ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: Hutnictwo z. 6

Nr kol. 440

Tadeusz Lamber, Franciszek Grosman Instytut Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej

USTALENIĘ ZALEŻNOŚCI ODKSZTAŁCENIA GRANICZNEGO WYBRANYCH MATERIAŁÓW O D STANU NAPRĘŻENIA

> Streszczenie: W pracy dokonano doboru prostyci metod badawczych pozwalających wyznaczyć odkształcenie graniczne (prowadzące do utraty spójności) dla różnych stanów naprężeń oraz ustalono postać funkcji pozwalającej wyrazić zależność odkształcenia granicznego od stanu naprężenia - tzw. - funkcję odkształcalności granicznej.

1. Wstep

Postęp techniczny zależy w znacznym stopniu od zastosowania nowych materiałów oraz nowych sposobów ich wytwarzania i przetwarzania. Działanie w tym kierunku stanowi jedno z podstawowych zadań nowej. interdyscyplinarnej dziedziny nauki - inżynierii materiałowej. Warunkiem niezbędnym do wypełnienia tego zadania jest, między innymi, opracowanie metod badawczych pozwalających na sprawdzenie rozważań teoretycznych oraz możliwie najpełniejszą ocenę podatności nowo wytworzonych materiałów do procesów technologicznych. W przypadku materiałów przeznaczonych do przeróbki plastycznej szczególnie istotne jest wyznaczenie własności charakteryzujących jego podatność do plastycznego kształtowania, na podstawie których dokonujemy wyboru najodpowiedniejszego procesu przeróbki plastycznej i ustalamy jego parametry. Parametry procesu przeróbki plastycznej należy uznać za właściwie ustalone jeżeli uzyska się żądany wyrób o wymaganych własnościach przy minimalnym nakładzie kosztów. Jedną z dróg obniżenia kosztów jest maksymalne wykorzystanie odkształcalności przerabianego materiału, co w przypadku procesów przeróbki plastycznej na zimno nozwala ograniczyć ilość kosztownych zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania oraz optymalnie dobrać wielkość wsadu.

Metody ustalania parametrów przeróbki plastycznej uwzględniające odkształcalność materiałów można ująć w cztery grupy:

grupa 1 w oparciu o wyniki pojedynczych prób wytrzymałościowych, grupa 2 w oparciu o kilka, specjalnie dobranych prób wytrzymałościowych, grupa 3 w oparciu o wyniki prób imitujących konkretne procesy przeróbki plastycznej, oraz grupa 4 w oparciu o funkcję odkształcalności granicznej wyrażającą zależność granicznego odkształcenia, tzn. prowadzącego do utraty spójności - od stanu naprężenia.

Pierwsze trzy grupy mają ograniczony zakres zastosowania. Metody ustalania parametrów procesu przeróbki plastycznej oparte o funkcje odkształcalności granicznej mają charakter uniwersalny. Pozwalają na dobór najbardziej odpowiedniego procesu przeróbki plastycznej oraz ustalenie optymalnych, ze względu na odkształcalność materiału, parametrów tego procesu.Wynika to stąd, że aktualny stan rozwoju teoretycznych podstaw przeróbki plastycznej pozwala określić stan naprężeń i odkształceń dla większości procesów przeróbki. Istnieją więc podstawy do projektowania procesów przeróbki plastycznej w oparciu o funkcje odkształcalności granicznej.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy [1] był dobór prostych, możliwych do zastosowania w praktyce przemysłowej metod badania odkształcalności, dla stanów naprężeń odpowiadających procesom przeróbki plastycznej na zimno. Aby cel ten osiągnąć przewidziano:

- Dokonanie doboru rodzaju prób oraz kształtu próbek pozwalających w sposób możliwie najprostszy osiągnąć określone stany naprężeń, charakterystyczne dla procesów przeróbki plastycznej.
- Przeprowadzenie oceny przydatności poszczególnych prób i wytypowanie na jej podstawie najodpowiedniejszych do wyznaczania funkcji odkształcalności granicznej.
- Określenie przebiegu odkształceń i stanu naprężeń w wytypowanych próbkach.
- 4. Opracowanie metodyki wyznaczania funkcji odkształcalności granicznej.
- 5. Określenie dla wybranych materiałów funkcji odkształcalności granicznej w oparciu o opracowaną metodykę.

Opracowanie metody badań pozwalającej w prosty sposób wyznaczyć odkształcalność powinno stworzyć możliwość przebadania każdego przeznaczone go do przeróbki plastycznej metalu w warunkach przeciętnie wyposażonego laboratorium zakładowego. Uzyskane zaś wyniki w postaci funkcji odkształcalności granicznej pozwolą na wybór najodpowiedniejszego procesu przeróbki plastycznej badanego materiału oraz ustalenie optymalnych parametrów tego procesu.

3. Metodyka i warunki badań

W pracy wielkość odkształcenia przyjęto [2] wyrażać stopniem odkształcenia e;:

$$e_{i} = \int_{0}^{t} \dot{\varphi}_{i} dt, \qquad (1)$$

gdzie:

 $\dot{\varphi_i} = \frac{d e_i}{dt} - zastępcza prędkość odkształcenia rzeczywistego$ $<math>\varphi_i = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2} - zastępcze odkształcenie rzeczywiste$

t - czas,

a stan naprężeń wskaźnikiem k

$$k = \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm i}}, \qquad (2)$$

gdzie:

$$\begin{split} & \tilde{G}_{m} = \frac{\tilde{G}_{1} + \tilde{G}_{2} + \tilde{G}_{3}}{3} - \text{naprężenie średnie} \\ & \tilde{G}_{1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\tilde{G}_{1} - \tilde{G}_{2})^{2} + (\tilde{G}_{2} - \tilde{G}_{3})^{2} + (\tilde{G}_{3} - \tilde{G}_{1})^{2}} - \text{naprężenie zastępcze.} \end{split}$$





Rys. 1. Próbki do rozciągania a - normalne, b - ze wstępnie wytoczoną szyjką

Wskaźnik stanu naprężeń w większości operacji przeróbki plastycznej na zimno waha się w granicach od ~0,6 $\leq k \leq 1,2$. Po przeprowadzeniu analizy do badań przyjęto następujące sposoby odkształcania i kształty próbek:

- 1) rozciąganie próbek okrągłych normalnych (rys. 1a)
- 2) rozciąganie próbek okrągłych ze wstępnie wytoczoną szyjką o stosunku d/R = 2 i d/R = 4 (rys. 1b)
- 3) ściskanie próbek walcowych w warunkach tarcia płynnego (rys. 2)
- 4) ściskanie próbek walcowych w warunkach tarcia suchego (rys. 3)
- 5) zginanie próbek o przekroju prostokątnym (rys. 4a)
- 6) zginanie próbek o przekroju kwadratowym (rys. 4b)
- 7) skręcanie próbek okrągłych (rys. 5).



Rys. 2. Próbka do ściskania "beztarciowego"



Rys. 3. Próbka do ściskania w warunkach tarcia suchego

Teoretycznie zabezpieczają te próby uzyskania stanów naprężeń dla których wskaźnik k zawarty jest w granicach – $0,33 \le k \le 1,33$. Przygotowanie próbek do badań polegało, po uzyskaniu wymaganego kształtu, na nadaniu powierzchniom roboczym odpowiedniej gładkości. Próbki 4-7 podlegały następnie dalszym zabiegom mającym na celu naniesienie na powierzchnie rysunku siatek, umożliwiającego pomiar lekalnych odkształceń. Na próbki do ściskania w warunkach tarcia suchego oraz próbki zginane nanoszono siatkę (rys. 6), której elementy stanowiły okręgi o średnicy 1 mm, a na próbki skręcane rysę wzdłuż tworzącej walcowej części próbki. Nanoszenia siatek dokonywano oryginalną metodą foto-chemiczną. Taki sposób nanosze-



a - o przekroju prostokątnym, b - o przekroju kwadratowym



Rys. 5. Próbka do skrecania

nia siatek posiada w stosunku do mechanicznego tę zaletę, że pozwala uniknąć lokalnego umocnienia i złagodzić działanie karbu. Próby rozciągania i zginania realizowane na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej, skręcanie na plastometrze skrętnym a ściskanie na prasie hydraulicznej.Prasę wyposażono w specjalnie skonstruowany przyrząd (rys. 7), który pozwolił wyeliminować zjawisko skoszenia ściskanych próbek.

Stopień odkształcenia oraz wskaźnik stanu naprężeń wyznaczono metodą pośrednią z odkształceń liniowych, które wyznaczane z pomiaru zasadniczych wymiarów próbki lub elementów siatek przed i po odkształceniu.



Rys. 7. Przyrząd eliminujący zjawisko skoszenia

Rys. 6. Siatka podziałowa nanoszona na powierzchnię próbek ściskanych w warunkach tarcia suchego

4. Badania wstepne

W celu określenia praktycznej przydatności poszczególnych prób do wyznaczania funkcji odkształcalności granicznej oraz ustalenie zakresu badań niezbędnych do udoskonalenia metodyki postępowania przeprowadzono badania wstępne. Badania te [3] przeprowadzono na próbkach ze stali 18G2VA, odznaczającej się przeciętną odkształcalnością. Utratę spójności uzyskano w następujących próbach: rozciągania próbek okrągłych normalnych i ze wstępnie wytoczonymi szyjkami, ściskania próbek w warunkach tarcia suchego oraz skręcania próbek okrągłych. Na ich podstawie sporządzono krzywą odkształcalności granicznej dla stali 18G2VA (rys. 8).

Nie udało się uzyskać utraty spójności w próbkach poddawanych zginaniu i ściskaniu "beztarciowemu". W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych ustalono, że szczególnie przydatne do wyznaczania odkształcalności granicznej są próby:

- rozciągania próbek okrągłych normalnych,
- rozciągania próbek okrągłych ze wstępnie wytoczoną szyjką o różnym stosunku d/R

oraz

- skręcania próbek okrągłych.

Tylko te próby przyjęto do dalszych badań.



Rys. 8. Krzywa odkaztałcalności granicznej stali 18G2VA

5. Badania zasadnicze

Badania zasadnicze przeprowadzono na materiałach: miedzi Cu 99,9 E, żelazie Armco E i stali OH18N9. Materiały te odznaczają się znacznie zróżnicowaną skłonnością do umocnienia. Na rys. 9 widoczne są przebiegi krzywych umocnienia tych materiałów wyznaczonych w próbie ściskania "beztarciowego".

Badania zasadnicze objęły:

- udoskonalenie metodyki wyznaczania odkształcalności granicznej,

oraz

- wyznaczenie udoskonaloną metodyką funkcji odkształcalności granicznej.



Rys. 9. Krzywe umocnienia wyznaczone z próby ściskania "beztarciowego"

W ramach doskonalenia metodyki wyznaczania odkształcalności granicznej przeprowadzono badania przebiegu wskaźnika stanu naprężeń w zależności od odkształceń dla próbek rozciąganych, w celu wyznaczenia zastępczej wartości wskaźnika dla tej próby oraz niejednorodności odkształcenia na długości skręconej próbki, co pozwoli stwierdzić czy możliwe jest wyznaczenie granicznego stopnia odkształcenia z ilości skręceń.

Na podstawie uzyskanych wyników stosując metody statystyki matematycznej wyznaczono szukane funkcje.

5.1. Zastępczy wskaźnik stanu naprężenia w próbie rozciągania

Celem badań było ustalenie wartości zastępczego wskaźnika stanu naprężenia dla próbek normalnych poddanych rozciąganiu. Wartość wskaźnika stanu naprężenia w tej próbie jest stała w fazie wydłużenia równomiernego, a zmienna » fazie tworzenia i rozwijania się szyjki. Na ogół stosuje się 4. 5, 6] obliczanie zastępczego wskaźnika k, jako średniej arytmetycznej wartości początkowej (k,) i końcowej w momencie pęknięcia (k,). Taka metoda obliczania nie uwzględnia w sposób poprawny wpływu zmienności stanu naprężenia na przebieg odkształcenia. Wydaje się, że znacznie słuszniejsze w tym względzie jest obliczanie zastępczego wskaźnika stanu naprężenia jako średniej całkowej funkcji k = f(e,). Dla wyznaczenia tej funkcji próbę rozciągania prowadzono etapami na maszynie wytrzymałościowej ZD-10/90. Do prób użyto po 10 próbek z każdego materiału (miedzi, żelaza Armco, OH18N9). Planowana wielkość bezwzględnego wydłużenia 1 w jednym etapie ustalono na podstawie pomiaru całkowitego wydłużenia uzyskanego na próbkach pilotowych i założenia realizacji całego odkształcenia w 10 etapach. Ustalono, że bezwzględne wydłużenie dla jednego etapu powinno wynosić dla miedzi 3,5 mm, żelaza Armco 3,5 mm, a dla stali OH18N9 5,0 mm.

Przed rozpoczęciem prób, próbki poddano pomiarom sprawdzającym. Po każdym etapie rozciągania próbki były mierzone. W fazie odkształceń równomiernych mierzono średnicę próbki w trzech miejscach na jej długości oraz długość pomiarową. W fazie tworzenia się i rozwijania szyjki, po kolejnych i - tych etapach rozciągania mierzono w dwóch prostopadłych kierunkach: średnicę minimalną d_i min, długość pomiarową l_{pi} oraz promień dna szyjki R_i. Pomiary próbek po zerwaniu były prowadzone w sposób analogiczny po ich złożeniu w miejscu złomu. Wskaźnik stanu raprężeń i stopień odkształcenia wyznaczono zgodnie z podaną metodyką.

W oparciu o uzyskane wyniki sporządzono wykresy zależności wskaźnika stanu naprężenia od stopnia odkształcenia. Zależności te dla miedzi przedstawiono na rys. 10. Dla żelaza Armco i dla stali OH18N9 postać wykresu jest podobna. Widoczna na wykresach postać krzywych wskazuje, że dla $e_i > e_r$, gdzie e_r - stopień odkształcenia odpowiadający równomiernemu wydłużeniu, możliwa jest aproksymacja funkcji k = f(e_i) wielomianem trzeciego stopnia (w przedziale $0 \le e_i \le e_r$, k ma wartość stałą). Przyjmując wstępnie założenia:

 Wykres funkcji przechodzi przez punkt wyznaczony granicznymi wartościami stopnia odkształcenia e_r i wskaźnika stanu naprężenia k_r odpowiadającego równomiernemu wydłużeniu, które wynoszą:

dla miedzi $e_r = 0,4$ $k_r = 0,33,$ dla Armco $e_r = 0,28$ $k_r = 0,33,$ dla OH18N9 $e_r = 0,52$ $k_r = 0,33,$



Rys. 10. Wartość wskaźnika stanu naprężenia k w zależności od stopnia odkształcenia e_i w rozciąganych próbkach z miedzi

 Funkcja ta jest ciągła w punkcie o współrzędnych dla (e_r, k_r), której w tym punkcie zachodzi zależność:

$$\frac{dk}{de_i} = 0$$

otrzymano postać wielomianu

$$k = a_0 + a_2(e_1 - e_r)^2 + a_3(e_1 - e_r)^3$$
(3)

gdzie:

96

 $a_0 = 0,33$.

Wartości współczynników a2 i a3 (tabl. 1) wyznaczono na maszynach cyfrowych stosując metodę najmniejszego odchylenia kwadratowego.

Wartości zastępczego wskaźnika stanu naprężenia obliczoną jako średnią całkową wyznaczonej funkcji k = f(e_i) wyraża dla przedziału (0, e_p) zależność

$$k_{z} = a_{0} + \frac{\frac{a_{2}}{3}(e_{p} - e_{r})^{3} + \frac{a_{3}}{4}(e_{p} - e_{r})^{4}}{e_{p}}$$
(4)

Tablica 1

| Materiał | a _o | ^a 2 | ⁸ 3 |
|-----------|----------------|----------------|----------------|
| Cu 99,9 E | 0,333 | 0,727 | -0,338 |
| Armco | 0,333 | 0,646 | -0,085 |
| OH18N9 | 0,333 | 0,878 | -0,494 |

Wartości parametrów we wzorach 3 i 4

5.2. Niejednorodność odkształceń w próbie skręcania

Badania wstępne potwierdziły wysuwane przez wielu autorów prac dotyczących próby skręcania stwierdzenie, że odkształcenie na długości próbki nie jest stałe. Tym niemniej istnieje prawdopodobieństwo, że pomiędzy tymi wielkościami występuje pewien związek. Jego analityczne ujęcie pozwoliłoby na znaczne uproszczenie metodyki wyznaczania granicznej odkształcalności z próby skręcania. Podjęto więc próbę znalezienia zależności między maksymalną wartością odkształcenia a ilością skręceń. W tym celu próbę skręcania postanowiono realizować etapami, ustalając dla każdego z nich wielkość odkształcenia maksymalnego i odkształcenia średniego obliczonego z ilości skręceń a na podstawie uzyskanych wyników podjąć próbę ustalenia zależności e_{mex} = f(n) w której e_{mex} jest maksymalnym stopniem odkształcenia, n - ilością skręceń. Na próbkach pilotowych ustalono ilość skręceń odpowiadającą zniszczeniu, a następnie dokonano podziału tej wartości na 10 stapów. W rezultacie otrzymano wielkości kąta skręcania na jeden etap dla miedzi - 2,8%, dla żelaza Armco - 1,8%, dla stali OH18N9 -0.8T. Regulacja wartości kata skręcania w poszczególnych etapach odbywało się na drodze nastawy automatycznego wyłącznika. Ponieważ wyłączanie może odbywać się co 1/8 obrotu, zdecydowano się wobec powyższego że, przyjęte mogą być tylko wartości skręcania w jednym etapie, odpowiadające wielokrotności 1/8 obrotu. Dało to ostatecznie wielkości skręcania:

| dla | miedzi | - | 2,75 T |
|-----|--------|---|--------|
| dla | Armco | - | 1,5 T |
| dla | OH18N9 | - | 0,75π. |

Po dokonaniu pomiarów sprawdzających kąta nachylenia rysy $\sqrt[4]{o} = 0^{\circ} \pm 10^{\circ}$ próbki poddano stopniowemu odkształceniu. Po każdym etapie odkształcenia wykonano pomiar kąta odkształcenia $\sqrt[4]{i}$ na długości pomiarowej próbki (rys. 11) w celu znalezienia maksymalnej jego wartości $\sqrt[4]{max}$. W pierwszym etapie skręcania pomiary wykonano w zaznaczonych na rysunkach w punktach 1, 3, 5, 7, 9 i 11, a kiedy różnica kąta pomiędzy punktami przekraczała 3° pomiary zagęszczono na wszystkie punkty.



Rys. 11. Miejsce pomiaru kąta odkształcenia na skręcanej próbce Wprowadzono współczynnik niejednorodności odkształcenia wyrażony stosunkiem

$$\delta = \frac{e_{\text{max}}}{e_{\text{m}}}$$
(5)

gdzie:

e_{max} - stopień odkształcenia odpowiadający wartości maksymalnego kąta odkształcenia na długości próbki ⁴max,

e_m - stopień odkształcenia odpowiadający średniemu kątowi odkształcenia ¶_m•

Średni stopień odkształcenia e_m obliczono z ilości obrotów n oraz średnicy i długości pomierowej 1 próbki o stałym przekroju wg wzoru:

$$e_{m} = \frac{\pi d \cdot n}{\sqrt{3} \cdot 1}$$
(6)

W oparciu o uzyskane wyniki sporządzono wykresy w układzie współrzędnych $e_m - \delta$. Wykresy te przedstawiono dla miedzi na rys. 12. Dla Armco i dla OH18N9 wykresy są badane. Na ich podstawie można stwierdzić, że da się wyodrębnić dwie strefy przebiegu odkształcenia:

- Strefa I w której współczynnik niejednorodności odkształcenia w miarę wzrostu odkształcenia średniego e_m stopniowo maleje.
- Strefa II w której występuje liniowa zależność między współczynnikiem a stopniem odkształcenia e_m.

Strefa II odpowiada dużym odkształceniom bezpośrednic poprzedzającym moment zniszczenia. Uwzględniając zatem cel niniejszych badań, szczególną uwagę poświęcono temu zakresowi zależności.

Występowanie w drugiej strefie liniowej zależności, której ekstrapolowanie w kierunku $e_i \rightarrow 0$ prowadzi do punktu o współrzędnych $\delta = 1$, $e_m = 0$ pozwala na wyrażenie zależności $\delta = f(e_m)$ wzorem:

$$\delta = 1 + a \cdot e_m \tag{7}$$



Rys. 12. Wartość wskaźnika niejednorodności odkształcenia w zależności od średniego stopnia odkształcenia e_m dla skręcanych próbek z miedzi

Dla tak założonej funkcji, posługując się metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono dla badanych materiałów współczynnik a (tabl. 2).

Tablica 2

| Materiał | Cu 99,9 E | Armco | OH18N9 |
|----------------|-----------|-------|--------|
| 11 <u>8</u> 11 | 0,043 | 0,109 | 0,070 |

Wartości parametru "a" we wzorach 7 i 8

Z funkcji przedstawionej wzorem (7) można po odpowiednich przekształceniach określić stopień odkształcenia e_p lub e_{max}

$$e_{p} = e_{\max} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{\sqrt{3} \cdot 1} + a \frac{\pi d \cdot n}{\sqrt{3} \cdot 1}$$
(8)

5.3. Wyznaczenie funkcji odkaztałcalności granicznej

Krzywe odkształcalności granicznej dla miedzi, żelaza Armco i stali OH18N9 (rys. 13) zostały sporządzone w oparciu o wyniki prób wytypowanych na podstawie badań wstępnych. Dla ustalenia parametrów procesów przeróbki plastycznej oraz optymalizacji tych parametrów nieodzowna jest przedstawienie funkcji odkształcalności granicznej w formie analitycznej. Sto-



Rys. 13. Krzywe odkształcalności granicznej materiałów: Cu 99,9 E, Armco E i OH18N9

sowana jest w tym celu aproksymacja wielomianami 2-go lub 3-go stopnia. Zakres stosowania wyrażonej w tej formie funkcji jest jednak ograniczony do przedziału wartości wskaźnika stanu naprężeń objętego przeprowadzonymi próbami. W pracy podjęto próbę wyrażenia odkształcalności granicznej funkcji pozwalającą ekstrapolować wyniki uzyskane w badaniach na cały zakres wartości wskaźnika stanu naprężenia. Wykresy funkcji $e_{p} = f(k) zarówno$ uzyskane w tej pracy jak i innych [3, 6, 7] wskazują na istnienie dla niej dwóch asymptot. Jedną asymptotę stanowi oś odciętych (k), a drugą prosta równoległa do osi rzędnych (e,) leżąca po stronie ujemnych wartości odciętych (rys. 14). Taką postać przebiegu krzywej można uzasadnić przesłankami fizykalnymi. W miarę jak stan naprężeń zbliża się do trójosiowego równomiernego rozciągania wskaźnik stanu naprężenia k->∞. Zgodnie z hipotezami energii odkształcenia postaciowego i maksymalnego napreżeń stycznych dla trójosiowego równomiernego rozciągania, odkształcenie plastyczne jest niemożliwe ($e_n = 0$) a więc dla k-> ∞ , $e_n = f(k) -> 0$ jest potwierdzeniem, że oś k jest jedną asymptotą funkcji e = f(k).

Badania przeprowadzone przez Erbla wykazały, że istnieje ciśnienie p_s nazwane ciśnieniem spajania, dla którego możliwe jest praktycznie dowolne duże odkształcenie. Ponieważ $G_{ms} = -p_s$ wskaźnik stanu naprężenia odpowiadający ciśnieniu spajania



Rys. 14. Wykres funkcji odkształcalności granicznej

Tablica 3

| Materiał | 8, | b | C |
|-----------|------|-------|-------|
| Cu 99,9 E | 2,51 | 0,666 | 1,702 |
| Armco | 1,34 | 0,666 | 0,922 |
| OH18N9 | 1,46 | 0,666 | 0,358 |

Wartości parametrów we wzorze 10

Dla k \rightarrow k_g z prawej strony e_p = f(k) $\rightarrow \infty$, tym samym istnieje podstawa do przyjęcia drugiej asymptoty. Funkcja spełniająca warunek istnienia tych dwóch asymptot ma postać

$$e_p = \frac{a}{(k-b)^c}$$
(10)

Posługując się metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono wartości współczynników tej funkcji dla badanych materiałów (tabl. 3).

6. <u>Omówienie ustalonej metodyki wyznaczania krzywych odkształcalności granicznej</u>

Dla wyznaczania krzywej odkształcalności granicznej wybranego materiału przeprowadzono próby: rozciągania próbek okrągłych normalnych (rys.1a) rozciąganie próbek okrągłych z wstępnie wykonaną szyjką (rys. 1b) i skręcanie próbek okrągłych (rys. 5). Wymiary próbek w miarę możliwości ustalono tak, aby ich przekroje w miejscu spodziewanej utraty spójności były jednakowe. Wszystkie próby prowadzono przy prędkości odkształcenia mieszczących się w zakresie prób statycznych.

Próba rozciagania próbek okragłych

Wartość granicznego stopnia odkształcenia e_D obliczono ze wzoru

$$e_p = 2 \ln \frac{d_o}{d_1}$$
(11)

a zastępczego wskaźnika stanu naprężenia ze wzoru (4). Określenie zastępczego wskaźnika stanu naprężenia wymagało wyznaczenia współczynników a_p i a, wchodzących do wzoru 4. W tym celu próbę rozciągania realizowano w dwóch etapach. Pierwszy etap rozciągania przeprowadzono do pojawienia się wyraźnie zarysowanej szyjki, a następnie przerywano odkształcanie aby pomierzyć promień dna szyjki R₁ i jej średnicę d₁. Dalsze rozciąganie prowadzono do zerwania. Po zerwaniu mierzono promień dna szyjki R_p i średnice d_n. Ponadto po pierwszym i drugim etapie rozciągania mierzono średnicę d, (zgodnie z zaleceniami PN-71/H-04310), aby określić stopień odkształcenia równomiernego e_r. Pomiaru promienia dna szyjki dokonano dwoma metodami: pośrednią obliczeniową oraz bezpośrednią używając do tego celu mikroskopu warsztatowego wypoważonego w głowicę z zarysami promieni. Po obliczeniu wartości stopni odkształcenia i wskaźników stanu naprężenia dla obydwóch etapów rozciągania uzyskano, po podstawieniu tych wartości do wzoru 3, układ równań:

$$k_{1} = 0,33 + a_{2}(e_{i1} - e_{r})^{2} + a_{3}(e_{i1} - e_{r})^{3}$$
$$k_{2} = 0,33 + a_{2}(e_{r} - e_{r})^{2} + a_{3}(e_{r} - e_{r})^{3}$$

Rozwiązując powyższy układ wyznaczono współczynniki a₂ i a₃ niezbędne do wyliczenia wartości zastępczego wskaźnika stanu naprężenia (tabl. 1).

Próba rozciagania próbek okragłych z szyjka

Próbę rozciągania dla tych próbek (rys. 1b) przeprowadzono w sposób ciągły do zerwania. Przed zrywaniem określono pierwotne wymiary, tzn. promień R_o i średnicę d_o, wstępnie wykonanej szyjki. Po zerwaniu dokonano pomiarów promienia dna szyjki R_p i średnicy szyjki d_p. Promień mierzono analogicznie jak dla próbek okrągłych gładkich.

Graniczny stopień odkształcenia wyznaczono ze wzoru 11. Zastępczy wskaźnik stanu naprężenia obliczono jako średnią arytmetyczną wartości wskaźnika w momencie rozpoczęcia rozciągania k_o i w chwili utraty spójności k_p:

$$k_z = \frac{k_o + k_p}{2}$$

a wchodzące do wzoru wskaźniki stanu naprężenia ze wzoru [1]:

$$k = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{d}{R} \right), \tag{12}$$

gdzie:

R - promień zarysu dna szyjki,

d - średnica szyjki.

Próba skrecania próbek okragłych

Wskaźnik stanu naprężenia w próbie skręcania, zgodnie z przyjętymi w pracy założeniami jest stały i równy "zero" (k=0). Stopień odkształcenia en dla tej próby wyznaczono ze wzoru

$$e_{p} = \frac{1}{\sqrt{3}} t_{g} \eta_{p}, \qquad (13)$$

gdzie:

🐧 – kąt nachylenia rysy w miejscu utraty spójności,

stosując próbki z naniesionymi wzdłuż tworzącej rysami. Kąt nachylenia rysy mierzono na powierzchni próbki w miejscu utraty spójności. Zważywszy złą w tym miejscu czytelność rysy stosowano metodę ekstrapolacji wykreślnej wyników pomiarów w bezpośrednim sąsiedztwie złomu. Ze względu na dużą pracochionność takiej metody w badaniach można określić graniczny stopień odkształcenia w sposób uproszczony, posługując się wzorem 8. W tym celu wystarczy zmierzyć ilość skręceń próbki do zniszczenia i przyjąć wartość współczynnika "a" występującego we wspomnianym wzorze. Na podstawie przeprowadzonych w pracy badań wyznaczono wartości tego współczynnika dla miedzi, żelaza Armco i stali OH18N9. Wynosiły one odpowiednio 0,043; 0,109; C.070. W obliczeniach przybliżonych można przyjąć wartość w granicach od 0,1 do 0,04, kładając większe wartości dla mniejszych ilości skręceń do zniszczenia (do 7 obr.), a mniejsze dla większej ilości skręceń (ok. 20). Przy założeniu jednorodności odkształcenia na całej długości próbki, obliczenie granicznego stopnia odkształcenia z ilości obrotów daje wartości znacznie zaniżone.

Odkształcalność graniczna

W celu sporządzenia krzywych odkształcalności granicznych naniesiono w układzie: wskaźnik stanu naprężenia k - graniczny stopień odkształcenia e,, Wyniki z przeprowadzonych prób rozciągania i skręcania. Na podstawie rozmieszczenia punktów poprowadzono krzywą odkształcalności granicznej miedzi, żelaza Armco i stali OH18N9 (rys. 13). Stosując metodę najmniejszych kwadratów wyznaczono na podstawie uzyskanych wyników funkcje odkształcalności granicznej dla badanych materiałów. Wartość stałej b = $-\frac{2}{3}$ dla tej funkcji została przyjęta, w oparciu o wyniki badań aluminium prowadzonych przez Erbla [8] oraz na podstawie otrzymanej przez Schillera [9] postaci funkcji. Ocena zgodności przebiegu funkcji w stosunku do punktów eksperymentalnych wykazała wysokie poziomy istotności, co częściowo potwierdziło, że przyjęto właściwą wartość b. Wyznaczenie rzeczywistej wantości tej stałej wymaga wykonania specjalnych badań materiału, o dużym odkształceniu ($\varphi_1 = 22 \text{ wg. } [8]$).

7. Omówienie wyników badań

Badania wstepne

Badania wstępne pozwoliły na ustalenie i opracowanie metodyki wyznaczania odkształcalności granicznej przy zastosowaniu wybranych próbek i sposobów ich odkształcania. Ustalono, że szczególnie przydatne do wyznaczania krzywej odkształcalności granicznej (e_p = f(k)) są próby rozciągania i skręcania. W szczególnych przypadkach, gdy wskazane jest określenie wpływu stanu powierzchni na odkształcalność technologiczną, wykonanie próby ściskania w warunkach tarcia suchego może okazać się celowe. Dla wyznaczania lokalnego stopnia odkształcenia w pracy opanowano metodę poligraficzną nanoszenia na powierzchnię próbek siatek podziałowych, które nie rzutują w sposób zasadniczy na wyniki prób. Pozostałe próby, których przeprowadzanie opanowano w badaniach wstępnych, można z powodzeniem stosować w pewnych szczególnych przypadkach badania materiału. Szczególnie przydatna może być próba ściskania "beztarciowego", która umożliwia realizacje odkształcenia przy stałej ujemnej wartości wskaźnika stanu naprężenia (k = -0,33) i monotonicznym przebiegu odkształceń. Zakres jej zastosowania jest jednak ograniczony do materiałów nie wykazujących w stanie jednoosiowych naprężeń ściskających dużej odkształcalności granicznej. Z tego samego względu ograniczone jest również stosowanie próby zginania próbek z naniesionymi siatkami podziałowymi. Użyteczność tej metody badań może

Ustalenie zależności odkształcenia ...

się jednak uwidocznić w przypadku stosowania jej do określenia odkształcalności technologicznej materiału przeznaczonego do procesu gięcia. Próba ta uwzględnia wpływ stanu powierzchni materiału na odkształcalność co jest w tym przypadku niezwykle istotne.

Wskaźnik stanu naprężenia w próbie rozciągania

Wyznaczone na podstawie wyników badań miedzi Cu 99,9 E, żelaza Armco E i stali OH18N9 przebiegi wartości wskaźnika stanu naprężenia w szyjce rozciąganej próbki w zależności od stopnia odkształcenia, udało się doskonale wyrazić wielomianem 3-go stopnia (3). Porównanie wykresów dla poszczególnych materiałów oraz wartości uzyskanych współczynników (tabl. 1) pozwala stwierdzić istnienie związku pomiędzy wartością stopnia wydłużenia równomiernego e_r a nachyleniem wykresu. Czym większa jest wartość e.,, tym bardziej strony jest przebieg funkcji k = f(e,) dla wartości $e_i > e_{r^*}$ Powyższe spostrzeżenia nie potwierdzają istnienia uniwersalnych rozwiązań sugerowanych w pracy [10]. Uzyskane w pracy funkcje k = f(e;) w postaci wielomianu są łatwo całkowalne. Wartości współczynników ap i az wielomianu można wyznaczyć jeżeli znane są wartości stopnia odkształcenia równomiernego en, oraz geometrii szyjki w dwóch fazach rozciągania. Najdogodniejsze jest pomierzenie tych wartości w momencie pojawienia się wyraźnie zarysowanej szyjki i po zerwaniu. Obliczenie zastępczego wskaźnika stanu naprężenia k_z dla tej próby, jako średniej całkowej funkcji $k = f(e_i)$ sprowadzono do zastosowania wzoru 4. W stosunku do średniej arytmetycznej obliczonej z wartości początkowej k_o i końcowej k_o wskaźnika stanu naprężeń, wartość średniej całkowej jest znacznie niższa. Znaczny udział w odkształceniu całkowitym fazy wydłużenia równomiernego (30%) wskazuje na słuszność określenia zastępczego wskaźnika stanu naprężenia jako średniej całkowej, czyli uwzględniające wielkość odkształcenia zachodzącego w określonym stanie naprężenia. W próbkach okrągłych z wytoczeniem, w całym zakresie odkształcenia wartość wskaźnika stanu naprężenia jest zmienna. lecz zakres tej zmienności jest niewielki. Zastępczy wskaźnik stanu naprężenia dla tych prób można obliczać jako średnią arytmetyczną wartości k i kp.

Graniczny stopień odkształcenia w próbie skręcania

Wyniki próby skręcania w badaniach wstępnych potwierdziły wysuwaną przez wielu autorów tezę, że odkształcenie na długości skręcanej próbki jest zmienne, a maksymalną wartość osiąga w miejscu złomu. Dalsze badania dotyczące próby skręcania, przeprowadzone w tej pracy wykazały, że niejed norodne odkształcenie na długości skręcanej próbki ma miejsce od momentu rozpoczęcia próby do jej zakończenia. Dla dokładniejszej analizy wprowadzone współczynnik niejednorodności odkształcenia $\delta = \frac{e_{max}}{e_{m}}$. W oparciu o przeprowadzone próby sporządzono wykresy zależności $\delta = f(e_{m})$. Na ich pod

stawie można stwierdzić występowanie dwóch odrębnych faz przebiegu odkształcenia. W fazie pierwszej współczynnik niejednorodności odkształcenia maleje w miarę wzrostu średniego stopnia odkształcenia i ilości obrotów. W fazie drugiej współczynnik & rośnie liniowo ze wzrostem stopnia od kształcenia e_.

Występowanie w drugiej fazie liniowej zależności $\delta = f(e_m)$ pozwoliła wyrazić ją prostym wzorem (7), w którym współczynnik kierunkowy "a" ma różne, podane w tablicy 2 wartości. Największe wartości osiąga dla żelaza Armco (0,109) a najmniejsze dla miedzi Cu 99,9 E (0,043). Miedź wykazała największą odkształcalność w tej próbie a żelazo Armco najmniejszą. Można by więc wysunąć wniosek, że wartość współczynnika "a" jest odwrotnie proporcjonalna do wartości odkształcenia granicznego. Potwierdzenie tego wniosku wymagałoby jednakże znacznego rozszerzenia badań w tym zakresie. Ponieważ moment zniszczenia należy również do drugiej fazy odkształcenia to znając dla danego materiału współczynnik kierunkowy "a", graniczny stopień odkształcenia lokalnego w miejscu złomu e_n można obliczyć z ilości skręceń do zniszczenia n_n, stosując wzór (8). Wartość e_m dla wszystkich materiałów jest znacznie niższa od e_p wyznaczonego z bezpośrednich pomiarów. Można stąd wyciągnąć wniosek, że do wyznaczania granicznego stopnia odkształcenia w próbie skręcania, w celu uzyskania dokładnych wartości, celowe jest użycie próbek z naniesioną rysą.

Odkształcalność graniczna miedzi Cu 99.9 E. żelaza Armco E i stali OH18N9

Odkształcalność graniczna miedzi dla całego zakresu stanów naprężeń objętego badaniami jest większa niż dla Armco. Różnica między odkształcalnością graniczną tych materiałów rośnie w miarę przechodzenia od wartości wskaźnika stanu naprężenia k = +1 do k = 0,0.

Odkszta calność graniczna stali OH18N9 przewyższa odkształcalność Armco dla wartości k > 0,33 i jest znacznie mniejsza dla k = 0. Dla k = 0,33 odkształcalność stali OH18N9 i żelazo Armco (wyrażone stopniem odkształcenia) są równe. Przebieg krzywych odkształcalności granicznej badanych materiałów nasuwa wniosek natury ogólnej, że ocena odkształcalności na podstawie wartości granicznego stopnia odkształcenia uzyskanej w jednego rodzaju próbie jest niewystarczająca. W tablicy 4 zestawiono i porównano wartości powszechnie przyjętych do wskaźników odkształcalności oraz wartości wykładników potęgowych krzywych umocnienia badanych materiałów. Okazało się, że zależnie od rodzaju próby (skręcanie lub rozciąganie) oraz przyjętego do oceny wskaźnika (A_r, A₅, A₁₀, Z, e_{pr}, e_{ps}, n_p) odkształcalność dla tego samego materiału może być uznana za dużą lub małą. W tablicy tej ustawiono w kolejności rosnących wartości poszczególnych wskaźników badane materiały. W kolumnie 1 (najmniejsza wartość) znalazły sie wszystkie materiały, a w kolumnie 3 (największa wartosć) stal OH18N9 i miedź. Znajduje tym samym potwierdzenie wysunięte wcześniej zastrzeżenie. że do oceny nie wystarczą wskaźniki uzyskane z jednej próby.

Tablica 4

| uporządkowane w kolejnosci rosnących wartosci wskaźnika materiały | | | | |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Rodz. próby | Charakte- ryst. wskaźniki | <u>wartość wskaźnika</u> materiał | | |
| | | 1 | 2 | 3 |
| Rozciąganie | A _r % | <u>16.9</u> Cu 99,9 E | 20.1 Armco E | 51.4 0H18N9 |
| | ^A 10 [%] | 24.8 Cu 99,9 E | <u>38.8</u> Armco E | 52.8 0H18N9 |
| | A5% | 40.0 Cu 99,9 E | 45.1 Armco E | 71.0 0H18N9 |
| | 2% | 69.9 Armco E | 77.9 0H18N9 | 88.7 Cu 99,9 E |
| | ep | <u>1.20</u> Armco E | 1.5 0H18N9 | 2.18 Cu 99,9 E |
| | m' | <u>0.31</u> Cu 99,9 E | O.40 Armco E | 0.65 0H18N9 |
| Skręcanie | n _p (obr) | 7.10 0H18N9 | <u>10.29</u> Armco E | 20.25 Cu 99,9 E |
| | ep | 1.65 0H18N9 | 2.46 Armco E | 4.83 Cu 99,9 E |
| Ściska- nie | m | 0,26 Cu 99,9 E | O.40 Armco E | 0.70 011809 |

Uzyskane funkcje odkształcalności pozwalają naekstrapolowanie wartości granicznego stopnia odkształcenia dla całego zakresu wartości wskaźnika stanu napreżeń k.

Zgodnie z wynikiem prac Schillera [9], przebieg krzywych odkształcalności granicznej w znacznej mierze zależy od skłonności materiału do umocnienia. Czym większa jest wartość wykładnika potęgowego krzywej umocnienia tym bardziej łagodny jest przebieg krzywej odkształcalności granicznej materiału. Nie udało się jednak znaleźć ogólnej zależności pomiędzy parametrami a, b, c występującymi we wzorze 10 a wartością wykładnika potęgowego umocnienia m. Z pewnością wymagałoby to rozszerzenia ilości gatunków materiałów poddanych badaniom.

8. Wnioski

- 1. Rozważania teoretyczne i wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że najwłaściwszą formą określania odkształcalności materiałów przeznaczonych do przeróbki plastycznej na zimno jest podanie zależności granicznego stopnia odkształcenia od wskaźnika stanu naprężenia. Zależność tę można przedstawić w formie analitycznej jakc tzw. funkcję odkształcalności granicznej (wzór 10) lub graficznej, czyli tzw. krzywej odkształcalności granicznej.
- 2. Opracowany sposób wyznaczanie odkszta²calności granicznej na podstawie prób rozciągania próbek okrągłych normalnych i z szyjką oraz próby skręcania próbek okrągłych, pozwala na drodze eksperymentalnej wyznaczyć krzywą lub funkcję odkształcalności dla stanów naprężeń określonych wskaźnikiem leżącym w przedziale 0≤k≤1,33, a przez ekstrapolację w oparciu o zależność funkcji (10) dla całego, istotnego dla procesów przeróbki plastycznej zakresu wartości wskaźnika stanu naprężeń.
- 3. Przeprowadzone opracowaną w pracy metodą, badania odkształcalności granicznej miedzi Cu 99,9 E, żelaza Armco E i stali OH18N9 pozwalają stwierdzić, że stosowane w praktyce do oceny odkształcalności wskaźniki uzyskane w pojedynczych próbach nie oddają w pełni tej własności materiału. Przebieg krzywych odkształcalności granicznej badanych materiałów (rys. 13) znacznie odbiega również od wyznaczonych na podstawie zależności podanej przez Schillera [9].
- 4. Wyznaczenie dla materiałów przeznaczonych do przeróbki plastycznej na zimno zależności granicznego stopnia odkształcenia od wskaźnika stanu naprężenia daje podstawy do optymalizacji parametrów procesu przeróbki tych materiałów.
- 5. Uzyskane w pracy wyniki i ustalone na ich podstawie zależności stanowią punkt wyjścia do dalszych badań odkształcalności materiałów. Szczególnie istotne jest doświadczalne wyznaczenie wartości wskaźnika stanu naprężenia $k_{\rm g}$ odpowiadającego stanowi naprężenia, w którym możliwa jest realizacja dowolnie dużego odkształcenia materiału bez obawy utraty spójności (e_n =∞).

LITERATURA

- Grosman F.: Praca doktorska. Instytut Inżynierii Materiażowej. Politechnika Śląska, Katowice 1973.
- [2] Iliuszin A.A.: Niekatoryje waprosy tieorii płasticzieskowo tieczenija Izw. An 3SSR, 1958 nr 2.
- [3] Grosman F., Godecki L.: Odkształcalność stali 18G2A, 18G2ACu i 18G2VA Wiadomości Hutnicze, 1972 nr 7-8.

- [4] Bridgman P.W.: Studies in Largo Plastic Flou and Fracture, New York, Toronto, London 1952.
- [5] Pełczyński T.: Niektóre zagadnienia wytężenia materiału. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, 1951 nr 7.
- [6] Smirnow-Aljajew G.A.: Soprotiwlenija matieriałłow płasticzeskomu dieformirowaniju. Moskwa 1961, Maszgiz.
- [7] Kołmogorow W.T.: Naprijażenija dieformacji rozruszenija. Moskwa 1970, Mietałłurgia.
- [8] Erbel St. Praca doktorska. Katedra Przeróbki Plastycznej. Warszawa 1965.
- [9] Schiller H.: Beitrag zum Einfluss der Art Sparnnungsnzustands auf das Umformvermögen metallischer Werkstoffe. Neue Hüte 1972 nr 7.
- [10] Truszkowski W.: Deformation of Metal at the Neek of a Strained Test
 Piece A Poles Sciences et de Lettres, Kraków 1952, vol. I, nr 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОТОБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ СОСТОЯНИЯ НАПРИЖЕНИЯ

Резюме

В работе произведен подбор простых исследовательских методов дающих возможность определить предельную деформацию для разных состояний напряжений а также установлено формулу функции позволяющей выразить зависимости предельной деформации от состояния напряжения так называемой функции предельного деформирования.

THE SETTELEMENT OF LIMIT STRAIN DEPENDENCE OF SELECTED MATERIALS UPON THE STATE OF STRESS

Summary

Some simple testing methods allowing to calculate limit strain have been selected in the work for different kinds of state of stress. The form of function allowing to express the dependence of strain deformation from the state of stress i.e. - limit deformability function has been chosen.