ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 18 Nr kol. 606

Franciszek GROSMAN, Zygmunt RAFALSKI
Jan ŁUKOWSKI

Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

FUNKCJA UMOCNIENIA ODKSZTAŁCENIOWEGO I FUNKCJA ODKSZTAŁCALNOŚCI GRANICZNEJ JAKO NOWOCZESNE WSKAŹNIKI OCENY PODATNOŚCI MATERIAŁU DO KSZTAŁTOWANIA OBJĘTOŚCIOWEGO NA ZIMNO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prowadzonych w IIM prac w zakresie ulepszania metodyki badań odkształcalności granicznej i umocnienia odkształceniowego. Przedstawiono również propozycje matematycznego opisu krzywych umocnienia i odkształcalności.

1. WSTĘP

Pojęcie plastyczności jako cechy materiałowej nie jest ściśle sprecyzowane. Zawarte w podstawowej literaturze [1, 2, 3, 4] definicje utożsamiają ją najczęściej z odkształcalnością, tzn. z podatnością materiału do trwałego odkształcania bez utraty spójności w danym stanie naprężeń, temperaturze, prędkości odkształcenia oraz ośrodku otaczającym odkształcany materiał. Do opracowania konkretnego procesu przeróbki plastycznej znajomość tej cechy materiałowej jest niewystarczająca, bowiem nie pozwala na określenie parametrów siłowych i energetycznych niezbędnych do jego realizacji. Jest więc uzasadnione charakteryzowanie plastyczności dwiema cechami materiałowymi, tz. odkształcalnością i naprężeniem uplastyczniającym. W procesach kształtowania objętościowego na zimno odkształcalność zależy głównie od stanu naprężeń, a naprężenie uplastyczniające od wielkości odkształcenia. Chcąc w pełni scharakteryzować przydatność materiału do konkretnych procesów przeróbki plastycznej należy więc wyrazić wartość naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia, a odkształcalność w funkcji stanu naprężenia.

Bliskie takiemu ujęciu było zaproponowane przez Pełczyńskiego [5] określenie tzw. "plastyczności technologicznej" za pomocą następujących wskaźników:

1) granicy plastyczności R_e, określającej początkową wartość naprężenia uplastyczniającego σ_p,
2) modułu umocnienia $D = d\sigma_p/d\varphi$, określającego przyrost naprężenia uplastyczniającego z przyrostem odkształcenia,

3) odporności materiału na zgniot $r = R_e/R_u \cdot (1 - 2)$), gdzie: R_u - wytrzymałość rozdzielcza, ν - współczynnik Poissona. Porównanie odporności na zgniot r z tzw. zdolnością zgniatania $Z = \sigma_i/\sigma_v$ procesu określa możliwość obróbki plastycznej materiału (σ_v - naprężenie zastępcze liczone wg Saint-Venanta, zaś σ_i wg hipotezy Hubera),
4) odkształcalności materiału scharakteryzowanej przewężeniem otrzymanym przy rozciąganiu próbek okrągłych.

Podawanie tych wartości jest w praktyce kłopotliwe i jak wykazały badania przeprowadzone w Instytucie Inżynierii Materiałowej ich wykorzystanie łączy się niejednokrotnie ze stosowaniem dużych przybliżeń. W związku z tym podjęto próbę wzajemnego powiązania ww. wskaźników, a tym samym ograniczenia ich ilości. Dwa pierwsze wskaźniki łącznie interpretowane dają pojęcie o wartości naprężenia uplastyczniającego w dowolnym etapie procesu kształtowania.

Trzeci wskaźnik zawiera w sobie m.in. informacje o schemacie stanu naprężenia, jakiemu poddany był odkształcony materiał (wykres wytężeniowy Hubera-Saint-Venanta [6]), zaś czwarty jest wielkością odkształcenia do utraty spójności. Tak ujmując, podatność materiału do obróbki plastycznej na zimno można określić dwoma zależnościami funkcyjnymi:

1. Uogólnioną funkcją umocnienia $\sigma_p = f(\varphi_i)$ uzależniającą naprężenie uplastyczniające σ_p od odkształcenia zastępczego φ_i.
2. Funkcją odkształcalności granicznej $\varphi_p = f(k)$, wyrażającą zależność między odkształceniem granicznym φ_p, tzn. odkształceniem do utraty spójności a stanem naprężeń wyrażonym wskaźnikiem $k = \sigma_m/\sigma_i$, gdzie σ_m - naprężenie średnie.

Zarówno uogólniona funkcja umocnienia - łącząca dwa pierwsze wskaźniki jak i funkcja odkształcalności granicznej - ujmująca dwa ostatnie wskaźniki zaproponowane przez Pełczyńskiego, zawierają więcej informacji, bowiem odnoszą się one nie tylko do jednoosiowego rozciągania, ale obejmują cały zakres stanów naprężeń. Obrazem graficznym funkcji umocnienia jest krzywa umocnienia, a funkcji granicznej krzywa odkształcalności granicznej.

2. KRZYWA UMOCNIENIA I METODY JEJ WYZNACZANIA

W procesach oróbki plastycznej spotyka się na ogół odkształcenia przekraczające znacznie granicę odkształceń równomiernych w próbie rozciągania oraz materiały wstępnie umocnione. Stąd też zaleca się, czemu dano wyraz w publikacjach [7, 8, 9], wyrażenia σ_p w funkcji odkształceń logarytmicznych φ, zamiast względnych $\varepsilon = \Delta L/L_o$ i $z = \Delta L/L$. Odkształcenia logarytmiczne określono wzorem:

$$\varphi = \int_{L_o}^{L} \frac{dL}{L}, \tag{1}$$

wynikającym z bardziej ogólnej zależności, ujmującej zastępcze odkształcenie plastyczne φ_i, upraszczają obliczenia i pozwalają uwzględnić uprzednie odkształcenia wstępne φ^o sumujące się arytmetycznie z bieżącym odkształceniem φ.

Z jednej strony naprężenie uplastyczniające σ_p zależy od wielu czynników [9], z drugiej zaś strony ich uwzględnienie w funkcji umocnienia znacznie komplikuje jej opis, co w dalszej konsekwencji ogranicza wykorzystanie w praktyce. Stąd też istniejące metody wyznaczania krzywej umocnienia na ogół z góry zakładają uzależnienie naprężenia σ_p tylko od odkształcenia φ i stałość pozostałych czynników.

2.1. Metody wyznaczania krzywej umocnienia

Daje się wyodrębnić trzy grupy doświadczalnych metod wyznaczania krzywej umocnienia $\sigma_p = f(\varphi_i)$ [8].

Do pierwszej grupy zaliczono proste próby wytrzymałościowe. Przydatne są tutaj próby jednoosiowego rozciągania, ściskania i skręcania - mniej próba zginania. Badania własne [10] w pełni potwierdziły przydatność próby rozciągania do przybliżonego wyznaczenia krzywej umocnienia.

Do drugiej grupy zaliczono metody wyznaczania naprężenia uplastyczniającego σ_p metalu wstępnie odkształconego na drodze obróbki plastycznej np. ciągnieniem, walcowaniem, kuciem). Otrzymane wyniki są zazwyczaj obciążone błędem spowodowanym głównie niejednorodnością odkształcenia, wywołaną tarciem. Wyznaczone krzywe nie mają charakteru w pełni ogólnego, ale mogą być przyjęte za podstawę obliczania parametrów w tych procesach odkształcenia, które były wykorzystywane do nadania odkształcenia wstępnego [10, 11, 12, 13].

Do trzeciej grupy zaliczono przeprowadzenie specjalnych prób wytrzymałościowych, przystosowanych do postaci badanego wyrobu, np. próba skręcania pierścieni wyciętych z blach. Metody te mogą mieć zastosowanie do wyznaczania zależności $\sigma_p = f(\varphi_i)$ na ogół dla wyrobów, dla których były opracowane, aczkolwiek spotyka się publikacje nie potwierdzające powyższego stanowiska.

2.2. Analityczny opis krzywych umocnienia

Znalezione doświadczalnie krzywe umocnienia wygodnie jest przedstawić w postaci analitycznej, stosując odpowiedni wzór aproksymujący. W pracy [7] zestawiono stosowane wzory aproksymujące, rozróżniając po raz pierwszy umocnienie odkształceniowe.

3. Krzywa odkształcalności granicznej

Funkcja odkształcalności granicznej jest pojęciem wprowadzonym stosunkowo niedawno, a jej wyznaczenie było możliwe dzięki pracom wielu badaczy zajmujących się odkształcalnością i poszukujących najbardziej uniwersalnego wskaźnika, charakteryzującego stan naprężeń i wywołane odkształcenie do utraty spójności. W pracach [14, 15, 16] metody badania odkształcalności podzielono na cztery grupy, na podstawie których ocenia się odkształcalność materiału, są to:

1) pojedyncze próby wytrzymałościowe,
2) kilka specjalnie dobranych prób wytrzymałościowych,
3) próby imitujące konkretne procesy obróbki plastycznej,
4) próby pozwalające wyznaczyć funkcję odkształcalności granicznej.

Jak już wspomniano funkcja odkształcalności granicznej wyraża zależność granicznego odkształcenia od stanu naprężenia. Stan naprężenia charakteryzuje się wskaźnikiem k, równym stosunkowi naprężenia średniego σ_m do naprężenia zastępczego σ_i liczonego wg hipotezy Hubera. Odkształcenie graniczne liczy się, w przypadku jego monotoniczności ze wzoru na zastępcze odkształcenie rzeczywiste.

$$\varphi_i = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2}. \tag{2}$$

Wskaźnik stanu naprężenia K dla większości procesów obróbki plastycznej na zimno waha się w granicach $-0{,}6 \leqslant k \leqslant 1{,}2$. Dlatego też, wyznaczenie funkcji odkształcalności granicznej wymaga przyjęcia prób, w których wartości wskaźnika stanu naprężenia obejmują ten przedział.

3.1. Sposoby odkształcenia pozwalające wyznaczyć krzywą odkształcalności granicznej

Dobór odpowiednich prób do wyznaczania krzywej odkształcalności granicznej był przedmiotem badań przeprowadzonych w Instytucie Inżynierii Materiałowej [14, 17, 18]. Powyższe badania pozwoliły określić następujące rodzaje próbek i sposoby odkształcania, w zupełności wystarczające do wyznaczenia krzywej odkształcalności granicznej:

1) rozciąganie próbek okrągłych normalnych, $k \gg 0{,}33$
2) rozciąganie próbek okrągłych ze wstępnie wytoczoną szyjką o stosunku $d/R = 2$ i $d/R = 4$, $k = f/d(R)$, dla $d/R = 2$ $k \geqslant 0{,}83$ a dla $d/R = 4$ $k \geqslant 1{,}33$,
3) ściskanie próbek cylindrycznych w warunkach tarcia suchego, $-0{,}58 < k < 0{,}2$,
4) skręcanie próbek okrągłych $k = 0$,
5) ściskanie próbek walcowych w warunkach tarcia płynnego $k = -0{,}58$.

Uzupełnieniem tych sposobów odkształcania może być:

6) zginanie próbek o przekroju prostokątnym i kwadratowym $0{,}25 \leqslant k \leqslant 0{,}58$.

Aby ograniczyć do minimum wpływ stanu powierzchni na odkształcalność graniczną zaleca się szlifowanie powierzchni próbek na chropowatość $R_a \leqslant 0{,}032$ mm.

Badania własne [19, 20, 21] w dużej mierze wyjaśniły zjawiska towarzyszące próbom rozciągania, ściskania i skręcania oraz pozwoliły na właściwą, pod kątem odkształcalności granicznej metodykę prowadzenia tych prób i interpretację otrzymywanych z nich wyników. I tak dla próby rozciągania [19] próbek okrągłych zaproponowano liczenie zastępczego wskaźnika k stanu naprężeń jako średniej całkowej z funkcji $k = f(\varphi_1)$, będącej łatwo całkowalnym wielomianem. Badania próby ściskania [20] dowiodły, że maksymalne odkształcenie lokalne prowadzące do utraty spójności występuje na powierzchni próbki w połowie jej wysokości, co wykorzystano w zaproponowanej - daleko uproszczonej - metodyce badań. Również wartości wskaźnika stanu naprężenia k osiągają maksimum w połowie wysokości próbki, a ze wzrostem gniotu maksymalne wartości wskaźnika stanu naprężeń mogą osiągnąć nawet wartości dodatnie. Występowanie w trakcie ściskania maksymalnych wartości wskaźnika stanu naprężeń oraz odkształcenia w środku wysokości próbki pozwala na ograniczanie się w badaniach do obszaru leżącego w bezpośrednim sąsiedztwie środka wysokości powierzchni bocznej, a tym samym stosowanie próbek z rysami naniesionymi na obwodzie w środku wysokości próbki.

Badania próby skręcania [21] potwierdziły przypuszczenie wielu autorów, że odkształcenie na długości próbki jest zmienne a maksymalną wartość osiąga w miejscu przełomu. Przeprowadzona w tej pracy analiza pozwoliła znaleźć między maksymalnym odkształceniem lokalnym a ilością obrotów do zniszczenia.

Tablica 1

Wzory określające wielkość odkształcenia granicznego φ_p w chwili utraty spójności oraz wskaźnika stanu naprężeń k dla poszczególnych prób

Rodzaj próby	Wskaźnik k	Odkształcenie graniczne φ_p
Rozciąganie próbek cylindrycznych	$k = \frac{1}{3}(1 + \frac{3}{4}\frac{d}{R})$	$\varphi_p = 2 \ln \frac{d_o}{d_1}$
Ściskanie próbek cylindrycznych (tarcie suche)	$k = \frac{\varphi_1+\varphi_2}{3\sqrt{\varphi_1^2+\varphi_1\varphi_2+\varphi_2^2}}$	$\varphi_p = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varphi_1^2+\varphi_1\varphi_2+\varphi_2^2}$
	$\varphi_1 = \ln \frac{h_o}{h_1}$	$\varphi_2 = \ln \frac{d_1}{d_o}$
Skręcanie pełnych próbek cylindrycznych	$k = 0$	$\varphi_p = \frac{tg\,\gamma}{\sqrt{3}}$
Zginanie	jak przy ściskaniu	

W tablicy zestawiono wzory pozwalające na określenie odkształcenia granicznego φ_p, jak i wskaźnika stanu naprężeń k dla poszczególnych rodzajów próbek i sposobów obciążenia.

3.2. Krzywa odkształcalności granicznej

Uzależnienie odkształceń granicznych φ_p od sposobów odkształcania opisywanych wskaźnikiem k pozwala skonstruować krzywą odkształcalności granicznej $\varphi_p = f(k)$. Grosman [14, 16] w przeciwieństwie do wcześniej stosowanych aproksymacji wielomianami zaproponował równanie:

$$\varphi_p = \frac{a}{(k - k_s)^c}, \tag{3}$$

gdzie a, c, k_s - wielkości stałe.

Funkcja $\varphi = f(k)$, zgodnie z wynikami prac [14, 16, 17, 23], posiada dwie asymptoty. Jedną asymptotę stanowi oś odciętych k a drugą prosta równoległa do osi rzędnych φ_p, leżąca po stronie ujemnych wartości osi odciętych.

4. PODSUMOWANIE

Omówione metody doświadczalne należy uznać za wystarczające do opisu umocnienia odkształceniowego i odkształcalności materiałów przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno. Podstawowe wyposażenie badawcze zapewnia realizację ww. metod, a podany sposób opracowywania wyników daje niezbędną ilość informacji o krzywych umocnienia i krzywych odkształcalności granicznej, będących podstawowymi charakterystykami materiału przeznaczonego do obróbki plastycznej na zimno.

Zaproponowana wyżej metoda oceny plastyczności została praktycznie wykorzystana w przemyśle części złącznych. Jednakże dopiero dalsze próby zastosowania opracowanej metodyki w odniesieniu do różnych technologii obróbki plastycznej mogą być potwierdzeniem słuszności i ewentualnej jej uniwersalności.

Na zakończenie należy dodać, że w dziedzinie badań i oceny materiałów do obróbki plastycznej jest jeszcze bardzo wiele do zrobienia, a słuszność zróżnicowanych koncepcji prowadzonych aktualnie badań może być zweryfikowana tylko w praktyce przemysłowej.

LITERATURA

[1] Encyklopedia techniki. Podstawy techniki. WNT, Warszawa 1974.
[2] Encyklopedia techniki. Materiałoznawstwo, WNT, Warszawa 1969.

[3] Encyklopedia techniki. Budowa Maszyn, WNT, Warszawa 1968.

[4] Polska Norma M-66001. Obróbka plastyczna. Nazwy i określenia.

[5] Pełczyński T.: Wskaźniki technologicznej plastyczności materiału.Obróbka plastyczna tom I, 1961, z. 2, ss. 7-19.

[6] Schneider M.: Podstawy przeróbki plastycznej metali, cz. I, AGH, Kraków 1964.

[7] Grosman F., Rafalski Z., Łukowski J.: Umocnienie odkształceniowe metali. Hutnik, 1977, XLIV, nr 12, ss. 560-565.

[8] Rafalski Z., Łukowski J.: Krzywa umocnienia i krzywa odkształcalności granicznej jako charakterystyki materiałów przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno. Biuletyn Techniczny ZPWM, 1977, XIX, nr 7/182, ss. 1-24.

[9] Rafalski Z.: Czynniki wpływające na naprężenia uplastyczniające. Rudy i Metale Nieżelazne, R22, 1977, nr 8, ss. 417-420.

[10] Rafalski Z.: Praca doktorska. Instytut Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, Katowice 1977 (nie publikowana).

[11] Latocha J., Rafalski Z.: Wyznaczenie krzywych umocnienia miedzi M1E i mosiądzu M63 w próbie ściskania. Rudy i Metale Nieżelazne,R21,1976, nr 9, ss. 345-348.

[12] Rafalski Z.: Gniot przy ciągnieniu a opór kształtowania przy ściskaniu. Wiadomości Hutnicze R. XXX, 1974 Nr 7-8, ss. 268-273.

[13] Rafalski Z., Stylok A.: Efekt Bauschingera a odkształcenia wstępne stali niskowęglowych z borem. Wiadomości Hutnicze, R. XXX, 1974, nr 11, ss. 408-411.

[14] Grosman F.: Praca doktorska. Instytut Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, Katowice 1973 (nie publikowana).

[15] Grosman F.: Przegląd metod badania odkształcalności, Hutnik 1975, nr 2, ss. 90-94.

[16] Grosman F.: Funkcja odkształcalności granicznej - obróbka plastyczna, t. XV, z. 4, 1976, ss. 197-202.

[17] Sprawozdanie nr 13/71 IIM Pol. Śląskiej, Katowice 1971 (nie publikowane).

[18] Grosman F.: Odkształcalność metalu w procesach przeróbki plastycznej na zimno. Mechanik 1973 nr 11, ss. 574-577.

[19] Grosman F.: Wskaźnik stanu naprężeń w próbie rozciągania próbek okrągłych. Obróbka plastyczna t. XV z. 3, 1976, ss. 129-132.

[20] Grosman F., Łukowski J.: Analiza naprężeń i odkształceń na powierzchni ściskanej próbki. Mechanik 1977 nr 4, ss. 172-175.

[21] Grosman F.: Niejednorodność odkształcenia na długości skręcanej próbki. Obróbka plastyczna, t. XV, z. 4, 1976, ss. 203-206.

[22] Grosman F., Godecki L.: Odkształcalność stali 18G2A, 18G2ACu i 18G2VA. Wiadomości Hutnicze, 1972, nr 7-8.

[23] Erbel S.: Praca doktorska. Katedra Przeróbki Plastycznej Pol. Warszawskiej, Warszawa 1965.

ФУНКЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УКРЕПЛЕНИЯ И ФУНКЦИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ КАК СОВРЕМЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОДАТЛИВОСТИ МЕТАЛЛА К ХОЛОДНОМУ ОБЪЁМНОМУ ФОРМИРОВАНИЮ

Р е з ю м е

В статье даются результаты проведённых в IIM работ в области улучшения методики исследований предельной деформации и деформационного укрепления. Приводятся тоже предложения математичеокого описания кривых укрепления и деформации.

THE FUNCTION OF STRAIN HARDENING AND THE FUNCTION OF BOUNDARY DEFORMABILITY AS MODERN INDICATORS OF ESTIMATION OF MATERIAL SUSCEPTIBILITY TO CAPACITY COLD FORMING

S u m m a r y

The paper presents the results of research on amendment of the methodology of research on boundary deformability and strain hardening, carried on in IIM. The proposals of mathematical description of hardening and deformability curves have been also presented.