

ANALIZA NOŚNOŚCI GRANICZNEJ OSIOWO-SYMETRYCZNYCH ELEMENTÓW Z KARBAMI KĄTOWYMI W UDAROWYM ROZCIĄGANIU

JÓZEF M I A S T K O W S K I (WARSZAWA) i HENRYK S K R O C K I (BIAŁYSTOK)

W pracy badano własności wytrzymałościowe osiowo-symetrycznych elementów z pojedynczymi i wieloma nacięciami kątowymi na obwodzie poddanych udarowym obciążeniu rozciągającym. Stwierdzono, że teoretycznie określona średnica elementu poza karbem oraz odległość między sąsiednimi nacięciami w elementach osłabionych szeregiem karbów są wielkościami optymalnymi również przy działaniu udarowych obciążeń rozciągających.

1. WPROWADZENIE

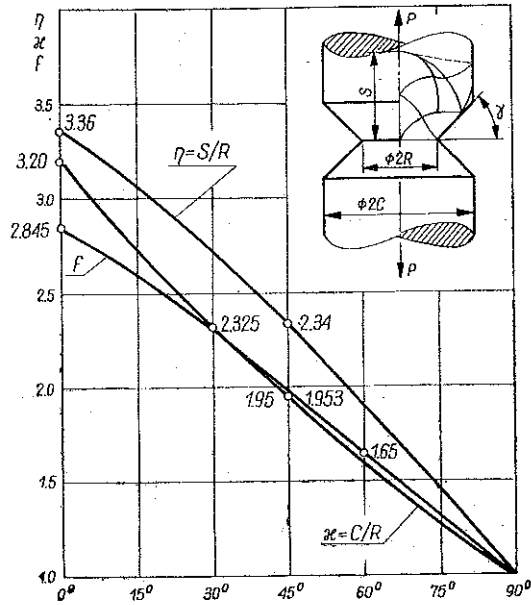
Systematyczny wykład metod wyznaczania lub szacowania nośności granicznej elementów konstrukcji o złożonych kształtach zawarty jest w pracy [1]. Jednym z podstawowych założeń tych metod jest quasi-statyczne obciążanie elementów, co stanowi istotne uproszczenie w stosunku do rzeczywistych warunków pracy konstrukcji. Praktyczna przydatność teoretycznych rozwiązań może być zatem potwierdzona tylko na drodze doświadczalnej. Wyniki eksperymentów zamieszczone w monografii [1] oraz późniejszych pracach [2–5] wskazują na dobrą zgodność rozwiązań teoretycznych z rzeczywistym zachowaniem się elementów konstrukcji wykonanych z materiałów o dobrych własnościach plastycznych i obciążonych statycznie. Należy podkreślić, że w pracy [2] przeprowadzono badania ucha sworzniowego, wykonanego ze stali 40H, również przy obciążeniach udarowych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono tam, że element określony na podstawie statycznie dopuszczalnych pól naprężeń jest bardzo zbliżony do elementu optymalnego z punktu widzenia zdolności absorpcji energii.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę wytrzymałościową osiowo-symetrycznych elementów konstrukcji, osłabionych pojedynczymi i wieloma nacięciami kątowymi na obwodzie, znajdujących się pod działaniem udarowych obciążeń rozciągających.

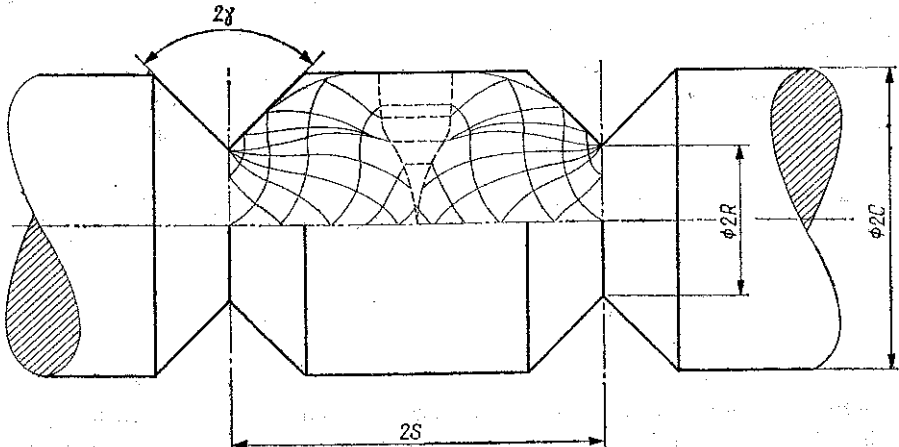
2. WYNIKI TEORETYCZNEJ ANALIZY

Szczegóły dotyczące teoretycznej analizy nośności granicznej osiowo-symetrycznych prętów osłabionych obwodowymi nacięciami zostały podane w pracach [1 i 5]. Rozwiązanie problemu jest określone przez cztery składowe tensora naprężenia i dwie składowe prędkości płynięcia. Wprowadzając postulat pełnej plastyczności

Haara-Kármána oraz warunek plastyczności Treski i stowarzyszone z nim prawo płynięcia, przyjmując poza tym, że materiał jest izotropowy i idealnie plastyczny, rozwiązano najpierw układ czterech równań określających naprężenia, a następnie z warunków izotropii i nieściśliwości określono dwie składowe prędkości płynięcia. W określonych przypadkach możliwe jest zbudowanie rozwiązań kompletnych, spełniających wszystkie statyczne i kinematyczne warunki. Otrzymuje się z nich rozkład naprężeń pozwalających wyznaczyć współczynnik zwiększenia nośności granicznej f (rys. 1), zasięg obszaru plastycznego płynięcia i rozkład prędkości



Rys. 1



Rys. 2

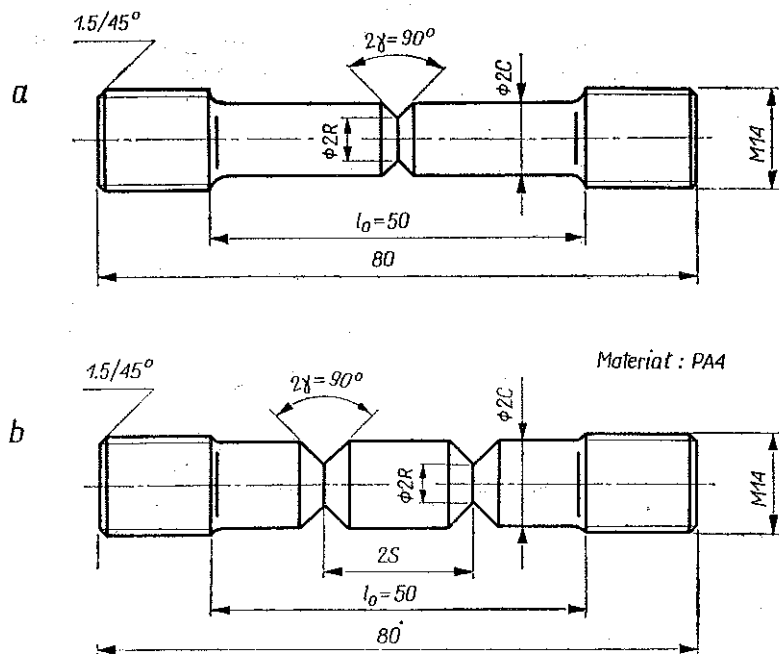
płynięcia. Ponadto przedłużenie pola naprężeń w obszar sztywny pozwala ocenić konieczną wielkość średnicy pręta $2C$ poza karbem oraz niezbędną najmniejszą odległość między dwoma nacięciami $2S$ (rys. 2). Tę niezbędną odległość uzyskuje się przez zestawienie obok siebie siatek linii poślizgu w sposób pokazany na rys. 2. Warto podkreślić, że w przypadku gdy rozstawienie dwóch kolejnych nacięć jest mniejsze od $2S$ lub gdy średnica jest mniejsza od $2C$, możliwe jest jedynie podanie ocen nośności granicznej od góry i od dołu [1]. Na rys. 1, obok wspomnianego wyżej współczynnika zwiększenia nośności granicznej f , podano również wykresy $\kappa=C/R$ i $\eta=S/R$ jako funkcji kąta γ określającego kształt nacięć kątowych.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Elementy maszyn i konstrukcji bardzo często w warunkach eksploatacji są narażone na działanie udarowych obciążeń. Ma to miejsce podczas przejazdu środków transportu przez nierówności, podczas startu i lądowania samolotów, w czasie formowania zestawów wagonowych itp. Wobec powyższego dla określenia pełnej charakterystyki materiału niezbędne jest przeprowadzenie badań również przy obciążeniach udarowych.

3.1. Udarowa próba rozciągania

Badania doświadczalne oparto w pracy na udarowych próbach rozciągania. Badania te z reguły mają na celu określenie mechanicznych własności (wytrzymałość i plastyczność) materiału przy jego rozciąganiu z wysoką prędkością. Można je przeprowadzać na próbkach bez karbu lub z karbem. Warto tu jednak podkreślić,



Rys. 3

że bardzo często określenie względnego wydłużenia przy udarowym zniszczeniu jest na próbkach bez karbu utrudnione ze względu na pojawienie się na nich kilku przewężeń (szyjek). Dlatego też próby udarowego rozciągania przeprowadza się z reguły na próbkach z karbem o kącie $\gamma=30^\circ$.

Udarowym próbom rozciągania poddano w pracy dwa rodzaje próbek z nacięciami. Na próbkach pokazanych na rys. 3a przeprowadzono badania wpływu wielkości średnicy części poza karbem na zdolność absorpcji energii przez element, a próbki z rys. 3b posłużyły do przeprowadzenia doświadczalnej analizy wpływu rozstawienia sąsiadujących ze sobą nacięć na wielkość tej energii.

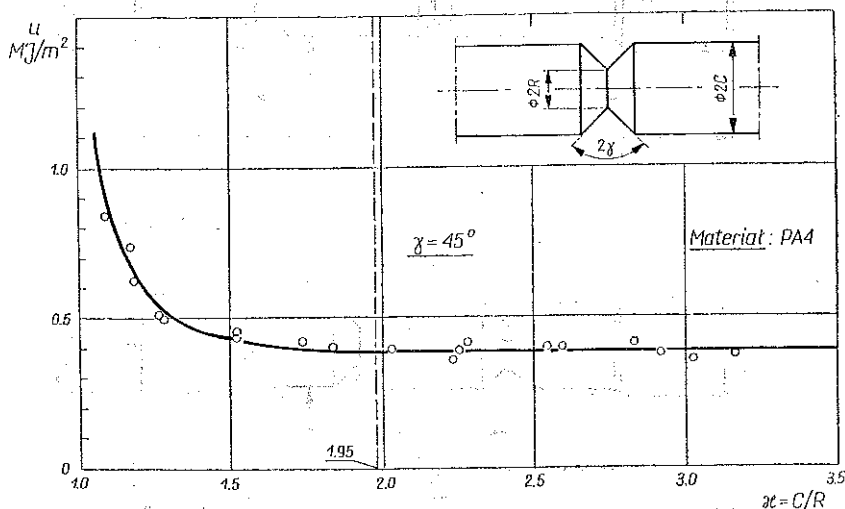
Próbki wykonano ze stopu aluminium PA4 (AlMg1Si1Mn) wg PN-79/H-88026. Materiał ten bardzo nadaje się do przeróbki plastycznej na zimno i na gorąco. Stosowany jest do wyrobu średnio obciążonych elementów konstrukcji lotniczych i pojazdów mechanicznych oraz części o złożonych kształtach kutech w matrycach.

Próby udarowego rozciągania przeprowadzono na młocie wahadłowym typu Charpy'ego produkcji VEB Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig, NRD, używanym do prób zginania. Maksymalna energia uderzenia wynosiła 50 J. Szczegóły metodyki tego rodzaju badań zawarte są w pracy [6].

3.2. Wpływ głębokości karbu na energię zniszczenia przy udarowym rozciąganiu

Na rys. 4 podano wykres zależności jednostkowej pracy udarowego zniszczenia próbek z karbem przy rozciąganiu jako funkcji parametru κ charakteryzującego głębokość karbu. Wykres ten otrzymano na podstawie prób udarowego rozciągania próbek pokazanych na rys. 3a. Jedynym parametrem zmiennym w tych próbkach była średnica części poza karbem $2C$. Pozostałe wymiary miały wartości podane na rys. 3a. Średnica najmniejszego przekroju $2R$ wynosiła $5,8 \pm 0,1$ mm.

Z przebiegu wykresu wynika, że energia zniszczenia próbek jest najwyższa dla tych przypadków, gdy średnica poza karbem $2C$ jest niewiele większa od średnicy



Rys. 4

karbu. Oznacza to, że cała próbka, a nie tylko w miejscu osłabionym, odkształca się plastycznie. Dla większych wartości parametru κ odkształcenia w coraz większym stopniu lokalizują się w strefie osłabionego przekroju, a krzywa łagodnie przechodzi w linię poziomą. Dalszy wzrost średnicy poza karbem $2C$ nie ma wpływu na zdolność absorpcji energii przez element. Oznacza to, że zniszczenie próbek poprzedzone jest jednakowym miejscowym, zlokalizowanym w karbie odkształceniem, które dla danej konfiguracji wycięcia ma wartość najniższą. Tej najniższej jednostkowej pracy udarowego zniszczenia towarzyszy najwyższa wartość siły. Wykres siły przy udarowej próbie rozciągania, ma więc zupełnie odmienny przebieg. Najniższa jej wartość przypada na próbkę bez karbu, ponieważ energia uderzenia rozpraszana jest w procesie odkształcania próbki na całej jej długości l_0 (rys. 3). Odkształcenie obejmuje więc największą objętość próbki, która przed zniszczeniem jest w stanie wchłonąć maksymalną ilość energii.

W próbkach z karami odkształcenie jest zlokalizowane. Jednakże, przy niewielkiej różnicy przekroju osłabionego i części poza karbem, odkształcenie obejmuje również części chwytowe. W miarę wzrostu parametru $\kappa = C/R$ odkształcenia części chwytowych stopniowo zanikają, praca odkształcenia maleje a siła udarowego zniszczenia rośnie. Z chwilą ustalenia się pracy zniszczenia ustala się również wartość siły niszczącej. Parametr κ w momencie ustalania się przebiegu powyższych krzywych przyjmuje wartość optymalną. Wartość ta ma duże znaczenie praktyczne. Zapewnia bowiem takie proporcje elementom z karami, że przy obciążeniach udarowych zachowują swoje wymiary i nie tracą własności użytkowych. Drugi ważny wniosek praktyczny dotyczy doboru wymiarów dla próbek z karami przygotowanych do prób udarowego rozciągania (p. 3.1). Do badań tych mogą być użyte tylko takie próbki, które przed zniszczeniem nie będą odkształcone w części chwytowej. Wyniki badań przeprowadzone na takich próbkach będą obrazowały wpływ karbu na własności mechaniczne materiału bez dodatkowego wpływu ubocznych efektów.

Wyznaczanie siły przy próbie udarowego rozciągania przedstawia duże trudności. W próbie tej wyznacza się umowne wartości średniego obciążenia i średniego naprężenia [6]. Wartości te określają się analogicznie jak przy statycznej próbie rozciągania. Mają one odpowiednio postać:

$$(3.1) \quad P_{ur} = \frac{9,80665 L_u}{\Delta l_u} \text{ kN}$$

oraz

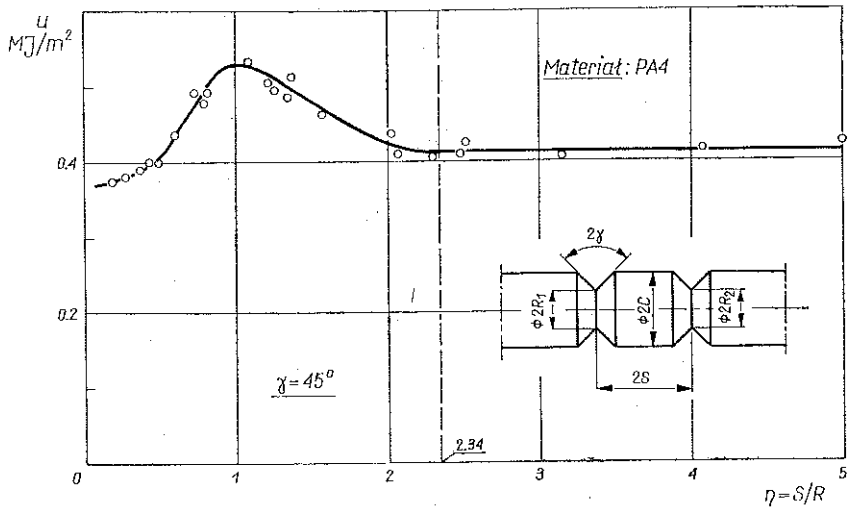
$$(3.2) \quad \sigma_{ur} = \frac{9806,65 L_u}{\Delta l_u F_0} \text{ MPa,}$$

gdzie L_u oznacza pracę zużytą na zniszczenie próbki przy udarowej próbie rozciągania wyrażonej w kGm, Δl_u wydłużenie próbki w mm oraz F_0 pole przekroju pierwotnego próbki w mm^2 .

Liniją przerywaną zaznaczono teoretyczną wartość średnicy części poza karbem otrzymaną z wykresu na rys. 1. Przebiega ona niemal dokładnie w miejscu, gdzie krzywa doświadczalna przechodzi w linię poziomą. Uzyskano w ten sposób potwierdzenie, że wymiary elementu z karbami określone teoretycznie metodą nośności granicznej są optymalne również w udarowym rozciąganiu.

3.3. Wpływ rozstawienia karbów na zdolność absorpcji energii przez element w udarowym rozciąganiu

Omawiany niżej cykl badań przeprowadzono na próbkach pokazanych na rys. 3b. Parametrem zmiennym jest tu jedynie rozstawienie karbów $2S$. Pozostałe wymiary są stałe, przy czym należy podkreślić, że wartość parametru $\kappa=C/R$ wynosiła dla każdego próbek około 2,15, była więc nieco większa niż wynikająca dla tego samego karbu wartość teoretyczna, równa 1,95. Średnice osłabionych przekrojów $2R$ miały średnią wartość równą $5,85 \pm 0,1$ mm.



Rys. 5

Wykres zależności jednostkowej pracy zniszczenia przy udarowym rozciąganiu próbek osłabionych szeregiem nacięć jako funkcji rozstawienia karbów pokazano na rys. 5 ($U = \varphi(\eta)$). Analizując, tak samo jak w p. 3.2, przebieg wykresu widzimy, że optymalne rozstawienie karbów ma tu miejsce dla wartości $\eta = S/R$ większych od 2,0. W przedziale tym zachodzi stabilizacja wykresu energii udarowego zniszczenia, a siła niszcząca przy udarowym rozciąganiu elementu osłabionego dwoma nacięciami osiąga maksymalną wartość. Nieco większa siła jest konieczna jedynie dla zniszczenia próbki z jednym nacięciem. Maksymalna energia zniszczenia i odpowiadająca jej najmniejsza siła ma miejsce dla $\eta \approx 1$. Jest to przypadek, w którym sąsiadujące z sobą karby są tak blisko siebie, że materiał próbki między nimi zawarty ulega w procesie zniszczenia plastycznej deformacji. Na rysunku zaznaczono

linią przerywaną teoretyczną wartość parametru η określoną z wykresu na rys. 1. Początek stabilizacji energii udarowego zniszczenia przy rozciąganiu ma miejsce w pobliżu linii przerywanej. Oznacza to, że określone teoretycznie na gruncie nośności granicznej rozstawienie sąsiadujących za sobą karbów jest optymalne również w udarowym rozciąganiu.

4. WNIOSKI

Wyniki badań potwierdziły, że wynikający z rozwiązania teoretycznego (z przedłużenia w obszar sztywny siatki linii poślizgu) stosunek części chwytowej do przedwężenia ($\kappa=C/R$) może być podstawą do określenia wymiarów próbek z karbem do badań w udarowym rozciąganiu.

Wartość teoretyczna parametru $\eta=S/R$, określającego podziałkę sąsiadujących z sobą karbów, jest optymalna również ze względu na wytrzymałość elementu w udarowym rozciąganiu.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. L. DIETRICH, J. MIASTKOWSKI, W. SZCZEPIŃSKI, *Nośność graniczna elementów konstrukcji*, PWN, Warszawa 1970.
2. L. DIETRICH, J. MIASTKOWSKI, *Doświadczalne badanie nośności granicznej połączeń sworzniowych*, Arch. Budowy Maszyn, 18, 4, 1971.
3. J. CZERNIAWSKI, J. MIASTKOWSKI, *Nośność graniczna płaskich elementów osłabionych szeregiem nacięć kątowych*, Zesz. Nauk. Filii Uniw. Warszawskiego w Białymstoku, 6, 25, Nauki Matemat.-Przyr., Białystok, 127-146, 1980.
4. J. MIASTKOWSKI, H. SKROCKI, *Analiza wytrzymałościowa prętów kwadratowych z szeregiem karbów kątowych*, Arch. Budowy Maszyn, 28, 1, 13-25, 1981.
5. L. DIETRICH, K. TURSKI, *Nośność graniczna rozciąganych osiowo-symetrycznych prętów osłabionych szeregiem karbów kątowych*, Mech. Teoret. Stos. 6, 4, 437-448, 1968.
6. S. KATARZYŃSKI, S. KOCANĀDA, M. ZAKRZEWSKI, *Badanie własności mechanicznych metali*, PWT, Warszawa 1971.

Резюме

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УГЛОВЫМИ ЗАРУБКАМИ В УДАРНОМ РАСТЯЖЕНИИ

В работе исследованы прочностные свойства осесимметричных элементов, с единичными и многими угловыми зарубками на периметре, подвергнутых ударным растягивающим нагрузениям. Констатировано, что теоретически определенный диаметр элемента вне-зарубки, а также расстояние между соседними зарубками в элементах, ослабленных рядом зарубок, являются оптимальными. величинами тоже при действии ударных растягивающих нагрузений.

SUMMARY

LOAD CARRYING CAPACITY OF AXI-SYMMETRIC ELEMENTS WITH ANGULAR NOTCHES SUBJECT TO IMPACT TENSION

The paper presents the analysis of strength of axi-symmetric elements weakened by single or multiple notches at the lateral surface and subject to impact tension loading. It is found that the theoretically determined diameter of the element outside the notch and the distances between the notches satisfy the optimum conditions also in the case of impact loading.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 8 marca 1983 r.
