krajowych. W IPPT będą rozwijane badania zarówno w zakresie wykrywania i klasyfikacji mikrozwapnień, jak i detekcji oraz klasyfikacji mas. Zagadnienie to składa się z dwóch części. Pierwsza część to samo wykrywanie mikrozwapnień i mas, a w szczególności ich konturów oraz rozkładu jasności w obrębie mikrozwapnień i mas. Druga część to ekstrakcja cech numerycznych tych mikrozwapnień, klasterów mikrozwapnień, a także cech numerycznych mas i wykorzystanie tych cech do klasyfikacji zmian pod kątem złośliwości. Przewiduje się rozwijanie metod zmiennej skali, zastosowanie piramidy morfologicznej, falek, pół losowych Markowa, a szczególnie różnych wariantów logiki rozmytej. Zasadnicza różnica w stosunku do Rys. 1 będzie polegała na użyciu międzynarodowej bazy danych mammogramów, co pozwoli na porównanie różnych metod oraz na prowadzeniu poszukiwań metod specyficznych dla mikrozwapnień bardzo słabo widocznych, odpowiadających możliwie wczesnemu stadium choroby.

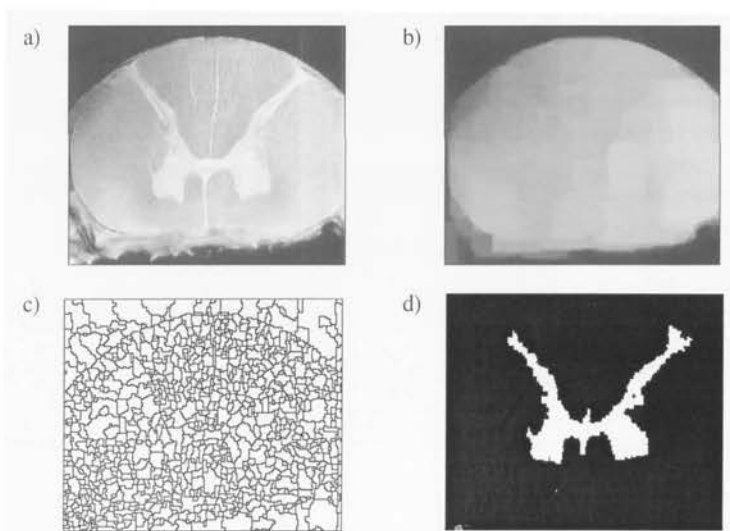
Jedną z podstawowych metod segmentacji obrazów będzie metoda wododziału. Natomiast ekstrakcja obiektów (obszarów) będzie prowadzona przy użyciu logiki rozmytej, która umożliwi łączenie segmentów (region merging) w obszary mające bezpośrednią interpretację fizyczną. Na Rys. 2 i 3 przedstawiono dwa przykłady segmentacji wododziałowej przekrojów rdzenia kręgowego otrzymanych z magnetycznego rezonansu jądrowego. Obrazy takie są otrzymywane przy dużej zmienności współczynnika wzmocnienia układu pomiarowego, co wynika z niemożności wygenerowania stałego pola magnetycznego w obszarze badanym. W efekcie różne części obrazu mają różną jasność. Prawa górna część obrazu na Rys. 2a oraz prawa część obrazu na Rys. 3a jest jaśniejsza. Jest to również zobrazowane na Rys. 2b i 3b przedstawiających nierównomierność sygnału. Nierównomierność ta utrudnia automatyczne wydobycie kształtu materii szarej, tj. centralnie położonego jaśniejszego „motyla”. Na Rys. 2c i 3c przedstawiono segmentację wododziałową obrazu rdzenia kręgowego. Jak pokazują te rysunki wynikiem segmentacji jest podział całej płaszczyzny obrazu na dużą liczbę małych segmentów. Na Rys. 2d i 3d przedstawiono maski materii szarej otrzymane drogą łączenia odpowiednio wybranych segmentów wododziałowych. Prowadzone będą dalsze prace nad różnymi metodami selekcji i łączenia segmentów wododziałowych, tj. ekstrakcją masek obiektów.



Rys. 1. Przykłady mammogramów oraz masek mikrozwapnień. W kolejnych wierszach a), b), c), d) pokazano po lewej stronie okno wycięte z mammogramu i przedstawiające najistotniejszą część mammogramu, a po prawej odpowiadającą mu mapę mikrozwapnień



Rys. 2. Przykład analizy zdjęcia rdzenia kręgowego otrzymanego z magnetycznego rezonansu jądrowego; a) obraz oryginalny, b) obraz nierównomierności sygnału w obrazie, c) linie wododziału, d) maska materii szarej

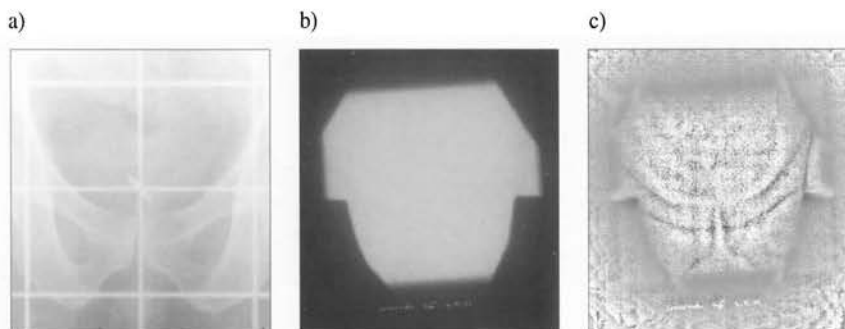


Rys. 3. Przykład analizy zdjęcia rdzenia kręgowego otrzymanego z magnetycznego rezonansu jądrowego; a) obraz oryginalny, b) obraz nierównomierności sygnału w obrazie, c) linie wododziału, d) maska materii szarej

W IPPT będą również rozwijane metody dekompozycji falkowej obrazów z użyciem operatorów morfologicznych, np. morfologicznych falek Haara, transformacji szkieletowych i podobnych, które są znane od bardzo niedawna. Zastosowanie tego rodzaju metod do ekstrakcji obiektów jest potencjalnie możliwe, ale wymaga badań, jakie nie były dotychczas podejmowane w literaturze.

Innym z kontynuowanych i rozwijanych w IPPT problemów z zakresu analizy obrazów medycznych będzie nakładanie obrazów (image registration), gdzie badanym zagadnieniem jest analiza jakości leczenia napromienianiem w onkologii. Precyzja w zakresie zgodności położenia organów pacjenta, nowotworu i wiązki promieniowania jonizującego podczas radioterapii ma zasadniczy wpływ na wynik leczenia. Kontrola tej precyzji wymaga pomiaru różnic pomiędzy planowaną a zrealizowaną geometrią procesu leczenia. Będzie rozwijana metoda nakładania, czyli przemieszczania i deformowania w ściśle określony sposób jednego obrazu tak, aby precyzyjnie pokrył się z drugim obrazem. Nie jest wymagana wiedza o tym, który konkretny punkt jednego obrazu ma się pokryć z danym punktem drugiego, a tylko jest potrzebne określenie, które zbiory punktów powinny się nałożyć. Rozwijana metoda pozwala wybrać jedno rozwiązanie spośród niewielkiego zbioru rozwiązań proponowanych, a zatem będzie wspierać decyzję człowieka, a nie ją zastępować. Proponowana metoda powinna być odporna na dane częściowo błędne lub niepełne, co jest ważne w zastosowaniu do obiektów o zmiennych i nieregularnych kształtach. Dotychczasowym osiągnięciem w tej dziedzinie jest implementacja w postaci obszernego oprogramowania, powstającego we współpracy i zgodnie z wymaganiami szpitala onkologicznego. Na Rys. 4–7 przedstawiono przykład procesu badania dokładności radioterapii raka prostaty. Dokładność bada się na podstawie obrazu powstającego podczas planowania leczenia, tj. obrazu symulacyjnego, a także obrazu rejestrowanego podczas każdej z wielu sesji radioterapii, tj. obrazu portalowego. Na obydwu obrazach są znajdowane brzożki pól napromieniania oraz brzożki wybranych struktur anatomicznych — zazwyczaj kości. Bada się, czy pole napromieniania jest tak samo ustawione względem struktur anatomicznych pacjenta na obrazie portalowym, jak to było planowane na obrazie symulacyjnym.

Na obrazach wejściowych (Rys. 4) jedne obiekty są widoczne wyraźnie, a inne nie. Na obrazie symulacyjnym (Rys. 4a), który jest zdjęciem rentgenowskim, brzożki pola napromieniania oraz osie

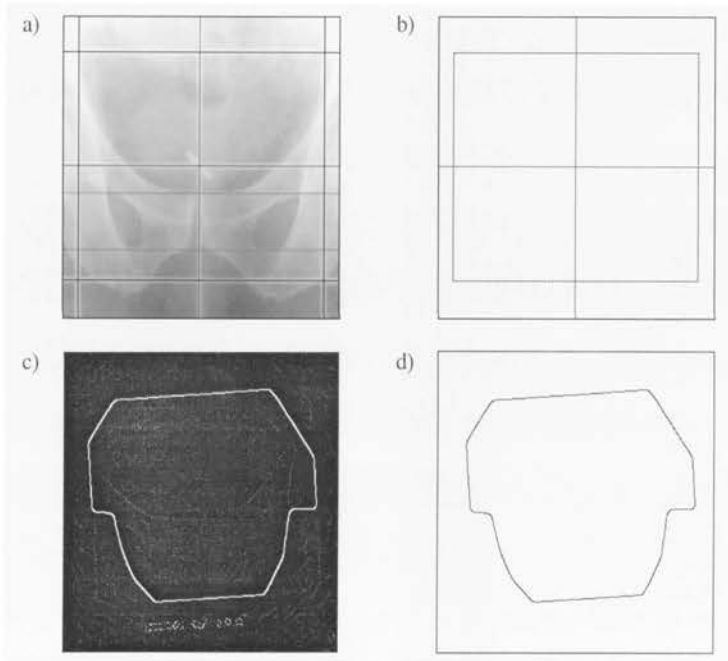


Rys. 4. Dane do kontroli jakości radioterapii raka prostaty: a) obraz symulacyjny, b) obraz portalowy — surowy, c) obraz portalowy — kontrast poprawiony metodą lokalnego adaptacyjnego wyrównywania histogramu

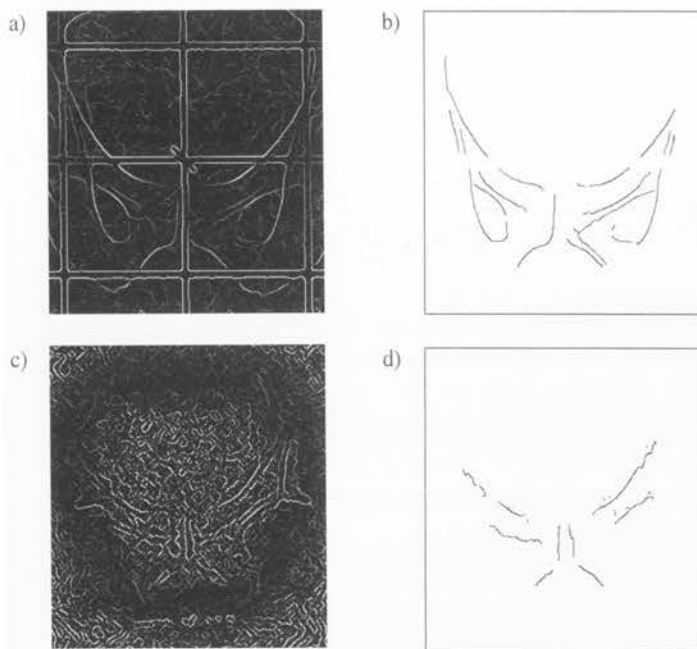
układu współrzędnych są zaznaczane podczas planowania leczenia za pomocą drutów, a struktury anatomiczne są dobrze widoczne. Dodatkowo, często osłony są dorysowywane ręcznie przez lekarza (nie jest to uwidocznione na rysunku). Na obrazie portalowym (Rys. 4b), formowanym na kliszy rentgenowskiej przez promieniowanie terapeutyczne, struktury anatomiczne są widoczne słabo, ponieważ promieniowanie to jest prawie tak samo pochłaniane przez różne tkanki. Natomiast brzegi pola napromieniania — z uwzględnieniem osłon — są doskonale widoczne. W obrazach portalowych konieczne jest poprawianie kontrastu — liniowe, lub inne, jak na Rys. 4c, jednak jakość tego obrazu zawsze pozostaje niska.

Pomiar dokładności realizacji geometrii radioterapii polega na nałożeniu na obraz symulacyjny obrazu portalowego w taki sposób, aby struktury anatomiczne pacjenta w obydwu obrazach precyzyjnie się pokryły, a następnie zmierzeniu, o ile przesunęły się pola napromieniania. Jeśli to przesunięcie jest zerowe, to dokładność jest pełna.

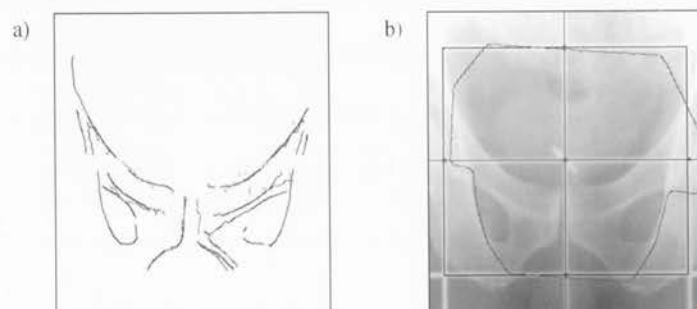
Brzegi pól napromieniania i osie układu współrzędnych w obrazie symulacyjnym można znaleźć stosując transformatę Hougha. Dla zwiększenia odporności metody na złą jakość obrazów, poszukuje się większej liczby linii, niż to konieczne (Rys. 5a), i tworzy się szereg hipotez pól



Rys. 5. Detekcja brzegów pola napromieniania — a), b) na obrazie symulacyjnym, c), d) na obrazie portalowym. W obrazie symulacyjnym brzegi pola i osie układu współrzędnych są oznaczone za pomocą drutów (a), które należy zlokalizować. Na rysunku uwidoczniono jedną z hipotez położenia pola (kolor niebieski) i osi (kolor czerwony). Linie niewykorzystane w hipotezie mają kolor żółty. Operator akceptuje najlepszą hipotezę pokazaną na Rys. (b). W obrazie portalowym brzegi pola są widoczne jako najsilniejsze krawędzie (c), których detekcja przez progowanie jest wystarczająca (d)



Rys. 6. Detekcja brzegów struktur anatomicznych — a), b) na obrazie symulacyjnym, c), d) na obrazie portalowym. a), c) Obrazy intensywności brzegów, b), d) fragmenty brzegów wybrane przez operatora do nakładania



Rys. 7. Wyniki nałożenia. a) Wyniki po nałożeniu struktur anatomicznych. Kolorem niebieskim oznaczono piksele obrazu symulacyjnego, zielonym — piksele obrazu portalowego wybrane do nałożenia (42%), czerwonym — piksele obrazu portalowego odrzucone z analizy (58%). b) Wyniki po zastosowaniu do obrazów brzegów pola napromieniania tej samej transformacji, jak w (a). Pole w obrazie portalowym (piksele zielone) okazało się przesunięte względem pola w obrazie symulacyjnym (piksele niebieskie) o 4,4 mm w prawo i 1,0 mm w dół oraz obrócone o $3,9^\circ$ w prawo

żenia pola i osi. Operator akceptuje jedną z nich (Rys. 5b). Na obrazie portalowym (surowym) brzegi pola są wyraźnie widoczne jako najsilniejsze krawędzie, które można znaleźć typowym detektorem brzegów (Rys. 5c). Progowanie obrazu intensywności brzegów daje wystarczająco dobre wyniki (Rys. 5d).

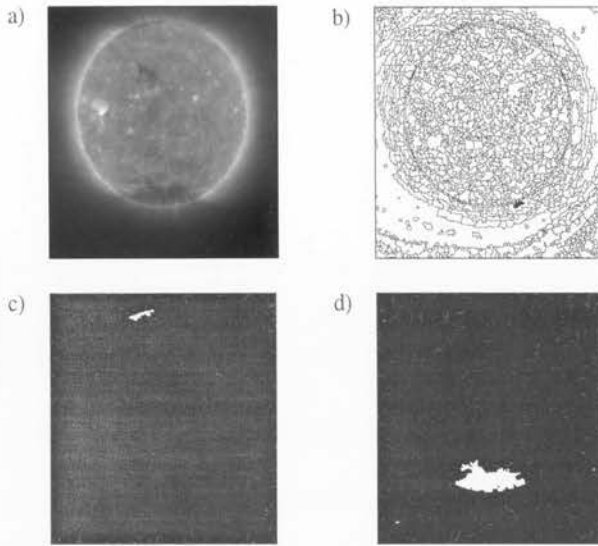
Brzegi struktur anatomicznych w obu analizowanych obrazach są znajdowane przez detekcję brzegów — detektor *zero drugiej pochodnej* (Rys. 6). Brzegi są progowane, a następnie operator wybiera istotne, jego zdaniem, ich fragmenty do nałożenia.

System proponuje kilka wyników nałożenia struktur anatomicznych pacjenta, różniących się udziałem pikseli przyjętych do analizy w stosunku do ogólnej liczby pikseli brzegu struktur w obrazie nakładanym. Widząc na ekranie wyniki dla każdego z udziałów bardzo łatwo wybrać ten, który najlepiej odpowiada rzeczywistemu udziałowi. Na Rys. 7a pokazano wynik nałożenia, w którym przyjęto do nałożenia 42% pikseli, a pozostałe 58% odrzucono jako nie mające odpowiedników w obrazie symulacyjnym. Po zastosowaniu do obrazów brzegów pola napromieniania tej samej transformacji, jak dla struktur anatomicznych, pole w obrazie portalowym okazało się przesunięte względem pola w obrazie symulacyjnym o 4,4 mm w prawo i 1,0 mm w dół oraz obrócone o $3,9^\circ$ w prawo. Te wielkości są wynikami pomiaru dokładności realizacji planowanego napromieniania.

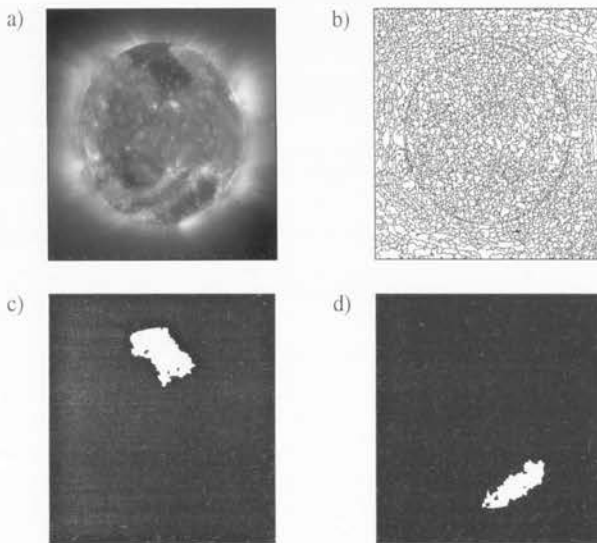
Analiza obrazów astrofizycznych

Analiza obrazów astrofizycznych jest trudna ze względu na fakt, że obrazy te przedstawiają obiekty, z jakimi nie mamy doświadczenia z życia codziennego. Np. obrazy słońca przedstawiają kulę plazmową widzianą przy różnych długościach fal. Przykładem obiektów są dziury w koronie widoczne często w pobliżu biegunów. Dziury te mają rozproszone kontury, zarówno w przestrzeni 3-wymiarowej jak i w obrazie. Dwa przykłady segmentacji obrazów otrzymanych przy długości fali 195 Å przedstawiono na Rys. 8 i 9. Rysunki 8a i 9a przedstawiają obrazy oryginalne. Obrazy te są obrazami z gradacją szarości, ale dla wymienionej długości fali przedstawione są w kolorze zielonym dla odróżnienia od innych długości fali. Rys. 8b i 9b przedstawiają wynik segmentacji wododziałowej otrzymany w pewnych warunkach. Chociaż intuicja podpowiada nam, co należy rozumieć przez dziurę, to jednak przetłumaczenie tego na język sformalizowany jest dalekie od oczywistości. Stosując opracowaną w IPPT metodę optymalizacji kontrastu między obiektem a jego otoczeniem dokonano ekstrakcji dziur położonych na biegunach. Maski tych dziur pokazano na Rys. 8c i d oraz 9c i d. Maski takie składają się z pewnej liczby odpowiednich segmentów wybranych z Rys. 8b oraz 9b.

Badania słońca przeprowadzane wspólnie przez NASA i ESA w ramach misji SOHO (Solar Heliospheric Observatory) dostarczyły już ok. 200 000 zdjęć i zdjęć tych wciąż przybywa. Opracowanie metod analizy tak olbrzymiej bazy danych przy ogromnej zmienności aktywności słońca od solarnego minimum do maksimum jest potężnym wyzwaniem dla specjalistów w zakresie przetwarzania obrazów. Z punktu widzenia IPPT zaangażowanie w obrazy pochodzące z satelity ma swoje zalety. Astronomia jest bowiem dziedziną przodującą w globalizacji. Jak wspomniano w punkcie 2, utworzono już wirtualne globalne obserwatorium astronomiczne. W konsekwencji istnieje dostęp do zdjęć z różnych instrumentów i zdjęcia te są niezależne od parametrów poszczególnych instrumentów. W dalszym ciągu nastąpi też ujednoczenie i udostępnienie oprogramowania do analizy obrazów słońca. W tej sytuacji mamy stosunkowo dobry dostęp do zdjęć, o jaki bywa trudno w innych dziedzinach.



Rys. 8. Ekstrakcja dziur biegunowych w koronie słonecznej; a) obraz oryginalny, b) linie wododziału, c), d) maski dziur



Rys. 9. Ekstrakcja dziur biegunowych w koronie słonecznej; a) obraz oryginalny, b) linie wododziału, c), d) maski dziur

Badanie struktur materiałów porowatych metodami przetwarzania obrazów

Szczególnie szybkiego postępu w przetwarzaniu obrazów należy spodziewać się tam, gdzie tymi samymi lub podobnymi metodami można osiągnąć postęp w kilku, czasami odległych, dziedzinach mających jednak wspólny mianownik. Przykładem są metody przetwarzania obrazów w zastosowaniu do badania struktur porowatych. W IPPT przewiduje się badanie struktur porowatych zarówno w medycynie, przy analizie kości, w szczególności w przypadku osteoporozy, jak i w przemyśle — przy analizie katalizatorów oraz filtrów.

Badanie struktur materiałów elektrycznych metodami przetwarzania obrazów

Wiele materiałów elektrycznych ma własności makroskopowe, np. napięcie przebicia zależne od ich struktury i krystaliczności. Znając tę strukturę i budując odpowiednie modele można by przewidywać te własności. Badania w tym zakresie muszą uwzględniać analizę wielkości i rozkładu ziaren, analizę jednorodności ziaren oraz ich rozkładów przestrzennych. Metody teoretyczne, które będą zastosowane w tym zakresie to morfologia matematyczna i statystyka przestrzenna (spatial statistics).

Badania w zakresie diagramatyki

Badania te będą prowadzone w dwóch kierunkach:

- a) teoretycznych i praktycznych zasad wnioskowania diagramowego, w szczególności problemu błędów wnioskowania,
- b) konstrukcji praktycznych systemów notacji diagramowych na potrzeby zastosowań w nauce i technice, w szczególności w algebrze przedziałów i przedziałowych obliczeniach numerycznych.

Przyszłościowym zagadnieniem jest też komputerowa implementacja interakcyjnego systemu wnioskowania diagramowego opartego na koncepcji „diagramowego arkusza kalkulacyjnego” powstałej w IPPT. W roku 2002 IPPT jest też współorganizatorem konferencji „First European Workshop on Diagrammatics and Design”, wraz z Uniwersytetem Jagiellońskim i Wyższą Szkołą Biznesu i Informatyki w Bielsku-Białej.

TECHNOLOGIE INTELIGENTNE

Jan Holnicki-Szulc

1 Interdyscyplinarny obszar badań

Rozwój technologiczny w dziedzinie materiałów i metod komputerowych doprowadzony został w ostatniej dekadzie do punktu kulminacyjnego, w którym ich synergetyczna kombinacja znacząco rozszerzyła aplikacyjność rozwiązań uzyskiwanych w interdyscyplinarnych badaniach nad konstrukcjami inteligentnymi (*smart structures*) i związanymi z nimi technologiami. Postępy w inżynierii materiałowej rozwinęły teoretyczne podstawy do wykorzystania wielofunkcyjności materiałów, zaś superszybkie komputery pozwoliły na stworzenie, na gruncie tych podstaw, metodologii praktycznego projektowania i produkcji. Rozwój dwóch kluczowych technologii doprowadził do aplikacyjności koncepcji adaptacyjnych konstrukcji i systemów. Pierwsza z nich to technologia materiałów funkcyjnych (inżynieria materiałowa) i ich zastosowanie w urządzeniach, takich jak rozłożone systemy aktyuatorów i sensorów (mechanika konstrukcji). Druga technologia związana jest z inżynierią sterowania, nowymi algorytmami i technologiami przetwarzania sygnałów. Podstawowa idea jest prosta: wysoko zintegrowany system sensorów dostarcza potrzebnych informacji o konstrukcji oraz jej obciążeniach systemowi sterującemu, który zarządza z kolei zintegrowanym systemem aktyuatorów, modyfikując odpowiednio własności konstrukcji i jej obciążenia w korzystny sposób. Wielofunkcyjne materiały oraz odpowiednio wykonane kompozyty demonstrują duże możliwości ich użycia do aktywnego tłumienia drgań, sterowania kształtem, redukcji hałasu, monitorowania stanu technicznego konstrukcji, w zastosowaniu do konstrukcji lotniczych, samochodowych, budowlanych i maszynowych.

Omawiane tu konstrukcje inteligentne zaczęły być badane na szerszą skalę (w dużej mierze jako rozwiązania hipotetyczne) w latach siedemdziesiątych, w ramach tematyki „gwiazdnych wojen”, kiedy inżynieria kosmiczna stawiała nowe wyzwania. Przykładowo, problem zapewnienia niezmiennego kształtu parabolicznej anteny komunikacyjnej krążącej na orbicie okołoziemskiej nie jest bagatelny. Szok termiczny spowodowany wyjściem ze strefy cienia w stożku Ziemi wywołuje deplanację czaszy i generuje trudne do wytłumienia drgania. Tym bardziej trudne, że struktura podtrzymująca czaszę zwierciadła jest bardzo wiotka (lekkość sprzętu wynoszonego na orbitę jest warunkiem decydującym o koszcie operacji wyniesienia w kosmos) i w związku z tym tłumienie naturalne jest w tym przypadku znikome. Aktywne sterowanie kształtu czaszy pojawia się tutaj jako bardzo obiecująca koncepcja wytłumienia drgań i korekcji deplanacji. Sensory mierzące w czasie rzeczywistym deformacje elementów struktury pozwalają zaprogramowanemu odpowiednio sterownikowi podjąć automatycznie decyzję jak powinny być pobudzone elementy aktywne (np. piezo-aktywatory), aby osiągnąć zamierzony cel. W następnym dwudziestolecu systemy aktywnie sterowane zaczęły być wprowadzane na szeroką skalę, głównie w przemyśle samochodowym, gdzie mechatroniczne rozwiązania w systemie sterowania, zawieszania i hamowania (tzw. ABS) stają się powszechną normą. Poduszki powietrzne też są przykładem systemu inteligentnego, reagującego na pomierzoną zmianę (sensor przyspieszenia) warunków ruchu pojazdu. Aktywatorem jest w tym przypadku mały ładunek wybuchowy (Micro-Pyro-System) powodujący

napętnienie powłoki sprężonym powietrzem. Projektowanie budowli (w szczególności wysokich budynków) na terenach zagrożonych wstrząsami sejsmicznymi jest następną dziedziną, w której dostrajanie własności konstrukcji do rozpoznanego wstrząsu zwiększa drastycznie nośność dynamiczną ustroju. Przykładowo, wykonane w Japonii realizacje wykorzystują ruchomą masę umieszczoną na jednej z górnych kondygnacji budynku i przemieszczaną w czasie zarejestrowanego wstrząsu tak, aby odpowiedź dynamiczna budynku była maksymalnie zredukowana. Inną stosowaną techniką są aktywnie sterowane kable sprężające. Istota koncepcji polega tu na wykonaniu konstrukcji wiotkiej, podatnej na duże deformacje, które są z kolei redukowane poprzez system aktywatorów. Analogiczna sytuacja występuje w mostach wiszących, które często są podatne na wzbudzenie niebezpiecznych drgań własnych, nawet przy nie najsilniejszych wiatrach bocznych. Jedno z pionierskich rozwiązań zastosowanych ostatnio (Japonia i Korea) na mostach wiszących o dużej rozpiętości polega na wykorzystaniu tłumików z cieczą magneto-reologiczną, (MRF — magneto-rheological-fluid) dołączonych do kabli nośnych i dostrojeniu, w czasie rzeczywistym ich charakterystyk do pomierzonych drgań, wzbudzonych aktualnie przez wiatr. Można uzyskać w ten sposób znaczną redukcję efektu „rozhuśtania” kabli. Ciecz MRF, zawierająca drobiny ferromagnetyczne, odpowiada zmianami swej „lepkości” po poddaniu jej działaniu pola magnetycznego, przy czym można uzyskać ciągłą zmienność tej lepkości, w zależności od napięcia prądu doprowadzonego do cewki tłumika MRF. Bardzo obiecująco wyglądają także biomedyczne zastosowania cieczy MRF. Firma LORD wykonała protezy nogi (wraz ze stawem kolanowym) z semi-aktywnie sterowaniem ruchu w kolanie, pozwalające na w pełni naturalne poruszanie się pacjenta. Po rozpoznaniu fazy ruchu, sterownik dostosowuje odpowiednio lepkość cieczy MRF tak, aby nie stawiała ona oporu w fazie wyrzucania nogi do przodu i aby tężała w fazie przeniesienia ciężaru ciała. Można tu mnożyć także inne przykłady zastosowań materiałów o cechach sterowalnych (piezo-elektryki, stopy z pamięcią kształtu – SMA – Shape Memory Alloys, cieczy MRF) w celu adaptacji ustrojów konstrukcyjnych do zmiennych warunków pracy.

Podsumowując, główne obszary tematyczne aktywności w omawianej dziedzinie to:

- analiza i projektowanie ustrojów adaptacyjnych, reagujących *inteligentnie* na zmienne warunki pracy,
- materiały inteligentne (piezo-elektryki, cieczy magneto-reologiczne,
- stopy z pamięcią kształtu),
- sensory i aktywatory,
- zagadnienia sprzężone (elektro-magneto-lepko-sprężysto-plastyczność),
- sterowanie i przetwarzanie sygnałów,

zaś kierunki badań szczególnie rozwijanych ostatnio w badaniach światowych to między innymi:

- nowe materiały funkcjonalne, a w szczególności piezoelektryki o wzmocnionym efekcie piezo oraz kompozyty z włóknami piezo-ceramicznymi,
- nowe sensory i aktywatory,

- metody projektowania ustrojów adaptacyjnych (sterowalnych), a w szczególności skuteczne oprogramowania pozwalające wyznaczyć rozwiązania optymalne dla problemów dynamicznych,
- optymalne rozmieszczanie sensorów i aktywatorów,
- strategie efektywnego sterowania,
- detekcja i identyfikacja defektów konstrukcyjnych (monitorowanie), a w szczególności związana z tym analiza sygnałów,
- aplikacja technologii inteligentnych w rozwiązywaniu problemów: sterowania kształtu, tłumienia drgań, absorpcji impaktu, itd., w poszczególnych dziedzinach inżynierskich (np. lotnictwo, pojazdy, budynki wysokie, mosty).

Jak widać, problemy technologii inteligentnych są wybitnie interdyscyplinarne i nie mieszczą się w ramach tradycyjnie pojmowanych specjalności inżynierskich. Stanowią raczej część ogólnie pojmowanego „Hi-Tech”.

2 Nowe wyzwania technologiczne i działalność Pracowni Technologii Inteligentnych IPPT

Problemy bezpieczeństwa były zawsze wyzwaniem technologicznym, które spotęgowane zostało wydarzeniami 11 września 2001 roku. Z drugiej strony, proces nasycenia elektroniką i związana z nią *inteligencją* zaawansowanych rozwiązań technicznych daje w ostatnich latach zdumiewający postęp technologiczny, dzięki uzyskiwanemu efektowi synergetycznemu. Ta wyspecjalizowana, interdyscyplinarna dziedzina wiedzy i technologii stwarza wielkie szanse wciągnięcia nowych zespołów do międzynarodowego wyścigu innowacyjności. Stało się tak w ostatnich latach np. w Indiach (okolice Bangalore) i Izraelu, gdzie dobrze wyszkolone zespoły badawcze z wizją nowatorskich rozwiązań zdołały wejść do światowej sieci ośrodków uczestniczących w projektowaniu w dziedzinie lotnictwa. Coraz większą częścią tych rozwiązań staje się *software*. Biorąc pod uwagę siłę wielu polskich zespołów badawczych, grupujących wysokiej klasy specjalistów z dziedziny: mechaniki konstrukcji, sterowania, pól sprzężonych, informatyki, możliwe jest wykreowanie naszej rodzimej, zespołowej aktywności technologicznej (grup badawczych, firm przemysłowych i nowotworzonych, małych firm) w dziedzinie Technologii Inteligentnych (*Smart Technology*).

Wyzwanie to podjęte zostało przez Pracownię Technologii Inteligentnych IPPT, skupiającą swoją aktywność badawczą w szczególności na następujących problemach technicznych:

- materiały z *inteligentną* mikrostrukturą o maksymalnych zdolnościach pochłaniania *impaktu* (np. osłony anty-eksplozyjne),
- bezpieczne pojazdy z *inteligentną* strategią rozpraszania energii zderzeń (np. samosterowalne zderzaki samochodowe i podwozia samolotowe),
- metody komputerowo wspomaganego projektowania ustrojów adaptacyjnych

- semi-aktywne tłumienie drgań z użyciem rozproszonej sieci sterowanych dysypatorów (np. tzw. *smart-skin* problem i redukcja hałasu),
- automatyczna, inteligentna diagnostyka stanu technicznego konstrukcji (*monitorowanie*, np. tzw. *piezo-diagnostyka*),
- komputerowo wspomagane monitorowanie i przewidywanie rozwoju zniszczeń w budowlach historycznych (np. system DAMON i badania w kościele św. Jana w Gdańsku),
- optymalne projektowanie, diagnostyka i sterowanie sieci wodnych.

Głównym celem tych inicjatyw jest stworzenie otoczenia badawczego (nastawionego na zastosowania nowych technologii) wokół polskiego przemysłu i opracowanie innowacyjnych rozwiązań pilotażowych, podnoszących bezpieczeństwo konstrukcji (samolotów, pojazdów, infrastruktury, itp.) i wykorzystujących technologie inteligentne.

Celami szczegółowymi są:

- opracowanie technologii (wykorzystującej ciecz magneto-reologiczne MRF o sterowalnych własnościach lepkości [2–5]) semi-aktywnego rozpraszania energii zderzeń i zastosowanie jej w nowych konstrukcjach (np. podwozia samolotu);
- opracowanie koncepcji i modelu demonstracyjnego materiału z inteligentną strukturą wewnętrzną o dużych możliwościach pochłaniania energii impaktu. Materiały takie mogłyby być stosowane np. w osłonach luków bagażowych, narażonych na eksplozje spowodowane małymi ładunkami wybuchowymi, przepuszczonymi przez naziemną kontrolę lotniskową;
- opracowanie technologii automatycznego monitorowania stanu technicznego laminowanych elementów konstrukcyjnych. Wczesne wykrycie defektu delaminacji, np. w elementach rotora helikoptera, miałyby zasadniczy wpływ na podniesienie bezpieczeństwa lotu;
- opracowanie technologii automatycznego monitorowania stanu technicznego elementów konstrukcyjnych, na zasadzie analizy modyfikacji transmisji czoła fali wygenerowanej przez piezo-generatory dalekiego zasięgu.

2.1 Proponowane, oryginalne podejście do problemu

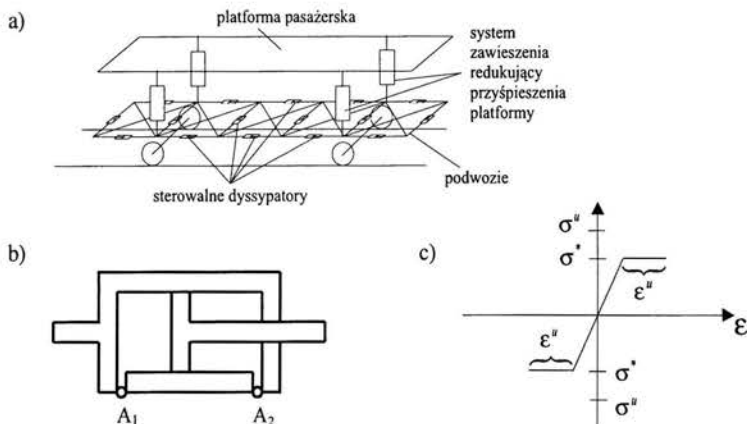
Aktywna dyssypacja energii impaktu poprzez zastosowanie odpowiednio sterowalnych dysypatorów stanowi bardzo obiecujące pole zastosowań technologii inteligentnych. Ogólna koncepcja aktywnego rozpraszania energii w czasie zderzeń przetestowana była numerycznie na przykładzie podwozia wagonu kolejowego, zakładając, że rama nośna pojazdu wyposażona jest w specjalnie zaprojektowane absorbery o sterowanym naprężeniu progowym, przy którym zaczynają one „płynąć”, dając efekt podobny do lokalnego uplastycznienia [1]. Kluczowym zadaniem proponowanego rozwiązania jest wciągnięcie maksymalnej części struktury podwozia do procesu kontrolowanego zgniotu w celu ochrony ludzi w czasie kolizji, a także, w celu ochrony konstrukcji podwozia w przypadku mniejszych energii zderzeń. Celom tym służą normalnie różnego rodzaju „pochłaniacze energii”, czyli elementy konstrukcyjne wbudowane w strukturę nośną wagonu i posiadające zdolność wygenerowania dużego obszaru zniszczenia w przypadku przeciążenia (np. struktura typu „plaster miodu”).

Problem projektowania bezpiecznych pojazdów, obdarzonych zdolnością maksymalnej absorpcji energii zderzeń, jest od wielu lat przedmiotem intensywnych badań. Zazwyczaj, proponowane rozwiązanie skupiają się na zaprojektowaniu pasywnych układów absorpcyjnych. Układy te bazują często na aluminiowych lub stalowych pakietach typu plastra miodu, charakteryzujących się wysoką zdolnością absorpcji energii. Wadą tego rozwiązania jest fakt, że wprowadzane tego typu elementy absorbujące energię zderzeń są elementami dodatkowymi, nie „współpracującymi” z konstrukcją w normalnym stanie jej użytkowania. Poza tym, są to elementy zaprojektowane na pewien założony z góry scenariusz kolizji i nie efektywne zazwyczaj w innych sytuacjach krytycznych. Przykładowo, pakiety plastra miodu zaprojektowane na czołowe zderzenie pojazdów szynowych są bardzo efektywne przy symetrycznym zderzeniu czołowym, gdy pociąg pozostaje na torach, lecz są bezużyteczne przy innym typie rozwoju kolizji, np. po wykolejeniu wagonów. Istnieje zatem potrzeba opracowania alternatywnych systemów aktywnej kontroli procesów zderzeń.

W odróżnieniu od standardowo stosowanych układów pasywnych proponowane jest zastosowanie systemu *aktywnej adaptacji* podstawowej konstrukcji nośnej do rozpoznanego uderzenia, w celu optymalizacji procesu dyssypacji energii w trakcie zderzenia. System taki musi być wyposażony w sensory ustalające, z pewnym wyprzedzeniem, kierunek i siłę uderzenia (np. akcelerometry lub radar), układ sterujący w czasie rzeczywistym strategią adaptacji konstrukcji oraz sterowalne elementy sprawcze (dyssypatory), pozwalające na modyfikację ich charakterystyk mechanicznych.

Demonstrując koncepcję projektowania ustrojów adaptacyjnych o podwyższonej odporności udarowej skoncentrujemy się na przykładzie bezpiecznego podwozia wagonu kolejowego (Rys. 1a). Przyjęto dwupoziomowy system podwozia, w którym dolna jego część stanowi ruszt nośny, którego dodatkowym zadaniem jest absorpcja energii uderzenia (bez dodatkowych ograniczeń na wielkość przyspieszeń) zaś zadaniem drugiej części (górnego systemu zawieszenia) jest odpowiednia redukcja przyspieszeń, tak, aby ochronić przewożone osoby i towary. Przedmiotem dalszych rozważań jest projektowanie dolnej, aktywnie adaptującej się do obciążenia dynamicznego, części podwozia. W celu uproszczenia dalszych rozważań przyjmijmy, że mamy do czynienia z dwuwymiarowym układem kratowym, którego elementy wyposażone są w *absorbery* (dynamiczne *bezpieczniki konstrukcyjne*), które mogą zostać uruchomione, gdy zostanie osiągnięty pewien wybrany poziom naprężeń lokalnych σ^* . Wtedy może zostać zrealizowana charakterystyka aktywnego elementu analogiczna do plastycznej odpowiedzi (Rys. 1c). W konsekwencji, problem opisu ustroju adaptacyjnego sprowadza się do dynamicznej analizy sprężysto plastycznej kratownicy o granicy plastyczności σ^* , przyjętej poniżej wartości naprężenia σ^u , powodującego zniszczenia w elementach konstrukcji.

Wiarygodna symulacja komputerowa procesu kolizji wymaga zastosowania bardzo wyspecjalizowanych narzędzi numerycznych obejmujących nieliniową analizę dynamiczną złożonych układów konstrukcyjnych, jakimi są pojazdy. Istnieją takie programy, pozwalających na wystarczająco dokładny opis zjawiska. Nie są one jednak zbyt przydatne projektantowi w procesie przeprojektowywania ustroju w celu uzyskania jego lepszej odpowiedzi numerycznej. W odróżnieniu od istniejących programów komputerowych, zaproponowane oryginalne podejście do analizy dynamicznej ustrojów nieliniowych pozwala na wdrożenie efektywnej numerycznie (opartej na analitycznym podejściu) analizy wrażliwości, a co za tym idzie procedur optymalnego projektowania konstrukcji poddawanych uderzeniom. Podejście to (oparte na tzw. *Metodzie dystorsji wirtualnych* — *Virtual*



Rys. 1. a) Dwupoziomowy, adaptacyjny system zawieszenia, b) model hydraulicznego, adaptacyjnego absorbera c) charakterystyka aktywnego elementu

Distortion Method VDM [1,6]), wykorzystuje wcześniej wyznaczoną *macierz wpływu D* opisującą redystrybucję naprężeń, spowodowaną jednostkowymi *dystorsjami wirtualnymi* (deformacjami wstępnymi nie ograniczonymi warunkami kompatybilności) wygenerowanymi w pojedynczych elementach układu. Dystorsje wirtualne wywołują z kolei w konstrukcji samo-zrównoważony stan naprężeń oraz kompatybilny stan deformacji. Superpozycja tych stanów ze stanami stanowiącymi odpowiedź dynamiczną ustroju sprężystego na wymuszenie zewnętrzne pozwala na modelowanie (poprzez odpowiedni dobór dystorsji wirtualnych) rozwoju strefy plastycznej w trakcie analizy dynamicznej, bez konieczności iterowania odpowiedzi plastycznej w każdym kroku czasowym oraz reformowania macierzy sztywności układu (jak długo zadawała nas założenie o małych deformacjach). Ponadto, możliwa jest jednoczesna symulacja dystorsjami wirtualnymi rozwoju strefy plastycznej jak i redystrybucji materiału. Wykorzystując dodatkowo wspomnianą wyżej analizę wrażliwości można stworzyć efektywne numerycznie narzędzie do projektowania optymalnych ustrojów ze względu na ich odporność udarową.

Abstrahując od technicznych ograniczeń opiszmy model hydraulicznego absorbera z zaworami sterowanymi (Rys. 1b), który mógłby zostać wykorzystany w podwoziu adaptacyjnym. Zakładając, że σ^u określa wartość naprężenia, powyżej której następuje zniszczenie elementu i ustalając wartości progowe ciśnień w komorach, powodujące otwarcie zaworów A_1 lub A_2 , na poziomie $\sigma^* < \sigma^u$, możemy otrzymać charakterystykę elementu aktywnego pokazaną na Rys. 1c. Oznacza to, że struktura oryginalna wyposażona w takie absorbery zachowywać się będzie jak ustrój sprężysto plastyczny o sterowalnych granicach plastyczności. Łatwo sterowalne napięciem prądu, odpowiadające w milisekundach cieczy magneto-reologiczne (magneto-rheological fluids MRF) mogą być zastosowane w technicznych realizacjach hydraulicznych absorberów nie wymagających zaworów sterowalnych.

Testowe symulacje numeryczne potwierdziły wysoką skuteczność koncepcji adaptacyjnego rozpraszania energii zderzeń. Przykładowo, pokazano [1], że dla elementów podwozia o stałym naprężeniu progowym wyzwalamy „idealne płynięcie” dysypatorów (podobne do plastycznego

plynięcia) prędkość uderzenia czołowego 25 m/s w sztywną ścianę jest ciągle prędkością bezpieczną, nie powodującą uszkodzenia konstrukcji. Inny test pokazuje, że w przypadku optymalnie dostosowywanych poszczególnych wartości naprężeń progowych do rozpoznanego uderzenia, bezpieczna prędkość zderzenia może być podniesiona nawet do ponad 38 m/s.

Wspomniane ciecze magneto-reologiczne pozwalają na sterowanie ich lepkością przez zastosowanie odpowiedniego pola elektrycznego [2]. Urządzenia wykorzystujące aktywne ciecze MRF wykorzystywane były jako sterowalne dyssypatory energii stosowane w zawieszaniach samochodowych [2], a także w anty-sejsmicznych systemach zabezpieczających budynki [3]. Ten ostatni przypadek jest zbliżony zakresem spodziewanych obciążeń do uderzeń przenoszonych przez podwozie samolotu. Znane są też aplikacje cieczy MRF realizujące siły tłumienia w zakresie 10^5 – 10^6 N.

Proponowane podejście projektowania układów dynamicznych o nieliniowych cechach fizycznych oparte na metodzie VDM może być także wykorzystane do skutecznej identyfikacji defektów w elementach konstrukcji [7]. Proponowana tu metoda polega na detekcji oraz identyfikacji uszkodzeń wykorzystując obserwację fal sprężystych generowanych oraz odbieranych poprzez odpowiednio rozmieszczone (na powierzchni ustroju) przetworniki piezo-elektryczne. Metoda ta mogłaby być wykorzystana do automatycznego „monitoringu” stanu technicznego różnych konstrukcji inżynierskich, jak np. zbiorników, rurociągów, karoserii pojazdów oraz mostów. Projekt ten stanowi pierwszy krok prowadzący do opracowania niezawodnego, taniego systemu zdolnego nie tylko do wykrycia uszkodzeń, lecz także do oszacowania ich lokalizacji i rozmiaru. System oparty jest na pomiarach i analizie anomalii propagacji fal sprężystych poprzez monitorowany ustrój. Fale sprężyste generowane są i obserwowane poprzez sieć przetworników piezoelektrycznych, rozmieszczonych na powierzchni lub we wnętrzu elementów konstrukcyjnych. Sygnały przekazywane pomiędzy elementami sieci przetworników analizowane są przy pomocy specjalnie zaprojektowanego systemu identyfikacji defektów poprzez śledzenie anomalii propagacji fal. Realizowany projekt zawiera trzy zakresy działań: teoretyczno-koncepcyjny, numeryczny oraz eksperymentalny.

Pierwszy zakres obejmuje opracowanie ogólnej koncepcji metody oraz modeli matematyczno-fizycznych niezbędnych do jej opisu.

Zakres drugi obejmuje opracowanie narzędzi numerycznych do analizy sygnałów prowadzącej do identyfikacji defektów w monitorowanym ustroju. Jest to kluczowy problem całego przedsięwzięcia. Planowane są próby rozwiązania tego zadania dwoma metodami:

- dekomponując odpowiedź dynamiczną ustroju na składową wywołaną wymuszeniem zewnętrznym w ośrodku idealnym oraz nieznaną kombinację liniową składowych zaburzeń pochodzących od defektów rozmieszczonych we wcześniej przewidzianych, możliwych lokacjach. Współczynniki liniowe wspomnianej tu kombinacji stanowiąc będą parametry sterowania zadania najlepszego dopasowania hipotetycznego rozkładu defektów do pomierzonej odpowiedzi rzeczywistej ustroju monitorowanego;
- stosując podejście sieci neuronowych abstrahujące od fenomenologicznego potraktowania problemu.

Dopuszczana jest także możliwość zastosowania metody hybrydowej, w której sieć neuronowa „uczona jest” poprzez testy komputerowe przeprowadzane na modelu numerycznym ustroju.

Trzeci zakres działań obejmuje weryfikację doświadczalną (w warunkach laboratoryjnych) skuteczności opracowanych narzędzi numerycznych do identyfikacji defektów oraz pilotażowe instalacje „monitoringu” w skali rzeczywistej (na elementach konstrukcji rurociągu).

Omawiana wyżej metoda VDM wykorzystywana była także przy opracowywaniu komputerowo wspomaganego systemu DAMON monitorowania rozwoju spękań w kościele św. Jana w Gdańsku [8]. Obserwacja, ocena oraz przewidywanie rozwoju zniszczeń w tak wielkim obiekcie stanowiło poważne wyzwanie badawcze. Do najważniejszych problemów należy zaliczyć tu:

- zaprojektowanie sieci czujników do identyfikacji stanu deformacji i zniszczeń obiektu,
- zbudowanie modelu numerycznego obiektu (zweryfikowanego doświadczalnie) zdolnego do dokonywania nieliniowej analizy pól naprężeń, uwzględniającej rozwój zniszczeń obiektu,
- opracowanie metody identyfikacji nierównomiernego osiadania fundamentów — głównej przyczyny rozwoju zniszczeń,
- zastosowanie analizy wrażliwości do przewidywania rozwoju zniszczeń i stopnia zagrożenia obiektu na podstawie historii osiadania fundamentów,
- opracowanie narzędzia numerycznego do analizy wariantów wzmocnienia zagrożonego obiektu.

Zbudowano narzędzie numeryczne pozwalające na rozwiązanie powyższych problemów, co potwierdzone zostało testami numerycznymi wykonanymi na modelach fragmentów obiektu. Zbudowano, wielkim nakładem pracy, model numeryczny całego obiektu (ok. 200 000 stopni swobody), co było niezbędne do zastosowania proponowanej metodologii w praktyce.

3 Ważniejsze projekty badawcze i inicjatywy edukacyjne

W ostatnich latach, Pracownia Technologii Inteligentnych IPPT uczestniczyła w następujących, europejskich projektach badawczych:

- Europejski projekt badawczy Copernicus (1995–1998): *Feasibility Study on Active Railway Track Support*, poświęcony zbadaniu realności koncepcji zastosowania „inteligentnych podkładów kolejowych” (zmniejszających w sposób sterowany swą wysokość pod obciążeniem przejeżdżającego pociągu) w celu redukcji obciążeń dynamicznych przekazywanych na most.
- Europejski projekt badawczy Copernicus (1995–1998): *Design of Adaptive Structures for Extreme Loads*, poświęcony zbadaniu realności koncepcji zastosowania tzw. „bezpieczników konstrukcyjnych” w *offshore structures*, ustępujących (podobnie do przystosowania plastycznego) w sposób kontrolowany w przypadku lokalnego przeciążenia.
- Projekt celowy KBN (1997–2000): *Monitorowanie rozwoju zniszczeń w kościele św. Jana w Gdańsku*, poświęcony opracowaniu metodologii komputerowo wspomaganego monitorowania stanu technicznego budowli historycznych na przykładzie kościoła św. Jana w Gdańsku [8].

Pracownia organizowała również następujące spotkania naukowe o międzynarodowym charakterze:

- NATO Advanced Research Workshop on *Smart Structures — Requirements and Potential Applications in Mechanical and Civil Engineering*, czerwiec 1998, Pultusk,
- AMAS Advanced Course on *Structural Control and Health Monitoring*, maj 2001, Warszawa.

Aktualnie, Pracownia bierze udział w następujących, europejskich inicjatywach badawczych oraz edukacyjnych:

- Europejski projekt badawczy PIEZODIAGNOSTICS (2002–2005), poświęcony opracowaniu nowatorskiej technologii automatycznej detekcji oraz identyfikacji defektów (głównie korozji) w elementach konstrukcyjnych (głównie w rurociągach);
- Europejski projekt badawczo-edukacyjny TRN *New Materials, Adaptive Systems and their Nonlinearities: Modelling, Control and Numerical Simulation — Smart Systems*, (2002–2006), w fazie negocjacji;
- Polsko-Niemiecki projekt badawczy ADCHOCK (2002–2005), poświęcony opracowaniu nowatorskiego rozwiązania adaptacyjnego podwozia samolotu, dostosowującego swe charakterystyki do rozpoznanego z wyprzedzeniem uderzenia;
- EU GROWTH Project — *Structural Assessment Monitoring and Control — SAMCO-TN*, 2002–2004, w fazie negocjacji;
- Organizacja spotkania naukowego: *Workshop on Smart Materials and Structures, SMART'03*, wrzesień 2003, Warszawa;
- Współorganizacja NATO ASI: *Smart Structures, Materials and Related Technologies*, lipiec 2003, Troya, Portugalia.

Pracownia podjęła też inicjatywę utworzenia *Studium Eksperckiego Technologii Inteligentnych* (Studium SMART-TECH). Studium to pomyślane zostało jako rozwiązanie pilotażowe, pozwalające na elastyczne dopasowanie programu do aktualnych potrzeb europejskiej branży Hi-Tech. Rosnące zapotrzebowanie na dobrze przygotowanych specjalistów w tej dziedzinie występuje od kilku lat. Formuła indywidualnego prowadzenia kandydatów poprzez dyplom uczelni technicznej (współpraca IPPT PAN z uczelnią), Studium Eksperckie oraz projekt badawczy (prowadzony wspólnie z przyszłym pracodawcą) okaże się skuteczną formą szkolenia poddyplomowego. Wykłady planowane w ramach Studium Eksperckiego będą w naturalny sposób służyć także Studium Doktoranckiemu IPPT.

Pracownia Technologii Inteligentnych IPPT rozwija swe laboratorium (SMART-LAB), wyposażając je w nowe *demonstratory*, których celem jest:

- demonstracja nowych koncepcji zastosowania technologii inteligentnych w strukturach adaptacyjnych,

- weryfikacja oryginalnego oprogramowania do symulacji odpowiedzi dynamicznych ustrojów adaptacyjnych,
- zainteresowanie partnerów przemysłowych nowatorskimi rozwiązaniami z dziedziny technologii inteligentnych.

Bibliografia

1. Knap L., Holnicki-Szulc J., *Optimal design of adaptive structures for the best crash-worthiness*, Proc. of the 3rd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation, Buffalo, May 1999.
2. Sims N.D., Stanway R., Johnson A.R., *Vibration control using smart fluids: a state-of-the-art review*, The Shock and Vibration Digest, **31**, 195–204, 1999.
3. Sims N.D., Peel D.J., Stanway R., Johnson A.R., Bullough W.A., *The electrorheological long stroke damper: A new modelling technique with experimental validation*, Journal of Sound and Vibration, **229**, 207–227, 2000.
4. Gavin H.P., *Design method for high-force electrorheological dampers*, Smart Materials and Structures, **7**, 664–673, 1998.
5. Carlson J.D., Spencer B.F., *Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control*, Proc. 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Sept. 1–6, Chiba, Japan, **3**, 35–40, 1996.
6. Holnicki-Szulc J., Gierliński J.T., *Structural Analysis, Design and Control by the VDM Method*, J. Wiley & Sons, Chichester, 1995.
7. Holnicki-Szulc J., Zieliński T., *New damage identification method through the gradient based optimisation*, Proc. COST International Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, June 6–9, 2000.
8. Cudny W., Holnicki J., Skłodowski M., Wiącek D., *Damage prediction concept based on monitoring and numerical modelling of a medieval church*, Proc. NATO Advanced Research Workshop SMART-98, Pultusk, 16–19 czerwiec, Kluwer, 1998.

ROBOTY MOBILNE A TRANSPORT PRZYSZŁOŚCI

Adam Borkowski

1 Wprowadzenie

Termin „robot”, wprowadzony przez Karela Čapka, oznaczał maszynę, która ma zastępować człowieka w pracy fizycznej (robocie). Robotyka jako dziedzina wiedzy inżynierskiej obejmuje dwie poddziedziny: budowę manipulatorów oraz budowę robotów mobilnych. W zależności od stopnia ingerowania człowieka w ich działanie roboty mobilne obejmują szeroką gamę urządzeń od zdalnie sterowanych do autonomicznych. Z badawczego punktu widzenia najciekawsze są roboty autonomiczne, ponieważ stanowią one doskonały poligon doświadczalny dla metod sztucznej inteligencji.

Niewątpliwie największy rozgłos robotom mobilnym przyniósł sukces amerykańskiej wyprawy na Marsa w lipcu 1997 roku. Sonda „Pathfinder” wylądowała miękko na tej planecie i spuściła na jej powierzchnię małego robota „Sojourner” (Rys. 1). Wyposażony w kamerę i kilka urządzeń pomiarowych łazik zbadał teren w promieniu kilkuset metrów wokół sondy. Planując misję NASA przyjęła zasadę „maksimum bezpieczeństwa przy minimum kosztu”. Z tego powodu „Sojourner” był stosunkowo prostym zdalnie sterowanym pojazdem. Był on jednak znacznie sprawniejszy ruchowo, niż „Łunochod” — pierwszy robot mobilny w Kosmosie, wysłany przez Rosjan na Księżyc w 1970 roku.

Historię rozwoju robotyki mobilnej w Polsce można śledzić od robota laboratoryjnego „Uliszes” (Rys. 2) do robota interwencyjno-inspekcyjnego SR-10 (Rys. 3). Pierwszy z nich został w drugiej połowie lat 80. skonstruowany przez A. Wolczowskiego z Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej i oprogramowany w Pracowni Systemów Adaptacyjnych IPPT PAN,



Rys. 1. Robot „Sojourner” do badania powierzchni Marsa



Rys. 2. Robot mobilny „Ulisses”



Rys. 3. Robot interwencyjno-inspekcyjny SR-10

kierowanej przez autora niniejszego opracowania. Pomimo 8-bitowego komputera pokładowego ZX „Spectrum” i ubożego zestawu sensorów „Ulisses” dosyć sprawnie poruszał się w pomieszczeniach biurowych i potrafił budować ich mapy.

Robot SR-10 powstał w latach 2000–2001 w Zakładzie Pojazdów Inteligentnych PIAP, kierowanym przez A. Masłowskiego. Jest to pierwszy robot dla potrzeb policji i jednostek specjalnych zbudowany w Europie Środkowej. Walory polskiej konstrukcji zostały docenione przez NASA, która przyznała robotowi SR-10 specjalną nagrodę w 2001 r. W roku bieżącym zespół A. Masłowskiego został nagrodzony w konkursie „Teraz Polska”, w którym wyróżniane są najlepsze krajowe osiągnięcia w dziedzinie technologii.

Pomiędzy „Ulissesem” i SR-10 są lata popularyzacji badań z zakresu robotyki w Polsce. Głównym motorem tego procesu był A. Morecki, w którego zespole powstawały pierwsze w kraju maszyny kroczące (T. Zielińska). Duże znaczenie dla wprowadzenia problematyki robotów mobilnych na nasze uczelnie miało zorganizowanie przez Pracownię Systemów Adaptacyjnych IPPT PAN dwóch imprez: letniej szkoły na temat zastosowań sztucznej inteligencji (Mądralin, 1988) i warsztatów „Intelligent Robotic Systems (IRS)” (Zakopane, 1993). Na konferencje te udało się ściągnąć doskonałych referentów (J. Crowley z Francji, J. Coelho z Portugalii), którzy pokazali jak fascynujące może być łączenie techniki komputerowej z układami sensorycznymi i sterownikami ruchu. Obecnie większość uczelni technicznych w Polsce prowadzi dydaktykę i prace badawcze w dziedzinie robotów mobilnych.

Celem niniejszego eseju jest uwypuklenie głównych problemów badawczych, jakie występują przy konstruowaniu autonomicznie poruszających się pojazdów, pokazanie szeregu zastosowań robotów mobilnych oraz zasygnalizowanie więzi, jaka występuje pomiędzy badaniami w dziedzinie robotyki, a nową dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki — tzw. inteligentnymi środkami transportu.

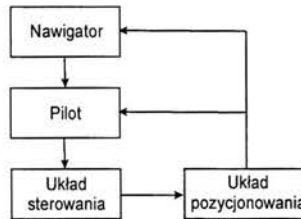
2 Zagadnienie nawigacji

Zgodnie z maksymą „*Navigare necesse est*” podstawową funkcją systemu prowadzącego autonomiczny pojazd jest nawigacja, czyli docieranie do określonego celu. Pojawiają się przy tym

takie pojęcia, jak *pozycja* pojazdu określona bieżącymi wartościami współrzędnych w wybranym układzie odniesienia, *trajektoria* ruchu oraz *mapa* otoczenia.

2.1 Struktura sterownika i rodzaje zadań

Zadanie nawigacyjne może być w różny sposób wykonywane przez sterownik pojazdu. Często wykorzystuje się schemat z Rys. 4, wzorowany na podziale funkcji stosowanym dawniej w lotnictwie.



Rys. 4. Schemat sterownika nawigacyjnego

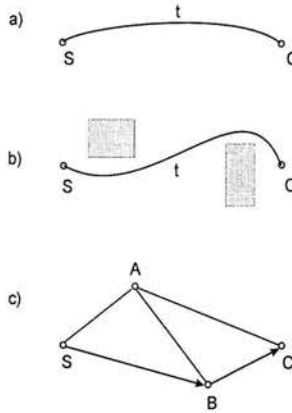
Moduł nazwany nawigatorem zajmuje się w tym układzie globalnym planowaniem trajektorii i przekazuje modułowi pilotującemu do wykonania jej poszczególne odcinki. Pilot jest zwykle implementowany jako regulator dążący do zminimalizowania uchybu traktowanego jako różnica między pozycją bieżącą a pozycją wynikającą z zadanej trajektorii.

Jakość systemu nawigacyjnego zależy od inteligencji nawigatora, który powinien dobierać optymalne trajektorie, oraz od precyzji pilota, który te trajektorie wykonuje. Oba moduły podejmują decyzje na podstawie danych dostarczanych przez układ pozycjonowania. Dokładność i szybkość działania tego układu ma zatem decydujący wpływ na jakość nawigacji.

Za pomocą schematu pokazanego na Rys. 4 można zrealizować sterowanie dowolnym pojazdem. Jednakże prowadzenie samolotu, okrętu czy samochodu po wyznaczonej trasie ma odrębne cechy, które decydują o obliczeniowej złożoności zagadnień nawigacji. Tabela 1 pokazuje różne klasy tego rodzaju zagadnień.

Tabela 1. Klasy zagadnień nawigacyjnych

	Cel	Przeszkody	Trajektoria	Przykład
A	ustalony	brak	dowolna	rakieta ziemia–ziemia, samolot, okręt na otwartym morzu
B	ruchomy	brak	dowolna	rakieta ziemia–powietrze
C	ustalony	brak	wybierana z grafu	samochód w ruchu dalekobieżnym
D	ustalony	ustalone	dowolna	okręt w żegludze przybrzeżnej
E	ustalony	ruchome	ograniczona	samochód w ruchu lokalnym
F	nieznany	ruchome	ograniczona	robot badający nieznanne otoczenie



Rys. 5. Klasy trajektorii pojazdu: a) swobodna, b) bezkolizyjna, c) wybrana z grafu połączeń

Prowadzenie samolotu w wolnej przestrzeni powietrznej, czy kierowanie okrętem na otwartym morzu jest stosunkowo proste. Znając współrzędne punktów startowego S i docelowego C można wybrać trajektorię t łączącą te punkty i przekazać ją do realizacji pilotowi (sternikowi) (Rys. 5a). W najprostszym przypadku t będzie odcinkiem prostej, a krzywe wynikające z minimalizacji czasu przelotu (przepływu) z uwzględnieniem krzywizny kuli Ziemi, wiatru czy prądu też można łatwo obliczyć. Z tego powodu automatyczne prowadzenie statków i samolotów stosowane jest od dawna.

Statek przepływający przez cieśniny, czy robot poruszający się po hali fabrycznej muszą dobrać trajektorię tak, aby przechodziła ona w bezpiecznej odległości od przeszkód (Rys. 5b). Jeżeli przeszkody są znane i stacjonarne, to zaplanowanie trajektorii bezkolizyjnej jest stosunkowo proste. Sytuacja znacznie się pogarsza w chwili pojawienia się w otoczeniu innych pojazdów. Stanowią one przeszkody ruchome komplikując obliczeniowo zadanie wyznaczania trajektorii bezkolizyjnej. W dodatku, dynamicznie zmieniające się otoczenie stawia układowi nawigacyjnemu ograniczenie pracy w czasie rzeczywistym: układ ten musi reagować na zagrożenie kolizją tym szybciej, im większe są względne prędkości pojazdów.

Osobną klasę zagadnień nawigacyjnych stanowi poruszanie się po ustalonych trasach, np. w sieci kolejowej, drogowej, czy sieci korytarzy powietrznych. Sieć taką można przedstawić w postaci grafu (Rys. 5c) i planowanie trajektorii przejazdu z punktu S do punktu C polega na wyborze optymalnego podgrafu (t_1, t_2) łączącego te punkty. W teorii grafów istnieje szereg algorytmów rozwiązywania tego typu zagadnień. Są one wykorzystywane w programach ułatwiających planowanie podróży koleją czy samochodem, które od kilku lat są powszechnie dostępne.

Wreszcie najtrudniejsze zadanie stoi przed systemem nawigacyjnym robota, który ma samodzielnie rozpoznawać nieznaną powierzchnię. Może to być powierzchnia ciała kosmicznego, na które został wysłany lądownik, wewnątrz budynku zniszczonego częściowo w wyniku wybuchu, czy teren zasypany lawiną. Podobnie jak by to uczynił człowiek, robot musi przyjąć pewną strategię przeszukiwania, modyfikując ją ewentualnie w miarę zdobywania informacji. Szczególne interesujące wydaje się współdziałanie kilku robotów w takiej sytuacji. Mogą one tworzyć zespół ratowniczy.

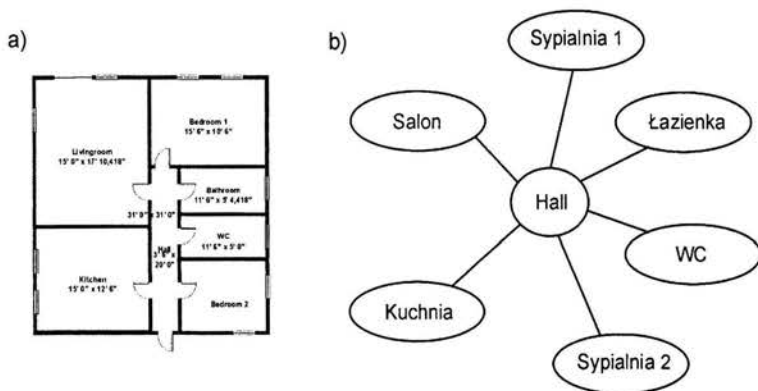
czy, wymieniając informacje między sobą i wspomagając się wzajemnie w razie potrzeby. Prace badawcze nad takimi zespołami prowadzone są obecnie w wielu ośrodkach na świecie. W IPPT PAN zajmuje się tą problematyką Zespół Systemów Inteligentnych we współpracy z Uniwersyte-tem w Lund (J. Malec [4]).

2.2 Tworzenie mapy i pozycjonowanie

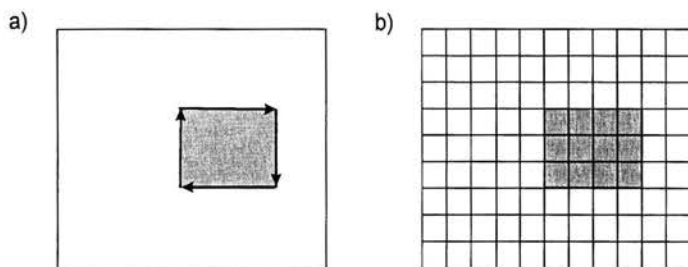
Informację o otoczeniu pojazdu można przedstawiać w dwojaki sposób. *Mapa metryczna* jest bezpośrednim odwzorowaniem fizycznej przestrzeni, zwykle polegającym na zrzutowaniu obiektów trójwymiarowych na wybraną dwuwymiarową powierzchnię odniesienia. Przykładami są mapy geograficzne, plany miast czy rzuty poziome budynków. Natomiast *mapa topologiczna* jest rodzajem grafu, którego węzłami są obiekty, a krawędziami relacje topologiczne (przyleganie, dostępność, itp.).

Przykłady tego rodzaju map otoczenia widzimy na Rys. 6: robot nadzorujący mieszkanie mógłby korzystać z mapy metrycznej (Rys. 6a) lub mapy topologicznej (Rys. 6b).

Wybór rodzaju mapy nie przesądza jeszcze o sposobie jej reprezentacji w pamięci sterownika. Mapy metryczne można bowiem zapisywać w postaci *wektorowej* lub *rastrowej*.



Rys. 6. Dwa rodzaje map budynku: a) metryczna, b) topologiczna



Rys. 7. Dwa rodzaje wewnętrznej reprezentacji mapy metrycznej: a) wektorowa; b) rastrowa

Zapis wektorowy oznacza, że krawędzie obiektów reprezentują odcinki prostych traktowane jako wektory w płaszczyźnie mapy (Rys. 7a). Ten sposób zapisu jest oszczędny pamięciowo, lecz stawia wyższe wymagania procedurom tworzenia mapy. W zapisie rastrowym powierzchnia mapy jest pokryta siatką (Rys. 7b) i obiekty stanowią podzbiory klatek tej siatki. Każda klatka oprócz współrzędnych (i, j) otrzymuje atrybut stopnia zajętości φ . Jeżeli przyjmujemy binarne wartości tego atrybutu: $\varphi = 0$ oznacza wolną klatkę, a $\varphi = 1$ klatkę zajętą, to otrzymamy „ostry” obraz świata zewnętrznego. Nic nie stoi jednak na przeszkodzie, by φ przyjmowało dowolne wartości z przedziału $[0, 1]$. Możemy je traktować, jako prawdopodobieństwo zajętości danej klatki i obliczać z wzorów Bayesa na podstawie kolejnych pomiarów otoczenia.

Rastrowy model mapy okazał się bardzo przydatny w robotyce. Zespół kierowany przez autora niniejszego opracowania zajmuje się rastrowym modelem od roku 1993 [1]. Udało się przy tym połączyć ten model z przetwarzaniem danych sensorycznych w sieci neuronowej (B. Siemiątkowska [14]), co doprowadziło do bardzo efektywnej metody tworzenia i uaktualniania mapy.

Mapa topologiczna jest bardzo przydatna w nawigacji jakościowej. Jest to sposób postępowania człowieka: wchodząc do budynku nie tworzymy w pamięci mapy metrycznej ani nie próbujemy ustalić własnego położenia z dokładnością do milimetra. Zamiast tego zuwajamy istotne fragmenty otoczenia — hall, korytarz, drzwi — i staramy się uchwycić ich usytuowanie względne. Nasze poruszanie się po budynku polega na wykonywaniu operacji typu „*podejź do drugich drzwi po lewej*” lub „*na najbliższym rozwidleniu korytarza skręć w prawo*”. Jeżeli wyposażymy nawigatora w ten sposób rozumowania, a jednocześnie pilot będzie w stanie prowadzić precyzyjnie robota środkiem korytarza, wchodzić w drzwi i podejżdzać na bliską odległość do wybranych obiektów, to otrzymamy sprawny system nawigacyjny. Wykazały to doświadczenia wykonane przez magistrantów Politechniki Warszawskiej: opracowali oni prototyp systemu jakościowej nawigacji w języku Prolog, który mógł prowadzić robota mobilnego w takim budynku, jak hotel czy szpital. W Stanach Zjednoczonych roboty rozwijające lekarstwa i posiłki po szpitalu są używane od kilku lat.

Pewną odmianą jakościowej nawigacji jest przybliżone pozycjonowanie robota względem takich ważnych obiektów, jak drzwi lub przewężenia korytarza. A. Dubrawski i J. Racz [11, 12] wykazali, że sieć neuronową można nauczyć rozpoznawania z pomiarów ultradźwiękowych czy robot będzie w stanie z aktualnej pozycji pokonać taką przeszkodę.

Określanie bieżącej pozycji pojazdu względem układu odniesienia nazywamy *pozycjonowaniem*. Większość robotów mobilnych jest wyposażona w czujniki zliczające obroty kół. Znając parametry kinematyczne układu napędowego można na tej podstawie śledzić drogę, jaką pokonał robot, i obliczać jego aktualne współrzędne. Taka metoda pozycjonowania zwana *odometrią* ma jedną istotną wadę: jej błąd narasta wraz ze wzrostem przebytej drogi. Przyczyną tego stanu rzeczy są nieuniknione poślizgi kół, szczególnie przy pokonywaniu nierówności terenu.

Wyjściem z sytuacji jest wykorzystywanie wielu pomiarów pozycji. Najlepiej, gdy pomiary te pochodzą z różnych źródeł: sonaru, lasera, kamery wizyjnej. Typowym rozwiązaniem problemu pozycjonowania jest zastosowanie uogólnionego filtru Kalmana. J. Crowley w swoim systemie nawigacyjnym wprowadził pojęcie elipsy wiarygodności pozycji [2]. Później A. Dubrawski z B. Siemiątkowską opracowali oryginalną metodę oceny pozycji na podstawie pomiarów laserowych [15].

Nawigację robotów mobilnych można nazwać *mininawigacją*, ponieważ z reguły są to urządzenia poruszające się wewnątrz określonego budynku. Typowe przebiegi takich robotów są rzędu

setek metrów, a wymagana dokładność pozycjonowania jest rzędu 5–10 cm. W transporcie samochodowym mamy do czynienia zarówno z mini jak i z makronawigacją — w skrajnym przypadku dzienny przebieg może sięgać tysiąca kilometrów. Na szczęście problem pozycjonowania w makronawigacji został rozwiązany dzięki satelitom nawigacyjnym. Po usunięciu przez Amerykanów sztucznych zakłóceń system GPS pozwala określić pozycję z dokładnością rzędu 100 m, a europejski system „Galileo” ma osiągać dokładność o rząd większą.

2.3 Funkcje użytkowe

Pierwsze zastosowania autonomicznych robotów mobilnych dotyczyły transportu wewnątrzzakładowego. Wózki podobne do pokazanych na Rys. 8 dostarczają materiały i części do obróbki do poszczególnych stanowisk zautomatyzowanych linii produkcyjnych.

Wprowadzenie takich robotów było logicznym rozwinięciem poprzednio stosowanych wózków poruszających się po stałych trasach. Wózki takie są prowadzone wzdłuż kabla ułożonego pod podłogą hali fabrycznej czy magazynu. Rozwiązanie to jest tanie, wymaga bowiem jedynie zainstalowania czujnika indukcyjnego na wózku. Wadą jego jest duży koszt przebudowy w przypadku zmiany programu produkcji. Roboty autonomiczne są droższe, lecz ich przestawienie na nowy program produkcyjny wymaga jedynie zmian w oprogramowaniu.

Kolejną dziedzinę stosowania robotów mobilnych stanowią różnego rodzaju urządzenia czyszczące i malujące duże powierzchnie. Na Rys. 9 widzimy robota, który sprząta stacje metra paryskiego. Jest to bardzo wdzięczne zadanie dla robota, bo perony metra mają regularny kształt i są puste w godzinach nocnych, kiedy robot pracuje.

Autonomiczne odkurzacze są już oferowane przez kilka firm (por. Rys. 10). Nie wydaje się jednak, aby upowszechniły się one w gospodarstwach domowych ze względu na wysoki koszt. Bardziej prawdopodobne wydaje się wprowadzenie autonomicznie poruszających się końcówek w instalacjach centralnego odkurzania. Stosowane głównie w budynkach biurowych, instalacje takie mają urządzenie wytwarzające podciśnienie w systemie rur rozprowadzonych po całym budynku. Do złączy umieszczonych w poszczególnych pomieszczeniach podłączane są giętkie węże



Rys. 8. Wózek przewożący materiały wewnątrz zakładu



Rys. 9. Robot czyszczący perony metra



Rys. 10. Mały odkurzacz autonomiczny



Rys. 11. Samochód zwiadowczy testowany przez Armię Stanów Zjednoczonych

do odkurzania. Obecnie końcówkę takiego węża przesuwają sprzątaczką. W przyszłości będzie to zapewne mały robot mobilny.

Osobną klasę stanowią zastosowania wojskowe i policyjne. Pomiędzy roboty stosowane do rozbrajania bomb, ponieważ z reguły są to urządzenia zdalnie sterowane. Autonomiczne roboty mobilne znajdują wspaniałe pole do popisu w usuwaniu min. Jak wiadomo, w takich regionach świata, jak Kambodża, Laos, tereny byłej Jugosławii, czy Afganistan, leżą tysiące trudno wykrywalnych min. Rozbrajanie za pomocą ręcznych wykrywaczy jest ryzykowne i powoduje duże straty wśród saperów. Z tego powodu wszystkie kraje technologicznie zaawansowane pracują nad robotami do usuwania min. Muszą to być urządzenia stosunkowo tanie, by ich utratę z powodu wybuchu miny można było zaakceptować. Jednocześnie prawdopodobieństwo wykrycia miny musi być wysokie, co nie jest łatwe w przypadku małych min przeciwpiechotnych, budowanych prawie całkowicie z plastiku.

Naturalnym polem zastosowań robotów mobilnych w wojsku są bezzałogowe pojazdy zwiadowcze. Mogą być nimi zarówno jednostki latające, jak i pojazdy poruszające się po polu walki. Rysunek 11 pokazuje taki samochód terenowy testowany przez US Army. Jest on wyposażony w kamery wizyjne i laserowy układ skanujący dalekiego zasięgu. Taki pojazd można wysłać w kierunku pozycji wroga na odległość kilku kilometrów i korygować za jego pośrednictwem ogień własnej artylerii.

3 Transport samochodowy w przyszłości

Charakterystyczną cechą robotyki jest to, że część wyników badań z tej dziedziny jest w sposób niezauważalny przejmowana przez inne dziedziny inżynierskie. Na przykład, nowoczesne maszyny do budowy dróg posiadają systemy automatycznego sterowania, które prowadzą je wzdłuż założonej trasy za pomocą lasera. Systemy takie przejęły wiele rozwiązań wypróbowanych na robotach mobilnych. Podobnie bezzałogowy samolot zwiadowczy „Predator”, który nadzoruje ruchy wojsk w Iraku, jest szczególnym przypadkiem autonomicznego robota mobilnego. W tym rozdziale zajmiemy się przepływem rozwiązań z robotyki mobilnej do transportu samochodowego

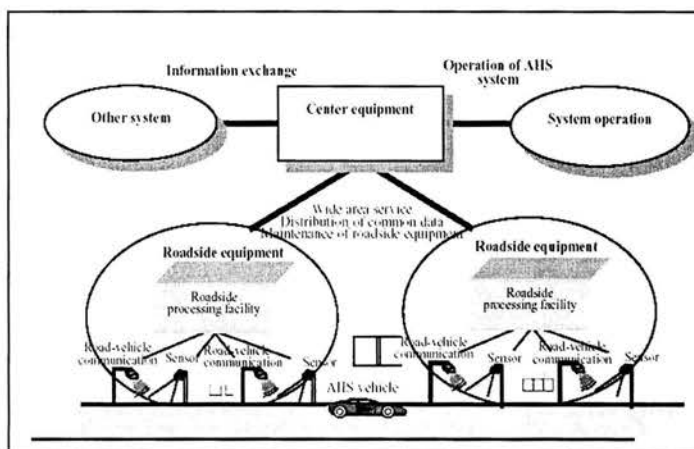
Komputeryzacja transportu samochodowego przebiega na dwóch płaszczyznach. Z jednej strony elementy sterowania i nadzoru automatycznego pojawiają się w sieci drogowej, z drugiej zaś — sam pojazd jest w coraz większym stopniu wyposażony w elementy sterowania cyfrowego. W terminologii badawczej mówi się zatem o podziale dziedziny *inteligentnych systemów transportu (IST)* na poddziedziny *inteligentne drogi* i *inteligentne pojazdy*.

3.1 Inteligentne drogi

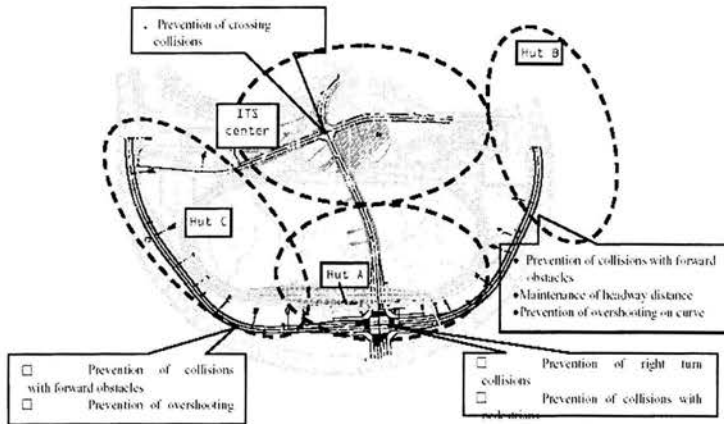
Koncepcja inteligentnej drogi zakłada budowę ośrodków nadzorowania ruchu, które działałyby w podobny sposób, jak ośrodki kontroli ruchu powietrznego. Rolę radaru przejęłyby przy tym czujniki rozmieszczone wzdłuż drogi. Ich zadaniem byłby pomiar liczby przejeżdżających samochodów i ich prędkości. Przykładowy schemat struktury inteligentnej drogi pokazuje Rys. 12. Jak widać z tego schematu, wzdłuż drogi rozmieszczone są również łącza radiowe, za pomocą których możliwe jest utrzymywanie komunikacji z samochodami.

W pierwszej fazie wdrożenia centra nadzoru mają przeciwdziałać zakłóceniom w ruchu na drogach wylotowych z miast i w węzłach autostrad. W przypadku przeciążenia poszczególnych kierunków czy pasów ruchu odpowiednie ostrzeżenia wysyłane są drogą radiową do kierowców, a na wyświetlaczach nad drogą pojawiają się stosowne ograniczenia prędkości. Badania nad infrastrukturą dróg inteligentnych są najbardziej zaawansowane w Japonii. Rysunek 13 pokazuje japoński poligon doświadczalny obejmujący kilka węzłów autostrad koło miasta Tsukuba.

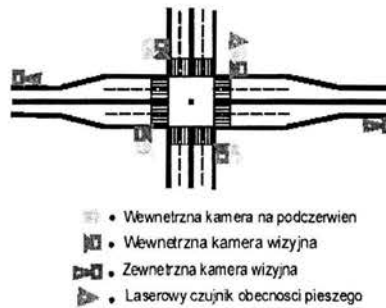
Szczególnym przypadkiem inteligentnej drogi jest inteligentne skrzyżowanie. Jak widać z Rys. 14, jest ono zaopatrzone w czujniki rejestrujące ruch na przejściach dla pieszych i na odcinkach dojazdowych. Częstą przyczyną kolizji jest niezauważenie pojazdu nadjeżdżającego z prawej strony, lub pieszego na przejściu, gdy kierowca skręca w prawo lub lewo na skrzyżowaniu. W takich sytuacjach inteligentne skrzyżowanie może ostrzec kierowcę.



Rys. 12. Schemat infrastruktury inteligentnej drogi [7]



Rys. 13. Poligon doświadczalny w Japonii [7]

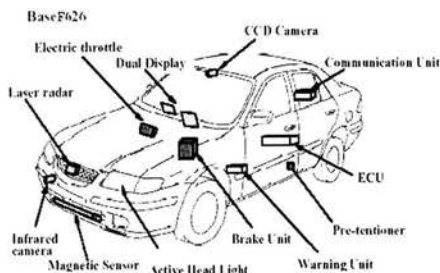


Rys. 14. Rozmieszczenie czujników na inteligentnym skrzyżowaniu ulic [10]

W ramach kierunku inteligentna droga prowadzone są też próby aktywnego oddziaływania na ruch. W Anglii i w Szwecji badano w ramach V Programu Ramowego Komisji Europejskiej kilka systemów wymuszających na kierowcach przestrzeganie ograniczeń prędkości. Zgodnie z oczekiwaniami, próby te nie wywołały entuzjazmu uczestników ruchu drogowego. Wskazywano na to, że odebranie kierowcy prawa wyboru prędkości poruszania się może być niebezpieczne w sytuacjach awaryjnych. Ostatecznie przyjęto koncepcję „inteligentnego pedału gazu”: pedał ten stawia zwiększony opór, gdy kierowca jedzie za szybko na danym odcinku.

3.2 Inteligentny pojazd

Automatyczna przekładnia była jednym z pierwszych elementów zautomatyzowanych w samochodzie. Po przelamaniu początkowych oporów, szczególnie w Europie, jest ona obecnie oferowana jako opcja we wszystkich klasach samochodów. Podobną ewolucję przeszedł system zapo-



Rys. 15. Sensory inteligentnego pojazdu [17]



Rys. 16. Samochodowy laser [9]

biegania poślizgom przy hamowaniu ABS (Anti-Blocking System), początkowo dostępny tylko w autach luksusowych.

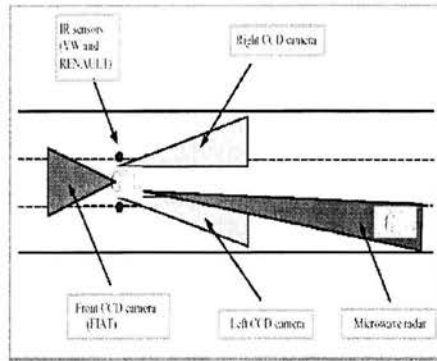
Już obecnie silniki samochodów sterowane są za pośrednictwem układu cyfrowego, który ustala optymalny skład mieszanki paliwowej na podstawie bieżących warunków pracy silnika. Samochód przyszłości upodobni się do samolotu sterowanego na zasadzie „fly-by-wire”. Zamiast mechanicznych połączeń między kierownicą, pedałami, dźwignią zmiany biegów a elementami wykonawczymi pojawiają się lokalne siłowniki sterowane przez komputer pokładowy. Próby kierowania pojazdem za pomocą joysticka już są prowadzone przez koncern Daimler-Chrysler i nie wykluczone, że będziemy musieli pożegnać się z tradycyjnym układem kabiny kierowcy.

Do uzyskania inteligencji nie wystarczy wyposażyć pojazd w komputer pokładowy. Taki pojazd musi obserwować otoczenie i odpowiednio reagować na jego zmiany. Wygląda na to, że podstawowymi „zmysłami” inteligentnego samochodu będą radar, laser i kamera wizyjna (Rys. 15).

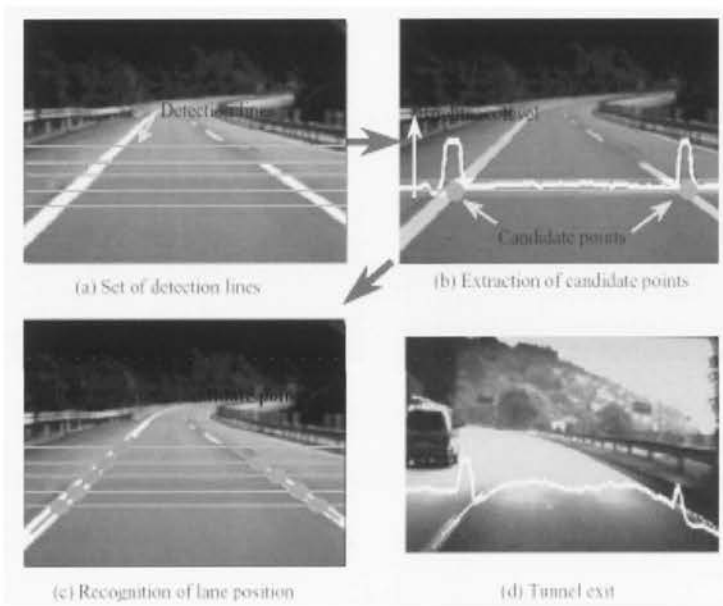
Mikrofalowe radary stosowane w samochodach mają wymiar grubej książki i bez trudu mieszczą się za atrapą chłodnicy. Ich zasięg jest rzędu 500 m, a dokładność pomiaru odległości sięga kilku centymetrów. Pierwszym zastosowaniem radarów są systemy kontroli przejazdu w kolumnie (Cruise Control System — CCS). Jest to wzbogacenie znanego wszystkim Tempomatu — układu prowadzącego samochód ze stałą prędkością — o dostosowywanie tej prędkości do prędkości, z jaką porusza się pojazd poprzedzający.

Laserowe skanery są montowane w pobliżu świateł drogowych i mają rozmiar zbliżony do zintegrowanego reflektora samochodowego (Rys. 16). Ich zaletą jest szybkość i precyzja pomiaru, wadą — nieprzydatność we mgle, intensywnym deszczu, czy opadach śniegu. Do wspomaganie kierowcy w takich warunkach służą kamery na daleką podczerwień, podobne do noktowizorów stosowanych w pojazdach wojskowych. Współczesne kamery są tak zminiaturyzowane, że umieszczanie ich w samochodzie nie stanowi problemu. Na Rys. 17 widzimy pojazd testowy jednej z firm europejskich wyposażony w kilka kamer wizyjnych.

Układy wizyjne sprawdzają się szczególnie przy śledzeniu stałych geometrycznych elementów drogi, takich jak bariery bezpieczeństwa czy elementy rozgraniczające pasy ruchu. Stosowane są przy tym standardowe metody obróbki obrazów (filtrowanie, progowanie, ekstrakcja krawędzi) z uwzględnieniem wymogu pracy w czasie rzeczywistym. Rysunek 18 pokazuje wyniki działania typowego systemu wizyjnego.



Rys. 17. Ustawienie kamer wizyjnych na samochodzie testowym [16]



Rys. 18. Śledzenie elementów poziomego oznakowania drogi [8]

3.3 Bezpieczeństwo pasywne i aktywne

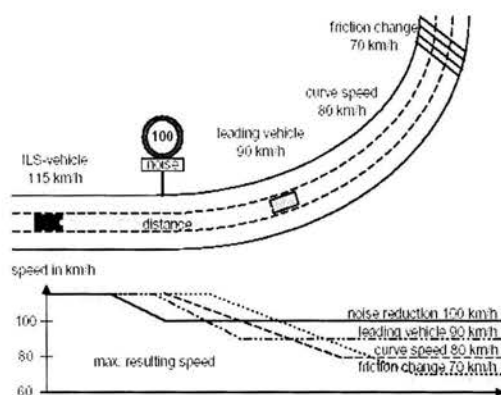
W ostatnich latach rocznie na europejskich drogach ginie około 40 tysięcy osób. Komisja Europejska postawiła sobie za cel zmniejszenie tej liczby o połowę w ciągu następnych 4 lat. Jest to bardzo trudne zadanie, zważywszy perspektywę rozszerzenia Unii o kraje, w których poziom bezpieczeństwa na drogach pozostawia wiele do życzenia.

Pasywnymi elementami bezpieczeństwa są pasy, poduszki powietrzne czy strefy pochłaniania energii zderzenia w nadwoziu samochodu. Uratowały one wiele istnień ludzkich, lecz dalszy postęp ich wykorzystaniu jest mało prawdopodobny. Z definicji bowiem elementy pasywne nie zapobiegają wypadkom drogowym: ich przeznaczeniem jest zmniejszanie skutków takich zdarzeń.

Elementy aktywne mają zapobiegać wypadkom. W pierwszej kolejności wprowadzono układy, które nie wymagają współdziałania kierowcy. Śledzą one wybrane parametry ruchu pojazdu i dokonują korekty w przypadku sytuacji niepożądanych. Przykładami takich systemów są układy ABS i ASR dbające o to, aby koła pojazdu nie doznawały poślizgu. Pierwszy z nich działa przy hamowaniu, drugi — przy przyspieszaniu. Zadaniem układu stabilizacji wzdłużnej ESP jest zapobieganie zarzucaniu pojazdu przy nagłej zmianie oporów toczenia się kół po jednej stronie (np. w wyniku najechania na miękkie pobocze). System ten przyhamowuje w ułamku sekundy koła po stronie przeciwnej, przywracając w ten sposób tor jazdy na wprost. Zauważmy, że w samochodach sterowanych elektronicznie (drive-by-wire) układy powyższe ulegną uproszczeniu. Zamiast instalacji hydraulicznych czy pneumatycznych auta te będą miały siłowniki przy hamulcach (takie rozwiązanie już jest oferowane w luksusowym modelu firmy Daimler-Chrysler).

Systemy ABS, ASR i ESP są montowane w samochodach od kilku lat. W niedługim czasie wejdzie do użytku kolejny układ tej klasy, zwany asystentem ds. szybkości na zakręcie (Curve Speed Assistant) [13]. Układ ten mierzy na bieżąco przyczepność nawierzchni drogowej za pomocą czujnika laserowego. Nawierzchnia mokra czy oblodzona ma inny współczynnik odbicia światła, niż nawierzchnia sucha. Na podstawie oceny stanu nawierzchni system redukuje, w razie potrzeby, prędkość samochodu.

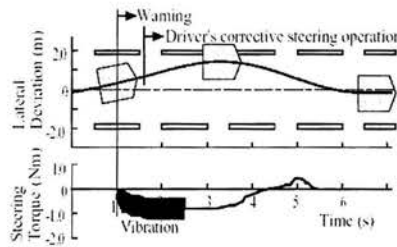
Jak widać, problemy drogi i pojazdu są ściśle sprzężone: rozwiązaniem najlepszym jest inteligentny pojazd na inteligentnej drodze. Przykład z Rys. 19 pokazuje dostosowywanie prędkości do warunków jazdy po łuku drogi. Pierwsze zmniejszenie prędkości następuje ze względu na znak drogowy, drugie — z powodu pojazdu poprzedzającego, trzecie — ze względu na krzywiznę zakrętu, czwarte — po wykryciu przez czujnik zamontowany na pojeździe zmniejszonej przyczepności jezdni.



Rys. 19. Ograniczanie szybkości na zakręcie drogi [13]

Kolejnym udogodnieniem dla kierowcy jest system Stop & Go. Utrzymuje on bezpieczną odległość w kolumnie poruszającej się „skokami”. Jazda taka jest wyjątkowo denerwująca i wiele stłuczek powstaje na skutek osłabienia uwagi kierowców, którzy dłuższy czas tkwią w korku. Zapewne codzienne przedzieranie się do pracy zatłoczonymi ulicami miast będzie tym zakresem użytkowania samochodu, w którym kierowcy najchętniej przyjmą elementy automatyzacji ruchu.

Często przyczyną groźnych w skutkach wypadków jest wypadanie kierowcy z pasa ruchu na skutek zmęczenia długotrwałą jazdą. System śledzący pasy na jezdni za pomocą kamery może wykryć takie niebezpieczeństwo i zaalarmować kierowcę drgającą kierownicą lub samoczynnie skorygować tor jazdy. Rysunek 20 pokazuje wynik działania takiego systemu.



Rys. 20. Przykład działania układu zapobiegającego wypadaniu z pasa ruchu [8]

W polskich warunkach szczególnego znaczenia nabiera poziom bezpieczeństwa na drogach łączących naszą granicę zachodnią z Litwą, Białorusią i Ukrainą. Brak autostrad powoduje, że drogi te są przeciążone do granic wytrzymałości nawierzchni i kierowców. Ci ostatni często jadą przez Polskę zmęczeni długą trasą i nie zachowują właściwej ostrożności. Wystarczy przypomnieć tragiczne w skutkach awarie autobusów turystycznych, czy czołowe zderzenia TIRów. Współczesna technologia pozwala wyposażać samochody w stosunkowo proste urządzenia, wspomagające kierowcę w zakresie bezpieczeństwa ruchu.

Należą do nich, na przykład, układy wykrywające przeszkody na poboczu drogi (pieszy, rowerzysta, zaparkowany samochód). Układ taki może śledzić pobocze w paśmie podczerwieni lub omiatać je promieniem lasera. Dane pomiarowe powinny być przekazywane do modułu rozpoznawania przeszkód. Jedną z możliwości implementacji takiego modułu jest zastosowanie sieci neuronowych. Nauczone na wzorcach sieci te potrafią dostatecznie szybko klasyfikować obiekty, by zapewnić zdolność pracy całego układu w czasie rzeczywistym.

Informacja o podejrzanym obiekcie na poboczu może być przekazywana kierowcy za pośrednictwem sylwetki wyświetlanej na szybie. Jednym z poważnych ograniczeń w inteligentnym samochodzie jest bowiem ograniczona zdolność percepcyjna kierowcy. Nawet w kabinach samolotów liczne przyrządy zastępowane są wskaźnikami scalonymi. Przeciętny użytkownik samochodu nie ma kwalifikacji pilota czy kierowcy Formuły I, toteż dodatkowe źródła informacji muszą być wprowadzane w przemyślany sposób.

Drugą przeszkodę przy wprowadzaniu elementów komputeryzacji w ruchu drogowym stanowi kwestia odpowiedzialności prawnej za skutki wypadków. Z tego względu większość układów inteligentnych jedynie wspomaga kierowcę w podejmowaniu decyzji. Przykład systemów ABS, ASR i ESP, które działają całkowicie samoczynnie, wskazuje na to, że pełnej automatyzacji będą podle-

gały wybrane wycinki funkcji pojazdu. Z technicznego punktu widzenia można już dziś zbudować pojazd poruszający się całkowicie samoczynnie. Nie jest to wszakże racjonalnym celem w dającej się przewidzieć przyszłości.

4 Robot a samochód

Podstawową różnicę pomiędzy robotem mobilnym a samochodem stanowi zakres autonomii: budując robota stawiamy sobie za cel zdolność tego urządzenia do samodzielnego poruszania się, samochód zaś ma być w zasadzie kierowany przez człowieka. Zastrzeżenie „w zasadzie” oznacza, że dopuszczamy możliwość przekazywania kontroli nad pojazdem sterownikowi pokładowemu. W Stanach Zjednoczonych prowadzone są przygotowania do wprowadzenia na autostradach pasów wydzielonych dla samochodów prowadzonych automatycznie. W wielu europejskich miastach autobusy poruszają się po pasach przeznaczonych wyłącznie dla nich. Automatyczne kierowanie takim autobusem jest też zapewne kwestią niedalekiej przyszłości. Natomiast zwykły ruch miejski jeszcze długo pozostanie poza zasięgiem możliwości autopilota.

Jak już wspominaliśmy, nawigacja samochodowa będzie oparta głównie na pozycjonowaniu satelitarnym. Z robotyki mobilnej zostały przejęte metody planowania drogi przejazdu po mapie, reprezentowanej jako graf. Można sobie wyobrazić, że pewne elementy mikronawigacji robotycznej znajdują zastosowanie w układach wspomagających parkowanie samochodu, czy wprowadzanie go do garażu. Jest to szczególnie uzasadnione w pojazdach przeznaczonych dla osób z upośledzeniem narządów ruchu.

Systemy zapewniające stateczność poruszania się pojazdów samochodowych rozwijają się niezależnie od badań w robotyce, ponieważ szybkość poruszania się większości robotów mobilnych jest zbyt mała, by dynamika ruchu miała istotne znaczenie. Natomiast doświadczenia zebrane w robotyce z zakresu układów sensorycznych znajdują bezpośrednie zastosowania w budowie samochodów. Chodzi w szczególności o laserowe dalmierze skanujące i układy wizyjne, które w ciągu następnej dekady powinny być oferowane w modelach aut wyższej klasy. Bardzo popularne w robotyce dalmierze ultradźwiękowe mają zbyt mały zasięg, aby były przydatne w ocenie sytuacji na drodze. Są one jednak bardzo użyteczne przy manewrowaniu pojazdem w ograniczonej przestrzeni (*vide* ultradźwiękowy zderzak w limuzynach firmy Daimler-Chrysler).

5 Podsumowanie

W pół godziny po starcie pilot samolotu pasażerskiego w rejsie transatlantyckim może spokojnie pić kawę, po przekazaniu sterowania autopilotowi. Samotni żeglarze śpią spokojnie w kabinie, gdy samosterujące urządzenie prowadzi ich jacht. W niektórych miastach istnieją całkowicie zautomatyzowane linie metra, gdzie maszynista pociągu jest tylko dodatkowym zabezpieczeniem. Nie oznacza to jednak, że powinniśmy nazywać te samoloty, statki i pociągi robotami mobilnymi. Elementy wypracowane i sprawdzone w robotyce wtapiają się w otaczającą nas technikę w podobny sposób, jak wcześniej były wykorzystywane osiągnięcia matematyki, fizyki, czy informatyki. Transport przyszłości będzie dążył do harmonijnego współdziałania elementów automatyki z człowiekiem, któremu ten transport ma służyć.

Domeną działania sensu stricte robotów mobilnych będą sytuacje, w których obecność człowieka jest niemożliwa lub niepożądana. Należą do nich takie dziedziny, jak badania kosmiczne, ratownictwo, czy zadania wojskowo-policyjne. Sympatyczne stworki w rodzaju R2D2 z „Gwiezdných Wojen” pozostaną na razie domeną naukowej fantastyki, choć robotom oprowadzającym zwiedzających po Smithsonian Museum w Waszyngtonie niewiele już do nich brakuje.

Bibliografia

1. Borkowski A., Siemiątkowska B., Sikorski K.A., Weigl M., *Grid-based mapping for autonomous mobile robot*, Journal of Robotics and Autonomous Systems, **11**, 13–21, 1993.
2. Crowley J.L., *World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging*, Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, 674–681, 1989.
3. Dubrawski A., *Neurocomputing for mobile robot navigation — successful and promising attempts*, Proc. 3rd Int. Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS 1995), Piza, Italy, 1995.
4. Gnatowski M., Malec J., *Minimalistyczny model współpracy robotów mobilnych*, Materiały VII Krajowej Konferencji Robotyki, Prace Instytutu Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wroclawska, Seria: Konferencje, **102**, 64, 205–216, Wroclaw 2001.
5. Hallmann I., Siemiątkowska B., *Artificial landmark navigation system*, Proc. 9th Int. Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS 2001), Toulouse, France, pp. 219–228, 2001.
6. Leonard J.J., Durrant-Whyte H.D., *Direct Sonar Sensing for Mobile robots*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
7. Mori M., Kondo T., Kamata G., *Design of the infrastructure equipment for smart cruise systems*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #3585.
8. Motoyama S., Ohta T., Watanabe T., Ito Y., *Development of lane departure warning system*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #3270.
9. Kidokoro H., Katsunori N., Tetsrou A., *Development of adaptive cruise control system which controls CVT*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #3158.
10. Kubo Y., Shibata Y., Horino M., *Development of intersection monitoring sensor systems*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #3579.
11. Racz J., Dubrawski A., *Artificial neural network for mobile robot topological localization*, IEEE Journal of Robotics and Autonomous Systems, **16**, 73–80, 1995.
12. Racz J., Dubrawski A., *Qualitative pose estimation using an artificial neural network*, Proc. 7th Int. Conference on Advanced Robotics (ICAR'95), Sant Feliu de Guixol, Spain, 1995.
13. Schraut M., Naab K., Bachmann Th., *BMW's driver assistance concept for integrated longitudinal support*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #2121.
14. Siemiątkowska B., Dubrawski A., *Cellular neural networks for navigation of a mobile robot*, Rough Sets and Current Trends in Computing, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1424: Polkowski L., Skowron A. [eds.], Springer-Verlag, Berlin, 1998.
15. Siemiątkowska B., Dubrawski A., *A method for tracking pose of a mobile robot equipped with a scanning laser range finder*, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'98), Leuven, Belgium, 1998, pp. 2518–2523.
16. Vivo G., Carrea P., Citelli S., *European Activities on Lateral Control Support: the LACOS Project*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #2226.
17. Yamada Y., Okuda K., Shiraishi N., *Pedestrian protection and rear-end collision injury reduction technologies on ASC-2*, Proc. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin, Italy, November 6–9, 2000, paper #4244.

KOMPUTEROWE METODY POZYSKIWANIA WIEDZY W INŻYNIERII LĄDOWEJ

Janusz Kasperkiewicz, Adam Borkowski

1 Wstęp

Inżynieria lądowa jest w zakresie wykorzystywania komputerów stosunkowo konserwatywnym działem nauk technicznych, przynajmniej w zestawieniu z takimi kierunkami jak elektronika, elektrotechnika, aeronautyka lub robotyka. Tym większe znaczenie ma wprowadzanie nowoczesnych metod informatyki, zarówno w praktyce budowlanej, jak i w kształceniu inżynierów-lądowców. Poniższy rozdział poświęcony jest metodom utożsamianym często ze zwrotem „inteligencja maszynowa”, który autorzy wolą zastąpić określeniem „komputerowe metody pozyskiwania wiedzy”. Inteligencję może przejawiać bowiem człowiek, zwierzę, ewentualnie robot, kojarzące się z systemami o mniejszej lub większej autonomii, ale nie należy przypisywać podobnej cechy systemowi obliczeniowemu. W terminologii uniwersytetów anglosaskich metody, o jakich będzie tutaj mowa, wykładane są na wydziałach identyfikowanych określeniem „*computational sciences*”, jednak termin „*nauki komputerowe*” natrafia w Polsce na pewne zastrzeżenia. W związku z tym, omawiane dalej w aspekcie zastosowań w inżynierii lądowej i budownictwie, metody sztucznych sieci neuronowych, uczenia się maszyn, algorytmów ewolucyjnych czy statystycznego rozpoznawania struktur, określane będą poniżej łącznie jako *metody automatycznego pozyskiwania wiedzy*.

Pomimo wspomnianego konserwatywnego nastawienia inżynierii lądowej rozwój możliwości obliczeniowych i codzienna praktyka wymusiły ostatecznie powolną modernizację tej dziedziny, np. wdrożenie najpierw metod macierzowych, a później metody elementów skończonych w mechanice budowli. Warto jednak zauważyć, że i tak nowoczesne działy mechaniki wprowadzane są w inżynierii lądowej mniej energicznie niż w innych dziedzinach techniki. Pozytywnymi przykładami mogą być np. mechanika pękania, niektóre zadania optymalizacyjne czy analiza probabilistyczna.

Jeśli chodzi o koncepcje tradycyjnie związane ze sztuczną inteligencją to zauważyć można, że z pewnymi oporami również i one wkraczają na grunt szeroko rozumianej inżynierii lądowej. Nie ulega przy tym wątpliwości, że wdrażanie nowego punktu widzenia jest ze wszech miar uzasadnione, ponieważ rozwój techniki powoduje potrzebę wyzyskania wielu dostępnych informacji równocześnie, co metodami konwencjonalnymi może być trudne lub w ogóle nie możliwe.

Intensywny rozwój technik i technologii stosowanych w budownictwie i w szeroko rozumianej inżynierii lądowej ma szereg dających się wyróżnić aspektów. W ostatnich dekadach stosować zaczęto nowe składniki, których przykładami mogą być — ograniczając się np. tylko do dziedziny technologii betonów — pyły krzemionkowe, traktowane kiedyś jako odpady, a obecnie droższe od cementu, superplastyfikatory i inne domieszki chemiczne, mikrowłókna, stosowanie zewnętrznych warstw z kompozytów wysokiej jakości do wzmacniania elementów żelbetowych. Wytwarzane są inne niż dotychczas i inaczej charakteryzowane gatunki cementów i pozostałych materiałów

składowych betonu. W efekcie, w charakterze przykładów wzmiankować można pojawianie się stosowanych coraz powszechniej, nieznanych dawniej kompozytów betonopodobnych, jak HPC (*High Performance Concrete*), FRC (*Fibrous Reinforcement Concrete*), SCC (*Self Compacting Concrete*), SIFCON (*Slurry Infiltrated Concrete Composite*), itd.

Wprowadzane są nowe normy i zalecenia, a właściwości materiałów bada się za pomocą szeregu niedostępnych dawniej w technikach eksperymentalnych metod, takich jak tomografia, mikroskopia skanningowa i akustyczna, metody emisji akustycznej, automatyczna analiza obrazów, metody ultradźwiękowe, akustyczne, rezonansu magnetycznego, holograficzne, badania w skali *mikro* i *nano*. Towarzyszy temu pojawianie się nowych możliwości rejestrowania i przechowywania danych eksperymentalnych.

O rozmaitych nowych metodach analizy danych przeciętny inżynier wie stosunkowo niewiele, nie tylko zresztą w Polsce. Natomiast dostępne stają się (np. w publikacjach), coraz to nowsze wyniki. W efekcie konstruktorzy znajdują się obecnie coraz częściej w sytuacji „eksplozji danych” a sytuacja zmierza w kierunku dającym się scharakteryzować z pomocą kalamburu: „Zaczynamy tonąć w nadmiarze danych, odczuwając równocześnie dotkliwy głód wiedzy”. Rozwiązanie problemu może leżeć w omawianych tu metodach komputerowych, stosowanych do automatycznej analizy dostępnych przykładów, a dokładniej — do analizy baz danych.

Faktycznie, coraz większa część aktualnej wiedzy inżynierskiej ukryta pozostaje w przykładach, opisywanych ilościowo, tzn. wartościami liczbowymi, w przestrzeniach o dużej liczbie wymiarów, lub co gorsza opisywanych także i jakościowo, w sposób nie dający się prosto scharakteryzować numerycznie. Próby formułowania uogólnień na podstawie takich przykładów, interpolacji wyników oraz próby bezpośredniego formułowania wniosków przekraczają w wielu wypadkach możliwości intuicji człowieka, tak jak to ma miejsce z zawodnością wyobraźni przy zależnościach w przestrzeniach euklidesowych o liczbie wymiarów powyżej trzech.

Esaj niniejszy poświęcony jest przewidywaniu zastosowań nowych możliwości obliczeniowych w inżynierii budowlanej, tradycyjnie obejmującej budownictwo wodne, przemysłowe, drogowe i mostowe, fundamentowanie, organizację robót budowlanych, budownictwo podziemne, naukę o materiałach budowlanych, itd.

Jakkolwiek tematyka inżynierska podejmowana jest w IPPT PAN od początku jego istnienia, w podobny sposób uprawiana była także w innych naukowych ośrodkach krajowych i zagranicznych. Jest wszakże dziedzina, będąca przedmiotem zainteresowania badaczy IPPT, która ma tylko nieliczne odpowiedniki w innych ośrodkach naukowych. Są to próby wiązania problematyki inżynierskiej z aktualnymi kierunkami rozwoju informatyki. Jednym z kontynuowanych w związku z tym w Instytucie tematów jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SSN) do zagadnień projektowania i badania materiałów konstrukcyjnych. Drugim jest stosowanie metod uczenia się maszyn (MUM) oraz statystycznych metod rozpoznawania struktur (SMRS) do tych samych zagadnień.

2 Zarys dziedziny

Komputerowe metody pozyskiwania wiedzy podzielić można w zależności od przyjmowanych paradygmatów na cztery grupy:

1. sztuczne sieci neuronowe (SSN) [13];
2. metody uczenia się maszyn (MUM) [8];
3. statystyczne metody rozpoznawania struktur (SMRS) [32];
4. ewolucyjne metody optymalizacji (EMO) [22].

Ich geneza była rozmaita, jakkolwiek występują często obok siebie w podręcznikach i monografiach. Różne także są zakresy ich stosowania i przydatności.

Inżynierowie-ładowcy są potencjalnymi użytkownikami tych metod. Na ogół nie biorą oni udziału w procesach tworzenia oprogramowania, natomiast z reguły muszą dostosowywać oferowane przez informatyków narzędzia programistyczne do własnych potrzeb. Racjonalne wykorzystanie komputerowych metod pozyskiwania wiedzy napotyka trudności, ponieważ tematyka ta nie jest na ogół wykładana na wydziałach politechnik związanych z budownictwem. Tymczasem to, co jest tam powszechnie wykładane — metody numeryczne i podstawy statystyki — nie nawiązuje na ogół do zagadnień automatycznego pozyskiwania wiedzy.

W rozmaitych zadaniach związanych z zastosowaniem omawianych tutaj metod kluczowym problemem jest uzyskanie dostępu do odpowiednich zbiorów danych, które powinny być uporządkowane w formie bazy danych. Sprawy te pozostają dość zaniedbane i każdy zainteresowany zmuszony jest właściwie tworzyć swoją bazę od nowa i po swojemu. Dopiero zupełnie niedawno powstały pierwsze dokumenty dotyczące sposobów właściwego, ujednoliconego formowania baz danych z zakresu materiałów betonowych [1].

2.1 Sztuczne sieci neuronowe

Koncepcje SSN rozwijane są od lat czterdziestych ubiegłego wieku, kiedy to zaproponowano model perceptronu, wzorowany na funkcjonowaniu neuronu biologicznego. Praktyczna implementacja proponowanych pomysłów stała się możliwa jednak dopiero w dobie powszechnej komputeryzacji.

Perceptron jest rozproszonym adaptacyjnym układem przekształcenia informacji zakodowanej numerycznie, poprzez progowanie wartości uzyskiwanych jako rezultat liniowego odwzorowania wektora danych. Każdorazowy wynik przekształcenia zależy od nastawienia wag połączeń między węzłami sieci. Wagi te są dostrajane w procesie uczenia, zależnie od różnic pomiędzy wynikiem uzyskiwanym a oczekiwanym. Związany z metodami SSN paradygmat przyjmuje, że podobnie jak w organizmach żywych, system złożony z licznych jednostek typu perceptronu jest w stanie nauczyć się odwzorowania jednej przestrzeni wielowymiarowej w drugą, pod warunkiem, że w analizowanym zbiorze danych występuje taka zależność. Wagi mogą być dostrajane, tzn. dostosowywane w procesie uczenia tak, że system „zapamięta” relacje występujące między zmiennymi.

Opisany w ten uproszczony sposób system predykcji wielkości numerycznych (istnieje bardzo bogata literatura na temat SSN, zob. np. [9]), odpowiada tylko jednej z licznych możliwych realizacji koncepcji sieci neuronowych. Mogą one pracować pod nadzorem i bez nadzoru, na zbiorach wielkości liczbowych (np. wyniki eksperymentów), odpowiednio zakodowanych sygnałach elektrycznych, akustycznych, obrazach, itd.

W IPPT PAN stosowano SSN oparte na teorii rezonansu adaptacyjnego (J. Kasperkiewicz, J. Racz, A. Dubrawski [16]) oraz rozwijano własne wersje sieci ze wsteczną propagacją błędów (P. Gołąbek, W. Kosiński, M. Weigl [10]).

2.2 Uczenie się maszyn

Paradygmat w wypadku metod uczenia się maszyn (MUM), jest nieco odmienny niż w wypadku SSN, jednak ma tę samą cechę wspólną, że wiedza, którą należy pozyskać, ukryta jest w przykładach — w bazach danych pochodzących z obserwacji, z eksperymentów, z doświadczenia, itd. O ile sieci neuronowe przetwarzają liczby, to systemy MUM są nastawione na przetwarzanie informacji zakodowanej na wyższym poziomie abstrakcji. Niekiedy mówi się o nich, jako o systemach przetwarzania informacji na poziomie symbolu (a zatem poziomie wyższym — *symbolic level*), w odróżnieniu od poziomu, na którym pracują sieci neuronowe, (niższy poziom — *subsymbolic level*).

Symbole opisu składają się na opis zjawiska. Zjawiska opisuje się poprzez pojęcia. Celem algorytmu MUM jest wykrycie pewnego pojęcia lub zestawu pojęć, które istnieją w pewnej rzeczywistości (dziedzinie, uniwersum) opisanej zbiorem danych. Każde pojęcie pozwala podzielić analizowany zbiór danych na dwa rozłączne podzbiory przykładów pozytywnych i przykładów negatywnych. Podzbiory takie zawierają w sposób niejawną wiedzę o badanym pojęciu. Celem działania programu jest wyrażenie wspomnianej wiedzy w sposób jawny za pomocą jednej lub kilku reguł decyzyjnych, typu „*JEŻELI dany rekord spełnia warunek_1 ORAZ warunek_2 ORAZ ... TO rekord należy do danej klasy*”. Do najbardziej znanych algorytmów MUM należą algorytm AQ17 Michalskiego [23] i algorytm ID3 Quinlana [26].

Rozwiązania w MUM realizowane są rozmaicie, ale ogólnie wnioskowanie przebiega na zasadzie indukcji z faktów uprzednio zgromadzonych. Nie zakłada się przy tym na ogół żadnej wiedzy wstępnej, w postaci konkretnych predykatów, na podstawie której można by stosować wnioskowanie dedukcyjne. Wnioskowanie może rozpocząć się od wyboru dowolnego przykładu pozytywnego ze zbioru treningowego, jako zarodka tzw. pokrycia, które następnie rozszerzane jest tak, aby obejmowało jak najwięcej przykładów pozytywnych, bez żadnego przykładu negatywnego. W parametrach programu występują oczywiście możliwości osłabienia stawianych wymagań, np. przez dopuszczenie niewielkiego procentu błędów. W zasadzie, warunkiem zakończenia działania procedury jest pokrycie wszystkich przykładów pozytywnych. W efekcie powstaje zbiór reguł decyzyjnych definiujących dane pojęcie.

Rezultaty operacji programu MUM stanowią uogólnienia sformułowane w języku zrozumiałym dla odbiorcy — człowieka. Jest to istotna zaleta w stosunku do SSN, które generują zestawy liczb wyliczanych przez pracującą w niekontrolowany sposób „czarną skrzynkę”.

Jakkolwiek ujęcia typu MUM są efektywne, a zarówno ich implementacja jak i stosowanie są na ogół proste, to jednak łatwo wykrywają one jedynie wyraziste struktury danych. Czasami uzyskany przekaz może być trudny do zinterpretowania. W przypadku wiedzy niepełnej i niepewnej zastosowanie znajdują zbiory rozmyte (por. [15]) i zbiory przybliżone [24]. Obecnie w uczeniu się maszyn wyodrębnia się nowa dziedzina, której angielską nazwę *Data Mining* można tłumaczyć jako pozyskiwanie wiedzy z danych. Ważną rolę w tej dziedzinie ma do odegrania statystyka, szczególnie w postaci analizy gradacyjnej wykorzystującej współczesne możliwości wizualizacji wyników [25].

2.3 Grafy i ich transformacje

Graf jest dla inżyniera czy architekta wygodnym i zrozumiałym intuicyjnie sposobem zapisu wiedzy: węzły grafu reprezentują pewne obiekty, a krawędzie wskazują na zachodzące między tymi obiektami relacje. W szczególności, jednolity język modelowania UML (*Unified Modeling Language*) [3], który ma duże szanse zostać standardem w projektowaniu inżynierskim, w istotnym stopniu wykorzystuje reprezentację grafową.

Od strony matematycznej teoria grafów stanowi dogłębnie rozbudowaną dziedzinę, obejmującą w szczególności transformacje i gramatyki grafowe. Terminu „gramatyka” używamy tu w sensie lingwistyki matematycznej zapoczątkowanej w latach 70. przez N. Chomskiego [7]. Nie siląc się na przytaczanie precyzyjnej definicji powiedzmy, że w ramach tego ujęcia skończony zbiór dowolnych obiektów może być uznany za alfabet. Podzbiory wybrane z tego alfabetu traktowane są jako słowa, a ciągi utworzone ze słów — jako zdania. Zbiór reguł ograniczających dowolność w tworzeniu słów i zdań nazywamy gramatyką. W ten sposób możemy definiować różnego rodzaju języki formalne. Mają one tę przewagę nad językami naturalnymi, że ze względu na ściśle określoną strukturę wewnętrzną doskonale nadają się do przetwarzania na komputerze.

Jeżeli elementami alfabetu są grafy, to reguły ich przetwarzania stanowią specjalny rodzaj gramatyki, zwany gramatyką grafową [28]. W naszym przypadku grafy interpretowane są semantycznie, jako opisy obiektów inżynierskich (projekty). Gramatyka pozwala ująć zarówno pewne ogólne zasady tworzenia takich obiektów (np. normy i przepisy obowiązujące w danej specjalności), jak i wyrazić pewne preferencje projektanta. Na przykład, w architekturze można określić odmienne gramatyki stylów gotyk i barok.

Wprowadzenie języka grafów do narzędzi wspomagających projektowanie inżynierskie jest bardzo korzystne. Pozwala ono bowiem oderwać projektanta od szczegółów i pozwolić mu myśleć koncepcyjnie. Na przykład, optymalizacja przekrojów w ramach ustalonego schematu konstrukcji nośnej rzadko daje większy zysk, niż 10–15 % ciężaru konstrukcji. Tymczasem wybór właściwego schematu może obniżyć ciężar nawet o 20 do 30 %.

Podobna sytuacja ma miejsce również w budowie maszyn. Przypomnijmy tylko zasadnicze korzyści, jakie dała zmiana schematu napędu w samochodach osobowych, czy zastąpienie biplanów w lotnictwie monoplanami. Poszukiwaniu takich „niekonwencjonalnych” rozwiązań sprzyja analiza koncepcyjna prowadzona w języku grafów i ich transformacji.

2.4 Algorytmy genetyczne

Bogactwo rozwiązań zadziwiających swą doskonałością, jakie obserwujemy w przyrodzie ożywionej, skłania do podziwu nad mechanizmem darwinowskiej ewolucji. Nie jest więc przypadkiem, że podjęto próby symulacji tego mechanizmu na komputerze. Idea algorytmu genetycznego, jaką zaproponował Holland [14], jest prosta: zapisujemy istotne cechy obiektu w ciągu bitów, które łącznie zwane są chromosomem, generujemy populację początkową takich obiektów i pozwalamy jej ewoluować zgodnie z zasadą Darwina: największe szanse na reprodukcję i przeżycie mają osobniki najlepiej przystosowane. Pula cech osobniczych jest wzbogacana przez krzyżowanie chromosomów przy tworzeniu potomstwa, a mutacja, czyli losowa zmiana wybranej cechy, wprowadza możliwość pojawienia się rozwiązań całkowicie nieoczekiwanych.

Z matematycznego punktu widzenia algorytm genetyczny jest odmianą przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, w której występują zarówno elementy losowości jak i ukierunkowania. Ważną zaletą tego algorytmu w stosunku do klasycznych metod optymalizacji są słabe wymagania w odniesieniu do funkcji celu i ograniczeń. Wystarczy bowiem tzw. funkcja przystosowania oceniająca „jakość” pojedynczego osobnika (obiektu). Ograniczenia mogą być dane w niejawnym sposób, algorytm dobrze daje sobie radę w przypadku występowania ekstremum lokalnego.

Od czasów publikacji Hollanda algorytmy genetyczne przeszły długą drogę rozwoju [22]. Obecnie mówi się raczej o szerokiej klasie ewolucyjnych metod optymalizacji (EMO). Metody te znajdują zastosowania w różnych dziedzinach techniki, o czym będzie mowa poniżej.

2.5 Systemy ekspertowe

Narzędzia określane jako systemy ekspertowe (ang. *Expert Systems*), jakkolwiek dość blisko związane z tematem, nie będą tu bliżej omawiane. Przy węższym rozumieniu tego sformułowania, przyjmowana w systemach ekspertowych koncepcja dotyczy programów komputerowych o charakterze konsultacyjnym, pisanych ściśle wg wiedzy ekspertów, a wyniki uzyskiwane są na zasadach dedukcji. Przy szerszym rozumieniu tego pojęcia dopuszcza się wbudowywanie do systemu rozwiązań z zakresu sztucznych sieci neuronowych, uczenia się maszyn, itp., ale te kwestie omawiane są w niniejszym tekście oddzielnie.

2.6 Źródła oprogramowania

Programy stanowiące praktyczne narzędzia realizacji implementacji omawianych tutaj metod dostępne są w szeregu pakietów programowych, najczęściej równoległe na rozmaitych platformach (Windows, Unix i Linux, McIntosh).

Oferowane są specjalistyczne programy komercyjne od bardzo tanich (poniżej 100 USD) do bardzo kosztownych (dziesiątki tysięcy USD). Na ogół ukierunkowane są one na specyficzne zastosowania (gra na giełdzie, działania społeczne, itd.). Programy przeznaczone do pozyskiwania wiedzy z zakresu inżynierii lądowej, są znacznie rzadsze.

W typowych pakietach komercyjnych ogólnego przeznaczenia wprowadza się coraz częściej moduły specjalistyczne, które trzeba oddzielnie dokupywać, i które nie są bynajmniej tanie. Kilka przykładów wyszczególniono w Tabeli 1.

Tabela 1. Komercyjne programy z dziedziny pozyskiwania wiedzy

Program	Toolbox	Uwagi
MatLab	Neural Networks Fuzzy Systems	
Mathematica	Fuzzy Logic Package	możliwość implementacji metod SSN
Statistica	STATISTICA Neural Networks	
SPSS	SPSS Neural Connection	szerokie możliwości tworzenia układów SSN

Warto wspomnieć również o mniej kosztownych, a bardzo interesujących możliwościach, w postaci oprogramowania *shareware* i *freeware*. Rozwój infrastruktury elektronicznej świata ma, poza otwarciem dostępu do coraz bardziej skomplikowanych programów i coraz potężniejszych komputerów, także powszechnie znany efekt synergistyczny w postaci pojawienia się Internetu. Wiąże się z tym niemal powszechne udostępnianie nowych zasobów wiedzy, zbiorów danych, a nawet narzędzi obliczeniowych, jako że szereg twórców, a zwłaszcza entuzjastów programowania i informatyki, zamieszcza w sieci swoje opracowania, zbiory, komentarze, także podręczniki, m.in. również opisy i listingi programów. Są one często pełnowartościowe, a od programów komercyjnych różnią się tym, że nie zapewniają wsparcia technicznego, chociaż niekiedy nawet i to ma miejsce. Przykładem w tej dziedzinie może być sam Linux, system operacyjny opracowany na zasadzie „pospolitego ruszenia”, a jednak stanowiący obecnie realne zagrożenie dla komercyjnego królestwa firmy Microsoft.

Niedostatkim zasobów internetowych jest okoliczność, że nikt nie gwarantuje ciągłości czasowej dostępu do nich. Tekst, łącze lub program może zniknąć z danego adresu w sieci Internetu z dnia na dzień, i jeśli nie zadbano o jego wcześniejsze skopiowanie pozostanie niedostępny dla potencjalnego użytkownika. Również w Internecie zalega mnóstwo „śmieci”, i przy przeszukiwaniu należy na to uważać. Jednak mimo podobnych zastrzeżeń możliwości jakie stanęły otworem przed przeciętnym użytkownikiem, w szczególności także przed inżynierem ładowcem, konstruk-

Tabela 2. Narzędzia pozyskiwania wiedzy dostępne bez opłat

Nazwa programu	Typ programu	Status
WinMine Toolkit v1.0		freeware
SNNS — Stuttgart Neural Network Simulator	Symulator sieci neuronowych, z obsługą możliwą również poprzez graficzny interfejs użytkownika.	za darmo do celów edukacyjnych; dostępne są pliki źródłowe
See5	ulepszona, komercyjna wersja programu C 4.5 Quinlana	za darmo dostępna jest pełnosprawna wersja demo, o ograniczonym czasie użytkowania (14dni)
aiNet		za darmo dostępna jest pełnosprawna wersja demo, o ograniczonym czasie użytkowania (21dni)
programy z rodziny AQ		do celów edukacyjnych dostępne w George Mason University
Rosetta	program do analizy metodą zbiorów przybliżonych (rough sets)	freeware
Gradestat	program do gradacyjnej analizy danych	dostępny u twórców (w IPI PAN)

torem czy technologiem, trudne są do przecenienia. Jedynym ograniczeniem mogą co najwyżej być trudności językowe.

W szczególności, również w dziedzinie automatycznego pozyskiwania wiedzy można w Internecie uzyskać dostęp do wartościowych materiałów i programów. Aktualnych adresów internetowych nie warto tu podawać, ponieważ korzystając z dowolnych przeglądarek stosunkowo łatwo można do nich dotrzeć, na podstawie samej nazwy programu. W Tabeli 2 wymienionych jest kilka przykładów z zaznaczeniem ich przeznaczenia i możliwości.

Konsekwencją powyższego jest to, że metody automatycznego pozyskiwania wiedzy znajdują się znacznie bliżej przeciętnego inżyniera czy naukowca, niż to się powszechnie uważa. Natomiast istotną barierę stanowi niedostatek informacji o tych metodach, to jednak jest już tylko związane z programami studiów politechnicznych i zakresem kształcenia.

Warto dodać, że również w Internecie znaleźć można dostęp do testowych zbiorów (*benchmarks*) danych z różnych dziedzin wiedzy, umożliwiających sprawdzanie efektywności poszczególnych metod. Przykładem mogą być zasoby uniwersytetu w Toronto (<http://www.cs.toronto.edu/~delve/data/summaryTable.html>), gdzie udostępnionych jest 39 baz danych pochodzenia naturalnego lub sztucznego, dotyczących charakterystyk społecznych, danych biologicznych, skomplikowanych funkcji algebraicznych, itp., o liczbach atrybutów od 4 do 139, i liczących od 500 do ponad 48000 rekordów. O ile wiadomo autorom, w tematyce zbliżonej do inżynierii lądowej zbiorów takich niestety nie ma.

3 Zastosowania w inżynierii lądowej — przykłady i przewidywania

3.1 Zbiory danych

Inżynierskie bazy danych są dopiero budowane. Wskazana jest w tej mierze daleko posunięta współpraca pomiędzy różnymi ośrodkami naukowymi.

Jakkolwiek konieczne są odpowiednie nowe ustalenia semantyczne w zakresie sposobów rejestrowania składu, właściwości oraz trwałości materiałów, możliwości naprawy konstrukcji, itp., w IPPT zgromadzone już zostały pewne zbiory takich danych, które można użyć przynajmniej w zastosowaniach eksperymentalnych. Stanowią one częściowo wynik realizacji prac z zakresu zagadnień modelowania i optymalizacji kompozytów betonopodobnych, których dotyczyły dwa projekty badawcze KBN realizowane w IPPT [17, 18], a także badania finansowane ze środków programu NATO „*Science for Peace*”, dotyczące HPC, betonów zwykłych, SFRC, oraz analizy struktury betonu stwardniałego.

Warto zdawać sobie sprawę z tego, że już obecnie przepisy wymagają stałego monitorowania wielu obiektów. Należą do nich mosty, tunele, zapory wodne, że nie wspomniemy już o kotłach, windach i dźwigach budowlanych. Z inicjatywy UNESCO śledzi się również stan techniczny ważniejszych zabytków architektury. Dane takiego monitoringu stanowią doskonały materiał do automatycznego pozyskiwania wiedzy. Można z nich bowiem wydobyć informację o zmianach obiektu niezauważalnych gołym okiem, jak również badać i przewidywać niezawodność obiektu. Prace takie były już prowadzone w IPPT PAN. Dotyczyły one kościoła Świętego Jana w Gdańsku (J. Holnicki-Szulc, 2000–2001).

3.2 Zastosowania konstrukcyjne i projektowe

Część materiałów stosowanych w budownictwie (beton, żelbet, ceramika, tworzywa sztuczne) wykazuje złożone nieliniowe własności pod obciążeniem. W takich przypadkach stosowanie standardowej procedury obliczeniowej typu liniowa Metoda Elementów Skończonych (MES) jest niewskazane, a wykorzystanie nieliniowej odmiany MES wymaga wyspecyfikowania zależności obciążenie–odkształcenie na poziomie elementu. Niestety, brak jest konsensusu co do sposobu poprawnego formułowania równań konstytutywnych betonu i podobnych materiałów, a dodatkowo pojawiają się ustawicznie rozmaite nowe modyfikacje „typowej” struktury betonu.

W czasach, gdy obliczenia wytrzymałościowe wykonywano na suwaku logarytmicznym, powszechną praktyką było stosowanie wzorów empirycznych. Polegało to na tym, że badano laboratoryjnie duże partie typowych elementów budowlanych, np. belek żelbetowych, i dobierano krzywe aproksymujące wyniki tych doświadczeń. Podręczniki i poradniki z zakresu konstrukcji żelbetowych, murowanych, drewnianych czy fundamentowania zawierają tego typu wzory. Zauważmy, że podejście empiryczne jest w pełni uzasadnione, jeżeli uzyskany wzór zapewnia dokładność dostateczną dla praktyki inżynierskiej. Dokonanie bowiem pełnej nieliniowej analizy takiej konstrukcji byłoby zbyt kosztowne.

Sieć neuronowa, jako uniwersalny aproksymator, daje zwykle lepsze odwzorowanie, niż klasyczna regresja, a także pozwala przybliżać opisy nieciągłe. Co więcej, przy właściwym doborze wewnętrznej struktury sieci i dostatecznie reprezentatywnym materiale uczącym, sieć taka jest w stanie ekstrapolować odpowiedź materiału czy elementu konstrukcyjnego na obszary nie pokryte danymi doświadczalnymi.

Typowym zastosowaniem SSN do obliczeń wytrzymałościowych jest neuronowy symulator odpowiedzi elementu nieliniowego. Załóżmy, że w konstrukcji występują elementy kruche, wiotkie, czy wykazujące cechy więzów jednokierunkowych. Jeżeli ich modelowanie analityczne sprawia trudności, a jednocześnie dysponujemy materiałem doświadczalnym na temat zachowania się tych elementów pod obciążeniem, to możemy zastosować SSN. Po nauczeniu sieci można ją wstawić do programu MES, jako moduł generujący odpowiedź danego elementu.

Mając wyniki pomiarów można w ten sposób modelować nie tylko nieliniowość zachowania się elementów konstrukcyjnych przy obciążeniu statycznym, ale również skomplikowane zjawiska zachodzące przy obciążeniu dynamicznym. W Polsce zagadnieniami stosowania SSN w modelowaniu nieliniowego zachowania się konstrukcji budowlanych zajmuje się zespół Z. Waszczyżyna [31].

Rekurencyjna sieć neuronowa może służyć jako narzędzie do optymalizacji. Próby zastosowania takich sieci były podejmowane przez wielu autorów (por. przegląd [4]). Niestety, praktyczna przydatność neuronowych modułów optymalizujących kończy się na granicy 10 zmiennych decyzyjnych. Nie wydaje się zatem, aby w tej dziedzinie sieci neuronowe znalazły szersze zastosowanie.

Znacznie większe możliwości oferują w tym względzie algorytmy ewolucyjne. Ich naturalna zdolność do wychodzenia z lokalnych minimów („dołków”) funkcji celu i doskonałe przystosowanie do uwzględniania niejawnych ograniczeń powoduje rosnące zainteresowanie badaczy ewolucyjną optymalizacją konstrukcji. Prekursorem tych badań był I. Rechenberg, którego strategię ewolucyjną inspirowały obserwacje optymalnych rozwiązań w przyrodzie [27].

Idea ewolucyjnej optymalizacji jest prosta, przynajmniej w zagadnieniach jednokryterialnych. Cechy podlegające optymalizacji kodujemy w chromosomach i uruchamiamy na komputerze proces symulujący darwinowski dobór gatunku. Kolejne populacje rozwiązań konstrukcyjnych ewoluują w kierunku optimum założonej przez nas funkcji oceny jakości. W Polsce ewolucyjną optymalizacją konstrukcji budowlanych i maszynowych zajmuje się zespół T. Burczyńskiego [6]. Interesujące zastosowania metod ewolucyjnych w optymalizacji dyskretnej uzyskała w IPPT PAN grupa W. Gutkowskiego [12].

Nowe perspektywy otwiera połączenie opisu struktury konstrukcji za pomocą grafów z jej optymalizacją ewolucyjną. Pozwala to poszukiwać najlepszych rozwiązań topologicznych: liczby i rodzaju składowych elementów konstrukcji wraz ze sposobem ich wzajemnego połączenia. Optymalizacja topologiczna stanowi poważne wyzwanie ze względu na jej kombinatoryczny charakter: nawet przy stosunkowo małej liczbie elementów liczba ich możliwych połączeń może być bardzo duża. Jeżeli dodamy do tego optymalizację usytuowania elementów w przestrzeni i optymalizację własności tych elementów, to problem staje czasochłonny obliczeniowo, nawet przy obecnych możliwościach komputerów.

W optymalizacji topologicznej, która najprawdopodobniej będzie głównym kierunkiem badań w okresie następnych lat, możliwe są dwa ujęcia zagadnienia. Pierwsze z nich bazuje na analizie wrażliwości i polega na próbie rozszerzenia pojęcia pochodnej funkcji (funkcjonału) celu na przypadek zmian strukturalnych. Przykładem tego typu podejścia jest praca D. Bojczuka [2]. Kłopot ze stosowaniem analizy wrażliwości polega na tym, że zmiany struktury powodują skokowe zmiany funkcji celu, pojęcie pochodnej traci zatem sens. Alternatywą wydaje się zastosowanie ewolucyjnej strategii optymalizacji do struktury zakodowanej w postaci grafu. Badania nad rozwiązaniami tego typu zostały zapoczątkowane przez drugiego z autorów niniejszego opracowania [5].

Jak wspomniano powyżej, w klasycznym algorytmie genetycznym informacja o obiekcie jest zakodowana w ciągu bitów, zwanym chromosomem. Chromosom jest tworem jednowymiarowym i wykonanie na nim podstawowej operacji genetycznej — krzyżowania — jest proste. Wystarczy wybrać miejsce przecięcia chromosomów rodzicielskich, by wymieniając na krzyż uzyskane fragmenty otrzymać chromosomy potomstwa. Sprawa znacznie się komplikuje, gdy chromosomy stają się grafami. Krzyżowanie jest wówczas zamianą podgrafów, a takiej zamiany nie można dokonywać w sposób przypadkowy. Wypada wówczas korzystać z zaproponowanego przez B. Strug pojęcia osadzenia podgrafu [29]. W warstwie semantycznej odpowiada to ograniczeniu wynikającemu z wewnętrznej struktury obiektu, i pewne kombinacje stają się niedozwolone. Na przykład, trudno oczekiwać by skrzyżowanie dachu budowli z jej fundamentem dało sensowny wynik.

Innym obiecującym kierunkiem badań jest opis obiektów za pomocą grafów hierarchicznych. Nowe definicje takich grafów, zaproponowane ostatnio przez zespół E. Grabskiej z Uniwersytetu Jagiellońskiego [11], pozwalają w wygodny sposób zapisywać wiedzę o obiektach inżynierskich. W szczególności, grafy te otwierają możliwość automatyzacji czasochłonnego i podatnego na błędy procesu projektowania w budynku instalacji grzewczej, klimatyzacyjnej, wodociągowej, itp. Instalacje takie projektują niezależnie od siebie specjaliści z odpowiednich dziedzin, i często pojawiają się kolizje pomiędzy przyjętymi przez nich rozwiązaniami. Program komputerowy wyposażony w wiedzę o grafach hierarchicznych będzie mógł porównywać projekty instalacji zapisane w tym języku i wykrywać ewentualne błędy projektowe. Badania podobnych możliwości prowadzone są przez Zespół Systemów Inteligentnych Zakładu Sterowania i Dynamiki Systemów zarówno w ramach projektu badawczego KBN, jak i we współpracy polsko-niemieckiej [30].

3.3 Zastosowania materiałowe

Najbardziej typowymi zastosowaniami SSN w dziedzinie materiałowej było użycie ich do projektowania betonu, [17, 19]. Większość prób miała charakter ograniczony do niewielkiej liczby uwzględnianych atrybutów (cech). Należy przewidywać, że w miarę przygotowywania baz danych wg ustalonego standardu, np. por. [20], i z chwilą rozwiązania w jakiejś mierze kwestii efektywnego scalania słabo kompatybilnych baz, wyniki w tej dziedzinie będą znacznie bardziej ogólne.

W tej dziedzinie również należy oczekiwać bardziej intensywnego posługiwania się metodami statystycznymi, zarówno konwencjonalnymi jak i nowoczesnymi (analiza gradacyjna) w celu prawidłowego przygotowania baz danych. Dotyczy to zwłaszcza wyboru cech pochodnych (ang. *derived attributes*), lepiej opisujących badane zjawiska, niż cechy naturalne. Znanym w technologii betonu przykładem wyższości takiego opisu jest zastępowanie w opisie mieszanki zawartości cementu oraz zawartości wody przez stosunek woda–cement.

Co się tyczy zastosowań MUM to wydaje się, że możliwości uzyskiwania interesujących rezultatów w dziedzinie projektowania materiałów betonopodobnych są jeszcze większe [18]. Ostatnie, pozytywnie zakończone próby z zastosowaniem bardzo małych i niekompletnych baz danych [20] wskazują na możliwość uzyskiwania ciekawych wyników niemalże natychmiast, tzn. bez potrzeby rozbudowywania wielkich zbiorów danych treningowych.

W tej dziedzinie zadaniem, jakie należy rozwiązać w najbliższej przyszłości, będzie sposób wyzyskania przy metodach uczenia się maszyn jednocześnie zarówno posiadanych baz danych jak i wiedzy z danej dziedziny (także wiedzy zawartej w normach i zaleceniach), która w oczywisty sposób uzupełnia zawartość danej bazy.

3.4 Zastosowania do oceny stanu konstrukcji

Metody SSN przy ocenie stanu konstrukcji zastosował jako pierwszy Lefik [21], jednak w bardzo ograniczonym zakresie. Sztuczna sieć neuronowa miała tam uogólniać działania grupy ekspertów, oceniających stan istniejących budowli mostowych.

Przykładem koncepcji zastosowania jednocześnie szeregu różnych metod automatycznego pozyskiwania wiedzy jest projekt realizowany obecnie w IPPT PAN, finansowany ze środków funduszu „*Science for Peace*” NATO. Temat podjętych aktualnie poszukiwań obejmuje automatyzację oceny stanu materiału i konstrukcji. Badania tradycyjne wymagają czasu, co wiąże się na ogół z nakładem środków, a alternatywą są nowoczesne badania w dużym stopniu zautomatyzowane. Koncepcję postępowania objaśnia szkic na Rys. 1: inspekcja stanu konstrukcji i wyniki badań pobranych z mostu próbek pozwalają na opracowanie zestawu danych, zawierającego zarówno oceny lingwistyczne, wyniki automatycznej analizy obrazów, wyniki badań twardości, emisji akustycznej, właściwości sprężystych, itp. Na podstawie uprzednio pozyskanej wiedzy, tj. odpowiednio wygenerowanej bazy danych, wyniki te pozwolą na automatyczną kwalifikację stanu materiału. W efekcie predykcji możliwe będzie wyrokowanie, np. o zalecanym poziomie naprawy lub modernizacji budowli.



Rys. 1. Schemat automatycznej oceny stanu mostu

4 Uwagi końcowe

Wśród motywów przewodnich referatów prezentowanych podczas ostatniej (siedemnastej), jednej z największych międzynarodowych konferencji poświęconych sztucznej inteligencji — IJCAI'01 (Seattle, 2001), wyróżnia się — poza tematami dotyczącymi ogólnego modelowania wiedzy, jej reprezentacji, itp. — tematyka niepewności wiedzy i jej oceniania. Wydaje się to oznaczać, że główne kierunki prac badawczych z zakresu SI są mniej więcej ustalone i kontynuowane w sposób przewidywalny. Będą to badania w zakresie systemów wieloagentowych, sztucznych sieci neuronowych, szczegółowych zagadnień uczenia się maszyn, rozpoznawania obrazów, analizy i syntezy języka naturalnego, robotyki. Wagi szczególnej natomiast nabiera problem oceny wiarygodności tej wiedzy, którą uzyskuje się w sposób automatyczny.

Wiąże się to niewątpliwie w sposób zasadniczy ze specyfiką metod automatycznej akwizycji wiedzy, w których użytkownik, a nawet twórca oprogramowania i/lub metody, nie zawsze — i na pewno nie w pełni, świadomy jest sposobów jej efektywnego funkcjonowania. Stąd istotna staje się rola sprawdzania takiej efektywności w drodze eksperymentowania. Oczywiście jest przy tym, że zagadnienie wiarygodności metod komputerowej akwizycji wiedzy należy ująć w sposób możliwie precyzyjny.

Innym bardzo ważnym aspektem jest kwestia języka opisu danych. Podobnie jak w niektórych kwestiach filozoficznych, język decydować może o możliwościach poznania i użytkowania wiedzy. Problemy techniczne trzeba najpierw sprowadzić do zapisu formalnego, ale okoliczność jak zostało to przeprowadzone w dużej mierze określa możliwość uzyskiwania odpowiedzi.

Duża część wiedzy ma charakter wiedzy zastanej (*background knowledge*), co oznacza, że wiedza ta pochodzi z czasów, gdy komputery nie były jeszcze dostępne. Powinna ona być przystosowana do automatycznej obróbki, tzn. odpowiednio zakodowana. Ostatecznie metodami automatycznymi możliwe będzie doskonalenie baz wiedzy rozwiniętych przez ludzkich ekspertów, poprzez:

- wykrywanie i prostowanie niezgodności;
- usuwanie elementów nadmiarowych;
- uzupełnianie braków;
- upraszczanie reguł wyprowadzonych lub proponowanych przez ekspertów.

Analizując temat automatycznej akwizycji wiedzy warto poruszyć kwestie możliwości i efektywności postępowania, w kontekście zagadnień moralnych, politycznych, estetycznych, itp. Poniższe uwagi mają już z konieczności nieco filozoficzny charakter. Jakkolwiek ambicje badaczy zmierzają w kierunku wyręczenia się maszynami w możliwie szerokim zakresie, to jednak wydaje się, że nawet przy najśmielszych koncepcjach występować będą całkiem naturalne i nieprzekraczalne bariery. Ludzie niechętnie będą rezygnowali z podejmowania decyzji w kwestiach związanych z najgłębszą sferą duchowości człowieka, takich właśnie jak moralność czy estetyka. W związku z tym można mieć uzasadnione wątpliwości, czy kiedykolwiek człowiek zechce sędować na maszynę sprawy podejmowania decyzji grożących utratą zdrowia czy życia przez inne istoty ludzkie, lub też zgodzi się, aby automatyczny system decyzyjny definiował kanony piękna i brzydoty. Trzeba będzie też wyraźniej określić wagę uzyskiwanych odpowiedzi w kwestii stopni niepewności oraz właściwego doboru zasad oceny, a także stosowanego języka.

Na zakończenie należy podnieść kwestię potrzeby odpowiedniego organizowania kształcenia kadry inżynierskiej. Nowe osiągnięcia w dziedzinie technik komputerowych wymagają popularyzacji, bowiem ograniczona znajomość tych technik przynosi oczywiste straty społeczeństwu, a opóźnienia przekładają się bezpośrednio na straty ekonomiczne. Dotyczy to przede wszystkim kształcenia informatycznego, zarówno w zakresie klasycznych metod obliczeniowych, jak i metod szeroko rozumianej sztucznej inteligencji.

Bibliografia

1. ACI Committee 126, *Guide to recommended format for concrete in materials property database* (ACI 126.3R-99), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 1999.
2. Bojczuk D., *Analiza Wrażliwości i Optymalizacja Konstrukcji Prętowych*, Monografie, studia, rozprawy. Politechnika Świętokrzyska, 18, 1999.
3. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I., *The Unified Modeling Language User Guide*, Addison-Wesley-Longman, Reading, 1999.
4. Borkowski A., *Neural networks and structural optimization*, [in:] Proceedings of the Advanced TEMPUS Course on Numerical Methods in Computer Aided Optimal Design, Zakopane, May 1992, Burczyński T. [ed.], Politechnika Śląska, Gliwice, 1992.
5. Borkowski A., Grabska E., Nikodem P., Strug B., *On graph grammars and genetic algorithms in layout optimization*, Proc. Polish National Conference on Solid Mechanics (SolMech 2002), Zakopane, September 2002.
6. Burczyński T. [ed.], *Computational sensitivity analysis and evolutionary optimization of systems with geometrical singularities*, Zeszyty Naukowe Katedry Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki, Politechnika Śląska, Gliwice, 1, 2002.
7. Chomsky N., *Aspects of Theory of Syntax*, MIT Press, Cambridge, 1965.
8. Cichosz P., *Systemy Uczące się*. WNT, Warszawa, 2000.

9. Duch W. et al. [red.], *Sieci Neuronowe*, t.6 serii *Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000*, Nałęcz M. [red.], Akademicka Ofic. Wyd. EXIT, Warszawa, 2000.
10. Gołąbek P., Kosiński W., Weigl M., *Adaptation of learning rate via adaptation of weight vector in modified M-Delta networks*, [in:] *Computational Intelligence and Applications, Studies in Fuzziness and Soft Computing*; Szczepaniak P.S., [ed.] Physica-Verlag, c/o Springer-Verlag; vol. 23, pp. 156–163, 1999.
11. Grabska E., *Graphs and designing*, [in:] *Graph Transformations in Computer Science*, Schneider H.J., Ehrig H. [eds.], LNCS 776, 188–203, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
12. Gutkowski W., Iwanow Z., Bauer J., *Controlled mutation in evolutionary structural optimization*, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21 (2001), pp. 355–360.
13. Hecht-Nielsen R., *Neurocomputing*, Addison-Wesley, New York, 1990.
14. Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
15. Kacprzyk J., *Zbiory Rozmyte w Analizie Systemowej*, PWN, Warszawa, 1986.
16. Kasperkiewicz J., Racz J., Dubrawski A., *HPC strength prediction using artificial neural network*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 9, 4, 279–284, 1995.
17. Kasperkiewicz J. [red.], *Zastosowanie sieci neuronowych do modelowania właściwości mieszanek betonowych*, Sprawozdanie merytoryczne z Projektu KBN Nr 7T07E01408, Warszawa, 1997.
18. Kasperkiewicz J. et al., *Prognoza właściwości kompozytów betonopodobnych przy zastosowaniu metod uczenia się maszyn*, Sprawozdanie merytoryczne z wykonania Projektu KBN 8 T11F01317, Warszawa, luty 2002.
19. Kasperkiewicz J., *Artificial neural networks in engineering materials design*, *Proceedings of the International Conference „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and beyond”*, Wrocław, June 2–5, 1997, vol. 1, 103–126.
20. Kasperkiewicz J., *Analiza baz danych na temat materiałów betonopodobnych*, XLVIII Konf. Nauk. KILW i KN PZITB, Krynica, t. 3, 35–42, 2002.
21. Lefik M., „Inteligentna” baza danych o stanie technicznym obiektów inżynierskich — koncepcja zastosowania sieci neuronowych. XL Konf. Nauk. KILW i KN PZITB, Krynica, t. 6, 149–156, 1994.
22. Michalewicz Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
23. Michalski R.S., *Learning strategies and automated knowledge acquisition: an overview*, [in:] *Knowledge-Based Learning Systems*, Bolc L. [ed.], Springer-Verlag, Berlin, 1985.
24. Pawlak Z., *Wiedza z perspektywy zbiorów przybliżonych*, Instytut Informatyki, Politechnika Warszawska, ICS Research Report 23/92, Warszawa, 1992.
25. Szczesny W., *Grade correspondence analysis applied to contingency tables and questionnaire data*. *Intelligent Data Analysis*, 6, 17–51, 2002.
26. Quinlan J.R., *Learning efficient classification procedures and their application to chess end games*, [in:] *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*, Michalski R.S., Carbonell J.G., Mitchell T.M. [eds.], Tioga, Palo Alto, 1983.
27. Rechenberg I., *Evolutionsstrategie*, Fromann Verlag, Stuttgart, 1973.
28. Rosenber G. [ed.], *Handbook of Graph Grammars and Computing by Graph Transformation*, World Science, Singapore, 1997.
29. Strug B., *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i transformacji grafowych w projektowaniu graficznym wspomaganym komputerowo*, rozprawa doktorska, Instytut Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 2001.
30. Szuba J., Borkowski A., *Graph transformations in architectural design*, *Computer Assisted Mechanics and Engineering Science (CAMES)*, 2003, w druku.
31. Waszczyszyn Z., *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii lądowej*. XLI Konf. Nauk. KILW i KN PZITB, Kraków, t. 9 — Materiały pokonferencyjne, 251–288, 1996.
32. Webb A., *Statistical Pattern Recognition*. ARNOLD, London, 1999.

EKO-BUDOWNICTWO JAKO PROBLEMATYKA BADAWCZA

Wojciech Dzieniszewski

1 Wprowadzenie

Tematyka badawcza w dziedzinie proekologicznego energooszczędnego budownictwa została zapoczątkowana w latach siedemdziesiątych. Była następstwem paliwowego kryzysu energetycznego w Europie Zachodniej, który spowodował realne zagrożenie możliwości utrzymania i rozwoju gospodarki energetycznej i eksploatacyjnej w sektorze budownictwa na dotychczasowym poziomie. Kryzys ten wymusił konieczność poszanowania energii i podjęcie badań oraz przedsięwzięć, zmierzających do radykalnego obniżenia energochłonności budownictwa mieszkaniowego i komunalnego — głównych konsumentów energii.

Powstał międzynarodowy program „Energy conservation” obejmujący główne ośrodki badawcze krajów Unii Europejskiej zajmujące się skojarzoną problematyką budownictwa i energii.

Pojawił się nowy rodzaj budownictwa określane mianem energo-oszczędnego o zaniżonym zużyciu energii systemowej i wykorzystujący odnawialne źródła energii środowiska w gospodarce energetycznej. Oszczędności w zużyciu energii na ogrzewanie, uzyskane w budynkach w wyniku ich termorenowacji oraz osiągnięte efekty energetyczne pochodzące z wykorzystania źródeł energii odnawialnej stymulują dalszy postęp w kierunku budownictwa niskoenergetycznego. Wyraża ono dążenie do budownictwa autonomicznego i samowystarczalnego energetycznie poprzez rozwiązania skojarzone ze środowiskiem, wykorzystujące z poszanowaniem jego zasoby energetyczne w sposób zrównoważony.

W kraju problemy energetyczne budownictwa objawiły się w połowie lat osiemdziesiątych. Zaistniały deficyt energii stał się poważną barierą uniemożliwiającą rozwiązywanie problemów mieszkaniowych. Ponadto w porównaniu z ówczesnym budownictwem krajów europejskich wysoko rozwiniętych gospodarczo, wdrażających realizowane programy badawcze, polskie budownictwo mieszkaniowe cechowała zbyt duża materiałochłonność i nadmierne zużycie systemowej energii w gospodarce energetycznej. W celu poprawy sytuacji utworzono w latach osiemdziesiątych ogólnokrajowe centralne programy badawcze PR-5, PR-8 a następnie związane ściśle z budownictwem wzajemnie sprzężone programy badań podstawowych i rozwojowych:

- CPBP 02.21 pt.: „Podstawy i mechanizmy racjonalnej gospodarki energetycznej budownictwa mieszkaniowego” (w skrócie ENERGO-BUDYNEK);
- CPBR 4.1 pt.: „Poprawa wartości użytkowych i efektywności budownictwa mieszkaniowego i towarzyszącego” z blokiem tematycznym P.3 „Gospodarka energetyczna budynku — badania i budynki eksperymentalne”.

Programy te skupiając merytoryczną działalność znaczących krajowych placówek naukowo-badawczych i dydaktycznych umożliwiły rozwój nauk technicznych w kontekście zagadnień wielorodzajowej inżynierii energooszczędnego budownictwa. Wielowątkowość tematyczna progra-

mów sprawiła, że powstały i zostały rozwiązane nowe problemy w zakresie zagadnień sprzęgających ze sobą dyscypliny nauk technicznych dotąd traktowane rozłącznie.

W wyniku realizacji prac badawczych, wskazano metody i rozwiązania różnokierunkowego ograniczania (w sensie architektonicznym, konstrukcyjnym, materiałowym, instalacyjnym, technologicznym i eksploatacyjnym) zużycia energii eksploatacyjnej na cele grzewcze oraz sposoby wykorzystania odnawialnych źródeł energii środowiska.

Poza pracami w zakresie badań podstawowych i rozwojowych powstało wiele opracowań i realizacji o znaczeniu praktycznym, ukierunkowanych na bieżące i przyszłe potrzeby energooszczędnego pro-ekologicznego budownictwa. Należy tu wspomnieć o pierwszym w skali kraju zrealizowanym w Warszawie w latach dziewięćdziesiątych energooszczędnym wielorodzinnym budynku WE-110.

Podjęte wówczas prace badawcze w różnych ośrodkach są kontynuowane i rozwijane. Stają się przedmiotem Łódzkiej konferencji „Fizyka budowli w teorii i w praktyce” organizowanej w latach nieparzystych oraz Krakowskiej „Energodom” w latach parzystych — odbywających się od 1988 roku.

2 Tematyka i ważniejsze osiągnięcia badawcze

Prowadzone obecnie w kraju badania o charakterze podstawowym w dziedzinie energooszczędnego budownictwa dotyczą zagadnień skupionych głównie w następujących grupach tematycznych:

- Podstaw projektowania budynków energooszczędnych — w zakresie wielokryterialnej optymalizacji kształtów i struktury budynków zasilanych różnymi źródłami ciepła, w tym pozyskanego z promieniowania słonecznego, z uwzględnieniem kosztów wznoszenia i eksploatacji budynku oraz emisji zanieczyszczeń stałych i gazowych.
- Modelowania matematycznego energetycznych oddziaływań środowiska fizycznego na budynek — w zakresie gęstości strumieni energii całkowitego promieniowania słonecznego, przy różnych stanach zachmurzenia z parametrami zidentyfikowanymi na podstawie statystycznych danych pogodowych z pomiarów stacji aktynometrycznych; zmiennych pogodowych klimatu Polski obejmujących: temperaturę powietrza zewnętrznego i prędkości wiatru oraz analizy dostępności promieniowania słonecznego (całkowitego, bezpośredniego i dyfuzyjnego) na powierzchnię o dowolnym pochyleniu i orientacji, w różnych porach dnia w czasie całego roku kalendarzowego, w odniesieniu do krajowych szerokości geograficznych.
- Analizy, modelowania matematycznego, symulacji komputerowej procesów ciepło-przepływowych w budynkach i wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym — w zakresie przenikania ciepła przez przegrody o złożonej strukturze z mostkami termicznymi, wpływu struktury obudowy budynku na całoroczne zapotrzebowanie energii do celów ogrzewania i klimatyzacji, rozkładów temperatury i przepływów powietrza wewnątrz przegrod obudowy oraz w obszarach pomieszczeń budynków, zakłóceń stanów równowagi termicznej w budynkach mieszkalnych z regulowaną instalacją grzewczą, wywołanych zmiennymi oddziaływaniami środowiska w warunkach pogodowych Warszawy, szacowania ilo-

ści ciepła oddawanego do otoczenia przez budynki na podstawie termogramów uzyskanych z pomiarów radiometrycznych.

- Teorii, modelowania matematycznego, symulacji komputerowej oraz badań eksperymentalnych funkcjonowania systemów grzewczych energetyki odnawialnej — w przedmiocie instalacji słonecznego podgrzewania wody użytkowej, zjawisk cieplnych w procesach magazynowania i odbioru ciepła z magazynów gruntowych z uwzględnieniem naturalnej relaksacji termicznej gruntu, akumulacji ciepła w magazynach ze złożem strukturalnym fazowo — zmiennym. Obejmują również procesy pozyskiwania, akumulacji i dystrybucji ciepła w budynkach przystosowanych do ogrzewania systemami pasywnymi bezpośrednich i pośrednich zysków ciepła. Zrealizowano w Laboratorium Energetyki Słonecznej IPPT PAN stanowisko badawcze funkcjonowania instalacji słonecznego podgrzewania wody z uwzględnieniem przemian fazowych czynnika roboczego oraz magazynowania energii w zasobnikach z przemianą fazową złoża wraz z układami zasilania i odbioru ciepła. W związku z dynamicznym rozwojem w kraju energetyki słonecznej wzrasta obecnie liczba prowadzonych badań charakterystyk cieplnych kolektorów słonecznych na zlecenie krajowych producentów i dystrybutorów tych urządzeń. Podjęto również badania w zakresie wykorzystania materiałów fazowo — zmiennych jako akumulatorów ciepła.
- Modelowania matematycznego, symulacji komputerowej i badań eksperymentalnych transportu masy i energii w materiałach budowlanych i elementach budowlanych o złożonych strukturach z uwzględnieniem lokalnych środowiskowych oddziaływań; obejmujących m.in. stany wilgotnościowe przegród, wentylację naturalną w aspekcie zagrożenia pleśnią, korozję mikrobiologiczną.
- Analiz, modelowania matematycznego i numerycznego oraz symulacji komputerowych transmisji fal akustycznych i propagacji hałasu w obszarach skojarzonych ze środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym obiektów budowlanych w zakresie — rezonatorów pobudzanych akustycznie o określonych pulsacjach przepływowo-rezonansowych w instalacjach z pojedynczą odnogą, z odnogami współosiowymi oraz z dwoma odnogami typu „tandem”, układów rezonansowych o dużych amplitudach sygnału pobudzającego, przewidywań rozkładu poziomu hałasu na fasadach budynków usytuowanych w pobliżu tras komunikacyjnych, o określonym modelu akustycznym z uwzględnieniem propagacji dźwięku z wielokrotnym odbiciem i dyfrakcją.
- Kryteriów ocen właściwości akustycznych oraz metod pomiarowych właściwości dźwiękoizolacyjnych i dźwiękochłonnych obejmujących: wyroby budowlane, elementy budowlane, obudowy obiektów.

Wskazana tematyka realizowana w kilku ośrodkach naukowych w kraju nie odbiega poziomem od prac krajów Unii Europejskiej. Proponowane rozwiązania, modele matematyczne oraz programy symulacji komputerowych są równoważące z reprezentowanymi na świecie. Niepokojąca jest sytuacja w obszarze badań eksperymentalnych, laboratoryjnych i poligonowych, wynikająca głównie z braku wysokiej klasy nowoczesnej specjalistycznej aparatury. Również wykorzystanie w praktyce wyników badań przez krajowe przedsiębiorstwa i firmy budowlane jest niezadowalające — brakuje zainteresowania i wdrożeń.

3 Kierunki i perspektywy rozwoju badań i zastosowań ich wyników

Współczesne światowe kierunki rozwoju proekologicznego budownictwa, przyjaznego użytkownikom i środowisku, o niskim zapotrzebowaniu energetycznym ze źródeł konwencjonalnych oraz wykorzystującym źródła energii odnawialnej w gospodarce eksploatacyjnej sprzyjać będą badaniom w dziedzinie budownictwa mieszkaniowego i komunalnego o znaczącym zapotrzebowaniu społecznym.

Nowe kierunki i zasady projektowania i wznoszenia budynków obecnego stulecia wytyczono na Światowej Konferencji „Green Building Challenge” w Vancouver w 1998 r., w myśl których nowowznoszone budynki, powinny być „zdrowe” i „przyjazne” człowiekowi i środowisku, wyróżniać się minimalnym wytwarzaniem szkodliwych substancji w czasie eksploatacji oraz właściwie rozwiązana gospodarką ściekami i odpadami organicznymi i nieorganicznymi. Nowe budynki charakteryzować powinny znamiona „inteligencji”, przejawiające się przemyślanym funkcjonowaniem określonych instalacji, zgodnie w wymaganiach użytkowników.

Stawia to naukom technicznym wyzwania podejmowania nowych zagadnień i rozwiązań o charakterze interdyscyplinarnym. W Polsce dodatkowo zarysowuje się nagląca potrzeba przebudowy i modernizacji istniejącej substancji budownictwa mieszkaniowego, wznoszonego w ubiegłych dziesięcioleciach, wobec konieczności polepszenia warunków bytowania oraz eksploatacji zgodnie ze standardami europejskimi. Amelioracja „bloków” mieszkalnych z „wielkiej płyty” i rewitalizacja osiedli mieszkaniowych stawać się będzie w nadchodzących latach bardzo ważnym ogólnokrajowym problemem społecznym. Dlatego też planowane w przyszłości prace badawcze w zakresie podstawowym stanowiąc będą kontynuację i rozszerzenie obecnie prowadzonych badań interdyscyplinarnych w kontekście przydatności ich wyników w proekologicznym budownictwie z uwzględnieniem warunków ochrony środowiska i komfortu użytkownika. Obejmować będą zagadnienia tworzące następujące bloki tematyczne:

I. Podstawy racjonalnego projektowania budynków oraz osiedli mieszkaniowych, ich energoaktywnych elementów i sprzężonych z ustrojem obiektu, helio-aktywnych systemów grzewczych i fotowolaltycznych, które obejmować będą:

- Optymalizację wielokryterialną z uwzględnieniem polskich warunków klimatycznych, w ujęciu statycznym i dynamicznym, z czynnikiem czasu odnoszącym się do oddziaływań środowiska i zmiennych konfiguracji działania urządzeń.
- Modelowanie i identyfikację zmiennych pogodowych w odniesieniu do lokalizacji w obszarze kraju dla potrzeb energetyki odnawialnej i kształtowania mikroklimatu.
- Kształtowanie przestrzeni zabudowy w środowisku zurbanizowanym z uwzględnieniem nasłonecznienia oraz przestrzeni wewnątrz budynków wielofunkcyjnych z maksymalnych oświetleniem światłem dziennym i zachowaniem wymaganego klimatu wietrzego.
- Kształtowanie pro-ekologicznych rozwiązań komunikacyjnych w obszarach śródmiejskich o dużym nasileniu ruchu takich jak: parkingów podziemnych w ciągu głównych ulic, osłon akustycznych na wiaduktach oraz pochłaniaczy spalin na skrzyżowaniach.

II. Modelowanie i analiza procesów różnych form wymiany ciepła, wilgoci i powietrza oraz postaci konwersji promieniowania słonecznego obejmujące m.in.:

- Przegrody, węzły i naroża obudowy budynków, obszary wewnątrz pomieszczeń mieszkalnych i użytkowych.
- Transparentne dwupowłokowe, z obiegiem powietrza w przestrzeni między powłokowej, ściany osłonowe o zmiennych, dostosowanych do oddziaływań otoczenia, parametrach fizyko-chemicznych,
- Helio-aktywne przekrycia i fasady budynków o postaciach paneli z ogniw fotowoltaicznych skojarzonych z wielofunkcyjnymi systemami energetycznymi budynku: grzewczymi i wentylacyjnymi, akumulacji i rekuperacji ciepła.
- Ścieżki kanałowe transportu powietrza w przegrodach budynku, rozprowadzające powietrze w obszarze budynku.
- Budynki obrazowane techniką termograficzną z użyciem radiometru oraz ich klasyfikacja energetyczna.

III. Podstawy projektowania, modelowanie funkcjonowania i badania eksperymentalne systemów i elementów instalacji energetyki słonecznej obejmujące m.in.:

- Kolektory słoneczne nowej generacji w układzie instalacji podgrzewania wody użytkowej.
- Zasobniki ciepła dwuskładnikowe ze złożem strukturalnym z elementami wypełnionymi materiałem fazowo-zmiennym.
- Kolektory słoneczne skojarzone z wymiennikami gruntowymi i pompami ciepła.
- Elementy wypełnione materiałem z przemianą fazową stanów skupienia.

IV. Kształtowanie i analiza klimatu akustycznego środowiska wewnętrznego w budynkach i zewnętrznego obszarów zabudowanych z trasami komunikacyjnymi obejmujących m.in.:

- Rozwój modelowania i metod numerycznych wyznaczania rozkładu pola akustycznego w pomieszczeniach obiektów budowlanych, generowanych oddziaływaniami środowiska wewnętrznego i zewnętrznego.
- Opracowanie metody ograniczania poziomu pulsacji akustycznych generowanych w instalacjach do transportu sprężonego powietrza.
- Modelowanie i metody analizy zjawisk powstawania oscylacji samowzbudnych w instalacjach przepływowych oraz w rezonatorach akustycznych.
- Modelowanie hałasu środowiskowego oraz opracowanie programów symulacyjnych w odniesieniu do różnych układów urbanistycznych, tras komunikacyjnych oraz źródeł hałasu.

- Podstawy projektowania osłon i ekranów akustycznych oraz nowych rozwiązań zabezpieczeń akustycznych.
- Doskonalenie kryteriów oceny akustycznej wyrobów budowlanych i obiektów budownictwa oraz wpływu hałasu na zdrowie.
- Rozwijanie metod pomiarowych i kryteriów oceny drgań ze względu na odczucia człowieka, wywołanych ruchem komunikacyjnym i przenoszonych do budynków mieszkalnych oraz użyteczności publicznej.
- Doskonalenie metod badawczych i pomiarowych dostosowanych do nowych, udoskonalonych kryteriów oceny w akustyce budowlanej, urbanistycznej i instalacyjnej.

Przedstawiony obszar i zakres tematyczny prac i badań odzwierciedlają najnowsze tendencje interdyscyplinarnych zagadnień w dziedzinie budownictwa skojarzonego ze środowiskiem i wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, w obszarze dyscypliny budownictwa. Metodyka przewidywanych badań uwzględniać powinna kryteria stawiane zrównoważonemu rozwojowi budownictwa mieszkaniowego i komunalnego.

Rozwój ten w krajach wysoko rozwiniętych jest stymulowany postępowaniem technicznym inicjowanym rozwiązaniami pro-ekologicznymi niskoenergetycznymi budynkami demonstracyjnymi. Budynki te powstają w wyniku realizacji narodowych programów badawczych jako modelowe rozwiązania, dostosowane do określonych warunków klimatycznych. Przykładami takich realizacji są m.in. samowystarczalny budynek słoneczny we Freiburgu w Niemczech, budynek wielorodzinny Urban Villa w Holandii k/Amsterdamu, budynek biurowy Villa Vission w Kopenhadze w Danii, czy niskoenergetyczny budynek w Sapporo w Japonii. Budynki demonstracyjne, będące zmaterializowanymi postaciami rezultatów programów badawczych, charakteryzują się innowacyjnymi rozwiązaniami technologicznymi w odniesieniu zarówno do bryły, struktury wyposażenia budynków związanego z ich ustrojem. W szczególności należą do nich: izolacje transparentne; tzw. „myślące okna” z pokryciami o niskiej emisyjności i z regulowanym dopływem promieniowania słonecznego do wnętrza pomieszczeń, systemy wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła; systemy grzewcze z pompą ciepła, wykorzystującą jako dolne źródło ciepła energię zawartą w środowisku naturalnym oraz zmagazynowaną energię promieniowania słonecznego; pasywne systemy słoneczne pochłaniające, magazynujące i rozprowadzające energię promieniowania słonecznego oraz aktywne systemy słoneczne w postaci kolektorów cieczowych i ogniw fotowoltaicznych. Działający w sposób ciągły w budynkach monitoring funkcjonowania instalacji i systemów, zużycia energii, parametrów klimatu wewnętrznego, umożliwia konfrontację wyników badań teoretycznych i symulacji numerycznych z rzeczywistym „zachowaniem się” budynku i stanem jego klimatu wewnętrznego. Wydaje się wskazane, tak jak to ma miejsce w innych państwach, ustanowienie krajowych programów przedsięwzięć badawczo-realizacyjnych. Programy te umożliwią dokonanie właściwych wyborów rozwiązań technologicznych, sposobów pozyskiwania i konwersji energii oraz surowców w procesie zrównoważonego rozwoju budownictwa ukierunkowanego ekologicznie.

STOCHASTYCZNE MODELE ZJAWISK W PRZYRODOZNAWSTWIE I TECHNICIE

Kazimierz Sobczyk

1 Wstęp

1.1 Zjawiska losowe: ich natura, modelowanie i symulacja

Od dawna oczywisty jest fakt, iż rozpoznawanie i ilościowe charakteryzowanie zjawisk otaczającego nas świata (zjawisk obserwowanych w przyrodzie, technice, ekonomii) nie może być pełne (a w wielu sytuacjach — jest wprost niemożliwe) bez uwzględnienia roli losowości. Istota losowości była i ciągle jest przedmiotem poważnego zainteresowania filozofii i metodologii nauki. Nie jest bowiem całkowicie oczywiste jaki rodzaj niepewności czy rozmytej, niepełnej informacji o zjawisku należy uznać za losowość. Czy losowość rozpadu pierwiastka promieniotwórczego, uważana za istotę tego procesu, jest tego samego rodzaju co losowość falowania morskiego? Niezależnie od trudności w rygorystycznym ustaleniu przyczyn i zakresu „funkcjonowania” przypadku, nauka wybrała podejście pragmatyczne; uznała, iż mimo że zjawiska te są losowe, to należy starać się rozpoznawać tkwiące w nich regularności, matematycznie je opisywać i ilościowo analizować. Około 200 lat temu C.F. Gauss (1777–1855) badał (probabilistyczne) prawa błędów pomiarowych i zaproponował sposoby ich szacowania. Nieco później L. Boltzmann (1866 r.) podał statystyczną interpretację jednego z podstawowych twierdzeń fizyki — drugiej zasady termodynamiki, wprowadzając pojęcie entropii zdefiniowanej w terminach prawdopodobieństwa. Później, na początku XX wieku, fizyka doznała prawdziwego metodologicznego „wstrząsu” w postaci mechaniki statystycznej i rozkładów Gibbsa (1902 r.), probabilistycznego modelu ruchów Browna (Einstein–Smoluchowski, 1905–1906 r.) i równania Langevina (1908 r.) zawierającego szum losowy i będącego pierwowzorem całej dzisiejszej dynamiki stochastycznej.

Wymienione wyżej idee i konkretne poszczególne osiągnięcia badawcze stawały wyzwania przed matematyką. Co należy rozumieć przez „wyjaśnianie zjawisk” lub „przewidywanie” ich przebiegu, gdy towarzyszy im niepewność, niepełna określoność, lub krótko” losowość? Z pomocą przyszła teoria prawdopodobieństwa (Kołmogorow, 1933 r.) nie tylko ujmująca losowość w terminach zdarzeń, prawdopodobieństw i wartości średnich, ale definiująca te pojęcia rygorystycznie w języku matematycznej teorii miary. Dzisiaj teoria prawdopodobieństwa — opisująca regularności w zakresie zjawisk losowych (przypadkowych) — jest ogromną i bardzo żywą dziedziną matematyki bardzo ściśle związaną z różnorodnymi zastosowaniami. Dostarcza ona metod do badania zjawisk losowych zmieniających się w czasie (teoria procesów stochastycznych) i w przestrzeni (teoria pól losowych i geometria stochastyczna), a także wskazuje jak należy wydobywać i analizować informacje zawarte w danych liczbowych, pochodzących z obserwacji i badań empirycznych (statystyka matematyczna).

Ważny problem związany z rozpoznawaniem i analizą losowości zjawisk rzeczywistych dotyczy komputerowego generowania losowości i „imitowania” (symulacji) modeli probabilistycznych. Możliwość taką dają generatory liczb losowych, tj. mówiąc w uproszczeniu — różne spo-

soby wytwarzania ciągów liczb, których pojawienie się w danym ciągu nie może być z pewnością przewidziane, ani z góry określone. Metody konstruowania takich ciągów są bardzo różne. Historycznie pierwszymi źródłami liczb losowych były tzw. tablice liczb losowych, sporządzane na podstawie danych ze spisów powszechnych. Ciągi losowe można otrzymywać na przykład przy pomocy „elektrycznej ruletki”. Można też wytwarzać ciągi liczb losowych w drodze pomiarów parametrów wybranego procesu fizycznego charakteryzującego się dużą losowością. Dysponując ciągiem liczb losowych, odpowiadających określonemu rozkładowi prawdopodobieństwa, można następnie komputerowo symulować rzeczywiste procesy losowe w modelach, w których ów rozkład prawdopodobieństwa został hipotetycznie wprowadzony. Obecnie metody symulacyjne są niezwykle przydatne w modelowaniu skomplikowanych zjawisk losowych.

1.2 Doświadczalnictwo: analiza danych i wnioskowanie statystyczne

Aby modele zjawisk losowych proponowane (i teoretycznie analizowane) przez teorię prawdopodobieństwa powiązać z rzeczywistością, konieczne są dane liczbowe charakteryzujące istotne cechy badanego zjawiska. Obserwacja zjawiska i rejestrowanie liczbowych charakterystyk jego cech lub zbieranie informacji w drodze odpowiednio zaplanowanego eksperymentu oraz analiza danych i wnioskowanie statystyczne służą temu celowi i stanowią przedmiot statystyki.

Biorąc pod uwagę fakt, iż zawsze należy liczyć się z losowymi błędami pomiarów oraz z tym, iż zwykle nie jesteśmy w stanie zbadać całej populacji badanej cechy, lecz tylko pewną jej część (próbę, ang. sample), która powinna być wybrana losowo — aby była reprezentatywna, to dochodzimy do wniosku, iż statystyka powinna być nieodzownym narzędziem w pracy doświadczalnej. Planowanie eksperymentu jest bardzo często rozdziałem w dobrych podręcznikach statystyki. Dane gromadzone podczas eksperymentu muszą być takie, aby pozwalały na racjonalną interpretację materiału statystycznego; nade wszystko muszą jak najlepiej (optymalnie) odzwierciedlać własności całej populacji badanych przedmiotów. Jest to szczególnie konieczne, jeśli wyniki eksperymentu mają służyć ustaleniu poważnej hipotezy naukowej czy prawa empirycznego. Statystyka dostarcza metod optymalnego wyboru próby statystycznej, a przy estymacji nawet najprostszych charakterystyk statystycznych, jak wartość średnia, czy wariancja wskazuje jak należy konstruować właściwe estymatory. Oczywiście, w sytuacjach, kiedy mamy do czynienia ze zjawiskiem/procesem o wysokim stopniu losowości „wewnętrznej”, wyniki pomiarów są z istoty swej losowe i metody statystyki matematycznej stanowią integralną część całego procesu rozpoznawania i modelowania zjawiska.

Należy podkreślić, iż statystyka zwykle kojarzy się z metodami opracowania danych dotyczących populacji, których badane cechy są charakteryzowane przez liczby rzeczywiste. Obecnie, przedmiotem badań są zjawiska i struktury stochastyczne opisywane przez pola losowe (skalarnie, wektorowe i tensorowe) czy też przez różne obiekty geometrii stochastycznej (np. losowa mikrostruktura materiałów). Gromadzenie danych empirycznych o tego rodzaju zjawiskach i strukturach oraz wnioskowanie statystyczne dotyczące nawet najprostszych charakterystyk statystycznych wymaga w takich sytuacjach metod, w których statystyka związana jest ściśle ze złożonością geometryczną. Metody takie są obecnie przedmiotem intensywnych badań (por. [14]).

„Świat” modeli probabilistycznych/stochastycznych jest nadzwyczaj rozległy; poza czysto teoretycznymi modelami samej szeroko rozumianej teorii prawdopodobieństwa, w ostatnich dziesięcioleciach nastąpił bardzo intensywny rozwój analizy stochastycznej nie tylko w fizyce i me-

chanice (gdzie modele i metody matematyczne zawsze odgrywały rolę podstawową), ale także w takich dziedzinach jak biologia, geologia, inżynieria środowiska, a także ekonomia i finanse. Pozostała część tego eseju będzie poświęcona modelom stochastycznym opisującym dynamikę układów fizycznych i technicznych, a także — pewne zjawiska przyrodnicze i odgrywających dzisiaj doniosłą rolę w różnych zastosowaniach. Jest to też problematyka bezpośrednio związana z pracą badawczą autora.

2 Stochastyczne układy dynamiczne: podstawowe modele i zastosowania

2.1 Dynamika stochastyczna układów technicznych

Realne układy fizyczne, w szczególności współczesne konstrukcje mechaniczne narażone są na działanie czynników, których przebieg w czasie jest nie tylko zmienny, ale także bardzo nieregularny i przypadkowy. W rezultacie takich wymuszeń, dynamika układu nie może być opisana i analizowana w sposób tradycyjny — przy użyciu metod deterministycznych. W ostatnich dekadach minionego wieku modele i metody stochastyczne dla układów dynamicznych zostały bardzo poważnie rozwinięte. Rezultaty te stanowią treść dynamiki stochastycznej — szerokiej dziedziny nauki badającej układy dynamiczne różnej fizycznej natury w obecności wymuszeń losowych.

W zakresie nauk technicznych dynamika stochastyczna, i w szczególności analiza drgań stochastycznych układów mechanicznych, jest dzisiaj jednym z najszybciej rozwijających się kierunków badań. Wynika to z jej ważności dla oceny niezawodności coraz to bardziej skomplikowanych konstrukcji inżynierskich, które narażone są na różne losowe oddziaływania zewnętrzne i parametryczne. Jako przykłady można wskazać: reakcję budowli na wymuszenia sejsmiczne, dynamikę morskiej platformy wiertniczej poddanej skomplikowanemu działaniu fal morskich i wiatru, drgania pojazdu drogowego wymuszane nierównościami realnych dróg itp. Także fizyka statystyczna zajmuje się obecnie dynamiką złożonych układów z wewnętrznymi i zewnętrznymi szumami losowymi.

Matematycznym modelem bardzo szerokiej klasy układów przyrodniczych i technicznych poddanych zmiennym w czasie wymuszeniom losowym jest następujący układ równań stochastycznych postaci

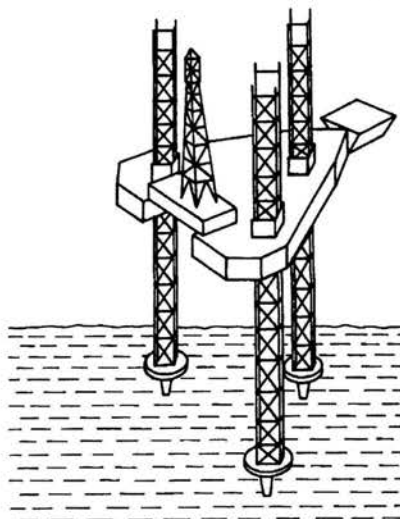
$$\frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, t) + \mathbf{G}(\mathbf{X}, t) \boldsymbol{\eta}(t, \gamma), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0(\gamma), \quad (1)$$

gdzie $\mathbf{X}(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)]$ charakteryzuje stan układu w chwili t , $\mathbf{F}(\mathbf{X}, t)$ opisuje regularną składową ruchu, zaś $\mathbf{G}(\mathbf{X}, t) \boldsymbol{\eta}(t, \gamma)$ modeluje fluktuacje losowe (z intensywnością zależną, w ogólności, od stanu układu); $\boldsymbol{\eta}(t, \gamma)$ jest odpowiednim procesem stochastycznym wektorowym charakteryzującym losowe oddziaływania zewnętrzne lub wewnętrzne. Symbol γ wskazuje tutaj, iż $\boldsymbol{\eta}$ jest funkcją losową czasu; γ jest elementem przestrzeni zdarzeń elementarnych Γ , na podzbiorach której określone jest prawdopodobieństwo P . Dla każdego $\gamma \in \Gamma$, $\boldsymbol{\eta}$ jest zwykłą funkcją czasu — realizacją procesu stochastycznego $\boldsymbol{\eta}(t, \gamma)$.

W ogólności, problem dynamiki stochastycznej polega na sformułowaniu równań dynamiki typu (1) właściwych dla rozważnego zjawiska, „dobranu” odpowiedniego procesu stochastycz-

nego $\eta(t, \gamma)$, charakteryzującego wymuszenia losowe (i estymacji jego charakterystyk na podstawie danych empirycznych) oraz skonstruowaniu metody rozwiązywania otrzymanego układu stochastycznych równań różniczkowych (tj. efektywnej metody charakteryzacji probabilistycznych własności procesu $\mathbf{X}(t)$). Mając charakterystyki reakcji układu (np. wartość średnią, wariancję, rozkłady prawdopodobieństwa procesu $\mathbf{X}(t)$) można następnie przystąpić do oceny niezawodności układu i — co jest zwykle celem ostatecznym — wykorzystania otrzymanych wyników do celów projektowania. Każde z wymienionych wyżej zadań stanowi poważny problem badawczy. Na przykład, w przypadku reakcji konstrukcji na wymuszenie sejsmiczne matematyczne modele wymuszenia mogą uwzględniać różne aspekty tego skomplikowanego i niestacjonarnego procesu losowego. Podobnie, równania ruchu (modele reakcji konstrukcji) mogą uwzględniać nieliniowość oddziaływań, różne składowe przemieszczeń i ich przestrzenne korelacje itp.

Nowe i trudne problemy występują, gdy przedmiotem zainteresowania jest dynamika platformy wiertniczej, poddanej skomplikowanej „kombinacji” obciążeń wiatrowych i falowych. Charakterystyka takich obciążeń wymaga połączenia nieliniowej dynamiki płynów z teorią procesów stochastycznych. Scharakteryzowane w taki sposób wymuszenie włącza się następnie do właściwie sformułowanego i obliczeniowo efektywnego modelu dynamiki (1). Wyobraźmy sobie klasyczną morską platformę wiertniczą typu płaszczowego (ang. jacket-type) — por. Rys. 1.



Rys. 1. Platforma morska typu płaszczowego

W analizie dużych platform typu płaszczowego nieliniowości są generowane przez *hydrodynamiczne siły wleczenia* (ang. *viscous drag forces*) wywołane lepkością i przez oddziaływania ciecż–konstrukcja. Czasem należy także uwzględnić nieliniowość spowodowaną zachowaniem się fundamentu platformy na dnie morskim. Przy matematycznym modelowaniu konstrukcji platformy przyjmuje się zazwyczaj, że elementy konstrukcji są sprężyste i wprowadza się odpowiednią dyskretyzację. Przy takim sformułowaniu siły są przykładane do węzłów konstrukcji, a równa-

nia, którym układ podlega, opisują reakcję konstrukcji jako funkcję czasu w ustalonych punktach przestrzeni. Model matematyczny konstrukcji platformy ma więc postać

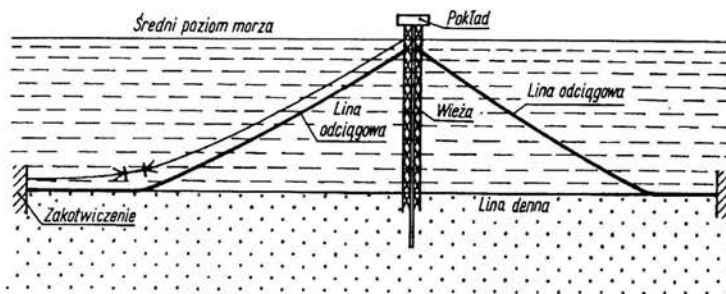
$$M\ddot{Y}(t) + G(Y, \dot{Y}) = f(t, \gamma), \quad (2)$$

gdzie M jest macierzą mas, G — odpowiednią nieliniową funkcją wektorową, natomiast $f(t, \gamma)$ jest procesem stochastycznym opisującym siły działające na konstrukcję (i związanym z własnościami fal morskich równaniem Morisona). W analizie konstrukcji platformy często przyjmuje się zlinearyzowane relacje w samej konstrukcji, natomiast nieliniowość jest wprowadzana przez siłę $f(t, \gamma)$ pochodzącą od fal (por. [10]). W każdym przypadku mamy do czynienia z dość skomplikowanymi równaniami różniczkowymi, które w znacznej części trzeba analizować numerycznie.

Platformy morskie zamocowane na stałe w dnie są bardzo ciężkie, trudne do instalowania i nieekonomiczne. Dlatego coraz większe znaczenie mają konstrukcje nowego typu, mianowicie — platformy morskie *poddające się, współfaluujące* (ang. *compliant*). Konstrukcjami tego typu są m.in. *platformy z odciągami* (ang. *tension-leg platforms* lub *guyed towers*). Podstawową ich cechą jest fakt, że bardziej poddają się one falom. Dlatego mówimy o nich jako o platformach *poddających się*.

Nieliniowe modele platform z odciągami są przedmiotem wielu opracowań. Platforma z odciągami jest smukłą wieżą o stałym przekroju, spoczywającą na elastycznym fundamencie i utrzymywaną pionowo przez liny odciągowe, przymocowane blisko wierzchołka — Rys. 2.

Każda z lin odciągowych ma wiele części składowych. W przeciętnych warunkach atmosferycznych wieża nie porusza się znacząco, lecz w czasie sztormów obciążenia wzrastają sprawiając, że układ staje się „miękki” i może absorbować energię fal. Nieliniowa sztywność jest generowana przez liny odciągowe jako wynik nieliniowości geometrycznej, zależności obciążenia od położenia itp. Wieża platformy jest modelowana jako sztywna, smukła kolumna umocowana przegubowo przy podstawie. Przyjmuje się, że liny odciągowe są rozmieszczone symetrycznie na obwodzie. Równanie różniczkowe — stanowiące przypadek szczególny układu równań (1) — opisujące ruch (dla kąta $\theta = \theta(t)$, tzn. kąta, który tworzy wieża z kierunkiem pionowym) otrzymuje się przez uwzględnienie momentów wszystkich sił względem umocowania u podstawy. Przy pewnych uproszczeniach, równanie to przyjmuje postać równania Duffinga z losowym członem wymuszającym, który opisuje obciążenie przez fale morskie. Szczegółowa metodyka budowania



Rys. 2. Platforma morska z odciągami

równań tego rodzaju konstrukcji i ich rozwiązywania przedstawiona jest w monografii autora [10] oraz w cytowanej w niej literaturze.

2.2 Dynamika stochastyczna układów z degradacją

Zmienne w czasie obciążenia (w tym — obciążenia losowe) powodują zmienność naprężeń i, w rezultacie, nieodwracalne zmiany w strukturze materiału i — co za tym idzie — w parametrach rozważanych układów technicznych. Te zmiany, nazywane zwykle degradacją (lub deterioracją), manifestują się w obniżaniu zdolności układu do przenoszenia „planowanych” obciążeń. W przypadku układów drgających jest to nade wszystko degradacja sztywności elementów konstrukcji powodowana akumulacją zniszczenia zmęczeniowego (którą również należy traktować jako proces losowy w czasie). Mimo, iż drgania układów mechanicznych i proces zmęczenia występujący w trakcie drgań są ze sobą związane, to jednak tradycyjna analiza drgań układów technicznych sprzężenia tego nie uwzględnia; koncentruje się ona na charakteryzowaniu reakcji układów na dane obciążenia, zakładając, iż ich parametry są znane i niezmienne.

Jest oczywiste, że bardziej zadowalający model powinien uwzględniać jednoczesną dynamikę układu oraz zachodzącą w niej degradację. W ostatnich latach problem sprzężonej analizy drgań stochastycznych i degradacji zachodzącej w czasie drgań (i na skutek tych drgań) był przedmiotem zainteresowań badawczych autora i współpracowników (por. [13]). Podano ogólny formalizm sprzężonego opisu problemów dynamiki stochastycznej i degradacji dla różnych mechanizmów deterioracji własności układu oraz zaproponowano efektywne metody analizy takich problemów. Szczególną uwagę skoncentrowano na łącznej analizie drgań stochastycznych i degradacji sztywności powodowanej wzrostem pęknięcia zmęczeniowego. W analizie tej współczynnik sztywności (występujący w równaniu drgań) zależy od wzrastającego pęknięcia, opisanego dodatkowym równaniem.

Ogólnie, sprzężony problem reakcji i degradacji nieliniowego układu mechanicznego z losowym obciążeniem może być sformułowany w postaci następującego układu równań stochastycznych:

$$\begin{aligned} \ddot{Y}(t) + F[Y(t), \dot{Y}(t), D(t)] &= X(t, \gamma), \\ \dot{D}(t) &= Q[D(t), Y(t), \dot{Y}(t)], \\ Y(t_0) &= Y_0, \quad \dot{Y}(t_0) = Y_{1,0}, \quad D(t_0) = D_0, \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie $Y(t)$ jest nieznanym procesem charakteryzującym reakcję (przemieszczenie) układu, $D(t)$ charakteryzuje proces degradacji, $F[y, \dot{y}, d]$ jest daną funkcją opisującą związek między przemieszczeniem, pochodną przemieszczenia i degradacją, $X(t, \gamma)$ jest procesem stochastycznym opisującym losowe wymuszenie, zaś $Q[d, y, \dot{y}]$ jest odpowiednią funkcją charakteryzującą zależność między zmianą degradacji i pozostałymi zmiennymi (tj. $D(t)$, $Y(t)$ i $\dot{Y}(t)$); jej matematyczna postać jest określana na podstawie danych empirycznych lub jest wyprowadzana z analizy fizyki procesu. W powyższym równaniu prędkość degradacji $\dot{D}(t)$ może zależeć od aktualnych wartości $Y(t)$, $\dot{Y}(t)$, ale może też zależeć od pewnych funkcjonatów $Y(t)$ i $\dot{Y}(t)$, na przykład, od całki procesu $Y(t)$ w przedziale $[0, t]$. Jeżeli $D(t)$ jest degradacją zmęczeniową to $D(t)$ jest interpretowane jako „unormowana” długość pęknięcia zmęczeniowego i właściwym równaniem ewolucji

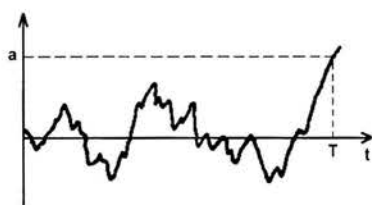
dla $D(t)$ jest, np. równanie Parysa, znane w mechanice zmęczenia; równanie to zawiera wielkość $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$, tj. zakres naprężenia — jest ona związana z przyrostem przemieszczenia $Y_{\max} - Y_{\min}$.

Model matematyczny w postaci równań sprzężonych (3) pozwala uwzględnić efekt degradacji zachodzącej w układzie na proces drgań oraz na jednoczesną estymację wielkości akumulowanej degradacji przy aktualnych wartościach przemieszczeń i naprężeń.

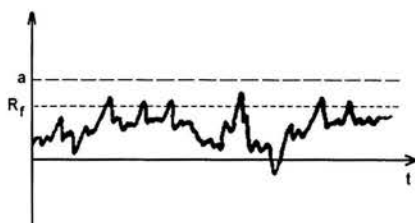
2.3 Ocena niezawodności; zniszczenie zmęczeniowe

Następne, w sposób naturalny wyłaniające się problemy związane z drganiami stochastycznymi, dotyczą skutków, jakie one wywołują. W istocie jest to problem oceny niezawodności układów dynamicznych poddanych różnym obciążeniom losowym. Taka ocena jest ostatecznym celem analizy dynamicznej i charakteryzowania reakcji układu; w szczególności — wyznaczania charakterystyk probabilistycznych przemieszczeń i naprężeń konstrukcji inżynierskich. Niech $Y(t)$, jak wyżej, oznacza stochastyczną reakcję układu (przemieszczenie, naprężenie itp.) w ustalonym punkcie krytycznym. Istotne jest pytanie: jak wykorzystać informacje o procesie $Y(t)$, otrzymane z analizy odpowiednich równań stochastycznych postaci (1), w badaniu uszkodzeń i w ocenie trwałości (niezawodności) układów technicznych?

Odpowiedź na powyższe pytanie nie jest prosta, a nawet nie zawsze możliwa. W celu uzyskania oszacowań trwałości (lub czasu życia) konstrukcji należy przede wszystkim uwzględnić (z badać) różne możliwe mechanizmy uszkodzeń mogących występować w stochastycznym układzie dynamicznym — w szczególności, w konstrukcji poddanej skomplikowanym obciążeniom losowym. Dwa takie mechanizmy są niewątpliwie podstawowe. Pierwszy mechanizm uszkodzeń (lub zniszczenia) polega na tym, że uszkodzenie układu występuje wtedy, gdy reakcja $Y(t)$ osiąga po raz pierwszy pewien określony, krytyczny górny (np. a) lub dolny (np. b) poziom. Uszkodzenia występujące przy zajściu tego zdarzenia są *uszkodzeniami katastroficznymi* (lub uszkodzeniami pierwszego przejścia (ang. first excursion failures) — por. Rys. 3. Druga możliwość jest następująca: reakcja układu $Y(t)$ nie przyjmuje dużych (katastroficznymi) wartości, doznaje jednak wielu nieznacznych wyjść poza pewną granicę (np. granicę wytrzymałości zmęczeniowej) i wobec tego zniszczenie zachodzące w układzie akumuluje się; całkowite zniszczenie następuje wtedy, gdy nagromadzone uszkodzenie osiąga pewną krytyczną wartość. Ten rodzaj zniszczenia znany jest pod nazwą *zniszczenia zmęczeniowego* (por. Rys. 4).



Rys. 3. Ilustracja uszkodzenia katastroficznego: przekroczenie przez reakcję (przemieszczenie, naprężenie itp.) stanu niebezpiecznego



Rys. 4. Ilustracja nagromadzania się uszkodzeń zmęczeniowych: R_f — tzw. granica wytrzymałości zmęczeniowej

W ocenie niezawodności przy uszkodzeniach katastroficznych problem polega na scharakteryzowaniu czasu pierwszego przejścia procesu $Y(t)$ przez ustalony poziom krytyczny, tj. na wyznaczeniu chwili $t = T$, w której proces $Y(t)$ po raz pierwszy osiąga krytyczny poziom y^* . Problemy związane z wyznaczaniem charakterystyk probabilistycznych czasu T (który jest zmienną losową) były rozważane w matematycznej teorii procesów stochastycznych i w zastosowaniach. Efektywne rozwiązania mogą być jednak otrzymane tylko dla pewnych specjalnych klas procesów $Y(t)$; na przykład dla dyfuzyjnych procesów Markowa, tj. procesów, w których „przyszłość” zależy tylko od stanu obecnego, a nie zależy od „przeszłości”. Możliwe są też rozwiązania przybliżone przy określonych hipotezach (por. [5]).

Zniszczenie konstrukcji układów mechanicznych pod wpływem drgań stochastycznych przyjmuje najczęściej formę zniszczenia zmęczeniowego, powstającego na skutek długotrwałego oddziaływania naprężenia o charakterze pulsującym. Fizyczne zjawiska leżące u podstaw zniszczenia zmęczeniowego są bardzo złożone i wiążą się z lokalnym uplastycznieniem materiału będącym wynikiem dyslokacji (w sieci atomowej) i lokalnych koncentracji naprężeń. Pod wpływem obciążeń zmiennych w czasie (np. cyklicznych) następuje przemieszczanie się dyslokacji, powstają mikropęknięcia, które zwiększają się i łączą tworząc duże pęknięcia (szczeliny). Owe pęknięcia i ich wzrost uważane są za główne przyczyny akumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Tradycyjnie podstawowe informacje o tym rodzaju zniszczenia czerpane są z danych doświadczalnych, przeprowadzanych w laboratoriach przy cyklicznym obciążaniu próbek metalowych. W takim przypadku istnieje relacja (prawo empiryczne) między amplitudą naprężenia (S) i liczbą cykli (N) powodujących zniszczenie; jest to tzw. krzywa $S-N$ (lub krzywa Wohlera) określana zależnością: $NS^b = c$, gdzie b i c są stałymi dodatnimi charakteryzującymi materiał. Mimo, iż krzywa $S-N$ jest wygodną hipotezą inżynierską, to nie może stanowić w żadnej mierze zadowalającego modelu zniszczenia zmęczeniowego — zjawiska skomplikowanego i w istocie swej stochastycznego.

W ostatnim ćwierćwieczu podjęte zostały próby (również w IPPT PAN) metodologicznie bardziej zadowalającego opisu zniszczenia zmęczeniowego. Mówiąc ogólnie, oparte jest ono na traktowaniu elementu konstrukcyjnego (czy próbki materiału), w którym zachodzi niszczenie zmęczeniowe (np. na skutek obciążeń losowych) jako pewnego układu, którego stany w różnych chwilach czasu są opisane przez proces stochastyczny. Owe zmęczeniowe stany elementu konstrukcji mogą być mierzone i interpretowane w różny sposób. Mogą być, na przykład, wyrażane poprzez długość szczelin (pęknięć), rys i innych defektów rozwijających się w materiale. Wzrost pęknięcia i jego relacja z generowanymi w materiale naprężeniami jest przedmiotem proponowanych modeli stochastycznych. Systematyczną prezentację takich modeli zawiera monografia [12]. Intencją autorów było przedstawienie najważniejszych wyników i wskazanie możliwych kierunków dalszych badań, wraz z nadzieją, iż książka będzie miała także inspirujący wpływ na rozwój nowego typu doświadczeń zmęczeniowych — planowanych i przeprowadzanych zgodnie z losową naturą zjawiska.

3 Przestrzenne procesy losowe: ich modele i prognoza

W tej części rozdziału chcemy skoncentrować uwagę na zjawiskach losowych, których natura i aplikacyjna doniosłość wykraczają poza zakres szeroko rozumianych nauk technicznych. Mamy tu na myśli takie procesy jak propagacja fal (różnej fizycznej natury) w ośrodkach o skompliko-

wanej i stochastycznej strukturze przestrzennej, transport zanieczyszczeń w otaczającym nas środowisku (w gruncie, wodzie, skałach itp.) czy wreszcie przepływy turbulენტne (burzliwe) cieczy i gazów, występujące zarówno w różnych urządzeniach technicznych jak i w atmosferze, rzekach, morzach itp. Wymienione procesy charakteryzują się nie tylko dużą zmiennością i chaotycznością w czasie, ale także w bardzo istotny sposób zależą od przestrzennych własności ośrodków materialnych, w których zachodzą. W ostatnich dziesięcioleciach były one przedmiotem intensywnych badań i ciągle intrygują fizyków, hydrologów, mechaników, meteorologów oraz matematyków zainteresowanych opisem zjawisk rzeczywistych.

3.1 Fale stochastyczne

Zjawisko ruchu falowego — w najprostszych swych formach znane każdemu z własnych obserwacji — odgrywa bardzo istotną rolę w fizyce i w różnych jej zastosowaniach. Jak wiadomo falowy charakter mają takie zjawiska jak: propagacja dźwięku w powietrzu, procesy rozchodzenia się deformacji w ośrodku stałym, rozprzestrzenianie się promieniowania elektromagnetycznego i inne. Samo pojęcie fali nie jest jednak w naukach fizycznych rozumiane jednoznacznie. Przez *falę* rozumie się okresowe zaburzenie ośrodka (fala sinusoidalna), w innych przypadkach — rozprzestrzeniającą się powierzchnię lub po prostu rozwiązanie równania (lub układu równań) różniczkowego hiperbolicznego. Wydaje się, że niezależnie od różnic interpretacyjnych, podstawowe atrybuty ruchu falowego zawarte są w następującym określeniu: fale — to zaburzenia rozprzestrzeniające się w przestrzeni ze skończoną prędkością i przenoszące energię.

Fale opisywane są przez funkcje zmiennej przestrzennej i czasu

$$\psi = f(\mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r} = (x, y, z), \quad (4)$$

gdzie ψ może być wielkością skalarną lub wektorową; w zależności od tego mówimy, że fala jest skalarna lub wektorowa. Ogólnie mówi się, że ψ opisuje *pole falowe*.

Przestrzenny rozkład pola falowego i jego zależność czasowa są określane z jednej strony — przez charakter źródła zaburzeń, z drugiej zaś — przez własności ośrodka, w którym rozprzestrzenia się fala. Bardzo ważny jest przypadek, kiedy kształt pola falowego pozostaje niezmienny w czasie ruchu i kiedy propagujące się zaburzenia mają postać drgań harmonicznycch o pewnej stałej częstotliwości ω . Taki rodzaj fal nazywamy *falami harmonicznymi* (lub monochromatycznymi). Wszystkie wielkości (potencjały), składowe odpowiednich pól wektorowych w fali harmonicznej są harmonicznymi funkcjami czasu.

Wspólną cechą klasycznej analizy fal jest fakt, że przyjęty za podstawę matematyczny model zjawiska (równania Maxwella fal elektromagnetycznych, równania akustyki fal dźwiękowych itp.) jest deterministyczny. Okazuje się jednak, że — podobnie jak w badaniach szeregu innych zjawisk — przyjęcie opisu deterministycznego nie zawsze dobrze odpowiada rzeczywistości. Wskutek istnienia wielu różnorodnych i przypadkowych czynników determinujących realne ruchy falowe (np. turbulencja atmosfery) bardziej adekwatny jest często opis stochastyczny, tj. opis oparty na matematycznym aparacie teorii prawdopodobieństwa.

Stochastyczny charakter rzeczywistych procesów falowych jest przede wszystkim wynikiem niejednorodności i nieoznaczoności struktury większości ośrodków przenoszących fale (czynniki objętościowe) oraz przypadkowych nierówności powierzchni rozdzielających ośrodki o różnych

własnościach (czynniki powierzchniowe). Nieregularność i złożoność własności ośrodków realnych (np. turbulenta atmosfera, nieregularne materiały kompozytowe, grunty — będące przedmiotem mechaniki i geofizyki itp.) prowadzą do stochastycznego opisu ośrodków i do problemów rozprzestrzeniania się fal w ośrodkach stochastycznych. Fakt, iż większość powierzchni rzeczywistych posiada przypadkowo rozłożone nierówności (np. powierzchnia morza, chropowatości powierzchni metalu itp.) prowadzi z kolei do analizy rozpraszania fal na powierzchniach stochastycznych.

Zjawiska związane z rozprzestrzenianiem się fal stochastycznych i metody ich badania są bardzo różnorodne. Zależą one od fizycznej natury rozpatrywanych fal (fale elektromagnetyczne, fale mechaniczne itp.), od rodzaju i opisu niejednorodności ośrodka i powierzchni (rozmiar niejednorodności w porównaniu z długością fali, niejednorodności rozłożone w sposób ciągły, niejednorodności w postaci przypadkowo rozłożonych dyskretnych elementów rozpraszających itp.), od tego jakie informacje o badanym procesie falowym chcemy otrzymać itd. Należy jednak podkreślić, że niezależnie od różnic związanych ze specyfiką konkretnych problemów, podstawowym zjawiskiem jest zjawisko rozpraszania fali. Fale rozproszone nakładają się na falę pierwotną (padającą) i powodują fluktuacje charakterystyk pola sumarycznego (fluktuacje amplitudy, fazy itp.); w rezultacie obserwuje się tłumienie fali (zanikanie amplitudy), jej opóźnienie, depolaryzację, a w przypadku fal wektorowych i szereg innych zjawisk. Dostarczenie informacji o tych zjawiskach jest celem analizy fal w ośrodkach stochastycznych i badania rozpraszania fal na powierzchniach stochastycznych.

Problemy dotyczące propagacji fal w ciągłych ośrodkach stochastycznych są opisywane przez równania różniczkowe cząstkowe z losowymi współczynnikami.

W przypadku propagacji fal elektromagnetycznych i fal sprężystych w ośrodkach stochastycznych równania te są odpowiednio równaniami Maxwella i równaniami teorii sprężystości, w których współczynniki są polami losowymi. Należy jednak podkreślić, że mimo iż równania Maxwella i równania teorii sprężystości są w ogólności dość skomplikowanymi równaniami wektorowymi, to zasadnicze cechy ruchu falowego w ośrodku stochastycznym dla fal elektromagnetycznych, jak i dla fal sprężystych (w tym — fal dźwiękowych w cieczach) można badać na podstawie następującego stochastycznego równania Helmholtza,

$$\nabla^2 \psi + k_o^2 n^2(\mathbf{r}, \gamma) \psi = g(\mathbf{r}), \quad (5)$$

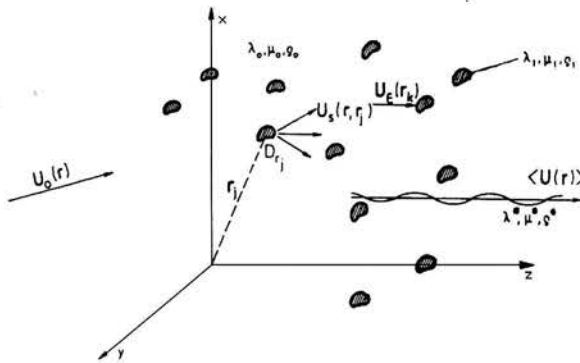
gdzie ∇^2 jest operatorem różniczkowym Laplace'a (tj. sumą pochodnych cząstkowych rzędu drugiego względem zmiennych x, y, z), k_o jest dodatnią liczbą rzeczywistą, $n(\mathbf{r}, \gamma)$ — daną funkcją losową charakteryzującą niejednorodność ośrodka (tzw. współczynnik załamania ośrodka, ang. refractive index), zaś $g(\mathbf{r})$ jest daną funkcją charakteryzującą źródło zaburzeń; w przypadku fal generowanych przez źródło punktowe umieszczone w początku układu współrzędnych $g(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r})$, gdzie $\delta(\mathbf{r})$ jest deltą Diraca. Funkcja losowa $\psi(\mathbf{r}, \gamma)$ ma w zależności od fizycznej natury fali odpowiednią interpretację.

Równania stochastyczne opisujące procesy falowe w ośrodkach z losową niejednorodnością, w tym stochastyczne równanie Helmholtza (5), nastrożają istotne problemy w analizie. Podstawowa trudność wynika stąd, że mimo, iż same równania są liniowe, to jednak są one „stochastycznie nieliniowe”, bowiem ich rozwiązania zależą w sposób nieliniowy od losowych współczynników. Oczywiście, trudności się zwiększają jeśli sam model propagacji fal ma postać nieliniowego równania stochastycznego.

W chwili obecnej istnieje bardzo obszerna literatura dotycząca rozprzestrzeniania się fal w ośrodkach stochastycznych. Jednak ze względu na wspomniane wyżej trudności matematyczne brak jest ogólnego i jednolitego podejścia. Istniejące badania korzystają z metod przybliżonych i oparte są na pewnych założeniach upraszczających i hipotezach fizycznych. Ogromna większość badań poświęconych propagacji fal w ośrodkach stochastycznych dotyczy problemów opisanych przez równania skalarnie i oparta jest na założeniu, że ośrodek stochastyczny jest słabo niejednorodny, tj. fluktuacje jego własności są dostatecznie małe. Założenie to pozwala przedstawiać rozważane procesy falowe w postaci rozwinięcia względem małego parametru i stanowi podstawę metody perturbacyjnej w różnych jej wersjach.

Jedną z najstarszych i najbardziej rozpowszechnionych procedur jest metoda perturbacyjna uwzględniająca tylko efekty rozpraszania jednokrotnego i znana jako przybliżenie Borna. Podejście to cechuje się prostotą, ma jednak dość ograniczony zakres stosowalności, toteż zaproponowane zostały metody kładące nacisk na inne aspekty zagadnienia i pozwalające uwzględniać rozpraszanie wielokrotne. Są to między innymi: metoda optyki geometrycznej, metoda Rytowa, metoda oparta na przybliżeniu równania Helmholtza równaniem parabolicznym (przybliżenie dyfuzyjne), metody oparte na rozwinięciu perturbacyjnym względem dwóch zmiennych, metoda wygładzania oparta na równaniach dla pola średniego i w sposób naturalny prowadząca do wyznaczania efektywnych parametrów rozważanych ośrodków stochastycznych czy wreszcie metody oparte na różniczkowaniu i całkowaniu w przestrzeniach funkcyjnych.

Metody te wraz z analizą różnych problemów fizycznych dla fal skalarnych i wektorowych są przedstawione w monografii autora [9]. W monografii tej omówione są też metody analizy fal w tzw. dyskretnych ośrodkach stochastycznych, tj. w takich, w których niejednorodności są rozłożone przypadkowo i „w sposób dyskretny”. Przykładem jest ośrodek zawierający losowy rozkład elementów, których własności różnią się istotnie od własności ośrodka otaczającego (macierzystego); te elementy mogą być np. pustkami, inkluzjami, porami wypełnionymi cieczą itp. (por. Rys. 5). Należy podkreślić, iż w takich sytuacjach sam opis ośrodka, ze względu na komplikacje geometryczne, nastrocza poważne trudności; zagadnieniom tym poświęcimy trochę uwagi w zakończeniu tego artykułu.



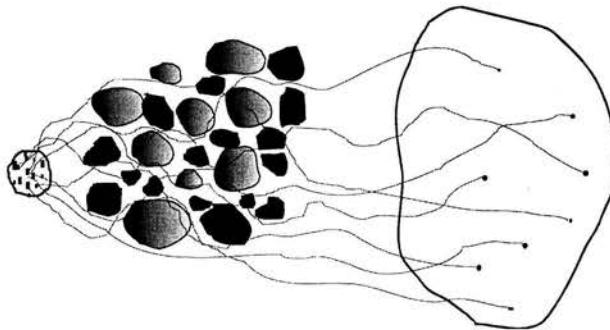
Rys. 5. Fale w dyskretnym ośrodku stochastycznym

3.2 Hydrologia stochastyczna; transport zanieczyszczeń

Szeroka klasa praktycznie ważnych problemów wiąże się z obiegiem wody na Ziemi i z rozprzestrzenianiem się (transportem) różnych szkodliwych substancji w wierzchnich warstwach skorupy ziemskiej (np. w gruntach i skałach). Zrozumienie procesów przepływu i transportu cieczy w różnych geologicznych formacjach i ich ilościowa charakteryzacja stanowi podstawę rozwoju takich dyscyplin jak hydrologia, ochrona środowiska, inżynieria chemiczna i „wzrostowa” (ang. petroleum technology) itp. Zjawiska fizyczne związane z przepływem cieczy i transportem substancji w ośrodkach porowatych są bardzo różnorodne i trudne do zadowalającego opisu i analizy. Trudność ta jest nade wszystko spowodowana komplikacją geometrycznej struktury rzeczywistych ośrodków, takich jak grunty, skały czy podziemne akweny wodne. Transport małych cząstek substancji zanieczyszczającej w takich ośrodkach ma charakter dyspersyjny, przy czym owa dyspersja jest zjawiskiem multi-skalowym, tj. zmienia się w zależności od odległości cząstek od źródła.

Wyobraźmy sobie przepływ cieczy zawierającej pewną ilość „zanieczyszczacza” w ośrodku porowatym, tj. w ośrodku niejednorodnym zbudowanym ze szkieletu i nieregularnie rozłożonych i połączonych por wypełnionych cieczą. Obserwacje i eksperymenty pokazują, iż w czasie przepływu cząstki obcej substancji, rozprzestrzeniając się w przestrzeni, stopniowo obejmują coraz większą jej część (przekraczającą rozmiary, których można by oczekiwać na podstawie oszacowań przepływu uśrednionego). Zjawisko to nosi nazwę dyspersji hydrodynamicznej i odgrywa zasadniczą rolę w modelowaniu i analizie transportu zanieczyszczeń. Dyspersja hydrodynamiczna jest makroskopową manifestacją skomplikowanych ruchów poszczególnych cząstek „zanieczyszczacza” w ośrodku porowatym oraz efektem różnych zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących w porach ośrodka (por. Rys. 6)

Tradycyjna praktyka w modelowaniu transportu cząstek w ośrodkach porowatych wykorzystuje zwykle tzw. równanie adwekcji–dyfuzji, będące w istocie wyrażeniem zasady zachowania masy w czasie ruchu. Ta tradycyjna analiza transportu w ośrodkach porowatych traktuje jednak zjawisko makroskopowej dyspersji cząstek tak jakby to było zjawisko czysto dyfuzyjne (z określonym i stałym współczynnikiem dyfuzji). Takie postępowanie, aczkolwiek akceptowalne w skali laboratoryjnej, przestaje być poprawne w przypadku przepływów w dużej skali przestrzennej.



Rys. 6. Transport zanieczyszczenia w stochastycznym ośrodku porowatym

W ostatnich latach rozpoznano, iż makroskopowa dyspersja nie jest czysto dyfuzyjnym procesem z odpowiednio zwiększonym współczynnikiem dyfuzji. Nowe modele transportu zanieczyszczeń w rzeczywistych ośrodkach porowatych (np. w dużych wodnych akwenach „podpowierzchniowych”) zakładają, że adwekcyjna prędkość przepływu doznaje przestrzennych fluktuacji i opisywana jest przez pole losowe. Podstawowy model dla koncentracji substancji zanieczyszczającej (w każdym punkcie i chwili czasu) ma wtedy postać problemu początkowego dla następującego stochastycznego równania różniczkowego (por. [1]),

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V}(\mathbf{r}, \gamma) \nabla C - \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla C) = 0, \quad C(\mathbf{r}, t_0) = C_0(\mathbf{r}), \quad (6)$$

gdzie $C = C(\mathbf{r}, \gamma)$ jest nieznanym polem losowym charakteryzującym koncentrację substancji, $\mathbf{D} = \{D_{ij}(\mathbf{r})\}$ jest tensorem dyspersyjności, $\mathbf{V}(\mathbf{r}, \gamma) = [V_1(\mathbf{r}, \gamma), V_2(\mathbf{r}, \gamma), V_3(\mathbf{r}, \gamma)]$ jest wektorowym polem losowym charakteryzującym lokalne zmiany pola prędkości cieczy, zaś ∇ jest tzw. operatorem nabla. Chociaż, w ogólności, wielkość D_{ij} jest dodatnią tensorową funkcją $\mathbf{r} = (x, y, z)$, to jest najczęściej traktowana jako wielkość stała, gdyż wpływ przestrzennej zmienności D_{ij} jest niewielki w porównaniu z wpływem przestrzennej zmienności prędkości $\mathbf{V}(\mathbf{r}, \gamma)$. W celu rozwiązania problemu (6) wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi należy najpierw scharakteryzować losowe pole prędkości $\mathbf{V}(\mathbf{r}, \gamma)$. Zwykle zakłada się, iż jest to losowe pole jednorodnie i izotropowe. W konkretnych problemach pole to musi być wyznaczone jako rozwiązanie problemu przepływu (z losowym współczynnikiem przepuszczalności K ośrodka porowatego). Często dokonuje się tego numerycznie i następnie rezultaty podlegają odpowiedniej obróbce.

Istniejące prace dotyczące stochastycznej analizy transportu zanieczyszczeń w znacznym stopniu koncentrują się na wyprowadzaniu (na podstawie równania (6)) równań dla momentów statystycznych koncentracji $C(\mathbf{r}, \gamma)$, w szczególności — równań dla średniej wartości koncentracji. Czynione są wysiłki, aby (przy odpowiednich hipotezach) równaniu dla średniej koncentracji $\langle C(\mathbf{r}, \gamma) \rangle$ nadać postać tzw. równania „efektywnego”, tj. równania mającego postać klasycznego równania adwekcyjno-dyfuzji o stałych (tzw. efektywnych) współczynnikach V_{eff} i D_{eff} . Nie ma jednak wystarczających przyczyn, aby oczekiwać, iż równanie dla średniej koncentracji w sytuacjach rzeczywistych będzie (podobnie jak wyjściowe równanie (6)) równaniem „lokalnym”, tzn. bez wyrazów zawierających całki i charakteryzujących wpływ korelacji przestrzennej pola prędkości. Można nawet powiedzieć, że szczególnie w sytuacjach kiedy przestrzenne i czasowe skale (na których proces transportu jest rozważany) nie są dużo większe od skali przestrzennych fluktuacji pola prędkości V , opis procesu transportu poprzez uśrednione-lokalne równanie jest niewłaściwy. W ostatnich latach pojawiły się prace, w których wyprowadza się równanie różniczkowo-całkowe dla średniej koncentracji zanieczyszczenia (por. [3, 4, 14]) i w ten sposób pokazuje się, że pole średniej koncentracji $\langle C(\mathbf{r}, \gamma) \rangle$ w punkcie \mathbf{r} zależy nie tylko od „lokalnych” wartości, ale także od jej wartości w innych otaczających punktach w zakresie promienia przestrzennej korelacji pola prędkości cieczy.

3.3 Turbulencja

W dyskusji na temat modeli i metod stochastycznych nie sposób pominąć zjawiska niezwykle ważnego i zarazem fascynującego jakim jest turbulencja przepływów cieczy i gazów. Jak wiadomo, wszystkie przepływy płynów dzieli się na dwa rodzaje: przepływy laminarne i turbulentne.

Pierwsze, to przepływy spokojne i stabilne, zaś drugi — to przepływy burzliwe, w których prędkość, ciśnienie, temperatura i inne wielkości hydrodynamiczne bardzo nieregularnie zmieniają się w czasie i w przestrzeni.

Istnienie tych dwóch, zasadniczo różnych, rodzajów ruchu płynu zostało stwierdzone około połowy XIX w. Jednak dopiero w pracach Reynoldsa (1883, 1885) podane zostały warunki, przy których przepływ laminarny przechodzi w przepływ turbulentny. Reynolds wprowadził pewną liczbę, wyrażającą stosunek typowych wartości sił bezwładności i sił lepkości, istniejących wewnątrz płynu i za jej pomocą zaproponował odróżnianie przepływów laminarnych od turbulentnych. Liczba ta określona jest wzorem

$$Re = \frac{vL}{\nu},$$

gdzie v prędkość cieczy w rozpatrywanym przepływie, L — charakterystyczny wymiar geometryczny przepływu (np. średnica rury), zaś ν tzw. współczynnik lepkości kinematycznej; liczba Re nosi nazwę *liczby Reynoldsa*.

Przepływy przy dostatecznie małych liczbach Reynoldsa są przepływami laminarnymi, a przy dostatecznie dużych liczbach Re są przepływami turbulentnymi. Oczywiście krytyczna wartość liczby Reynoldsa, przy której następuje destrukcja przepływu laminarnego, zależy w każdym szczególnym przypadku od własności płynu oraz od struktury geometrycznej przepływu. Na przykład przy przepływie wody przez gładką rurę o przekroju kołowym wartość ta jest rzędu 10^3 . Wartości krytyczne liczby Reynoldsa maleją w obecności ścian chropowatych. Przy dużych wartościach liczby Reynoldsa, znacznie przekraczających jej wartość krytyczną (mówi się wtedy o turbulencji rozwiniętej), przepływ jest bardzo nieregularny i „nieprzewidywalny”.

Praktyczne znaczenie teorii turbulencji jest ogromne, okazuje się bowiem, że większość spotykanych w przyrodzie i w technice przepływów — to przepływy turbulентne. Różnorodne ruchy powietrza w atmosferze ziemskiej, poczynając od zwykłego wiatru a na ogólnych ruchach cyrkulacyjnych kończąc, są ruchami turbulentnymi; z ruchami turbulentnymi mamy do czynienia w praktycznych problemach przepływów w turbinach i w rurach (przewody wodne, gazowe itp.); turbulентne są ruchy w warstwach przygranicznych powstających wokół powierzchni statków powietrznych; wreszcie turbulентny charakter mają często przepływy wody w rzekach, morzach, oceanach itp.

Chociaż nie istnieje jeden matematyczny model, który obejmowałby wszystkie powyższe sytuacje, to ogólnie uważa się, iż ogólne równania hydrodynamiki, tj. równania Naviera–Stokesa powinny być podstawą teoretyczną badań przepływów turbulentnych. Dla przepływów nieściśliwych (gęstość płynu ρ pozostaje stała w czasie ruchu) równania Naviera–Stokesa, zapisane w postaci wektorowej, mają postać

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{X}, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (7)$$

gdzie $\mathbf{v}(r, t)$ i $p(r, t)$ są odpowiednio prędkością i ciśnieniem płynu w punkcie $\mathbf{r} = (x, y, z)$ i w czasie t , ρ jest stałą gęstością, zaś $\mathbf{X}(r, t)$ charakteryzuje siły zewnętrzne oddziałujące na przepływ.

Powyższy nieliniowy układ równań różniczkowych cząstkowych jest uzupełniany przez odpowiednie warunki początkowe i właściwe warunki brzegowe, gdy przepływ jest badany w obsza-

rze ograniczonym. Bez wnikania w szczegóły, powiemy tutaj tylko, iż równania Naviera–Stokesa są skomplikowane i trudne do analitycznego badania. Bardzo trudno jest też „wydobyć” z nich wszystkie te mechanizmy i efekty, które dla zrozumienia zjawiska turbulencji są fundamentalne. Mimo wieloletnich badań, ciągle nie ma jednoznacznej zgody co do prawdziwych fizycznych mechanizmów turbulencji. Uważa się dzisiaj, iż cechą podstawową przepływów przy bardzo dużych liczbach Reynoldsa jest ogromna liczba „dynamicznych skal” ruchu płynu. Te skale (przestrzenne i czasowe) zmieniają się od bardzo dużych, na których energia turbulencji odgrywa rolę wymuszenia do skal mniejszych. Okazuje się, że liczba różnych składowych ruchu (ang. turbulent modes) w przepływie turbulentnym jest rzędu $Re^{9/4}$ w jednostkowej objętości. A zatem, w przepływach o liczbie Reynoldsa rzędu 10^8 (która, jak to wynika z badań, w przypadku przepływów geofizycznych jest liczbą „skromnej” wielkości) liczba owych form ruchu jest rzędu 10^{18} . To wskazuje jak bardzo skomplikowany jest przepływ turbulentny, przy czym komplikacja ta jest jeszcze wzmocniona przez trudność rozdzielenia ruchu w różnych skalach.

Biorąc pod uwagę wyżej naszkicowaną naturę turbulencji nie dziwi nas fakt, iż ciągle brak jest zgody odnośnie do samego rozumienia „rozwiązania” problemu turbulencji. Z jednej strony, inżynierowie są głównie zainteresowani w uśrednionych własnościach skomplikowanych i losowych przepływów, takich np. jak: średnie profile prędkości, średnie ciśnienia przepływu wywierane na ściany obszaru (np. rury) czy też średnie gradienty przepływu. Z drugiej strony, jeśli chcemy rozpoznać bardziej subtelne cechy i mechanizmy przepływu turbulentnego konieczne są informacje o szczegółach ruchów płynu na różnych jego skalach. Na przykład, w przypadku silnych huraganów konieczne jest rozpoznanie szczegółowych cech i detali przestrzennych owych intensywnych ruchów cyrkulacyjnych. Ważne jest więc pytanie: jak opisywać (przy pomocy jakiego matematycznego języka) przepływ turbulentny, aby rozpoznanie jego ważnych immanentnych cech było możliwe?

Jednym z efektywnych nurtów w badaniach turbulencji jest statystyczna teoria turbulencji, wywodząca się ze szkoły rosyjskiej (Obuchow, Kołmogorow, Monin, Jagłom i inni). W teorii tej podstawowe własności hydrodynamiczne ruchu turbulentnego są charakteryzowane przez pola losowe w ścisłym probabilistycznym sensie (por. np. [7]), a równania hydrodynamiki (dla dużych liczb Reynoldsa) rozumie się jako stochastyczne równania różniczkowe dla odpowiednich losowych pól hydrodynamicznych. Ponieważ pola losowe opisujące ruch turbulentny (np. losowe pole prędkości) czynią zadość równaniom hydrodynamiki, to charakterystyki probabilistyczne tych pól (np. wartości średnie, funkcje korelacyjne i momenty statystyczne wyższych rzędów) są związane szeregiem interesujących i praktycznie ważnych zależności. Szczególnie interesujące rezultaty zostały otrzymane przy założeniu, że rozważane losowe pola ruchu turbulentnego są jednorodne i izotropowe (turbulencja izotropowa) oraz lokalnie jednorodne i izotropowe. Z tego nurtu badań wywodzi się sławne prawo skalowania Kołmogorowa, orzekające, iż widmo energii pola prędkości (będące transformatą Fouriera funkcji strukturalnej, tj. wartości średniej iloczynu przyrostów pola) ma, dla określonego zakresu liczb falowych k , uniwersalną postać $E(k) = C|k|^{-5/3}$. Prawo to zostało zadowalająco zweryfikowane w wielu badaniach eksperymentalnych dotyczących turbulentnych przepływów technologicznych. Czy istnieją podobne prawa (skalujące wykładnik w wyrażeniu widma energii) dla turbulencji w atmosferze i oceanach? W ostatnim dwudziestoleciu problem ten zajmował uwagę wielu badaczy. Należy zauważyć, iż oprócz konkretnej postaci zależności widma energii od k , ważne jest też rozpoznanie fizycznych przyczyn takich praw uniwersalnych (por. [6]).

Poza ogólnym podejściem stochastycznym, proponowane są ciągle inne interpretacje i opisy zjawiska turbulencji. Okazuje się, iż przepływom turbulentnym towarzyszą pewne, szczególne zjawiska, np. lepkość wirowa (ang. eddy viscosity), struktury koherentne itd. Badanie tych zjawisk stanowi istotny składnik współczesnej teorii turbulencji. Ważne idee wiążą się z interpretacją przepływu turbulentnego jako nieliniowego układu dynamicznego (nieskończenie-wielowymiarowego) i z istnieniem rozwiązań (ruchów) chaotycznych. W teorii turbulencji ciągle ważne miejsce zajmuje interpretacja powstawania turbulencji podana przez Landaua, zgodnie z którą przepływ staje się turbulentny na skutek powstawania w nim nieskończenie wielu niestabilności (bifurkacji) i generowania w ten sposób „nieporządku” lub losowości.

Nie jest tutaj możliwe ani celowe szersze i bardziej szczegółowe przedstawianie interesujących i intrygujących problemów teorii turbulencji. Bez wątpienia będą one nadal przedmiotem intensywnych badań i wyzwaniem stojącym przed nauką XXI wieku, szczególnie w kontekście związków turbulencji z prognozą pogody i klimatu.

4 Zakończenie

Mamy nadzieję, iż przedstawione w tym artykule modele, metody i interpretacje dadzą Czytelnikowi pogląd na istotę i znaczenie metod stochastycznych w zastosowaniu do badania zjawisk rzeczywistych. Mimo ogromnego zaawansowania tych metod (szczególnie w drugiej połowie XX wieku) w różnych dziedzinach należących do przyrodoznawstwa i techniki bez wątpienia będą one w przyszłości ogarniać nowe obszary badań i udoskonalać swe narzędzia. Więcej, wydaje się, iż wiele wyzwań stojących dzisiaj przed nauką i jej zastosowaniami może być podjętych z szansą sukcesu tylko z pomocą modeli probabilistycznych i analizy stochastycznej (por. [8]). Przytoczymy tutaj trzy takie wyzwania.

4.1 Dynamika informacyjna

Jest oczywiste, iż informacja to dzisiaj pojęcie wręcz wszechogarniające. Trzeba więc umieć informację mierzyć, transformować, kodować itp. Zajmuje się tym teoria informacji zapoczątkowana (w ścisłym znaczeniu — jako nauka) przez C.E. Shannona w 1948 r. Jednakże, mimo, iż teoria informacji jest już dziedziną dość rozwiniętą, to jednak jest zwyczajowo zawężana do specyficznych technicznych systemów informatycznych, zasad efektywnego kodowania i przesyłania informacji itp. Właściwe znaczenie teorii informacji jest jednak znacznie szersze. Jak to już podkreślał dawno w swej książce S. Kullback, teoria informacji jest gałęzią teorii prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Tak więc, aparat teorii informacji powinien być odpowiedni do analizy dowolnego probabilistycznego systemu obserwacji, gdyż zawsze gdy dokonujemy statystycznych obserwacji (oraz planujemy i przeprowadzamy eksperyment) poszukujemy informacji. Pojęcia i metody teorii informacji mogą być też użyte do analizy różnych układów fizycznych i technicznych; jak wiadomo, są one od dawna użyteczne w fizyce, w szczególności — w termodynamice, gdzie związek między informacją o układzie i jego termodynamiczną entropią jest dobrze znany. Jeżeli pojęcia i metody teorii informacji użyjemy do modelowania, estymacji i analizy układów dynamicznych to otrzymamy klasę problemów, dla których naturalna jest nazwa *dynamika informacyjna*. Pytania, które się nasuwają są, na przykład, następujące: jak w języku teorii informacji (i w jej jednostkach

— bitach) scharakteryzować różnicę między wskazaniem modelu dynamicznego i danymi empirycznymi? Jaką ilość informacji generuje badany układ drgający (przy losowym wymuszeniu) w jednostce czasu? Jak zmienia się entropia informacyjna przy przejściu sygnału przez konkretny układ dynamiczny? Wydaje się, iż pytania powyższe i inne podobne są ważne zarówno ze względów teoretycznych, jak i aplikacyjnych i będą zajmowały uwagę badaczy w przyszłości. Szersze przedstawienie tej problematyki znajdzie Czytelnik w artykule [11].

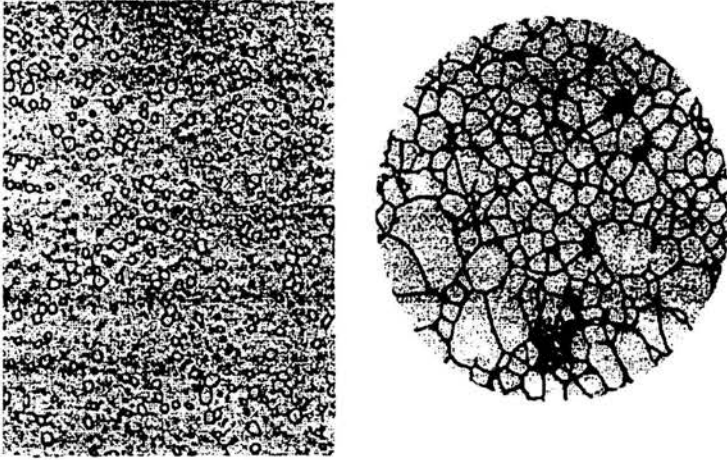
4.2 Prognoza klimatu

Nie ma najmniejszej wątpliwości, iż jednym z naczelnych wyzwań, które stoją przed nauką XXI wieku jest rozpoznanie i matematyczna charakteryzacja dynamiki atmosfery, mórz i oceanów (włączając oddziaływanie z procesami biologicznymi i chemicznymi) w celu uzyskania możliwości niezawodnej prognozy klimatu. Procesy te są wyjątkowo złożone, gdyż zawierają w sobie różnorodne nieliniowe procesy fizyczne, które oddziałują między sobą w bardzo szerokim zakresie skal, od milimetrów do dziesiątek tysięcy kilometrów. Ogólnie rzecz ujmując, problemy tutaj poruszane dotyczą prognozy/predykcji wysoce skomplikowanych dynamicznych układów stochastycznych, opisywanych przez układy nieliniowych stochastycznych równań różniczkowych cząstkowych dla funkcji losowych zależnych od zmiennych przestrzennych i czasu. Równania te są tak skomplikowane, że — jak już wspominaliśmy w kontekście dyskusji problemu turbulencji i równań Naviera–Stokesa — ich efektywna analiza jest związana z bardzo fundamentalnymi trudnościami. Sposobem pokonywania tych trudności jest wprowadzanie hipotez, które pozwalają upraszczać problem matematyczny. To jednak zwykle prowadzi do „zubożenia” fizycznej natury badanych zjawisk i do, mniejszej lub większej, niezgodności rezultatów analizy teoretycznej (i obliczeń) z rzeczywistością.

Istniejące wcześniejsze prace (por. [2]) proponują różne modele uproszczone — w większości prowadzące do równania Langevina dla specyficznych charakterystyk systemu klimatycznego (szczególny przypadek ogólnego układu (1)). Obecne wysiłki dotyczące prognozowania klimatu idą w kierunku wykorzystania komputerów dużej mocy. Mamy tu na myśli modele komputerowe, nazywane ogólnymi modelami cyrkulacyjnymi (ang. general circulation models — GCM's), w których większość charakterystyk atmosfery i oceanów jest modelowana dokładnie, ale szczególnie oddziaływanie z różnymi procesami zachodzącymi w małych skalach (zwykle mniejszych niż kilkaset kilometrów) są uwzględniane przy pomocy parametrów. Aby owa parametryzacja odzwierciedlała możliwie najlepiej fizykę oddziaływań, wykorzystuje się różne teorie szczegółowe, np. statystyczną teorię turbulencji. Oczywiście, ciągle konieczne jest lepsze zrozumienie owych procesów na różnych skalach przestrzennych i ich parametryzacji. To właśnie wydaje się stanowić otwarty i intrygujący problem z pogranicza nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych, procesów stochastycznych i statystyki matematycznej, dynamiki chaosu, teorii informacji itp. (por. np. [6]).

4.3 Modelowanie mikrostruktury materiałów

Obserwacja struktury różnych materiałów konstrukcyjnych oraz ośrodków naturalnych prowadzi do wniosku, iż koncepcja jednorodnego continuum materialnego będącego podstawą klasycznych teorii materiałów (np. teorii sprężystości, plastyczności itp.) jest zbyt wyidealizowana i nie od-



Rys. 7. Przykład mikrostruktury rzeczywistych metali (stal i stop cynkowo-miedziowy)

zwierciedla złożoności i niejednorodności rzeczywistych ośrodków i materiałów. Jako przykłady mogą służyć takie ośrodki jak: grunty, skały, metale polikrystaliczne, betony, materiały kompozytowe, czy wreszcie — ośrodki porowate czy ciała stałe z różnymi defektami wewnętrznymi (por. Rys. 7). Chociaż natura niejednorodności w każdym z powyższych przykładów jest różna, to jednak mają one jedną wspólną cechę — istnienie mikrostruktury, tj. pewnej charakterystycznej niejednorodnej struktury materialnej w skali, która jest mała w porównaniu z makroskopowym wymiarem elementu materialnego (elementu konstrukcji, próbki ośrodka porowatego itp.).

Często zakłada się, iż mikrostruktura jest periodyczna; upraszcza to wyznaczanie własności globalnych. Nie ulega jednak wątpliwości, że mikrostruktura rzeczywistych ośrodków naturalnych i materiałów inżynierskich jest niedeterministyczna; jest przestrzennie skomplikowana i w wysokim stopniu losowa. Ważny dla nauki i zastosowań problem jest następujący: jak charakteryzować matematycznie skomplikowane i losowe mikrostruktury materialne? Z pomocą przychodzi teoria pól losowych, geometria stochastyczna i statystyka geometryczna (przestrzenna). Połączenie tych stosunkowo nowych dziedzin matematyki z nauką o materiałach, mikroskopią materiałową oraz z mechaniką i fizyką stało się od niedawna i pozostanie jeszcze przez wiele lat ważnym wyzwaniem badawczym. Czytelnik zainteresowany tą nową problematyką znajdzie jej zwięzłe przedstawienie w monografii [14].

Bibliografia

1. Dagan G., Neuman S.P. [eds.], *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*, Intern. Hydrology Series, Cambridge Univ. Press, 1997.
2. Hasselmann K., *Stochastic climate models, Part 1 — theory*, Tellus **17** (5), 473–485, 1965.
3. Koch D.L., Brady J.F., *A non-local description of advection–diffusion with application to dispersion in porous media*, J. Fluid Mech., **180**, 387–403, 1989.

4. Kotulski Z., Sobczyk K., *Non-local description of pollution transport in random medium*, Math. Modeling and Sci. Computing, **1**, 1, 142–152, 1993.
5. Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C., *Methods of Structural Safety*, Prentice Hall Inc., N. York, 1986.
6. Majda A.J., *Real world turbulence and modern applied mathematics*, [in:] Mathematics: Frontiers and Perspectives, Arnold V., Atiyah M., Lax P., [eds.], AMS — American Math. Soc., Providence 2000.
7. Monin A.S., Yaglom A.M., *Statistical Fluid Mechanics* (translation from Russian), MIT Press, Cambridge, MA; Vol. I — 1971; Vol. II — 1975.
8. Mumford D., *The dawning of the age of stochasticity*, [in:] Mathematics: Frontiers and Perspectives, Arnold V., Atiyah M., Lax P., [eds.], AMS — American Math. Soc., Providence 2000.
9. Sobczyk K., *Stochastic Wave Propagation*, Elsevier, Amsterdam, 1985.
10. Sobczyk K., *Stochastic Differential Equations with Applications to Physics and Engineering*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1991 (wydanie w j. polskim: Sobczyk K., *Stochastyczne Równania Różniczkowe: Teoria i Zastosowania*, WNT, Warszawa, 1996).
11. Sobczyk K., *Information dynamics: premises, challenges and results*, Mech. Systems and Signal Processing, **15** (3), 475–498, 2001.
12. Sobczyk K., Spencer B.F., *Random Fatigue: From Data to Theory*, Academic Press, Boston, 1992 (wydanie w j. polskim: Sobczyk K., Spencer B.F., *Stochastyczne Modele Zmęczenia Materiałów*, WNT, Warszawa, 1996).
13. Sobczyk K., Trębicki J., *Stochastic dynamics with fatigue-induced stiffness degradation*, Probabilistic Eng. Mechanics, **15**, 1, 91–99, 2000.
14. Sobczyk K., Kirkner D.J., *Stochastic Modeling of Microstructures*, Birkhauser, Boston, 2001.

NIELINIOWE MODELOWANIE MATEMATYCZNE W TECHNICIE I NAUKACH PRZYRODNICZYCH. ZAGADNIENIA CAŁKOWALNOŚCI I SYMETRII

Jan J. Sławianowski

1 Motywacja, charakterystyka zagadnienia i tło historyczne

Tematyka badawcza, o której tu mowa, znajduje się na pograniczu matematyki stosowanej, nauk technicznych oraz fizyki teoretycznej i stosowanej. Pozostaje też w silnym związku z zagadnieniami ekologii i biologii. Ma charakter wybitnie interdyscyplinarny i integrujący. Jest to swego rodzaju znak czasu, gdyż współczesność stawia przed nami konkretne problemy, które mogą być rozwiązane tylko przez współdziałanie dyscyplin naukowych, tradycyjnie uważanych za odrębne, oraz przez wypracowanie wspólnej metodologii. Tej wspólnej metodologii dostarcza modelowanie matematyczne ze szczególnym naciskiem na zagadnienia nieliniowe. Warto podkreślić, że w nauce światowej funkcjonuje od pewnego czasu pojęcie „Nonlinear Science” obejmujące jednocześnie wyrafinowane metody matematyczne (geometria różniczkowa, układy dynamiczne, analiza funkcjonalna, nieliniowe równania różniczkowe i solitony) oraz bardzo praktyczne zastosowania, nawet takie, jak problemy walki z zanieczyszczeniem środowiska i ratowanie równowagi ekologicznej. Jeżeli chodzi o stronę czysto matematyczną, to wspólnym mianownikiem jest silna nieliniowość, wynikająca ze struktury geometrycznej zagadnienia i powiązania z problemami symetrii. Z jednej strony, w zagadnieniach nieliniowych znajomość grupy symetrii modelu lub ekstra nałożony wymóg symetrii na poszukiwane rozwiązania, pomaga dostać jawne wyniki analityczne lub nadaje walor niezawodności procedurom numerycznym. Z drugiej strony, często jest tak, że warunek (skąd by nie pochodził), by dynamika problemu była niezmiennicza względem dostatecznie bogatej grupy symetrii, w sposób nieunikniony prowadzi do silnej nieliniowości tego modelu. Na jedną okoliczność trzeba zwrócić uwagę, gdy mówimy, że współczesna technika i przyrodoznawstwo stoją pod znakiem modelowania matematycznego. Z punktu widzenia dogmatycznie pojmowanej filozofii redukcjonistycznej i skrajnego fizykalizmu można by na pozór takie stwierdzenie uznać za trywialne. Znane są przecież w ogólnym zarysie fundamentalne teorie opisujące oddziaływanie mikroobektów, zatem każde zjawisko zachodzące w złożonym układzie, np. odkształcenie w ciele makroskopowym, proces biologiczny itp., powinno być w zasadzie możliwe do opisanego przez teorię-schemat matematyczny będącą konsekwencją teorii fundamentalnej. Rzecz jednak w tym, że ciała makroskopowe zbudowane są z mnóstwa mikroobektów rzędu liczby Avogadro, więc o faktycznym wyprowadzeniu teorii rządzącej makroukładem z teorii na poziomie elementarnym raczej nie może być mowy. Warto zresztą dodać, że teorie fundamentalne są wciąż niekompletne i borykają się z własnymi trudnościami (klasyczna teoria punktowych cząstek naładowanych we wzajemnym oddziaływaniu z polem elektromagnetycznym, kwantowa teoria pola, itp.). Jedynym rozsądnym wyjściem jest więc, by opierając się na elementach ściśle wyprowadzenia, rozumowaniu jakościowym i zwykłej intuicji, postulować autonomiczne w zasadzie modele układów i zjawisk złożonych. Niezależnie od

stopnia uzasadnienia takich modeli mikro-teorią, ich ostatecznej weryfikacji dostarcza doświadczenie.

Większość zjawisk badanych we współczesnych naukach technicznych i przyrodniczych to zjawiska nieliniowe. Chodzi tu o nieliniowość istotną, zasadniczą, wbudowaną w samą strukturę równań, nie zaś o nieliniowe „poprawki” nałożone na dominujące, liniowe tło problemu. Takie zasadnicze nieliniowości nie pozwalają się skutecznie ująć metodami perturbacyjnymi. Inna sprawa, że nawet w zagadnieniach „prawie liniowych” rachunek zaburzeń potrafi być zawodnym przyjacielem, jeśli zapomni się o tym, że bardzo często otrzymane szeregi funkcyjne są szeregami asymptotycznymi, którym nie przysługuje walor dosłownie rozumianej zbieżności. Istotna nieliniowość zdaje sprawę z fizycznych mechanizmów samooddziaływania, wiąże się to z problemami symetrii i wymaga szczególnych metod matematycznych. Chodzi tu o metody nieperturbacyjne, nie wymagające znajomości żadnego liniowego „tła” ani użycia żadnego małego parametru. Opracowanie takich metod jest niezbędne nie tylko dla uzyskania analitycznych rozwiązań, co nie zawsze jest możliwe, lecz wręcz dla zrozumienia samej struktury zagadnienia. Raz opracowane, na użytek jednego konkretnego problemu, metody te stają się częścią warsztatu badawczego pozwalającego skutecznie traktować całą klasę zagadnień nieliniowych.

Trudno przecenić też znaczenie praktyczne matematycznych modeli nieliniowej dynamiki. Równania typu nieliniowego równania Schrödingera lub nieliniowego Kleina–Gordona (zwłaszcza równania typu sin-Gordon) są używane do opisu tak ważnych zagadnień, jak oddziaływanie wiązki laserowej z materią. Istotnie nieliniowe równania pojawiają się w naturalny sposób w mechanice ciał odkształcalnych z dużymi deformacjami. Dotyczy to polimerów, a także nowych ośrodków otrzymywanych metodami inżynierii materiałowej. Wiąże się to też z nanostrukturami, zjawiskami mezoskali, ośrodkami z mikrostrukturą. Istotnie nieliniowe modele używane są też w ekologii, np. przy analizie problemu równowagi współistniejących gatunków, w biologii i mikrobiologii molekularnej, a nawet w zagadnieniach ochrony środowiska i walki z zanieczyszczeniami.

Istotnie nieliniowe modele w teorii sterowania, oparte na współczesnej geometrii, teorii grup i teorii układów dynamicznych, pozostają w istotnym związku z rozwojem automatyki i robotyki, w tym z badaniami kosmicznymi.

Jednym z istotnych aspektów poznawczego modelowania matematycznego, zwłaszcza nieliniowego, jest wniosek o jedności obrazu świata na poziomie matematyki. Podobne modele matematyczne mogą opisywać dynamikę tak odległych w sensie fizycznym obiektów jak manipulator i łańcuch molekularny.

Do całkiem niedawna fizyka, w tym szeroko rozumiana mechanika, była całkowicie zdominowana przez zagadnienia liniowe. Równania Maxwella opisujące dynamikę pola elektromagnetycznego są, przy zadanych źródłach, liniowe. To samo dotyczy teorii sprężystości dla małych odkształceń. Oczywiście, gdy ma miejsce wzajemne oddziaływanie między polem elektromagnetycznym a źródłami (np. poruszającym się naładowanym elektrycznie ośrodkiem), zagadnienie staje się nieliniowe, ale jest to właściwie nieliniowość typu „zła koniecznego”, będąca małym zaburzeniem dopisanym do równania liniowego. Tego rodzaju nieliniowość badano metodami rachunku zaburzeń. Było to możliwe dzięki temu, że stała sprężenia w oddziaływaniach elektromagnetycznych jest „mała”. W teorii drgań układów dyskretnych również punktem wyjścia jest analiza harmonicznego tła, zaburzonego „małymi” poprawkami anharmonicznymi. Główne problemy istotnie nieliniowe w „tradycyjnej” fizyce i mechanice to dynamika układów punktów

materialnych przyciągających się grawitacyjnie po newtonowsku oraz hydrodynamika. W teorii Newtona dla układu dwóch ciał zagadnienie jest jak wiadomo ściśle rozwiązalne. Nie ma tam jednak, podobnie jak w hydrodynamice, naturalnego liniowego „tła”. Zmatematyzowane (całkowicie lub częściowo) nauki przyrodnicze stoją pod znakiem nieliniowości. Paradoksalnie jednak, na pewien czas właśnie fizyka współczesna nadała ponownie wielką wagę liniowości i utrzymała jej paradygmat. Mowa o mechanice kwantowej, liniowym równaniu Schrödingera i związanej z tą liniowością zasadzie superpozycji. W kwantowej teorii pola, najbardziej fundamentalnej z istniejących obecnie teorii fizycznych, sytuacja pod tym względem jest trochę bardziej skomplikowana. Na poziomie przestrzeni stanów kwantowych teoria ta jest liniowa, ale jej operatorowe sformułowanie, otrzymane w wyniku kwantyzacji odpowiednich równań klasycznej teorii pola (nieliniowych) jest względem tych operatorów nieliniowe, co ma zasadnicze znaczenie w wielu zagadnieniach. W tym sensie nieliniowość wróciła. Inne, mniej tajemnicze źródło dla renesansu nieliniowości, to teoria fal nieliniowych, zapoczątkowana analizą równania Kortwega–de Vriesa i eksplozją problematyki solitonowej. W klasycznej teorii pola, fundamentalna nieliniowość o nieperturbacyjnym charakterze pojawiła się w teorii grawitacji, opartej na równaniach Einsteina i elektrodynamice Borna–Infelda. W mechanice ośrodków ciągłych nieliniowość nabrała szczególnego znaczenia wraz z rozwojem teorii i technologii materiałów sprężystych o dużych odkształceniach. Jak wspomniano, rozwój automatyki zaowocował postępem w nieliniowej teorii sterowania, opartej na metodach geometrycznych. Historycznie ważnym elementem rozwoju badań nieliniowych jest synergenetyka, wyrosła z termodynamiki procesów nieodwracalnych i fizyki złożonych układów otwartych.

2 Zagadnienia nieliniowe w nauce światowej. Stan aktualny

Wspomniane powyżej historyczne etapy rozwoju modeli nieliniowych doprowadziły do obecnego stanu tej dziedziny wiedzy, trudnego do krótkiego opisanego.

W teorii fal nieliniowych, w zagadnieniach solitonowych jednym z głównych narzędzi matematycznych stała się metoda odwrotnego zagadnienia rozpraszania. Ta metoda wraz z innymi technikami badawczymi, jakie na niej wyrosły, odgrywa w teorii fal nieliniowych rolę analogiczną do tej, jaką w zagadnieniach liniowych odgrywa analiza fourierowska. Umożliwiło to uzyskanie ścisłych rozwiązań w postaci analitycznej oraz przeprowadzenie niezwykle wnikliwej analizy jakościowej. Te ścisłe podstawy matematyczne wpłynęły w oczywisty sposób na niezawodność stosowanych w tej dyscyplinie metod numerycznych (dzięki matematycznym dowodom istnienia rozwiązań określonego typu).

Dużą rolę we współczesnej fizyce i mechanice odgrywa teoria układów z kolektywnymi i wewnętrznymi stopniami swobody. Z reguły modele tego typu są zasadniczo nieliniowe i to w charakterystyczny sposób, silnie związany z geometrią. Wyjaśnijmy tu krótko, co rozumiemy przez mody kolektywne. Właśnie w tych zagadnieniach widać całą istotę modelowania matematycznego jako opisu rzeczywistości. Wyobraźmy sobie układ o wielkiej liczbie stopni swobody; dopuszczamy przy tym możliwość nieskończonej przeliczalnej liczby stopni swobody, bądź wręcz kontinuum mechaniczne lub połowe. Dynamika takiego układu z reguły nie poddaje się ścisłej obróbce analitycznej. Zdarza się jednak często, że część zmiennych, charakteryzujących obiekt wyodrębnia się i spełnia w przybliżeniu autonomiczny układ równań. Jeśli zmiennych tych jest niewiele, można

problem badać metodami jakościowej teorii układów dynamicznych. Jeśli, mówiąc nieprecyzyjnie, wszystkie jednocząstkowe zmienne stanu wchodzą „na równych prawach”, „z jednakowym natężeniem” do wspomnianych zmiennych oddzielonych, to te ostatnie nazywamy zmiennymi kolektywnymi. W przypadku zagadnień wielociałowych są one z reguły pewnymi globalnymi, momentowymi charakterystykami obiektu jako całości. I z reguły mają jakiś związek z geometrią zagadnienia. Dynamiki tych modów kolektywnych z reguły nie wyprowadza się wprost z mikro-modelu (praktycznie niewykonalne), lecz uzasadnia się za pomocą heurystycznego, jakościowego rozumowania i postuluje wykorzystując naturalne postulaty symetrii. To zaś z reguły, jak wspomniano, wiąże się z silną nieliniowością. Podobna sytuacja pojawia się w przypadku układów z wewnętrznymi stopniami swobody, jak np. ośrodki spinowe. Teoriogrupowe modele kolektywnych i wewnętrznych stopni swobody są efektywnym narzędziem dla badania ośrodków z mikro-strukturą, zjawisk w mezoskali, nanostruktur. Są też używane jako narzędzie przybliżonej analizy dla zjawisk w rozmaitych skalach fizycznych, jak jądra atomowego, molekuly, makroskopowego obiektu sprężystego, a także obiektów astrofizycznych. Grupy przekształceń, rządzące modami kolektywnymi w realistycznych, faktycznie stosowanych modelach, to z reguły typowe grupy klasyczne jak: grupa ortogonalna, liniowa (model ciała afinicznie sztywnego), rzutowa, konforemna, unitarna.

Innego rodzaju zasadniczą nieliniowością, która zrobiła zawrotną karierę we współczesnej fizyce i mechanice ośrodków ciągłych, nieliniowością także wynikającą z założonych symetrii problemu, jest nieliniowość teorii z cechowaniem (przy nieprzemiennej grupie symetrii). W mechanice ośrodków ciągłych modele te pozwoliły uporządkować znane wyniki w dziedzinie kontynuualnej teorii defektów i uzyskać nowe. W fundamentalnej fizyce wszystkie podstawowe oddziaływania niegrawitacyjne zostały w zasadzie zadowalająco opisane w języku teorii z cechowaniem. Charakterystyczna, silna nieliniowość tych teorii pola, podobnie jak nieliniowość kontynuualnych teorii defektów, ma swe źródło w założonej, nieprzemiennej grupie symetrii. W standardowej, Einsteińskiej teorii jest to niezmienniczość względem nieskończenie-wymiarowej grupy wszystkich dyfeomorfizmów czasoprzestrzeni. Podobnie, jak wykazał Arnold, nieliniowość równań dla cieczy idealnej jest ściśle związana z tym, że grupa zachowujących objętość dyfeomorfizmów przestrzeni materialnej jest grupą symetrii równań ruchu i funkcjonału Lagrange’a. Tak doniosłe z punktu widzenia teorii, praktyki i wręcz technologii zjawiska jak nadprzewodnictwo i nadciekłość mają podobny opis teoretyczny. Jego istotą jest niezmienniczość względem nieskończenie-wymiarowej grupy przekształceń cechowania.

Analiza własności symetrii, grup niezmienniczości jest bardzo istotna zarówno w problemach liniowych, jak nieliniowych. Ułatwia ona znalezienie ścisłych rozwiązań, a nawet gdy nie jest to możliwe, pozwala na głębokie, jakościowe zrozumienie zagadnienia. Wiele doniosłych problemów we współczesnej fizyce teoretycznej i mechanice rozwiązano dzięki samej zaobserwowanej, lub postulowanej *a priori* grupie symetrii, nawet, gdy pełne szczegóły dynamiki nie były jeszcze znane, bądź gdy przy szczegółowo znanej teorii nie było możliwe znalezienie jawnej postaci ścisłych rozwiązań.

We współczesnej elektrodynamice ośrodków ciągłych, a także w fundamentalnych, fizycznych, teoriach pola nastąpił renesans istotnie nieliniowych modeli typu Borna–Infelda. Okazało się, że nie tylko nie jest to jedna z nieskończenie wielu możliwych nieliniowości, nie tylko nie jest to trywialna nieliniowość typu poprawki do tła liniowego, ale jest to model nieliniowy w pewnym sensie kanoniczny, jedyny, jeśli nałożyć z góry pewne sensowne fizycznie wymagania. Okazuje

się zresztą, że modele tego typu również związane są z pewnego rodzaju charakterystycznymi grupami symetrii.

We współczesnej mechanice hamiltonowskiej również jednym z głównych zagadnień jest sieć wzajemnych powiązań bądź wykluczeń między takimi pojęciami jak istotna nieliniowość, całkowalność, symetrie, ergodyczność, chaos i mieszanie.

Ważnym wycinkiem studiów nieliniowych jest współczesna teoria sterowania opracowana przez takich badaczy jak Brockett, Mayne, Millman, Süßman i inni. Jest ona oparta na metodach współczesnej geometrii różniczkowej. Również w tej dziedzinie bardzo istotne są metody teorii grup Liego i zagadnienia symetrii. Zagadnienie sterowalności układu mechanicznego jest ściśle związane ze strukturą odpowiedniej grupy Lie lub algebry Liego. Nowoczesne metody pochodzące od Brocketta, Süßmana i innych są bardzo szerokim uogólnieniem tradycyjnych kryteriów Kalmana opracowanych dla układów z siłami liniowymi względem parametrów sterowania.

3 Aplikacyjne aspekty nauki o nieliniowości

Nieliniowa teoria ośrodków z mikrostrukturą, wewnętrznymi stopniami swobody, defektami i modami kolektywnymi ma znaczenie nie tylko poznawcze, ale i praktyczne, wręcz technologiczne, między innymi w dziedzinie inżynierii materiałowej. Sytuacja w tej dziedzinie zmieniła się zasadniczo od chwili, gdy jesteśmy w stanie wykonywać doświadczenia z pojedynczymi atomami i w ten sposób wpływać między innymi na termoelektryczno-mechaniczne własności tradycyjnych ośrodków i materiałów.

Istotnie nieliniowe modele w teorii pola i teorii materii skondensowanej znalazły zastosowania technologiczne wszędzie tam, gdzie silne wiązki laserowe oddziałują z materią, między innymi w zagadnieniach obróbki laserowej, a nawet w problemach medycznych.

Nieliniowa teoria sterowania oparta na zaawansowanej geometrii różniczkowej znalazła szerokie zastosowanie techniczne w automatyce, robotyce i inżynierii kosmicznej. Podejmuje się ambitne próby stosowania tego rodzaju metod dla praktycznego sterowania ekosystemami.

Teoria drgań nieliniowych z jej nowoczesnymi metodami matematycznymi odgrywa ważną rolę w dynamice maszyn. W praktycznych zagadnieniach geofizyki wykorzystuje się osiągnięcia teorii fal nieliniowych, trudnej teorii opartej na zaawansowanej matematyce współczesnej.

Warto wspomnieć o pewnym, do dziś nie rozwiązany fundamentalnym problemie, w którym, jak się wydaje, pewną nadzieję można pokładać w nieliniowości. Jest to problem oddziaływania kwantowych mikroukładów z ciałami makroskopowymi. W fundamentalnej fizyce wiąże to się z zagadnieniem pomiaru w mechanice kwantowej oraz pewnych elementów tajemniczej, względnej autonomii świata kwantowego i klasycznego. Inaczej mówiąc, chodzi o dwoistość ewolucji nieobserwowanego układu kwantowego rządzonego równaniem Schrödingera i skokowej redukcji towarzyszącej pomiarowi — zderzeniu z odpowiednim układem klasycznym. R. Penrose uważa, że kluczem do zrozumienia powinna tu być jakaś istotna nieliniowość, być może związana z oddziaływaniem z polem grawitacyjnym. W związku z tym odżyły ostatnio próby wprowadzenia nieliniowości do mechaniki kwantowej. Wśród nich również wyróżniają się modele, w których nieliniowość jest implikowana przez bogatą grupę symetrii, np. grupę dyfeomorfizmów trójwymiarowej przestrzeni fizycznej. Ciekawe, że te fundamentalne, na pozór odległe od praktyki za-

gadnienia fizyczne mają jednak pewien wymiar aplikacyjny związany z kwantową teorią informacji. Chodzi o program budowy komputerów kwantowych i procesorów opartych na zjawiskach kwantowych.

4 Modelowanie matematyczne i studia nieliniowe w Polsce i na świecie. Perspektywy

W Polsce istnieją zespoły badawcze i pojedynczy uczeni zajmujący się omówionymi powyżej zagadnieniami, tzn. modelowaniem matematycznym w naukach przyrodniczych ze szczególnym naciskiem na zasadniczą nieliniowość i symetrię. Wydaje się jednak, że ciągły brak zwartej grupy środowiskowej prowadzącej skoncentrowane badania. Zagubione zostały tradycje Banacha, Steinhausa, Ulama i innych, który potrafili powiązać abstrakcyjną matematykę z konkretnymi problemami nauk przyrodniczych. Z kolei przedstawiciele nauk przyrodniczych i technicznych zdają się z dystansem odnosić do matematyki i nie oczekują od niej szczególnej pomocy w swych problemach. Chyba, że chodzi o numeryczno-informatyczne aspekty matematyki. Jedną z niewielu poważnych prób powiązania matematyki, przyrodoznawstwa i techniki, prób stworzenia interdyscyplinarnego środowiska i interdyscyplinarnej atmosfery była w minionych dziesięcioleciach działalność prof. K. Maurina, do której piszący te słowa odnosi się z wielkim sentymentem i szacunkiem. W naszym środowisku to samo można powiedzieć o wieloletniej działalności prof. H. Zorskiego.

W Instytucie Podstawowych Problemów Techniki kierunek ten był w przeszłości silnie reprezentowany w Zakładzie Teorii Ośrodków Ciągłych oraz w (formalnie już nie istniejących) Zakładzie Mechaniki Cieczy i Gazów i Zakładzie Układów Mechanicznych. Zmiany personalne, jak odejście na emeryturę wielu prominentnych profesorów, migracje na uczelnie, wywołane atmosferą stwarzaną wokół Instytutów Polskiej Akademii Nauk przez niektóre środowiska, doprowadziły niestety w pewnym stopniu do rozproszenia i atomizacji. Aby zatrzymać i odwrócić ten negatywny proces, należy dążyć do stworzenia w IPPT silnego ośrodka badań nieliniowych i matematyki stosowanej.

Idea ta wiąże się ściśle z obserwowanymi przez nas trendami w nauce światowej, przynajmniej w tym jej nurcie, który, choć wywodzący się z tradycyjnej mechaniki, jest jednocześnie silnie związany ze współczesną fizyką i z nowoczesnymi teoriami matematycznymi jak: zaawansowana analiza funkcjonalna i geometria różniczkowa, teoria układów dynamicznych i probabilistyka. Z naszych kontaktów z uczonymi z krajów wysoko rozwiniętych wynika, że kierunek ten, zwłaszcza zaś teoretyczne i praktyczne zagadnienia istotnie nieliniowe i to traktowane w wymiarze interdyscyplinarnym, zdaje się dominować w zamierzeniach badawczych na początek dwudziestego pierwszego wieku. Nowoczesna inżynieria materiałowa, nawiązując do tradycyjnego dorobku mechaniki ośrodków z mikrostrukturą i defektami, będzie musiała posługiwać się takimi osiągnięciami współczesnej fizyki jak doświadczenia z pojedynczymi mikroobiettami i sterowanie procesami kwantowymi. Nieliniowa elektrodynamika ośrodków ciągłych, zwłaszcza w aspekcie oddziaływania między wiązkami laserowymi a materią, oraz rozmaite wersje nieliniowości typu Borna-Infelda będą w tych badaniach odgrywały coraz większą rolę. Nieliniowe modelowanie matematyczne będzie też odgrywało znaczącą rolę w zagadnieniach biologii i ekologii. Wiąże to się nie tylko z jakościową teorią układów dynamicznych, ale także ze współczesną nieliniową

termodynamiką układów otwartych i zagadnieniami synergetyki. Istnieją przypuszczenia, że nieliniowe mody kolektywne i makroskopowo uchwytnie zjawiska kwantowe pozwolą lepiej zrozumieć fenomen życia biologicznego i być może pewne aspekty pracy mózgu. Zapoczątkowane w mechanice metody abstrakcyjnych układów dynamicznych są już stosowane w ekonomii, a wydaje się, że coraz szerszym nurtem będą też wkraczać do psychologii i socjologii. Nieliniowa teoria sterowania, tradycyjnie związana z automatyką, robotyką i programami kosmicznymi, nie tylko umocni swą rolę w tych dziedzinach, ale wkroczy także do ekonomii, ekologii, nauk politycznych i socjotechniki.

5 Zamierzenia badawcze w obrębie IPPT

Instytut ma duże doświadczenie w wielu spośród omówionych powyżej kierunków badań. W Pracowni Mechaniki Analitycznej i Teorii Pola, działającej od lat w ramach Zakładu Teorii Ośrodków Ciągłych, zajmowaliśmy się od dawna i nadal zajmujemy nieliniową dynamiką modów kolektywnych i wewnętrznych stopni swobody. Były to z reguły problemy istotnie nieliniowe silnie powiązane z zagadnieniami symetrii, teorią grup i jakościową teorią układów dynamicznych. Również rozmaitego typu nieliniowości w teorii pola i teorii defektów były analizowane z punktu widzenia teorii grup i własności niezmienniczości. Jeśli chodzi o inne zespoły w Instytucie, to nasza tematyka jest najbardziej zbliżona do badań zainicjowanych przez profesorów H. Zorskiego, Z. Pera-dzyńskiego, D. Rogulę i kontynuowanych także przez ich współpracowników.

Zamierzamy kontynuować te badania i nie będzie to bynajmniej bezwładne powielanie tradycyjnej tematyki oparte na zwykłym przyzwyczajeniu. Motywacją jest dla nas zarówno pragnienie rozwiązania do końca pewnych rozpoczętych wątków jak i zachęcająca konfrontacja ze wspomnianymi trendami w nauce światowej. Mamy zamiar rozwinąć i pogłębić analizę nieliniowych modeli dynamicznych, opartych na grupie liniowej (rzeczywistej i zespolonej), grupie rzutowej, konforemnej i unitarnej. Otrzymane tam wyniki chcemy zastosować do badania ośrodków z mikrostrukturą oraz dużych obiektów z kolektywnymi modami ruchu. Zamierzamy też rozwinąć badania dotyczące ściśle rozwiązalnych modeli dynamicznych sieci (łańcuchów) nieliniowych, zarówno na poziomie klasycznym, jak i kwantowym. Może to mieć pewien związek z teorią łańcuchów molekularnych w kontekście polimerów lub nawet zagadnień biofizyki. Jednym z zamierzonych kierunków jest też relatywistyczna dynamika ciągłych i dyskretnych układów z wewnętrznymi stopniami swobody. Obejmowałoby to też fizyczne teorie pól z cechowaniem, oparte na wspomnianych powyżej grupach symetrii. Zamierzamy też kontynuować wykorzystujące podobne metody badania w teorii defektów oraz rozwinąć badania nad nanostrukturami, oparte na wcześniejszych wynikach w dziedzinie teorii efektu skali. Leży też w naszych planach fizyczna i matematyczna analiza uogólnionych nieliniowości typu Borna–Infelda, zarówno w kontekście fizycznych teorii pola, jak i nieliniowych ośrodków ciągłych z mikrostrukturą.

Być może dość ezoterycznym i hipotetycznym wątkiem w naszych zamierzeniach są problemy związane z nieliniowością w mechanice kwantowej, zwłaszcza w kontekście oddziaływania między mikroobektami i makroukładami. Jak wspomniano, zagadnienia te, niezależnie od swych fundamentalnych aspektów, mogą mieć związek z kwantową teorią informacji i z problemem sterowania zjawiskami kwantowymi. Mamy w tej dziedzinie pewne idee i hipotezy, również oparte na teorii istotnie nieliniowych układów dynamicznych.

6 Podsumowanie

Powyżej wielokrotnie mówiono o integracyjnym walorze matematyki i o zbawiennych skutkach współpracy interdyscyplinarnej. W krajach technologicznie przodujących nie ma dziś mowy o barierach między dyscyplinami. Nie da się dziś uprawiać akademickiej mechaniki ośrodków ciągłych i układów dyskretnych w izolacji od współczesnej fizyki i zaawansowanej matematyki. Tylko wzajemne przenikanie się tych dyscyplin, będące znakiem czasu, pozwoli stawić czoła wyzwaniom, które przed nauką stawia dzisiejsze życie. I tylko na tej drodze, poprzez wzajemnie wzbogacające oddziaływanie praktyki technologicznej i matematycznej abstrakcji, nasza dyscyplina może uzyskać społeczną akceptację i przychylność politycznych decydentów.

Bibliografia

1. Abraham R., Marsden J.E., *Foundations of Mechanics*, Benjamin-Cummings Publishing Company Inc., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney, Tokyo, 1978.
2. Białynicki-Birula I., *Nonlinear electrodynamics, variations on a theme of Born and Infeld*, [in:] Quantum Theory of Particles and Fields, Jancewicz B., Lukierski J. [eds.], 31–48, Singapore, World Scientific, 1983.
3. Brockett R.W., Millman R., Süssmann H.J. [eds.], *Differential-Geometric Control Theory*, Progr. in Math., Birkhäuser, 1983.
4. Calogero F., Degasperis A., *Spectral Transforms and Solitons. Tools to Solve and Investigate Nonlinear Evolution Equations*, North-Holland, Amsterdam–New York–Oxford, 1982.
5. Sławianowski J.J., *Geometry of Phase Spaces*, PWN, Warszawa, J. Wiley, Chichester, 1991.

NAUKI OBLICZENIOWE

Michał Kleiber

Aby scharakteryzować zakres problematyki podejmowanej w tym rozdziale, nie mieszczącej się w tradycyjnym układzie dyscyplin badawczych, rozpocznijmy od uwag terminologicznych. W niniejszym artykule termin „nauki obliczeniowe” (ang. computational science) rozumieć będziemy w możliwie najszerszym sensie — przyjmować będziemy mianowicie, że obejmuje on całą problematykę definiowaną w literaturze terminami takimi jak „metody komputerowe w nauce” (ang. computer methods in science) czy „modelowanie i symulacja komputerowa” (ang. modeling and computer simulation)¹. Nazewnictwo nie jest w tym przypadku sprawą nieważną i wymagać będzie dalszych wyjaśnień — termin „metody komputerowe w nauce” sugeruje przecież na przykład, że mamy do czynienia z pewną metodyką prowadzenia prac badawczych, zaś termin „nauki obliczeniowe” — że chodzi o wyodrębnioną dyscyplinę badawczą. Sprawą tą zajmiemy się dokładnie nieco później — dopiero bliższe przyjrzenie się specyficznej roli odgrywanej we współczesnej nauce przez nowoczesne techniki komputerowe pozwoli nam zrozumieć istotę używania wprowadzonych powyżej terminów.

Podkreślmy także od razu na wstępie, że nie będą nas tutaj w najmniejszym stopniu interesować standardowe, biurowe zastosowania komputerów — w badaniach naukowych, tak jak w administracji, bankowości, handlu i wszędzie indziej, komputerowa edycja tekstów, tworzenie ilustracji graficznych i wykresów, sporządzanie raportów, korzystanie z baz danych czy wykonywanie podręcznych obliczeń stały się już rzeczami zbyt normalnymi, aby zasługiwały tu na komentarz. Chodzi nam o sprawy znacznie bardziej dla rozwoju nauki fundamentalne, a mianowicie o to,

Jak rozwijające się z bezprzykładnym dynamizmem zaawansowane techniki komputerowe wpływają na sposób uprawiania nauki, tempo jej rozwoju oraz charakter i wiarygodność otrzymywanych wyników?

Nie chodzi więc nam o zastosowania komputerów „w ogóle” — celem naszym jest dyskusja problematyki wykorzystywania komputerów w sposób twórczy z punktu widzenia procesu badawczego. Wykorzystywania takiego więc, które nie tylko wspomaga badania, ale w istocie przesądza o możliwości osiągnięcia pewnych nowych rezultatów naukowych.

Komputeryzacja procesów badawczych postępuje oczywiście od wielu już lat. Analiza stanu obecnego zawiera w sobie liczne i przejrzyste wskazówki co do trendów rozwojowych i, jak zwykle, okazuje się bardzo pomocna w refleksji nad przyszłością. Rozpocznijmy tę analizę od stwierdzenia, że, nieco niepostrzeżenie, symulacja komputerowa urosła w ostatnich dekadach do rangi trzeciego metodycznego filaru nauki — obok Teorii i Eksperymentu trudno dzisiaj nie wymienić jej jako trzeciego zasadniczego sposobu prowadzenia badań naukowych, Rys. 1.

¹Szersze znaczenie przypisujemy zazwyczaj terminowi „badania wspomagane komputerem” (*computer assisted research*) — obejmuje on dodatkowo problematykę komputerowego sterowania eksperymentu fizycznego wraz ze zbieraniem i przetwarzaniem otrzymywanych wyników.



Rys. 1.

Myślę, że do intuicyjnego choćby zrozumienia istoty powyższego stwierdzenia wystarczy lektura pism popularno-naukowych: w pełni skomputeryzowany proces badawczo-rozwojowy, który doprowadził do powstania najnowocześniejszego obecnie samolotu pasażerskiego Boeing 777, znaczenie badawcze (i diagnostyczne!) tomografii komputerowej, komputerowo wspomagane osiągnięcia w biologii molekularnej czy projektowaniu leków najnowszej generacji, to spektakularne przykłady sukcesów badawczych niemożliwych do osiągnięcia bez użycia nowoczesnych technik komputerowych. Pojawienie się autonomicznych dyscyplin naukowych takich jak przykładowo² *Computational Mathematics, Computational Chemistry, Computational Biology, Computational Environmental Science, Computational Engineering* (z poddyscyplinami takimi jak *Computational Fluid Dynamics, Computational Material Science, Computational Electromagnetism, ...*), *Computational Economics, Computational Linguistics* czy nawet *Computational Intelligence*, mających odpowiednie światowe stowarzyszenia naukowe, kongresy i czasopisma, a także umożliwiające zdobywanie stopni naukowych na czołowych uniwersytetach świata, nie pozostawia wątpliwości — symulacja komputerowa staje się ważnym elementem w procesie rozwoju nauki. Ponieważ Teoria i Eksperyment zawsze jednak uważane były za kompletne i nierozłącznie uzupełniające się elementy rozwoju nauki, propozycja rozszerzenia tego klasycznego zestawienia wymaga natychmiastowego dodania, że

Symulacja Komputerowa nie jest metodyką prowadzenia badań alternatywną do Teorii i Eksperymentu i musi być rozpatrywana jako podejście komplementarne, ujawniające swą siłę dopiero w powiązaniu z dwoma pozostałymi.

Głęboko niesłuszne są więc na przykład takie niedawne stwierdzenia bezkrytycznych apologetów ery komputerów, że jakoby „już wkrótce tunele aerodynamiczne (tu: symbol eksperymentu fi-

²Nie będziemy tu używać częstych w Polsce, ale niefortunnych terminów typu „chemia komputerowa” czy, jeszcze gorzej, „informatyka chemiczna”. Lepszym, choć też nie idealnym terminem o bardzo zbliżonym znaczeniu wydaje się być „chemia obliczeniowa”.

zycznego, przyp. autora) służyć będą jedynie składowaniu wyników obliczeń komputerowych”, ale także liczne skądinąd stwierdzenia zmierzające do marginalizacji znaczenia komputerów w nauce.

Nawet jednak przy powyższym zastrzeżeniu schemat przedstawiony na Rys. 1 jawi się zapewne czytelnikowi jako nieco obrazoburczy — zakłócone jest na nim przecież odwieczne rozumienie procesu poznawania świata jako harmonijnego uzupełniania się Teorii i Eksperymentu Fizycznego. Przyznajmy — możliwa wydaje się próba wyodrębnienia w ramach Symulacji Komputerowej części typu teoretycznego i zaliczenia jej do Teorii oraz, przy odpowiedniej interpretacji, części typu eksperymentalnego. Rozróżnienie zaproponowane na Rys. 1 wydaje się jednak właściwsze, co postaramy się uzasadnić.

Jeszcze do niedawna w środowisku naukowym powszechnie panowała opinia, że jeśli „porządnemu” (czytaj: nie stosującemu w pracy technik informatycznych) uczonemu przydarzy się potrzeba dokonania jakichś obliczeń bądź zestawień statystycznych, to wystarczy poprosić o pomoc znajomego informatyka i on tę sprawę skutecznie załatwi. Dzisiaj wiadomo już na pewno, że poglądy takie są błędne co najmniej z dwóch powodów:

- (i) Samo formułowanie problemu badawczego uwzględniać musi możliwie pełną wiedzę o dostępnych środkach technicznego wspomaganie badań (wśród których techniki komputerowe zajmują czołowe miejsce), zaś
- (ii) Nasze oczekiwania związane z użyciem technik komputerowych, wynikające z natury badanej problematyki, bardzo często wykraczają poza możliwości oferowane przez będący w naszym zasięgu sprzęt i oprogramowanie. Implikuje to konieczność prowadzenia ukierunkowanych prac badawczych w zakresie np. matematyki stosowanej i informatyki przez zespoły prowadzące badania w dyscyplinach mających nominalnie niewiele wspólnego z tą problematyką. Do takich sytuacji zaliczymy na przykład rozwijanie technik wizualizacji dostosowanych do specyfiki danego problemu, rozwiązywanie problemów charakteryzujących się niepełnością informacji „wejściowej”, numeryczne rozwiązywanie pewnych specjalnych równań różniczkowych lub problemów optymalizacyjnych, czy wreszcie opracowywanie algorytmów numerycznych operujących na dużych macierzach o specjalnej budowie, itp.

Do spraw tych za chwilę powrócimy — na razie nieodzowne jest porozmawianie o rzeczach bardziej ogólnych, do których z pewnością zaliczyć można szeroko prowadzoną w mediach (i, rzadziej, w środowisku uczonych) dyskusję o tzw. globalnym kryzysie polityki naukowej czy wręcz nauki.

Poddając wprawdzie w wątpliwość zasadność użycia terminu „kryzys” w odniesieniu do stanu dzisiejszej nauki w świecie należy stwierdzić, że sytuacja w jakiej znalazła się ona obecnie jest w istotny sposób różna od tego, czego doświadczyliśmy w okresie ostatnich wielu dziesięcioleci. Nauka jest oczywiście ciągle naturalnym wyrazem poznawczej ciekawości człowieka — nie uległa też zmianie ważna społecznie funkcja nauki jako istotnego (aczkolwiek bynajmniej nie jedyne, a zapewne nawet nie najważniejszego!) czynnika rozwoju gospodarczego społeczeństw. Zasadnicze zmiany nastąpiły natomiast w sposobach prowadzenia badań naukowych — niektóre z tych zmian scharakteryzujemy poniżej.

Podstawową rolę w dotychczasowym procesie rozwoju nauki odgrywały badania prowadzone przez pojedynczych (lub pracujących w małych, bazujących na koleżeńskich układach, grupach)

badaczy, rozwijających tematykę ukształtowaną przez własne zainteresowania. W finansujących te badania instytucjach milcząco zakładano, że w warunkach tak rozumianej wolności twórczej zdolny badacz osiągnie rezultaty i tak z zasady przydatne społecznie — fakt, iż nie wiadomo było dokładnie, czego one będą dotyczyły, nikogo specjalnie nie martwił. System takiego, powiedzmy tradycyjnego, prowadzenia badań można by w szerszym, społecznym wymiarze określić słowem „liniowy” — prowadził on od badań podstawowych przez badania stosowane i prace rozwojowe aż do ostatecznych wdrożeń. Doświadczenia z ostatnich dziesięcioleci zakłóciły jednak ten dla wielu z nas naturalny obraz prowadzenia badań. Spośród tych doświadczeń wymieńmy: dramatyczny przyrost zakresu prowadzonych badań i ich kosztu oraz zmiany w zakresie możliwości praktycznego wykorzystywania gromadzonej wiedzy. W efekcie tego procesu priorytet w procesie społecznego tworzenia i wykorzystywania wiedzy przesunął się ze strony uczonych na stronę szeroko rozumianego rynku. Towarzyszyła temu krytyka postępującego odrywania się zainteresowań uczonych od potrzeb społecznych, marnotrawstwa publicznych środków przez wielkie, zbiurokratyzowane instytucje badawcze czy braku zobiektywizowanych metod oceny osiągnięć naukowych. Dodać do tego należy jeszcze fakt, iż mniej więcej od początku lat osiemdziesiątych dynamizm rozwoju nauki (mierzony wzrostem nakładów na badania, liczby naukowców czy liczby publikacji) znacznie się zmniejszył. Nietrudno to zrozumieć — z czysto demograficznych powodów niemożliwe stało się podwajanie osiągnięć nauki co 10–15 lat, co miało w przybliżeniu miejsce w ostatnich 300 latach. Gdyby badania naukowe miały utrzymać takie tempo rozwoju także w przyszłości, to już wkrótce wszyscy mieszkańcy globu zajęci byłiby pisaniem prac naukowych, co jest zaiste wizją koszmarem! Pamiętajmy przy tym, że każde badania, lepiej czy gorzej odpowiadając na postawione przez badacza pytania, otwierają znacznie więcej problemów do przyszłych badań — problemów częstokroć intrygujących i ważnych, wręcz domagających się kontynuacji prac. W tej sytuacji nieuchronna staje się selekcja tematyki badawczej — nieuchronna staje się też coraz ostrzejsza rywalizacja uczonych o środki badawcze. Powoduje to konieczność wprowadzenia mechanizmów oceny projektów badawczych oraz przesądza o niezbędności rozliczania się z uzyskanych wyników. Niekoniecznie budzi to entuzjazm samych uczonych — czują oni instynktownie, że niezbędne tu procedury administracyjne przedkładają instrumentalne cele nauki nad jej cele poznawcze, co w konsekwencji prowadzić może do ograniczenia oryginalności prowadzonych badań.

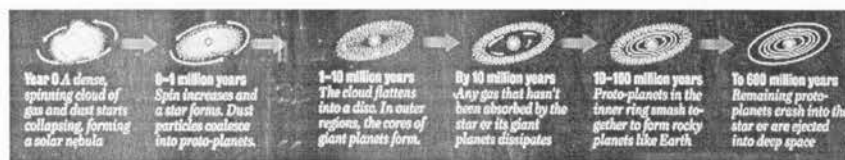
Następnym ważnym elementem charakteryzującym aktualną sytuację nauki jest fakt, że prowadzone badania są coraz mniej zrozumiałe dla finansujących je społeczeństw. Ludzie nie utożsamiają niestety pojawiających się dosłownie każdego dnia nowych udogodnień życia codziennego (wymieńmy choćby Internet, telefon komórkowy, nowe metody diagnostyki i terapii medycznej, coraz bardziej wiarygodne prognozowanie pogody czy coraz doskonalsze modele samochodów) z postępem naukowym — wiedza niezbędna do tworzenia produktów tego typu jawi się ludziom z reguły jako zbyt hermetyczna i niezrozumiała, nie przekładając się wcale na pogłębienie społecznego poparcia dla badań naukowych.

Czynnikiem niezmiernie komplikującym decyzje o wspieraniu określonego kierunku badań jest fakt, iż nawet osiągnięcie naprawdę nowatorskich rezultatów o pozornie bardzo znacznym potencjale aplikacyjnym nie gwarantuje komercyjnego sukcesu. Nawet najciekawsze odkrycie naukowe nie przynosi bowiem wymiernych korzyści materialnych jeśli nie towarzyszą mu odpowiednia infrastruktura, umożliwiająca szybkie przeprowadzenie prac wdrożeniowych i przemysł, umiejący dostosować opracowany produkt do swojej oferty sprzedaży.

W tym kontekście należy uznać, że obowiązujący w Polsce podział badań na podstawowe i stosowane jest niefortunny. Lepszy podział, jeżeli w ogóle jakiś jest potrzebny, polega na wyróżnieniu badań nieskrępowanych (swobodnych), ocenianych wyłącznie na podstawie ich oryginalności w skali światowej, badań prowadzonych w kontekście zastosowań, dla których muszą istnieć głęboko przemyślane, choćby nawet znacznie odległe w czasie, perspektywy aplikacyjne i prace (nie badania!) rozwojowe i wdrożeniowe. Można przyjąć za pewne, że znaczenie badań prowadzonych w kontekście zastosowań będzie się systematycznie zwiększać — na pociechę badaczy-teoretyków należy dodać z naciskiem, że oznacza to nie tyle ograniczenie zakresu prowadzonych badań poznawczych, co raczej koncentrację tych badań w obszarach prowadzących do przewidywanych aplikacji. Prowadzenie, w kontekście zastosowań, badań w zakresie wytwarzania nowych materiałów o zadanych własnościach, komputerowo wspomaganego tłumaczenia tekstów, projektowania samolotów nowej generacji czy nowych metod terapii medycznej zawiera bowiem przecież w sobie potężny ładunek badań poznawczych!

Po tej ogólnej dyskusji dotyczącej problemów współczesnej nauki, zanim powrócimy do głównego tematu tego artykułu, przytoczymy szerzej choćby jeden pouczający przykład (z zakresu kosmologii), ilustrujący siłę metod komputerowych we współczesnych badaniach.

Cechą charakterystyczną wielu zjawisk badanych przez astronomów jest ich bardzo długi czas trwania — tworzenie się układu gwiazdnego (galaktyki) w ciągu np. 100 mln lat nie pozwala uczonym z oczywistych powodów mieć nadziei na obserwację całego przebiegu tego zjawiska. Uczeń obserwują jednak za pomocą coraz doskonalszych metod istnienie w różnych miejscach wszechświata różnych galaktyk będących oczywiście na różnych etapach swego rozwoju. Są to jakby fotografie chwilowego stanu powoli zmieniających się i różnie zaawansowanych procesów. Patrząc na te wrywkowe obrazy dotyczące w dodatku zupełnie różnych galaktyk nie sposób wyobrazić sobie szczegółów procesów ewolucyjnych zachodzących w każdej z nich. Osiągnięcie tego stało się możliwe za pomocą bardzo subtelnych metod komputerowych: skomplikowana analiza otrzymywanych obrazów statycznych w połączeniu z technikami ekstrapolacji i, oczywiście, głęboką wiedzą teoretyczną astronomów o naturze zachodzących procesów pozwoliła zrekonstruować przebieg poszczególnych procesów i stworzyła fascynującą wiedzę o powstawaniu galaktyk nieosiągalną w żaden inny sposób, Rys. 2!



Rys. 2.

Inne nasuwające się natychmiast przykłady, których nie będziemy szczegółowo omawiać to badanie struktur biochemicznych (np. sposobów związania się cząsteczek białek), gdzie bez modelowania i symulacji komputerowej w ogóle nie jest możliwy obecnie postęp poznawczy, analiza wzrostu kryształów półprzewodników w warunkach nieważkości, kiedy zamiast wystrzeliwać całe laboratorium na orbitę możemy po prostu „wyłączyć” efekt grawitacyjny w programie symulacyjnym, czy prognozy zjawisk atmosferycznych, dla których rozmiar problemu wyklucza jakiegokolwiek inne, niesymulacyjne podejście.

W naukach technicznych nauki obliczeniowe z reguły zasadniczo obniżają koszt opracowania nowej konstrukcji czy systemu. Dzięki modelowaniu i symulacji komputerowej nie trzeba wykonywać setek modeli w naturze by np. znaleźć najlepszy aerodynamicznie kształt samolotu.

Rozpatrzmy dla przykładu problem optymalnego ustalenia kształtu łoka silnika tak, aby zredukować jego szerokość (a więc zaoszczędzić materiał i zmniejszyć ciężar), zachowując dostateczną wytrzymałość. Rozwiązanie tak postawionego problemu z zasady wymaga wykonania szeregu czynności, takich jak:

- stworzenia łącznego modelu wszystkich procesów fizycznych zachodzących w silniku (spalanie, przewodnictwo ciepła, deformacja poszczególnych części, itp.),
- przeprowadzenie skomplikowanych symulacji komputerowych,
- skorzystania z różnych, często bardzo wyrafinowanych technik modelowania geometrycznego i możliwości grafiki komputerowej,
- skorzystania z obszernych baz danych zawierających wiedzę o projektowaniu i wytwarzaniu danego elementu,
- wykorzystania różnorodnych możliwości komunikowania się człowieka z komputerem.

Każda z powyższych czynności jest absolutnie niezbędna do skutecznego wykonania postawionego zadania — w każdej z nich kluczową rolę odgrywają techniki komputerowe. Mamy tu do czynienia z zespołowym wysiłkiem wielu ludzi, bazującym na systemach komputerowych składających się z milionów wyrażeń zapisanych w odpowiednich językach programowania — systemach olbrzymich, kosztownych i trudnych w eksploatacji w warunkach wymagających niezawodności działania, ale niezbędnych do postępu wiedzy technicznej.

Nie będziemy dalej mnożyć przykładów, choć fascynujące badania w zakresie np. robotyki, diagnozowania medycznego czy projektowanie nowych leków dostarczyłyby nam wielu dalszych przekonujących dowodów na fundamentalne znaczenie nauk obliczeniowych i metod komputerowych dla rozwoju nauki. Jest to naturalna kolej rzeczy — wymagania współczesnego świata są tak złożone i subtelne, że twórcze wykorzystywanie istniejących technik komputerowych stało się dzisiaj nieodzownym, centralnym elementem większości procesów badawczych. A naprawdę twórcze stosowanie tych technik jest nauką samą w sobie — dotyczy bowiem nie tylko racjonalnego (skądinąd często bardzo twórczego!) łączenia wiedzy w danej „nie-komputerowej” dyscyplinie badawczej z możliwościami współczesnego sprzętu i oprogramowania komputerowego, ale także opracowywania specjalnych metod dostosowanych do specyfiki analizowanej problematyki. A więc — autonomicznej działalności naukowej w dziedzinie zwanej umownie naukami obliczeniowymi.

Szczególnie istotne jest powiązanie powyższych obserwacji z sygnalizowanym poprzednio stale zwiększającym się znaczeniem badań prowadzonych w kontekście zastosowań. Tylko bowiem efektywne zastosowania praktyczne rezultatów badawczych zwiększyć mogą społeczne poparcie dla nauki, a zastosowania te są bardzo często ściśle związane z poziomem użytego w procesie badawczym wspomaganie komputerowego. Zapewnia on bowiem z reguły możliwości uzyskiwania efektywnych i czytelnych rozwiązań problemów formułowanych na gruncie opracowywanych teorii, zapewnia większą efektywność i obniżenie kosztu przenoszenia wyników badań

do praktyki, poszerza możliwości współpracy badawczej, stwarza możliwości stałego, „przyrostowego” udoskonalania wyników.

Powtórzmy teraz, w nawiązaniu do terminologicznej dyskusji ze wstępu, że przedmiot naszych rozważań dotyczy zarówno

- (a) badań prowadzonych w dziedzinie „bazowej”, w których zasadniczym elementem metodycznym jest wykorzystywanie nowoczesnych technik komputerowych, jak i
- (b) ukierunkowanych, autonomicznych badań „usługowych” prowadzonych w zakresie informatyki, metod numerycznych, elektroniki (np. dedykowane procesory!), itp., umożliwiającym stawianie nowych problemów badawczych w dziedzinie bazowej i uzyskiwanie efektywnych rozwiązań tych problemów.

Oczywiście, rozróżnienie pomiędzy (a) i (b) jest często niemożliwe, bowiem relacje pomiędzy czynnościami wykonywanymi w obrębie obu obszarów okazują się z reguły bardzo złożone. I takie postrzeganie sprawy wydaje się uzasadniać zastosowane w niniejszym, ogólnym artykule dość swobodne utożsamienie różnych znanych terminów dotyczących wykorzystywania komputerów w nauce. Omawiana sytuacja nie jest bynajmniej wyjątkowa — przecież na przykład pod nazwą „Eksperyment Fizyczny” kryje się zarówno zbiór technik przeprowadzania doświadczeń weryfikujących teorię („metody eksperymentalne w nauce”) jak i wiele „uzupełniających” kierunków badawczych związanych np. z planowaniem czy opracowywaniem wyników doświadczeń („nauki o eksperymencie”).

Znaczenie metod komputerowych w rozwoju różnych dziedzin nauki i techniki oraz ich interdyscyplinarny charakter spowodowały, że w krajach o wysokim poziomie badań dyscyplina o nazwie *computational science* (bądź, nieco szerzej, *computational science and engineering*) staje się coraz częściej pełnoprawnym kierunkiem studiów oraz obszarem nadawania stopni naukowych. W Tabeli 1 przedstawiono parę wybranych (z wielokrotnie dłuższej listy) czołowych uniwersytetów amerykańskich, na których oferowane są studia z tego zakresu. Ze względu na brak w języku polskim ogólnie przyjętej terminologii informacje zawarte w Tabeli 1 podano w wersji oryginalnej. Zestawienie to jest dobrą ilustracją osiągnięć pierwszych kilkunastu lat rozwoju technik modelowania i symulacji komputerowej, które doprowadziły do uznania tego obszaru badań za mający bardzo istotne znaczenie dla dalszego rozwoju całej nauki i techniki. Ten wstępny okres rozwoju dobiega zresztą już dzisiaj w USA do końca — wchodzi tam bowiem w życie następny etap badań o nazwie „Information Technology for the 21st Century”. Bazując na dotychczasowych osiągnięciach, jego celem jest dalszy rozwój transdyscyplinarnych badań mających u podstaw zaawansowane techniki obliczeniowe („petaflop computers”, „next-generation Internet”, „grid computing”, itp.). Nie ulega wątpliwości, że za tym przykładem podążać będą wszystkie kraje aspirujące do odgrywania liczącej się roli w świecie nauki XXI wieku.

Pewnego komentarza wymaga na koniec stosunek omawianych zagadnień do informatyki w ścisłym znaczeniu tego terminu. Jak podkreślaliśmy parokrotnie, metody komputerowe w nauce i nauki obliczeniowe szeroko korzystają z osiągnięć innych dyscyplin badawczych w tym, głównie, informatyki. Istnieją nawet pewne tendencje do określania omawianej tu problematyki terminem „informatyka stosowana”. Należy jednak z mocą podkreślić, że przy całym swym znaczeniu badania w zakresie modelowania i symulacji komputerowej w nauce powinny być traktowane (i finansowane!) zupełnie niezależnie od badań ściśle informatycznych, stanowiących samodzielną dyscyplinę badawczą o fundamentalnym znaczeniu daleko wykraczającym poza takie czy

Tabela 1. Zestawienie studiów magisterskich i doktoranckich z zakresu metod komputerowych w nauce i technice prowadzonych w wybranych uniwersytetach USA

Uniwersytet	Tytuł zawodowy i/lub stopień naukowy	Katedra lub instytut	Jednostka administracyjna	Przedmioty podstawowe	Krótkie omówienie
University of Utah	Graduate certificate in computational engineering and science	Computer Science and Mathematics	Computational Engineering and Science program	Computer science, numerical analysis, modeling and case studies	Seven specified courses
University of California at Davis	PhD in applied science with computational science speciality	Applied Science	Applied Science	Classical, continuum and statistical mechanics; mathematical physics and computational mathematics	Three CS&E courses, three special applications courses, electives and thesis
Rice University	MS and PhD in computational science and engineering	Mathematical Sciences, Computer Science, Chemical Engineering and Electrical Engineering	Computational Science Committee	Numerical analysis, scientific computing, architecture and software tools	10 courses for MS, individualised program for PhD degree
Stanford University	PhD in scientific computing and computational mathematics	Separate program: Scientific Computing and Computational Mathematics	Scientific Computing and Computational Mathematics	Numerical analysis, applied mathematics and relevant computer science	Normal degree program covering mathematics, numerical analysis, computer science and application
George Mason University	PhD in computational science and informatics	Institute for Computational Science and Informatics, Biology, Chemistry, Earth Science, Mathematics, Physics, Space Sciences, Statistics	Separate institute: Institute for Computational Science and Informatics	CS&E courses and applications	73 hours; 25 percent CS&E, 50 percent application area and 25 percent electives
Mississippi State University	MS and PhD in computational engineering	All Engineering, Mathematics and Computer Science	Separate graduate program: Computational Engineering Program	Computational mathematics, computer architecture, scientific computing, software tools and applications	Engineering application of mathematics and computer sciences
University of California at San Diego	PhD speciality in listed departments	Applied Mechanics and Engineering Sciences, Biology, Chemistry, Computer Science and Engineering, Mathematics and Physics	Program in Scientific Computation	Algorithms and numerical methods, simulation	3–5 courses in each of applied mechanics and engineering science, CS&E and numerical analysis
University of Michigan	PhD speciality in listed departments	All Engineering plus Mathematics, Statistics, Geology, Pharmacy and Astronomy	Laboratory for Scientific Computation	Scientific computing, architecture, numerical analysis and parallel algorithms	Regular department requirements plus courses in scientific computing, advanced architectures, parallel algorithms and numerical analysis

inne aplikacje. Brak tego rozróżnienia w powiązaniu ze spektakularnymi sukcesami nauk obliczeniowych mógłby bowiem zaowocować ograniczeniem zainteresowania społecznego (tj., także, finansowania) dla informatyki jako takiej — byłby to paradoksalny zaiste przykład sytuacji, w której aplikacyjne sukcesy informatyki stają się wrogiem rozwoju jej podstaw. Innymi słowy,

Wykorzystywanie informatyki w nauce nie powinno w żadnym sensie zastępować nauki informatyki!

W podsumowaniu stwierdzmy, że:

- Rewolucja informacyjna osiąga dzisiaj „masę krytyczną”, zaś jej ważny składnik w postaci technik modelowania, analizy, symulacji i wizualizacji komputerowej skutecznie aspiruje do statusu filaru metodycznego badań naukowych o znaczeniu porównywalnym z Teorią i Eksperymentem. Należy z całą mocą podkreślić, że metody komputerowe są dla nich metodyką komplementarną, a nie alternatywną!
- Znaczenie ogólnie rozumianego modelowania i symulacji komputerowej w badaniach naukowych będzie w przyszłości dalej rosło przybierając postać dedykowanych do danej problematyki i łatwych w użyciu środowisk obliczeniowych — głęboka refleksja nad tym zjawiskiem jest niezbędna do prawidłowego, krytycznego wbudowania tej metodyki badawczej i jednocześnie dyscypliny naukowej w całokształt problematyki rozwoju nauki.
- Już dzisiaj nauka obfituje w przykłady osiągnięć naukowych uzyskanych nie tylko przy pomocy nowoczesnych technik komputerowych, ale głównie dzięki nim!
- Stosowanie metod komputerowych sprzyja transdyscyplinarności badań, kluczowej dla postępu w zatอมizowanym świecie współczesnej nauki i zasadniczo zwiększa potencjał aplikacyjny osiągniętych wyników.
- W żadnym przypadku nie należy bagatelizować takich niebezpieczeństw związanych z komputeryzacją procesów badawczych, jak
 - konieczność wirtualizacji badanego wycinka rzeczywistości,
 - przesadne oczekiwania co do skuteczności technik komputerowych w rozwiązywaniu problemów, których nie potrafimy dostatecznie precyzyjnie sformułować,
 - rozwijanie metod komputerowych kosztem prowadzenia eksperymentów fizycznych i prób rozumienia istotnych aspektów symulowanych procesów (alternatywne, zamiast komplementarnego, traktowanie symulacji).
- Wyrażana niekiedy nadzieja, że rozwój technik komputerowych zwolni nas także od konieczności podejmowania wielu trudnych decyzji w trakcie prowadzenia badań okaże się z pewnością płonna — decyzje te podejmowane będą po prostu na innym poziomie, w warunkach pełniejszej informacji. Innymi słowy, podział ról między człowiekiem i komputerem zmierzać będzie do jak najpełniejszego wykorzystania „naturalnych” ich cech: fenomenalnej zdolności do twórczego myślenia u człowieka oraz szybkości i niezawodności wykonywania powtarzalnych operacji w komputerze.

- W nadchodzącej przyszłości coraz bardziej użyteczne stawać się będą techniki typu *artificial life*:
 - programy będą w stanie uczyć się rozwiązywania problemów z pewnej klasy (na razie niezbyt szerokiej),
 - możliwe staną się symulacje bardzo złożonych problemów, biologicznych i społecznych
 - użyteczne staną się techniki tzw. *soft computing* umożliwiające komputerom konkurowanie (w wąskich obszarach) z człowiekiem pod względem jego fenomenalnych zdolności do wnioskowania w warunkach niepewności, hierarchicznego zapamiętywania informacji czy uczenia się na podstawie doświadczenia.
- Doświadczenia autora z pracy w KBN (przewodniczenie Sekcji Metody Komputerowe w Nauce), wieloletniej działalności w komisjach opiniujących programów badawczych Unii Europejskiej, członkostwa w Centralnej Komisji ds. Tytułu i Stopni Naukowych oraz działalności badawczej i dydaktycznej na licznych uczelniach w kraju i zagranicą wskazują, że dyscyplina badawcza o nazwie Nauki Obliczeniowe stanowi wyraźnie zdefiniowany obszar badawczy o znacznej autonomii metodycznej i jasnych kryteriach oceny poziomu prac. Kierując się przykładem USA i wyraźnym trendem rozwojowym należałoby być może rozpocząć w Polsce starania o uruchomienie kierunku studiów lub specjalności w tym zakresie i umożliwienie zdobywania odpowiednich stopni naukowych. Wyszłoby to także na przeciw ewidentnej potrzebie wprowadzania do polskiego systemu edukacji na poziomie wyższym kierunków, które w naturalny sposób łączyłyby informatykę z innymi dyscyplinami naukowymi, dla których informatyka jest narzędziem zarówno wykorzystywanym, jak i rozwijanym. Jeszcze innym aspektem takiego integrującego działania jest fakt, iż badania w zakresie metod komputerowych w nauce nadają się idealnie do realizacji w ramach tzw. rozproszonych centrów badawczych składających się z grup badawczych komunikujących się ze sobą za pomocą sieci komputerowych — ten typ współpracy naukowej, realizowany już szeroko w USA, Japonii i krajach Unii Europejskiej, ma z pewnością w nauce wielką przyszłość.

