

5.54 — Beton zbrojony włóknami. Zastosowania w konstrukcjach.

Red. Nauk. Stanisław
Kajfasz

Praca zbiorowa

KOMPOZYTY BETONOWE
SIATKO-FIBRO-POLIMEROBETONY
WŁAŚCIWOŚCI I ZASADY STOSOWANIA

32 / 1981

P. 269

Redaktor naukowy
prof. dr Stanisław Kajfasz

WARSZAWA 1981

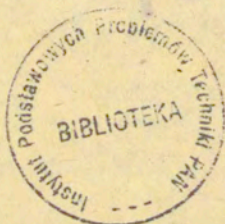
Praca wpłynęła do Redakcji dnia 28 września 1981 r.

Zarejestrowana pod nr 32/1981

Opracował zespół autorski w składzie:

A.M.Brandt, Z.Jamroży, J.Jaworski, S.Kajfass, J.Kasperkiewicz
/fibrobetony/, L.Czarnecki, J.Pietrzykowski /polimerobeton/
B.Walkus /siatkobeton/

Redakcja naukowa S.Kajfass



57081



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 190 egz. Ark. wyd. 5,5. Ark. druk. 8.
Oddano do drukarni w październiku 1981.
Nr zamówienia

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

S p i s t r e ś c i

	Strona
1. Wstęp	7
1.1. Cel opracowania	7
1.2. Przedmiot opracowania	7
2. Składniki matrycy, zaprawy, betony.	13
2.1. Spoiwa cementowe	13
2.2. Spoiwa polimerowe	13
2.2.1. Ogólne wymagania	14
2.2.2. Właściwości żywic syntetycznych	14
2.3. Kruszywo	18
3. Mikrobrojenie	21
3.1. Włókna ciągle stalowe w postaci siatek	22
3.2. Włókna z drutu stalowego ciętego	25
3.3. Włókna szklane ciągle i cięte. Siatki szklane.	26
3.4. Włókna polimerowe	28
3.5. Inne rodzaje włókien	29
4. Podstawy technologiczne	30
4.1. Zaprawy i betony uzbrojone siatkami stalowymi /ferrocement/	30
4.2. Zaprawy i betony uzbrojone ciętym włóknem stalowym	32
4.3. Zaprawy i betony uzbrojone włóknem szklanym	35
4.4. Zaprawy i betony uzbrojone ciętym włóknem polipropylenowym	37
4.5. Zaprawy i betony polimerowe	38
4.5.1. Betony impregnowane polimerem	38
4.5.2. Betony cementowo-polimerowe	41
4.5.3. Zaprawy i betony żywiczne /na spoiwie polimerowym/	43
5. Struktura kompozytów	46
5.1. Poziomy obserwacji /fenomenologiczny, makroskopowy, molekularny, atomowy/	46
5.2. Opis struktury fazy rozproszonej i ciągłej	47
5.3. Techniczne sposoby opisu struktury kompozytu	50

5.4. Techniczne sposoby opisu struktury mikrobro- jenia sztywnego	Str. 52
5.5. Struktura mikrobrojenia wiotkiego	54
5.6. Mikrostrukturalne uwarunkowania efektywności rozwiązań materiałowych betonów polimerowych /PCC, PIC, PC/	55
6. Właściwości kompozytów	63
6.1. Właściwości zapraw i betonów uzbrojonych siatka- mi stalowymi	65
6.1.1. Procent uzbrojenia i rozproszenia uzbrojenia	
6.1.2. Zarysowanie	
6.1.3. Zachowanie się siatkobetonu rozciąganego	
6.1.4. Zachowanie się siatkobetonu ściskanego	
6.1.5. Skurcz	
6.1.6. Przyczepność	
6.2. Właściwości zapraw i betonów uzbrojonych cię- tym włóknem stalowym	69
6.2.1. Procent uzbrojenia	
6.2.2. Zależność odkształceń od obciążeń przy roz- ciąganiu i zginaniu	
6.2.3. Powstawanie i rozwój rys	
6.2.4. Wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie	
6.2.5. Wytrzymałość na zmęczenie i trwałość	
6.2.6. Zdolność gromadzenia energii i odporność na oddziaływanie dynamiczne	
6.2.7. Porowatość i przepuszczalność	
6.2.8. Skurcz i pełzanie	
6.2.9. Metody badań i kontroli	
6.3. Mechaniczne właściwości zaczynów cementowych, zapraw i betonów uzbrojonych ciągłym i ciętym włóknem szklanym	81
6.4. Właściwości zapraw i betonów uzbrojonych ciętym włóknem polipropylenowym	84
6.4.1. Zależność naprężenia - odkształcenia przy rozciąganiu	
6.4.2. Odporność na obciążenia udarowe i absorbcja energii	
6.4.3. Trwałość	

	Str.
6.5. Właściwości betonów polimerowych	86
6.5.1. Właściwości betonów impregnowanych polimerami	
6.5.2. Właściwości betonów cementowo-polimerowych	
6.5.3. Właściwości betonów zwykłych	90
7. Założenia i metody projektowania kompozytów betonowych	
7.1. Zaprawy i betony zbrojone siatkami	97
7.2. Podstawy teoretyczne i doświadczalne projektowania kompozytów zawierających fazę mikrouzbrojenia stalowego rozproszonego	99
7.2.1. Założenia wyjściowe	
7.2.2. Projektowanie materiałowe	
7.2.3. Wytrzymałość i odkształcalność fibrobetonów	
7.2.4. Wyznaczanie sił wewnętrznych w stanach granicznych	
7.3. Podstawy projektowania kompozytów z mikrouzbrojeniem włóknem szklanym	109
7.4. Projektowanie betonów i zapraw żywiczych	110
8. Zastosowania konstrukcyjne	116
8.1. Siatkobeton	
8.2. Fibrobeton z ciętym drutem stalowym	
8.3. Fibrobeton uzbrojony włóknem szklanym	
8.4. Fibrobeton z dodatkiem ciętych włókien polipropylenowych	
8.5. Betony polimerowe	
9. Powołania na podstawowe publikacje	121

1. Wstęp

1.1. Cel opracowania

Niniejsze opracowanie zawiera w zwartej formie informacje i wytyczne o:

- a/ podstawach stosowania kompozytów betonowych jako materiałów budowlanych,
- b/ możliwościach, ograniczeniach oraz warunkach technicznych i ekonomicznych takich zastosowań.

Celem opracowania jest podanie informacji i głównych wytycznych dotyczących kompozytów wymienionych w tytule w zakresie a/ struktury i właściwości, b/ projektowania, c/ wykonania, d/ stosowania.

Wytyczne oparto o krytyczną analizę materiałów zawartych w publikacjach technicznych, krajowych i zagranicznych oraz wyniki badań przeprowadzonych przez członków zespołu redakcyjnego w dziedzinie: a/ betonów, zapraw i zaczynów na spoiwie cementowym z uzbrojeniem rozproszonym z włókna ciętego lub ciągłego stalowego, szklanego, polimerowego lub innego, b/ betonów i zapraw cementowych impregnowanych polimerami, c/ betonów i zapraw, w których materiał wiążący cementowy zamieniono częściowo lub całkowicie na materiał wiążący polimerowy.

Wynikiem tej analizy jest podanie możliwych na obecnym etapie rozwoju wiedzy, wskazówek mających znaczenie przy projektowaniu, obliczaniu i stosowaniu wymienionych materiałów i elementów z nich wykonanych.

1.2. Przedmiot opracowania - przedmiotem opracowania są:

- charakterystyka materiałów składowych - omówiono właściwości materiałów wchodzących w skład kompozytów;
- podstawy technologiczne - podano podstawowy opis materiałów kompozytowych, opisano operacje technologiczne niezbędne do wykonania kompozytów oraz wpływ technologii produkcji na strukturę, właściwości i zastosowania kompozytów;

- struktura kompozytów

podano jakie informacje są niezbędne do jednoznacznego opisu budowy wewnętrznej materiału oraz sposób opisu struktury kompozytu,

- właściwości kompozytów

nacisk położono na te właściwości, które mają istotne znaczenie dla zastosowań konstrukcyjnych oraz na metody badawcze prowadzące do dobrego rozeznania tych właściwości,

- założenia do projektowania

podane zostały zależności teoretyczne lub doświadczalne, na postawie których można przewidywać i projektować materiał o założonych właściwościach oraz określać siły wewnętrzne w elementach konstrukcyjnych poddanych obciążeniu; przedyskutowano założenia upraszczające oraz zakres ważności podanych zależności,

- zastosowania konstrukcyjne

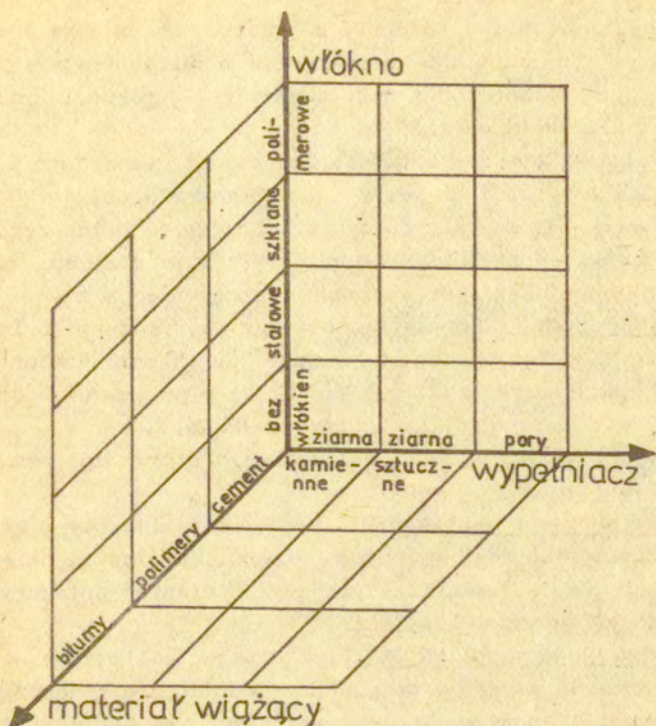
wskazano kierunki zastosowań i przedyskutowano ich uzasadnienie techniczne i ekonomiczne.

Grupy materiałów, jakie mogą stanowić elementy składowe kompozytów betonowych, obrazuje poglądowo Rys. 1-1.

1.3. Podstawowe pojęcia i określenie

Kompozyt - sztucznie wytworzony materiał co najmniej dwufazowy /dwuskładnikowy/, przy czym każdy ze składników zachowuje swoją odrębność oraz określone obszary w kompozycie o właściwościach wynikających z właściwości składników /faz/. Bardzo zbliżona definicja, podana w normie PN-75/C-89103 "Terminologia tworzyw sztucznych. Nazwy ogólne materiałów i produktów" brzmi: kompozyt - materiał składający się z co najmniej dwóch odrębnych faz fizycznych, z których jedna stanowi materiał wiążący, a druga równomiernie w nim rozprowadzony materiał ziarnisty, włóknisty lub warstwowy.

Kompozyt betonowy - kompozyt o matrycy /fazie ciągłej/ kruchej wykonanej z materiału wiążącego mineralnego /cement, wapno, gips itd./ lub organicznego /polimery, bitumy itd./ i wypełniacza /fazy nieciągłej/ wykonanego z ziaren kruszywa naturalnego lub sztucznego, porów, włókien ciętych lub ciągłych z różnych materiałów.



Rys.1-1. Możliwe kombinacje materiałowe w kompozycie.

Faza - jest to część układu ograniczona dostrzegalną powierzchnią od jego reszty, jednolitą w swym wnętrzu, różniącą się właściwościami od materii z drugiej strony powierzchni rozdzielenia. Powierzchnia ograniczająca fazę nosi nazwę granicy faz /W.Tomassi - Podstawa termodynamiki chemicznej, PWN/.

Matryca /ang.matrix/- faza ciągła otaczająca i łącząca pozostałe fazy w kompozycie. Pojęciu matrycy w sensie opisu geometrycznego odpowiada w kompozycie betonowym pojęcie materiału wiążącego /spoiwa, lepiszcza, zaczynu, kompozycji itp./.

Mikrobrojenie - faza włóknista składająca się z długich lub krótkich, smukłych odcinków drutu, przędzy włókien, niewielkich średnic, zazwyczaj poniżej 1 mm.

Fibrobeton - kompozyt betonowy ze spoiwem cementowym i mikro-zbrojeniem w postaci krótkich włókien z różnych materiałów.

Drutobeton - fibrobeton z mikro-zbrojeniem w postaci krótkich odcinków drutu stalowego.

Siatkobeton - kompozyt betonowy ze spoiwem cementowym i mikro-zbrojeniem w postaci siatek z różnych materiałów.

Beton zwykły - szczególny przypadek kompozytu betonowego, w którym spoiwem jest zaczyn cementowy, a wypełniaczem kruszywo mineralne o największych ziarnach większych od 4 mm.

Beton polimerowy - kompozyt betonowy, w którym zamiast lub obok spoiwa cementowego występuje polimer. Określenie "beton polimerowy" obejmuje beton żywiczy /PC/, beton polimerowo-cementowy /PCC/ i beton impregnowany polimerem /PIC/.

Beton żywiczy /PC/ - beton polimerowy, w którym spoiwem jest żywica syntetyczna.

Beton polimerowo-cementowy /PCC/ - beton polimerowy, w którym do mieszanki betonowej wprowadza się polimer lub odpowiedni monomer wraz z dodatkami umożliwiającymi przebieg polimeryzacji /beton modyfikowany polimerami/.

Beton impregnowany polimerem /PIC/ - beton polimerowy wykonany przez nasycenie zwykłego betonu po stwardnieniu monomerem wraz z odpowiednimi dodatkami, a następnie monomer ten jest poddawany polimeryzacji wewnątrz betonu.

Spoiwo żywicze - kompozycja żywicza składająca się z żywicy syntetycznej lub mieszaniny żywic względnie odpowiednich monomerów i dodatków zapewniających właściwy przebieg utwardzania. Spoiwo żywicze może zawierać również inne dodatki np. rozcieńczalniki modyfikujące właściwości mieszanki lub betonu żywicznego.

Mikrozaprawa żywicza - spoiwo żywicze wraz z mikrowypełniaczem.

Mikrowypełniacz - wypełniacz, którego średnica jest mniejsza lub zbliżona do podwójnej grubości otulenia spoiwem pozostałych ziarn kruszywa. W praktyce niezbyt słusznie przyjmuje się dla betonów żywiczych, że maksymalna średnica mikrowypełniacza może wynosić 150 μm .

Podane definicje starają się uwzględnić dotychczasowa tra-

dycję w zakresie nazw i określeń. W stosunku do tradycyjnego betonu kompozyty betonowe są uogólnieniem i rozwinięciem. Już w betonie uwzględnia się zmienność materiału wiążącego przez tworzenie takich pojęć, jak na przykład asfaltobeton oraz zmienność wypełniacza /kruszywa/ przez nazwy w rodzaju trocinobeton, żużlobeton itp.

W kompozytach betonowych, poza zmiennością spoiw i wypełniaczy może dojść również różnorodność fazy włóknistej, która może wykazywać analogię do zbrojenia żelbetu, gdy ma postać siatek, lub odmienność, gdy jest w postaci krótkiego, ciętego, nieuporządkowanego włókna wykonanego ze stali lub innych materiałów. Podana definicja pozwala wyróżnić dość szeroką klasę materiałów konstrukcyjnych i poszukiwać uogólnień i związków ważnych w obrębie całej grupy.

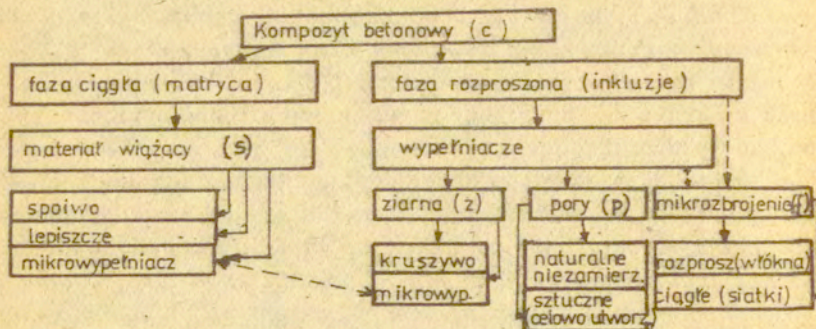
W opisie kompozytu betonowego występują zmienne materiały i zmienne geometryczne. Dlatego w dalszych opisach kompozytów mówi się o składnikach, gdy chodzi o podkreślenie elementów materiałowych kompozytu, lub o fazach, gdy podkreśla się aspekt geometryczny. Rozróżnienie to jest istotne w opisie np. takich elementów struktury jak pory.

Struktura

Przez strukturę kompozytu rozumiemy jego budowę wewnętrzną, opis rozmieszczenia elementów składowych - ziaren, porów, włókien w matrycy /materiale wiążącym/, oraz opis samych tych elementów. Wzajemne relacje elementów struktury pokazuje Rys.1.2. Interesuje nas głównie makrostruktura kompozytu, tj. wzajemne przyporządkowanie i połączenie w całość elementów występujących w reprezentatywnym elemencie objętości /REO/, /2/, w postaci widzialnej /por.Rozdział 5/. Ziarna przenoszą w większym lub mniejszym stopniu obciążenia i tworzą szkielet kompozytu.

Ziarna, które powstały z materiału nieprzenoszącego obciążenia oraz wytworzone pory wypełniają przestrzeń obniżając ciężar objętościowy kompozytu i wpływając na inne jego właściwości. Włókna są składnikiem, z którego utworzona jest faza włóknista /mikrozbrojenie/ struktury. Faza włóknista może mieć rozmaitą budowę i w związku z tym możemy mówić o strukturze fazy włóknistej w kompozycie. Jest to faza przenosząca wyłącznie

rozciągania, powstające w kompozycie w kierunku osi włókien.



Rys.1.2. Elementy struktury kompozytu betonowego

Dzięki niej ulegają poprawie cechy wytrzymałościowe kompozytu. Przez strukturę porów rozumiemy ich budowę i rozmieszczenie. Pory mogą być połączone pomiędzy sobą i tworzyć ciągłą strukturę, mogą również występować pory zamknięte nie łączące się pomiędzy sobą. Struktura porów determinuje dyfuzję wody i pary wodnej w kompozytach, a przez to wpływa na takie zjawiska jak skurcz i pęcznienie; ma również znaczenie dla nasiąkliwości, własności termoizolacyjnych oraz odporności na korozję i zamrażanie kompozytów.

2. Składniki matrycy, zaprawy, betony

Matryca kompozytu fibrobetonowego wykonana jest najczęściej z zaprawy cementowej, to znaczy, że kruszywo ograniczone jest do piasku.

Przy elementach cienkich, zbrojonych włóknami szklanymi lub polipropylenowymi matryca redukuje się najczęściej do zaczynu cementowego tj. mieszaniny cementu z wodą.

W elementach grubszych o włóknach dłuższych, sztywniejszych, matryca może zawierać pewne ilości /na ogół mniej niż 50% / kruszywa frakcji 2-4 i 4-10 mm. Właściwości matrycy mogą być modyfikowane przez domieszki i dodatki specjalne stosowane w niewielkich ilościach.

2.1. Spoiwa cementowe

W betonach z włóknami stalowymi można stosować każdy rodzaj cementu dopuszczonego w konstrukcjach żelbetowych, a więc wszystkie cementy produkowane aktualnie w Polsce. Żaden z produkowanych w Polsce cementów nie nadaje się natomiast do wyrobów z mikrobrojeniem z włókien szklanych. Wyjątek mogą stanowić cementy glinowe łączone z włóknami szklanymi o podwyższonej odporności na środowisko alkaliczne.

Najodpowiedniejszymi cementami do betonów z włóknami stalowymi są cementy o średnim uziarnieniu, a to cementy marek 350 do 450 /miałkość 2800 do 3500 cm^2/g wg Blaina/.

2.2. Spoiwa polimerowe

2.2.1. Ogólne wymagania odnośnie spoiw polimerowych. Rodzaje spoiw.

Jako spoiwa do betonów żywicznych stosowane są ciekłe, zdolne do utwardzania kompozycje żywiczne. W zależności od budowy chemicznej, a więc od długości łańcuchów cząsteczkowych /masy cząsteczkowej/, rodzaju wiązań w łańcuchu głównym, rodzaju i liczby grup funkcyjnych /grup zdolnych do reakcji chemicznej/, rodzaju podstawników, rodzaju i gęstości kowalencyjnych wiązań poprzecznych oraz międzycząsteczkowych sił Van der Waal-
sa żywice syntetyczne mają bardzo zróżnicowane właściwości.

Do betonów żywicznych stosuje się jako spoiwa zarówno żywice utwardzane na drodze polimeryzacji: nienasycone poliestrowe /NP/, epoksydowe /E/, akrylowe /A/, rzadziej poliuretanowe

/PU/, a ostatnio również silikonowe /SI/, styrenowe /S/ oraz kumaronowe-indenowe /KI/, jak i żywice utwardzane na drodze polikondensacji: furanowe /FUR/, fenolowe /F/, rzadziej mocznikowe /M/, a ostatnio butadieno-furfurylowe /BF/, a także melaminowe /ML/.

Różnica o wielkim znaczeniu praktycznym pomiędzy tymi dwoma grupami spoiw polega na wydzielaniu wody jako produktu ubocznego /spoiwa polikondensacyjne/ bądź nie wydzielaniu takiego produktu /spoiwa polimeryzacyjne/. Wydzielanie produktu ubocznego komplikuje proces technologiczny, zwiększa zawartość porów w utwardzonym spoiwie i w konsekwencji oddziałuje na właściwości betonu.

W skład kompozycji żywicznej stosowanej jako spoiwo obok nieutwardzonej żywicy lub monomeru wchodzi układ utwardzający, który na ogół zawiera utwardzacz /środek sieciujący/, inicjator przyspieszacz i ewentualnie inhibitor /opóźniacz/. Na właściwości kompozycji żywicznych można oddziaływać z reguły przez odpowiedni dobór jakościowy i ilościowy wszystkich tych składników.

Do najbardziej rozpowszechnionych spoiw żywicznych należą żywice poliestrowe, epoksydowe, furanowe i akrylowe. W Polsce stosuje się przede wszystkim żywice poliestrowe i epoksydowe, znane pod nazwami handlowymi odpowiednio Polimal i Epidian.

2.2.2. Właściwości żywic syntetycznych [43]

Spojwa żywiczne stanowią białą zróżnicowaną pod względem właściwości grupę materiałów /tabl.2.1./. Wynika to z ogromnej różnorodności rodzajów żywic.

Bardzo istotną cechą decydującą o urabialności mieszanki betonowej, a w konsekwencji o maksymalnym stopniu wypełniania kompozycji jest lepkość.

Niekorzystnie dużą lepkością sięgającą kilkudziesięciu Pa.s odznaczają się żywice epoksydowe. Nowe odmiany żywic epoksydowych oferowane przez przemysł chemiczny, są w coraz większym stopniu przystosowane do specyficznych potrzeb budownictwa. Spośród żywic epoksydowych o lepkości rzędu kilku Pa.s można tu wymienić np. nowo opracowaną polską żywicę Epidian 6. Lepkość pozostałych żywic polikondensacyjnych /FUR, F, M/ będą-

Tab.2.1. Właściwości żywic stosowanych w stanie utwardzonym

Ip.	Właściwości	Jedn.	Żywice utwardzane wg.reakcji:								
			polimeryzacji			polikondensacji					
			NP	E	A	PU	S	FUR	F	M	
			Poliestr, Epoksyd, Akryl, Poliuret, Styren, Furan, Fenol, Mocznik.								
1.	Objętościowy skurcz po utwardzeniu ϵ_s	%	6-12	1-5	5-12	2-5	5-12	2-10	2-10	2-10	
2.	Wytrzymałość na ściskanie R_0	MPa	90-250	90-200	50-150	-	70-150	80-150	25-70	22-50	
3.	Wytrzymałość na zginanie R_g	MPa	50-150	40-150	25-150	-	30-100	35-40	28	-	
4.	Wytrzymałość na rozciąganie R_T	MPa	30-90	30-90	40-120	20-70	45-90	9-15	8,5	-	
5.	Moduł sprężystości E	GPa	1,5-6	1,5-7	3-6	1,5-2,5	2-5	1-14	1-9	1	

cych alkoholowymi lub rzadziej wodnymi roztworami, a także żywicy poliestrowej będącej roztworem styrenowym nie przekracza kilku Pa.s. Nienewtonowski charakter cieczy /lepkość spada ze wzrostem szybkości ścinania/ pozwala na ogół otrzymywać mieszanki betonowe o dobrej urabialności.

Napięcie powierzchniowe decydujące o zwilżalności kruszywa jest podobnie jak lepkość ważnym parametrem technologicznym. Z reguły żywice syntetyczne odznaczają się doskonałą zwilżalnością kruszywa.

Utwardzanie wszystkich omawianych spoiw może w zasadzie zachodzić w temperaturze pokojowej i pod normalnym ciśnieniem, przy czym im temperatura jest wyższa, tym proces przebiega szybciej. Za czas osiągnięcia pełnej sprawności eksploatacyjnej przyjmuje się okres od 3 do 7 dni. Czas ten można wydatnie skrócić stosując dodatkowe wygrzewanie.

Spoiva żywiczne są wrażliwe na obecność wody podczas utwardzania. W mniejszym stopniu dotyczy to żywic utwardzanych na drodze polikondensacji, zwłaszcza jeśli stosowane są wodne roztwory tych żywic. Najbardziej wrażliwe są spoiwa poliuretanowe, a także epoksydowe.

Całkowity skurcz objętościowy utwardzania przyjmuje wartości od kilku % dla żywicy epoksydowej i poliuretanowej do 10, a nawet 12% dla pozostałych żywic. Istotna jest nie tylko maksymalna wartość skurczu, ale i przebieg zmian tej wielkości w czasie, gdyż jest to decydujące dla poziomu naprężeń wewnętrznych kształtujących się w materiale. Najgroźniejszy jest skurcz zachodzący po upływie dłuższego czasu od utwardzenia żywicy, a więc występujący wówczas gdy materiał znajduje się już w stanie szklistym. Wówczas naprężenia wewnętrzne wywołane odkształceniami skurczowymi mają bardzo ograniczoną możliwość relaksacji i zachodzi obawa powstawania rys i pęknięć wyrobu. Z tego powodu najkorzystniejsze są żywice epoksydowe, gdzie po 5 godz. od początku reakcji utwardzania występuje już 60% skurczu całkowitego, podczas gdy dla żywic poliestrowych i furanowych ma miejsce zaledwie 30%.

Jedną z najważniejszych zalet spoiw żywicznych jest bardzo dobra, a w niektórych przypadkach wręcz doskonała odpor-

ność chemiczna. Wszystkie spoiwa żywiczne odznaczają się dobrą odpornością na kwasy. Śródownisko alkaliczne jest bardziej niebezpieczne dla spoiw żywicznych niż kwaśne. Dotyczy to zwłaszcza spoiw fenolowych, a także poliestrowych. Dobrą odporność na zasady, nawet stężone, wykazują spoiwa furanowe, epoksydowe i akrylowe. Żywice syntetyczne są również odporne na większość substancji organicznych takich jak rozpuszczalniki, oleje i płynne paliwa. Do spoiw o stosunkowo najbardziej wszechstronnej odporności chemicznej należy zaliczyć epoksydowe, furanowe i akrylowe. Wadą spoiw akrylowych jest brak odporności na ropę naftową.

Odporność na starzenie utwardzonych żywic jest, jak wszystkich materiałów organicznych, znacznie mniejsza od tradycyjnych materiałów budowlanych. Jednak starzenie spoiwa żywicznego w masie betonu zachodzi wiele razy wolniej niż np. w znacznie cieńszych, antykorozyjnych powłokach ochronnych. Największą odpornością na starzenie spośród omawianych spoiw odznaczają się epoksydowe, poliuretanowe, akrylowe, furanowe i poliestrowe.

Żywice syntetyczne wykazują z reguły bardzo dobrą przyczepność do różnych materiałów. Przy łączeniu jednak żywic z innymi materiałami należy pamiętać o wzajemnym oddziaływaniu składników podłoża i żywicy. I tak nanoszenie na podłoża betonowe żywic nieodpornych na alkalia wymaga uprzedniego zneutralizowania betonu cementowego np. przez fluatowanie. Do łączenia lub pokrywania betonu zwykłego najdogodniejsze są żywice epoksydowe i akrylowe, natomiast stali - epoksydowe, poliestrowe, poliuretanowe i akrylowe.

Spojwa żywiczne odznaczają się bardzo wysoką wytrzymałością mechaniczną.

O odporności cieplnej na podwyższone temperatury można wnioskować na podstawie temperatury mięknięcia. Temperatura mięknięcia dla spoiw polimeryzacyjnych wynosi ok. 330K /60°C/, co stanowi pewne ograniczenie zakresu stosowania tych spoiw. Natomiast dla spoiw polikondensacyjnych temperatura ta wynosi powyżej 420K /150°C/, co w większości zastosowań jest całkowicie zadowalające.

Rozszerzalność cieplna żywic jest znaczna. Współczynnik rozszerzalności cieplnej / α_t / jest kilka, lub nawet kilkanaście

razy większy od współczynnika rozszerzalności cieplnej zaczynu cementowego.

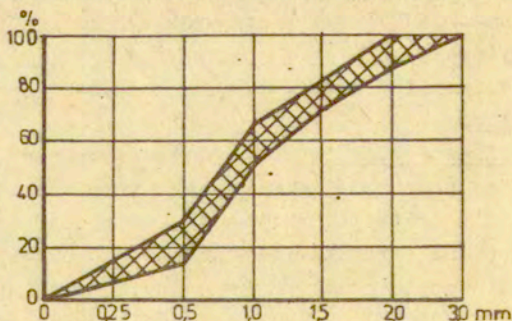
Najpowaźniejszą wadą spoiw żywicznych jest ich wysoki koszt. Koszt najtańszych spośród omawianych żywic /fenolowych i furanowych/ jest kilkadziesiąt razy wyższy od kosztu cementu portlandzkiego. Stosunek ten dla najdroższych żywic epoksydowych i akrylowych kształtuje się powyżej 100 : 1.

2.3. Kruszywo

Do kompozytów betonowych stosuje się piaski kwarcowe o średnicy ziaren do 2 mm oraz z reguły tylko drobne frakcje kruszyw naturalnych i łamanych ze skał magmowych jak granit, bazalt, andezyt. Wskazane są kruszywa o szorstkiej powierzchni i regularnym kształcie ziaren, czyste i niezapylone.

W siatkobetonie wymiar maksymalnej frakcji kruszywa zależy od wymiaru i ilości siatek oraz od technologii wykonania konstrukcji, jednak z reguły wymiar ten nie przekracza 4 mm. Oznacza to praktycznie, że kruszywem w konstrukcjach siatkobetonowych jest piasek. Jakość piasku wpływa zasadniczo na właściwości i jakość drobnoziarnistego betonu. Wielkość i kształt ziaren kruszywa, wytrzymałość, jakość powierzchni i wodozadność kruszywa - to podstawowe czynniki, które o tej jakości decydują

Do zbadanych i zalecanych w Polsce piasków do siatkobetonu zaliczyć można np. piaski filtracyjne dostarczane przez "Besar" z kopalni Zielina koło Opola. Na rys.2.1. przedstawiono przykładowe krzywe przesiewu stosowane do siatkobetonu.



Rys.2.1. Krzywa przesiewu piasku stanowiącego kruszywo do siatkobetonu /3/

Do betonu z ciętymi włóknami stalowymi można stosować każdy rodzaj kruszywa mineralnego, a więc kamienne i sztuczne lekkie, /24/, /26/ pod warunkiem, że beton będzie miał strukturę zwartą. Dopuszczalna wielkość maksymalnych ziarn w kruszywie zależy od rodzaju stosowanych włókien i od wymaganych właściwości betonu.

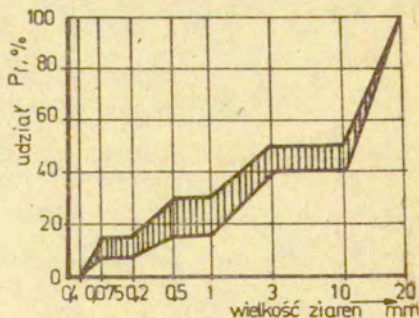
Dotychczasowe doświadczenia dają się streścić następująco:

- a/ najlepsze efekty techniczne i ekonomiczne uzyskuje się przy stosowaniu kruszywa do 4 a nawet do 8 mm,
- b/ największe ziarna nie powinny w zasadzie przekraczać 16 mm, choć w betonie z kruszywem do 32 mm również zauważono pewne pozytywne efekty zastosowania włókien stalowych,
- c/ im większe są ziarna kruszywa, tym mniej udaje się wprowadzić włókien do mieszanki betonowej, /por. 4.2./
- d/ bez względu na wielkość maksymalnych ziaren kruszywa, zawsze trzeba podwyższyć punkt piaskowy w porównaniu z betonem nie zawierającym włókien. Wzrost ten powinien wynosić około 7 do 10% ogólnej ilości kruszywa.

Uziarnienie kruszywa w zakresie frakcji 0/2 i 2/8 lub 2/6 powinno odpowiadać wymaganiom normy PN-75/B-00650 - "Beton zwykły" z tym, że krzywe przesiewu powinny być zbliżone do górnych krzywych granicznych.

Uziarnienie kruszywa do betonów żywicznych najkorzystniej jest dobierać wg minimum wskaźnika jakości kruszywa będącego iloczynem jamistości i powierzchni kruszywa. Najczęściej do betonów żywicznych są stosowane kruszywa o uziarnieniu nieciągłym /rys.2.2./, rzadziej o uziarnieniu ciągłym.

Rys.2.2. Nieciągłe krzywe uziarnienia kruszywa stosowanego do betonów żywicznych.



Jako mikrowypełniacze do betonów żywicznych stosuje się mączki kamienne ze skał o tej samej charakterystyce petrograficznej jak kruszywo podstawowe, np. mączkę kwarcową lub andezytową, a także cementy, popioły lotne, grafit itp.

Użycie kruszywa o gładkiej powierzchni ułatwia uzyskanie dobrej urabialności mieszanki betonowej, zaś zastosowanie kruszyw o szorstkiej powierzchni zwiększa wytrzymałość betonu żywicznego. Przyjętym w praktyce kompromisem jest stosowanie kruszywa łamanego we frakcjach grubych powyżej 5 mm, zaś naturalnego-otoczkowego we frakcjach drobnych.

Przy stosowaniu włókien szklanych powinno się w ogóle unikać stosowania kruszywa, a co najwyżej stosować piasek do 2 mm. W przypadku stosowania kruszyw do betonu z włóknami szklanymi, należy zmienić technikę wprowadzania tych włókien do wyrobów. Nie mogą one być mieszane w betoniarce gdyż ulegają kruszeniu.

3. Mikrobrojenie

Przez mikrobrojenie tworzące fazę włóknistą rozumie się włókna o średnicy $d \leq 1$ mm i stosunku $l/d \geq 50$. Nie jest to definicja precyzyjna ponieważ nie wyjaśnia jaką budowę posiadają pojedyncze włókna i ich układy. Pojedyncze włókno może być jednorodne lub samo może mieć budowę złożoną. Układy włókien mogą mieć postać regularnych siatek, mat, tkanin lub rozproszoną przypadkowo, z pewnymi prawidłowościami rozkładu.

Jako mikrobrojenie stosuje się włókna stalowe, szklane, azbestowe, polimerowe, naturalne włókna roślinne. Niniejsze opracowanie ograniczone jest do kompozytów z włóknami stalowymi, szklanymi i polipropylenowymi. Wspólną cechą wszystkich tych gatunków włókien jest okoliczność, że posiadają wyższą wydłużalność przy zerwaniu niż matryca cementowa. Moduł odkształcalności pierwszych dwóch gatunków włókien jest wyższy niż matrycy cementowej, pozostałe mają moduły niższe.

Na zachowanie mikrobrojenia w kompozycie wpływa zasadniczo okoliczność czy stanowi ono w matrycy fazę ciągłą / jak w siatkobetonie / czy też rozproszoną /uzbrojenie włóknem ciętym/. W pierwszym przypadku eksponowane są własności wytrzymałościowe uzbrojenia, w drugim znaczenia nabierają warunki przyczepności do matrycy cementowej.

Porównawczy opis podstawowych włókien podaje Tab.3.1.

Tab.3.1. Właściwości mechaniczne niektórych włókien.

Material	Srednica	Ciężar obj.	Moduł spręż.	Wytrzymałość	Wydłużenie przy zerwaniu
	/μm/	/10 ³ kg/m ³ /	kN/mm ²	kN/mm ²	/ % /
Stal	5-500	7,8	200	1-3	3-4
Szkło	9-15	2,6	80	2-4	2-3,5
Polipropylen	20-200	0,9	5	0,5	20
Nylon	4	1,14	4	0,9	15
Kevlar					
a/PRD 49	10	1,45	133	2,9	2,6
b/PRD 29	12	1,44	69	2,9	4,0
Azbest					
a/Chryzo	0,02-20	2,55	164	3,1	2-3
b/Krocidolitowy	0,1-20	3,37	196	3,5	2-3

3.1. Włókna ciągle stalowe /zbrojenie siatkobetonu/.

Uzbrojenie siatkobetonu ma postać siatek. Pierwsza funkcja siatek oraz często stosowanych łącznie z nimi prętów lub rurek stalowych jest uformowanie szkieletu odwzorowującego kształt przyszłej konstrukcji. Szkielet przenosi także ciężar nałożonej nań mieszanki betonowej. W okresie jej twardnienia przejmuje powstające w strukturze naprężenia rozciągające, powodowane skurczem betonu, zginaniem i skrecaaniem uformowanego uzbrojenia. Mechaniczne właściwości siatkobetonu zależne są od typu, ilości, orientacji, właściwości wytrzymałościowych, a przede wszystkim od rozproszenia stosowanego mikrouzbrojenia.

Mikrouzbrojeniem siatkobetonu są przede wszystkim siatki z drutów stalowych o średnicach nie przekraczających 1,0 mm i o wymiarach boku oczka siatki nie większego niż 30 mm,.

Ze względu na przyczepność bardziej właściwe są druty falowe niż proste. Kształty oczek mikrouzbrojenia siatkowego mogą być kwadratowe, prostokątne, sześciokątne, rombówce i inne. Najczęściej stosuje się siatki tkane, plecione, zgrzewane, skręcane a niekiedy cięto-ciągnione.

3.1.1. Mikrouzbrojenie siatkowe

W mikrouzbrojeniu siatkowym możemy wyróżnić następujące siatki: tkane, plecione, zgrzewane, skręcane.

Siatki tkane /rys.3.1./ o oczkach kwadratowych, są wykonane z drutu na automacie tkackim, przy czym każda nitka wątku przechodzi kolejno nad i pod określoną liczbą nitok osnowy, tworząc z nimi kąty proste. W wyniku tkania druty siatek nie są proste lecz zafalowane.



Rys.3.1. Siatka tkana

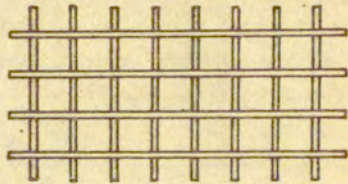
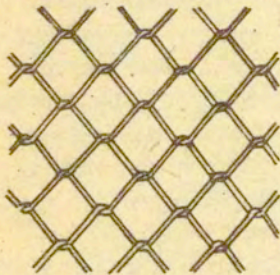
Jako materiał do siatek tkanych stosuje się drut stalowy niskowęglowy, goły lub ocynkowany /powłoka antykorozyjna/.

Ze względu na rodzaj oczek rozróżnia się siatki tkane o oczkach kwadratowych i prostokątnych.

Siatki tkane powodują polepszenie właściwości siatkobetonu, w stopniu znacznie wyższym niż siatki pozostałych rodzajów. Man-
kamentem siatek tkanych jest możliwość występowania przypadkowej zmienności kształtu geometrycznego oczek w trakcie układania zbrojenia.

Siatki plecione. Z tej grupy siatek można stosować jako mikro-zbrojenie siatkobetonu siatki plecione ogrodzeniowe - ślimakowe o oczkach kwadratowych /rys.3.2./. Siatki plecione układają się szczególnie łatwo w konstrukcjach walcowych oraz dwukrzywiznowych o niewielkich krzywiznach.

Siatki zgrzewane. Zapewniają łatwiejsze formowanie kształtu projektowanej konstrukcji /rys.3.3./.



Rys.3.2. Siatka pleciona

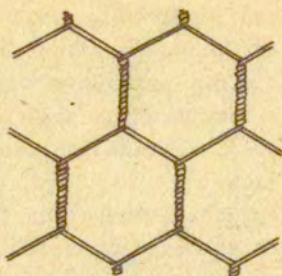
Rys.3.3. Siatka zgrzewana

Słabym miejscem siatek jest punkt zgrzewania, gdyż występuje zjawisko oddzielenia się drutów podczas zbrojenia konstrukcji. Produkowane siatki zgrzewane przeznaczone są do zbrojenia szkła czyli do zbrojenia elementów płaskich, stąd nie przystosowanie węzłów siatek do kształtowania elementów krzywoliniowych.

Siatki skręcane. W krajach Europy Zachodniej najbarziej znane i powszechnie stosowane są siatki skręcane hexagonalne o oczkach sześciokątnych /rys.3.4./.

Jest to uzbrojenie o stabilnych oczkach, łatwe w formowaniu krzywoliniowych kształtów konstrukcji, najtańsze. Służy przede wszystkim do produkcji kadłubów jednostek pływających. Produkowane są z drutu ciągnionego na gorąco, średnica drutu siatek wynosi od 0,5 do 1,0 mm, światło oczka od 10 do 25 mm.

Rys.3.4. Siatka skręcana



W Polsce produkuje się trzy rodzaje siatek skręcanych z oczkami sześciokątnymi, z oczkami sześciokątnymi z drutem środkowym i oczkami trapezowymi.

3.1.2. Właściwości mechaniczne siatek

Charakterystyka siatek tkanych ogólnego przeznaczenia o oczkach kwadratowych wykonanych z drutu odmiany I zawarta jest w PN-76/M-9400, a ich właściwości mechaniczne są określone w PN-75/M-93843. Siatki tkane Rabitza w/g BN-66/5032-01 wykonane z drutu gołego stalowego niskiej wytrzymałości posiadają właściwości mechaniczne określone w PN-67/M-80026. Charakterystykę siatek zgrzewanych, skręcanych, plecionych, cięto-ciągnionych i innych należy każdorazowo określać doświadczalnie.

Wytrzymałość charakterystyczna, w przypadku mikrozbrojenia z reży wykonanego ze stali nie wykazującej wyraźnej granicy plastyczności, jak również odkształceń ściśle liniowych, ma charakter konwencjonalny tzw. techniczny i jest określona jako naprężenie, któremu przy odciążeniu odpowiada wydłużenie trwałe 0,2%. Granicę sprężystości należy przyjmować jako naprężenie odpowiadające wydłużeniu trwałemu 0,02%.

Wytrzymałości charakterystyczne i wytrzymałości obliczeniowe mikrozbrojenia siatkowego przedstawiają się następująco:

wytrzymałość charakterystyczna	220 MPa
wytrzymałość obliczeniowa na rozciąganie	220 MPa
wytrzymałość obliczeniowa na ścinanie	210 MPa
wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie	220 MPa

Współczynnik sprężystości podłużnej należy przyjmować równy 150 GPa.

3.1.3. Zabezpieczenie przed korozją

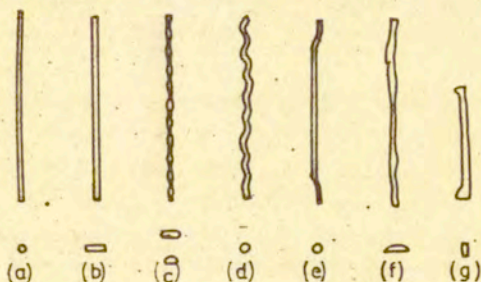
W celu minimalizacji grubości otulenia skrajnych warstw drutu w elementach siatkobetonowych oraz podniesienia odporności na korozję, warstwy zewnętrznych siatek powlekane są antykorozyjną powłoką. W przypadku zwiększonych wymagań antykorozyjnych wszystkie siatki pokrywa się powłoką antykorozyjną. Jako powłokę antykorozyjną najczęściej stosuje się warstwę cynku. Jednak przy długotrwałej eksploatacji powłoka cynkowa może okazać się niedostateczną, dlatego też niezbędnym jest zastosowanie powłok antykorozyjnych z tworzyw sztucznych. Przyczepność siatek do betonu wynika z zakotwienia mechanicznego w punkcie skrzyżowania drutu osnowy z drutem wiatku, zatem stan powierzchni drutu nie ma większego wpływu.

3.2. Włókna z drutu stalowego ciętego

Włókna metalowe do fibrobetonu produkowane są obecnie głównie przez cięcie cienkich drutów stalowych. Dwie inne technologie produkcji włókien są za granicą w fazie prób półtechnicznych /W. Brytania/. Są to:

- cięcie taśm stalowych w kierunku poprzecznym do długości,
- uzyskiwanie włókien przez kontrolowane rozpryskiwanie roztopionego metalu; otrzymywane włókna są znacznie tańsze od ciętych z drutu.

Włókna cięte z drutu są obecnie najczęściej poddawane dalszym operacjom zmierzającym do powiększenia ich przyczepności do betonu /rys.3.5./.



Rys.3.5. Kształty włókien stalowych

Uzyskuje się w ten sposób włókna:

- nagniatane na całej długości /np. Wirand, c/,

- z haczykami na końcach /Dramix, e/,
- z poszerzeniami na końcach /Thibo, g/,
- z zafalowaniami na końcach,
- faliste /d/.

Poprawienie przyczepności jest jednym ze sposobów zwiększenia efektywności mechanicznej włókien.

Wymiary włókna określone są średnicą, długością i współczynnikiem kształtu l/d , który zwykle wynosi od 60 do 140. Maksymalna smukłość /współczynnik kształtu/ ograniczona jest urabialnością mieszanki betonowej i dlatego najczęściej używane są włókna o $l/d = 80$ do 100.

Pod określeniem rodzaju włókien zwykle rozumiany jest zatem ich kształt, rodzaj powierzchni i smukłość.

Jako materiał do wyrobu włókien stosowane są różne rodzaje stali od tzw. miękkiej o $\sigma_R \sim 300 - 400$ MPa do tzw. stali twardej o $\sigma_R \sim 1500$ MPa. Średnice włókien wynoszą od 0,25 do 0,75 mm, najczęściej od 0,25 do 0,4 mm.

Niekiedy włókna stalowe są powlekane innym metalem, np. mosiądzem lub cyną, w celu podwyższenia odporności na korozję.

W Polsce włókna do fibrobetonu nie są produkowane w skali przemysłowej. Drobne ilości wytwarzane rzemieślniczo i laboratoryjnie pokrywają potrzeby badawcze. W Europie Zachodniej, USA, włókna do fibrobetonów produkowane są przez szereg firm w cenie ok. 1 dolar USA za 1 kg.

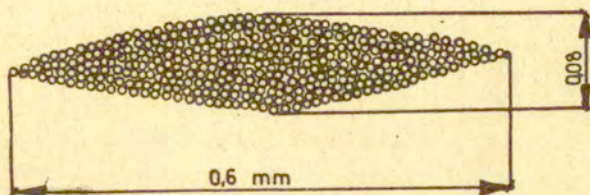
Jeżeli przy projektowaniu fibrobetonu przewiduje się stosowanie włókien importowanych, to należy wybrać ich rodzaj uwzględniając aktualne ceny i efektywność różnego rodzaju włókien.

Spośród stosowanych za granicą włókien, które cechuje dobra efektywność i które mogłyby być stosunkowo łatwo uzyskane w kraju, można wymienić włókna o przekroju prostokątnym. Powinny to być włókna o przekroju w granicach 0,2 do 0,5 mm i długości 25 do 40 mm. Nie jest oczywiste, czy kształtowanie powierzchni drucików przynosi efekty adekwatne do zwiększonych kosztów produkcji.

3.3. Włókno szklane ciągłe i cięte. Siatki szklane.

Stosowane jako mikrobrojenie włókna szklane wytwarzane są techniką wyciągania. Pojedyncze włókno ciągnięte ma średni-

cę 4 do 13 μm . Dalszy proces technologiczny polega na tworzeniu pasm z włókien elementarnych - rovingu /pasm bez skrętu/ lub przędzy - pasm ze skrętem. Z materiałów tych, rovingu lub przędzy mogą być tworzone tkaniny, a z włókna cietego maty. Ze względu na kruchość i wiotkość włókna szklane nie nadają się do betonu lecz jedynie do zaczynów cementowych, lub co najwyżej do zapraw cementowych. Stosuje się włókno o przekroju jak na rys.3.6. /12/.



Rys.3.6. Przekrój włókna rovingu

Powierzchnia przekroju rovingu wynosi $A_F = 0,01 + 0,07 \text{ mm}^2$, w zależności od średnicy włókna podstawowego, przy 204 do 240 włókien podstawowych w paśmie. Czynną powierzchnię uzbrojenia określa obwód czynny włókna rovingu $P_F = 1,4$ do $2,8 \text{ mm}$.

Szkło zajmuje około 34% objętości włókna rovingu.

Włókno ciągnięte występuje w trzech grupach szkła. Własności szkła ciągniętego podano w tablicy 3.2.

Włókno szklane ulega w zaczynie cementowym korozji alkalicznej. Tablica 3.3. przedstawia odporność włókien szklanych na działanie alkaliów. W celu zmniejszenia korozji alkalicznej włókien stosuje się:

- impregnację włókien żywicami epoksydowymi lub polivinilem,
- cementy o zmniejszonym pH, np. cement glinowy,
- dodatki do cementu jak pyły dymnicowe lub puzzolane,
- szkło odporne na działanie zasad - szkło zirkonowe.

Warto podkreślić, że żadne z produkowanych włókien szklanych nie jest w pełni odporne na korozję alkaliczną i dlatego ich zastosowanie konstrukcyjne jest ograniczone.

Siatki

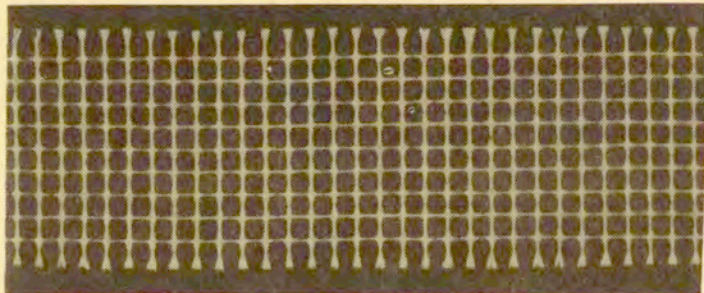
Z włókien szklanych produkowane są między innymi siatki /Rys.3.7./ o oczkach 3 do 6 mm o różnym typie splotów, z apreturą włókienniczą lub plastyczną /5/. Mogą być one również nasycane żywicami.

Tablica 3.2. Własności podstawowego włókna szklanego.

Własności	Szkło		
	Typ A sodowo-wapniowe	Typ E borokrzemowe	alkaloodporne zirkonowe
Gęstość g/cm ³	2,46	2,54	2,78
Wytrzymałość na rozciąganie MN/m ²	3100	3500	2500
Moduł sprężystości GN/m ²	65	72,5	70
Wydłużenie przy pękaniu %	4,7	4,8	3,6

Tablica 3.3. Odporność włókien szklanych na korozję alkaliczną. Zmniejszenie w procentach promienia włókna w wyniku przebywania w środowiskach agresywnych w temperaturze 100°C.

Gatunek szkła	NaOH - 1.5h	Ca(OH) ₂ - 4h
Pyrex	22	22
typ A	15	10
typ E	59	9
szkło alkalioodporne	5	1



Rys.3.7. Siatka szklana produkcji RFN.

3.4. Włókna polimerowe.

Stosowane są włókna polipropylenowe o średnicy 0,1 + 0,2 mm uzyskiwane techniką wyciągania. Struktura włókna jest złożona i składa się z amorficznej masy wzmocnionej mikrowłóknami powstałymi w procesie ciągnięcia. Włókno posiada budowę podobną do włókien szklanych ze skretem lub bez /por.3.3./ i jest

cięte na odcinki od 25 do 75 mm. Wytrzymałość na rozciąganie wynosi 400 MPa.

Moduł sprężystości 1 - 8 GPa jest wielokrotnie niższy od modułu sprężystości matrycy betonowej, który jest rzędu 30 GN/m². Moduł ten wzrasta wraz z prędkością obciążenia i dynamiczny moduł sprężystości jest większy od 10 GPa, dzięki czemu włókno jest przydatne do ustrojów poddanych uderzeniom.

Do ujemnych cech włókna zaliczyć należy brak odporności na wzrost temperatury; topi się w temperaturze 165°C. Obniża ono rysoodporność kompozytu wskutek niskiego modułu sprężystości. Należy podkreślić, że trwają poszukiwania nowych włókien organicznych do betonu o zwiększonej wytrzymałości i module sprężystości /por.Tab.3.1./.

3.5. Inne rodzaje włókien

Poza szeroko stosowanym włóknem azbestowym próbowano także stosować włókna organiczne celulozowe, sizalowe, kevlarowe, nylonowe, perlonowe, polietylenowe oraz z wełny mineralnej /12/ /13/, /14/. Wszystkie te włókna mogą być jednak łączone tylko z zaczynem cementowym ze względu na ich kruchość bądź wiotkość.

4. Podstawy technologiczne

Technologie wykonania kompozytów betonowych są bardzo zróżnicowane. W zależności od rodzaju włókien mogą to być wszystkie znane techniki tradycyjne wykonania zaczynów, zapraw i betonów lub też muszą być wprowadzone specjalne technologie. W opracowaniu pominięto informacje odnoszące się do tradycyjnej, klasycznej technologii betonu podkreślając jedynie elementy nowe, wyróżniające rozważany materiał kompozytowy.

Przyjęty sposób wykonywania wpływa w sposób istotny na:

- układ i maksymalną objętość mikrobrojenia, którą można umieścić w matrycy. Największy procent uzbrojenia, dochodzący do 15% objętościowo uzyskuje się w technikach nawijania włókna szklanego ciągłego /np. w produkcji rur/. Techniki natryskiwania ciętych włókien szklanych pozwalają na umieszczenie w matrycy mikrobrojenia o objętości dochodzącej do 10%. Zastosowanie tradycyjnych metod przygotowania mieszanki betonowej przez dodanie włókien stalowych lub propylenowych w fazie mieszania składników ogranicza możliwość uzbrojenia matrycy do max. 2,5%. Istotnym czynnikiem wpływającym na objętość włókien możliwą do umieszczenia w matrycy jest struktura granulometryczna stosu okruszowego. Wraz ze wzrostem średnicy ziarn objętość ta maleje.

4.1. Zaprawy i betony uzbrojone włóknami ciągłymi.

/Siatkobeton - ferrocement/

Materiał ten stosowany jest w ustrojach cienkościennych, o grubościach nie przekraczających na ogół 30 mm, /3/.

Mała grubość elementów siatkobetonowych, konieczność właściwego rozmieszczenia siatek w przekroju, nieduże tolerancje wymiarów elementu wymagają produkcji o dużym stopniu zmechanizowania.

Wibroprofilowanie - element jest formowany na urządzeniu wibroprofilującym, którego dolna część, tzw. wzornik, ma kształt dostosowany do kształtu przekroju poprzecznego elementu. Wzornik jest sprzężony z zasobnikiem, wewnątrz którego zawieszona jest drgająca przepona. Forma wraz z ułożonym na niej uzbrojeniem przesuwana się po szynach pod urządzeniem wibroprofilującym.

Wibroprasowanie ślizgowe - samojezdne urządzenie do wibrowania ślizgowego składa się z zasobnika mieszanki betonowej połączo-

nego z częścią wibrująco-prasująca oraz częścią wygładzająca.

Schemat działania urządzenia przedstawia się następująco: po umieszczeniu zbrojenia urządzenie z zasobnikiem napelnionym mieszanką betonową przesuwa się nad formę. Mieszanka betonowa dostaje się między część prasująca a formę, a następnie przy ciągłym ruchu prasy wzdłuż formy i ciągłej wibracji następuje zagęszczenie i prasowanie mieszanki betonowej. Ostateczny kształt nadaje elementowi najbardziej oddalona od zasobnika część prasująca. Część wygładzająca urządzenia nadaje elementowi wymaganą fakturę.

Wibroprasowanie stacjonarne - beton jest zagęszczony wibratorem posiadającym płytę dociskową. Płyta ta, będąca górną częścią formy, ma wymiary odpowiadające wymiarom całego formowanego elementu.

Wibroodlewanie - elementy siatkobetonowe wykonywane są w dwustronnych formach stalowych, wewnątrz których ułożone zostaje uprzednio uzbrojenie siatkowe. Odpowiednią ciekłość mieszanki uzyskuje się przez jej plastyczną konsystencję i upłynniające działanie intensywnie wibrowanych form.

Gięcie - sposobem tym formowane są elementy faliste, fałdowe lub elementy o przekrojach kołowych. Formowanie rozpoczyna się od wykonania elementu płaskiego, który w stanie świeżym, nie-stwardniałym jest gięty do właściwego kształtu. Forma, na której spoczywa element, posiada w miejscach gięcia odpowiednie przeguby metalowe lub gumowe.

Natryskiwanie - elementy wykonywane są przez narzucanie mieszanki betonowej na uzbrojenie siatkowe za pomocą agregatu tynkarskiego lub torkretnicy. Powierzchnia elementu jest wygładzana ręcznie lub mechanicznymi zacieraczkami. Stosowane są różne konstrukcje dysz wylotowych oraz zróżnicowane sposoby przygotowania mieszanki / mokry lub suchy torkret/.

Sposób ten stosowany jest w przypadku konstrukcji o złożonym kształcie. Wadą tego sposobu jest m.in. duże zużycie betonu wskutek strat pewnej części materiału wywołanych tzw. odbiciem oraz znaczne nakłady pracy ręcznej, związane z zacieraaniem nierówności na powierzchni zewnętrznej.

Formowanie injekcyjne - sposób ten polega na tłoczeniu drobnoziarnistej mieszanki betonowej pod ciśnieniem do zamkniętej,

dwustronnej formy zawierającej uprzednio ułożone zbrojenie z siatek. Iniekcję łączy się czasem dodatkowo z próżniowaniem.

4.2. Zaprawy i betony uzbrojone włóknem ciętym stalowym.

Dodatek włókien stalowych obniża urabialność mieszanki. Stąd między innymi wynika konieczność ograniczenia objętości dodawanych włókien. Można wyróżnić minimalną, maksymalną i optymalną objętość włókien. Minimalna to taka, przy której zauważa się pozytywny wpływ włókien. Maksymalna to objętość włókien odpowiadająca ilości możliwej technologicznie do wprowadzenia do mieszanki przy jednoczesnym najwyższym wpływie na właściwości betonu. Optymalna natomiast to taka objętość, która daje się stosunkowo łatwo wprowadzić do betonu a jej wpływ na właściwości betonu jest istotny. Optymalna objętość włókien odpowiada w przybliżeniu średniej arytmetycznej z ilości minimalnej i maksymalnej. Optymalna objętość włókien zależy od wielkości ziarn zastosowanego kruszywa. Im większe są ziarna kruszywa, tym mniej jest przestrzeni o takiej wielkości, żeby włókna stalowe mogły się w nich swobodnie mieścić i dlatego też mniejsze są dla nich optymalne objętości włókien. W przybliżeniu można przyjąć, że optymalna objętość włókien wynosi:

- przy kruszywie do 2 mm - 1,8% objętości betonu,
- przy kruszywie do 4 mm - 1,5% objętości betonu,
- przy kruszywie do 8 mm - 1,2% objętości betonu,
- przy kruszywie do 16 mm - 0,9% objętości betonu,
- przy kruszywie do 32 mm - 0,6% objętości betonu.

Podane objętości mogą ulegać drobnym zmianom w zależności od kształtu ziarn i kruszywa i od objętości zaprawy w betonie. Ogólnie można przyjąć, że optymalny skład zaprawy lub betonu nie zawierającego włókien musi ulec następującym zmianom po dodaniu włókien:

- zawartość cementu zwiększy się o około 10 %,
- zawartość piasku /ziarn kruszywa do 2 mm/ zwiększy się o 20% w stosunku do całości kruszywa.

Do wykonania mieszanki betonowej z dodatkiem włókien stalowych i do jej zagęszczania można stosować wszystkie znane sposoby przy wykonywaniu betonu zwykłego. Należy je dobierać odpowiednio do potrzeb i możliwości stosowania z uwzględnieniem, że można wyróżnić sposoby zagęszczania więcej lub mniej

efektywne.

Mieszankę drutobetonową wykonuje się przez mieszanie wszystkich składników /wraz z włóknami stalowymi/ w mieszarkach do urabiania zapraw i w betoniarkach normalnie stosowanych w budownictwie. Jedyną różnicą jest konieczność wprowadzania włókien w postaci całkowicie rozproszonej i wsypywanie ich w sposób ciągły do stale obracającego się bębna, w którym następuje mieszanie składników.

Włókna stalowe można wprowadzać do wymieszanych już uprzednio tylko suchych składników, a wodę dolewać równomiernie wraz z dodawaniem włókien lub już po zakończeniu wsypywania włókien.

Stosuje się również wsypywanie włókien po wymieszaniu wszystkich tradycyjnych składników betonu a więc i z wodą. Wiele wyników badań wskazuje, że pierwszy sposób jest lepszy, gdyż w tym przypadku występuje mniejsza tendencja do zbijania się drucików w kule /ang. balling/, a ponadto uzyskuje się nieco korzystniejsze cechy wytrzymałościowe. Druciki w tym przypadku są lepiej oczyszczone z ewentualnych śladów zaciwienia, co daje wyższą przyczepność drucików do matrycy betonowej.

Włókna stalowe powinny być dostarczane w paczkach lub workach. Dostarczane włókna mają zwykle postać zbita. Dla rozdzielania włókien na poszczególne druciki przy wprowadzaniu do bębna stosuje się różne sposoby, np. sita wibrujące, układ wałców szybkoobrotowych zaopatrzonych w bolce, przepuszczanie przez pionową rurę zaopatrzoną na końcu w układ dwóch ramion obracających się poziomo w przeciwnych kierunkach, wiertarki zaopatrzone w specjalne końcówki do rozdzielania włókien. Stosuje się także urządzenia pneumatyczne, choć te są szczególnie przydatne a nawet niezastąpione przy wprowadzaniu włókien wiotkich np. szklanych. Firma Bekaert w Belgii produkuje druciki pod nazwą "DRAMIX", charakterystyczne między innymi tym, że są one przyklejone do siebie podobnie jak zszywki do papieru. Ten typ drucików można wrzucać do mieszarki tak jak inne składniki; przy tym niekoniecznie podczas ruchu betoniarki. Pod wpływem wody i mechanicznego oddziaływania kruszywa podczas mieszania, druciki rozdzielają się i rozprowadzają równomiernie w masie betonu bez tworzenia zbitych grud. Jest to bardzo wygodne w

praktycznym stosowaniu. Zbyt długie i powolne mieszanie może prowadzić do tworzenia się wspomnianych kul.

Mieszankę betonową zawierającą włókna stalowe można transportować w identyczny sposób jak beton zwykły, ale należy raczej unikać mieszania w czasie transportu ze względu na tworzenie zbitków z drutów. Z powodzeniem można stosować transport pompą, Trzeba przy tym uwzględnić, że średnice przewodów muszą być co najmniej 2,5 raza większe od długości stosowanych włókien. W przypadku transportu pompami typu "Stetter" nie wolno dopuścić, aby mieszanka zawierała zbitki z drutu o zbyt dużych średnicach i dlatego należy wyprodukowaną mieszankę wprowadzić do pompy przez sito o oczkach 60 mm.

Ponieważ mieszanka z włóknami zagęszcza się znacznie trudniej niż beton zwykły, stosuje się w praktyce z reguły tylko mieszanki o konsystencjach od ciekłej po plastyczną.

Ze względu na wrażliwość mieszanki drutobetonowej na bodźce zagęszczające można ustalić następującą kolejność skuteczności zagęszczenia zaczynając od najskuteczniejszej: próżnio - prasowanie, wstrząsanie, wibroodwadnianie, odwadnianie, ubijanie, wibrowanie wibratorem powierzchniowym, wibrowanie wibratorem wgłębnym, wibrowanie na stole wibracyjnym. W przypadku wibrowania, wibratory powinny posiadać częstotliwość co najmniej 60 Hz, a mieszanka powinna być o konsystencji plastycznej lub półciekłej.

Beton z włóknami stalowymi wymaga w okresie dojrzewania starannej pielęgnacji, przy czym nie różni się ona od sposobów postępowania z betonem zwykłym.

Do szczególnych przypadków stosowania drutobetonu należy wykonywanie elementów rurowych metodą wirowania oraz układanie betonu metodą natryskiwania, /22/, /23/.

Mieszanka drutobetonową przeznaczoną do wykonywania elementów przez wibrowanie musi się charakteryzować następującymi właściwościami:

- konsystencja półciekła o rozpięty $d_0/D = 1,5$ w badaniu normowym na stoliku wstrząsowym stosowanym do badania ciekłości zapraw,
- zawartość włókien stalowych w ilości 1 % objętości betonu,
- w przypadku kruszywa o wielkości ziarn największych do 4 lub

8 mm, punkt piaskowy powinien wynosić odpowiednio 55 i 45 %.

Mieszanka przeznaczona do układania metodą natryskową /torkret/ musi posiadać następujące właściwości:

- rodzaj cementu jak w przypadku zwykłego betonu przeznaczonego do narzucania,
- kruszywo naturalne otoczkowe o możliwie największej szczelności stosu i z ziarnami o średnicy 8 mm,
- dozwolone jest stosowanie dodatków tych samych co do betonu zwykłego,
- włókna stalowe o długości 20 do 30 mm, l/d 60 - 100, z możliwie miękkiej stali $R_{t} \approx 200 \text{ MPa}$, w ilości 1,3 do 2 % obj. /min. 1 % obj./. Należy stosować raczej wyższe ilości drutu, gdyż część ich /ok. 20 % przy metodzie mokrej i do 30 % przy metodzie suchej/ odpada przy narzucaniu, w wyniku odbijania się od torkretowej powierzchni,
- ilość cementu 300 - 600 kg/m^3 ,
- konsystencja zależy od typu agregatu natryskowego.

Mieszankę przeznaczoną do natryskiwania można wykonywać zarówno metoda na sucho jak i metoda na mokro. Korzystniejsza jest metoda na mokro, gdyż uzyskuje się wtedy bardziej jednorodną mieszankę i mniejsze straty przy narzucaniu betonu.

Przemysł budowlany w kraju posiada urządzenia do stosowania tej metody. Przewody do mieszanki drutobetonowej powinny mieć średnicę min. 50 mm.

4.3. Zaprawy i betony uzbrojone włóknem szklanym.

W szkło-cemencie stosuje się uzbrojenie włóknem szklanym ciętym w ilości od 2% do 6% w stosunku do objętości mieszanki. Odpowiada to od 2,5% do 7,5% w stosunku do masy składników. Wielkości te odpowiadają uzbrojeniu płaskich elementów, w których włókno szklane tworzy rozrzucone, płasko zorientowane układy.

Możliwe uzbrojenie aż do 17% objętościowo /14/ większych trójwymiarowych elementów nie ma większego znaczenia praktycznego ze względu na trudności technologiczne dobrego wymieszania i ułożenia kompozytu. Duże procenty uzbrojenia /powyżej 7,5%/ powodują trudności z rozmieszczeniem włókien w kompozycie, uzyskaniem właściwej gęstości kompozytu i efektywności włókien. Koszt włókien przy tych samych procentach uzbrojenia sta-

je się zbyt wysoki w stosunku do uzyskanych efektów.

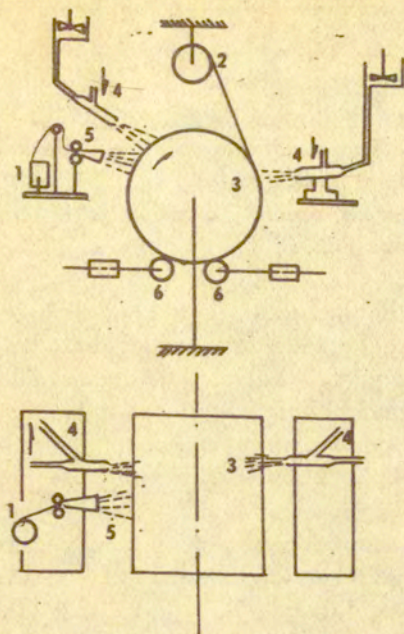
Długość ciągłego włókna wynosi od 10 mm do 40 mm.

Jako spoiwa stosuje się cement portlandzki i glinowy.^{x/} Przy zastosowaniu cementu portlandzkiego stosuje się zaczyn cementowy o wskaźniku w/c = 0,28 do 0,33. W celu zmniejszenia alkaliczności cementu dodawane są do mieszanek pyły lub puzzolana w ilości do 40%. Dla uplastycznienia mieszanki dodawane są dodatki do cementu jak metyloceluloza lub polietylen w ilości 0,1 % do 1% wody zarobowej.

Proces mieszania i formowania może przebiegać w sposób tradycyjny. Do specjalnych technik zaliczyć można próżniowanie, prasowanie lub wytłaczanie. Stosowana jest również technika natryskowa w której jedna dysza podaje zaczyn cementowy, a druga rwie ciągle włókno i narzuca je na ciasto cementowe /rys.4.1./. Wysoką mechanizację procesu nawijania włókna ciągłego i procesu torcretowania uzyskano w produkcji rur i ciągłej produkcji płyt. Dzięki tym technikom uzyskuje się częściowo zorientowaną strukturę fazy włóknistej.

Kompozyty uzbrojone włóknem szklanym są upatrywane jako substytut azbestocementu, stąd duże zainteresowanie przemysłowymi technologiami produkcji.

^{x/} Należy podkreślić, że w pełni przydatne do kompozytów uzbrojonych włóknem szklanym jest spoiwo gipsowe, nie wywołujące korozji mikrobrojenia.



Rys.4.1. Schemat procesu produkcji rur cementowo - szklanych.

- 1- włókno ciągle do cięcia na szpuli
- 2- roving do nawijania
- 3- obracająca się rura
- 4- dysza zaczynu cementowego
- 5- dysza włókna ciętego
- 6- wałki dociskowe

4.4. Zaprawy i betony uzbrojone włóknem polipropylenowym.

Procent uzbrojenia włóknami waha się w granicach od 1,5 do 7 % objętościowo.

Stosowana jest w zasadzie tradycyjna technologia mieszania i formowania. Cięcie włókna, które przychodzi w szpulach lub motkach odbywa się w wytwórni betonów.

Świeża mieszanka z dodatkiem włókien polipropylenowych i plastyfikatorów może wykazywać interesujące własności np. zjawisko tixotropii /ruch niszczy strukturę/ a w pewnych przypadkach odwrotnie, reopeksji /ruch tworzy strukturę/. W Angli wykonuje się betony z dodatkiem włókien polipropylenowych oznaczające się walorami termoizolacyjnymi i architektonicznymi oraz łatwością formowania /Faircrete/. Stosowane jest włókno

średnicy 0,1 - 0,2 mm długości 1,0 - 10 mm.

4.5. Zaprawy i betony polimerowe.

4.5.1. Betony impregnowane polimerami /PIC/.

Racjonalnie zaprojektowany proces otrzymywania betonu za-impregnowanego polimerem obejmuje:

- otrzymanie elementu z betonu cementowego o odpowiednio ukształtowanej strukturze porów,
- dobór impregnatu,
- przeprowadzenie impregnacji.

W przypadku przeprowadzenia impregnacji "in situ" beton cementowy jest tworzywem o danych właściwościach, do którego należy dostosować technikę impregnacji. Natomiast w procesie otrzymywania prefabrykowanych elementów, który jest typowym zastosowaniem technologii PIC, strukturę betonu cementowego należy optymalizować z punktu widzenia wymagań impregnacji. Problem ten jest skomplikowany. Z jednej strony dąży się bowiem do uzyskania porowatej struktury możliwie najłatwiejszej do wypełnienia ciekłym impregnatem, a więc składającej się przede wszystkim z sieci porów otwartych, z drugiej zaś strony limitowana jest ilość wprowadzanego impregnatu co związane jest z wymaganiami wytrzymałościowymi oraz względami ekonomicznymi. Stąd też przyjęta jako optymalna porowata struktura tworzywa cementowego musi być efektem kompromisu między tymi dwoma zależnościami.

W wyniku badań /40/ stwierdzono:

- 1°. Do betonów przeznaczonych do impregnacji mogą być wykorzystane ogólnie stosowane spoiwa cementowe, przy czym należy preferować cementy portlandzkie o średnim stopniu rozdrobnienia.
- 2°. Przy projektowaniu składu mieszanki przyjmować należy wielkości wskaźnika w/c w granicach od 0,4 do 0,5.
- 3°. Zawartość objętościowa zaczynu w betonach powinna wynosić orientacyjnie od 0,25 do 0,3, przy czym przy jej ostatecznym ustalaniu kierować się należy warunkiem poprawnej urabialności.
- 4°. Betony cementowe winny być wykonane jedynie z udziałem kruszywa najwyższej jakości, zaś ich uziarnienie winno spełniać warunek maksymalnej szczelności.
- 5°. Korzystnym zabiegiem wobec betonów cementowych przeznaczo-

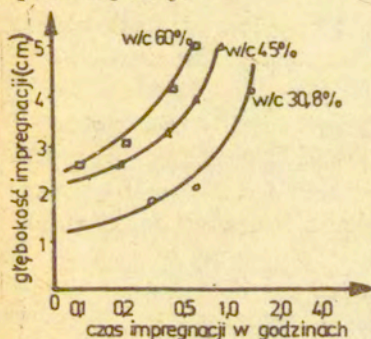
nych do impregnacji jest stosowana ogólnie w prefabrykacji obróbka termiczna systemem naporzania niskoprężnego.

W celu otrzymywania PIC jako impregnaty stosuje się z reguły monomery lub niskocząsteczkowe chemoutwardzalne żywice syntetyczne.

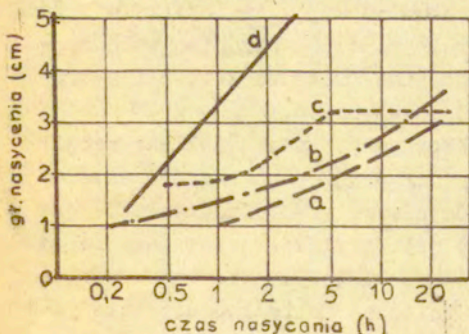
O przydatności impregnatu do otrzymywania PIC decydują nie tylko cechy technologiczne jak lepkość, lotność /prężność par i temperatura wrzenia, łatwość kontrolowanej polimeryzacji itp./, ale też cechy użytkowe polimeru, które w istotny sposób rzutują na kształtowanie się właściwości PIC. Spośród różnych monomerów najpowszechniej stosowany jest metakrylan metylu.

Proces impregnacji składa się z następujących podstawowych operacji technologicznych:

- suszenie betonu,
- odgazowanie /próżniowanie/ betonu,
- nasylenie /rys.4.2 , 4.3./,
- polimeryzacja



Rys.4.2. Głębokość impregnacji a współczynnik wodno-cementowy.



Rys.4.3. Wpływ metody nasycenia na głębokość nasycenia
a-nasycenie grawitacyjne
b-odgazowanie przed nasyceniem
c-nasycenie pod ciśnieniem
d-odgazowanie oraz nasycenie pod ciśnieniem

Suszenie. Warunkiem prawidłowej technologii polimerobetonu jest właściwe wysuszenie elementu przeznaczonego do impregnacji. Maksymalna ilość monomeru jaką można nasycić impregnowany beton zależy od objętości wolnych przestrzeni znajdujących się w betonie oraz od poziomu ewakuacji zeń wilgoci i powietrza. Stopień wysuszenia betonu zależy od temperatury, czasu i metody suszenia z jednej strony oraz od wielkości, kształtu i struktury suszonego elementu z drugiej strony.

W skali półtechnicznej i technicznej stosowane są autoklawy i tunele do suszenia, które służą często również do nasycania i polimeryzacji.

Temperatura suszenia ograniczona jest warunkiem uniknięcia pęknięć termicznych i skurczowych.

Impregnacja. Rodzaj monomeru ustala się biorąc pod uwagę wymagania technologiczne /mała lepkość/, spodziewane warunki środowiska /temperatury, działania soli, kwasów, wody opadowej/ oraz wymagane właściwości betonu.

Zabiegi próżniowania i stosowanie nadciśnienia przy impregnacji zwiększają głębokość i skracają czas penetracji monomeru. Są one jednak kosztowne.

Powierzchnie drogowe impregnuje się przez zalanie systemem monomerowym wysuszonej poprzednio nawierzchni. Nasycenie grawitacyjne płyty na głębokość 25 mm trwa w tych warunkach 2-4 godz. Zastosowanie próżni na powierzchni betonu przez 15 do 30 minut skracą okres nasycenia dwukrotnie.

Inna metoda polega na posypywaniu wysuszonej powierzchni betonu warstwą wysuszonego piasku grubości 6 do 10 mm.

Warstwę tę nasycą się następnie monomerem, który wsiąka w beton. Warstwa piasku służy jako zbiornik monomeru chroniąc wsiąknięty w beton monomer przed odparowaniem. Możliwe jest 2 i 3-krotne uzupełnienie monomeru, co 2 do 4 godzin.

Polimeryzacja. Spośród trzech stosowanych metod polimeryzacji /termiczna, chemiczna i radiacyjna/ powszechne zastosowanie w polimerobetonach znalazła metoda pierwsza - termokatalizy, jako najtańsza i skuteczna. Przed polimeryzacją ważne jest zabezpieczenie monomeru przed odparowaniem. W tym celu można powlekać powierzchnie farbą lub zabezpieczać folią lub wreszcie polimeryzować w gorącej wodzie czy oleju. Do polimeryzacji polo-

wej większych powierzchni stosuje się gorące powietrze. Można również stosować parę wodną lub gorącą wodę pod warunkiem zabezpieczenia folią przed wypłukiwaniem monomeru. Warstwa wody grubości około 7 cm, o temperaturze $+82^{\circ}\text{C}$, jest wystarczająca przy użyciu jako monomeru metakrylanu metylu. Stosowanie katalizatorów zwykle pozwala na obniżenie temperatury do 60°C a nawet do temperatury pokojowej. Nadmierne podwyższenie temperatury może być szkodliwe dla zachodzących reakcji. Czas polimeryzacji zależy od głębokości zaimpregnowanego monomeru i wymiarów elementu. Przy powierzchniowej polimeryzacji płyty mostowej konieczne jest na przykład działanie temperatury 70°C przez co najmniej 6 godzin. Polimeryzacja przez radiację /promieniotwórczość gamma/ nie była na szerszą skalę w krajowych pracach stosowana. Zaletą tej metody jest polimeryzacja w niskiej temperaturze /co zmniejsza parowanie monomeru/ i na dowolnej głębokości co zapewnia lepszą efektywność. Nie wymagany jest inicjator chemiczny, a uzyskany produkt ma większą masę cząsteczkową i co za tym idzie większą wytrzymałość. Możliwość stosowania impregnatu nie zawierającego inicjatora znacznie zmniejsza niebezpieczeństwo zżelowania monomeru poza właściwym elementem betonowym poddawany impregnacji, co zmniejsza wielkość opadu technologicznego, zwiększając równocześnie pewność prowadzenia procesu.

4.5.2. Betony cementowo - polimerowe /PCC/

Betony cementowo-polimerowe otrzymuje się przez wprowadzenie do świeżej mieszanki betonu cementowego monomeru lub polimeru. Z punktu widzenia operacji technologicznych i stosowanych urządzeń proces otrzymywania PCC jest bardzo zbliżony do wytwarzania betonu zwykłego.

Do PCC stosuje się środki modyfikujące w postaci lateksów np. kauczuków syntetycznych, emulsji wodnych np. polimerów termoplastycznych i żywic utwardzalnych, a także ciekłych monomerów i żywic utwardzalnych zwłaszcza w postaci odmian rozpuszczalnych w wodzie, oraz sproszkowanych termoplastów.

W zależności od natury chemicznej użytego modyfikatora, równocześnie z wiązaniem zaczynu cementowego może zachodzić reakcja chemiczna polimeryzacji monomeru lub utwardzania żywicy, bądź w przypadku użycia gotowych polimerów jedynie przemiany fizyczne takie jak odebranie wody z lateksu dla celów

hydratacji cementu, czy też stopienia termoplastu i częściowe wypełnienie nim porów /ten ostatni przypadek wymaga specjalnej obróbki cieplnej betonu/.

Podstawową trudność stanowi dobór środka modyfikującego. Główną przyczyną występujących trudności przy sporządzaniu PCC jest niemieszalność większości organicznych substancji z roztworami wodnymi zaczynu cementowego. W wielu przypadkach zachodzi także inhibitowanie procesu polireakcji przez alkaliczny zaczyn cementowy lub zakłócenie procesu wiązania cementu obecnością dodatków. Trudności te występują zwłaszcza w przypadku stosowania monomerów i kompozycji żywicznych wymagających utwardzenia. Z tego względu użycie nawet stosunkowo drogich modyfikatorów np. epoksydowych, poliestrowych, furynowych i poli-chloru winylu i to w dużych ilościach, bo sięgających do 30% masy betonu, daje tylko umiarkowane wyniki. Wytrzymałość na ściskanie wynosi wówczas np. co najwyżej 150 - 200% wytrzymałości betonu zwykłego.

Do najaktywniejszych środków modyfikujących ze względu na wytrzymałość betonu można zaliczyć tanie żywice mocznikowe. Bardzo obiecujące wyniki uzyskano także z sulfonowanymi żywicami melaminowymi i żywicami acetonowo-formaldehydowymi. Woda wydzielająca się w wyniku polikondensacji tych żywic jest zużytkowana do hydratacji cementu /przy odpowiednio zmniejszonym w/c/, co korzystnie wpływa na szczelność tych betonów, a w konsekwencji na mrozoodporność i chemoodporność. Rozpowszechnionym jest także stosowanie polioctanu winylu, który wpływa na beton plastyfikująco, a ponadto poprawia jego udarność, ścieralność i rysoodporność. Wadą jest tutaj możliwość hydrolizy polioctanu winylu pod działaniem alkalicznego środowiska betonu, zwłaszcza pracującego w warunkach wlotnych.

Obok przytoczonych poprzednio dodatnich modyfikacji cech użytkowych betonu i z reguły poprawy urabialności mieszanki betonowej, PCC wykazują również szereg wad, a mianowicie:

- duży skurcz w czasie utwardzania,
- dużą rozszerzalność cieplną /większą nawet o 50% od rozszerzalności betonów zwykłych/,
- dużą podatność na pęcznienie,
- stosunkowo mały moduł sprężystości.

Biorąc pod uwagę powyższe, jak również duży koszt materiałowy dodatku, PCC należy uznać za mało efektywny sposób modyfikacji.

Szczególnym przypadkiem PCC jest wprowadzenie polimeru nie do mieszanki betonowej, lecz zastosowanie powlekania ziarn kruszywa żywicą utwardzalną np. epoksydową. Poprawia to przyczepność kruszywo-cement i około dwukrotnie zwiększa wytrzymałość betonu. Zabieg powlekania kruszywa żywicą jest jednakże technologicznie dość kłopotliwy. Pewną odmianą tej metody jest impregnacja kruszywa o niskiej jakości przed użyciem do betonu zwykłego. W pewnych okolicznościach, przy dużych kosztach transportu właściwego kruszywa, zabieg ten może być uzasadniony z punktu widzenia techniczno-ekonomicznego.

4.5.3. Zaprawy i betony na spoiwie polimerowym.

Beton żywiczny a więc taki beton w którym kruszywo zostało połączone utwardzonym spoiwem żywicznym jest materiałem z definicji prostym, jednakże trudnym w technicznej realizacji. Duże zróżnicowanie pod względem jakościowym i ilościowym składników, oraz skomplikowane zależności pomiędzy budową a właściwościami stwarzają z jednej strony duże możliwości w zakresie sterowania właściwościami, z drugiej zaś strony nie uwzględnione w sposób racjonalny mogą powodować otrzymanie produktu o niezamierzonych właściwościach.

Najogólniej można stwierdzić, że technologia wytwarzania betonów żywicznych jest zbliżona do technologii betonów cementowych i mieszanki betonów żywicznych można w zasadzie otrzymywać i formować z wykorzystaniem tych samych urządzeń jak do betonów cementowych. Proces wytwarzania betonów żywicznych może być realizowany zarówno w węźle betoniarским zlokalizowanym w miejscu zastosowania - na placu budowy, jak również w stacjonarnej wytwórni elementów prefabrykowanych z betonów żywicznych.

Podstawową różnicę w stosunku do mieszanki betonu cementowego stanowi fakt, że w miejsce wody w zaczynie cementowym, cieczy newtonowskiej o małej lepkości, stosuje się kompozycję żywiczną, która jest cieczą lepkosprężystą z reguły o dużej lepkości. Dlatego też w przypadku mieszanki betonu żywicznego na ogół można się spodziewać mniejszego stopnia ciekłości, a w

śląd za tym gorszej urabialności niż to ma miejsce w betonach cementowych.

Rozpatrując wpływ podstawowych parametrów na lepkość mieszanki betonu żywicznego można stwierdzić, że: lepkość mieszanki rośnie wraz ze stopniem wypełnienia, przechodzi przez minimum w funkcji wielkości ziarna, maleje natomiast w funkcji temperatury i naprężeń ścinających występujących podczas mieszania bądź zagęszczania.

Kłopotliwą czynnością w zakresie przygotowania składników jest konieczne suszenie kruszywa. Użycie kruszywa o naturalnej wilgotności jest możliwe jedynie w przypadku zastosowania specjalnie dobranego spoiwa żywicznego i dodatku odpowiednich sorbentów wilgoci. Najważniejszą operacją technologiczną przygotowania mieszanki betonowej jest mieszanie. Ze względu na wspomniane już właściwości lepkością spoiwa oraz takie cechy jak napięcie powierzchniowe, siły kohezji i adhezji jest to proces trudny.

Stosuje się dwa podstawowe sposoby łączenia spoiwa z kruszywem:

- przez dodanie mikrowypełniacza do spoiwa i wprowadzenie tak przygotowanej mikrozaprawy do uprzednio wymieszanego kruszywa,
- przez wprowadzenie spoiwa do kruszywa, z tym, że przy dużym stopniu wypełnienia spoiwo dodaje się do najgrubszej frakcji wypełniacza i następnie wprowadza się kolejne pozostałe frakcje, a na końcu mikrowypełniacz, doprowadzając mieszaninę po dodaniu każdej frakcji do ujednorodnienia.

Mieszanie spoiwa z kruszywem można przeprowadzić w typowych betoniarkach przeciwbieżnych, jednakże korzystniejsze efekty uzyskuje się przez zastosowanie specjalnie przystosowanych mieszarek automatycznych /ślimakowych, przeciwwradowych/.

Do betonów żywicznych stosuje się podobne metody zagęszczania jak do betonów tradycyjnych tj. ubijanie, nakłuwanie, wibrowanie, wibroprasowanie i prasowanie. Omówione już specyficzne cechy spoiwa żywicznego powodują, że efektywność zagęszczania jest znacznie mniejsza niż betonów cementowych. Do betonów utwardzanych według reakcji polikondensacji zalecane jest wibroprasowanie i prasowanie. Do tych betonów stosuje się również próżniowanie. Do pozostałych betonów najczęściej stosuje

się wibrowanie przy użyciu z reguły większych częstotliwości i amplitud niż do betonów zwykłych. Dobre wyniki daje również proste nakłuwanie /sztychowanie/ mieszanki betonowej.

Utwardzanie betonów żywicznych w zasadzie prowadzi się w temperaturze normalnej, przy czym w 20°C osiąga się po 1 dobie conajmniej 60% wytrzymałości maksymalnej.

$$R_{c,t} = R_{c,max} \left[1 - /1 + t^{0,5}/^{-1,5} \right]$$

gdzie:

$R_{c,t}$ - wytrzymałość na ściskanie, po czasie utwardzania t , dni,

$R_{c,max}$ - maksymalna wytrzymałość na ściskanie

Przyspieszenie procesu utwardzania można uzyskać przez dodatkowe wygrzewanie betonu żywicznego po zaformowaniu.

Dodatkową obróbkę cieplną betonów polimeryzacyjnych przeprowadza się w temperaturze 60-70°C, a dla betonów polikondensacyjnych 80-100°C. Wygrzewanie prowadzi się przez okres od 2 do 24 godzin, najczęściej 4 godziny. Wygrzewanie betonów polimeryzacyjnych można rozpoczynać wkrótce po zaformowaniu, natomiast polikondensacyjnych na ogół po 1 dobie od zaformowania.

Jakość betonu żywicznego zależy zarówno od właściwości użytych materiałów jak i dokładności wykonania poszczególnych operacji technologicznych. Przy przestrzeganiu właściwych zaleceń technologicznych graniczna zmienność danego betonu żywicznego nie powinna przekraczać $\pm 10\%$.

5. Struktura kompozytów.

5.1. Poziomy obserwacji.

Opis struktury kompozytu zależy od przyjętego za podstawę poziomu obserwacji /tab.5.1./.

Tablica 5.1. Poziomy obserwacji

Poziom obserwacji	Jednostka wymiarowa	Przykłady obserwowanych elementów struktury
fenomenologiczny /inżynierski/	$/10^{-1}m/$	wymiary konstrukcji
makroskopowy	mm $/10^{-3}m/$	kruszywo, lepiszcze, uzbrojenie w kompozycie, rysy w żelbecie $/0,1-1mm/$
mikroskopowy	μm $/10^{-6}m/$	mikrorysy $/2-100 \mu m/$ duże pory $/1-10 \mu m/$ ziarna cementu $/10-100 \mu m/$ średnica włókna szklanego $/5-15 \mu m/$
cząsteczkowy /molekularny/	100 Å $/10^{-8}m/$	pory kapilarne $/1000 \text{ \AA} /$ cząstki żelu stężenia hydratacji /szerokość 200 \AA długości $1 \mu m/$
atomowy	Å $/10^{-10}m/$	pory w żelu cementowym $/20 \text{ \AA} /$ molekuła wody $/4 \text{ \AA} /$

Na poziomie fenomenologicznym można mówić o jednorodności statycznej i izotropii materiału.

Na poziomie makroskopowym dokonujemy najczęściej opisu struktury betonu, żelbetu, kompozytu betonowego jako materiałów dwu lub trójskładnikowych.

Poziom mikroskopowy pozwala na uwzględnienie efektów mikrozarzysowania materiału i budowy matrycy /fazy ciągłej/. Na poziomie molekularnym możemy interpretować zjawiska procesów wiązania cementu, budowy mezo i makroporów, procesów migracji wody kapilarnej /efekty napięcia powierzchniowego cieczy/, zjawisk skurczu, pełzania, w końcu poziom atomowy pozwala na interpretację budowy materii, mechanizmów skurczu i pełzania betonu.

Model materiału dwuskładnikowego, dwufazowego jest wygodny i stosowany na odnośnych poziomach obserwacji do opisu betonu /kruszywo otulone zaprawą/, zaprawy /piasek otulony zaczynem cementowym/ i zaczynu /ziarna niezhydratyzowanego cementu otulone żelem/.

Dokładnie rzecz biorąc należało by mówić o kompozycie betonowym jako materiale wielofazowym złożonym co najmniej z 8 składników: grubego kruszywa, piasku, włókien, niezhydratyzowanych

ziarn cementu, żelu cementowego, porów żelu, porów kapilarnych i porów dużych /pustek, w których woda ma charakter swobodny/. Dodajmy, że pory mogą występować zarówno w matrycy, jak również we włóknach /np. szklanych/. Takie rozróżnienie faz jest jednak kłopotliwe i naogół zbędne.

Procesy technologiczne mieszania, formowania, zagęszczania, dojrzewania i inne mogą wprowadzać istotną modyfikację do struktury betonu i wywoływać anizotropię materiału w kierunku formowania. Przykładem może być równomierna lub nierównomierna segregacja kruszywa, osiadanie, kłębianie stalowych włókien, migracja mlecza cementowego ku górze, tworzenie pęcherzy wodnych lub powietrznych w materiale, większe spulchnienie górnych warstw gazobetonu.

5.2. Opis struktury.

Dokładny opis struktury kompozytu dwuskładnikowego /na każdym poziomie obserwacji/, składającej się z fazy ciągłej i rozproszonej staramy się sformalizować przez określenie następujących elementów /1/ :

a/ układ fazy rozproszonej

- kształt składników
- wielkość i rozkład wielkości składników
- koncentracja składników
- orientacja składników
- topologia składników

b/ budowa wewnętrzna fazy rozproszonej

c/ budowa wewnętrzna fazy ciągłej

Określenie kształtu, wielkości i rozkładu składników /ziarn, włókien/ fazy rozproszonej kompozytu betonowego jest stosunkowo proste. Większy kłopot sprawia opis orientacji, koncentracji i topologii składników, które są istotnymi elementami decydującymi o właściwościach kompozytu.

Kształt i wielkość fazy rozproszonej decydują o teksturze materiału, wielkości powierzchni kontaktu pomiędzy fazami, oraz wzajemnego oddziaływania obu faz. Koncentracja fazy rozproszonej /% uzbrojenia, wskaźnik objętości ziarn w jednostce objętości/ jest ważnym elementem opisu /kryterium/ jednorodności kompozytu.

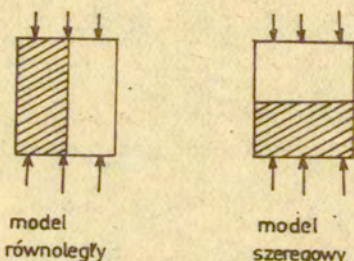
Orientacja składników /zwłaszcza fazy włóknistej/ decyduje o

izotropii materiału. Przez topologię składników rozumiemy ich wzajemny stosunek w przestrzeni /np. czy włókna się przecinają, dotykają, czy pory łączą się pomiędzy sobą, itd./.

W przypadku kompozytu z łączącymi się porami mamy do czynienia z dwiema fazami ciągłymi.

Jest rzeczą oczywistą, że struktura kompozytu /rodzaj składników i ich układ/ wpływa na jego cechy mechaniczne.

Jako najprostszą ilustrację do opisu cech materiału składającego się z dwóch faz ciągłych można przytoczyć dwa skrajne modele teoretyczne, szeregowy i równoległy /rys.5.1./.



(równych odkształceń) (równych naprężeń)

Rys.5.1. Modele teoretyczne materiału dwuskładnikowego.

Moduł sprężystości modelu szeregowego /równe naprężenia/ jest równy

$$E_c = \frac{E_1 E_2}{E_1 / (1 - V_1) + E_2 V_1} \quad \text{albo} \quad \frac{1}{E_c} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{1 - V_1}{E_2}$$

natomiast w modelu równoległym /równe odkształcenia/ otrzymujemy

$$E_c = E_1 V_1 + E_2 / (1 - V_1)$$

W wyrażeniach tych oznaczają

E_c - moduł sprężystości kompozytu, $E_1; E_2$ - moduły sprężystości składników.

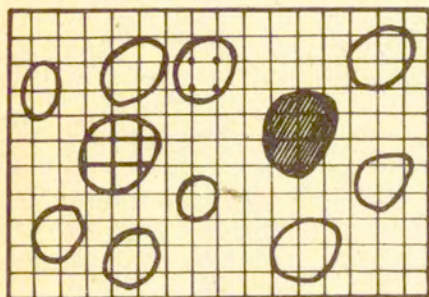
Wiadomo z teorii żelbetu, że modele te mogą być bardziej złożone /np. model Hirscha lub Counto /.

Model równoległy /równych odkształceń/ daje ograniczenie od góry wartości opisywanych własności, model szeregowy /równych naprężeń/ ograniczenie od dołu.

Inne modele dają wyniki pośrednie pomiędzy tymi wartościami skrajnymi.

Opis przestrzennej struktury materiału kompozytowego opieramy dla prostoty najczęściej na opisach przekrojów płaskich. Otrzymujemy na ich podstawie dość dobrą, aczkolwiek nie w pełni dokładną informację o wielkości i koncentracji /wskazniku objętości/ fazy rozproszonej oraz pogląd na kształt składników tej fazy.

Wielkości, które mierzymy w przekroju kompozytu to powierzchnie składników A_z , albo odcinki linii siatki pomiarowej L_z , w obrębie składników fazy rozproszonej, albo ilości punktów przecięcia siatki w obrębie składników fazy rozproszonej N_z /rys.5.2./.



Rys.5.2. Elementy opisu płaskiego przekroju kompozytowego.

Wskaźnik objętości fazy rozproszonej V_1 będzie równy

$$V_1 = \frac{A_z}{A_c} = \frac{L_z}{L_c} = \frac{N_z}{N_c}$$

gdzie A_c , L_c , N_c oznaczają odpowiednio: całkowita powierzchnia, całkowita długość linii siatki, całkowita ilość punktów przecięć. Wynik pomiarów należy uśredniać z wielu analizowanych przekrojów.

Opisany sposób ma swoje ograniczenie. Nie pozwala na określenie rozkładów koncentracji, liczby składników fazy rozproszonej przypadających na jednostkę objętości. Nie pozwala również na stwierdzenie czy faza rozproszona nie ma charakteru ciągłego /np. określenie budowy porów łączących się pomiędzy sobą, określenie charakteru zbrojenia w siatko-betonie/. Nie jest również wystarczający do zdefiniowania orientacji i topologii składników, których znajomość ma zasadnicze znacze-

nie w przypadku fazy włóknistej. Stosowane są wówczas metody prześwietlania promieniami Roentgena.

Należy zaznaczyć, że istnieją wzory do określania wielkości składników na podstawie płaskich przekrojów kompozytu.

Elementem struktury materiału kompozytowego są również powierzchnie kontaktowe i ich gładkość. Analiza płaskiego przekroju materiału kompozytowego pozwala na określenie wielkości powierzchni kontaktowej pomiędzy fazami przypadającej na jednostkę objętości kompozytu $S_v / n_p \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^3}$.

Prowadząc dowolną linię przez kompozyt zliczamy liczbę przecięć tej linii z powierzchniami kontaktowymi przypadającymi na jednostkę długości $n_L / \frac{1}{\text{mm}}$. Otrzymujemy /1/

$$S_v = 2n_L$$

Gładkość powierzchni /mierzona jako pionowa odległość pomiędzy najwyższym szczytem i najgłębszą doliną/ jest w przypadku idealnie wypolerowanej powierzchni rzędu 100 - 1000 Å: może więc być oceniona dopiero na poziomie cząsteczkowym. Większość szorstkich i gładkich powierzchni posiada gładkość rzędu 1 μm i więcej, co uwidacznia się na poziomie mikroskopowym. Informacja ta ma znaczenie dla oceny warunków przyczepności składników kompozytu betonowego, które są istotne dla spójności materiału i jego zachowania pod obciążeniem / np. propagacji rys/.

5.3. Techniczne sposoby opisu struktury kompozytu.

Struktura kompozytu /z pominięciem włókien/ opisywana może być podobnie jak w technologii betonu przez podanie krzywej przesiewu kruszywa oraz przez określenie zawartości kruszywa w jednostce objętości. Istnieje szereg innych proponowanych charakterystyk numerycznych kruszywa, takich jak wskaźnik uziażnienia kruszywa, wskaźnik jakości kruszywa, wskaźnik Abramsa, Edwardsa /powierzchnia właściwa/, liczba Solvey'a, wskaźniki Bolomey'a, Hughesa etc. Brak jest jednak powiązania tych wskaźników z właściwościami mechanicznymi kompozytu.

Struktura świeżego zaczynu cementowego jest gesta zawieszona, o wysokim wskaźniku objętościowym ziarn cementu w wodzie /fazie ciekłej/. Ziarna te, na dodatek, mają na powierzchniach kontaktu z cieczą utworzoną warstewkę koloidalną. Stwardniały zaczyn ma budowę nadzwyczaj skomplikowaną o wymiarach cząstek żeluzu rzędu 100 Å /koloidalnych/.

Do opisu zaprawy i betonu w skali makroskopowej przyjmuje się model materiału dwuskładnikowego składającego się z jednorodnego materiału wiążącego wypełnionego kulistymi w kształcie ziarnami kruszywa /lub porami i pustkami/, o dużym wskaźniku objętościowym wypełnienia.

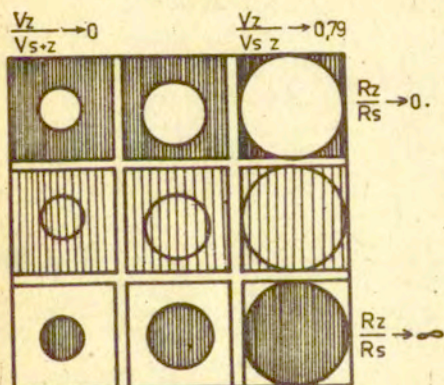
W modelu takim występują następujące zmienne:

- rozkład wielkości ziarn,
- zawartość objętościowa ziarn w kompozycie /zmienia się od 0 do 0,8/.

O zjawiskach zachodzących w takim modelu decyduje również stosunek modułów sprężystości ziarn i spoiwa $\frac{E_a}{E_s}$ oraz stosunek wytrzymałości $\frac{R_a}{R_s}$, zmienne odpowiednio w zakresie $0 < E_a/E_s < \infty$ i $0 < R_a/R_s < \infty$ co daje nieskończoną ilość możliwych kombinacji przedstawionych schematycznie na rys.5.3.

Modelowanie struktury kompozytu służy w pierwszym rzędzie do wyjaśnienia i opisu zjawiska skurczu, pęcznienia, pełzania i niszczenia materiału.

W kompozytach, w których $E_z \gg E_s$, skurcz, pełzanie spoiwa i obciążenie zewnętrzne, powodują powstanie koncentracji napreżeń na powierzchniach kontaktu kruszywa z zaprawą, prowadzących do mikro zarysowań /rys o rozwarości 2 - 5 μm /.



Rys.5.3. Schematyczne przedstawienie zakresu zmienności kombinacji parametrów geometrycznych i mechanicznych.

Podstawowym mechanizmem niszczenia jest inicjacja i propagacja mikroprys, które się rozszerzają i łączą pomiędzy sobą aż do utraty spójności fragmentu materiału. Różne uproszczone modele strukturalne matrycy stanowiły punkt wyjścia wielu prac zajmu-

jących się mechaniką zniszczenia. /Brandtzaeg, Reinius, Baker, Anson i inni/.

Zachowanie materiału pod obciążeniem, a także przebieg zjawisk skurczu i pełzania ulegają istotnej zmianie, gdy $E_z \ll E_s$ i gdy zamiast usztywniającego szkieletu kruszywa w kompozycie mamy w skrajnym przypadku szkielet /strukturę/ pustek. Wszystkie cechy wytrzymałościowe ulegają znacznej redukcji, a wszelkie zmiany objętościowe zjawiska skurczu, pęcznienia i pełzania przebiegają swobodniej i są silniej zaakcentowane.

Należy dodać, że rozmieszczenie porów w materiale w przypadku betonów lekkich o lekkim kruszywie mineralnym lub organicznym oraz betonów lekkich z pustkami wytworzonymi przez pianę lub gaz zależy w znacznym stopniu od technologii produkcji. Procesy gazotwórcze, obecność lżejszego kruszywa w cięższym zaczynie cementowym prowadzi do przemieszczenia się kruszywa i pęcherzy wewnątrz fazy ciągłej i do powstawania niejednorodności materiału polegającej na koncentracji fazy rozproszonej u góry oraz większej gęstości fazy ciągłej u dołu materiału /efekt zakalca/.

5.4. Techniczne sposoby opisu struktury mikrobrojenia sztywne- go.

W przypadku mikrobrojenia ciągłego w postaci siatek, strukturę traktujemy jako w pełni zdeterminowaną przez znajomość układu geometrycznego siatek i ich liczby w przekroju poprzecznym elementu. W opisie materiału stosuje się pojęcie współczynnika powierzchni właściwej lub współczynnika otulenia stali betonem /por. punkt 6.1.1./.

Uzbrojenie rozproszone w kompozycie jest trudniejsze do opisanego /29/-2. Zakładamy, że poszczególne włókna mają stałą długość i średnicę. Opisujemy strukturę uzbrojenia rozproszonego przez podanie zawartości objętościowej włókien w kompozycie β /, typu rozkładu włókien /1D, 2D, 2D-3D, / oraz kształtu pojedynczego włókna /a zwłaszcza jego wymiarów l i d /.

Przez rozkład 1D rozumiemy układ włókien zlinearyzowany w pewnym kierunku. Rozkład 2D oznacza włókna o dowolnej orientacji w płaszczyznach wzajemnie równoległych, natomiast rozkład 3D oznacza przypadkową orientację bez kierunku wyróżnionego. Rozróżnienie np. czy dany układ jest typu 2D czy 2D-3D może

być subiektywne. Przy konkretnych zastosowaniach, poprawność takiego rozróżnienia może mieć drugorzędne znaczenie, jeżeli tylko wszystkie analizowane elementy charakteryzować się będą identycznym typem rozkładu, np. w produkcji cienkich płyt fibro betonowych w zakładzie prefabrykacji.

Naturalnym parametrem opisującym rozkład uzbrojenia w kompozycie jest liczba włókien przeciętych przez określony przekrój elementu fibrobetonowego. Jeżeli wielkość pola przekroju elementu wynosi A, a liczba widocznych w tym przekroju włókien wynosi N, to wspomniany parametr można określić jako:

$$\alpha^{iD} = \frac{A}{N} \text{ /mm}^2\text{/}$$

przy czym $i = 1, 2, 2 + 3$, lub 3 zależnie od typu rozkładu włókien.

Jeżeli element fibrobetonowy jest dostatecznie cienki, to podstawą do analizy rozkładu włókien może stanowić zdjęcie rentgenowskie, na którym obserwuje się liczbę N obrazów włókien przecinających wybraną bazę pomiarową o długości l_b .

Jeśli grubość elementu oznaczyć przez w, to wspomniany parametr rozkładu wyznacza wzór:

$$\alpha^{iD} = \frac{l_b w}{N} \text{ /mm}^2\text{/}$$

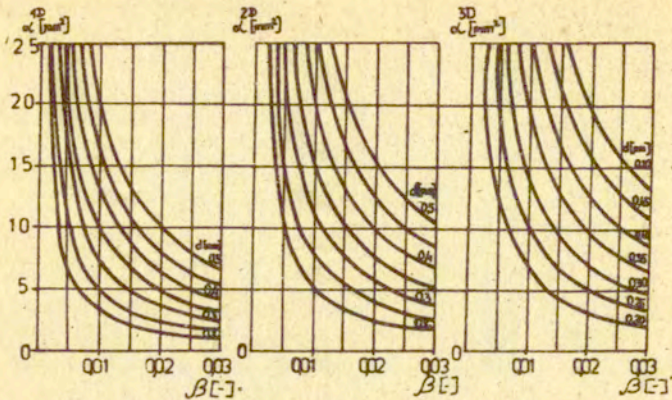
W przypadku włókien zorientowanych wartość α^{iD} zależy od kierunku obserwacji /przekroju lub bazy pomiarowej/. Przyjęto, że wartość α^{iD} określa się zawsze dla przekrojów prostopadłych do ewentualnych kierunków orientacji struktury. Wartość współczynnika α^{iD} w wyidealizowanych układach włókien może być określona również analitycznie, jako wielkość zależna od zawartości włókien $[\beta]$, ich średnicy d oraz układu $\{1D, 2D, \text{etc.}\}$. Jak się okazuje, długość włókna l nie wpływa na wartość α^{iD} .

Na rys.5.4. podane są wykresy α^{iD} dla trzech najważniejszych typów rozkładu włókien - por./29/-2. Wykresy tego rodzaju mogą służyć do kontroli wykonania kompozytu, do sprawdzania jednorodności rozkładu włókien, etc.

Długość włókna, jakkolwiek nie wpływa na wartość parametru α^{iD} , ma zasadniczy wpływ na właściwości mechaniczne kompozytu, w szczególności na jego zachowanie się po zarysowaniu.

Reasumując, pełny opis struktury wewnętrznej fibrobetonu wymaga podania następujących parametrów liczbowych

- wymiary pojedynczego włókna l, d ,



Rys.5.4. Wykresy współczynników nasycenia przekroju kompozytu włóknem α^{iD} w zależności od średnicy włókien d , zawartości objętościowej włókien w kompozycie β , oraz typu orientacji włókien $i=1,2,3$ - 1D, 2D, lub 3D.

- wskaźnik kształtu pojedynczego włókna uwzględniający rodzaj powierzchni i zakotwień,
- stopień nasycenia przekroju kompozytu włókien α^{iD} ,
- typ orientacji włókien /1D, 2D, 2D+3D, 3D/,
- charakterystyka uwzględniająca niejednorodność i anizotropię układu ziaren przemieszanych z włóknami uzbrojenia /brak jest dotychczas danych w tym zakresie/.

5.5. Struktura mikrouzbrojenia wiotkiego

Przytoczone poprzednio rozważania dotyczyły przede wszystkim włókien stalowych, a więc włókien sztywnych o dużej wytrzymałości na rozciąganie. Włókna te w kompozycie zachowują swój prostoliniowy kształt i pierwotne wymiary. Sytuacja ta może ulec zmianie w zależności od wartości modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie użytych włókien. I tak w przypadku włókien sztywnych, lecz kruchych jak włókna szklane czy anhydrytowe, zachowują one w kompozycie prostoliniowy kształt, jednakże ich długość /współczynnik kształtu, l/d / ulega na ogół skróceniu w stosunku do wymiaru pierwotnego. Skrócenie to następuje w wyniku spekań włókien wywołanych złożonymi naprężeniami podczas przygotowania mieszanki kompozytu. W rezultacie w kompozycie występuje pewien, często dość szeroki, rozkład

długości włókien i właściwości takich kompozytów możemy odnosić nie do jednej określonej długości włókna, lecz do odpowiedniej wartości średniej.

Stan ten komplikuje się jeszcze bardziej w przypadku zastosowania włókien elastycznych np. aramidowych. Wówczas niezależnie od wspomnianego skrócenia włókien występuje szereg załamów bądź zagięć włókna, przy czym występuje tendencja do utrzymania stałej odległości między tymi charakterystycznymi punktami. Właściwości kompozytów z tego rodzaju włóknami są określone jak można sądzić nie tylko przez całkowitą długość włókna, ale również, lub być może nawet przede wszystkim, przez długość charakterystycznego elementu składowego włókna. Analiza rozkładu takich włókien w kompozycie na podstawie wybranego przekroju również nie prowadzi do określenia parametrów rozkładu włókien jako całości, lecz ich charakterystycznych elementów cząstkowych.

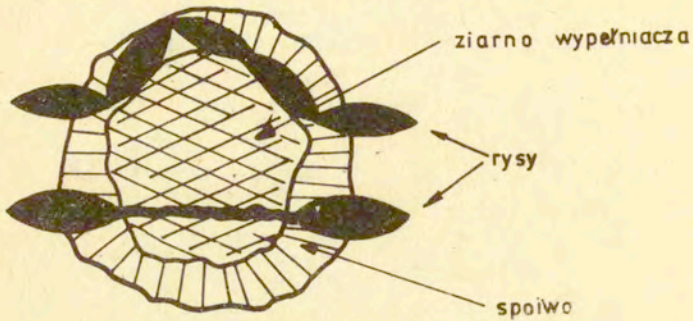
5.6. Mikrostrukturalne uwarunkowania efektywności rozwiązań materiałowych betonów polimerowych /PCC, PIC, PC/.

W grupie betonów polimerowych PIC odznaczają się największą wytrzymałością mechaniczną, a PC największą chemoodpornością, zaś właściwości PCC mogą się kształtować pomiędzy tymi dwoma ekstremami a właściwościami zwykłego betonu cementowego, raczej bliżej tego ostatniego. Istnieje możliwość otrzymania betonów zawierających ten sam rodzaj polimeru /np. akrylowego/ w tej samej ilości /np. 7%/, a znakomicie różniących się właściwościami np. o wytrzymałości na ściskanie jak 1 : 3 : 4 odpowiednio dla PCC, PC i PIC. A zatem nie tylko sam fakt obecności polimeru, lecz również jego struktura ukształtowana w specyficznych warunkach wewnątrz kompozytu betonowego i sposób współdziałania polimeru z innymi komponentami decydują o skuteczności danego rozwiązania materiałowego. Z tego względu warto rozważyć jakie czynniki strukturalne determinują poszczególne drogi modyfikacji typu PCC, PC czy PIC. W wyniku wprowadzenia polimeru do betonu może wystąpić:

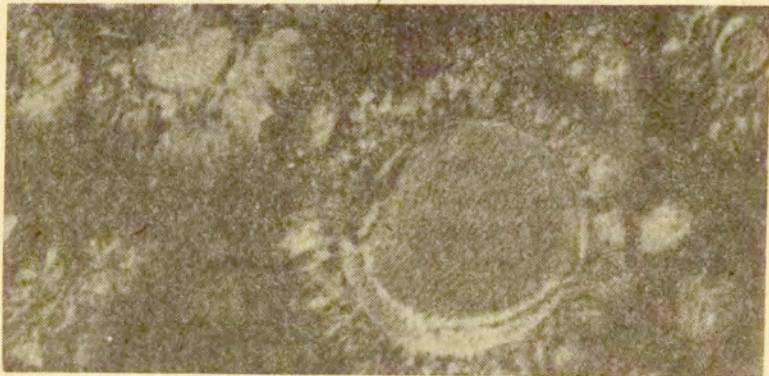
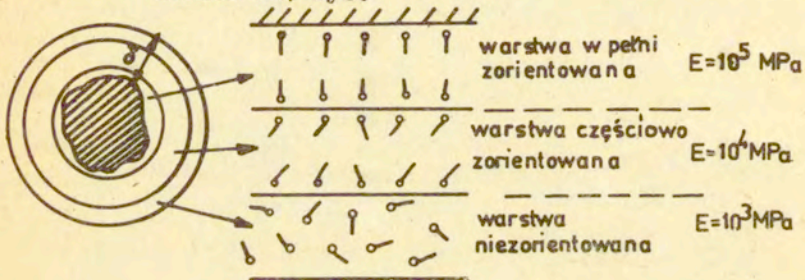
- wzrost adhezji spoiwa do kruszywa dla PCC, PIC, PC /rys.5.5./, której wynikiem jest rozprzestrzenianie się rys poprzez ziarną, a nie tylko poprzez spoiwo,
- powstanie mostków polimerowych hamujących rozwój rys w PIC i

PC, oraz w mniejszym stopniu w PCC,

- modyfikacja mikrostruktury spoiwa polimerowego, zwłaszcza wzrost stopnia uporządkowania łańcuchów polimeru w PIC i PC, a w mniejszym zakresie także w PCC /rys.5.6./;

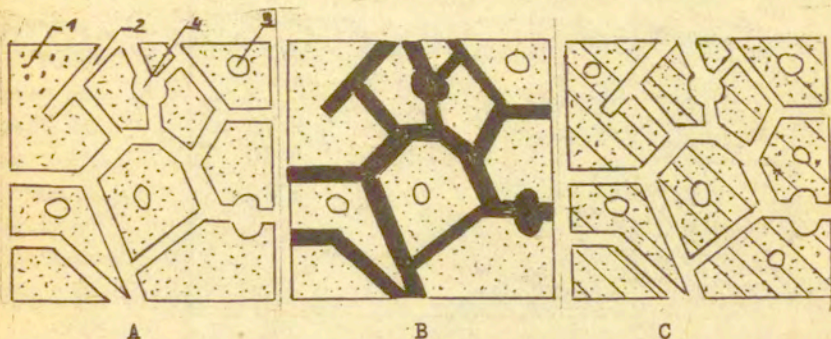


Rys.5.5. Mechanizm zniszczenia PC. Schemat rozprzestrzeniania się rysy.



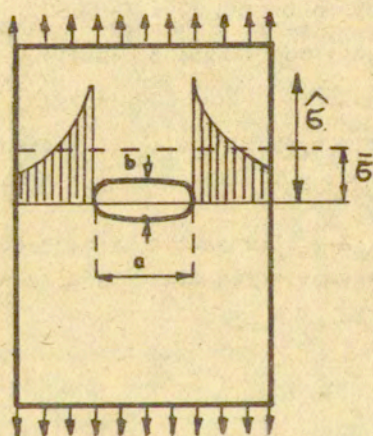
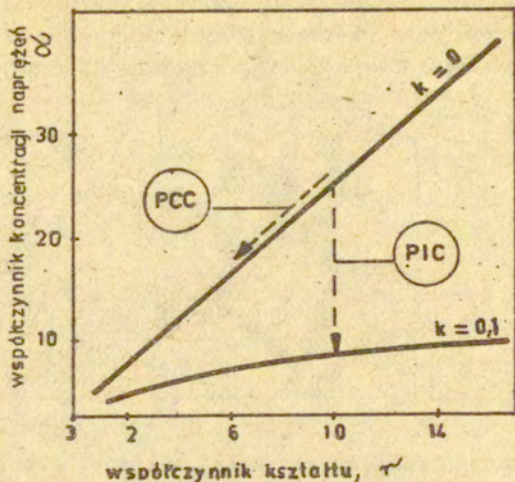
Rys.5.6. Modyfikacja spoiwa polimerowego w warstwie otaczającej ziarno kruszywa.

- zmniejszenie ogólnej zawartości porów w przypadku PC /zwłaszcza dla spoiw utwardzanych wg reakcji-polimeryzacji/ lub wypełnienie polimerem porów istniejących w przypadku PIC i związany z tym spadek poziomu naprężeń wewnętrznych /rys.5.7./.



Rys.5.7. Schematy struktury porowatej betonów: A.:stwardniały zaczyn cementowy /objętość porów $V_p = 12-16\%$ / B.:stwardniały zaczyn cementowy impregnowany polimerem / $V_p = 3-5\%$ / C.:stwardniały zaczyn polimerowo-cementowy / $V_p = 13-21\%$ /
1.pory żelowe 2.kapilary 3.pory powietrzne zamknięte 4.pory powietrzne otwarte

W PCC natomiast, odwrotnie, występuje większa tendencja do napowietrzania spoiwa cementowo - polimerowego i w związku z tym wzrost zawartości porów,
- wzrost regularności porów, a w ślad za tym zmniejszenie stopnia koncentracji naprężeń wewnętrznych dla PCC, a także w PC /rys.5.8./.



$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$$

$$k = \frac{E_p}{E_m}$$

$$r = \frac{a}{b}$$

Rys.5.8. Zależność między współczynnikiem koncentracji naprężeń wewnętrznych i współczynnikiem kształtu porów dla różnych stosunków k / modułu sprężystości matrycy cementowej E_m / i polimeru E_p ; PCC - $k = E_p/E_m = 0$ pory niewypełnione, PIC - $k = E_p/E_m = 0,1$ pory wypełnione typowym polimerem

Porównując hipotetyczne wytrzymałości idealnego - nieporowatego - zaczynu cementowego po utwardzeniu / ~ 800 MPa/ oraz spoiw polimerowych / ~ 300 MPa/ z wytrzymałością rzeczywistą różnych betonów oraz uwzględniając, że wytrzymałość maleje w potęgze 6, a moduł sprężystości w potęgze 3 w funkcji zawartości porów - można stwierdzić, że zmniejszenie porowatości stanowi najefektywniejszy mechanizm modyfikacji. Mechanizm ten jest dominujący w przypadku PIC. Właściwości PC natomiast kształtują się zasadniczo jako wynik superpozycji mechanizmu porów i mechanizmu uporządkowania mikrostruktury spoiwa polimerowego. W odniesieniu do PCC jako główne czynniki należałoby wymienić wzrost regularności porów i modyfikację struktury spoiwa cementowego.

Przedstawione rozważania pozwalają na oszacowanie granicznych wartości cech technicznych materiałów możliwych do osiągnięcia różnymi drogami modyfikacji. Przy obecnym stanie techniki, przyjmując jako odniesienie beton cementowy średniej klasy, maksymalny stopień wzmocnienia wytrzymałości na ściskanie można przyjąć dla PCC: 2, dla PC: 6 a dla PIC: 7.

Znajomość mechanizmów modyfikacji pozwala ponadto na zobiektywizowaną ocenę, a nawet weryfikację metod projektowania i racjonalne poszukiwania w zakresie nowych rozwiązań betonów polimerowych.

Intuicyjnie można by oczekiwać, że prawo mieszanin /model szeregowy/ mogłoby stanowić pierwsze przybliżenie opisu zależności między właściwościami składników i kompozytu. Skomplikowana budowa betonów polimerowych, a zwłaszcza współdziałanie zachodzących pomiędzy ich składnikami daje jednakże często efekt nieaddytywności właściwości. Właściwości fizyko-mechaniczne kompozytów w przeciwieństwie do prostych mieszanin fizycznych nierzadko też wykazują istnienie ekstremum w funkcji składu. W tej sytuacji prawo mieszanin, jakkolwiek ze względu na prostotę ujęcia jest stosowane, to jednak uzyskiwane tą drogą wyniki są dość odległe od rzeczywistych i z reguły zaniżone.

W literaturze spotyka się szereg rozwiązań analitycznych podających zależność modułu sprężystości od zawartości kruszywa. Najprostszym przykładem jest tutaj zastosowanie prawa mieszanin w klasycznej postaci:

$$E_B = V_K \cdot E_K + (1 - V_K) / E_S$$

gdzie: V_K - objętość kruszywa, $m^3 \cdot m^{-3}$

E_B, E_K, E_S - moduły sprężystości betonu, kruszywa i spoiwa.

Równanie to jest słuszne dla układu dwuskładnikowego, z pominięciem porów $(p=0)$ i zaniedbaniem współczynnika Poissona. Czasami stosuje się również prawo mieszanin w postaci bardziej uwikłanej:

$$E_B = (1 - V_K / E_S + f / V_K E_K)$$

Ten sposób postępowania jest stosowany zwłaszcza dla PIC.

Bardziej skomplikowany, ale w efekcie dający na ogół lepsze przybliżenie, zwłaszcza dla PC, sposób polega na rozpatrzeniu warunków równowagi naprężeń w układzie kompozytu. Również tutaj przyjmuje się szereg założeń idealizujących, a mianowicie: kształt ziarna przybliża się bryłą foremną np. sześciangiem lub modelem "klockowym" zbudowanym z prostopadłościaków, a także dwunastociangiem. Rozwiązanie uzyskuje się dla układu dwuskładnikowego, jednorodnego i izotropowego, z reguły przyjmując, że nie zachodzi wzajemne oddziaływanie pomiędzy ziarnami kruszywa. Ten ostatni warunek powoduje, że rozwiązanie jest słuszne tylko w zakresie małej zawartości kruszywa do 30%, wyjątkowo do 50%.

Wilczyński wyprowadził zależności dla modułu sprężystości

E_c i współczynnika Poissona ν_c kompozytów polimerowych w zależności od zawartości objętościowej wypełnienia kompozytu f i odpowiednich stałych materiałowych matrycy E_m, ν_m :

- dla ośrodka porowatego /pory jako wypełniacz o module $E_2=0$ /

$$E_c = \frac{2 E_m / 7 - 5 \nu_m /}{2 / 7 - 5 \nu_m / + / 1 + \nu_m / f^{2/3} [/ 13 - 15 \nu_m / + 6 / 1 - f^{2/3} /]}$$

$$\nu_c = \frac{2 \nu_m / 7 - 5 \nu_m / + / 1 + \nu_m / f^{2/3} [/ 13 - 5 \nu_m / + 3 / 1 - f^{2/3} /]}{2 / 7 - 5 \nu_m / + / 1 + \nu_m / f^{2/3} [/ 13 - 15 \nu_m / + 6 / 1 - f^{2/3} /]}$$

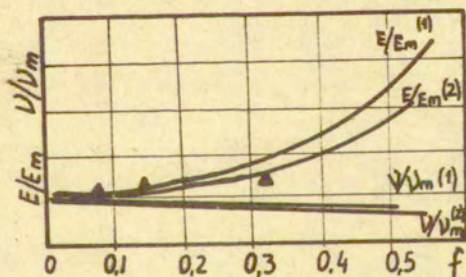
- dla wypełniacza sztywnego, $E_2 \gg E_m$

$$E_c = \frac{2 E_m / 4 - 5 \nu_m /}{2 / 4 - 5 \nu_m / - f [4 / 2 - \nu_m / + 3 / 1 + \nu_m / / 1 - f^{2/3} /]}$$

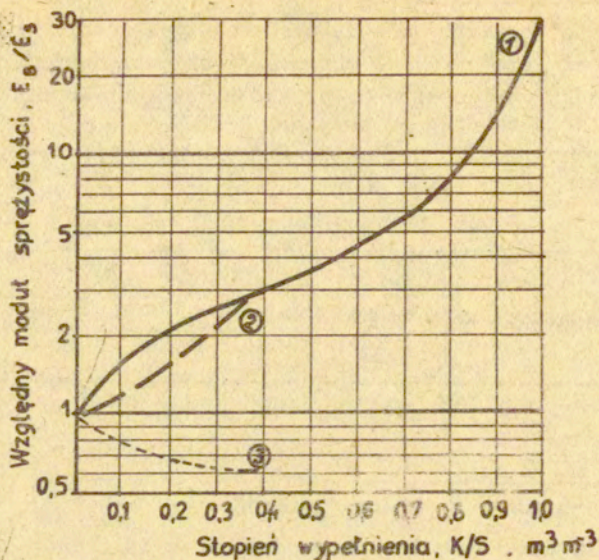
$$\nu_c = \frac{4 \nu_m / 4 - 5 \nu_m / / 1 - f / - 3 / 1 + \nu_m / / 1 - f^{2/3} / f}{4 / 4 - 5 \nu_m / - 2 f [4 / 2 - \nu_m / + 3 / 1 + \nu_m / / 1 - f^{2/3} /]}$$

Wyniki doświadczalne potwierdzają te zależności z wystarczającą w praktyce dokładnością /rys.5.9./.

Rozwiązanie obejmujące cały zakres zawartości kruszywa w betonach żywicznych opracowali R. Bareš i współpracownicy w skomplikowanej postaci uzyskanej w wyniku 3 kolejnych przybliżeń /rys.5.10/.



Rys.5.9. Zmiana modułu sprężystości kompozytu E w stosunku do matrycy E_m i współczynnika Poissona /odpowiednio ν_1, ν_m w funkcji stopnia napełnienia f wg wzorów dokładnych, /2/-wg wzorów przybliżonych \blacktriangle - wartości doświadczalne wg. Wilczyńskiego.



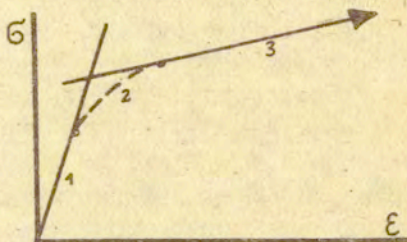
Rys.5.10. Zmiana współczynnika sprężystości betonu E_B/E_S w stosunku do spoiwa E_S w zależności od zawartości wypełniacza wg Bareša /1/ i wg Wilczyńskiego /2/5/. Krzywe /1/2/ dla Wypełnienia kruszywem oraz dla porów /3/. Współczynnik Poissona dla spoiwa przyjęto 0,3.

6. Właściwości kompozytów.

Rozdział ten przedstawia opis cech mechanicznych kompozytu jako funkcji jego zmiennych geometrycznych i materiałowych. Kompozyty betonowe wykazują szereg właściwości "ulepszonych" w stosunku do właściwości podstawowych materiałów. Zwrócić należy uwagę na cztery grupy zagadnień:

a/ Istotną właściwością wszystkich kompozytów z uzbrojeniem włóknistym jest sposób przenoszenia obciążeń zewnętrznych przez kruchą matrycę i ciągliwe włókna przed i po zarysowaniu. Możemy w związku z tym rozróżnić na wykresie σ - ϵ przy rozciąganiu i zginaniu 3 zakresy.

Rys.6.1. Trzy charakterystyczne zakresy zależności σ - ϵ przy rozciąganiu.

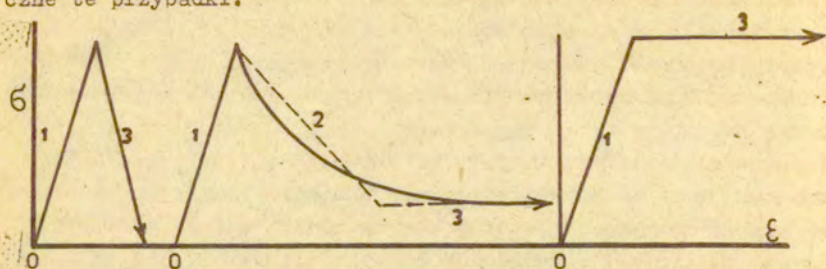


W zakresie 1, przed zarysowaniem, o zachowaniu kompozytu decyduje zasadniczo matryca, wpływ fazy włóknistej jest dość ograniczony, co wynika z proporcji geometrycznych i mechanicznych. W zakresie 3, po dobrze rozwiniętym zarysowaniu, o zachowaniu kompozytu decyduje wyłącznie faza włóknista, jej zachowanie pod obciążeniem.

Zakres 2 odpowiada etapowi tworzenia się rys, stopniowemu przekazywaniu obciążeń z matrycy na fazę włóknistą. Wielkość zakresu 2, przebieg krzywej w zakresie 2 mogą być różne w zależności od proporcji geometrycznych, mechanicznych oraz w zależności od współpracy /przyczepności, tarcia, zakotwienia/ obu składników kompozytu.

Zakres 1 zwykle się traktować jako sprężysty, zakres drugi jako pseudo-plastyczny i zakres trzeci jako plastyczny. Schemat pokazany na rys.6.1., odpowiada przypadkowi, gdy faza włóknista potrafi przenieść większe obciążenia niż kompozyt przed zarysowaniem i poprawia nośność kompozytu /zakres plastyczny ze wzmocnieniem/. W przeciwnym razie wzajemne proporcje i prze-

bieg zakresów mogą być różne. Na rys.6.2. pokazano schematyczne te przypadki.



Rys.6.2. Charakter zależności $G-\epsilon$ przy rozciąganiu związany z efektywnością fazy włóknistej.

b/ Rysy. W kompozytach z faza włóknistą można uzyskać korzystne warunki późniejszego powstawania rys, gęstszej ich rozłożenia i mniejszej rozwartości, innymi słowy można kontrolować proces zarysowania. Jest to jedna z istotnych właściwości tych materiałów.

c/ Wytrzymałość kompozytów na różnego rodzaju oddziaływania / zwłaszcza rozciąganie, zginanie i pdar/ to następna grupa korzystnych właściwości kompozytów. Związane z nimi jest nadzwyczaj ważne zjawisko lokalnego zachowania materiału w procesach niszczenia polegające na wewnętrznej absorpcji i dysypacji energii obciążenia.

d/ Zagadnień trwałości kompozytów betonowych nie można uogólnić i należy rozpatrywać je dla poszczególnych rodzajów materiałów i środowisk w których mają przebywać.

W kompozytach z włóknami stalowymi występuje zjawisko korozji zbrojenia w elementach betonowych o niewielkich grubościach przy małych średnicach mikrouzbrojenia i podwyższonej porowatości i zarysowaniu.

W kompozytach z włóknami szklanymi występuje korozja włókien i wzrost kruchości w zaczynie cementowym i w wodzie.

Spoiva i włókna polimerowe, a w konsekwencji kompozyty z nich wykonane podlegają zjawisku starzenia, są czułe na temperaturę, ekspozycję na promienie ultrafioletowe, światło.

Należy na koniec zwrócić uwagę na zagadnienie badań materiałów kompozytowych jako źródła informacji o materiale.

W kompozytach betonowych ulepszamy różne cechy materiału i

jest oczywiście niezbędne zadokumentowanie tych cech przez stosowne badania. Nie zawsze może to być badanie standartowe, gdyż w tym rodzaju badań nie zawsze udaje się wyeksponowanie cech o które chodzi. Przykładowo standartowa próba rozciągania czy ściskania na maszynie "miękkiej", bez kontroli prędkości odkształceń nie może dostarczyć istotnej informacji o zachowaniu materiału podczas niszczenia. Dlatego ważne wydaje się rozróżnienie dwóch uzupełniających się wzajemnie rodzajów badań:

- a/ badania porównawcze, według standartowych metod, tradycyjnych i "ulepszonych" materiałów pozwalające na jakościową i ilościową ocenę porównawczą,
- b/ badanie "poznawcze" pozwalające na obiektywne opisanie i zinterpretowanie analizowanego zjawiska w nawiązaniu do struktury materiału i warunków badania.

6.1. Właściwości zapraw i betonów uzbrojonych siatkami stalowymi.

6.1.1. Procent uzbrojenia i rozproszenie uzbrojenia.

Racjonalnie zaprojektowany kompozyt z siatkami stalowymi powinien mieć w jednym kierunku przekrój uzbrojenia w granicach od 1,25 do 4,5 %. Dolna granica gwarantuje uzyskanie dodatkowych wydłużeń po zarysowaniu, górna granica wynika z technologicznych możliwości ułożenia siatek.

Rozproszenie włókien w kompozycie przyjęło się określać za pomocą współczynnika powierzchni właściwej zwanym także współczynnikiem otulenia stali betonem, który wyraża stosunek powierzchni włókien /powierzchni przyczepności/ do objętości kompozytu. Ma on wymiar $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}\right]$ tj. $[\text{cm}^{-1}]$; wyraża się zależnością

$$K = \frac{F_u}{V_b}$$

lub

$$K = 4 \frac{\mu_f}{d_f}$$

Oznaczono przez F_u - powierzchnię uzbrojenia, V_b - objętość siatkoconu, $100 \mu_f$ - procent uzbrojenia, d_f - średnica drutu. Procent uzbrojenia i wskaźnik rozproszenia K związane są zależnością

$$100 \mu_f = 25 K d_f$$

Współczynnik K powinien zawierać się - jak wykazują doświadcze-

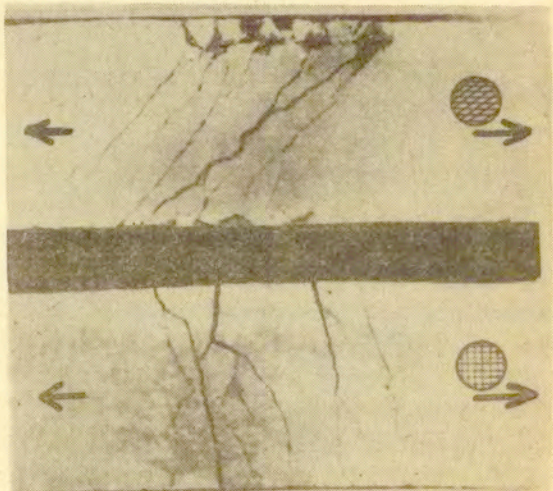
nia - w granicach od 1 do $1,5 \text{ cm}^{-1}$.

Graniczne rozstawy poszczególnych drutów w siatkach mieszczą się w zakresie 3 do 6 mm. Inne ograniczenie rozstawu wynika z kryteriów technologicznych tj. wymagania, aby średnica maksymalnego ziarna kruszywa nie przekraczała $1/3$ długości mniejszego wymiaru oczka.

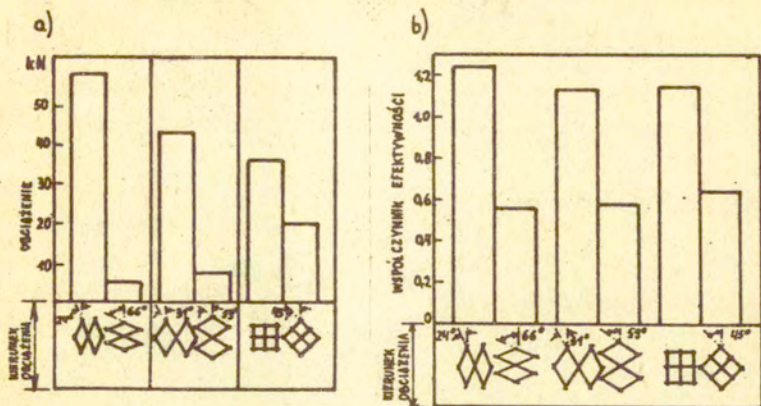
6.1.2. Zarysowanie.

Podstawową własnością siatkobetonu jest ustalony sposób powstawania i propagacji mikrorys [77, 187, 197]. Stwierdzono, że mikrorysy pokrywają się z drutami wątka /równoległymi do rys/ pierwszej siatki licząc od powierzchni zarysowanej. Stwierdzenie to zachowuje swoją ważność również wówczas, gdy druty wątka są nachylone pod kątem 45° do kierunku działania obciążenia /rys.6.3./.

Wpływ rozproszenia oraz procentu uzbrojenia przy siatkach o oczkach kwadratowych/ są tym większe im większa jest wartość współczynników $K_x = K_y$. Minimalna wartość tych współczynników powinna być zbliżona do $K_x = K_y = 1 \text{ cm}^{-1}$, przy minimalnym procentie uzbrojenia w kierunkach x i y równym $1,5\%$. Na obraz rys oraz wielkości siły rysującej ma również wpływ kształt oczek siatki oraz rodzaj siatki /np. zgrzewana, cięto-ciągniona/,
rys..6.4.

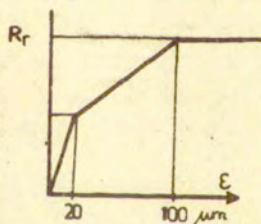


Rys.6.3. Współbieżność trasy rys z mikrouzbrojeniem.



Rys.6.4. Wpływ kształtu oczek siatki na przenoszone obciążenie
 6.1.3. Zachowanie się siatkobetonu rozciąganego.

Można rozróżnić 3 strefy na wykresie naprężenie - odkształcenie: strefę proporcjonalności do początku umownego mikrozarzysowania, strefę quasi - plastyczną odpowiadającą rozwojowi zarzysowania i plastyczną odpowiadającą rozszerzeniu rys i przyjęciu całego obciążenia przez uzbrojenie /rys.6.1./.
 Interpretację uproszczoną przedstawia rys.6.5.



Rys.6.5. Uproszczona zależność $\sigma - \epsilon$ siatkobetonu przy rozciąganiu.

Zakłada się, że współpraca między matrycą /osnową/ a mikrouzbrojeniem trwa, aż do osiągnięcia rozwartości pierwszej mikrorzysy rzędu 100 mikrometrów. Od tej chwili mikrouzbrojenie przejmuje wszystkie naprężenia rozciągające. Maksymalna liczba mikrorzys pojawia się po tym stadium t.j. po wystąpieniu pierwszej rzysy o rozwartości 100 mikrometrów.

Z punktu widzenia eksploatacyjnego możemy podzielić zachowanie się siatkobetonu na trzy stany graniczne użytkowania względnie nośności:

- stan szczelności, w którym rozwartość mikrorys wynosi 0-20 μ m,
- stan meta-korozyjny, w którym rozwartość mikrorys wynosi od 20 do 100 μ m,
- stan zniszczenia, w którym rozwartość mikrorys jest $> 100 \mu$ m, charakteryzujący się wyłączeniem ze współpracy betonu.

6.1.4. Zachowanie się siatkobetonu ściskanego

Uważano do niedawna, że wytrzymałość betonu piaskowego i siatkobetonu są sobie bardzo bliskie. Stwierdzano również, że wytrzymałość siatkobetonu jest bądź niższa o około 25% od betonu piaskowego, bądź też wyższa. Należy przypuścić, że zaniżone wyniki uzyskuje się wskutek efektu złego zagęszczania próbek betonowych i nierównomiernego rozmieszczenia mikrobrojenia.

Dobrze wykonany siatkobeton uzbrojony siatkami tkanymi o oczkach kwadratowych, w których rozstawy drutów w siatkach i odstepy siatek zbliżone są do siebie, wykazuje na ściskanie wyższe współczynniki sprężystości niż porównywalny beton piaskowy [107].

Mimo tendencji do rozwarstwiania się siatkobetonu wzdłuż linii siatek, zniszczenie materiału następuje przy znacznie wyższych naprężeniach niż w betonie piaskowym.

Odkształcenia graniczne przy zniszczeniu mierzone na próbkach 4x4x16 cm mieszczą się w przedziale 1,5 - 2^o/oo dla próbek zbrojonych, podczas gdy dla betonu piaskowego wynoszą 1^ooo.

6.1.5. Skurcz.

Duża zawartość cementu, najczęściej znacznie przekraczająca 600 kg/m³, brak większych ziarn kruszywa, małe grubości elementów siatkobetonowych powodują, że bezwzględne wartości skurczu betonu drobnoziarnistego są większe niż w betonie zwykłym, szybciej następuje stabilizacja przebiegu skurczu, a materiał wykazuje znaczną wrażliwość na zmiany wilgotności środowiska /większy udział skurczu wysychania/.

W zjawisku skurczu betonu drobnoziarnistego istotną rolę odgrywa mikrobrojenie rozproszone. Skurcz po okresie 300-400 dni siatkobetonu wynosi około $\epsilon_s = 0,66^o/oo$. Jest to wielkość

około 30% mniejsza niż w betonie piaskowym bez mikrobrojenia.

6.1.6. Przyczepność.

Spośród trzech znanych czynników składających się na współpracę betonu i stali t.j. zjawisk fizyko - chemicznych /adhezji/, tarcia i zazębienia mechanicznego, decydujące znaczenie ma przyczepność wskutek zazębienia betonu i stali.

6.2. Właściwości zapraw i betonów uzbrojonych ciętymi włóknami stalowymi.

Podstawowe dane na ten temat można znaleźć w [12], [13], [14], [16].

6.2.1. Procent uzbrojenia.

W zależności od rodzaju elementu i typu przewidywanych obciążeń procent uzbrojenia może wynosić od 0,5 do 3,0% w stosunku do objętości mieszanki, co odpowiada od ok. 2,0 do ok. 10,0 % w stosunku do ciężaru.

Uzbrojenie włóknami stalowymi poniżej 0,5% jest stosowane tylko w wyjątkowych okolicznościach, gdyż tak mała zawartość włókien może mieć jedynie znikomy wpływ na właściwości kompozytu.

Uzbrojenie powyżej 3,0% nie powinno być stosowane, ponieważ:

- powstają poważne trudności we właściwym rozmieszczeniu włókien oraz ułożeniu mieszanki w formach czy w deskowaniu,
- efektywność włókien zaczyna maleć,
- koszt włókien staje się wysoki w stosunku do uzyskanych efektów.

Praktycznie nie przekracza się 2,2 % uzbrojenia.

W nawierzchniach różnego rodzaju zwykle stosuje się uzbrojenie w ilości od 0,5 do 1,5 %, a w elementach konstrukcyjnych od 1,5 do 2,0 % objętościowo.

Powyżej wymienione ilości odpowiadają średniemu procentowi uzbrojenia, wynikającemu z proporcji dozowania. W rzeczywistości natomiast występuje często nierównomierny rozkład włókien, wywołany rozmieszczeniem fibrobetonu podczas transportu, wadliwym zagęszczaniem i innymi czynnikami przypadkowymi.

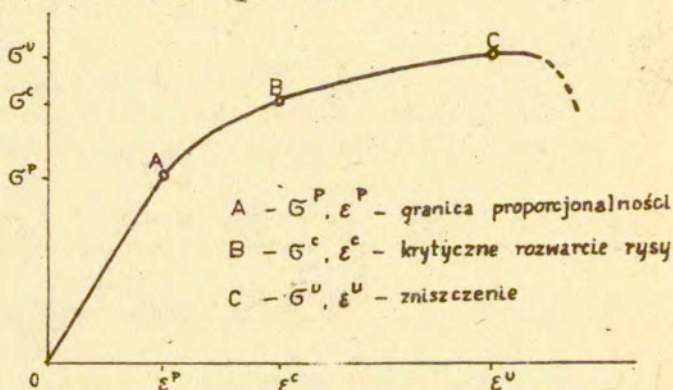
W badaniach określa się rzeczywisty procent uzbrojenia włóknami w przekrojach charakterystycznych w celu wyjaśnienia zmienności obserwowanych właściwości kompozytu, lub do oceny

jednorodności produkowanych elementów. Rzeczywisty procent uzbrojenia można obliczać obserwując rentgenogramy cienkich płytek oraz szlify przekrojów poprzecznych. W obu przypadkach trzeba zliczać ilości włókien, a porównywanie wyników uzyskanych w różnych miejscach prowadzi do oceny jednorodności kompozytu. Wyniki zliczania można także analizować metodami stereologicznymi.

Przybliżony procent uzbrojenia w elementach o niewielkiej grubości można określać metodami magnetycznymi.

6.2.2. Zależności odkształceń od obciążeń przy rozciąganiu i zginaniu.

Typowy kształt wykresu zależności odkształcenia od naprężenia pokazany jest na rys.6.6. W zależności od rodzaju obciążenia i sposobu uzbrojenia punkty charakterystyczne A, B, C wykresu mogą być rozmaicie usytuowane.



Rys.6.6. Kształt typowego wykresu zależności $[\sigma, \epsilon]$ przy obciążeniu elementu z betonu uzbrojonego ciętym stalowym włóknem rozproszonym.

Granica proporcjonalności A o współrzędnych $[\sigma^p, \epsilon^p]$ niewiele zależy od sposobu uzbrojenia włóknami, zwłaszcza graniczne odkształcenie ϵ^p pozostaje niemal takie samo jak w matrycy niezbrojonej.

Po przekroczeniu granicy proporcjonalności rozpoczyna się strefa quasi - plastyczna, związana z występowaniem mikrorys o szerokości mniejszej niż $100 \mu\text{m}$ i początkiem procesu odspajania włókien. Ten odcinek krzywej zależy w znacznym stopniu

od rodzaju i ilości włókien. Włókna odpowiednio ułożone /np. zlinearyzowane 1D/ oraz o zwiększonej przyczepności do matrycy /np. typu Bekaerta/, wpływają na rozproszenie rys a punkt o współrzędnych σ^c, ϵ^c występuje przy znacznie większych naprężeniach i odkształceniach niż w przypadku włókien gładkich i o rozkładzie przypadkowym w matrycy 2D lub 3D. Graniczne wielkości ϵ^c i σ^c /punkt B/ odpowiadają występowaniu krytycznej rozwarości rys, wynikającej z dodatkowych okoliczności np. z trwałości konstrukcji lub ze względów estetycznych.

Dalszy przebieg krzywej na rys.6.6. odpowiada rozwieraniu się rys i ich łączeniu. Maksymalne obciążenie /punkt C/ zależy od sposobu uzbrojenia - objętości, rozłożenia i zakotwienia włókien. Uzbrojenie efektywne prowadzi do poważnej różnicy między σ^u a σ^p , natomiast przy niskim stopniu efektywności $\sigma^u = \sigma^p$ i następuje zniszczenie.

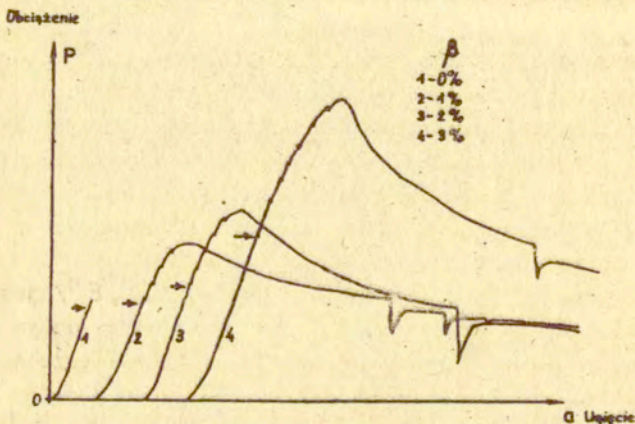
Odcinek krzywej po przekroczeniu punktu σ^u, ϵ^u jest silnie uzależniony od efektywności uzbrojenia. Przy dużym procencie uzbrojenia rozłożonego w kierunku działania rozciągających i dobrym zakotwieniu w betonie spadek nośności jest powolny i odpowiada stopniowemu wywlekaniu włókien z matrycy w miejscach, w których przecinają się rysy.

Powyższy opis odpowiada zjawiskom zachodzącym w elemencie rozciągającym, badanym w maszynie wytrzymałościowej o dostatecznej sztywności lub o kontrolowanym przemieszczeniu tłoka. W innym przypadku, np. przy obciążeniu grawitacyjnym, po pojawieniu się pierwszych rys po przekroczeniu punktu σ^p, ϵ^p wydławująca się energia sprężysta obciążenia powoduje raptowne zniszczenie.

W elementach zginanych badane są najczęściej ugięcia. Przykłady zależności między obciążeniem a ugięciem w belkach o różnym procencie uzbrojenia β pokazano na rys.6.7. Na tych wykresach widać w jaki sposób uzbrojenie włóknami wpływa na przebieg zjawisk, natomiast wielkości ugięć i nośność belek zależą w decydujący sposób od ilości i efektywności włókien.

W prawidłowo wykonanym fibrobetonie poddanym zginaniu lub rozciąganiu następuje mniejsze lub większe wzmocnienie materiału, to znaczy że pierwsze rysy pojawiają się później /dla wyższych obciążeń/, a po wystąpieniu pierwszych rys nośność ele-

mentu jeszcze wzrasta. Nawet rysy szerokie dochodzące do kilku milimetrów odpowiadają nieznacznie tylko zmniejszeniu nośności elementu. Pole powierzchni zawartej pod krzywą $/\sigma, \epsilon/$ lub pod krzywą $/P, a/$ jest proporcjonalne do energii sił zewnętrznych, wydatkowanej podczas procesu odkształcenia i jest wielokrotnie zwiększone w stosunku do matrycy nieuzbrojonej /por.6.7./.



Rys.6.7. Wykresy ugięcia w funkcji obciążenia elementów zginanych z fibrobetonu przy różnej zawartości włókien stalowych.

Moduł sprężystości kompozytu może być obliczony na podstawie wzorów wynikających z prawa mieszanin.

6.2.3. Powstawanie i rozwój rys.

Obecność włókien powoduje rozmieszczenie rys i stają się one później zauważalne, tzn. przy wyższych obciążeniach. Powstanie rys następuje przy odkształceniach jednostkowych rzędu od $100 \cdot 10^{-6}$ do $200 \cdot 10^{-6}$.

Rozwój mikrorys powoduje quasi-plastyczne odkształcenia na odcinku między punktami $/\sigma^P, \epsilon^P/$ a $/\sigma^C, \epsilon^C/$ na rys.6.6. Podczas rozwierania rys, włókna stopniowo odspajają się od matrycy. Następnie, po osiągnięciu maksymalnej nośności, wszystkie włókna przechodzące przez rysy są już odspojone i dalsze rozwieranie rys odbywa się przy wyciąganiu włókien z matrycy. O nośności kompozytu w tym etapie decydują siły tarcia między włóknami a matrycą.

Im bardziej uzbrojenie włóknami jest efektywne, tym więcej

powstaje rys, przy czym są one drobniejsze. Do uzyskania w elemencie rozciągany lub zginany systemu-mikrorys, równomiernie rozłożonych wzdłuż długości, pożądane jest stosowanie włókien o powiększonej przyczepności, uporządkowanych w kierunku rozciągań głównych /1D - linearyzacja/.

Dla zastosowań fibrobetonu mają znaczenie dwie właściwości związane z rozwojem rys:

- zamiast skupionych rys o znacznej rozwartości można uzyskać system mikrorys, mniej szkodliwych ze względu na korozję i trwałość,
- nawet po wystąpieniu znacznych zarysowań, np. w wyniku obciążeń wyjątkowych, elementy konstrukcyjne zachowują część nośności.

Odporność na rozwój rys jest istotną cechą fibrobetonu, stąd próby pomiaru tej odporności przy zastosowaniu pojęć mechaniki zniszczenia. Próby te w zakresie liniowej mechaniki zniszczenia obejmują m.in. doświadczalne wyznaczanie krytycznych wartości współczynnika K_C - intensywności naprężeń oraz G_C - współczynnika wyzwalań energii sprężystej. Łącznie ze stosowaniem wzorów analitycznych próby takie prowadzone są na późnego rodzaju elementach fibrobetonowych ze wstępnymi naciągami, inicjującymi rysy. Brakuje narazie jednoznacznej odpowiedzi, czy wartości tych współczynników i innych wyznaczonych tą drogą parametrów mogą mieć znaczenie jako stałe materiałowe i służyć do oceny jakości i odporności fibrobetonu. Zarówno te pojęcia bowiem jak i wspomniane wzory analityczne zostały sformułowane w odniesieniu do ośrodków idealnych, jednorodnych i liniowo sprężystych. Tymczasem fibrobeton jest ośrodkiem silnie niejednorodnym a po zarysowaniu trudno wogóle mówić o liniowości. Mimo to, uzyskano dotychczas pewne rozeznanie zakresów w jakich występują nominalne wartości K_C i G_C oraz możliwość przybliżonego porównywania jakości materiału. Dalsze badania dotyczą uwzględnienia lokalnych zjawisk plastycznych występujących na czubku rysy propagującej się w betonie, energii zużytej podczas całego procesu zarysowania, oraz zastosowania innych pojęć zaczerpniętych z mechaniki zniszczenia.

6.2.4. Wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie.

Pojęcie wytrzymałości na rozciąganie w odniesieniu do fi-

brobetonu nie jest tak jednoznaczne jak w betonie tradycyjnym [18]. Wobec znacznej odkształcalności zniszczenie nie następuje po osiągnięciu granicy proporcjonalności ani też po przekroczeniu maksymalnej nośności. Co więcej, właśnie zakres nośności w fazie silnego zarysowania decyduje często o przydatności fibrobetonu i stanowi zaletę w stosunku do żelbetu. Z tego powodu wytrzymałość trzeba określać uwzględniając zależnie od potrzeb rozmaite stany np:

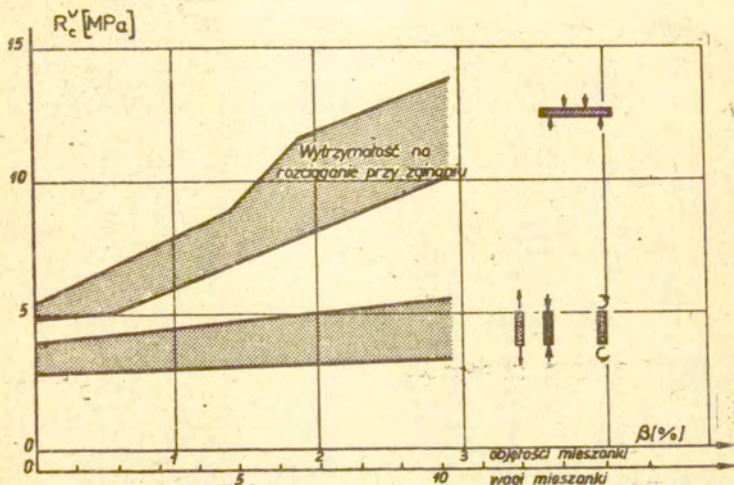
- początek zarysowania,
- maksymalną nośność,
- odkształcenia lub przemieszczenia zmieniające w sposób istotny kształt konstrukcji lub układ obciążenia,
- osiągnięcie konwencjonalnie przyjętych wartości odkształceń, przemieszczeń lub rozwarcia rys.

Zniszczenie elementu fibrobetonowego i określenie wytrzymałości materiału są także zależne od sposobu obciążenia /por. 6.2.2./. Podatny system obciążający powoduje wyzwolenie całej nagromadzonej energii bezpośrednio po wystąpieniu pierwszego pęknięcia lub rysy. Natomiast w sztywnych maszynach wytrzymałościowych o kontrolowanym przemieszczeniu tłoka można badać przebieg zjawisk w całym zakresie i obserwować opadającą gałąź wykresu obciążenie - przemieszczenie.

Wytrzymałość na rozciąganie rozumiana jako maksymalna nośność rośnie wraz z ilością i efektywnością włókien /por. rys 6.7./. Wzmocnienie to pokazano przykładowo na rys.6.8. Na podstawie wielu badań można określić, że wzmocnienie to w elementach rozciąganych dochodzi 25 do 30 % w stosunku do wytrzymałości matrycy nieuzbrojonej, a w elementach ściskanych tylko 10 do 15 %. Przy zginaniu podwyższenie wytrzymałości może być znacznie większe, jak to widać na rys.6.8. Największe wzmocnienia osiągnano przy stosowaniu włókien o podwyższonej przyczepności, linearyzowanych równolegle do kierunków głównych, przy czym objętość włókien naogół nie przekracza 2 %. Wzmocnienie to sięgało wówczas 100 % /29-1/.

Warto nadmienić, że wytrzymałość na zginanie elementu fibrobetonowego zależy również od rozmieszczenia włókien w przekroju poprzecznym. Najefektywniej jest wykorzystane mikrobrojenie skoncentrowane w strefie rozciąganej, a w szczególności

w pobliżu włókien skrajnych rozciąganych /27/. Włókna w strefie sciskanej są nawet czynnikiem obniżającym nośność. Przedstawia to rys.6.8.a.



Rys.6.8. Wykresy pokazujące zakresy wzrostu wytrzymałości elementów fibrobetonowych w różnych stanach obciążenia [14].

Graniczne odkształcenia lub przemieszczenia, przy których elementy fibrobetonowe wykazują jeszcze wyraźną choć zmniejszoną wytrzymałość, rosną znacznie wraz z efektywnością i ilością włókien. Ma to duże znaczenie np. we wszelkich stanach awaryjnych, gdy konstrukcja może przenieść własny ciężar mimo znacznych spękań. Wówczas wytrzymałość kompozytu wynika z oporu włókien które przechodzą poprzez rysy i są wyciągane z matrycy.

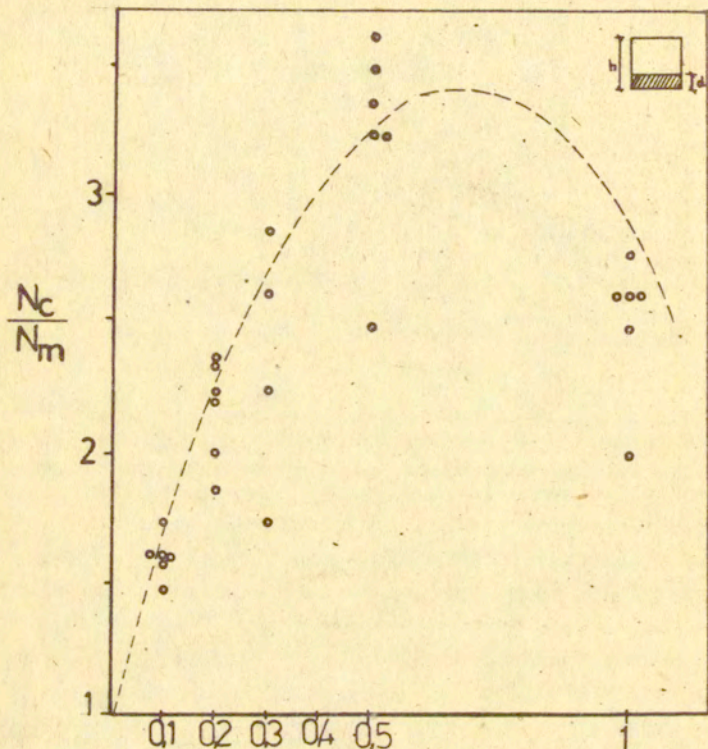
Wytrzymałość na ścinanie różnie wraz ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie. Przy rozpatrywaniu tej właściwości należy również uwzględnić korzystniejsze warunki przeciwdziałające powstawaniu rys, o czym była mowa wyżej.

Przenoszenie naprężeń ścinających w elementach nośnych wyłącznie przez włókna nie jest stosowane. Natomiast połączenie włókien z uzbrojeniem klasycznym prętami pozwala na:

- zmniejszenie lub zlikwidowanie prętów odgiętych,
- podwyższenie obciążeń, wywołujących określone stany zarysowania.

Nieliczne badania wytrzymałości na ściskanie wskazują na

jej zależność od rodzaju i układu włókien, a także od sposobu betonowania elementów; brakuje obecnie danych do szczegółowych zaleceń ilościowych.



Rys.6.8.a. Wzrost nośności elementu zginanego, odniesiony do elementu niezbrojonego, przy wzrastającej warstwie mikrobrojenia [27]:

6.2.5. Wytrzymałość na zmęczenie i trwałość.

Wytrzymałość na zmęczenie od obciążeń zginających rośnie w wyniku dodania włókien stalowych. Przyjmując zgodnie z zaleceniami literatury, że wytrzymałość zmęczeniowa na zginanie dla betonu $R_{zg\ zm}$ odpowiadająca 2 milionom cykli wynosi dla betonu drobnoziarnistego $R_{zg\ zm} = 0,6 R_{zg}$ gdzie R_{zg} jest to wytrzymałość na zginanie przy statycznym obciążeniu, to po dodaniu włókien wzrasta ona do wielkości $R_{zg\ zm} \geq 0,75 R_{zg}$. Ostateczna wielkość zależy od ilości, kształtu i smukłości włókien. Podana wyżej wielkość $0,75 R_{zg}$ odnosi się do betonu z kruszywa do 8 mm, z włóknami prostymi, gładkimi o $l/d = 100$ w ilości 1,5 % objętości betonu.

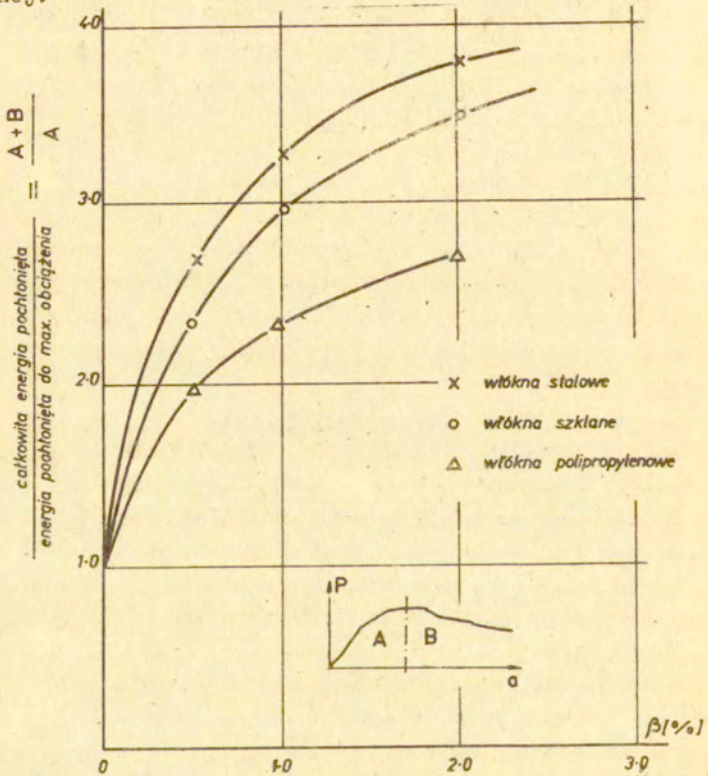
Z dość licznych już badań i weryfikacji praktycznej w kraju i za granicą wynika, że beton z włóknami stalowymi jest trwały w normalnych warunkach użytkowania. Jeśli nasiakliwość betonu nie przekracza 5 % wagowo, to włókna w takim betonie nie korodują nawet w środowisku wilgotnym, ani w środowisku o średniej agresywności w stosunku do stali. Stwierdzono, że włókna nie korodują nawet w miejscach zarysowań betonu, jeśli rozwarcie rys nie jest większe niż 0,1 mm. Korodują one natomiast w skarbonizowanej warstwie betonu, czemu można się przeciwstawić stosując odpowiednie domieszki bądź zewnętrzną ochronę betonu.

6.2.6. Zdolność gromadzenia energii i odporność na oddziaływania dynamiczne.

Pojęcie zniszczenia w odniesieniu do fibrobetonu nie jest łatwe do zdefiniowania. Przy odpowiednio efektywnym uzbrojeniu włóknami wykresy takie jak pokazane na rys. 6.6. i 6.7. wydłużają się znacznie, zanim następuje całkowite rozdzielenie elementów /przy rozciąganiu/ lub zupełne rozłamanie / przy zginaniu/. Przed utratą całkowitą nośności układ geometryczny elementu może ulegać zmianie jakościowej a urządzenia badawcze często nie pozwalają na kontynuowanie pomiarów wobec nadmiernych przemieszczeń /por.6.9./.

Pole pod wykresem $G-\xi$ jak na rys.6.6. lub pod wykresem P, a , jak na rys.6.7. jest proporcjonalne do energii nagromadzonej w elemencie podczas odkształcenia lub do pracy sił zewnętrznych, i jest one dogodnym miernikiem odporności materia-

zu /elementu/ na zniszczenie. Miernik ten może być wykorzystywany np. do porównywania jednakowych elementów badanych w takich samych warunkach, lecz wykonanych przy różnym uzbrojeniu, /por. rys.6.7./. Okazuje się, że im bardziej efektywne jest uzbrojenie włóknami, tym większe jest pole pod krzywą ograniczone przyjętym umownie odkształceniem lub przemieszczeniem. Wskaźnik uzyskany przez podzielenie całkowitego pola przez pole ograniczone rzędną maksymalnego obciążenia lub rzędną rozwarcia 1-szej rasy prowadzi do wniosku o kilkadziesiąt razy większej odporności fibrobetonu w porównaniu do matrycy nieuzbrojonej.



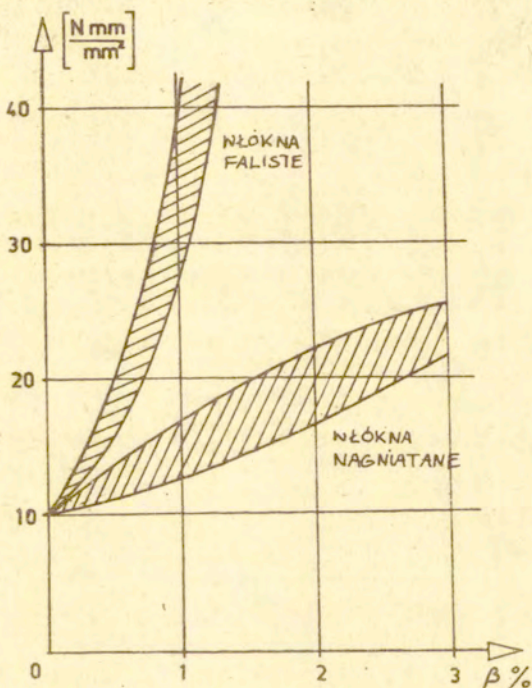
Rys.6.9. Wykresy zależności przyrostu energii nagromadzonej w zginanym elemencie fibrobetonowym od uzbrojenia.

Na rys.6.9. pokazano wykresy zmienności tak określonego wskaźnika w zależności od rodzaju włókien i ich ilości. Wykre-

sy te mają znaczenie przykładowe.

Odporność fibrobetonu na oddziaływanie dynamiczne i uderzenia wynika ze zdolności do gromadzenia znacznych ilości energii podczas procesu zarysowania. Odporność ta może być wykorzystywana we wszelkiego rodzaju konstrukcjach narażonych na przypadkowe uderzenia i wybuchy. W odróżnieniu od innych materiałów, fibrobeton nawet po silnym spękaniu zachowuje znaczną zdolność do przenoszenia obciążeń, /31/.

Średnio można przyjmować, że wytrzymałość na uderzenia jest 2 do 2,5 krotnie większa przy uzbrojeniu włóknami stalowymi w ilości ok.2% w porównaniu z matrycą nieuzbrojona.



rys.6.10. Wzrost wytrzymałości na uderzenia w zależności od rodzaju i objętości włókien stalowych.

Na rys.6.10. pokazano przykłady zależności przyrostu wytrzymałości na uderzenia przy różnym uzbrojeniu.

6.2.7. Porowatość i przepuszczalność fibrobetonu.

Fibrobeton jest naogół materiałem o zwiększonej porowato-

ci ponieważ obecność włókien utrudnia prawidłowe zagęszczenie.

6.2.8. Odkształcenia opóźnione - skurcz i pełzanie.

Wielkości odkształceń skurczowych i pełzania fibrobetonu zależą głównie od rodzaju włókien i zawartości cementu w matrycy. Wpływ włókien na t.zw. skurcz swobodny elementów oraz na ich pełzanie jest niemal pomijalny.

Skutki procesu skurczu w postaci rys można w znacznej mierze kontrolować poprzez uzbrojenie włóknami. Głównym celem stosowania włókien w elementach podlegających szczególnie silnemu skurczowi, np. w nawierzchniach lub elewacjach budynków, jest więc przeniesienie napreżeń skurczowych wynikających z tego, że odkształcenia te nie przebiegają swobodnie. Uzyskać więc można rozproszenie rys skurczowych, podobnie jak rys innego pochodzenia. Prawidłowo zaprojektowany fibrobeton i odpowiednio wykonany może wykazywać rysy jedynie poniżej dostrzegalnej rozwartości, dzięki czemu stają się one nieszkodliwe.

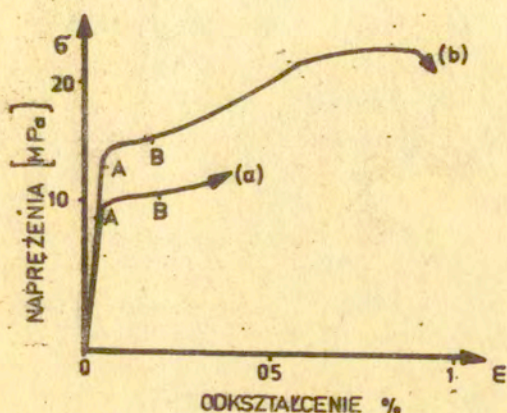
6.2.9. Metody badań i kontroli.

Dotychczas jedynie American Concrete Institute zaproponował zestaw badań, potrzebnych do określenia właściwości fibrobetonu. Podano przy tym wymiary i sposób wykonania próbek oraz sposoby przeprowadzenia badań, Proponowane badania są powiązane z obowiązującymi w USA zaleceniami w zakresie badania betonów zwykłych. Tematyce badań poświęcono [157].

W obecnym stanie rozwoju badań nad fibrobetonem w Polsce nie jest jeszcze możliwe opracowanie tak szczegółowych zaleceń.

6.3. Mechaniczne właściwości zaczynów cementowych i zapraw uzbrojonych ciętym włóknem szklanym.

Typowy wykres zależności naprężenia od odkształcenia przy rozciąganiu został przedstawiony na rys.6.11.



Rys.6.11. Kształt typowego wykresu zależności $\sigma - \epsilon$ przy rozciąganiu elementu z cementu uzbrojonego ciętym włóknem.

a-niski procent uzbrojenia krótkimi włóknami,
b-duży procent uzbrojenia długimi włóknami.

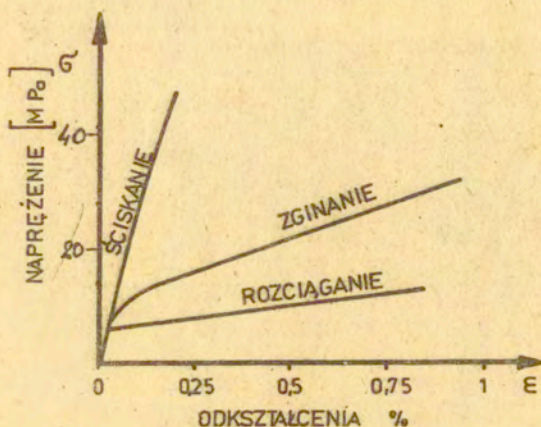
W obszarze OA materiał zachowuje się w sposób sprężysty. Moduł sprężystości E_k kompozytu określa się z prawa mieszanin /por. punkt 5.2./.

W obszarze AB występuje zarysowanie kompozytu. Rysy powstają w wielu punktach kompozytu. W punkcie B wykresu występuje rysa zasadnicza i w dalszym ciągu materiał niszczy się przez wyciąganie lub pęknięcie włókien w obrębie tej rysy.

Krytycznym czynnikiem w kompozycie uzbrojonym włóknem szklanym są zjawiska przyczepności występujące w powierzchniach zespolenia dwóch faz. Wynikają one ze skomplikowanej budowy włókna szklanego i powinowactwa chemicznego szkła i cementu prowadzącego do korozji włókna szklanego. Silna przyczepność zewnętrznych warstw włókna szklanego jest z jednej strony źródłem dobrej współpracy obu faz, z drugiej strony prowadzi do łatwego łamania włókien otulonych cementem, zginanych w miej-

scu zarysowania matrycy.

Na rys.6.12. przedstawiono zachowanie się fibrobetonu z włóknem szklanym przy ściskaniu, rozciąganiu, zginaniu.



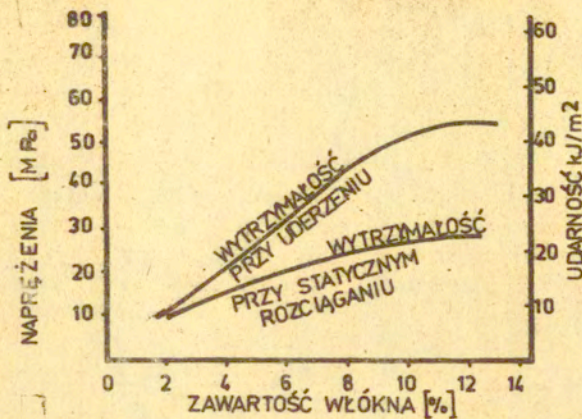
Rys.6.12. Zachowanie się fibrobetonu z włóknem szklanym przy różnych stanach obciążenia.

Przy zginaniu materiał kolejno znajduje się w podobnych stadiach rozwoju zarysowania jak przy rozciąganiu.

W szkło-cemencie, wytrzymałość na ścinanie wynosi dla matrycy między warstwami uzbrojenia, wykonywanej metodą natryskową w postaci warstw, około 3 MN m^{-2} . Tę samą wartość należy przyjmować przy ścinaniu między matrycą a włóknem. Przy ścinaniu w poprzek włókien wytrzymałość wynosi od około 12 MN m^{-2} , aż do 50 MN m^{-2} przy prostopadłym ścinaniu do włókien.

Wytrzymałość na uderzenie szkło-cementu określana przy użyciu metody Izod wynosi 20 kJ/m^2 . Dla porównania wytrzymałość uderzeniowa azbesto-cementu wynosi $4,4 \text{ kJ/m}^2$. Szkło-cement pęka przy uderzeniu w odmienny sposób od sposobu pęknięcia betonu czy azbesto-cementu, wykazując pewną ciągliwość. Wyższa wytrzymałość na uderzenia stanowi dodatnią cechę materiałową szkło-cementu.

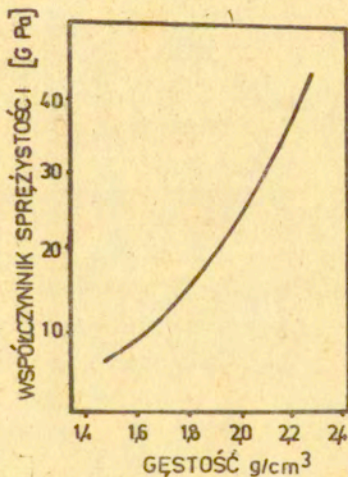
Zwiększona wytrzymałość statyczna i dynamiczna kompozytu zależna jest od zawartości włókna w kompozycie /rys.6.13./.



Rys.6.13. Wpływ zawartości włókna w kompozycie na wytrzymałość dynamiczną przy uderzeniu i wytrzymałość statyczną.

Zwiększona zawartość włókna powoduje, że struktura kompozytu może zawierać większe wady /pory w matrycy/ i powodować zmniejszenie gęstości kompozytu. Wpływa to ujemnie na właściwości mechaniczne kompozytu.

Rys.6.14. Zależność współczynnika sprężystości E od gęstości szkło-cementu.



Na rys.6.14. przedstawiono zależność modułu sprężystości E od gęstości szkło-cementu.

Kompozyty szkło-cementowe podlegają dużemu skurczowi początko-

wemu, który dochodzi do 30×10^{-4} . Dodatek piasku obniża skurcz kompozytu ale wpływa na obniżenie wytrzymałości. Optymalna mieszanka z piaskiem posiada stosunek cementu do piasku równy 2:1. Ważnym czynnikiem wpływającym na właściwości kompozytu jest technologia jego wykonania. Właściwości kompozytu w różnych technologiach podaje tablica 6.1.

Tablica 6.1. Właściwości kompozytu po 28 dniach wykonanego czterema technikami. Matryca - cement portlandzki, włókno szklane długości 20 mm.

Właściwości	Natrysk	Mieszanka ręcznie formowana	Mieszanka wytłaczana	Mieszanka prasowana
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu MPa	21,2	9,8	18,0	13,5
Wytrzymałość uderzeniowa /Charpy/ kJm ⁻²	8,1	8,6	9,0	9,2
Gęstość /g/cm ³ /	2,18	1,60	1,74	1,80

W związku z postępującą korozją alkaliczną włókien właściwości mechaniczne zależą od warunków zewnętrznych w jakich się znajduje kompozyt. Zmianę właściwości kompozytu /z włókna alkaloodpornego/ po pewnym okresie sezonowania przedstawia tablica 6.2. Tablica 6.2. Zmiana w procentach właściwości kompozytu natryskwanego po 1 i 5 latach przechowywania w powietrzu i w wodzie w stosunku do właściwości po 28 dniach.

Właściwości	po roku		po 5 latach	
	w powietrzu	w wodzie	w powietrzu	w wodzie
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	-6 ± -18	-42 ± -48	-18 ± -29	-42 ± -50
Granica proporcjonalności	-15 ± -42	+3 ± +24	-21 ± -35	+3 ± +24
Wytrzymałość przy rozciąganiu	0	-24 ± -42	-2 ± -14	-24 ± -42
Moduł sprężystości	0	+20 ± +49	0	+20 ± +49
Wytrzymałość uderzeniowa	0 ± -25	-58 ± -68	-12 ± -25	-75 ± -83

Szczegółowe dane o właściwościach szkło-cementu można znaleźć w [33], [34].

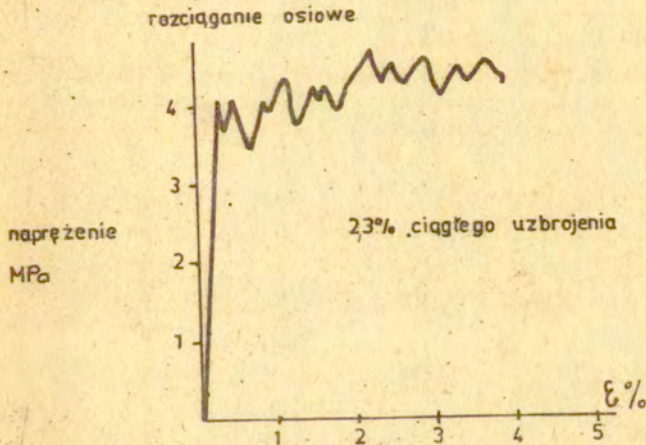
6.4. Właściwości zapraw i betonów uzbrojonych ciętym włóknem polipropylenowym.

Włókna polipropylenowe zwiększają sztywność betonu podda-

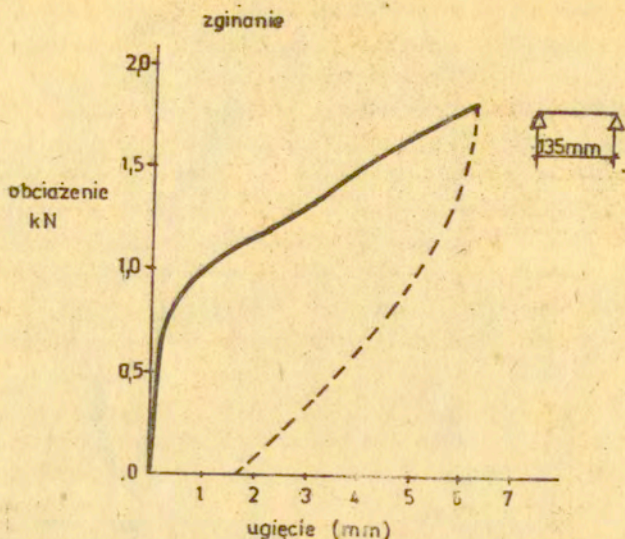
nego obciążeniem udarowym, pomimo, że odznaczają się niskim modułem sprężystości, wysokim współczynnikiem Poissona i znikomą przyczepnością fizyko-chemiczną do zaczynu cementowego. Siła wyciągająca włókno z betonu jest pomimo to rzędu 300-500 N /trudno określić naprężenia przyczepnościowe wskutek niezdefiniowanej powierzchni/ i wynika z zakotwienia mechanicznego włókien. Obserwuje się na elementach zniszczonych, że wytrzymałość na wyciąganie włókien polipropylenowych jest wysoka, zwłaszcza w elementach starych i że włókna ulegają zerwaniu. Tłumaczy się to tym, że produkty hydratacji cementu infiltrują we włókna polipropylenowe o złożonej budowie. Ocenia się, że wielkość naprężeń od sił przyczepności jest rzędu 0,7 - 1,4 MPa.

6.4.1. Zależność naprężenia - odkształcenia przy rozciąganiu.

Wykres σ - ϵ w zależności od procentu uzbrojenia ma kształt przedstawiony na rys.6.15. [14]. Odczuwa się brakiem wyraźnej fazy przejściowej pseudo-plastycznej.



Rys.6.15. Zależność σ - ϵ przy rozciąganiu osiowym. Elementy zginane smukłe o $l/h = 10$, silnie zbrojone ($\sim 6\%$ włóknem ciągłym) dają wzrastającą gałąź wykresu po zarysowaniu i gęsty rozkład rys.6.16. [14].



Rys.6.16. Zależność ugięcia - obciążenia próbki zginanej.

6.4.2. Odporność na obciążenie udarowe i absorpcja energii.

W badaniach rejestrowano dwu - do dziesięciokrotny wzrost udamności w porównaniu z matrycą nieuzbrojoną.

Absorpcja energii przez kompozyt, nawet przy niskich procentach uzbrojenia, wielokrotnie przekracza właściwości samej matrycy i może być większa niż w kompozycie z włókien stalowych o podobnym procencie uzbrojenia niewielkiej przyczepności włókien do matrycy /por. rozdział 8/.

6.4.3. Trwałość

Kompozyty z włóknami polipropylenowymi mają uzbrojenie odporne na agresję chemiczną.

6.5. Właściwości betonów polimerowych.

6.5.1. Właściwości betonów impregnowanych polimerami /PIC/.

Betony impregnowane polimerem należą do kompozytów betonowych o najwyższej wytrzymałości mechanicznej. Maksymalna wytrzymałość na ściskanie uzyskana w dotychczasowych badaniach wynosi 280 MPa. Za wartości reprezentatywne w przeciętnych warunkach przemysłowych można natomiast przyjąć: wytrzymałość na ściskanie 150 MPa i moduł sprężystości 45 GPa. Ponadto, zna-

czny w porównaniu z betonem zwykłym wzrost wykazują takie cechy jak wytrzymałość na rozciąganie, twardość, odporność na ścieranie i mrozoodporność, zwiększa się również chemoodporność i korzystnie maleje przepuszczalność wody. Na szczególne podkreślenie zasługuje około 20-krotne zmniejszenie nasiąkliwości wodą i około 10-krotny spadek podatności na pełzanie. Na prawie niezmiennym w stosunku do betonu cementowego poziomie pozostają gęstość, przewodność cieplna i ciepło właściwe /tabl.6.3./. Obok tych bardzo korzystnych zmian, do wad należy zaliczyć przede wszystkim gwałtowny charakter zniszczenia materiału nie poprzedzony zjawiskami ostrzegawczymi, jak również, choć w mniejszym stopniu, wzrost współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej o około 30%.

Zgodnie z uwarunkowaniami strukturalnymi występującymi w PIC /por.p.5.5./ właściwości PIC są określone przede wszystkim stopniem wypełnienia polimerem porów w betonie. Z tego względu struktura i cechy użytego do impregnacji betonu w pierwszym rzędzie decydują o efektywności techniczno-ekonomicznej impregnacji /parametry technologiczne procesu, zawartości polimeru w betonie/, nie zaś o uzyskanych w efekcie właściwościach PIC. Wpływ rodzaju użytego polimeru jest również względnie niewielki i uzależniony tylko od niektórych cech fizykochemicznych polimeru /zwilżalność w stanie ciekłym i adhezji w stanie utwardzonym/ oraz od temperatury zeszklenia /przemiany II rodzaju/. Cechy te dla wielu polimerów są dość zbliżone. Z drugiej strony możliwości doboru impregnatu spośród różnych polimerów są ograniczone zdolnością wnikania w głąb betonu /w tym zwłaszcza lepkością /ich monomerów bądź odpowiednich żywic. Wszystko to czyni, iż zróżnicowanie cech użytkowych PIC np. w porównaniu z PC jest stosunkowo nieduże. Pewnym dodatkowym elementem oddziaływania na właściwości jest natomiast głębokość impregnacji, która może się zmieniać od tylko powierzchniowej do skrośnej.

W praktyce przy prognozowaniu cechy betonu impregnowanego wygodnie jest stosować tzw. współczynnik wzmocnienia $X_{PIC}/X_B/$, którego typowe zakresy zestawiono poniżej:

- wytrzymałość na ściskanie: 3-4; wytrzymałość na rozciąganie: 2,5-4; moduł sprężystości: 1,5-4; twardość: 1,5-2; odporność na ścieranie: 1,5-2; nasiąkliwość wodą: ~ 20; przepuszczalność

Tabl.6.3. Porównanie właściwości betonu polimetakrylanowo-metylowego /PC/ i betonu cementowego impregnowanego metakrylanem metylu /PIC/.

lp.	Właściwość	Jednostka	Beton cementowy	PC	PIC
1	2	3	4	5	6
1	Wytrzymałość na ściskanie, R_c	MPa	37	98-138	138
2	Wytrzymałość na rozciąganie, R_T	MPa	3	9-11	11
3	Wytrzymałość na ścinanie, R	MPa	-	23	-
4	Wytrzymałość na zginanie, R_g	MPa	2-4	28	-
5	Moduł sprężystości:	GPa	25	37	43
6	Ścieralność	mm	1,3	-	0,4
7	Nasiąkliwość wodą, n_w	%	5,4	0,6	0,34
8	Przepuszczalność wody	mm rok ⁻¹	0,16	-	0,043
9	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	10 ⁻⁶ deg ⁻¹	10	13,3-18,8	13,1
10	Odporność na zamrażanie				
	- liczba cykli		740	-	10340
	- strata masy	%	25	-	12,5

wody /mm rok⁻¹/: 3,5-4; przewodność cieplna: 0,95; współczynnik rozszerzalności cieplnej: 1,3; gęstość: 1,05.

Wobec względnej niezależności właściwości PIC od cech betonu cementowego, w pierwszym przybliżeniu można stosować zasadę, że im niższa klasa betonu tym można oczekiwać większego stopnia wzmocnienia.

6.5.2. Właściwości betonów cementowo-polimerowych.

Wprowadzenie polimeru w odpowiedniej postaci /por.p.4.5.2/ do mieszanki betonu cementowego powoduje z reguły zarówno zmianę właściwości technologicznych mieszanki jak i cech użytkowych betonu. Polimer stosuje się w celu poprawy jednej lub kilku cech szczególnie istotnych w danym zastosowaniu. Skutki tego typu modyfikacji są znacznie mniejsze niż w przypadku PIC i PC, zaś polepszenie danej właściwości z reguły pociąga za sobą pogorszenie innych. Rozmaitość stosowanych tutaj rodzajów modyfikatorów i szeroki zakres ilościowy w jakim mogą być użyte, pozwala na otrzymanie wielu różnych rozwiązań materiałowych. Niewielki dodatek polimeru z reguły powoduje plastyfikację mieszanki betonowej, zaś dalsze zwiększenie zawartości pogarsza urabialność. W zakresie małych dodatków np. poliocetanu winylu można przy tym oddziaływać na urabialność, praktycznie bez zmiany innych właściwości betonu. W obecności polimeru np. poliocetanu winylu lub żywicy melaminowej, czas wiązania zaczynu na ogół ulega wydłużeniu, niektóre rodzaje żywic np. epoksydowych mogą jednak powodować przyspieszenie wiązania. Skurcz utwardzania PCC z reguły /jakkolwiek nie zawsze/ jest istotnie większy niż betonu zwykłego.

PCC charakteryzuje na ogół wyższa szczelność, mrozoodporność a także w pewnym stopniu lepsza od zwykłych betonów chemo-odporność. Betony cementowo-polimerowe zwłaszcza modyfikowane poliocetaniem winylu lub lateksami kauczukowymi wykazują na ogół większą niż betony zwykłe przyczepność do innych materiałów budowlanych. Znane są jednak przypadki obniżania przyczepności w obecności polimeru, zwłaszcza typu silikonów.

Wytrzymałość na ściskanie PCC może sięgać do 150 %, a wyjątkowo do 200 % wytrzymałości betonów zwykłych. Wytrzymałość na rozciąganie na ogół nie przekracza 150 % wytrzymałości betonów cementowych. W celu podwyższenia wytrzymałości betonu

można stosować między innymi dodatki polioctanu winylu, lateksu kauczukowego, a także żywic akrylowych, melaminowych i moczynowych. Ponadto, PCC wykazują na ogół większą udarność, odporność na ścieranie i rysoodporność.

Do wad PCC obok wspomnianego już dużego skurczu utwardzania należy zaliczyć:

- dużą rozszerzalność cieplną /większą nawet o 50 % od rozszerzalności betonów zwykłych/,
- stosunkowo mały moduł sprężystości,
- dużą podatność na pełzanie.

6.5.3. Właściwości betonów żywicznych.

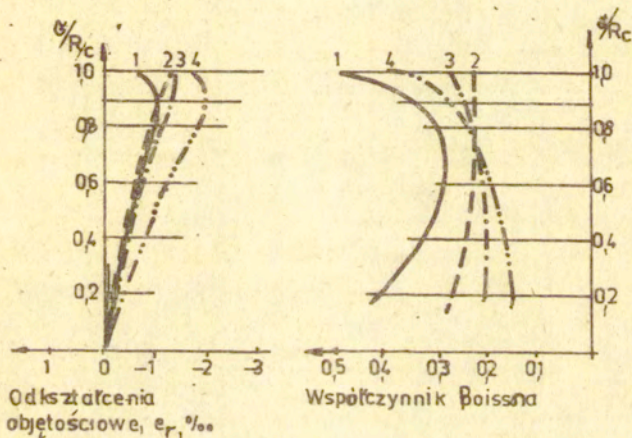
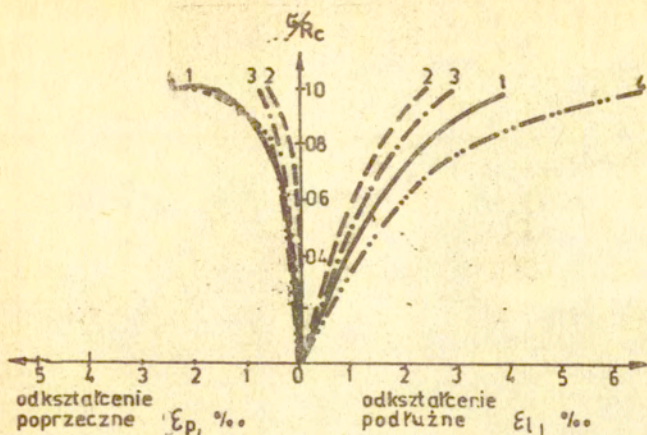
Podstawową zaletą betonów żywicznych jest duża wytrzymałość mechaniczna /tabl.6.4, rys.6.17./ w połączeniu z dobrą odpornością chemiczną.

Ponadto jako cechy dodatnie betonów żywicznych można wymienić: krótki czas żelowania i szybki przyrost wytrzymałości, tj. krótki czas do osiągnięcia sprawności montażowej i eksploatacyjnej, doskonałą przyczepność do różnych materiałów, dużą szczelność, dużą rysoodporność, bardzo małą ścieralność, wysoką mrozoodporność, możliwość uzyskiwania gładkich powierzchni, łatwość otrzymywania kolorowych wybarwień, minimalne wymagania w zakresie pielęgnacji betonu.

Do wad betonów żywicznych należy zaliczyć: stosunkowo dużą podatność na pełzanie, ograniczoną odporność cieplną, zwłaszcza betonów utwardzanych wg reakcji polimeryzacji addycyjnej duża rozszerzalność cieplna, a także: mniejszą w porównaniu z betonem zwykłym odporność na starzenie, stosunkowo wysoki koszt, konieczność przestrzegania specjalnych warunków wykonania /dokładne dozowanie składników, suche wypełniacze i podłoże, odpowiednia temperatura i wilgotność środowiska w czasie mieszania i układania betonów itp./.

Można wymienić następujące cechy wspólne /tabl.6.4./

- gęstość od 1900 do 2400 kg m⁻³, a więc nieco mniejsza lub zbliżona do gęstości zwykłych betonów cementowych,
- całkowity skurcz utwardzania od 0,05 do 3 0/00, a zatem w zależności od odmiany betonu żywicznego otrzymujemy materiały wykazujące skurcz mniejszy /E,PU/ zbliżony /A/ lub niekorzystnie nawet o rząd wielkości większy /NP,FUR,B,M/ od skurczu charakte-



Rys.6.17. Krzywe naprężenie - odkształcenie przy ściszczeniu dla betonów epoksydowych /1/, poliestrowych /2/, wulkanicznych /3/ i fenolowych /4/. Stopień wypełnienia $\sqrt{S} = 10$.
 objaśnienia: R_c - naprężenie niszczące.

Tablica 614. Właściwości zwykłych betonów żywiczo-
Betonu utwardzane wg reakcji:

Właściwości	Jednostka	Betonu utwardzane wg reakcji:										Beton cementowy		
		polimeryzacji addycyjnej		Epoksydo-uretanowe		Epoksydo-smolewe		Epoksydo-lies-trowe		Epoksydo-wo fu-rano we			polikondensacji	
		NP	E	A	PU	PU	PU	PU	PU	PU	FUR	F	M	
Gęstość po- zorna,	kg m ⁻³	2000- 2400	1950- 2400	2000- 2400	1900- 2100	2100- 2300	2100- 2300	1900- 2400	1900- 2400	1900- 2200	1900- 2350	1850- 2000	2100- 2400	2200-2400
Skurcz linio- wy,	‰	0,1- 3,0	0,03- 0,50	0,03- 0,2	0,05- 0,25					0,15- 2,0	0,5- 1,0	0,6- 2,4	0,7- 2,4	0,1-0,4
Wytrzymałość na ściskanie, R	MPa	50- 150	50- 150	70- 210	60- 75	53- 98	53- 98	65- 130	65- 130	80- 110	30- 140	20- 80	30- 60	30-60
Wytrzymałość na zginanie, R	MPa	15-45	15-50	30-35	20-35	9-27	9-27	21-33	21-33	22-55	10-50	4-10	5-13	2-6
Wytrzymałość na rozciąganie, R	MPa	8-25	8-25	9-11	8-25	7-9	7-9	5-11	5-11	5-20	3-8	3-5	1,5-4	1,5-2
Moduł sprężysto- ści - przy ści- skaniu, E	GPa	20-40	20-40	35-40	10-20	15-25	15-25	10-20	10-20	23-35	15-38	2,5-6	6-14	30-40
- przy rozciąga- niu, E	GPa	11-14	12-15	17-21				7-12	7-12		16-27	0,8-2		
Graniczne od- kształcenie przy ściskaniu, ε	‰	0,5	0,5											
przy rozciąga- niu, ε	‰	0,03- 0,10	0,02- 0,09										0,04- 0,06	
Twardość wg Brinella, HB	MPa	160- 250	250- 400			260- 310	260- 310							
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, α _t , 10 ⁻⁶	K ⁻¹	10-30	10-35	10-19	30									10-14
Przyczepność do betonu	MPa	4-5	4-6	5	4,5	2,5	2,5			8	1-2,5	1,0		

rystycznego dla zwykłych betonów cementowych,

- współczynnik Poissona od 0,16 do 0,30, a więc zbliżony lub większy od tegoż współczynnika w zwykłym betonie cementowym,
- ścieralność od 0,10 do 0,20 cm, a więc kilkakrotnie mniejsza niż zwykłych betonów cementowych,
- współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej od 10 do 30 $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ - tzn. rozszerzalność cieplna niektórych odmian betonów żywicznych może przekraczać 2, a nawet 3-krotnie odpowiednie wartości zwykłego betonu cementowego. Można jednak otrzymać również beton żywiczny o wartości α_T , odpowiadającej wartości zwykłego betonu cementowego.

Betony żywiczne są bardzo dobrymi dielektrykami /opór powierzchniowy ok. $10^{10} \Omega \text{ cm}^{-1}$ /. Cecha ta w niektórych zastosowaniach /np. podłogi przemysłowe, zbiorniki paliw/ może stanowić wadę, ze względu na łatwość gromadzenia się ładunków elektrycznych.

Pozostałe cechy fizyczno-mechaniczne betonów żywicznych wykazują większe zróżnicowanie w zależności od rodzaju reakcji utwardzania według której otrzymano beton.

Betony żywiczne otrzymywane w wyniku reakcji polimeryzacji addycyjnej odznaczają się wytrzymałością na ściskanie 50-200 MPa, na rozciąganie ok. 10 MPa, a na zginanie 15-50 MPa, a więc kilkakrotnie, a w przypadku zginania i rozciągania nawet kilkunastokrotnie wyższą od wytrzymałości zwykłego betonu cementowego. Podobnie kilkakrotnie jest większa rysoodporność betonu żywicznego. Moduł sprężystości na ściskanie jest zbliżony do modułu zwykłego betonu cementowego, co jednak przy tak wysokiej wytrzymałości mechanicznej w większości zastosowań należy uznać za pewną niedoskonałość.

Betony tej grupy odznaczają się bardzo dobrą szczelnością; nasiąkliwość wodą jest kilkakrotnie mniejsza od zwykłych betonów cementowych /<1%/.

Betony poliestrowe, epoksydowe, akrylowe i poliuretanowe utwardzają się na zimno i bardzo szybko osiągają sprawność montażową i eksploatacyjną, jak również wykazują bardzo dobrą przyczepność do różnych materiałów budowlanych. Cechy wytrzymałościowe tych betonów żywicznych po jednej, a co najwyżej po kilku godzinach utwardzania uzyskują wartość przekraczającą 28

dniową wytrzymałość betonów cementowych.

Typowe betony polikondensacyjne fenolowe i mocznikowe wykazują wytrzymałość na ściskanie dwukrotnie, a na zginanie nawet dziesięciokrotnie mniejszą od poprzednio omówionych betonów utwardzanych według polimeryzacji.

Cechy wytrzymałościowe betonu mocznikowego oraz pewnych odmian betonu fenolowego są zbliżone lub tylko nieznacznie przewyższają wytrzymałość betonów cementowych wyższych klas. Wytrzymałość betonu furanowego na ściskanie jest natomiast co najmniej dwukrotnie, a na rozciąganie nawet czterokrotnie większa od wytrzymałości zwykłych betonów cementowych.

Moduł sprężystości betonu furanowego jest zbliżony, a dla betonów mocznikowych i fenolowych kilkakrotnie niższy od odpowiedniej wartości betonu cementowego. Betony te są utwardzane pod wpływem utwardzaczy o charakterze kwaśnym. Dlatego też z reguły nie można ich stosować bezpośrednio na podłożu cementowym bądź stalowym. W tym celu na ogół wprowadza się warstwę pośrednią np. epoksydową lub bitumiczną.

Betony na spoiwach polikondensacyjnych są najczęściej utwardzane na gorąco. Do wad betonów furanowych i fenolowych należy zaliczyć również ciemną barwę uniemożliwiającą otrzymywanie kolorowych wybarwień.

Nasiąkliwość wodą betonów polikondensacyjnych jest większa niż poprzednio omawianych betonów polimeryzacyjnych i wynosi ok. 2%.

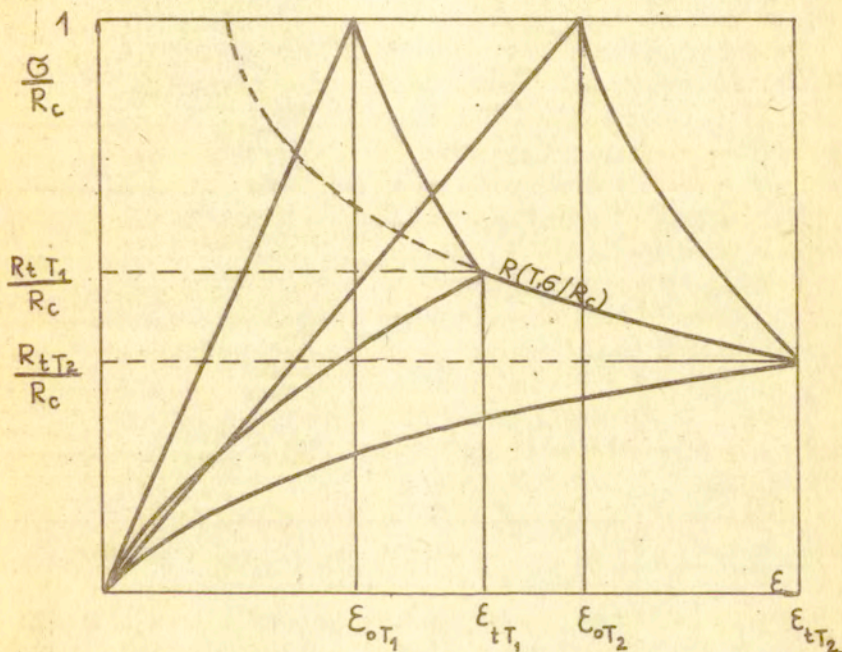
Cechą wyróżniającą budowę cząsteczkową polimerów spośród innych spoiw są długie, o różnym stopniu giętkości łańcuchy tworzące makrocząsteczkę. Jedną z praktycznych konsekwencji tego stanu rzeczy są szczególne właściwości reologiczne polimerów, które znacznie odbiegają od modelu ciała sztywnego.

Skutkiem lepkosprężystego charakteru spoiwa polimerowego jest wyraźna zależność temperaturowo-czasowa podstawowych charakterystyk mechanicznych materiału /rys.6.18/ i w konsekwencji wspomniana już zwiększona podatność na pełzanie i odkształcenia cieplne. Dopuszczalna temperatura stosowania betonów żywicznych jest w pierwszym rzędzie uzależniona od temperatury zeszklenia spoiwa, która dla usieciowanych tworzyw termoplastycznych jest zawsze większa od 50°C; dla żywic epoksydowych i po-

liestrowych wynosi ok. 70°C a dla furanowych i feńolowych ok. $110-130^{\circ}\text{C}$. Oszacowanie maksymalnej temperatury eksploatacji T_e betonów żywiczych można w pierwszym przybliżeniu przeprowadzić na podstawie zależności

$$T_e = 0,75 T_m + 20 \text{ K}$$

gdzie T_m - temperatura mięknięcia spoiwa wg Martensa. Na ogół przyjmuje się, że temperatury użytkowania w warunkach stałego obciążenia dla betonów feńolowych i furanowych nie powinny przekraczać $120-150^{\circ}\text{C}$, a dla pozostałych betonów polimeryzacyjnych $40-60^{\circ}\text{C}$.



Rys.6.18. Schematyczne przedstawienie wpływu temperatury na przebieg krzywych naprężenie-odkształcenie.

Dogodną miarą wpływu danego czynnika na właściwości betonu jest wskaźnik materiałowy wyrażany stosunkiem wybranej cechy wytrzymałościowej, najczęściej wytrzymałości na ściskanie mierzonej w warunkach działania rozpatrywanego czynnika do wytrzymałości doraźnej w normalnych warunkach /tabl.6.5./.

W rzeczywistych warunkach eksploatacji beton żywiczny jest z reguły poddawany oddziaływaniu kilku czynników np. element znajduje się pod obciążeniem w środowisku agresywnym chemicznie o podwyższonej temperaturze. Ze względu na trudności badawcze rzadko badanie właściwości betonów żywicznych przeprowadza się w tak złożonych warunkach. Zaletą wspomnianych wskaźników materiałowych jest łatwość modelowania warunków pracy betonu przez tworzenie iloczynów odpowiednich wskaźników. Otrzymana w ten sposób wartość wskaźnika kompleksowego jest jednak z reguły niższa od otrzymanej w bezpośrednim badaniu i można ją na ogół traktować jako graniczną.

Tablica 6.5. Wskaźniki materiałowe betonów żywicznych.

Lp.	Wskaźnik materiałowy	Wartość	Rodzaj betonu
1.	jednorodności betonu k_j - w zastosowaniach konstrukcyjnych /99,85% poziom ufności/	0,60-0,65	FUR
		0,75	E, NP
	- w innych zastosowaniach /95% poziom ufności/	0,80	FUR
		0,85	F, NP
2.	wytrzymałości długotrwałej, k_t	0,50-0,55	NP, E
		0,50-0,62	FUR
3.	udarności, k_u /czas obciążenia 10 ⁻² s/	1,3-1,5	NP, FUR
4.	wytrzymałości zmęczeniowej, k_p	0,6	NP, A
		0,2-0,3	FUR
5.	odporności na podwyższone temperatury, k_{T+}	0,5-0,8	FUR
		0,5-0,7	E
		0,4-0,7	NP
6.	odporności na obniżone temperatury, k_{T-}	0,75	FUR
		1-1,2	E, NP
7.	odporności chemicznej, k_{ch}	0,4-0,9	E, NP FUR

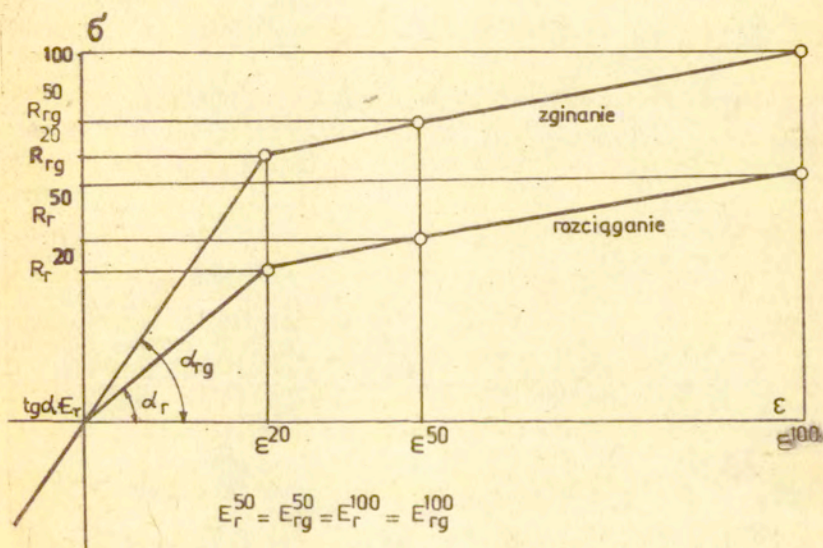
7. Założenia i metody projektowania kompozytów betonowych.

7.1. Zaprawy i betony zbrojone siatkami.

Założenia i metody obliczeń siatkobetonu wywodzą się przez powinowactwo materiałowe i konstrukcyjne z teorii żelbetu. Wprowadza się punkty charakterystyczne na wykresie $\sigma - \epsilon$ materiału rozciąganego odpowiadające mikrorysom o rozwartości $a = 20 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}$

odkształcenia $\epsilon^{20}, \epsilon^{50}, \epsilon^{100}$;
 naprężenia $R^{(20)}, R^{(50)}, R^{(100)}$;

/por.rys.7.1./. W obliczeniach przyjmuje się różne współczynniki sprężystości betonu przy ściskaniu, przy rozciąganiu osiowym i rozciąganiu przy zginaniu, a ponadto rozróżnia się współczynniki sprężystości początkowe oraz przedziału $\epsilon > \epsilon^{20}$.



Rys.7.1. Obliczeniowy opis materiału w siatkobetonie.

Materiał uważa się za szczelny przy szerokościach mikrorys $a \leq 20 \mu\text{m}$, za odporny na środowisko korozyjne w stosunku do

stali przy $a \leq 50 \mu\text{m}$ i za odporny na korozję atmosferyczną przy $a \leq 100 \mu\text{m}$. Podział stadium II na dwie fazy wynika więc przede wszystkim ze względów korozyjnych, a punkt graniczny fazy IIa i IIb określony jest parametrami $a=50 \mu\text{m}$ i $\epsilon = \epsilon_r^{1/50}$.

Wartości modułów sprężystości służące do obliczania momentów zginających muszą być określone doświadczalnie.

Rozciąganie osiowe.

Przyjmujemy, że pod wpływem działającego obciążenia kompozyt, matryca i mikrobrojenie odkształcają się jednakowo.

$$\epsilon_k = \epsilon_m = \epsilon_f$$

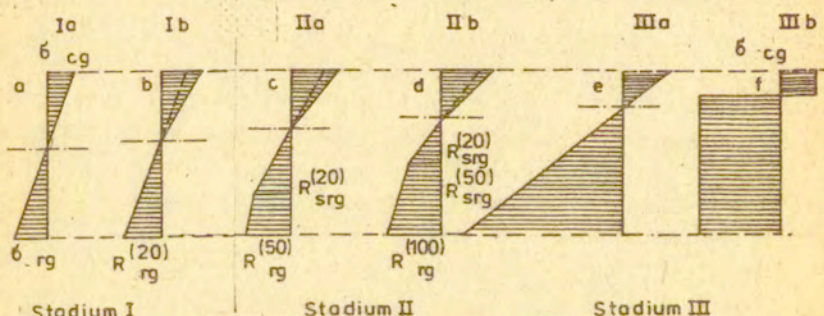
Wartości naprężeń $0 \leq \epsilon_r \leq \epsilon_r^{1/20}$ wynikają z zależności pokazanej na rys.7.1.

W stadium III - po zarysowaniu dającym rozwartość rys $> 100 \mu\text{m}$ - obliczenie oparte jest na założeniu, że beton wyłączył się ze współpracy ze stalą, całe obciążenie przejmuje stal. Naprężenia graniczne określamy zależnością

$$R_f = \epsilon_f E_f$$

gdzie indeksy f odnoszą się do zbrojenia rozciąganego.

Zginanie. Rozkłady naprężeń odpowiadające poszczególnym fazom zginanego elementu siatkobetonowego ilustruje rys. 7.2.



Rys.7.2. Rozkłady naprężeń w zginanym przekroju siatkobetonowym.

Pierwsze dwie fazy to stadium sprężyste, drugie dwie - stadium sprężysto plastyczne, w których przekrój jest zarysowany w strefie rozciąganej lecz rozwartość mikrorys nie przekracza wartości dopuszczalnych i trzecie stadium pseudo plastyczne w którym całość sił rozciągających przejmuje zbroje-

nie. Na tych fazach została oparta metoda wymiarowania siatkobetonu ze względu na zarysowanie i nośność.

Rozkład naprężeń w przekroju przyjmuje się przy wymiarowaniu na zarysowanie zależnie od dopuszczalnej rozwartości mikrorys, według rys.7.2b. - dla $a < 20 \mu\text{m}$, według rys.7.2c. - dla $a < 50 \mu\text{m}$, według rys.7.2d. dla $a \leq 100 \mu\text{m}$. Przy $a > 100 \mu\text{m}$ wymiaruje się przekrój z uwagi na nośność graniczna.

W strefie ściskanej, w której w dwu pierwszych stadiach - naprężenia są wykorzystane w nieznacznym stopniu współczynnik odkształcalności podłużnej E_{cg} można przyjmować jako stały, w strefie rozciąganej współczynnik ma w poszczególnych stadiach wartość zmienną, którą dla poszczególnych faz pracy przyjęto zgodnie z rys.7.1.

Na podstawie tak określonych danych można przewidzieć moment zarysowania w zależności od rozwartości mikrorys.

Przytoczona metoda wiąże bezpośrednio naprężenia z rozwartością mikrorys dopuszczalną w poszczególnych stadiach eksploatacyjnych. Rozstaw rys jest ściśle określony przez rozstaw drutów w kierunku poprzecznym, więc nie zachodzi potrzeba formułowania wzoru obliczeniowego. Metody wymiarowania w stanach granicznych użytkowania podano w /9/.

Stadium III stanowi podstawę wymiarowania przekrojów metodą nośności granicznej. Faza IIIa opiera się na metodzie naprężeń liniowych /rys.7.2e./, faza IIIb stanowi punkt wyjścia dla metody obciążeń granicznych /rys.7.2f./. Metody wymiarowania przekrojów siatkobetonowych w stadium III podano w /6/ i /11/.

7.2. Podstawy teoretyczne i doświadczalne projektowania kompozytów zawierających fazę mikrouzbrojenia stalowego rozproszonego.

7.2.1. Założenia wyjściowe.

Mimo znacznej już liczby konkretnych zastosowań konstrukcyjnych, zwłaszcza w przypadku niektórych kompozytów betonowych, teoretyczne podstawy projektowania tych materiałów są słabo rozwinięte. W przypadku realizacji szeregu konstrukcji fibrobetonowych opisywanych w publikacjach zagranicznych prowadzono - jak się wydaje - projektowanie metodą prób i błędów. Szerzej rozbudowana jest teoria siatkobetonu, którą wzorowano

na klasycznej teorii żelbetu. Wzorowanie takie jest niemożliwe w przypadku uzbrojenia w postaci ciętych włókien rozproszonych /fibrobeton/.

Podstawową ideą we wszystkich materiałach kompozytowych jest koncepcja kształtowania właściwości materiału zależnie od potrzeb. Zwiększa to konieczność sprecyzowania warunków w jakich pracować będzie ostatecznie element konstrukcyjny. O ile w przypadku klasycznych betonów konstrukcyjnych wartość 28 - dniowej wytrzymałości na ściskanie /tzw. marka betonu/ stanowi stosunkowo miarodajną informację, o dużym dla projektowania znaczeniu praktycznym, nic analogicznego nie daje się określić w przypadku poszczególnych kompozytów betonopodobnych. Wynika to stąd, że beton wykonuje się przede wszystkim celem przeniesienia naprężeń ściskających w konstrukcji, natomiast funkcje materiałów kompozytowych są znacznie bardziej różnorodne; do porównania nadawałby się zatem nie tyle beton co żelbet.

Wobec braku teorii, wagi nabierają metody doświadczalne, wśród których wspomniana metoda prób i błędów stanowi przykład szczególny.

Projektant konstrukcji kompozytowej powinien - w idealnym, na razie nie możliwym jeszcze do zrealizowania przypadku projektowania "zupełnego" - znać i uwzględniać następujące elementy:

- /A/ - wytrzymałość kompozytu na ściskanie, rozciąganie, zginanie, skracanie, udar oraz zmienność tych cech w czasie,
- cechy reologiczne mieszanek, zarówno świeżej jak i stwardniałej,
- ścieralność, odporność na kawitacje stwardniałego kompozytu,
- trwałość kompozytu, jego mrozoodporność i ognioodporność,
- odporność na pękanie,
- koszt poszczególnych składników,
- koszt poszczególnych operacji technologicznych przy produkcji,
- koszt i przewidywane warunki eksploatacyjne /takie jak intensywność i częstotliwość oddziaływań/ aż do kosztów przewidywanej rozbiórki włącznie,

Oczywiście nie wszystkie elementy wymienione powyżej mają jednakowe znaczenie w poszczególnych zastosowaniach praktycznych.

Odnosnie wszystkich istotnych cech użytkowych wymienio-

nych powyżej, szczególnie ważna jest ich zmienność w zależności od poszczególnych parametrów materiałowych składników, Np. w przypadku fibrobetonu uzbrojonego włóknami stalowymi parametrami takimi byłyby:

- /B/ - gatunek stali we włóknach,
- kształt włókien,
- zawartość uzbrojenia,
- gatunek i ilość cementu,
- rodzaj wypełniacza i jego ilość,
- zawartość wody oraz ewentualnych domieszek,
- struktura stosu okruszowego,
- struktura układu mikrouzbrojenia,
- warunki pielęgnacji.

Wszystkie dotychczas opublikowane wyniki eksperymentalne zawierają rezultaty szczegółowych badań wpływu wybranych parametrów z grupy /B/ na niektóre właściwości zestawione w /A/. Biorąc pod uwagę wszystkie możliwe zestawienia, oczywiste jest że liczba niewiadomych przy projektowaniu znacznie przekracza liczbę pozytywnych konstatacji eksperymentalnych.

W opracowaniu ograniczono się do wyboru tych kilku informacji przydatnych projektantowi, które zostały już częściowo choćby sprawdzone. Pozostałe zdobywać należy jedną z następujących metod:

- oddzielne badania specjalistyczne,
- metoda prób i błędów,
- analogie z podobnymi wynikami badań wykonanych na kompozytach o zbliżonym składzie i technologii wykonania.

Na podstawie dotychczasowych badań przyjmować można /przynajmniej w pierwszym przybliżeniu/, że do pojawienia się pierwszej rysy fibrobeton z włóknem stalowym zachowuje się tak samo jak matryca nieuzbrojona. Można zatem przyjmować model materiału liniowo sprężystego, o współczynniku sprężystości określonym wzorem wynikającym z prawa mieszanin:

$$E_c = \eta E_f V_f + E_m / 1 - V_f /,$$

w którym współczynnik $\eta \ll 1$ uwzględnia efekty nieliniowości oraz skończonej długości włókien uzbrojenia. Preponowano kilka wzorów do wyznaczania wartości η ale nie zostały one potwierdzone eksperymentalnie i dlatego nie są tu przytaczane. Na margine

się należy zauważyć, że zniszczenie w fibrobetonie z włóknem stalowym następuje wraz z odspojeniem się i wysunięciem włókien z matrycy. W związku z tym, że włókna praktycznie nigdy nie ulegają zerwaniu, koncepcję współczynników efektywności ze względu na długość włókna l i jego zakotwienie l_1 należy odrzucić jako bezzasadną. Występującą tu tematykę komplikuje fakt że rozrzuty właściwości fibrobetonu są znaczne nawet przy optymalnym doborze składu kompozytu. Powiększenie długości włókien wiąże się przy tym nie tylko z pewną poprawą efektywności ale i z pogorszeniem jednorodności materiału.

Chwila pojawienia się pierwszej rysy w obciążonym elemencie fibrobetonowym jest trudna do ścisłego określenia. Mikrouzbrojenie może powodować rozproszenie rys większych na szereg rys mniejszych. Również jak wykazały obserwacje doświadczalne fibrobeton może zawierać rysy "martwe", widoczne przed początkiem obciążenia i nie rosnące ze wzrostem obciążenia. W związku z tym wydaje się uzasadnione zdefiniowanie chwili pojawienia się pierwszej rysy w elemencie fibrobetonowym jako tej, która odpowiada zagięciu się wykresu obciążenia w funkcji przemieszczenia w odpowiednio wybranym punkcie próbki. W pierwszym przybliżeniu można przewidzieć, że tak określona pierwsza rysa wystąpi w fibrobetonie wówczas gdy naprężenia rozciągające wg. zasad teorii sprężystości osiągną wartość odpowiadającą wytrzymałości na rozciąganie osiowe matrycy nieuzbrojonej badanej oddzielnie. Jako "matryca nieuzbrojona" rozumiana jest tu matryca, do której nie dodano włókien /której wskaźnik w/c jest w związku z tym podwyższony w stosunku do matrycy w kompozycie o wodozgodność uzbrojenia rozproszonego/. Obie te wartości na ogół nie powinny się znacznie różnić od siebie.

Zachowanie się fibrobetonu po zarysowaniu jest stosunkowo mało zbadane. W badaniach określony był najczęściej parametr wytrzymałości, z pominięciem przebiegu odkształcalności, sposobu powstawania rys itd. Znane wyniki badań doświadczalnych sprowadzają się do niewielkiej liczby ogólnych spostrzeżeń.

7.2.2. Projektowanie materiałowe.

W nawiązaniu do punktu 4.2., wytyczne projektowania materiału z włóknami stalowymi rozproszonymi można ująć jak następu-

je:

Ilość i jakość włókien - nie należy w żadnym przypadku przekraczać 3% obj. włókien, najczęściej jako graniczną wielkość, ze względu na możliwość zagęszczenia przyjmuje się 2,0% a nawet 1,0% obj. Elementy niekonstrukcyjne, nawierzchnie itp. mają zwykle uzbrojenie w granicach 0,5-1,0% obj. Elementy konstrukcyjne lub uzbrojone lokalnie 1,5-2,5% obj. Gatunek stali włókien nie ma większego znaczenia; zwykle włókna są produkowane ze stali miękkiej. Doradzić można stosowanie włókien tanich. Większe znaczenie niż materiał ma kształt włókien.

Jakość mieszanki betonowej. Fibrobetony wymagają stosowania większych zawartości cementu, ze względu na większą zawartość zaprawy. Zwykle zawartość ta wynosi w granicach od 350 do 550 kg/m³. Należy pamiętać, że niezależnie od gatunku cementu jego cena jest małym ułamkiem ceny całego kompozytu. W związku z tym próby oszczędzania poprzez ograniczenie zawartości cementu w fibrobetonie, nie roszą nadziei na sukces.

Wskaźnik wodno - cementowy w/c. Wysokie wartości wskaźnika w/c są niezbędne do uzyskania dobrej urabialności; zwykle stosuje się w/c = 0,50-0,65. Zmniejszenie w/c jest możliwe przy stosowaniu domieszek uplastyczniających, popiołów lotnych etc. Nie należy natomiast spodziewać się aby np. stosowanie superplastyfikatorów mogło wydatnie podwyższyć możliwą do zabetonowania zawartość włókien w kompozycie.

Struktura stosu okruszowego - na ogół w fibrobetonach stosuje się ciągle uziarnienie kruszywa. Dobór krzywej przesiewu wynika z warunku dobrej urabialności świeżej masy po wprowadzeniu do niej włókien.

Struktura uzbrojenia włóknami - wpływa najsilniej ze wszystkich znanych paramentów na efektywność włókien, co oznacza że np. w przypadku dostosowania układu włókien do przewidywanych sił wewnętrznych można ilość włókien zmniejszyć. Linearyzacja włókien ma sens wówczas gdy znane są kierunki główne tensora naprężenia. Stwierdzono doświadczalnie, że zlinearyzowane 2% obj. zawartości włókien stalowych pozwala uzyskać kompozyt, w którym widoczny jest efekt wzmocnienia. W odróżnieniu od kompozytu typu 2D, układ włókien 1D, pozwala uzyskać nie tylko kompozyt o znacznej ciągliwości, ale również taki, którego wytrzymałość na

rozciąganie osiowe przekracza dwukrotnie wytrzymałość na rozciąganie matrycy nieuzbrojonej.

7.2.3. Wytrzymałość i odkształcalność fibrobetonu.

Wytrzymałość i odkształcalność fibrobetonu mogą być w poważnej mierze dobrane do przewidywanych warunków użytkowania i wynikających z nich sił i oddziaływań.

Niezbędne jest wyraźne określenie celu uzbrojenia włóknami np.

- powiększenie obciążenia powodującego zarysowanie /1-sza rysa/,
- zabezpieczenie przed nadmiernym rozwarciem rys,
- powiększenie maksymalnej nośności,
- uchronienie przed dezintegracją konstrukcji po wystąpieniu znacznych zarysowań,
- powiększenie odporności na inne oddziaływania /ścieranie, przebicie, ścinanie itd/.

Przy obecnym stanie zagadnienia można zalecić następujący tryb postępowania przy projektowaniu fibrobetonu. Należy wybrać skład fibrobetonu, o którym wiadomo, że został sprawdzony /doświadczalnie w skali laboratoryjnej/. Po wstępnym ustaleniu kompozycji fibrobetonu, korzystając z posiadanych składników i w warunkach zbliżonych do naturalnych /przewidywanych w produkcji/, konieczne jest doświadczalne sprawdzenie uzyskanych właściwości. Metody i wzory pozwalające na dostatecznie ściśle określanie wytrzymałości i odkształcalności fibrobetonu "a priori", podobne do stosowanych w odniesieniu do elementów stalowych, żelbetowych czy /innych materiałów/, nie zostały dotychczas powszechnie przyjęte i nie są stosowane. Stąd wynika konieczność doświadczalnego sprawdzania słuszności przybliżonych ocen wstępnych, oraz ewentualnego wprowadzania poprawek.

7.2.4. Wyznaczanie sił wewnętrznych w stanach granicznych.

Siły wewnętrzne w elementach fibrobetonowych wyznaczane są przy założeniach:

- makroskopowej izotropii i jednorodności przy układach włókien zbliżonych do 3D,
- ośrodka warstwowego i anizotropowego, w szczególności ortotropowego, jeżeli układ włókien to uzasadnia.

Założenia także przyjmowane są również przy wyznaczaniu sił wewnętrznych w elementach betonowych bez uzbrojenia włók-

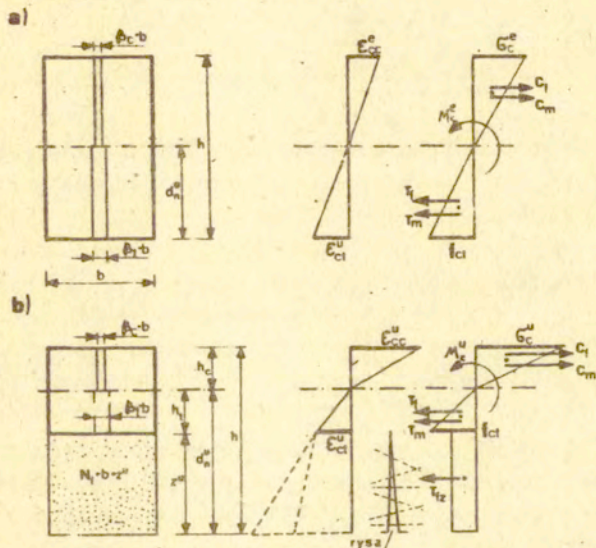
nami.

W elementach ściskanych, rozciąganych i ścinanych założenia powyższe wystarczają do wyznaczenia sił wewnętrznych do chwili wystąpienia pierwszych rys. Metody wyznaczania sił wewnętrznych w elementach zarysowanych nie są znane.

Obliczanie sił w elementach zginanych może być prowadzone kilkoma proponowanymi metodami, różniącymi się szczegółami w przyjętych założeniach upraszczających. Dwie z tych metod podano tytułem przykładu.

Projektowanie zginanego elementu fibrobetonowego w dwóch stanach granicznych - metoda I.

Zakładając pełną przyczepność włókien do matrycy oraz trójkątny rozkład odkształceń w strefie niezarysowanej, można zgodnie z rys.7.3. wyznaczyć siły wewnętrzne w dwóch stanach granicznych.



Rys.7.3. Rozkład naprężeń i odkształceń w zginanym przekroju fibrobetonowym w stanie granicznym zarysowania /a/ oraz w stanie granicznej nośności uzbrojenia /b/. Linia przerywaną zaznaczono możliwe kształty wykresu odkształceń.

W stanie granicznym wystąpienia rys w strefie rozciąganej założono na dolnej krawędzi przekroju osiągnięcie wytrzymałości

kompozytu na rozciąganie R_{ct} oraz granicznego odkształcenia ξ_{ct}^u .

W stanie granicznym odpowiadającym największej nośności występuje rysa o głębokości z^u . W części niezarysowanej przekroju rozciąganego występują te same skrajne wartości wytrzymałości R_{ct} oraz odkształcenia ξ_{ct}^u . Natomiast w części zarysowanej przekroju siły są przekazywane wyłącznie przez włókna wyciągane z matrycy. Założono przy tym, że siły te są stałe na wysokości przekroju oraz że są proporcjonalne do liczby włókien co jest uzasadnione badaniami doświadczalnymi [27].

Powyższe założenia odnośnie obu stanów granicznych prowadzą do następujących równań, określających siły wewnętrzne w przekroju poprzecznym

$$\begin{aligned} C_m &= 0,5b/h-d_n / \epsilon_{mc} \cdot E_{mc} \\ C_f &= 0,5b/h-d_n / \epsilon_{fc} \cdot E_f \beta_c \\ T_m &= 0,5b/d_n-z / \epsilon_{mt}^u \cdot E_{mt} & /7.2.1./ \\ T_f &= 0,5b/d_n-z / \epsilon_{ft}^u \cdot E_f \beta_t \\ T_{fz} &= b z N_f \bar{P}_f \end{aligned}$$

tu dolne indeksy m, f, c oznaczają matrycę, włókno i kompozyt a indeksy t i c - rozciąganie i ściskanie; indeks górny u wskazuje na wartość graniczną, skrajną.

N_f - liczba włókien w jednostce powierzchni przekroju poprzecznego, określona np. na podstawie zliczania na próbnich szlifach lub w przybliżeniu według wzorów [17], [28]

P_f - nośność jednego włókna podczas wyciągania z matrycy po zarysowaniu, określona w wyniku badań doświadczalnych lub przyjęta w przybliżeniu według danych [19]

E_{mt}, E_{mc}, E_f - moduły sprężystości matrycy ścisanej i rozciąganej oraz włókien, przyjęte jako znane właściwości materiałów
 β_c, β_t - procenty uzbrojenia włóknami, odpowiednio w strefie ścisanej i rozciąganej elementu zginanego, określone na podstawie ilości włókien w kompozycie i ewentualnie sprawdzone w elementach próbnym

Inne oznaczenia podane są na rys.7.3.

Przyjmując tożsamość odkształceń matrycy i włókien, równych odkształceniom kompozytu

$$\varepsilon_{mt} = \varepsilon_{ft} = \varepsilon_{ct},$$

$$\varepsilon_{mc} = \varepsilon_{fc} = \varepsilon_{cc},$$

można ułożyć dwa układy równań w obu stanach granicznych: przy $z=0$, tzn. przy rozwieraniu się pierwszej rysy

$$\varepsilon_{cc}^e / h - d_n^e // E_{mc} + E_f \beta_c / = \varepsilon_{ct}^u d_n^e // E_{mt} + E_f \beta_t /,$$

$$M^e = / \varepsilon_{ct}^e // E_{mt} + E_f \beta_t / d_n^e h b \frac{1}{3} \quad /7.2.2./$$

oraz w stanie granicznym nośności

$$\varepsilon_{cc}^u / h - d_n^u // E_{mc} + E_f \beta_c / = \varepsilon_{ct}^u / d_n^u - z // / E_{mt} + E_f \beta_t / + 2N_f \bar{P}_f z^u \quad /7.2.3./$$

$$M^u = \varepsilon_{ct}^u // E_{mt} + E_f \beta_t // / d_n^u - z^u // h - z^u / b \frac{1}{3} + N_f \bar{P}_f / 4h + 2d_n^u - 3z^u / b z^u \frac{1}{6}$$

Tu przez M^e i M^u oznaczono momenty sił zewnętrznych w obu stanach, zaś indeks górny e wskazuje na stan graniczny zarysowania.

Wielkości graniczne ε_{ct}^u i ε_{cc}^u powinny być znane jako charakteryzujące fibrobeton.

Oba układy równań mogą służyć do wyznaczania różnych wielkości niewiadomych przy projektowaniu lub sprawdzaniu przekroju elementu zginanego.

W układzie równań /7.2.2./ po przyjęciu rozmiarów przekroju h i b można wyznaczyć moment rysujący M^e oraz odkształcenie ε_{cc}^e na krawędzi ściskanej, obie te wielkości można porównać z momentem wynikającym z obciążenia zewnętrznego oraz z wynikami pomiarów odkształceń elementów próbnych.

W układzie równań /7.2.3./ jako niewiadome można przyjęc nośność uzbrojenia w postaci iloczynu $N_f \bar{P}_f$ oraz moment graniczny M^u .

W obu układach równań występują wielkości d_n i z^u , które można wyznaczyć na drodze pomiarów odkształceń elementów próbnych lub założyć w przybliżeniu

$$d_n^e = 0,5h, \quad d_n^u = 0,65 - 0,75 h, \quad z^u = 1/3 h.$$

Możliwe też jest inne traktowanie wielkości znanych i poszukiwanych w tych wzorach, np. przez dobieranie rozmiarów belki do założonych wielkości M^e i M^u . Dyskusję tych możliwości oraz wyniki sprawdzeń doświadczalnych i obliczeń prowadzonych przy użyciu maszyn cyfrowych opublikowano w [17].

Projektowanie zginanego elementu fibrobetonowego na zniszczenie - metoda II.

Koncepcja tej metody opiera się na przyjęciu, że zachodzi liniowa zależność między tzw. parametrem wzmocnienia fibrobetonu Θ^{iD} , a wytrzymałością jego na rozciąganie. Wg pewnych wyników doświadczalnych wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie osiowe związana jest z tym parametrem związkiem /28/:

$$R_{ct} = 0,154 \Theta^{iD} / \text{MPa} / .$$

Przy czym Θ^{iD} wyraża się wzorem

$$\Theta^{iD} = \frac{l \xi}{s^{iD}}$$

tu l - długość włókna

ξ - współczynnik przyczepności włókna do matrycy, równy 1,0 - w przypadku włókna gładkiego i 1,3 - w przypadku włókna z zakotwieniami /typu Bekaert/.

s^{iD} - tzw. pozorny rozstaw włókien zależny od ich średnicy d , zawartości objętościowej β oraz od stopnia ich orientacji /która powinna być znana lub poprawnie przewidziana/

$$s^{iD} = \begin{cases} \frac{\pi d^2}{40\beta} & i=1 \\ \frac{\pi d^2}{80\beta} & i=2 \\ \frac{\pi d^2}{20\beta} & i=3 \end{cases}$$

Maksymalny moment niszczący belkę o przekroju b i wysokości h jest obliczany z prostego wzoru /28/

$$M = \frac{bh^2 R_{ct} / E_1 \xi_c / ^2}{2/E_1 \xi_c + 2R_{ct} / ^2} \left[1 + \frac{4}{3} / \frac{2R_{ct}}{E_1 \xi_c} / \right]$$

Tu ξ_c graniczne odkształcenie w strefie ściskanej belki, równe ok. $1000 \cdot 10^{-6}$, E_1 - współczynnik odkształcalności kompozytu zależny od współczynników odkształcalności matrycy m i włókien f , w przybliżeniu:

$$E_1 = E_f \cdot \beta + /1 - \beta / E_m .$$

Wobec nieuniknionej nieściśłości przy szacowaniu wartości występujących w powyższych wzorach wynik obliczeń może być niedokładny. Uzyskana wartość niszczącego momentu zginającego jest wówczas jedynie związana liniowo z wartością parametru Θ^{iD} .

7.3. Podstawy projektowania kompozytów z mikrouzbrojeniem włóknem szklanym.

Elementy nośne konstrukcji ze szkło-cementu lub szkło-betonu nie są jeszcze dopuszczane na świecie przez nadzór budowlany. Wynika to z faktu pogarszających się cech wytrzymałościowych materiału w czasie, oraz braku norm dotyczących wytwarzania i kontroli jakości tego materiału. Istniejące konstrukcje ścian nośnych lub konstrukcji dachowych są traktowane jako eksperymenty w skali naturalnej.

Ponieważ mechanika działania włókna szklanego w matrycy jest bardzo zmienna, zależna od wielu czynników w tym również czasu, projektowanie oparte jest na zasadzie prób i błędów oraz zebranych dotychczas doświadczeń /por.rozdział 4.3, 6.3/.

Metoda prób i błędów.

Przy projektowaniu elementu konstrukcji ze szkło-cementu stosowane są bardzo przybliżone obliczenia wytrzymałościowe elementu a następnie przeprowadzane są badania w skali naturalnej pozwalające dokładniej określić cechy mechaniczne konstrukcji. W wielu przypadkach uzasadnionym staje się traktowanie materiału jako jednorodnego i stosowanie metody naprężeń dopuszczalnych.

Podstawowymi informacjami niezbędnymi przy projektowaniu są:

- rodzaj materiałów współpracujących,
- własności wytrzymałościowe,
- skurcz i efekty reologiczne,
- zachowanie się elementów w skali naturalnej.

Określenie bezpiecznych wartości naprężeń wynika z badań wytrzymałościowych i znajomości zachowania materiału w czasie. Należy mieć na względzie, że skurcz standartowej mieszanki przy wysychaniu jest rzędu 0,15% , natomiast odkształcenia rozciągające przy zniszczeniu wynosi 0,05%. Widac stąd, że wpływ skurczu jest bardzo istotny.

Wskaźnik zmniejszający określający wytrzymałość trwałą wynosi orientacyjnie:

- $D=1,0$ dla szkło-cementu przy krótkotrwałym obciążeniu /28-90 dni/
- $D=0,7$ dla szkło-cementu przechowywanego w powietrzu
- $D=0,5$ dla szkło-cementu przechowywanego w wilgoci.

7.4. Projektowanie betonów i zapraw żywicznych.

Projektowanie betonów żywicznych można rozpatrywać jako proces obejmujący następujące dwa stadia:

- dobór jakościowy składników,
- dobór ilościowy składników.

Zadaniem pierwszego etapu jest wytypowanie takich składników, aby przy możliwie najmniejszym koszcie materiałowym osiągnąć pożądane cechy betonu żywicznego. Dobór jakościowy składników przeprowadza się na podstawie analizy warunków przyszłej pracy betonu żywicznego jak również przewidywanego sposobu i warunków formowania /rys.7.4./.

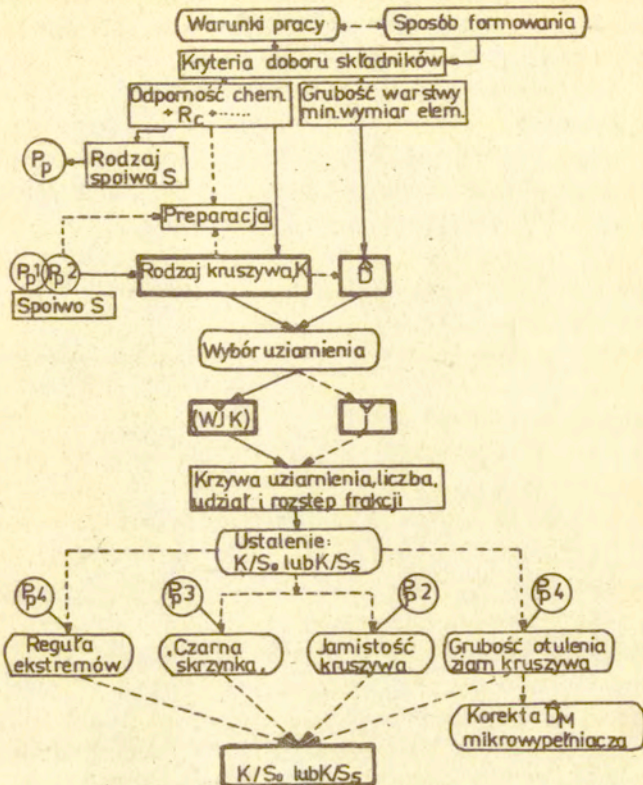
Jako podstawowe elementy budowy PC podobnie jak innych betonów można uważać: spoiwo /S/, kruszywo /K/, i pozry /p/. Dwa pierwsze z tych elementów determinują rodzaj betonu żywicznego a w konsekwencji również pewien zestaw charakterystycznych właściwości. Praktycznie do betonów żywicznych stosuje się na świecie ponad 10 różnych odmian spoiw. Mogą one być w niektórych przypadkach łączone ze sobą /tzw. spoiwa mieszane/ co dodatkowo zwiększa liczbę możliwych kombinacji. Do spoiw żywicznych używa się różnych utwardzaczy, które w większości przypadków w istotny sposób modyfikują tak właściwości technologiczne mieszanki betonowej jak i eksploatacyjne utwardzonego betonu. Przykładowo liczba znanych utwardzaczy do spoiw epoksydowych sięga 50. Ponadto na właściwości betonów żywicznych można oddziaływać przez wprowadzenie odpowiednich dodatków modyfikujących. Ten ostatni sposób jakkolwiek często nie doceniany w praktyce jest bardzo istotnym narzędziem kształtowania właściwości.

W przypadku wymagania dużej szczelności, mrozoodporności, wytrzymałości mechanicznej i dobrej przyczepności do różnych materiałów preferowane są spoiwa z grupy żywic utwardzanych wg. reakcji polimeryzacji. Wymienione wyżej cechy tej grupy żywic są zbliżone, a zatem czynnikiem decydującym o wyborze jest chemoodporność, skurcz utwardzania i koszt spoiwa.

W przypadku wymagania pracy w podwyższonej temperaturze /powyżej 50°C/ zalecane są spoiwa z grupy polikondensacyjnych.

Rodzaj użytego spoiwa żywicznego w pierwszym rzędzie określa chemoodporność betonu i graniczną temperaturę stosowania oraz zapewnia pewien, często szeroki zakres możliwych do osią-

PROJEKTOWANIE BETONÓW ŻYWIWCZYCH



Rys. 7.4. Algorytm przebiegu projektowania betonów żywicznych. Program główny.

Objasnienie: S - spoiwo, S_a - spoiwo aktywne, S_m - mikrozaprawa, K - kruszywo, P - podprogram ustalenia spoiwa, linia ciągła - zależności podstawowe, linia przerywana - zależności drugorzędne lub alternatywne, D - średnica dodatku, WJK - wskaźnik jakości kruszywa, j - jamistość

gnięcia wartości innych cech technicznych. Optymalizację właściwości betonu w obrębie tego zakresu przeprowadza się przez dobór kruszywa oraz ustalenie odpowiedniej reakcji ilościowej pomiędzy kruszywem i spoiwem /K/S/.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły oddziaływania na wła-

ściwości betonu żywicznego przez zmianę rodzaju składników. Natomiast ustalenie właściwego stosunku K/S stanowi czynnik kształtowania właściwości betonu żywicznego dla określonych jakościowo składników.

Dobór ilościowy składników ma natomiast na celu taką optymalizację składu, aby wybrane cechy materiałowe osiągnęły pożądane wartości, przy czym na ogół dąży się do zapewnienia wartości ekstremalnych np. maksimum wytrzymałości na ściskanie czy minimum współczynnika rozszerzalności cieplnej.

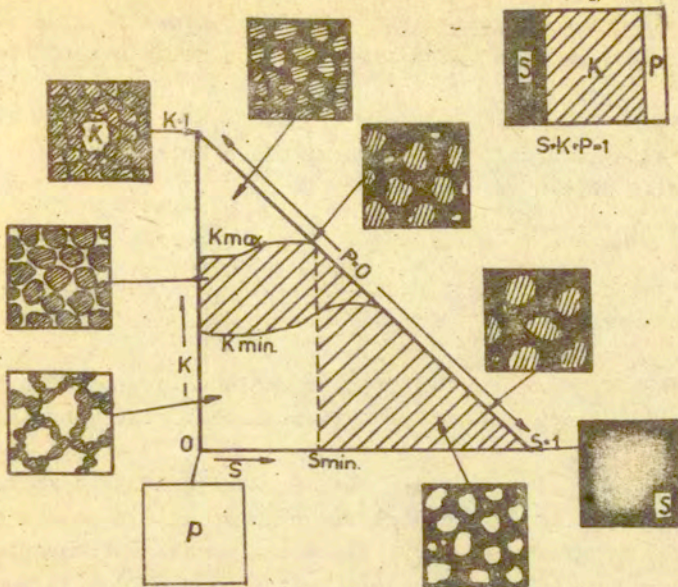
W szerokim rozumieniu, do zagadnień ilościowych przy projektowaniu betonów żywicznych możemy zaliczyć:

- 1^o dobór ilości utwardzacza,
- 2^o dobór ilości ewentualnych dodatków zwłaszcza rozcieńczalników,
- 3^o dobór uziarnienia kruszywa,
- 4^o ustalenie relacji ilościowej kruszywo-spoivo, a więc dobór stopnia wypełnienia /K/S/.

Traktując dwa pierwsze punkty łącznie w toku projektowania możemy wyróżnić: optymalizację podstawowych komponentów betonu tzn. spoiva i kruszywa, które same w sobie są materiałami złożonymi oraz optymalizację kompozytu jako całości poprzez wyznaczenie stosunku K/S. Ten ostatni problem jest najtrudniejszy i często uważany za podstawowe zagadnienie projektowania betonów żywicznych.

Wspomniane poprzednio elementy budowy są ilościowo powiązane ze sobą równaniem objętości absolutnych $/S+K+p=1/$, a ich udział w betonie /rys.7.5./ jest określony przez gęstość $/\rho_p/$ i stopień wypełnienia /K/S/. W tej sytuacji można rozważać właściwości danego betonu żywicznego jako funkcję zawartości porów, gdyż niezależnie od rodzaju spoiva i kruszywa są one ilościowo tożsamym elementem struktury. W betonach żywicznych podobnie jak i w innych materiałach istnieje wyraźna zależność między objętością porów w materiale a jego cechami technicznymi, w tym zwłaszcza wytrzymałościowymi.

Ograniczenie się jednakże tylko do takiego makroskopowego ujęcia byłoby z punktu widzenia projektowania betonu niesłuszne. Właściwości betonu żywicznego są, jak już wspomniano, wynikiem superpozycji oddziaływań makrostruktury betonu i mikro-



Rys. 7.5. Schematy różnych makrostruktur betonu żywicznego w zależności od udziału objętościowego spoiwa /S/, kruszywa /K/, i pustek /p/.

struktury spoiwa. Za czynnik wiążący cechy techniczne betonu z ilościowym stosunkiem składników można uważać grubość otulenia ziarn kruszywa spoiwem /por. 5.6./. Istnieje szereg metod ustalania właściwego współczynnika wypełnienia K/S . Stopień w jakim metody te uwzględniają omawiane zależności strukturalne jest swego rodzaju probierzem ich rzetelności. W praktyce stosuje się najczęściej jeden z następujących sposobów:

- metoda według reguły ekstremów,
- metoda "czarnej skrzynki",
- metoda na podstawie jamistości kruszywa,
- metoda według grubości otulenia spoiwem ziarn kruszywa.

Dobór ilościowy składników według reguły ekstremów polega na doświadczalnym wyznaczeniu najwłaściwszego stopnia wypełnienia betonu żywicznego K/S . Dla kruszywa o uprzednio dobranym uziarnieniu wyznacza się empirycznie szereg zależności podstawowych parametrów technicznych betonu od stopnia wypełnienia

mieszanki.

Według metody "czarnej skrzynki" projektowany skład betonu żywicznego charakteryzuje się za pomocą kilku ułamków bezwymiarowych:

- x_1 - względna zawartość piasku w kruszywie,
- x_2 - względna zawartość mikrowypełniacza w kruszywie,
- x_3 - stopień wypełnienia, K/S
-
- x_n -

Zakłada się, że cechy diagnostyczne y_i są funkcją w/w ułamków bezwymiarowych

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Funkcję y_i wyznacza się statystycznie na podstawie wyników uzyskanych z wykorzystaniem matematycznego planu doświadczeń.

Podstawową zaletą metody "czarnej skrzynki" jest kilkakrotne zmniejszenie liczby doświadczeń w porównaniu z metodą ekstremów przy uzyskaniu znacznie większego zasobu informacji. Wadą metody jest dość dowolny i niepełny opis układu za pomocą kilku bezwymiarowych ułamków oraz trudności w interpretacji fizycznej tak uzyskanych modeli.

Dobór ilościowy składników na podstawie jamistości kruszywa opiera się na założeniu, że wypełnienie spoiwem /względnie mikrozaprawą/ jam międzyziarnowych w kruszywie jest warunkiem wystarczającym dla otrzymania betonu żywicznego o zadowalających właściwościach. Metoda ta jest analogiczna do znanego sposobu postępowania w przypadku asfaltobetonów. Zaletą metody jest prostota, wadą zaś dość arbitralny sposób przyjmowania wartości nadmiaru lub niedomiaru spoiwa.

Dobór ilościowy składników na podstawie pozornej grubości otulenia jest zbliżony do analogicznej metody projektowania betonu cementowego.

Podstawową zaletą tej metody jest to, że pozwala na uzależnienie rozpatrywanych właściwości materiału od jednego parametru - grubości otulenia ziarn kruszywa spoiwem.

Dla wcześniej dobranego uziarnienia kruszywa /np.wg WJK - minimum/ zadanie projektowe sprowadza się do wyznaczenia stopnia wypełnienia K/S przy wybranej na podstawie ustalonych za-

leżności grubości otulenia.

Wyznaczanie współczynnika /K/S/ uzyskuje się w wyniku rozwiązania układu dwóch równań:

- równania objętości absolutnych

$$V_s + V_k + p = 1$$

- równania bilansu materiałowego

$$V_s + p = V_j + V_{\sigma}$$

gdzie

V_s, V_k, V_j - objętość spoiwa, kruszywa i jam międzyziarnowych w 1 m^3 betonu żywicznego

V_{σ} - objętość warstewek spoiwa otulających ziarna kruszywa

p - objętość porow w 1 m^3 betonu.

Omówione metody projektowania różnią się sposobem przyjętego opisu zależności właściwości betonu żywicznego od stopnia wypełnienia i stosowanymi założeniami upraszczającymi. Wybór metody projektowania betonów żywicznych jest uzależniony między innymi od istniejących możliwości w zakresie przeprowadzania prób laboratoryjnych i obliczeń. Wobec postępu w dziedzinie techniki obliczeniowej i coraz powszechniejszego stosowania maszyn matematycznych metody projektowania wg grubości otulenia ziarn kruszywa a także "czarnej skrzynki" oparte głównie na obliczeniach, a wymagające stosunkowo małej liczby doświadczeń wydają się najkorzystniejsze.

Odrębny problem stanowi dobór ilości mikrowypełniacza /M/. Ilość tą na ogół przyjmuje się arbitralnie lub ustala się metodą prób i błędów ze względu na urabialność mieszanki betonowej. Optymalizacja zawartości mikrowypełniacza ze względu na jego modyfikujący wpływ na mikrostrukturę spoiwa /por. p.5.6./, pozwala oszacować właściwą zawartość mikrowypełniacza w stosunku do spoiwa jako $M/S = 0,5$.

8. Zastosowania konstrukcyjne.

Kompozyty betonowe nie stanowią konkurencji dla tradycyjnego betonu i żelbetu, więc nie można ich przeciwstawiać tym materiałom. Rozszerzają one możliwości aplikacyjne zapraw i betonów o spoiwie cementowym na takie przypadki, w których te tradycyjne materiały zawodzą lub też są nieekonomiczne. Ponadto wzbogacają możliwości materiałowe w wyrobach cienkościennych, które są oparte dotychczas wyłącznie na azbescie.

Istotnym ograniczeniem w stosowaniu kompozytów betonowych jest wysoki koszt włókien oraz spoiw polimerowych. Należy przypuszczać, że nawet po rozwinięciu przemysłowej produkcji, koszt włókien będzie na tyle wyseki, że zastosowanie fibrobetonów będzie uzasadnione tylko w przypadku wykorzystania ich korzystnych właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych. Podobnie będzie się kształtować sytuacja w przypadku spoiw polimerowych.

Wydaje się, że kryterium opłacalności /efektywności/ ekonomicznej kompozytów betonowych powinien być wskaźnik efektywności określony stosunkiem zmiany cech użytkowych /np. wytrzymałości, trwałości/ do wzrostu nakładów dzięki którym ta zmiana została osiągnięta.

8.1. Siatkobeton.

Jako celowe i sprawdzone kierunki zastosowań należy wymienić:

- Przykrycia cienkościenne fałste, fałdowe, strukturalne, profile cienkościenne skrzynkowe, o rozpiętości do 100 m,
- Elementy płyt ściennych panwiowych, zewnętrznych i działowych oraz płyt stropowych i stropodachowych,
- Zbiorniki na ciecze,
- Rury cienkościenne ciśnieniowe wytrzymujące ciśnienie w granicach 10 -20 at, /3/, /4/, /5/.

Podkreślić należy użycie siatkobetonu do kadłubów jednostek pływających.

W Polsce zostały wykonane prefabrykowane przekrycia dachowe do rozpiętości 12 m, zbiorniki na ciecze, kabiny sanitarne oraz rury cienkościenne.

8.2. Fibrobeton z ciętym drutem stalowym.

Znalazł dotychczas zastosowanie w następujących rozwiązaniach:

- nawierzchnie drogowe pasów startowych, naprawa i wzmocnienie istniejących nawierzchni i pasów, płyty jezdni mostów drogowych i ich naprawa, /25/,
- posadzki w przemysłowych halach produkcyjnych,
- fundamenty pod młoty udarowe, wylewki pod maszyny,
- konstrukcje poddane podwyższonym temperaturom,
- elementy prefabrykowane - rury, słupy,
- wykładziny ścian tuneli, obudowa wyrobisk i chodników górniczych, stabilizacja stoków skalnych, wykładziny zapór wodnych,
- konstrukcje odporne na eksplozję i udar,

Do oryginalniejszych udanych wdrożeń w Polsce można zaliczyć:

- rekonstrukcję fundamentu pod młot udarowy MPM 20,
- budowę fundamentu pod młot udarowy MPM 10, /20/,
- obudowy wyrobisk górniczych metodą natrysku,
- przekrycia dachowe nad halami przemysłowymi,
- wykonywanie rur metodą wirowania lub zwykłego betonowania odcinków, /22/, /23/.

8.3. Zaprawy i konstrukcje zbrojone włóknem szklanym ciętym i ciągłym.

Można tu wymienić następujące kierunki zastosowań:

- elementy cienkościenne /typu wyrobów azbestocementowych/, płyty okładzinowe, rury, zamknięcia włazów,
- wykładziny ścian tuneli,
- samonośne deskowania nieodzyskiwalne,
- elementy poddane podwyższonym temperaturom i agresji korozyjnej.

8.4. Zaprawy, betony z dodatkiem włókien ciętych polipropylenowych.

Znajdują zastosowanie w elementach o podwyższonej odporności na uderzenia /pale i słupy/ i w elementach dekoracyjnych.

8.5. Zaprawy i betony polimerowe.

Podstawowy problem w zakresie stosowania betonów polimerowych stanowi, jak się wydaje, następujący paradoks:

- w wielu przypadkach praktyka stosowania betonów polimerowych wyprzedziła badania i rozważania teoretyczne,
- z drugiej strony obecne zastosowania betonów polimerowych w stosunku do ich potencjalnych możliwości określonych przez bar-

dzo dobre właściwości tych materiałów są jeszcze stosunkowo nieliczne.

Wysoki koszt materiałowy betonów polimerowych jest jedną z najpoważniejszych przeszkód na drodze do szerszego stosowania tych materiałów w budownictwie. W wielu przypadkach jest to jednak głównie "bariera" o charakterze psychologicznym, gdyż wysoki koszt materiałowy nie przesądza jeszcze efektywności ekonomicznej.

Betony polimerowe mogą być użyte prawie we wszystkich dziedzinach budownictwa /tab.8.5./, jednakże ze względów ekonomicznych powinny być stosowane przede wszystkim tam gdzie właściwości tradycyjnych materiałów okazują się niewystarczające, bądź nawet specyficzne właściwości betonów polimerowych stanowią warunek realizacji właściwego rozwiązania technicznego. Do takich zastosowań należy zaliczyć: naprawy i wzmocnienia oraz łączenie konstrukcji, naprawy dróg, lotnisk i przegród wodnych, wykładziny antykorozyjne i posadzki przemysłowe oraz elementy prefabrykowane, np. rury, studzienki, zwłaszcza pracujące w warunkach zagrożenia chemicznego, wykładziny powierzchni zlewnych obiektów hydrotechnicznych, elementy budowli pływających, obudowy szybów i chodników w budownictwie podziemnym itp, /37, 38,39,43,44,45/.

W grupie betonów polimerowych: PCC,PIC,PC te dwa ostatnie swoimi właściwościami istotnie odbiegają od betonów tradycyjnych. Z tego względu wydało się celowym przedstawienie podziału zastosowań PC i PIC według ich g. wnych cech użytkowych /rys. 8.5./. Oczywiście ani teraz, ani też w przyszłości nie należy oczekiwać aby PC czy PIC stały się konkurentem betonu cementowego. Beton polimerowy jest szczególnie przydatny w trudnych warunkach pracy, a zwłaszcza zagrożenia korozyjnego. Istnieje wiele przykładów, w których użycie betonu polimerowego wiąże się z dużą efektywnością ekonomiczną. Często są również przypadki, w których zastosowanie betonu polimerowego stanowi jedyne właściwe czy nawet możliwe rozwiązanie z punktu widzenia technicznego.

Tablica 8.5. Podział zastosowań betonów polimerowych wg głównej cechy.

chemoodporność + szczelność

↳ ochrona antykorozyjna

chemoodporność + szczelność + wytrzymałość mechaniczna

↳ konstrukcje w warunkach zagrożenia chemicznego

chemoodporność + wytrzymałość mechaniczna + odporność na ścieranie

↳ wykładziny i płyty posadzkowe, stopnie schodowe

chemoodporność + szczelność + wytrzymałość mechaniczna + odporność na ścieranie + gładkość powierzchni

↳ rury

szczelność + chemoodporność + wytrzymałość mechaniczna + odporność na ścieranie + odporność na kwitancję

↳ elementy zapór wodnych, nabrzeży portowych, budowli pływających

pryczepność + szybkie osiągnięcie zdolności eksploatacyjnej + wytrzymałość mechaniczna

↳ łączenie, naprawy wzmocnienia konstrukcji

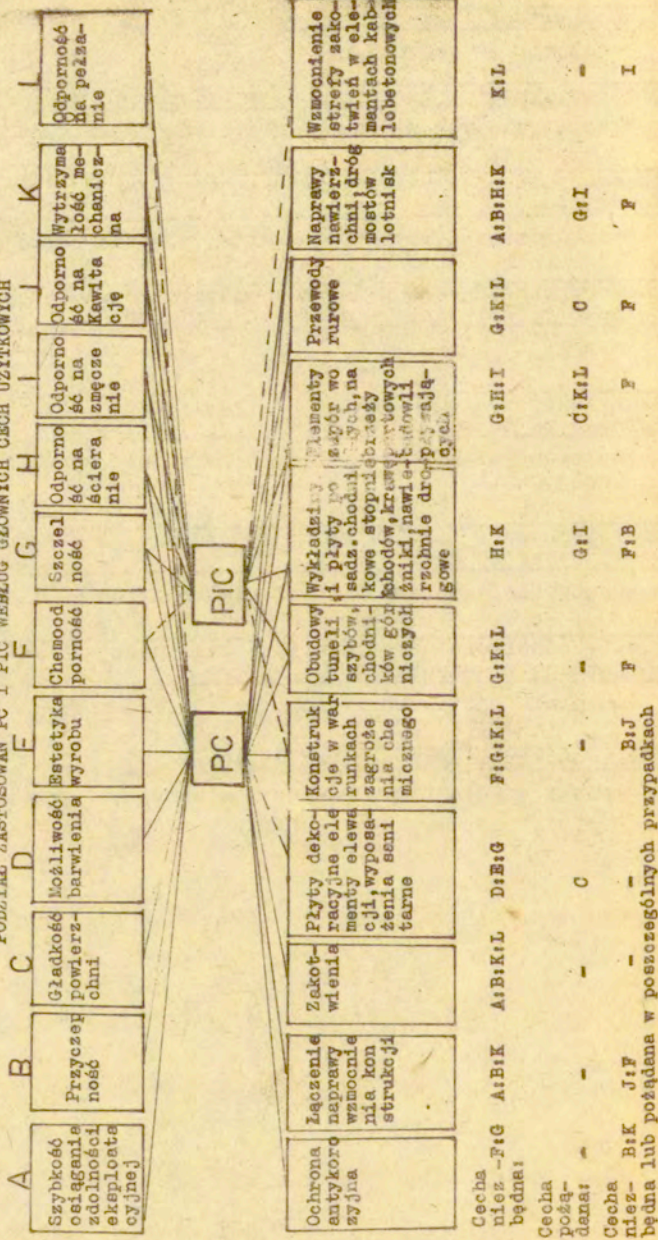
j.w. + odporność na ścieranie + mała przepuszczalność + odporność na zmęczenie

↳ naprawa nawierzchni dróg, mostów i lotnisk

możliwość barwienia + estetyka + trwałość

↳ płyty dekoracyjne, elementy elewacji, wyposażenia sanitarne

PODZIAŁ ZASTOSOWAŃ PC I PIC WEBLUG GŁÓWNYCH CECH UŻYTKOWYCH



Cecha niez- -F:G A:B:K A:B:K:L D:E:G F:G:K:L G:K:L H:K G:H:I G:K:L A:B:H:K K:L

Cecha pożądana: - - - C - - - G:I - - - C G:I - - -

Cecha niez- B:K J:F - - - B:J B:F B:F B:F F F F F I

będą lub pożądana w poszczególnych przypadkach

9. Powołania na podstawowe publikacje.

Literatura przedmiotu jest tak obszerna, że jakakolwiek próba zestawienia możliwie wyczerpującej i kompletnej informacji rozsądziłaby ramy niniejszej publikacji. Czytelników zainteresowanych dotarciem do źródłowej informacji odsyła się do /1/, /2/ a także do Tematycznego zestawienia dokumentacyjnego Nr 2087/80 opracowanego przez Instytut Techniki Budowlanej. W opracowaniu dokonano selektywnego zestawienia tylko tych pozycji do których odsyła się czytelnika dla rozszerzenia lub uzupełnienia istotnych informacji stanowiących przedmiot zainteresowania, bez wnikania w zagadnienie szczegółowe. Pierwszeństwo dano literaturze krajowej ogólnodostępnej.

LITERATURA

Zagadnienia ogólne

- /1/ HOLLIDAY L., L.Composite materials, Elsevier, Amsterdam 1966.
- /2/ Własności mechaniczne i struktura kompozytów betonowych, Red.Brandt A.M., Ossolineum, Wrocław 1974.

Beton zbrojony siatkami stalowymi

- /3/ SANDOWICZ M., Zastosowanie siatkobetonu w budownictwie, COIB, Warszawa 1976.
- /4/ SANDOWICZ M., Betony zbrojone włóknem rozproszonym regularnie - siatkobeton, Symp.Kompozyty betonowe w budownictwie, Wyd.ITB, Warszawa 1979.
- /5/ GRABOWSKI J., SANDOWICZ M., Badanie mimośrodowo obciążonych słupów z rur siatkobetonowych wypełnionych betonem, Inż. i Bud., 8, 1978.
- /6/ WALKUS B.R., Zasady wymiarowania elementów siatkobetonowych na nośność, Inż. i Bud., 19, 1965.
- /7/ WALKUS B.R., Wpływ wielkości oczek na wytrzymałość zbrojenia siatkobetonu, Arch.Inż.Ląd., 15, 4, 1969.
- /8/ WALKUS B.R., Zachowanie się siatkobetonu przy zginaniu, Arch.Inż.Ląd., 17, 4, 1971.
- /9/ WALKUS B.R., Wymiarowanie zginanych elementów siatkobetonowych na zarysowanie z uwzględnieniem szerokości rozwarcia mikrorrys, Arch.Inż.Ląd., 19, 2, 1973.
- /10/ MACKIEWICZ A., Zachowanie się siatkobetonu piaskowego z regularnym zbrojeniem rozproszonym pod wpływem obciążeń długotrwałych, ITB, KS-53, 1978.

/11/ Instrukcja po projektowaniu armociementnych konstrukcji,
SM - 66 - 77, Strojzdat, Moskwa 1978.

Beton zbrojony ciętym włóknem stalowym

/12/ Fibre reinforced cement and concrete, RILEM Symposium
1975, The Construction Press, London 1975.

/13/ Fibre concrete materials, Report RILEM Technical Commit-
tee 19-FRC, Materiaux et Construction, 10, 56, 1977.

/14/ HANNANT D.J., Fibre cements and fibre concretes, J.Wiley,
Chichester 1978.

/15/ Rilem symposium 1978: Testing and test methods of fibre
cement composites, Ed.R.N.Swamy, Lancaster Construction
Prese, 1978.

/16/ JAMROŻY Z., red., Aktualne problemy drutobetonu w Polsce,
Seminarium ImlKB Pol.Krak., 1978.

/17/ BABUT R., Nośność i odkształcalność elementów fibrobeto-
nowych przy zginaniu, Prace IPPT PAN, 32, 1979.

/18/ BRANDT A.M., Badanie propagacji rys i odporności na znisz-
czenie elementów fibrobetonowych, XXV Konf.PAN i PZITB,
Krynica 1979.

/19/ BURAKIEWICZ A., Przyczepność włókien do matrycy w kompo-
zytach fibrobetonowych, Prace IPPT, Praca doktorska, War-
szawa 1979.

/20/ CIESIELSKI R., JAMROŻY Z., KURNIK Z., Kompleksowe rozwią-
zanie blokowych fundamentów z drutobetonu pod urządzenia
wywołujące obciążenia typu udarowego, XXIII Konf.KILW PAN
i KN PZITB, Krynica 1977.

/21/ FUKSA M., SLIWINSKI M., Wytrzymałość i odkształcalność
betonu zbrojonego włóknem stalowym przy osiowym rozciąga-
niu, XIX Konf.KILW PAN i KN PZITB, Krynica 1973.

/22/ JAMROŻY Z., SLIWINSKI J., Próba zastosowania metody wirow-
wania do zagęszczania drutobetonu, Inż. i Bud., 1, 1976.

/23/ SLIWINSKI J., Technologia drutobetonu wirowego, Biul.inf.
o Bud., Cz.a nr 7-8 z.NB, 1977.

/24/ JAMROŻY Z., Modyfikacja własności betonu z łupkoporytu z
dodatkiem ciętego drutu, XXIII Konf.Nauk.KILW PAN i KN
PZITB, Krynica 1977.

/25/ JAMROŻY Z., OLEK J., SASIADEK S., Zastosowanie drutobetonu
do nawierzchni, XXIV Konf.KILW i KN PZITB, Krynica 1978.

/26/ JAMROŻY Z., ANDREASIK M., Wytrzymałość na docisk miejscowy
drutobetonu z kruszywa dolomitowego, Inż. i Bud., 417-418,
1978.

- /27/ KAJFASZ S., O efektywności warstwy zewnętrznej mikrobrojenia rozproszonego w modyfikowaniu własności betonu, XXIV Konf.Nauk.PAN i PZITB, Krynica 1978.
- /28/ KASPERKIEWICZ J., BABUT R., Wytrzymałość fibrobetonu z włóknem stalowym na rozciąganie przy zginaniu, w:/16/, ss.29-38.
- /29/ KASPERKIEWICZ J., Wytrzymałość i odkształcalność graniczna przy rozciąganiu fibrobetonu z włóknem stalowym, Mech.Teoret.Stos., 1, 1979.
- KASPERKIEWICZ J., Analysis of idealised distributions of short fibres in composite materials, Bull.Acad.Polon.Sci. Serie Sci.techn., 27, 6, 1979.
- /30/ LUBKOWSKA J., Problemy technologiczne wytwarzania betonu zbrojonego rozproszonym włóknem stalowym, Przegl.bud., 6, 1978.
- /31/ RADOMSKI W., Właściwości fibrobetonu pod obciążeniem uderzeniowym, Prace IPPT PAN, Warszawa 1979.
- /32/ WALKUS B.R., JANUSZKIEWICZ A., JERUZAL J., Kompozyty betonowe z ciętym mikrobrojeniem stalowym poddane osiowemu rozciąganiu, Arch.Inż.Ląd., 1978.

Beton zbrojony włóknem szklanym i polipropylenowym

- /33/ MAJUMDAR A.M., NURSE R.W., Glass fibre reinforced cement, Materials Science and Engineering, 15, 1974.
- /34/ WALTON P.L., MAJUMDAR A.J., Cement-based composites with mixtures of different types of fibres, Composites, wrzesień 1975.
- /35/ PIETRAS R., Podstawowe własności siatek z włóknem szklanym jako zbrojenie siatkobetonu, Arch.Inż.Ląd., 4, 1970.
- /36/ PIWOWARSKI K., Możliwości i perspektywy wykorzystania włókna szklanego jako zbrojenia zapraw i betonów, Sesja z okazji 50-lecia pracy naukowej prof.dr.B.Kopycińskiego, Wydz.Bud.Ląd.Pol.Krakowskiej, Kraków 1976.

Betony polimerowe

- /37/ Polymers in Concrete, Proceedings of the First International Congress on Polymer Concretes, Londyn 1975.
- /38/ Polymers in Concrete, Proceedings of the Second International Congress on Polymer Concretes, Austin, Texas, USA 1978.
- /39/ HOP T., Betony modyfikowane polimerami, Arkady, Warszawa 1980.
- /40/ BRONIEWSKI T., SLIWINSKI J., Kształtowanie struktury two-

rzyw cementowych przeznaczonych do impregnacji polimerami, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej pt. "Betony impregnowane polimerami", Kraków 1980.

- /41/ BRONIEWSKI T., SLIWINSKI J., Technologia właściwości i zastosowanie betonów impregnowanych polimerami, Sympozjum SITMB "Nowe materiały budowlane", Jachranka 1980.
- /42/ BARES R., JAVORNICKY J., NAVRATIL J., Some basic features of inhomogeneous materials, Proceedings International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Japan, 5, 1972.
- /43/ CZARNECKI L., OSIECKA E., Betony żywiczne, Problematyka Budownictwa, COIB, Warszawa 1976.
- /44/ CZARNECKI L., Perspektywy zastosowań betonów żywicznych, Sympozium SITPMB "Nowe materiały budowlane", Jachranka 1980.
- /45/ CZARNECKI L., Betony żywiczne, Arkady /w druku/.
- /46/ CZARNECKI L., BRONIEWSKI T., Betony żywiczne a betony cementowe impregnowane polimerami, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej "Betony impregnowane polimerami", Kraków 1980.
- /47/ CZARNECKI L., PIETRZYKOWSKI J., SZWARC M., Some polish investigation on properties and applications of composite polymer - concrete materials, Third International Conference on Composite Materials, Paryż 1980.
- /48/ CZERNIAK M., PIETRZYKOWSKI J., Badania nieniszczące cementowych kompozytów polimerobetonowych, III Krajowe Symp. Badanie nieniszczące w budownictwie, Wyd. ITB, Warszawa-Jadwisin 1979.
- /49/ PIWOWARSKI K., DYDENKO J., Zginane elementy z betonów lekkich zbrojone laminatami, XXII Konf. KILW PAN i KN PZITB, Krynica 1976.
- /50/ PRÓCHNIAK S., KOCIOLEK K., Wpływ domieszki dyspersji wodnej polioktanu winylu na porowatość betonu, XXIV Konf. PZITB, Krynica 1978.
- /51/ SKWARA J., Metoda projektowania betonów epoksydowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 1976.
- /52/ CZARNECKI L., WHITE J., Shear flow rheological properties, fiber damage and mastication characteristics of aramid, glass-and cellulose-fiber-reinforced polystyrene melts, J. Appl. Polymer Sci., 25, 1217, 1980.
- /53/ ZIMMERMAN J., WILCZYNSKI A.P., Wpływ wzmacniający wypełniaczy kulistych na własności mechaniczne kompozytów,

Polymery, 18, 165, 1980.

/54/ MRÓZ Z., PIETRUSZCZAK S., Próba modelowania mechanicznych
własności polimerobetonów, Arch.Inż.Ląd., 2, 1977.