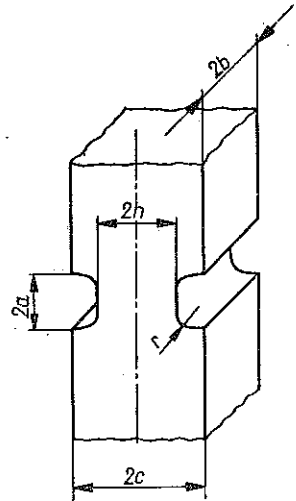


DOŚWIADCZALNA ANALIZA NOŚNOŚCI GRANICZNEJ ROZCIĄGANYCH PŁASKICH PRĘTÓW Z KARBEM

W. SZCZEPIŃSKI i J. MIASTKOWSKI (WARSZAWA)

Teoria stanu naprężenia i odkształcenia w płaskim pręcie osłabionym obustronnymi symetrycznymi wycięciami i poddanym rozciąganiu jest oparta na schemacie ciała sztywno-plastycznego lub sprężysto-plastycznego bez wzmocnienia. Rozwiązania dotyczą dwóch skrajnych przypadków, mianowicie płaskiego stanu odkształcenia, gdy szerokość pręta $2b$ (rys. 1) jest bardzo duża w porównaniu z pozostałymi wymiarami w miejscu karbu, oraz płaskiego stanu naprężenia występującego przy bardzo małej szerokości $2b$. D. ALLEN i R. SOUTHWELL [1] zbadali proces tworzenia się obszarów plastycznych dla karbu w postaci półkola oraz karbu ostrego o kącie 90° zarówno dla płaskiego stanu odkształcenia jak i płaskiego stanu naprężenia. Obliczenia wykonane zostały metodą relaksacji dla materiału sprężysto-plastycznego. W przypadku płaskiego stanu odkształcenia stwierdzono, że obszary plastyczne poczynają się tworzyć od dna karbu, ale w dalszej fazie procesu nie spotykają się ze sobą w najwęższym miejscu pręta. Połączenie to następuje na osi pręta w dość znacznej odległości powyżej i poniżej najmniejszego przekroju. Powstaje więc sprężyste jądro całkowicie otoczone materiałem, który przeszedł w stan plastyczny. Pojawienie się takiego jądra otrzymał również J. A. JACOBS [2] dla karbu szczelinowego. Wyniki analogicznych obliczeń dla płaskiego stanu naprężenia [1] nie wykazują tworzenia się takiego sprężystego jądra.

W rozwiązaniu R. HILLA [3,4] zakłada się, że uplastycznienie następuje w najwęższym miejscu. Z obu stron rozpoczyna się budowę siatki linii poślizgu aż do spotkania skrajnych linii na osi najmniejszego przekroju. Na podstawie takiego schematu tworzenia się obszaru plastycznego został szczegółowo zanalizowany proces odkształcania dla prętów z różnymi karbami przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia. W pracach E. H. LEE [5, 7] oraz E. H. LEE i A. J. WANGA [8] zbadano karby z ostrymi załamaniem. A. J. WANG [6] podał rozwiązanie dla pręta z wycięciami półkolistymi. Wszystkie wymienione rozwiązania uzyskano przy założeniu,



Rys. 1

że występuje nieciągłość prędkości wzdłuż skrajnych linii poślizgu, przecinających się na osi pręta w największym przekroju. Nieciągłe są składowe prędkości styczne do tych linii. Jednakże znany fakt niejednoznaczności rozwiązania dla prędkości w teorii ciała idealnie plastycznego powoduje, że możliwe jest przyjęcie nieciągłości wzdłuż innych linii poślizgu, a również zbudowanie pola prędkości bez nieciągłości pomiędzy obszarem sztywnym i plastycznym [9]. Tego rodzaju ciągłego pola prędkości należy oczekiwać w rzeczywistym materiale wzmocnionym, gdyż nawet niewielki poślizg wzdłuż dowolnej linii powoduje lokalne wzmocnienie; następne poślizgi odbywają się w słabszych sąsiednich częściach. Zjawisko to można zaobserwować na trawionych przekrojach prętów z karbem otrzymanych przez B. B. HUNDY'EGO [10].

O możliwości procesu odkształcania bez tworzenia się sprężystego jądra według schematu R. HILLA decyduje szerokość $2c$ części chwytowej pręta (rys. 1). Ocene wymiaru $2c$ otrzymuje się przez przedłużenie siatki linii poślizgu w największym przekroju na pozostały obszar pręta. Jak wykazał J. F. W. BISHOP [11] przedłużenie takie jest zawsze możliwe. Tak zbudowane pole naprężeń w sztywnej części pręta jest statycznie dopuszczalne. Jeżeli zewnętrzne linie tego pola znajdują się wewnątrz rzeczywistego konturu części chwytowej pręta, to jej nośność graniczna nie będzie mniejsza od nośności miejsca osłabionego karbem. Jeżeli wymiar $2c$ jest zbyt mały, to schemat R. HILLA nie może zostać zrealizowany, gdyż plastyczne płynięcie może wystąpić w materiale w sąsiedztwie karbu, a w największym przekroju pozostanie sprężyste jądro. W takim przypadku schemat Hilla może być uznany jedynie za kinematycznie dopuszczalny, a więc dający górną ocenę nośności granicznej pręta z karbem. Dolną ocenę tej nośności można otrzymać przez zbudowanie nieciągłego statycznie dopuszczalnego pola naprężeń w sposób pokazany dla płaskiego stanu odkształcenia przez P. G. HODGE'A i W. PRAGERA [12], a dla płaskiego stanu naprężenia przez H. FORDA i G. LIANISA [13].

Doświadczalne określenie miejsc, w których obszary plastyczne rozchodzą się, i określenie miejsca, w którym łączą się one na osi pręta, są związane ze znacznymi trudnościami, gdyż obserwacje mogą być dokonywane tylko na czołowych powierzchniach pręta. Z tego względu lepiej zbadany jest przypadek, gdy grubość $2b$ jest mała. Stan naprężenia może być wtedy uważany za zbliżony do płaskiego, w którym warunki w punktach wewnętrznych nie różnią się od warunków na powierzchni. P. S. THEOCARIS [14, 15] przeprowadził badania metodą elastooptyczną, naklejając na wypolerowaną powierzchnię metalowej próbki cienką płytkę z przezroczystego materiału czułego elastooptycznie. W czasie obciążenia metalowej próbki elastooptyczna płytkę spełnia rolę tensometru, gdyż dzięki niskiej wartości modułu Younga cały czas znajduje się w stanie sprężystym, mimo znacznych odkształceń plastycznych próbki metalowej. Obserwując płytkę w świetle spolaryzowanym można w każdej chwili wyznaczyć jej odkształcenia. Odkształcenia te są oczywiście równe odkształceniom metalowej próbki. Analizując te odkształcenia można wyznaczyć granicę między plastycznymi i sprężystymi obszarami w otoczeniu karbu. Otrzymane wyniki dla pręta z półkolistymi wycięciami [14] i wycięciami klinowymi [15] wykazują bardzo dobrą zgodność rzeczywistego położenia granic sprężysto-

plastycznych z granicami wyznaczonymi teoretycznie w pracy [1] dla płaskiego stanu naprężenia.

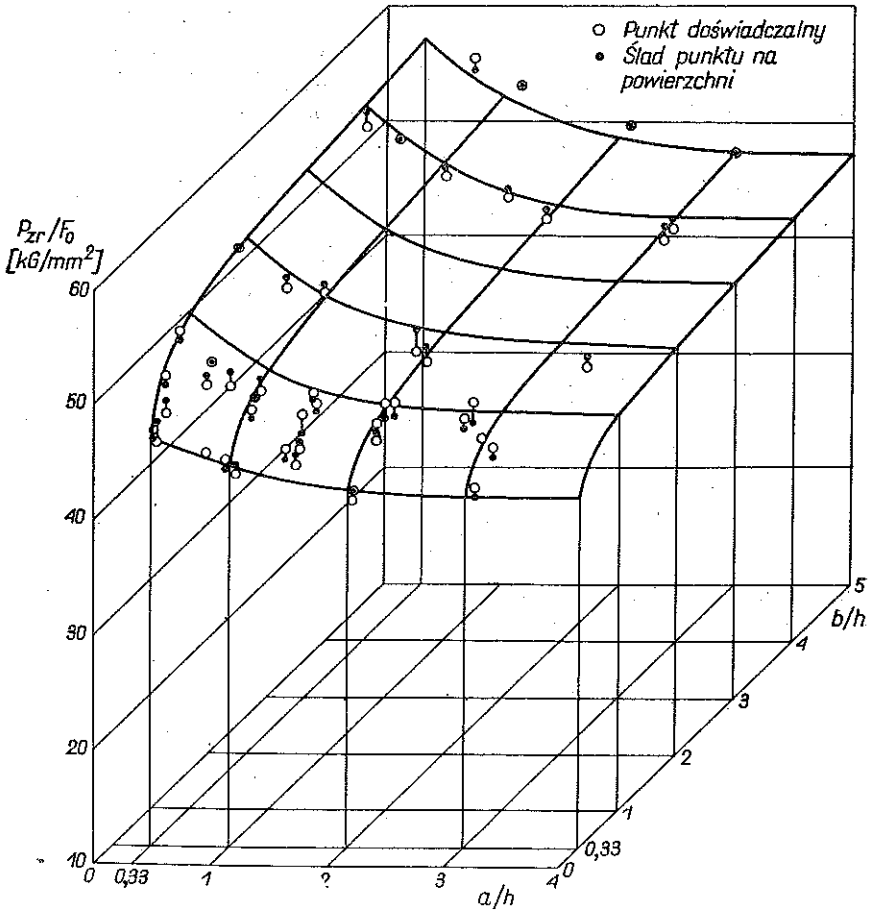
W. ŻUKOWSKI badał w kilku pracach proces odkształcenia w największym przekroju pręta z ostrymi klinowymi wycięciami. Pomiarów dokonywano na czołowych powierzchniach pręta nanosząc na nich szereg punktów. W czasie odkształcenia odczytywano za pomocą mikroskopu zmianę odległości pomiędzy tymi punktami. Dla wycięcia o kącie wierzchołkowym 47° stwierdzono [16], że na linii największego przekroju odkształcenia plastyczne obejmują jedynie mały odcinek przylegający do dna karbu. W części środkowej odkształcenia są sprężyste aż do zniszczenia pręta. W badanym pręcie stosunek szerokości części chwytowej do szerokości w karbie wynosił $c/h = 2,8$, a przedłużenie pola naprężeń [9] daje niezbędną wartość teoretyczną $c/h \approx 6$. Szerokość c była więc zbyt mała, aby materiał w największym przekroju mógł przejść w stan plastyczny. Dla podobnego karbu, ale o kącie wierzchołkowym 102° , pomiary wykazały [17], że sprężyste jądro nie występuje. Dla takiego karbu teoretyczny stosunek szerokości wynosi $c/h \approx 3,2$, a więc tylko nieznacznie więcej niż rzeczywista wielkość $c/h = 2,8$.

W wielu rzeczywistych konstrukcjach wymiar $2b$ pręta nie jest ani na tyle mały, aby powstał płaski stan naprężenia, ani dostatecznie duży, aby wytworzył się płaski stan odkształcenia. Powstał wobec tego ważny problem, kiedy teoretyczne schematy płaskiego stanu naprężenia i płaskiego stanu odkształcenia stanowią mogą dobre przybliżenie rzeczywistych warunków występujących w pręcie. Teoretyczną próbę analizy tego zagadnienia podjął D. C. DRUCKER [18] wykorzystując graniczne twierdzenia teorii plastyczności. Analiza taka, polegająca na doborze odpowiednich pól kinematycznie lub statycznie dopuszczalnych, może dać jedynie niezbyt dokładną ocenę wielkości wymiaru $2b$ niezbędnej dla wywołania stanu zbliżonego do płaskiego stanu odkształcenia. Całkowicie pewne informacje mogą być uzyskane jedynie w sposób doświadczalny.

W. ŻUKOWSKI badał również wpływ grubości $2b$ na nośność pręta z ostrym karbem kątowym. W pracy [17] wykazano, że siła zrywająca odniesiona do jednostki długości w kierunku wymiaru $2b$, ma już praktycznie stałą wartość dla $b/h > 4$. W pracy [19] badano zmianę wielkości siły, przy której zaczynają się duże w porównaniu ze sprężystymi odkształcenia plastyczne, dla różnych stosunków b/h . Również i ta siła na jednostkę długości jest prawie stała dla $b/h > 4$. Dla prętów o bardzo małej grubości $2b$ odczytano, że siła ta jest mniejsza niż dla pręta bez karbu o polu przekroju równym polu przekroju w karbie. Podobny wynik otrzymano w pracy [20]. Jest to w sprzeczności z wynikami teoretycznymi dla płaskiego stanu naprężenia [4], z których wynika, że stosunek siły, przy której przekrój całkowicie przechodzi w stan plastyczny, do siły P_{pl}^0 dla pręta bez karbu nie może być mniejszy od jedności. Stosunek ten będziemy nazywali współczynnikiem zwiększenia nośności granicznej i oznaczali symbolem $\alpha = P_{pl}/P_{pl}^0$. Jego teoretyczna wartość dla płaskiego stanu naprężenia zawiera się w granicach $1 \leq \alpha \leq 1,15$. Mniejszą od jedności wartość tego współczynnika otrzymano w pracach [19 i 20] prawdopodobnie wskutek błędnej oceny początku dużych odkształceń plastycznych na wykresie siła-wydłużenie. Zagadnienie to omówimy bardziej szczegółowo w następnym punkcie.

2. Wpływ długości karbu i grubości próbki

Badaniu podlegało 48 próbek z symetrycznym karbem, wykonanych ze stali St3 (0,2–0,25% C) o granicy plastycznej $Q_r = 24 \text{ kG/mm}^2$, doraźnej wytrzymałości $R_r = 44,4 \text{ kG/mm}^2$ i wydłużeniu $a_5 = 27\%$. Kształt karbu oraz wymiary próbki podano na rys. 1. Stałą wartość miały wymiary $h = 9 \text{ mm}$, $r = 3 \text{ mm}$ i $c = 13 \text{ mm}$. Długość karbu $2a$ oraz grubość pręta $2b$ były różne. Wszystkie próbki były rozciągane na maszynie hydraulicznej, przy czym na większości z nich były mierzone

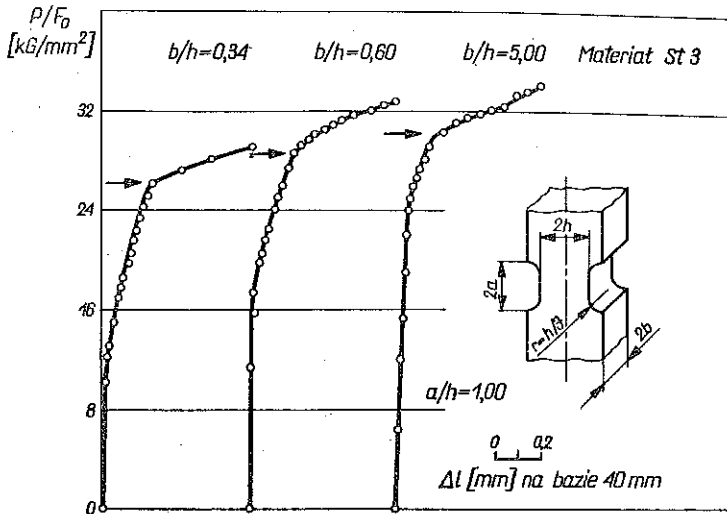


Rys. 2

odkształcenia w początkowej fazie rozciągania za pomocą mechanicznego ekstensometru AMSLERA przy jednakowej bazie 40 mm. Rozciąganie prowadzono aż do zerwania próbki rejestrując siłę zrywającą P_{zr} .

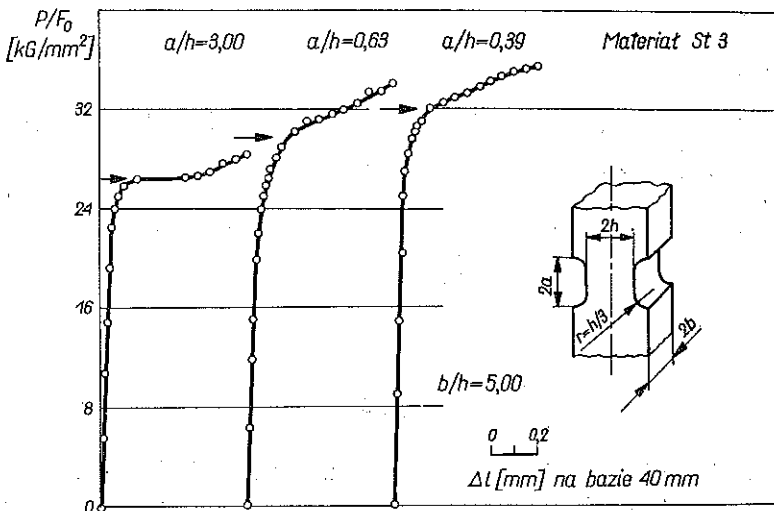
Na rysunku 2 kółkami oznaczono otrzymane dla próbek o różnych wymiarach punkty doświadczalne, odpowiadające umownemu naprężeniu zrywającemu $R_r = P_{zr}/F_0$, gdzie F_0 jest polem początkowego przekroju w największym miejscu karbu. Na podstawie tych punktów zbudowano powierzchnię, na której ciemnymi

punktami zaznaczono ślady odpowiednich punktów doświadczalnych. Pionowe odcinki łączące punkt doświadczalny z jego śladem pokazują wielkość odchylenia



Rys. 3

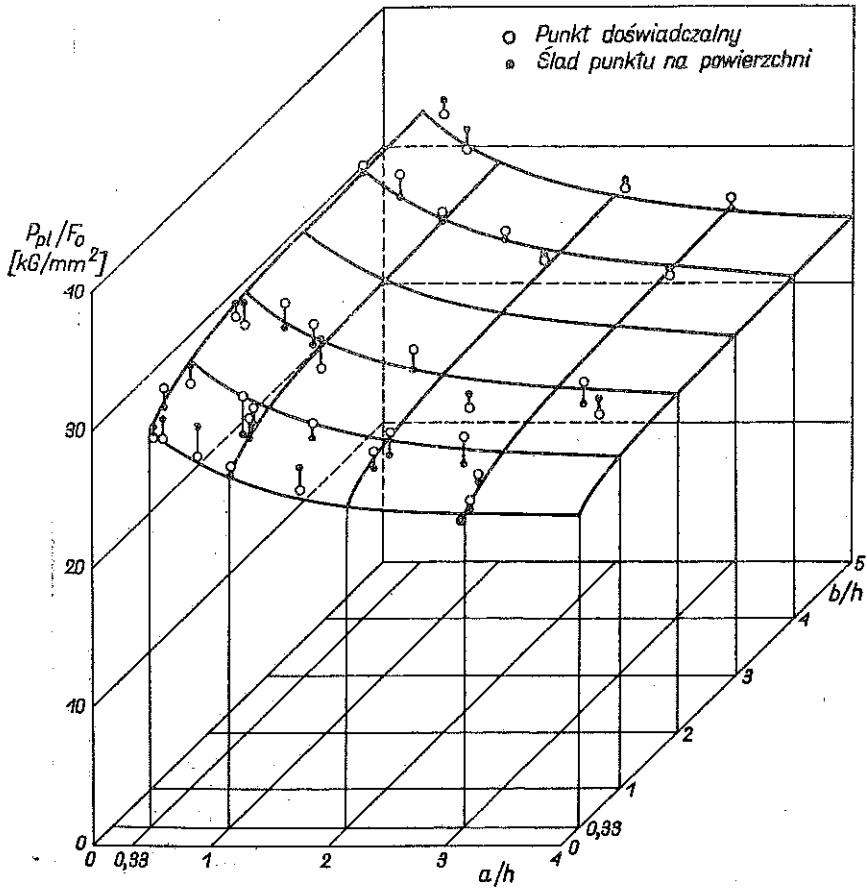
znalezionych punktów od tak zbudowanej powierzchni. Największe odchylenie nie przekracza 4,5%.



Rys. 4

Większe trudności sprawia wyznaczenie analogicznej powierzchni odpowiadającej umownym naprężeniom $\sigma_{pl} = P_{pl}/F_0$, przy których rozpoczynają się duże w porównaniu ze sprężystymi odkształcenia plastyczne w karbie. Teoretycznie naprężenia te odpowiadają chwili, w której następuje zetknięcie na osi pręta po-

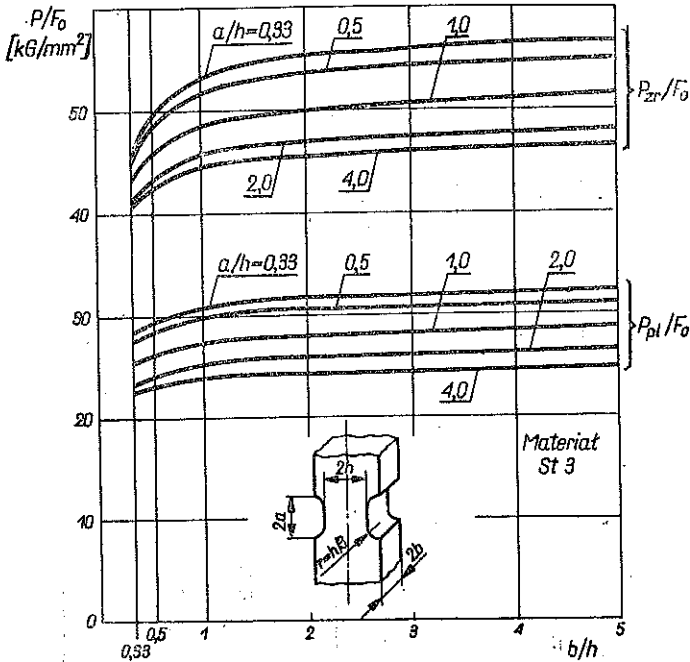
stępujących z obu stron obszarów plastycznych. Dokładne uchwycenie tego momentu na wykresach rozciągania jest utrudnione przez zjawisko wzmocnienia materiału, wywołujące złagodzenie ostrych załamania wykresu. Na rysunku 3 pokazano początkowe odcinki wykresów rozciągania trzech próbek o stałym stosunku $a/h = 1,00$ i różnym stosunku b/h . Początkowy prostoliniowy odcinek odpowiada całkowicie sprężystemu stanowi naprężeń w przekroju. Następny łagodnie zakrzywiony odcinek reprezentuje stopniowe rozwijanie się obszarów plastycznych.



Rys. 5

Jednakże wydłużenie pręta jest małe, co wskazuje na istnienie sprężystego rdzenia w największym przekroju. Pełnemu uplastycznieniu tego przekroju odpowiada punkt zaznaczony na wykresie strzałką, od którego rozpoczyna się silny wzrost odkształceń pręta. Zwraca uwagę fakt, że dla cienkich próbek, w których panuje stan zbliżony do płaskiego stanu naprężenia, zakrzywiona część wykresu rozpoczyna się znacznie wcześniej niż dla próbek grubych. Na właściwą ocenę momentu osiągnięcia całkowicie plastycznego stanu w przekroju pozwala dopiero zdjęcie dalszej części wykresu, aż do otrzymania znacznych odkształceń plastycznych. Na rysunku 4

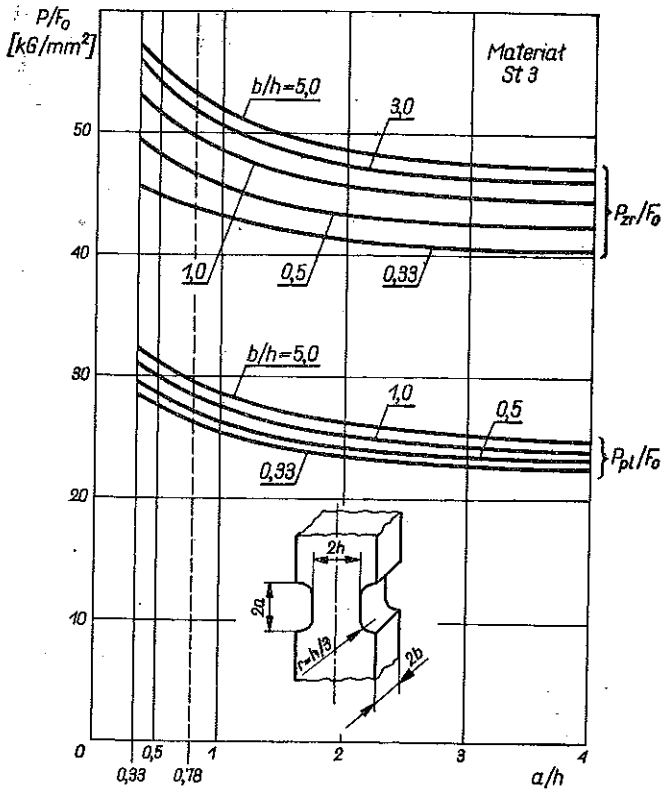
pokazano trzy wykresy dla próbek o stałym stosunku $b/h = 5,00$ i o różnych stosunkach a/h . Również i na tych wykresach strzałkami zaznaczono naprężenia, przy których zaczynają się duże odkształcenia plastyczne. Otrzymane w taki sposób punkty doświadczalne oznaczono kółkami na wykresie przestrzennym (rys. 5). Podobnie jak i dla naprężeń zrywających zbudowano powierzchnię, na której ciemnymi punktami naniesiono ślady punktów doświadczalnych. Największe z odchyżeń przedstawionych przez odcinki łączące punkt doświadczalny z jego śladem na powierzchni nie przekracza 10%.



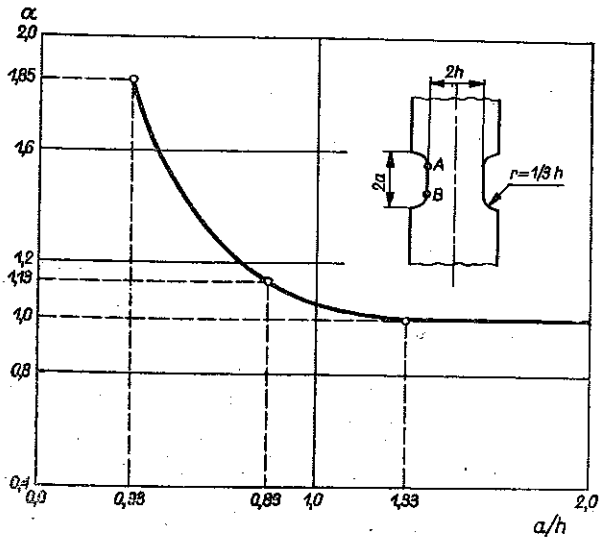
Rys. 6

Na rysunku 6 przedstawiono krzywe otrzymane przez przecięcie powierzchni przedstawionych na rys. 2 i 5 płaszczyznami $a/h = \text{const}$. Zarówno umowne naprężenie odpowiadające początkowi dużych odkształceń, jak i umowne naprężenie, przy którym następuje zerwanie, nie wykazują wyraźnego wzrostu już dla $b/h > 2$. W. ŻUKOWSKI [17, 19] dla ostrego karbu kąтового otrzymał, że ustalenie wielkości naprężenia umownego następuje dla $b/h = 4$, a więc znacznie większego niż dla badanego tu karbu z zaokrągleniami. Różnica ta wskazuje, że kształt karbu ma wpływ na wielkość stosunku b/h , przy której stan odkształcenia w próbce jest zbliżony do płaskiego.

Krzywe, otrzymane przez przecięcie powierzchni płaszczyznami $b/h = \text{const}$, pokazuje rys. 7. Z teoretycznego rozwiązania R. HILLA [3] dla ciała idealnie plastycznego w przypadku płaskiego stanu odkształcenia wynika, że siła graniczna P_{pl} dla pręta z karbem będzie równa sile granicznej P_{pl}^0 pręta bez karbu o takim samym

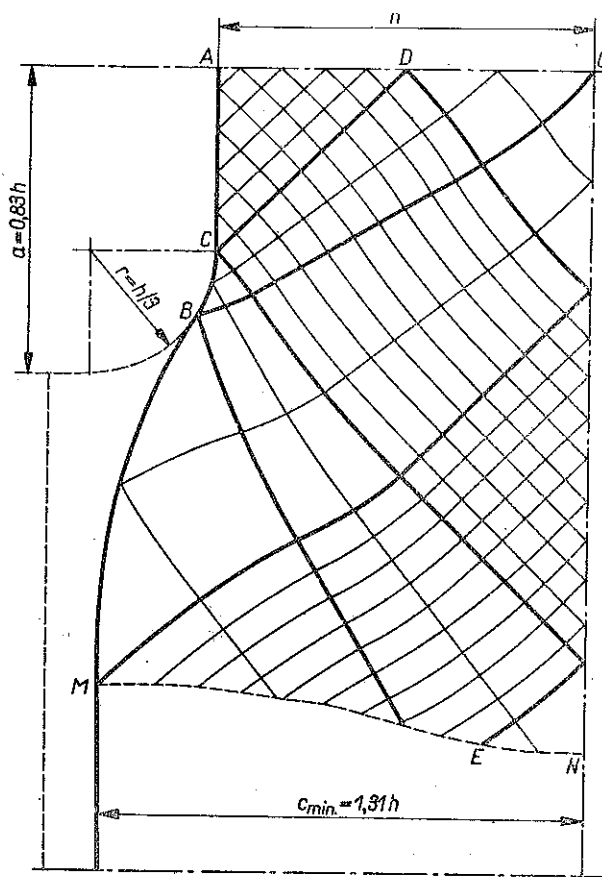


Rys. 7



Rys. 8

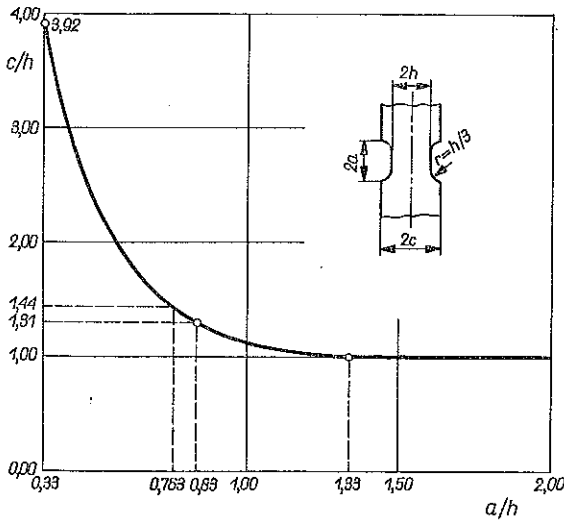
przekroju wtedy, gdy prostoliniowy odcinek AB dna karbu będzie równy $2h$. Siatka linii poślizgu składa się z dwóch rodzin prostych. Skrajne linie poślizgu poprowadzone z punktów A i B przecinają się na osi pręta. Przy dalszym zwiększaniu długości odcinka AB siła graniczna nie zwiększa się. Współczynnik zwiększenia nośności $\alpha = P_{pl}/P_{pl}^0$ równa się jedności dla $2(a - r) \geq 2h$ albo po uwzględnieniu, że $r = a/3$, dla $a/h \geq 1,33$. Dla $a/h < 1,33$ współczynnik $\alpha > 1$, a jego wartość może być dla każdego a/h wyznaczona przez zbudowanie siatki linii poślizgu w najwęższym przekroju



Rys. 9

i numeryczne obliczenie naprężeń. Tak wyznaczoną zależność α od stosunku a/h podano na rys. 8. Porównanie tej krzywej teoretycznej z wynikami doświadczalnymi pokazanymi na rys. 7 wykazuje znaczne rozbieżności. Najbardziej zbliżone do płaskiego stanu odkształcenia krzywe dla $b/h = 5$ wykazują dla $a/h > 1,33$ znaczny ciągły spadek aż do $a/h \approx 3$. Dotyczy to zarówno krzywej dla naprężeń zrywających jak i krzywej przejścia w stan plastyczny. Z krzywej P_{pl}/F_0 dla $b/h = 5$ wynika, że stosunek naprężeń umownych przejścia w stan plastyczny wynosi $\alpha_{rzecz} \approx 1,3$ dla skrajnych wielkości $a/h = 0,33$ i $a/h = 4$, a więc znacznie mniej od teoretycznej

wartości $\alpha_{teor} = 1,85$. Ta rozbieżność tłumaczy się zbyt małą szerokością $2c$ części chwytowych badanych próbek. Teoretyczna wartość koniecznego stosunku c/h dla każdego kształtu karbu może być obliczona w sposób pokazany przez J. F. W. BISHOPA [11] przez przedłużenie siatki linii poślizgu na części chwytowe próbki. Na rysunku 9 pokazano takie przedłużenie dla $a/h = 0,83$. Jeżeli dla tego przypadku część chwytowa pręta będzie miała wymiar nie mniejszy od $c_{min} = 1,31 h$, to nośność graniczna chwytu nie będzie mniejsza od nośności karbu. Linią przerywaną zaznaczono rzeczywiste wymiary części chwytowej. Jak widać zarys teoretyczny mieści się całkowicie wewnątrz rzeczywistego konturu, a więc możliwy jest schemat odkształcenia w karbie określony liniami poślizgu zawartymi w $ACBO$. W taki sam sposób wyznaczono teoretyczną wartość stosunku c/h dla skrajnego

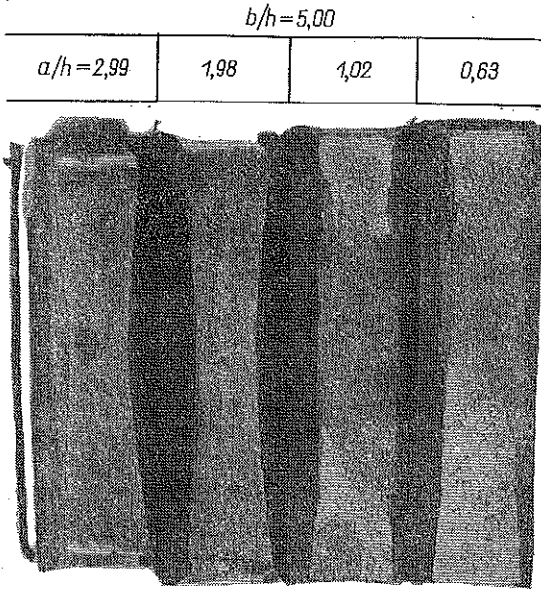


Rys. 10

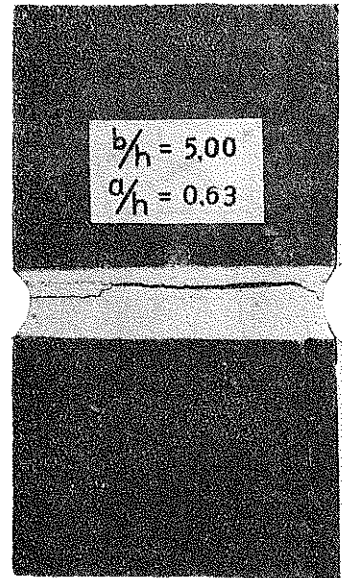
przypadku $a/h = 0,33$. Poprowadzoną przez tak wyznaczone punkty krzywą przedstawiono na rys. 10. Dla każdej wielkości a/h można z niej odczytać niezbędny stosunek c/h szerokości chwytowej do szerokości karbu. Wszystkie badane próbki miały jednakowe wymiary h i c ; ich stosunek równał się $c/h = 1,44$. Wynika stąd, że dla próbek o $a/h > 0,763$ szerokość chwytu $2c$ była dostateczna, a dla próbek o $a/h < 0,763$ była zbyt mała. Przy zbyt małym c wcześniej od mechanizmu odkształcenia Hilla powstanie inny mechanizm odkształcenia plastycznego, obejmujący materiał części chwytowych sąsiadujący z karbem. Dla minimalnego stosunku $a/h = 0,763$, przy którym szerokość $2c$ jest jeszcze wystarczająca, z rys. 8 otrzymujemy $\alpha_{teor} = 1,17$, a z krzywej doświadczalnej P_{pl}/F_0 dla $b/h = 5$ na rys. 7 $\alpha_{pl} = 1,19$. Z krzywej P_{zr}/F_0 dla $b/h = 5$ otrzymujemy $\alpha_{zr} = 1,13$, a więc również bardzo blisko wartości teoretycznej.

Interesująca jest zależność charakteru złomu próbki od stosunku wymiarów a/h . Na rysunku 11 pokazano fotografie złomów kilku próbek o stałym stosunku $b/h = 5$ i zmiennym stosunku a/h . Dla $a/h = 2,99$ i $1,98$ w środkowej części pręta widać

wyraźnie złom rozdzielczy, od którego rozpoczyna się pęknięcie próbki. W dalszym etapie rozdzielenie obu części próbki następuje przez zniszczenie poślizgowe tworzące w rezultacie charakterystyczne miseczkowe uformowanie pękniętego przekroju. Przy $a/h = 1$ i $0,63$ zniszczenie próbki przebiega inaczej. Od podobnej jak



Rys. 11



Rys. 12

w obu poprzednich próbkach jamy w ośrodku próbki, utworzonej przez pęknięcie rozdzielcze, w kierunku obu przekrojów czołowych próbki propaguje się kruche pęknięcie, wyraźnie widoczne jako jasne pola na fotografii. Zniszczenie poślizgowe następuje tylko w środkowej części oddalonej od obu przekrojów czołowych. Na rysunku 12 widoczne jest, że pęknięcie rozpoczyna się w części środkowej i postępuje w kierunku brzegów.

3. Wpływ szerokości części chwytowej pręta

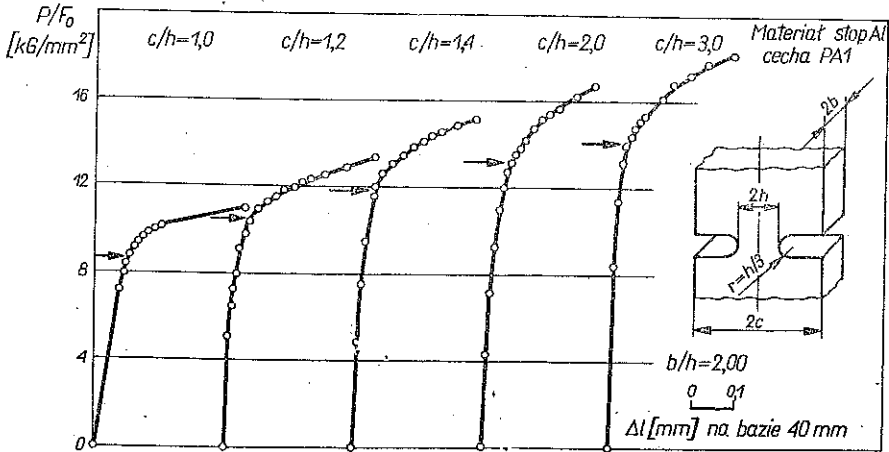
W celu doświadczalnego zbadania wpływu szerokości części chwytowej na nośność graniczną pręta osłabionego karbami wykonano osobną serię ośmiu próbek ze stopu aluminiowego PA1. Próbki te miały jednakowe wymiary przedstawione na tablicy 1, a różniły się jedynie stosunkiem wymiarów c/h poczynając od 1 do 4.

Tablica 1

Wymiar [mm]		$2h$	$2a$	$2b$	$2c$	r
Materiał	St 3	18	zmienny		$1,44h$	$1/3h$
	Stop Al PA1	10	$1,2h$	$2h$	zmienny	$0,6h$

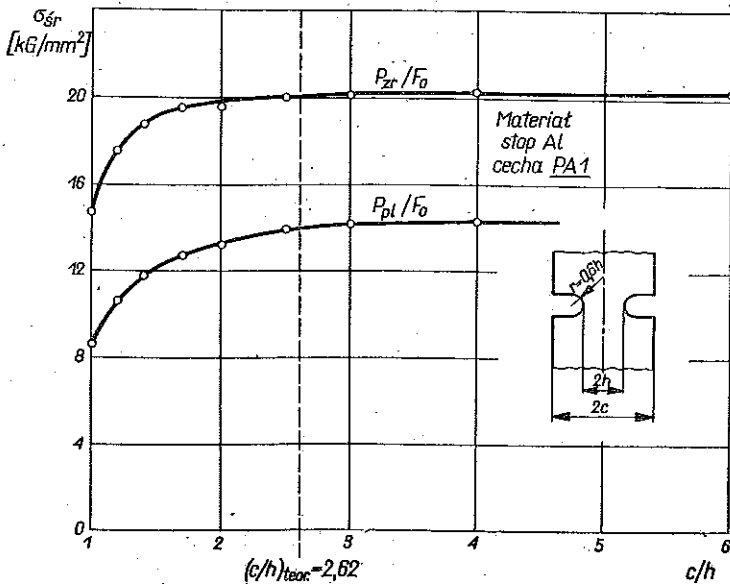
Dla $c/h=1$ mamy próbkę bez karbu. Aby otrzymać stan zbliżony do płaskiego stanu odkształcenia przyjęto zgodnie z poprzednimi wynikami dla próbek stalowych (rys. 6)

wartość stosunku $b/h=2$. Każdą z próbek rozciągano na zrywarce hydraulicznej rejestrując w początkowej fazie odkształcenia za pomocą ekstensometru Amslera na bazie 40 mm. Próbę prowadzono aż do zerwania notując maksymalną siłę.



Rys. 13

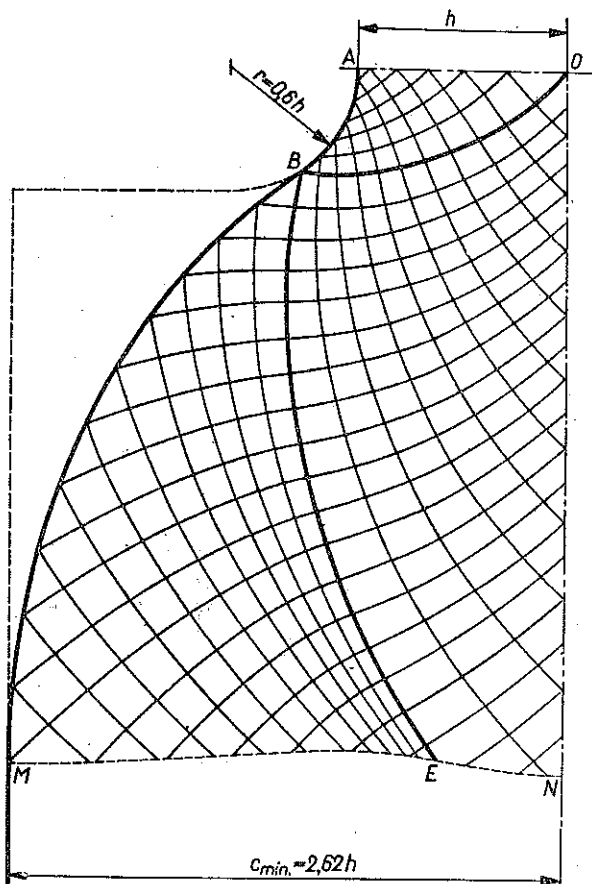
Na rysunku 13 pokazano początkowe odcinki wykresów rozciągania pięciu z badanych próbek. Lewy wykres dla $b/h = 1,0$ odnosi się do próbki bez karbu. W miarę wzrastania szerokości $2c$ krzywe rozciągania przebiegają coraz wyżej.



Rys. 14

Strzałkami zaznaczono miejsca załamania wykresów, które odpowiadają początkowi znacznych odkształceń plastycznych. Dolna krzywa na rys. 14 przedstawia naprężenie umowne P_{pl}/F_0 , odpowiadające punktom załamania wykresów dla

różnych stosunków c/h . Kółkami zaznaczono punkty doświadczalne otrzymane z wykresów rozciągania w sposób pokazany na rys. 13. Górna krzywa na rys. 14 przedstawia umowne naprężenia P_{zr}/F_0 , przy których następuje zerwanie próbki. Pionowa przerywana prosta określa teoretyczny stosunek $c/h = 2,62$, otrzymany przez przedłużenie siatki linii poślizgu na części chwytowe próbki. Kompletną siatkę linii poślizgu pokazano na rys. 15. Jak widać z rys. 14 zarówno krzywa P_{pl}/F_0 jak i P_{zr}/F_0 dla $c/h = 3$ przebiegają poziomo. Teoretyczna ocena niezbędnej szerokości chwytu dobrze odpowiada wynikom uzyskanym doświadczalnie.



Rys. 15

Również dość dobra zgodność występuje między teoretyczną wartością współczynnika nośności, który dla karbu, jaki miały badane próbki ze stopu PA1, równa się $\alpha_{teor} = 1,57$. Z rysunku 14 otrzymujemy z krzywej P_{pl}/F_0 dla momentu przejścia całego przekroju w stan plastyczny $\alpha_{pl} = 1,65$, a z krzywej P_{zr}/F_0 współczynnik dla momentu zerwania $\alpha_{zr} = 1,37$. Obydwa współczynniki obliczono jako stosunek rzędnych dla $c/h > 3$ i $c/h = 1$. Ta ostatnia odpowiada próbce bez karbu.

Teoretyczne rozwiązania [5-8], zakładające idealnie plastyczny materiał, prowadzą do wniosku, że rozdzielenie obu części pręta następuje dopiero wtedy, gdy

szerokość w najwęższym miejscu karbu zmaleje do zera. Dla rzeczywistych materiałów pęknięcie następuje w chwili, gdy początkowa szerokość h zmalała do wielkości h_k . Dla określenia stopnia odkształcenia w zniszczonym przecie stosowany jest [9] współczynnik odkształcenia

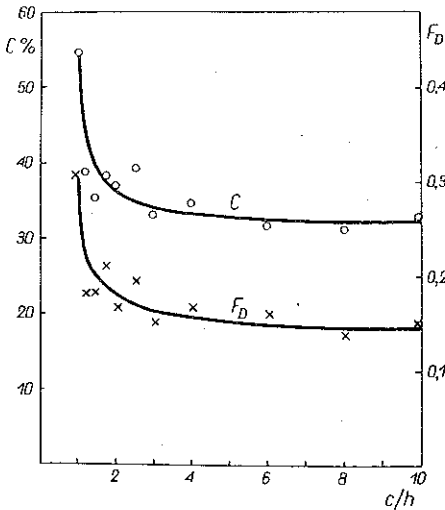
$$F_D = \frac{h - h_k}{h},$$

mogący teoretycznie przyjmować wielkości od 0 dla materiału bardzo kruchego do 1 dla materiału idealnie plastycznego. Na rys. 16 pokazano zależność współczynnika F_D od stosunku c/h . Jednocześnie wyznaczono krzywą dla przewężenia, określonego za pomocą wzoru

$$c = \frac{A_0 - A_k}{A_0} 100\%,$$

gdzie A_0 i A_k oznaczają odpowiednio początkowe i końcowe pole przekroju próbki

w najwęższym miejscu. Obydwie krzywe dla $c/h > 4$ przebiegają prawie równoległe do osi poziomej.



Rys. 16

Literatura cytowana w tekście

1. D. N. DE G. ALLEN and R. SOUTHWELL, *Relaxation methods applied to engineering problems*, XIV Plastic straining in two-dimensional stress-system, Phil. Trans. Roy Soc., Series A, No. 850, 242 (1950), 379-414.
2. J. A. JACOBS, *Relaxation methods applied to problems of plastic flow, I Notched bar under tension*, Phil. Mag., 41 (1950), 349-361.
3. R. HILL, *The plastic yielding of notched bars under tension*, Q.J. Mech. Appl. Math., 2, (1949), 40.
4. R. HILL, *On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin shells*, J. Mech. Phys. Solids, 1 (1952), 19-30.
5. E. H. LEE, *Plastic flow in V-notched bar pulled in tension*, J. Appl. Mech., 19 (1952), 331-336.
6. A. J. WANG, *Plastic flow in a deeply notched bar with semi-circular root*, Q. Appl. Math., 11 (1954), 427-438.
7. E. H. LEE, *Plastic flow in a rectangularly notched bar subjected to tension*, J. Appl. Mech., 21 (1954), 140-146.
8. E. H. LEE, A. J. WANG, *Plastic flow in deeply notched bars with sharp internal angles*, Proc. 2nd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., 1954, 489-497.
9. F. A. MCCLINTOCK, *On notch sensitivity*, Welding J. Research Supplement, May 1961.
10. B. B. HUNDY, *Plane plasticity*, Metallurgia, March 1954, 109-118.
11. J. F. W. BISHOP, *On the complete solution to problems of deformation of a plastic-rigid material*, J. Mech. Phys. Solids, 2 (1953), 43-53.
12. W. PRAGER, P. G. HODGE, *Theory of perfectly plastic solids*, J. Wiley, 1951.

13. H. FORD, G. LIANIS, *Plastic yielding of notched strips under conditions of plane stress*, ZAMP, **8** (1957), 360-382.
14. P. S. THEOCARIS, *Experimental solution of elastic-plastic plane stress problems*, J. Appl. Mech., **19** (1962), 735-743.
15. P. S. THEOCARIS, E. MARKETOS, *Elastic-plastic strain and stress distribution in notched plates under plane stress*, J. Mech. Phys. Solids, **11** (1963), 411-428.
16. В. С. Жуковский, *Распределение деформаций и напряжений в плоских надрезанных стержнях*, АН СССР, Проблемы прочности в машиностроении, Вып. 2, Москва 1954, 54-71.
17. В. С. Жуковский, *Деформированное состояние и прочность плоских надрезанных стержней произвольной толщины*, Расчеты на прочность Вып. 9, Машгиз, Москва 1963, 231-252.
18. D. C. DRUCKER, *On obtaining plane strain or plane stress conditions in plasticity*, Proc. 2nd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., 1954, 485-488.
19. В. С. Жуковский, *О коэффициенте усиления и характере распространения пластических зон в надрезанных стержнях*, Изв. АН СССР, ОТН, Вып. 5, 1958, 116-119.
20. E. SIEBEL, A. HOSANG, *Untersuchung über die plastische Stützwirkung bei gekerbten Stüben*, Z.VDI, **4**, 96 (1954).

Резюме

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЛОСКИХ НАДРЕЗАННЫХ СТЕРЖНЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ РАСТЯЖЕНИЮ

Приводятся результаты экспериментального исследования несущей способности плоских симметрично надрезанных стержней. Первая серия 48 образцов из мягкой стали, была посвящена, главным образом, исследованию влияния ширины образца $2b$ (рис. 1) на величину силы при разрыве и силы при которой начинаются большие пластические деформации. Из экспериментальных кривых (рис. 6) вытекает, что для $b/h > 2$ приращение силы являются очень малым. Таким образом можно принять, что $b/h > 2$ в образцах существует состояние близкое плоскому напряженному состоянию. Для таких образцов получено, однако значительную расходимость коэффициента повышения несущей способности, полученного из решения Хилла для идеально пластичной среды. Это объясняется частично слишком малой шириной $2c$ зажимаемой части образцов (рис. 1). Исследованию влияния ширины $2c$ на несущую способность посвящено отдельную серию образцов, изготовленных из алюминиевого сплава. Эти образцы различались только размером $2c$ и имели отношение $b/h > 2$. Результаты измерений показаны на рис. 14. Верхняя кривая соответствует условным напряжениям при разрыве, а нижняя — пределу пластичности. Вертикальная штрихованная линия соответствует теоретическому значению $c/h = 2,62$, полученному путем продолжения сетки скольжения (рис. 15).

Summary

EXPERIMENTAL LIMIT ANALYSIS OF FLAT NOTCHED BARS
SUBJECTED TO TENSION

The paper presents the results of experimental investigation of the limit load of flat bars subjected to tension and having symmetric notches at opposite edges. The first set, comprising 48 mild steel test-pieces were used chiefly for the investigation of the influence of the width $2b$ of the test piece (Fig. 1) on the magnitude of the rupture force and the force for which large plastic strain begins to occur. From the experimental curves of Fig. 6 it follows that for $b/h > 2$ the increase of the force is very small; we can therefore assume that for $b/h > 2$ the test pieces are in a state approaching the plane state of strain. However, considerable dispersion of the values of the coefficient

of limit load increase, as obtained from Hill's solution for a perfectly plastic body, has been found. This can be explained in part by a too small width $2c$ of the grip of the test pieces. A separate set of aluminium alloy test-pieces was used to investigate the influence of the width $2c$ on the limit load. These test pieces differed only by the dimension $2c$ and had the ratio $b/h = 2$. The measurement results are represented in Fig. 14. The upper curve represents the conventional rupture stress, the lower — the yield limit. The vertical dotted line represents the theoretical value $c/h = 2.62$ obtained by prolonging the net of slip lines (Fig. 15).

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 27 stycznia 1965 r.
