

5.3 — plastyczność, lepkoplastyczność

P. 269

J. Miastkowski, H. Skrocki

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA
UDAROWO ROZCIĄGANYCH
OSIOWO-SYMETRYCZNYCH ELEMENTÓW
KONSTRUKCJI Z KARBAMI PROSTOKĄTNYMI

12/1993

WARSZAWA 1993

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 12 listopada 1993 r.



56678



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark.wyd. 1,15 Ark.druk. 1,40
Oddano do drukarni w marcu 1993 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul.Jasna 1

Józef Miastkowski (IPPT - PAN, Warszawa)

Henryk Skrocki (Uniwersytet Warszawski -

Filia w Białymstoku)

**Analiza wytrzymałościowa udarowo rozciąganych
osiowo-symetrycznych elementów konstrukcji z korbami
prostokątnymi**

Streszczenie

W pracy podano wyniki badań własności wytrzymałościowych osiowo-symetrycznych elementów konstrukcji, osłabionych jednym lub wieloma wycięciami prostokątnymi, poddawanych udarowym obciążeniom rozciągającym.

Stwierdzono, że teoretyczne wartości średnicy elementu poza korbem oraz odległości między sąsiednimi wycięciami w elementach z dwoma i więcej korbami prostokątnymi, określone w oparciu o rozwiązania metodami nośności granicznej, są wielkościami optymalnymi również w przypadku udarowego ich rozciągania.

1. WPROWADZENIE

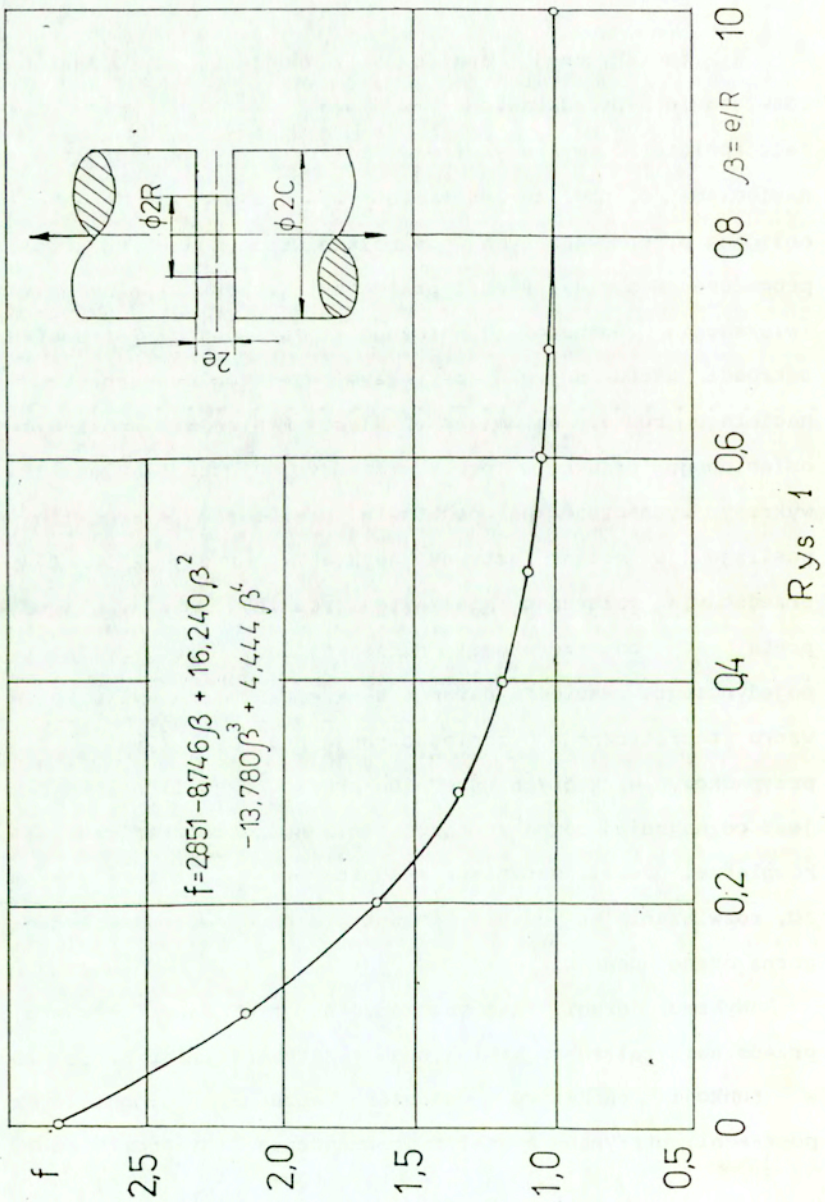
Przy konstruowaniu elementów maszyn o skomplikowanych kształtach, poddawanych złożonym obciążeniom, bardzo przydatne są metody wyznaczania i szacowania nośności granicznej przedstawione w opracowaniu [1]. W metodach tych przyjmuje się pewne uproszczenia w stosunku do rzeczywistych warunków pracy elementów konstrukcji, a mianowicie ich quasi-statyczne obciążenie. W rzeczywistości mamy do czynienia często z obciążeniami dynamicznymi. Wyniki prac eksperymentalnych, zamieszczone w monografii [1], wskazują na dobrą zgodność rozwiązań teoretycznych z rzeczywistym zachowaniem się elementów konstrukcji wykonanych z materiałów plastycznych i obciążonych statycznie. Teoretyczną i doświadczalną analizę nośności granicznej elementów osiowo symetrycznych prezentują prace [2], [4], [6], [8], [9]. Przy analizie teoretycznej wykorzystuje się metodę R. T. Shielda [7] dotyczącą rozwiązania zagadnień teorii plastyczności w warunkach osiowej symetrii. Metoda ta polega na uzupełnieniu równań równowagi postulatami pełnej plastyczności Haara-Kármána oraz przyjęciu warunku plastyczności Treski i stowarzyszonego z nim prawa płynięcia dla materiału izotropowego i sztywno-idealnie plastycznego.

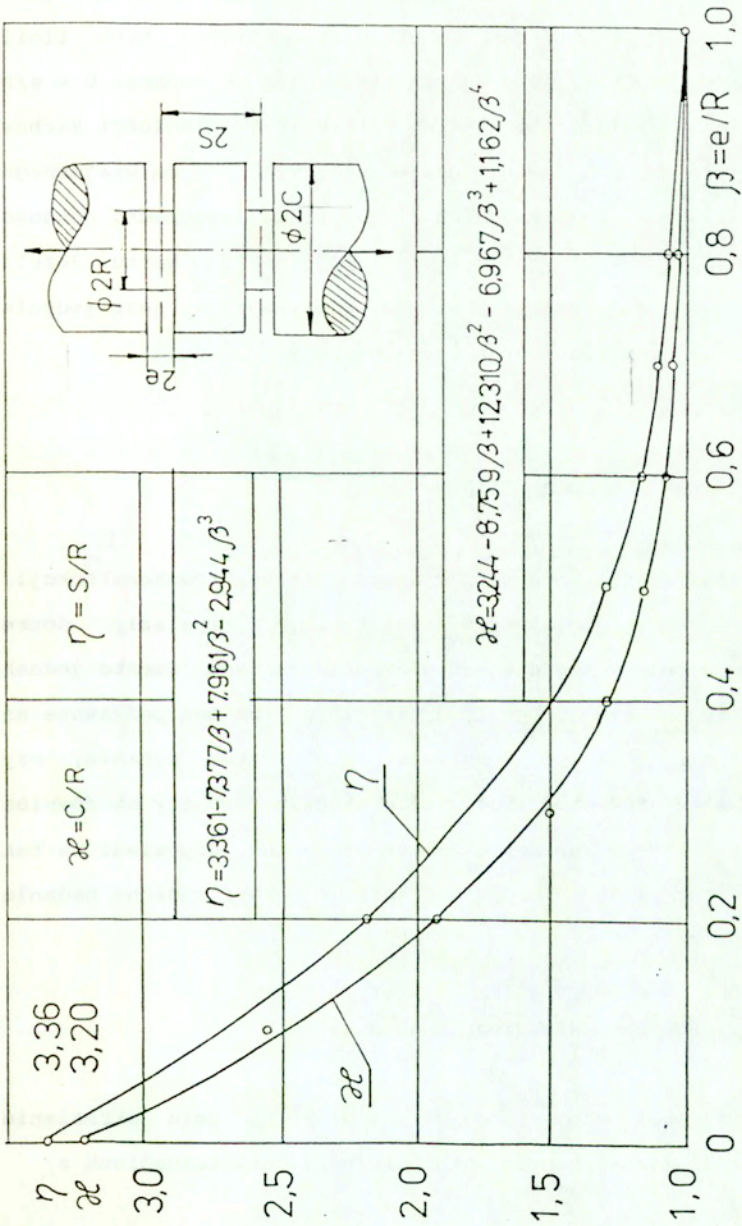
W prezentowanej pracy przeprowadzono analizę wytrzymałościową osiowo-symetrycznych elementów konstrukcji z pojedynczymi oraz wielokrotnymi prostokątnymi nacięciami obwodowymi, poddawanych udarowym obciążeniom rozciągającym.

2. WYNIKI TEORETYCZNEJ ANALIZY

W teoretycznej analizie zagadnienia wykorzystano rozwiązania przedstawione w pracy [6]. Z pracy tej zaczerpnięto 3 wykresy (rys. 1 i rys. 2) dla elementów z nacięciami o profilu prostokątnym, otrzymanych jako wynik obliczeń przeprowadzonych w oparciu o wspomnianą w punkcie 1 procedurę Schielda. Rys. 1 przedstawia wykres współczynnika zwiększenia nośności granicznej f w funkcji parametru ostrości karbu $\beta = e/R$, przy czym e jest połową szerokości naciętego rowka, natomiast R jest minimalnym promieniem osłabionego przekroju pręta. Na rys. 2 przedstawiono dwa wykresy wyznaczone na podstawie przedłużeń siatki linii poślizgu w obszar sztywny. Wykres pierwszy $\kappa = f(\beta)$ przedstawia zależność minimalnej średnicy części chwytowej pręta $2C$ od szerokości nacięcia $2e$ i dotyczy karbu pojedynczego. Wartość parametru $\kappa = C/R$ można wyliczyć ze wzoru teoretycznego, zamieszczonego na tym rysunku. Dla przypadków, w których średnica pręta w części poza karbem jest co najmniej równa $2C$ rozwiązania nośności granicznej są kompletne. Jeżeli natomiast średnica pręta jest mniejsza od $2C$, rozwiązania są jedynie kinematycznie dopuszczalne i dają górną ocenę nośności.

Wykres drugi, zamieszczony na tym samym rysunku, przedstawia zależność minimalnego rozstawu szeregu nacięć $2S$ w funkcji parametru ostrości karbu β . Podobnie jak poprzedni, otrzymany został z przedłużenia linii poślizgu w





Rys. 2

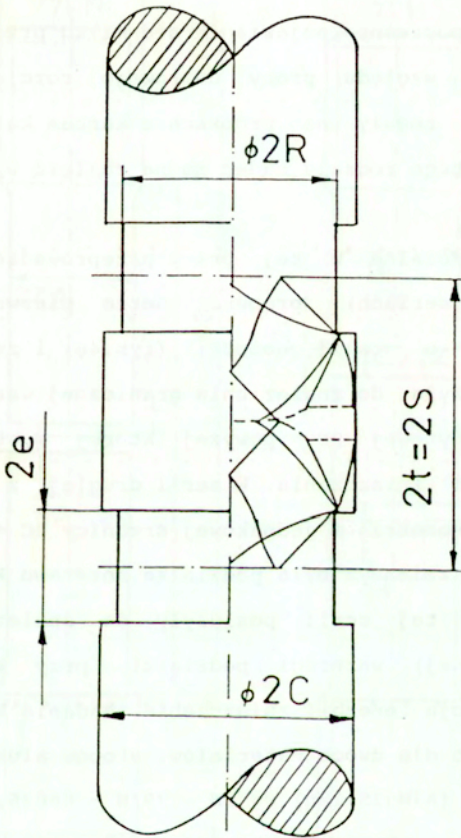
obszar sztywny. Przykładowe rozmieszczenie karbów i obraz przebiegu zestawionych obok siebie siatek tych linii pokazano na rys. 3. Wykres $\eta = S/R$ w funkcji $\beta = e/R$ umożliwia znalezienie takiej minimalnej odległości karbów $2S$, przy której można powiedzieć, że nie ma wzajemnego oddziaływania ich na siebie. W takim przypadku nośność graniczna jest równa nośności pojedynczego karbu. Jeżeli odległość jest mniejsza niż $2S$, wtedy możliwe jest jedynie oszacowanie nośności granicznej od góry i od dołu.

3. BADANIA DOSWIADCZALNE

Rozwiązania nośności granicznej elementów konstrukcji, poddawanych obciążeniom statycznym, znalazły dobre potwierdzenie w szeregu badań doświadczalnych. Często jednak elementy maszyn pracują dynamicznie lub też poddawane są obciążeniom nagłym. Pojawia się zatem pytanie, czy wyznaczone metodami nośności granicznej wymiary są również optymalne w warunkach obciążeń uderowych. Odpowiedź na tak postawione pytanie mogą dać jedynie przeprowadzone badania doświadczalne.

3.1. Udarowa próba rozciągania

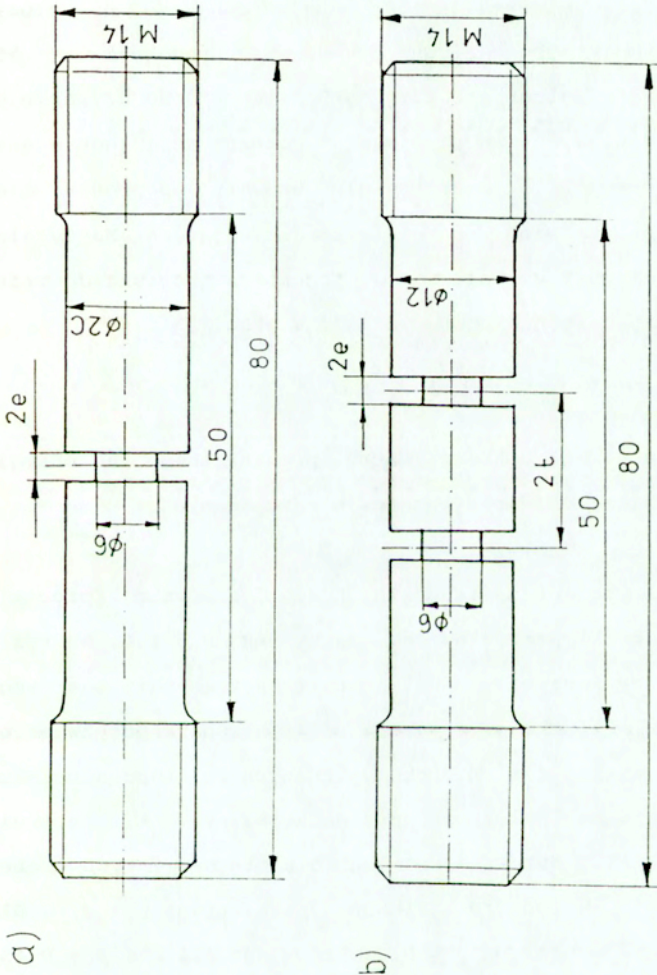
Udarowe próby rozciągania mają na celu określenie własności mechanicznych materiału przy odkształceniach z



Rys. 3

dużą prędkością. Badania te przeprowadza się na próbkach gładkich lub z karbem. Przy badaniu próbek gładkich często pojawiają się trudności z wyznaczeniem względnego wydłużenia ze względu na jednoczesne pojawianie się kilku przewężeń (szyjek). Z tego względu próby udarowego rozciągania przeprowadza się z reguły na próbkach z karbem kątowym. Szczegóły metodyki tego rodzaju badań można znaleźć w pracy [10].

Badania doświadczalne w tej pracy przeprowadzono na dwóch rodzajach (seriach) próbek. Seria pierwsza z pojedynczym karbem, o stałej geometrii (rys.4a) i zmienną średnicą $2C$, posłużyła do znalezienia granicznej wartości średnicy części chwytowej $2C$, powyżej której występuje stabilizacja energii zniszczenia. W serii drugiej, z dwoma karbami o stałej geometrii i jednakowej średnicy $2C = 12\text{mm}$ (rys.4b), elementem zmiennym była podziałka rozstawu karbów $2t$. Wyniki badań tej serii posłużyły do znalezienia optymalnej (minimalnej) wartości podziałki, przy której występuje stabilizacja energii zniszczenia. Badania każdej serii przeprowadzono dla dwóch materiałów, stopów aluminium PA2 (AlMg2) i PA4 (AlMg1Si1Mn) wg PN - 79/H - 88026, przy czym dla PA2 parametr ostrości karbu wynosił $\beta = e/R = 0,3$, natomiast dla PA4 $\beta = e/R = 0,45$. Oba wymienione materiały mają bardzo dobre własności plastyczne i wytrzymałościowe. Stosowane są do wyrobu szeregu średnio obciążonych elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń przemysłu transportowego, lotniczego. Poza tym stop PA4 często jest stosowany do



Rys. 4

wytwarzania elementów konstrukcyjnych sprzętu domowego, sportowego i turystycznego.

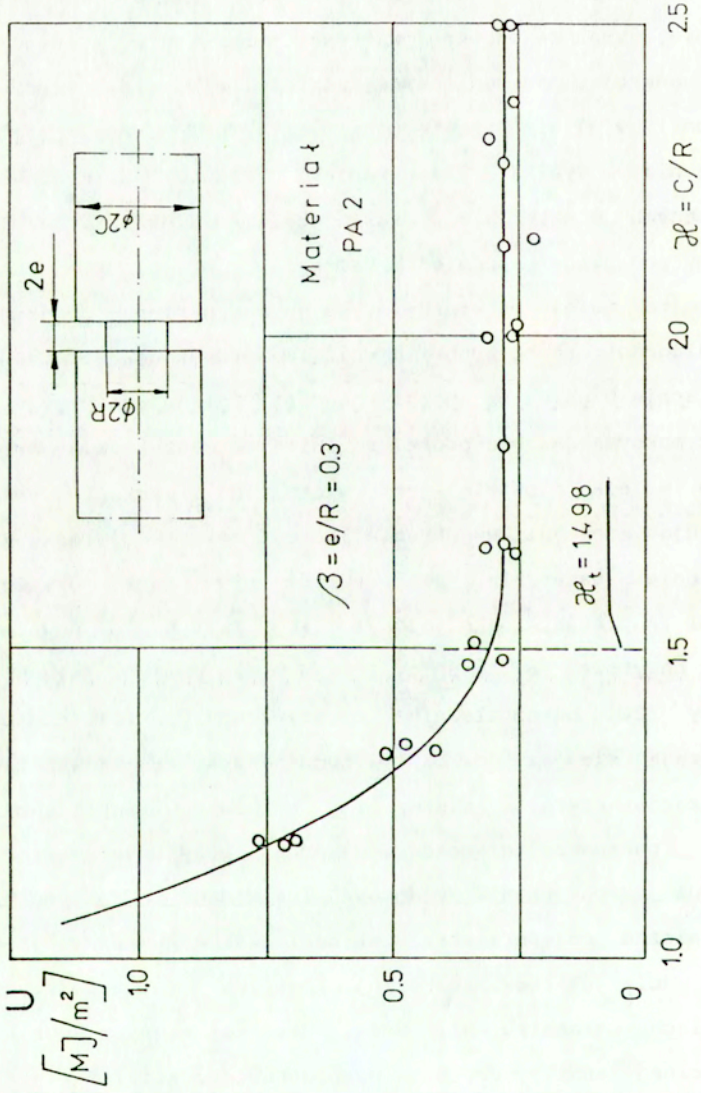
Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na młocie wahadłowym typu Charpy'ego produkcji VEB Werkstoffprüfmashinen, Leipzig, NRD, standardowo używanym do prób udarnościowych. Po niewielkiej modernizacji (dokręceniu kolumn oporowych i zamontowaniu uchwyty do próbek) młot został przystosowany do obciążeń zrywających. Maksymalna energia uderzenia wynosiła 50 J. Schemat stanowiska do próby udarowego rozciągania można znaleźć w pracy [5].

3.2. Wpływ głębokości karbu prostokątnego na energię zniszczenia przy udarowym rozciąganiu

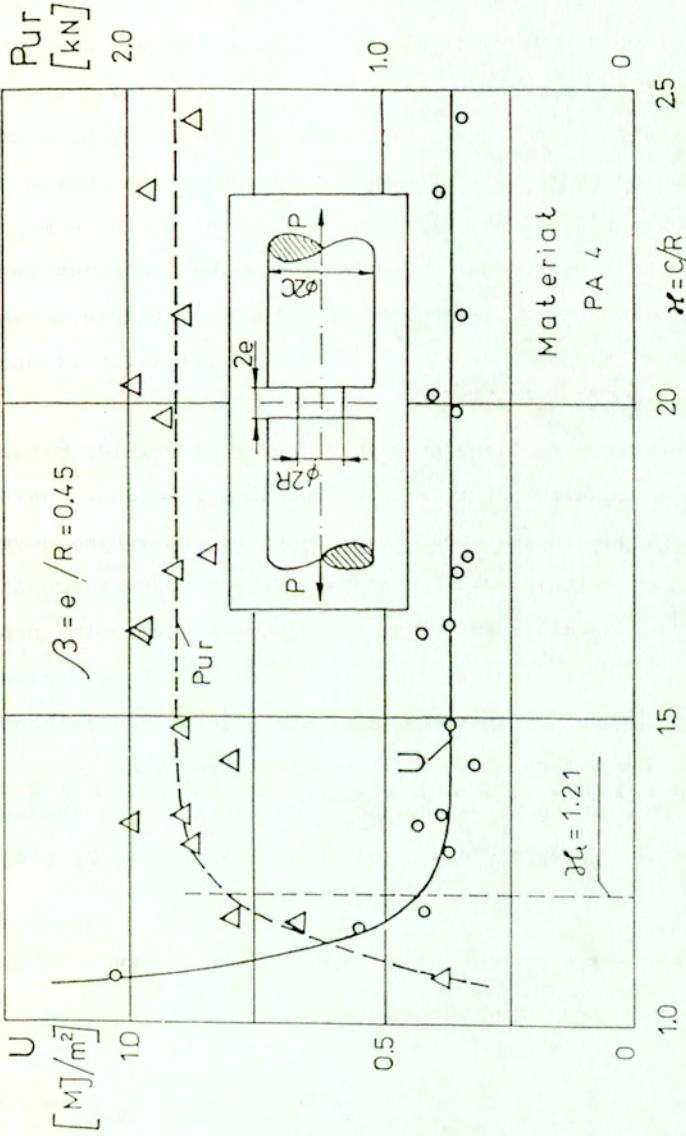
Wyniki badań doświadczalnych serii pierwszej (próbek z jednym karbem) przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Na rys 5 podany jest wykres zależności jednostkowej energii udarowego zniszczenia w funkcji parametru $\kappa = c/h$, charakteryzującego głębokość karbu dla próbek wykonanych ze stopu aluminium PA2. Taką samą zależność przedstawia rys. 6, lecz dla materiału PA4. Istotną różnicą dla obu serii tych próbek jest ostrość karbu zdefiniowana parametrem $\beta = e/R$. Dla materiału PA2 wynosi on $\beta = 0,3$, natomiast dla PA4 $\beta = 0,45$.

Analizując wykresy na obu rysunkach można zauważyć asymptotyczny przebieg krzywych jednostkowej energii zniszczenia. Maksymalną wartość tej energii otrzymano dla

karbów, których średnica $2R$ niewiele różniła się od średnicy części chwytowej $2C$, a parametr $\kappa = C/R$ zbliżał się do 1. Następnie, wraz ze wzrostem wartości parametru κ , występuje spadek energii, aż do pewnej wartości minimalnej (krzywa przechodzi w linię prostą poziomą). Taki obraz energii zniszczenia wynika z przebiegu zjawisk fizycznych zachodzących w materiale w czasie obciążania próbki. Jeżeli weźmiemy pod uwagę proces odkształcenia próbki gładkiej (bez karbu), to należy stwierdzić, że uplastycznienie obejmuje całą długość roboczą próbki a energia zniszczenia rozprasza się właśnie w całej objętości roboczej. Osiąga ona przy tym wartość maksymalną. Dla próbki z minimalną głębokością karbu (gdy $\beta = e/R$ niewiele jest większe od 1) odkształcenia lokalizują się już w obrębie karbu, ale w związku ze wzmocnieniem materiału, po przekroczeniu pewnej granicy wartości naprężeń, odkształcają się plastycznie również części chwytowe (o średnicy $2C$). W miarę powiększania się średnicy $2C$ odkształcenia plastyczne w tej części zmniejszają się aż do całkowitego zaniku, co objawia się stabilizacją energii zniszczenia. W miejscu stabilizacji energii parametr głębokości karbu przyjmuje wartość optymalną. Z porównania rysunków 5 i 6 widać, że wartość ta jest zależna od parametru ostrości karbu $\beta = e/R$ i jest większa dla karbów bardziej ostrych (o mniejszych wartościach parametru β). Potwierdza to również wyniki teoretycznej analizy uzyskane na podstawie rozwiązań siatek linii poślizgu (rys. 2) i przedstawionych na rys. 5 i 6



Rys. 5



Rys. 6

pionową linią przerywaną. Niewielkie rozbieżności między wynikami teoretycznymi a uzyskanymi z doświadczeń mogą wynikać z uproszczonych założeń i przyjęcia obciążeń quasi-statycznych przy obliczeniach numerycznych, podczas gdy doświadczenie było prowadzone w warunkach udarowych.

Wyznaczenie optymalnej wartości parametru κ ma duże znaczenie praktyczne. Umożliwia bowiem zaprojektowanie kształtu karbu w taki sposób, by element w czasie obciążeń udarowych zachował wymiary i nie stracił swoich właściwości użytkowych.

Na rys. 6 linią przerywaną pokazano również przebieg umownego średniego obciążenia w funkcji parametru κ . Wartość tego obciążenia jest obarczona pewnym błędem wynikającym ze sposobu określenia odkształceń całkowitych. Odkształcenia te wyznaczano jako różnicę między długością całkowitą próbki przed i po zerwaniu. Mimo tych niedokładności otrzymano krzywą, której charakter jest analogiczny do zależności uzyskanej w przypadku obciążeń quasi-statycznych.

Umowne wartości średniego obciążenia P_{ur} i średniego naprężenia σ_{ur} wyznaczono z zależności (3.1) i (3.2) [10].

$$3.1. \quad P_{ur} = \frac{E_u}{\Delta l_u} \cdot 10^{-3} \text{ kN}$$

$$3.2. \quad \sigma_{ur} = \frac{E_u}{\Delta l_u F_0} \cdot 10^{-6} \text{ MPa}$$

gdzie:

E_u - energia zniszczenia próbki przy
udarowej próbie rozciągania
wyrażona w J

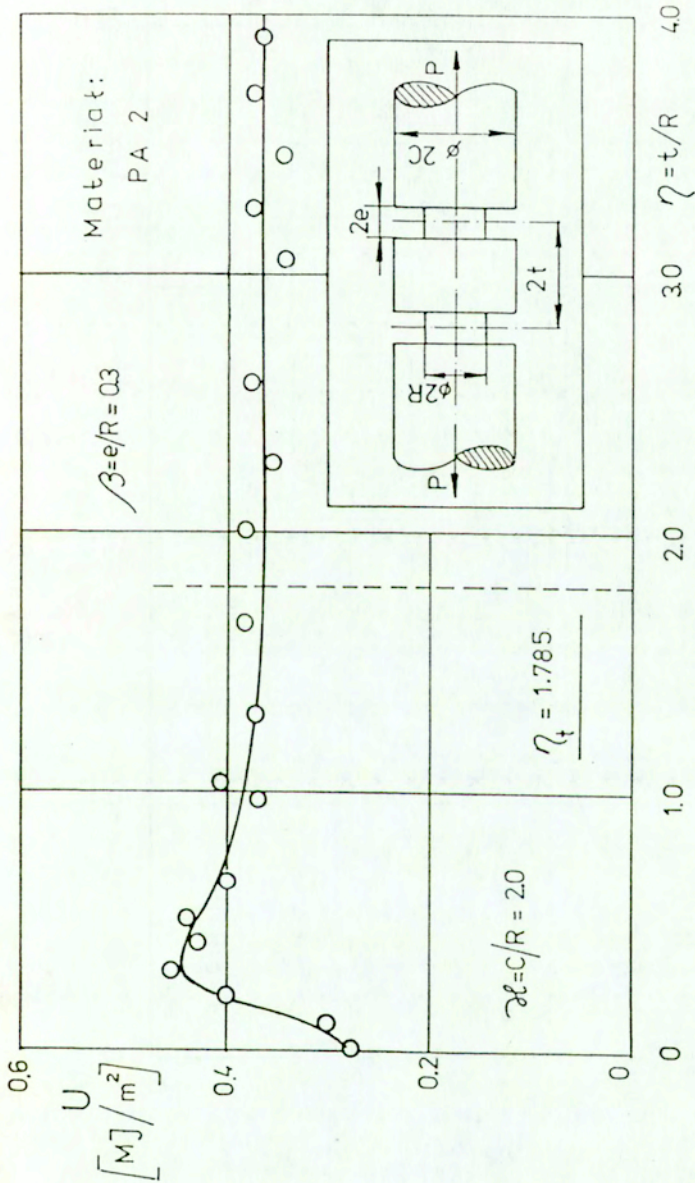
Δl_u - wydłużenie próbki w m

F_0 - pole przekroju próbki przed
obciążeniem w m^2

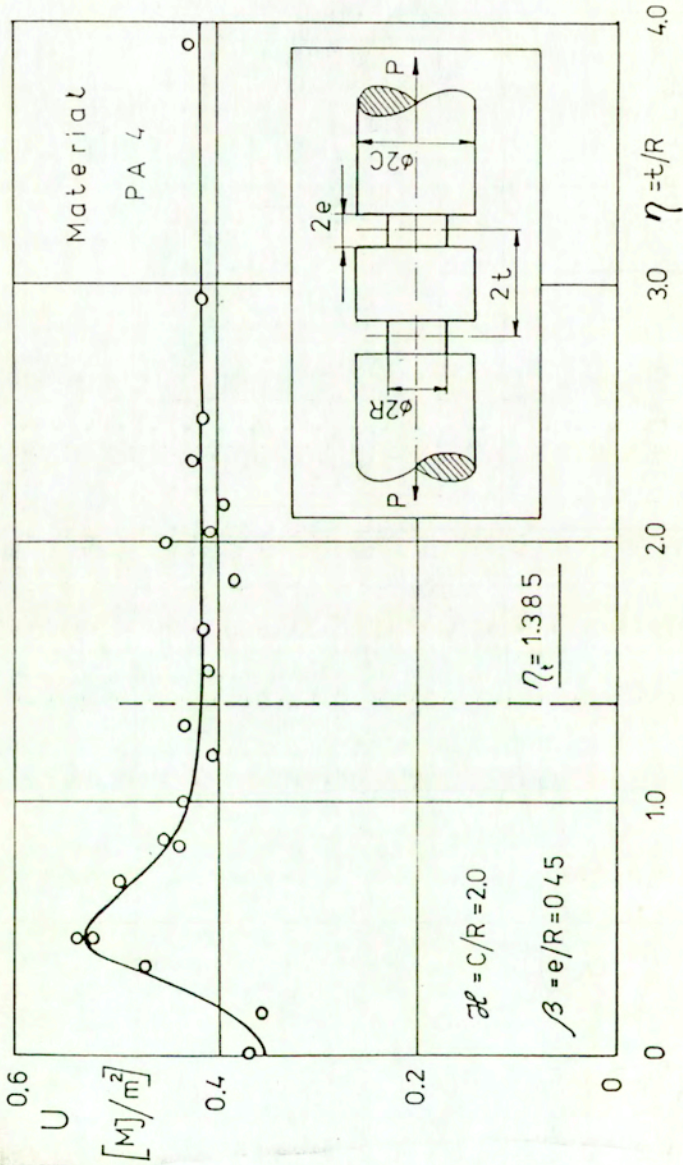
3.3. Wpływ rozmieszczenia korbów na zdolność do absorbowania energii przez element z wieloma nacięciami w warunkach udarowego rozciągania.

Badania przeprowadzono dla dwóch materiałów. W serii pierwszej próbki wykonane ze stopu aluminium PA2 miały nacięcia o parametrze ostrości $\beta = e/R = 0,3$, natomiast w drugiej próbki wykonano ze stopu PA4 z nacięciami charakteryzującymi się parametrem $\beta = 0,45$. W obu seriach parametr głębokości karbu był jednakowy i wynosił $\kappa = C/R = 2,0$. Jest to wartość znacznie większa od optymalnej wyznaczonej z przebiegu wykresów $U = f(\kappa)$ na rysunkach 5 i 6. Przyjęcie takich wymiarów próbek eliminuje uboczny wpływ odkształceń plastycznych poza karbem. Parametrem zmiennym w obu seriach była podziałka rozstawienia korbów $2t$. Na wykresach podziałkę tę odnoszono do średnicy dna karbu wprowadzając parametr $\eta = t/R$.

Zależność jednostkowej energii zrywania U , przy udarowym obciążeniu w funkcji parametru rozstawienia korbów η , przedstawiono odpowiednio na rys.7 dla materiału PA2 i na rys.8 dla PA4. W przebiegu wykresów można wyróżnić charakterystyczne fazy: wznoszenie do osiągnięcia wyraźnego maksimum, następnie opadanie i na koniec łagodne przejście do pewnej wartości ustabilizowanej. Wyznaczenie optymalnej wartości parametru podziałki η , powyżej której następuje stabilizacja energii zniszczenia, jest podstawowym celem tej części badań. Optymalna wartość parametru η wyznacza również granicę wzajemnego oddziaływania sąsiadujących ze sobą korbów. Dla $\eta = 0$, a więc praktycznie dla próbki z jednym korbem, wartość energii zniszczenia jest taka sama jak na poprzednich wykresach 5 i 6 po osiągnięciu stabilizacji. Maksymalną wartość jednostkowej energii zrywania osiągnęły próbki przy parametrze rozstawienia korbów η równym w przybliżeniu parametrowi ostrości β . Jest to zrozumiałe, ponieważ mamy wtedy do czynienia praktycznie z pojedynczym korbem o podwójnej szerokości. Ustabilizowana wartość energii dla dwóch korbów jest znacznie wyższa od energii zniszczenia próbek z jednym korbem. Wynika to stąd, że w początkowym okresie (wskutek umacniania się materiału) odkształcają się oba karby i dopiero lokalizacja szyjki w jednym z nich powoduje zerwanie właśnie tego karbu. Większą wartość ustabilizowanej energii potrzebnej do zniszczenia próbek z korbami uzyskano dla materiału PA4, który charakteryzuje się również większą wytrzymałością.



Rys. 7



Rys. 8

Optymalna wartość parametru η zależy od ostrości karbu ($\beta = e/R$). Wynika to z rozwiązań teoretycznych uzyskanych dla obciążeń quasi-statycznych. Wartości optymalnych parametrów η_t uzyskanych tą drogą przedstawiono na rysunkach 7 i 8 przerywaną linią pionową. W obu przypadkach (dla dwóch materiałów i dwóch różnych ostrości karbu β) przejście energii zniszczenia do wartości ustabilizowanej odbywa się w strefie wyznaczonej w/w linią η_t . Oznacza to, że wyznaczone teoretycznie wartości parametrów η_t mogą mieć praktyczne znaczenie również w przypadku obciążeń udarowych.

4. WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych można stwierdzić, że teoretyczne rozwiązania siatek linii poślizgu wraz z przedłużeniem w obszar sztywny (dla obciążeń quasi-statycznych) pozwalające określić optymalny stosunek średnicy części chwytowej do średnicy dna karbu $\kappa = C/R$, mogą być podstawą optymalizacji wymiarów osiowo-symetrycznych elementów z nacięciami prostokątnymi również w warunkach obciążeń udarowych.

Teoretycznie określona dla quasi-statycznych obciążeń wartość parametru rozstawu karbów $\eta = s/R$ dla elementów osiowo-symetrycznych z wieloma nacięciami jest również optymalna przy rozciąganiu udarowym.

LITERATURA

1. L. Dietrich, J. Miastkowski, W. Szczepiński: Nośność graniczna elementów konstrukcji, PWN, Warszawa, 1970.
2. L. Dietrich, K. Turski: NOśność graniczna rozciąganych osiowo-symetrycznych prętów osłabionych szeregiem korbów kątowych, Mech. Teoret. Stosow., 4, 6, 1968, s. 437 - 448.
3. J. Miastkowski, H. Skrocki: Analiza nośności granicznej osiowo-symetrycznych elementów z korbami kątowymi w udarowym rozciąganiu, Rozprawy Inżynierskie, 31, 4, 1983, s. 473 - 480.
4. L. Dietrich, J. Miastkowski, R. Szczebiot: Nośność graniczna osiowo-symetrycznych prętów z szeregiem korbów kołowych. Rozprawy Inżynierskie, 36, 3, 1988, s. 441 - 459.
5. J. Miastkowski, H. Skrocki: Analiza wytrzymałościowa udarowo rozciąganych osiowo-symetrycznych prętów z nacięciami kołowymi. Zeszyty Naukowe Filii U.W. w Białymstoku, z. 59, T. IX, Nauki Matemat. - Przyrodnicze. Dział WT, Białystok 1989, s. 5 - 23.

6. L. Dietrich, J. Miastkowski, R. Szczepirot: Analiza wytrzymałościowa osiowo-symetrycznych elementów z szeregiem nacięć o profilu prostokątnym. Rozprawy Inżynierskie (praca złożona do druku).
7. R. T. Shield: On the plastic flow of metals under conditions of metals under conditions of axial-symmetry. Proc. Roy. Soc., 233A, No 1193, 1955, 267 - 287.
8. W. Szczepiński, L. Dietrich, E. Drescher, J. Miastkowski: Plastic flow of axially-symmetric notched bars pulled in tension. Jnt. J. Solids Structures, 2, 1966, 543 - 554.
9. L. Dietrich, W. Szczepiński: Plastic yielding of axially-symmetric bars with non-symmetric V-notch, Acta Mechanica, 3, 4, 1967, 230 - 240.
10. S. Katarzyński, S. Kocanda, M. Zakrzewski: Badanie własności mechanicznych metali, PWT, Warszawa, 1961.