

WYTRZYMAŁOŚĆ UDAROWO ROZCIĄGANYCH PŁASKICH ELEMENTÓW O DOWOLNEJ GRUBOŚCI Z WYCIĘCIAMI PROSTOKĄTNYMI

JÓZEF M I A S T K O W S K I (WARSZAWA)

Na podstawie prób udarowego rozciągania prętów z korbami prostokątnymi przeprowadzono analizę wpływu ostrości karbu i rodzaju materiału na graniczną wartość grubości, przy której praca udarowego zerwania elementu osiąga wartość optymalną. Ustalono, że ta graniczna wartość grubości, uwzględniając ostrość karbu i rodzaj materiału, może być od 2,5 do 5 razy większa od szerokości elementu w miejscu osłabionym. Poza tym stwierdzono, że krzywe opisujące zależność grubości granicznych w funkcji ostrości karbu mają ten sam charakter dla obciążeń udarowych i quasi-statycznych. Ustalono też, że graniczne grubości, określone na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie, są większe od grubości granicznych wyznaczonych przy obciążeniach udarowych, i mogą być przyjmowane jako optymalne ze względu na obciążenia niszczące również w udarowym rozciąganiu.

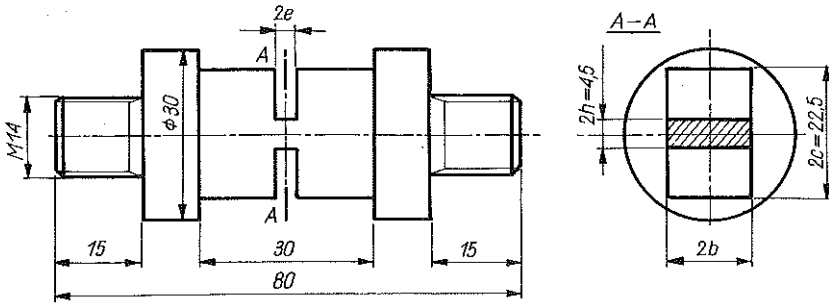
1. WPROWADZENIE

Monograficzny wykład metod wyznaczania lub szacowania nośności granicznej elementów konstrukcji o złożonych kształtach zawarty jest w opracowaniu [1]. Jednym z podstawowych założeń tych metod jest quasi-statyczne obciążenie elementów, co stanowi istotne uproszczenie w stosunku do rzeczywistych warunków pracy konstrukcji. Praktyczna przydatność teoretycznych rozwiązań może być zatem potwierdzona tylko na drodze doświadczalnej. Wyniki eksperymentów podane w monografii [1] oraz w pracach [2-15] wskazują na dobrą zgodność rozwiązań teoretycznych z rzeczywistym zachowaniem się elementów konstrukcji

wykonanych z materiałów o dobrych własnościach plastycznych i poddanych obciążeniom nie tylko statycznym ale również udarowym [11, 12] i zmęczeniowym [14, 15].

Dla płaskich prętów osłabionych obustronnie korbami określenie rozkładu naprężeń i teoretycznej nośności granicznej jest możliwe w dwóch skrajnych przypadkach, mianowicie dla płaskiego stanu odkształcenia oraz dla płaskiego stanu naprężenia. Powstaje wobec tego ważny problem, kiedy teoretyczne schematy płaskiego stanu naprężenia i płaskiego stanu odkształcenia mogą stanowić dobre przybliżenie rzeczywistych warunków. Całkowicie pewne informacje na tak postawione pytanie mogą być uzyskane jedynie w sposób doświadczalny [1-10].

Wyniki badań podane w pracach [1-8] wskazują na dużą różnorodność ocen wartości granicznych parametru $\lambda = b/h$, które można przyjmować dla celów praktycznych za początek realizacji w elementach z korbami płaskiego stanu odkształcenia. Wyjaśnienie przyczyn tej różnorodności ocen wartości granicznych parametru λ podane zostało w pracach [9, 10], w których badania tego zagadnienia przeprowadzono z uwzględnieniem rodzaju materiału oraz ostrości i konfiguracji karbu. W przypadku prętów osłabionych nacięciami prostokątnymi [10], graniczna wartość grubości, określona parametrem λ_{gr} , dla stopu aluminium PA2 zawarta jest w przedziale od 3 do 6-ciu (linia przerywana na rys. 10). Należy podkreślić, że krzywa λ_{gr} określona została na podstawie wykresów zależności granicy plastyczności w funkcji grubości λ , wyznaczonych dla różnych ostrości korbów opisanych parametrem $\beta = e/h$. Dla oceny przydatności teoretycznych rozwiązań, uzyskanych przy założeniu quasi-statycznego obciążenia, w przypadku udarowego rozciągania czy cyklicznego obciążania płaskich elementów o złożonych kształtach niezbędne stają się doświadczalne badania warunków, w których teoretyczne schematy płaskiego stanu naprężenia i płaskiego stanu odkształcenia mogą stanowić dobre ich przybliżenie. W prezentowanej pracy podjęto próbę rozwiązania tego zagadnienia dla przypadku udarowego rozciągania płaskich elementów z korbami prostokątnymi (rys. 1). Analizę rozpatrywanego zagadnienia, pierwszą tego typu w literaturze, przeprowadzono na podstawie wyników badań prętów o dowolnej grubości, wykonanych z odmiennych materiałów i osłabionych korbami o różnej ostrości.

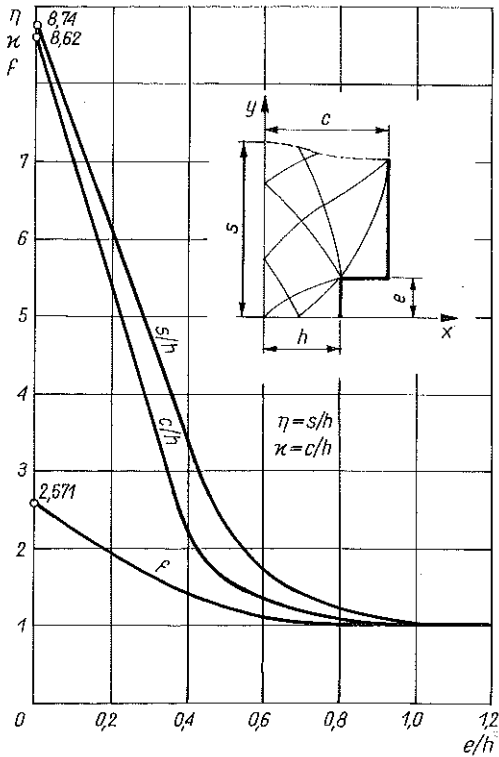


| Materiał | Liczba próbek |
|-----------------------|---------------|
| PA2 (Al Mg 2) | 49 |
| PA4 (Al Mg 1 Si 1 Mn) | 49 |
| PA6 (Al Cu 4 Mg 1) | 49 |

Rys. 1

2. ROZWIĄZANIE SZTYWNO-PLASTYCZNE DLA PŁASKIEGO STANU ODKSZTAŁCENIA

Teoria stanu naprężenia i odkształcenia w płaskim przęciu osłabionym obustronnie symetrycznymi wycięciami i poddanym rozciąganiu jest oparta na założeniu, że panuje w nim płaski stan odkształcenia. Teoretycznie nastąpi to wtedy, gdy stosunek b/h (rys. 1) dąży do nieskończoności. Jednakże, jak wykazują wyniki badań doświadczalnych, rozwiązania dla płaskiego stanu odkształcenia mają praktyczne znaczenie już przy grubościach b kilkakrotnie większych od charakterystycznego wymiaru h . Jest to o tyle ważne, że w rzeczywistych konstrukcjach występują elementy o skończonej wartości stosunku b/h . Określenie więc na drodze eksperymentalnej, kiedy teoretyczne schematy płaskiego stanu odkształcenia mogą stanowić dobre przybliżenie rzeczywistych warunków stanowi istotny problem naukowy. Wyznaczenie obciążenia granicznego elementów osłabionych symetrycznymi wycięciami o dowolnym kształcie oparte jest na założeniu, że cały najwęższy przekrój ulegnie uplastycznieniu. Stan naprężenia w sąsiedztwie brzegu jest wówczas zależny jedynie od istniejących na nim warunków. Kontur karbu jest brzegiem swobodnym, a więc warunki brzegowe są na nim jednoznacznie określone. Rozwiązując zagadnienie brzegowe Cauchy'ego można wyznaczyć z obu stron symetryczne siatki linii poślizgu



Rys. 2

do osi pręta (wstawka na rys. 2). Metoda podana przez R. HILLA [16] pozwala obliczyć w sposób numeryczny rozkład naprężeń i nośność graniczną dla dowolnego kształtu karbu [1]. Rozkład naprężeń normalnych zależy od kształtu karbu. W pewnych przypadkach naprężenia na osi są przeszło dwu i półkrotnie większe od naprężeń równych granicy plastyczności materiału σ_{pl} , występujących w skrajnych punktach zewnętrznych. Jak wiadomo, jest to związane z istnieniem trójosiowego stanu naprężenia w wewnętrznych punktach najmniejszego przekroju. Taki rozkład naprężeń w chwili połączenia się obszarów plastycznych powoduje, że nośność graniczna P_{pl}^* prętów z korbami jest większa od nośności granicznej P_{pl} prętów gładkich o takiej samej powierzchni przekroju poprzecznego jaki mają pręty z korbami w miejscu osłabionym. Liczbowe ujęcie tego zjawiska określa współczynnik zwiększenia nośności granicznej f , określony z zależności $f = P_{pl}^*/P_{pl}$.

Dla rozpatrywanych w pracy korbów prostokątnych wykres wartości

współczynnika zwiększenia nośności granicznej f w funkcji ostrości karbu $\beta = e/h$ przedstawiono na rys. 2.

2.1. Przedłużenie siatki linii poślizgu w obszar sztywny

Całkowitą pewność, że maksymalna siła, określona nośnością graniczną najmniejszego przekroju, może być przeniesiona przez pozostałe przekroje elementu bez naruszenia warunku plastyczności, można uzyskać budując przedłużenie siatki linii poślizgu z otoczenia nacięć na przylegające obszary (wstawka na rys. 2). Pozwala to określić optymalną szerokość $2c$ części nieosłabionych (rys. 1). Sposób budowy przedłużenia siatki linii poślizgu w obszar sztywny podał J.F. BISHOP [1]. Tak zbudowane pole naprężeń w sztywnej części pręta jest statycznie dopuszczalne. Określone na tej podstawie bezpieczne szerokości części chwytowych dla elementów osłabionych korbami o dowolnych kształtach przedstawione zostały w opracowaniu [1]. Dla rozpatrywanego w pracy przypadku elementu z nacięciami prostokątnymi, wykres bezpiecznej szerokości części poza korbem $\kappa = c/h$ w funkcji ostrości karbu $\beta = e/h$ podano na rys. 2.

Drugą charakterystyczną wielkością przedłużenia w obszar sztywny siatki linii poślizgu jest wymiar s (rys. 2). Wymiar ten ma duże znaczenie praktyczne, zwłaszcza przy analizie nośności granicznej elementów z wieloma korbami. Pozwala ocenić minimalną odległość między korbami, przy której wzajemne oddziaływanie na siebie zanika. Wykres wysokości przedłużenia siatki linii poślizgu w obszar sztywny, określonej przez parametr $\eta = s/h$, w funkcji ostrości karbu $\beta = e/h$, dla przypadku korbów prostokątnych, podano również na rys. 2.

3. DOŚWIADCZALNE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI PRĘTÓW Z KARBAMI W UDAROWYM ROZCIĄGANIU

3.1. Opis przebiegu badań

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z trzech różnych stopów aluminium do obróbki plastycznej PA2 (AlMg2), PA4 (AlMg1Si1Mn) i PA6 (AlCu4Mg1). Kształt karbu oraz wymiary próbek

podano na rysunku 1. Łącznie poddano badaniu 147 próbek osłabionych karbami oraz 6 próbek bez karbu (po dwie dla każdego z materiałów), które poddano statycznej próbie rozciągania. Wszystkie próbki z karbami miały stałą wartość wymiarów $2h$ i $2c$. Szerokość części chwytowej była tak określona, aby w żadnym z rozpatrywanych przypadków nie była mniejsza od wynikającej z przedłużenia linii poślizgu w obszar sztywny (rys. 2).

Udarowe próby rozciągania przeprowadzono na młocie wahadłowym Charpy'ego produkcji VEB Verkstoffprüfmaschinen, Leipzig, NRD.

Próbki mocowano w tylnej części młota, na drugim końcu próbki mocowano poprzeczkę. W najniższym położeniu młota (największa energia kinetyczna) następowało uderzenie poprzeczki w podstawę młota. Pracę zużytą na rozerwanie próbki odczytywano na podziałce młota. Szczegóły metodyki tego rodzaju badań można znaleźć w pracach [17, 18].

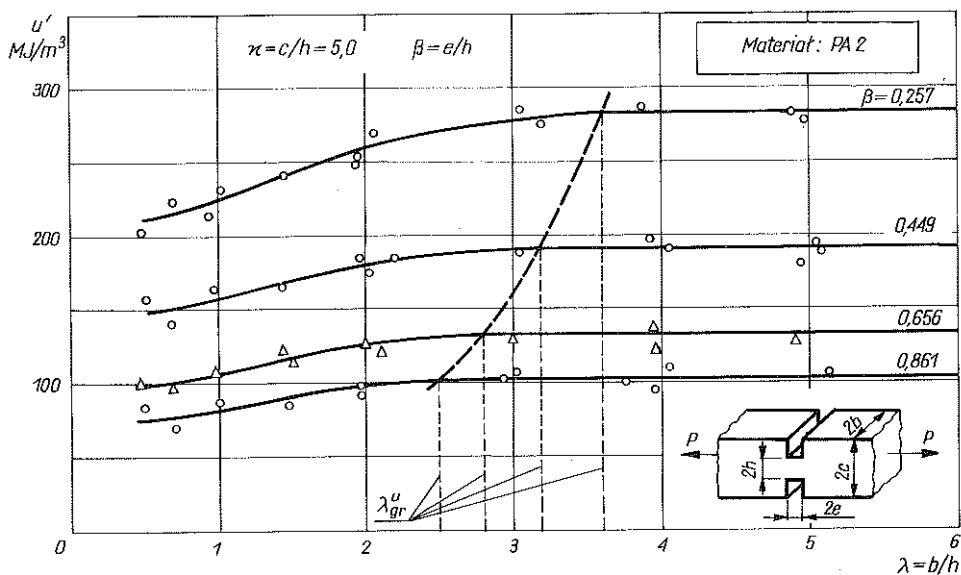
Stacyjne próby rozciągania przeprowadzono na próbkach wykonanych zgodnie z normą PN-80/H-04310 o wymiarach odpowiadających dziesięciokrotnej próbce nr 16 z tablicy 3. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu Instron. Obciążenie uplastyczniające przyjmowano w punkcie, w którym krzywa rozciągania ulegała widocznemu załamaniu i przyrostowi obciążeń towarzyszyły zwiększone odkształcenia plastyczne. Wytrzymałość na rozciąganie σ_m i granicę plastyczności σ_{pl} każdego z badanych materiałów określano na podstawie prób rozciągania dwóch próbek, uśredniając graniczne wartości naprężeń niszczących i uplastyczniających te próbki.

3.2. Wyniki badań próbek ze stopu aluminium PA2

Stop aluminium PA2 jest bardzo podatny do obróbki plastycznej na gorąco i na zimno. Stosowany jest do wyrobu średnio obciążonych elementów konstrukcji lotniczych, okrętowych, budowlanych i pojazdów mechanicznych, a także urządzeń przemysłu chemicznego i spożywczego. Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_m = 241,22\text{MPa}$, granica plastyczności (umowna, wyznaczana metodą stycznej) $\sigma_{pl} = 198,33\text{MPa}$.

Ze względu na powstające miejscowe przewężenie praca zużyta na udarowe zerwanie próbki U' , odniesiona do objętości odkształconego plastycznie materiału, jest zależna od wymiarów próbki w miejscu przewężenia.

Próbki podzielono na cztery grupy różniące się ostrością karbów $\beta = e/h$. Próbki jednej grupy miały więc karby o jednakowej szerokości $2e$ i różniły się jedynie grubością $2b$. Wyniki badań próbek jednej grupy pozwalały określić zmianę jednostkowej pracy udarowego zniszczenia U' w funkcji grubości $\lambda = b/h$. Wykresy tych zmian dla czterech grup próbek przedstawiono na rys. 3. Z przebiegu wykresów



Rys. 3

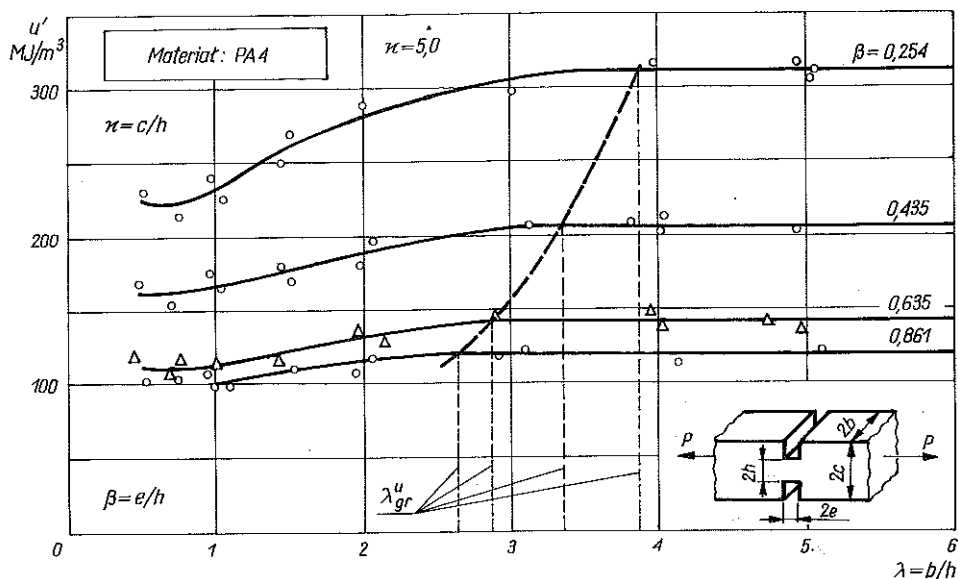
wynika, że wraz ze wzrostem grubości energia zniszczenia próbek rośnie, a następnie stabilizuje się. Wykresy początkowo krzywoliniowe przechodzą w prostoliniowe odcinki poziome fazy ustabilizowanej. Grubości próbek, określone przez parametr $\lambda = b/h$, którym odpowiada przejście w fazę ustabilizowaną przyjęto jako graniczne i oznaczono przez λ_{gr}^u . Można więc przyjąć, że od wartości λ_{gr}^u , przyrost grubości próbek nie ma większego wpływu na wielkość pracy zniszczenia w udarowym rozciąganiu.

Na poszczególnych wykresach (rys. 3), odpowiadających różnym ostrościom karbów, grubości graniczne λ_{gr}^u mają inną wartość. Punkty określające te grubości graniczne połączone zostały linią przerywaną. Godnym podkreślenia jest tu fakt, że najszybciej stabilizuje się wykres odpowiadający karbom łagodnym, o najmniejszej ostrości. W elemen-

tach osłabionych wycięciami bardziej ostrymi, przejście wykresu w fazę ustabilizowaną następuje znacznie później, a więc przy większych ich grubościach. Wynik ten najlepiej obrazuje przebieg wykresów na rys. 6.

3.3. Wyniki badań próbek ze stopu aluminium PA4

Stop aluminium PA4, podobnie jak i PA2, jest materiałem bardzo podatnym do przeróbki plastycznej na gorąco i na zimno. Stosowany jest do wyrobu średnio obciążonych elementów konstrukcji lotniczych i pojazdów mechanicznych, do wyrobu sprzętu sportowego i turystycznego, elementów konstrukcyjnych i dekoracyjnych zmechanizowanego sprzętu domowego, a także do wyrobu mebli, części głęboko tłoczonych oraz części o złożonych kształtach kutych w matrycach. Granica plastyczności $\sigma_{pl} = 204,96\text{MPa}$, wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_m = 347,53\text{MPa}$.

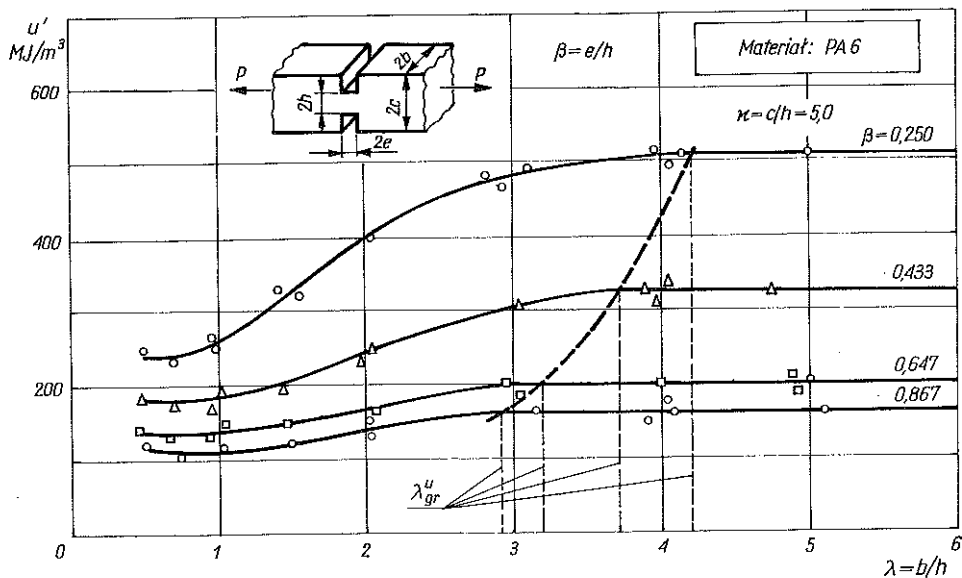


Rys. 4

W porównaniu z PA2, stop PA4 ma wyższą wytrzymałość. Wyniki badań przedstawiono na rys. 4. Na każdym z wykresów,

odpowiadających określonej ostrości karbów, wyznaczono graniczne wartości grubości λ_{gr}^u , które odpowiadają początkowi fazy ustabilizowanego przebiegu krzywych. Wartości λ_{gr}^u przeniesiono następnie na rys. 6, uzyskując zależność λ_{gr}^u w funkcji ostrości karbu $\beta = e/h$. Otrzymane dla PA4 wartości granicznych grubości są wyższe, choć niewiele, od analogicznych wartości dla PA2 w całym zakresie ostrości karbów.

3.4. Wyniki badań próbek ze stopu aluminium PA6



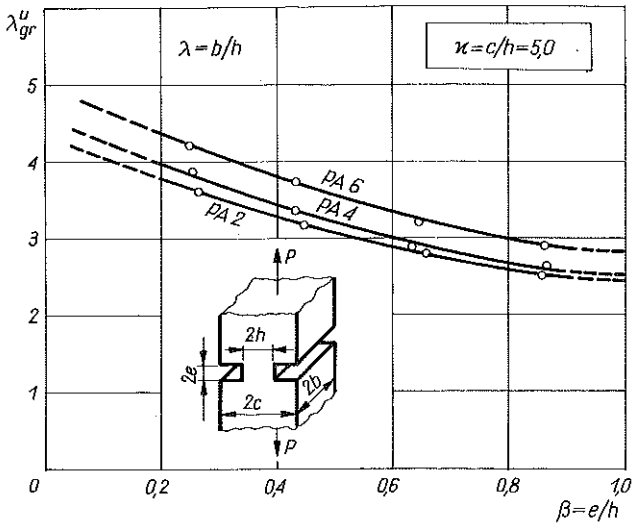
Rys. 5

Stop PA6, w odróżnieniu od dwóch poprzednio omówionych materiałów, ma duży opór plastyczny przy przeróbce plastycznej na gorąco i na zimno. Dlatego też, stosowany jest do wyrobu obciążonych elementów konstrukcji lotniczych i pojazdów mechanicznych, elementów maszyn i środków transportu oraz do wyrobu konstrukcyjnych elementów budowlanych. Stop ten ma wysoką wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_m = 485,90\text{MPa}$ oraz granicę plastyczności o wartości $\sigma_{pl} = 317,23\text{MPa}$.

Wyniki badań energii zniszczenia w warunkach udarowego rozciągania przedstawiono na rys. 5. Jednostkowa praca zniszczenia

jest tu znacznie wyższa niż w przypadku dwóch poprzednich materiałów. Wyższe są też wartości granicznych grubości λ_{gr}^u , przy których wykresy przechodzą w fazę ustabilizowanego przebiegu, co widać na rys. 6.

3.5. Podsumowanie wyników badań



Rys. 6

Na rys. 6 przedstawiono wykresy parametru λ_{gr}^u , charakteryzującego graniczną grubość elementów, w funkcji ostrości korbów $\beta = e/h$ dla trzech badanych materiałów w warunkach udarowego rozciągania. Z przebiegu krzywych wynika, że w elementach z korbami ostrymi przejście wykresów w fazę ustabilizowaną zachodzi przy większych grubościach niż ma to miejsce w prętach z korbami łagodnymi, o większej szerokości $2e$.

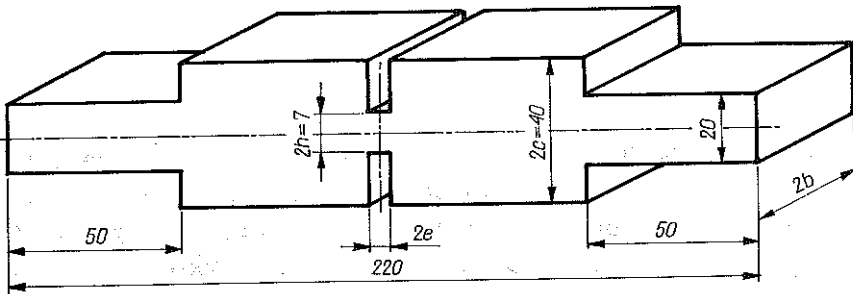
Dla trzech badanych materiałów charakter zależności granicznych grubości elementów λ_{gr}^u w funkcji ostrości korbów β jest podobny, z tym zastrzeżeniem, że w elementach wykonanych z materiału o większym oporze do odkształceń plastycznych grubości te są większe niż w przypadku elementów wykonanych z materiału o niższej granicy plastyczności. Zależność tę można zapisać w postaci nierówności: $\lambda_{gr}^u(\text{PA6}) > \lambda_{gr}^u(\text{PA4}) > \lambda_{gr}^u(\text{PA2})$.

4. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PŁASKICH ELEMENTÓW Z KARBAMI PROSTOKĄTNYMI

W pracy [10] przedstawiono część wyników obszernych badań doświadczalnych dotyczących wpływu grubości na nośność graniczną i stan odkształcenia płaskich elementów z karbami prostokątnymi o różnej ostrości przy obciążeniach quasi-statycznych. Opublikowany fragment obejmuje analizę tego zagadnienia na podstawie granicznych obciążeń uplastyczniających. W doświadczeniach tych rejestrowano także wytrzymałość na rozciąganie elementów z karbami, co pozwala na przeprowadzenie analizy wpływu grubości na wielkość obciążeń maksymalnych.

4.1. Przebieg doświadczenia

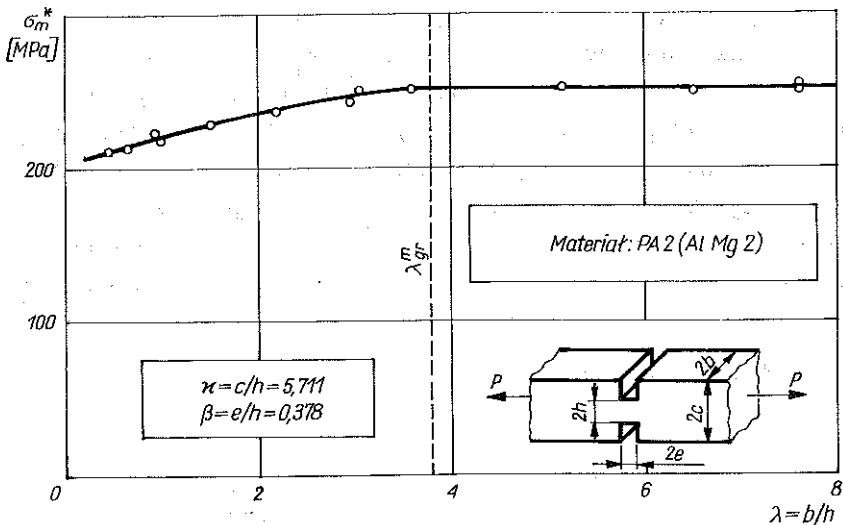
| | |
|---------------|----------------|
| Materiał | PA 2 (Al Mg 2) |
| Liczba próbek | 65 |



Rys. 7

Próbki, których kształt i wymiary podano na rys. 7, wykonane zostały ze stopu aluminium PA2. Mają one stałą wartość $2h$ i $2c$, przy czym szerokość części chwytowych $2c$ została tak określona, aby w żadnym z rozpatrywanych przypadków nie była mniejsza od wynikającej z przedłużenia linii poślizgu w obszar sztywny (rys. 2). Szerokość końców próbek celowo zmniejszono, aby zwiększyć osiowość obciążania. Próbki podzielono na pięć grup, z których każda miała inną szerokość korbów $2e$. Różniły się więc te grupy próbek ostrością naciętych na nich korbów, określoną przez parametr $\beta = e/h$. Wartości pięciu parametrów β , charakterystycznych dla każdej grupy, podano na rys. 9.

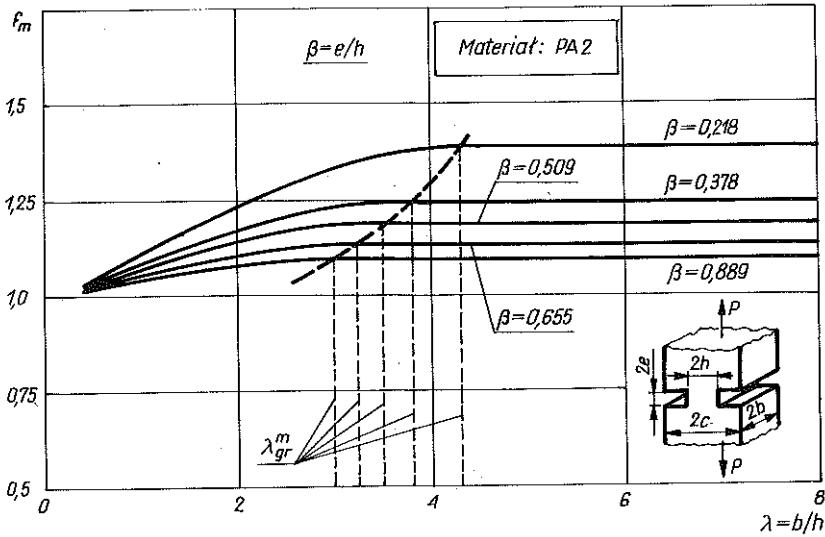
4.2. Wyniki badań



Rys. 8

Na rys. 8 podano przykładowo wykres zależności maksymalnych naprężeń rozciągających w funkcji $\lambda = b/h$ dla jednej z badanych grup próbek, dla której $\beta = e/h = 0,378$. Linia przerywaną zaznaczono graniczną wartość grubości λ_{gr}^m , od której wykres maksymalnych naprężeń, określających wytrzymałość na rozciąganie, przechodzi w fazę ustabilizowaną. Kółkami oznaczono wartości maksymalnych naprężeń rozciągających poszczególnych próbek.

Pełny zestaw zależności maksymalnych naprężeń rozciągających w funkcji grubości próbek pokazano na rys. 9. Zależności te przedstawiono w postaci wykresów współczynnika zwiększenia maksymalnych naprężeń rozciągających pręty z karami w stosunku do maksymalnych naprężeń rozciągających pręt bez karbu. Współczynnik ten można napisać w postaci $f_m = \sigma_m^*/\sigma_m$. Z przedstawionych na rys. 9 wykresów wynika, że najszybciej stabilizuje się wykres odpowiadający karbom łagodnym, czyli o największej szerokości $2e$. W elementach osłabionych wycięciami ostrymi, stan graniczny pojawia się później, a więc dla większych grubości.

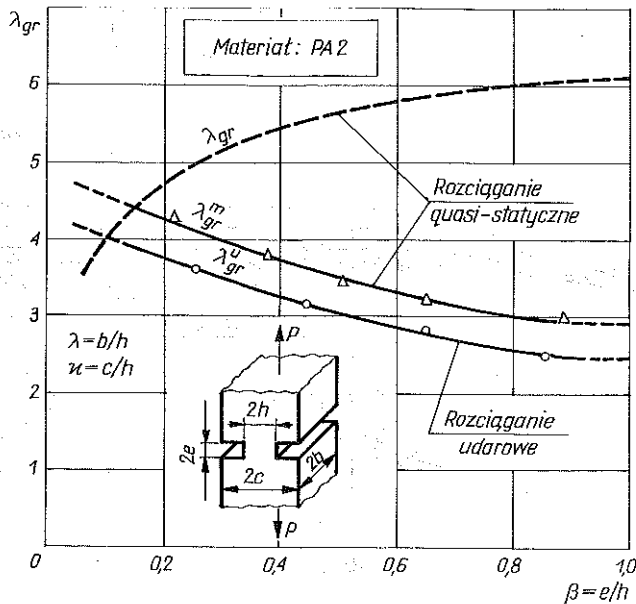


Rys. 9

5. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ROZCIĄGANYCH ELEMENTÓW Z KARBAMI PROSTOKĄTNYMI PRZY UDAROWYM I QUASI-STATYCZNYM OBCIĄŻANIU

Na rys. 10 pokazano trzy wykresy obrazujące zależności granicznych grubości: λ_{gr} , λ_{gr}^m i λ_{gr}^u , w funkcji ostrości korbów $\beta = e/h$ dla próbek wykonanych ze stopu aluminium PA2. Dwie z tych zależności, a mianowicie λ_{gr} i λ_{gr}^m , otrzymano z prób jednoosiowego rozciągania badanych elementów obciążeniami quasi-statycznymi, natomiast trzecią zależność, λ_{gr}^u , uzyskano z analogicznych badań przeprowadzonych w warunkach udarowego rozciągania.

Przed dalszą analizą powyższych wykresów należy wyjaśnić, że krzywą λ_{gr} określono na podstawie obciążeń uplastyczniających materiał w przewężonych częściach badanych elementów, natomiast krzywą λ_{gr}^m wyznaczono na podstawie wytrzymałości na rozciąganie tych elementów. Krzywa λ_{gr} jest więc zbiorem punktów określających graniczne wartości grubości $\lambda = b/h$, od których poczynając, zależności obciążeń uplastyczniających w funkcji grubości przechodzą w prostoliniową fazę ustabilizowaną. Te graniczne wartości grubości λ_{gr} przyjęto praktycznie uważać za początek realizowania się w elementach z korbami płaskiego stanu odkształcenia [10].



Rys. 10

Przechodząc do analizy przedstawionych wykresów można stwierdzić, że przebieg zależności λ_{gr}^m i λ_{gr}^u , choć uzyskanych z różnych niezależnie przeprowadzonych badań doświadczalnych, jest do siebie podobny, ale odmienny w swym charakterze od przebiegu krzywej λ_{gr} . Oznacza to, że w przypadku obciążeń niszczących, wykresy zmian grubości granicznych mają przebieg zgodny zarówno przy quasi-statycznym jak i udarowym rozciąganiu, ale różnią się od krzywej λ_{gr} , określonej dla obciążeń uplastyczniających elementy w osłabionym przekroju. Oznacza to więc, że przebieg wykresów λ_{gr}^m i λ_{gr}^u jest uwarunkowany innymi czynnikami niż te, które występują w przypadku zależności λ_{gr} i są związane z płaskim stanem odkształcenia. Z analizy wykresów wynika też, że graniczne grubości λ_{gr}^m , dla obciążeń niszczących przy quasi-statycznym rozciąganiu, są około 16% większe od granicznych grubości λ_{gr}^u dla obciążeń udarowych. Wynika stąd, że przyjęcie w elementach z karami granicznych grubości λ_{gr}^m , wynikających z wytrzymałości na rozciąganie, zapewnia jednocześnie uzyskanie optymalnych własności wytrzymałościowych w udarowym rozciąganiu. Fakt ten może mieć istotne znaczenie praktyczne.

6. WNIOSKI

Graniczne grubości λ_{gr}^u , przy których energia zniszczenia elementów w warunkach udarowego rozciągania osiąga wartość optymalną, zależne są od ostrości karbu i rodzaju materiału.

W elementach z karami ostrymi, graniczne grubości λ_{gr}^u są większe od analogicznych grubości w elementach z karami łagodnymi, o większej szerokości $2e$.

Graniczne grubości λ_{gr}^u w elementach wykonanych z materiału o dużym oporze do odkształceń plastycznych są większe niż w przypadku elementów wykonanych o niższej granicy plastyczności.

Uwzględniając ostrość karbu prostokątnego i rodzaj badanego stopu aluminium (PA2, PA4, PA6), graniczne wartości grubości mogą być od 2,5 do 5. razy większe od szerokości elementu w miejscu osłabionym.

W przypadku obciążeń niszczących, zależności granicznych grubości (λ_{gr}^m i λ_{gr}^u) mają zgodny przebieg zarówno przy quasi-statycznym jak i udarowym rozciąganiu. Jednakże, zależności te mają odmienny charakter od wykresu zmian granicznych grubości λ_{gr} , określonych dla obciążeń uplastyczniających element w osłabionym przekroju przy quasi-statycznym rozciąganiu.

Graniczne grubości λ_{gr}^m , określone dla quasi-statycznych obciążeń niszczących przy rozciąganiu, mają dla danego materiału większe wartości niż analogiczne grubości λ_{gr}^u , określone w warunkach udarowego rozciągania.

Wartości granicznych grubości λ_{gr}^m , określone dla obciążeń niszczących przy quasi-statycznym rozciąganiu, mogą być przyjmowane jako optymalne również w przypadku udarowego rozciągania.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. L.DIETRICH, J.MIASTKOWSKI, W.SZCZEPIŃSKI, *Nośność graniczna elementów konstrukcji*, PWN, Warszawa 1970.
2. W.SZCZEPIŃSKI, J.MIASTKOWSKI, *Doświadczalna analiza nośności granicznej rozciąganych płaskich prętów z karami*, Rozpr. Inżyn., 13, 3, 637-652, 1965.
3. W.N.FINDLEY, D.C.DRUCKER, *An experimental study of plane plastic straining of notched bars*, J.Appl.Mech., 32, 493-503, 1965.

4. W. SZCZEPIŃSKI, *Przegląd prac dotyczących nośności granicznej rozciąganych prętów z karcem*, Mech. Teoret. Stos., **3**, 3, 51-78, 1965.
5. И.С.Жуковский, *О коэффициенте усиления и характере распространения пластических зон в надрезанных стержнях*, Изв. АН СССР, ОТН, **5**, 116-119, 1958.
6. И.С.Жуковский, *Распределение деформаций и напряжений в плоских надрезанных стержнях в связи с объемностью и напряженного состояния, Проблемы прочности в машиностроении, Вып.2, Изд. АН СССР, Москва 1959.*
7. И.С.Жуковский, *Деформированное состояние и прочность плоских надрезанных стержней произвольной толщины, Расчеты на прочность, сборник статей, вып. 9, Машгиз., 231-252, Москва 1963.*
8. J. MIASTKOWSKI, *Nośność graniczna rozciąganych prętów z karami kątowymi o dowolnych wymiarach części nad karami*, Mech. Teoret. Stos., **7**, 1, 81-98, 1969.
9. J. MIASTKOWSKI, *Analiza nośności granicznej płaskich elementów o dowolnej grubości osłabionych okrągłymi karami o różnej ostrości*, Rozpr. Inżyn., **32**, 2, 255-266, 1984.
10. J. MIASTKOWSKI, *Wpływ grubości na nośność graniczną i stan odkształcenia płaskich elementów z karami prostokątnymi o różnej ostrości*, Mech. Teoret. Stos., **23**, 1, 71-79, 1985.
11. L. DIETRICH, J. MIASTKOWSKI, *Doświadczalne badanie nośności granicznej połączeń sworzniowych*, Arch. Budowy Maszyn, **18**, 4, 555-574, 1971.
12. J. MIASTKOWSKI, H. SKROCKI, *Analiza nośności granicznej osiowo-symetrycznych elementów z karami kątowymi w udarowym rozciąganiu*, Rozpr. Inżyn., **31**, 4, 473-480, 1983.
13. L. DIETRICH, J. MIASTKOWSKI, R. SZCZEBIOT, *Nośność graniczna osiowo-symetrycznych prętów z szeregiem karbów kołowych*, Rozpr. Inżyn., **36**, 2, 1988.
14. L. DIETRICH, *Ocena przydatności metod teorii plastyczności do projektowania elementów maszyn na podstawie badań zmęczeniowych połączeń sworzniowych*, Prace IPPT PAN, **38**, 1976.
15. L. DIETRICH, *Badania zmęczeniowe pasma z otworami*, Prace IPPT PAN, **54**, 1976.
16. R. HILL, *The plastic yielding of notched bars under tension*, Quart. J. Mech. Appl. Math., **2**, 40, 1949.
17. S. KATARZYŃSKI, S. KOCANĀDA, M. ZAKRZEWSKI, *Badanie własności mechanicznych metali*, PWT, Warszawa 1961.
18. L. A. DOBRZAŃSKI, R. NOWOSIELSKI, *Metody badań metali i stopów. Badania własności fizycznych*, WNT, Warszawa 1987.