

OSZACOWANIE ENERGII DYSYPOWANEJ W PROCESIE DEFORMACJI PLASTYCZNEJ
NIEKTÓRYCH METALI

JANUSZ KLEPACZKO (WARSZAWA)

1. Uwagi wstępne

Możliwość obliczania energii dysypowanej w procesach deformacji plastycznej metali pozwala na wykorzystanie tej właściwości w niektórych problemach praktycznych. Celem niniejszej pracy jest podanie metody oszacowania tej energii dla miedzi oraz aluminium, przy czym uwzględnia się wpływ temperatury i prędkości odkształcenia na krzywą umocnienia tych metali. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w badaniach udarności. Z tego powodu zostało ono omówione bardziej szczegółowo.

Całkowitą pracę W dysypowaną w procesie deformacji plastycznej można obliczyć z zależności

$$(1.1) \quad W = \int_V \int_0^{\varphi_w} \sigma[\eta(\varphi), \varphi, T] d\varphi dV,$$

gdzie V oznacza objętość materiału odkształcanego, a φ_w odkształcenie logarytmiczne, przy którym zakończono proces deformacji. Równocześnie zakłada się, że naprężenie plastycznego płynięcia σ jest pewną funkcją odkształcenia φ , prędkości odkształcenia η i temperatury T ,

$$(1.2) \quad \sigma = \sigma(\varphi, \eta, T),$$

przy czym w obecnej pracy temperatura T jest traktowana jako parametr. Należy dodać, że funkcja $\eta(\varphi)$ we wzorze (1.1) opisuje zmiany prędkości odkształcenia w zależności od odkształcenia podczas procesu deformacji.

Określoną postać związku (1.2) przyjmiemy z pracy [3], mianowicie

$$(1.3) \quad \sigma = B(T) \varphi^{m(T)} \eta^{n(T)};$$

$B(T)$ oznacza moduł plastyczności zależny od temperatury, $m(T)$ wykładnik umocnienia jako funkcja temperatury oraz $n(T)$ czułość na prędkość odkształcenia również zależną od temperatury. Równanie (1.3) wykazuje pewną niedogodność, mianowicie jest słuszne dla odkształceń większych niż początkowe odkształcenia sprężyste i z tego powodu nie nadaje się do opisu krzywej umocnienia w zakresie małych odkształceń (rzędu mniejszych niż 1%). Ponieważ jednak dla takich metali

w stanie wyżarzonym, jak np. dla aluminium, miedzi, ołowiu, niklu, obszar odkształceń sprężystych jest niewielki i brak fizycznej granicy plastyczności, przeto prawo o postaci (1.3) jest słuszne w bardzo dużym zakresie odkształceń plastycznych. Jak wykazała analiza przeprowadzona dla miedzi i aluminium w pracy [3], zmiany $B(T)$, $m(T)$ i $n(T)$ w zależności od temperatury można opisać następującymi funkcjami:

$$B(T) = C \exp\left(-\frac{q}{3T_m - T}\right),$$

$$m(T) = m_0 \left(1 - \frac{T}{T_m}\right) \quad \text{lub} \quad m(T) = m_0(1 - \theta),$$

$$n(T) = aT \quad \text{lub} \quad n(T) = \alpha_1 \theta,$$

gdzie C , q , m_0 i a oznaczają stałe materiałowe, T_m temperaturę topienia, θ aktualną temperaturę w skali homologicznej ($\theta = T/T_m$).

Uwzględniając zależność (1.3) mamy

$$W = B(T) \int_0^{\varphi_w} \int_0^{\varphi_r} \varphi^{m(T)} [\eta(\varphi)]^{n(T)} d\varphi dV.$$

Jeżeli ograniczyć się np. do analizy próby rozciągania, to dla odkształceń mniejszych niż wydłużenie równomierne φ_r ($\varphi_w \leq \varphi_r$) całka $\int_V dV$ jest równa objętości materiału V deformującej się części próbki: $\int_V dV = V$. Natomiast jeżeli rozciągana próbka ulega rozerwaniu, to całkowita energia dysypowana w tym procesie wynosi

$$(1.4) \quad W = VB(T) \int_0^{\varphi_r(\eta, T)} \varphi^{m(T)} [\eta(\varphi)]^{n(T)} d\varphi + W_s(\eta, T).$$

Energia ta jest więc sumą energii W_r dysypowanej podczas równomiernego odkształcania się próbki i energii dysypowanej w szyjce W_s . Symbolicznie zapisano, że energia dysypowana w szyjce jest również pewną funkcją prędkości odkształcania i temperatury. Wobec skomplikowanego i zmieniającego się podczas procesu deformacji rozkładu odkształceń w szyjce [6] oszacowanie W_s nastęrcza duże trudności. Ponieważ jednak dla metali w stanie wyżarzonym $W_r \gg W_s$, przeto w dalszej części pracy energia W_s będzie pomijana. Należy równocześnie dodać, że górna granica całkowania we wzorze (1.4), tj. wydłużenie równomierne φ_r jest też zależna od prędkości odkształcania i temperatury.

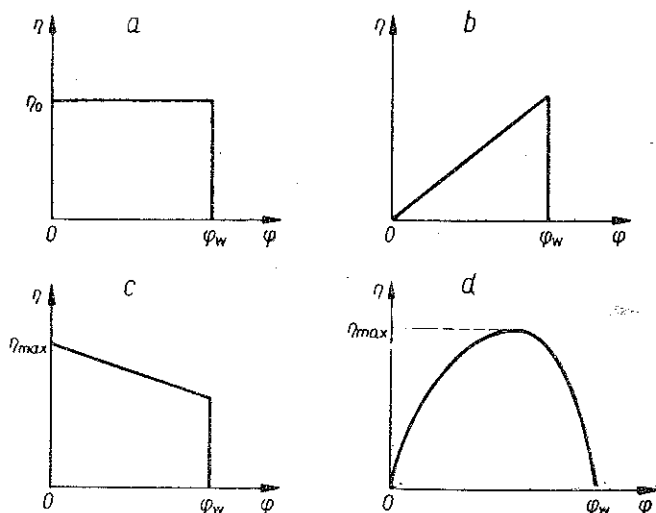
Funkcja $\eta(\varphi)$ opisująca zmiany prędkości odkształcania nie została dotychczas określona. Cztery podstawowe wykresy tej funkcji zostały przedstawione na rys. 1.

Pierwszy przypadek jest najczęściej spotykany, gdy prędkość odkształcania podczas procesu deformacji jest w przybliżeniu stała (rys. 1a), więc kiedy

$$(1.5) \quad W = \frac{VB(T) \eta_0^{n(T)}}{m(T)+1} \varphi_w^{m(T)+1}, \quad \eta(\varphi) = \eta_0 = \text{const.}$$

Po podstawieniu funkcji $B(T)$, $m(T)$ i $n(T)$ otrzymuje się

$$(1.6) \quad W = CV \frac{\eta_0^{\alpha T} \varphi_w^{m_0(1-\theta)+1}}{m_0(1-\theta)+1} \exp\left(-\frac{q}{3T_m - T}\right), \quad \eta(\varphi) = \eta_0 = \text{const.}$$



Rys. 1. Cztery podstawowe wykresy funkcji $\eta = \eta(\varphi)$ opisującej zmiany prędkości odkształcenia podczas procesu deformacji

W drugim przypadku (rys. 1b), spotykanym raczej rzadko, prędkość odkształcenia wzrasta proporcjonalnie do odkształcenia; wówczas

$$(1.7) \quad W = \frac{VB(T)b^{n(T)}}{m(T) + n(T) + 1} \varphi_w^{m(T)+n(T)+1}, \quad \eta(\varphi) = b\varphi$$

lub

$$(1.8) \quad W = CVb^{\alpha T} \frac{\varphi_w^{m_0(1-\theta)+\alpha T+1}}{m_0(1-\theta)+\alpha T+1} \exp\left(-\frac{q}{3T_m - T}\right).$$

Trzeci typ zmiany prędkości odkształcenia (rys. 1c) może dobrze aproksymować często spotykany przypadek przy wszelkich próbach na młotach spadowych (młocie typu Charpy'ego itp.)

$$(1.9) \quad W = VB(T) \int_0^{\varphi_w} (\eta_{\max} - a\varphi)^{n(T)} \varphi^{m(T)} d\varphi, \quad \eta(\varphi) = \eta_{\max} - a\varphi$$

lub

$$(1.10) \quad W = VC \exp\left(-\frac{q}{3T_m - T}\right) \int_0^{\varphi_w} (\eta_{\max} - a\varphi)^{\alpha T} \varphi^{m_0(1-\theta)} d\varphi.$$

Ostatni przypadek odnosi się do zmiany prędkości odkształcenia o charakterze impulsu; wówczas

$$(1.11) \quad W = VB(T) \eta_{\max}^{n(T)} \int_0^{\varphi_w} (\sin \omega\varphi)^{n(T)} \varphi^{m(T)} d\varphi, \quad \eta(\varphi) = \eta_{\max} \sin \omega\varphi$$

lub

$$(1.12) \quad W = VC \eta_{\max}^{\alpha T} \exp\left(-\frac{q}{3T_m - T}\right) \int_0^{\varphi_w} (\sin \omega\varphi)^{\alpha T} \varphi^{m_0(1-\theta)} d\varphi.$$

Omówione przypadki umożliwiają obliczenie dysypowanej energii przy odpowiednio zmieniającej się prędkości odkształcenia, gdy temperatura jest traktowana jako parametr.

2. Oszacowanie energii dla miedzi i aluminium w stanie wyżarzonym; sprawdzenie doświadczalne

W celu orientacyjnego sprawdzenia wyprowadzonych zależności zostały przeprowadzone po dwie serie eksperymentów dla miedzi i aluminium w stanie wyżarzonym. Pierwsza seria polegała na przeprowadzeniu prób rozciągania na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej i otrzymaniu wykresów σ jako funkcji φ ; na tej podstawie obliczono stałe materiałowe we wzorze (1.3). Druga seria badań została przeprowadzona na młocie typu Charpy'ego, gdzie rejestrowano energię zerwania próbek. Energie zarejestrowane na młocie dla miedzi i aluminium porównano następnie z obliczeniami przeprowadzonymi dla różnych temperatur z równoczesnym uwzględnieniem wpływu prędkości odkształcenia na krzywą umocnienia.

Zarówno badania statyczne jak i dynamiczne przeprowadzono na próbkach o jednakowym kształcie. Próbki z miedzi M1 zostały wyżarzone w temperaturze 550°C w czasie 1 godz., próbki z aluminium 99,97% Al wyżarzone w temperaturze 450°C również w czasie 1 godz.

Otrzymane w wyniku doświadczeń uśrednione wartości modułu plastyczności B , wykładnika umocnienia m i czułości na prędkość n dla temperatury pokojowej ($T \approx 290^\circ\text{K}$) wynoszą odpowiednio:

$$\text{Cu: } B(290) = 75,8 \text{ kG/mm}^2, \quad m(290) = 0,621, \quad n(290) = 0,0137,$$

$$\text{Al: } B(290) = 17,6 \text{ kG/mm}^2, \quad m(290) = 0,392, \quad n(290) = 0,017.$$

Ponieważ w obecnej pracy nie badano wpływu prędkości odkształcenia, to wartości czułości na prędkość $n(290)$ przyjęto z pracy [3]. Wszystkie statyczne próby rozciągania przeprowadzono dla prędkości odkształcenia $\eta_{\text{stat}} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ sek}^{-1}$.

Badania dynamiczne przeprowadzono na młocie wahadłowym typu Charpy'ego o energii maksymalnej młota 15 kGm i 30 kGm. Otrzymano następujące średnie wartości energii zerwania próbek:

$$\text{Cu: } \bar{W}_{30} = 17,1 \pm 0,1 \text{ kGm}, \quad w_r = 11,41 \text{ kGmm/mm}^3,$$

$$\text{Al: } \bar{W}_{30} = 10,53 \pm 0,05 \text{ kGm}, \quad w_r = 3,963 \text{ kGmm/mm}^3,$$

$$\bar{W}_{15} = 10,65 \pm 0,65 \text{ kGm}, \quad w_r = 3,918 \text{ kGmm/mm}^3,$$

gdzie przez \bar{W}_{30} oznaczono średnią energię zerwania próbki z maksymalną energią młota 30 kGm, przez \bar{W}_{15} analogiczną wartość dla energii młota 15 kGm. Przez w_r oznaczono energię jednostkową przypadającą na jednostkę objętości metalu

$$w_r = \frac{W}{V}.$$

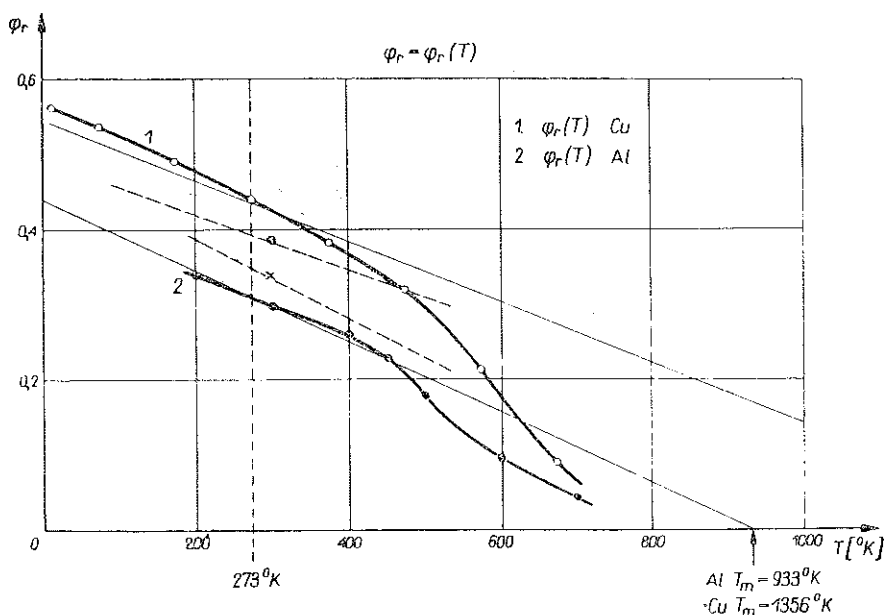
W każdej serii zrywano po pięć próbek, przy czym po zerwaniu mierzono również wydłużenia równomierne φ_r , które po uśrednieniu wynoszą odpowiednio

$$\text{Cu: } (\bar{\varphi}_r)_{\text{stat}} = 0,3757, \quad (\bar{\varphi}_r)_{\text{dyn}} = 0,3839,$$

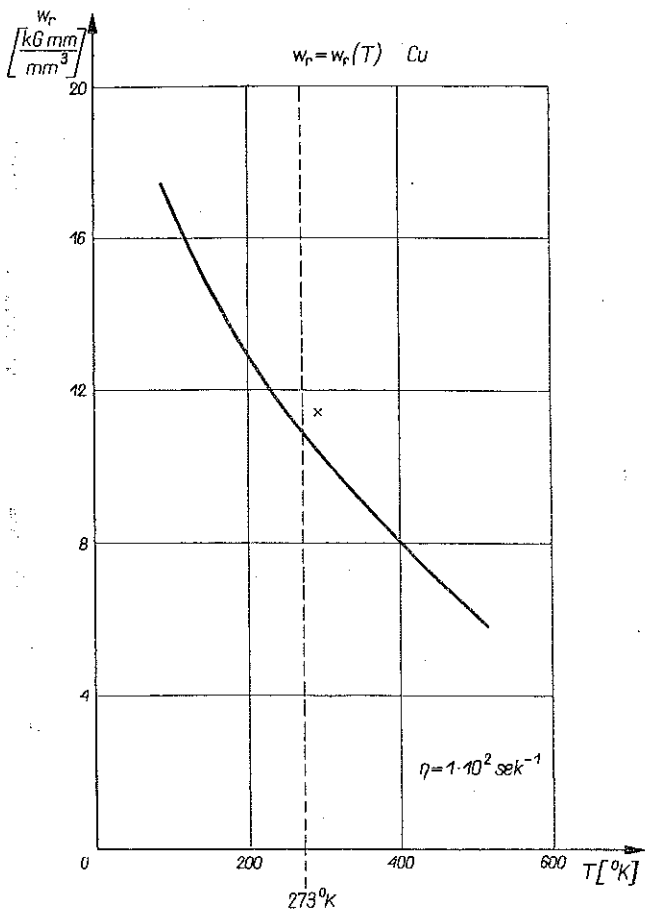
$$\text{Al: } (\bar{\varphi}_r)_{\text{stat}} = 0,2735, \quad (\bar{\varphi}_r)_{\text{dyn}} = 0,3401.$$

Porównując wyniki doświadczeń należy stwierdzić, że wydłużenia równomierne są znacznie mniejsze od możliwej wartości teoretycznej, która wynosi $\varphi_r = m(T)$. Różnica ta jest spowodowana niejednorodnością próbki [5.] Czynnikiem powodującym ten efekt mogą być np. anizotropia materiału, niedokładności wykonania próbki itp. Aby uwzględnić wspomniany fakt, wprowadzimy współczynnik jednorodności s ; wówczas

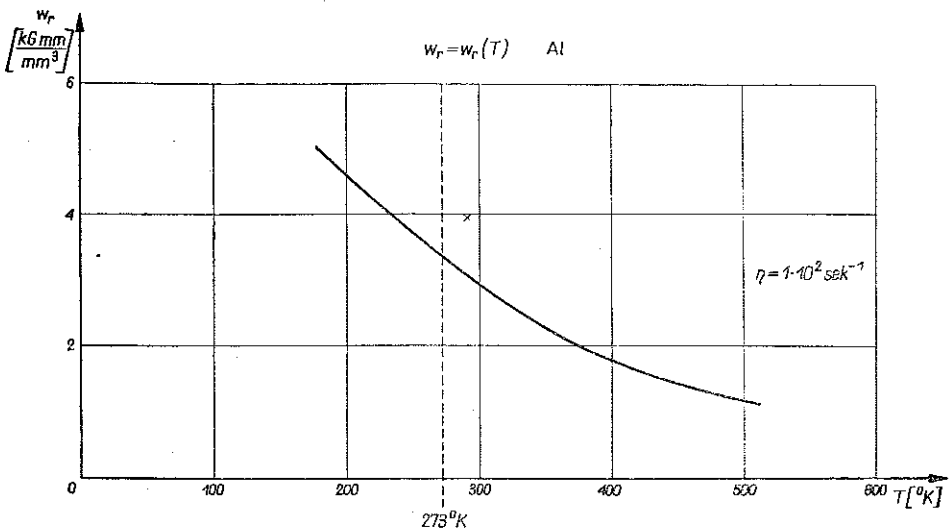
$$\varphi_r(T) = sm(T), \quad 0 < s \leq 1.$$



Rys. 2. Wartości wydłużeń równomiernych jako funkcja temperatury; dane dla miedzi wg pracy [1], dane dla aluminium wg pracy [6]. Cienkie linie ciągłe przedstawiają aproksymacje tych wyników równaniem $\varphi_r = sm(T)$. Punktami \circ i \times oznaczono wartości wydłużeń dla miedzi i aluminium uzyskane z własnych badań. Linie przerywane oznaczają aproksymacje $\varphi_r = \varphi_r(T)$ przyjęte do obliczeń



Rys. 3. Wyniki obliczeń energii jednostkowej w_r dla miedzi przy poszczególnych temperaturach; × wartość uzyskana na drodze doświadczalnej (młot typu Charpy'ego, maksymalna energia początkowa 30 kGm)



Rys. 4. Wyniki obliczeń energii jednostkowej w_r dla aluminium przy poszczególnych temperaturach; × wartość uzyskana na drodze doświadczalnej, średnia dla początkowej energii młota 30 kGm i 15 kGm

Gdy próbka jest idealnie jednorodna, to $s = 1$ i wówczas warunek $\varphi_r = m(T)$ jest ściśle spełniony. Wartość współczynnika jednorodności s nie jest z góry wiadoma i nie można jej przewidzieć; z tego powodu s należy wyznaczać doświadczalnie. Dla użytych próbek i badanych materiałów otrzymano następujące wartości s : $s_{Cu} = 0,605$ oraz $s_{Al} = 0,698$; wyznaczono je z prób statycznych.

Aby obliczyć dysypowaną energię jednostkową dla prób na młocie Charpy'ego, wykorzystano zależność (1.6) przyjmując $\eta = \text{const}$, przy czym dla używanego do badań młota i wymiarów użytych próbek $\eta = 1,04 \cdot 10^2 \text{ sek}^{-1}$. Przyjęcie stałej prędkości odkształcenia nie powoduje w tym przypadku zbyt dużych błędów z tego powodu, że zapas energii młota jest odpowiednio duży w stosunku do energii dysypowanej przy rozerwaniu próbki. Jako górną granicę całkowania przyjęto wydłużenia równomierne obliczane ze wzoru $\varphi_r(T) = s^* m(T)$. Ponieważ pominięto tu wpływ prędkości odkształcenia na wydłużenie równomierne, to dla zrekompensowania tego faktu do obliczeń przyjęto wartości współczynnika jednorodności s^* wyznaczone dla wartości $(\bar{\varphi}_r)_{\text{dyn}}$; wartości te wynoszą odpowiednio $s_{Cu} = 0,618$ oraz $s_{Al} = 0,867$.

Obliczenia energii jednostkowej przeprowadzono przy wymienionych założeniach dla przedziału temperatur od 100°K do 500°K . Dla zilustrowania realności założeń na rys. 2 przedstawiono doświadczalne wartości wydłużeń równomiernych jako funkcję temperatury wg prac [1 i 6]. Równocześnie na rys. 2 zaznaczono wartości wydłużeń równomiernych uzyskane z obecnych badań; liniami przerywanymi przedstawiono przyjęte aproksymacje dla warunków statycznych.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyniki obliczeń energii jednostkowych w_r dla poszczególnych temperatur. Punktami zaznaczono podane uprzednio wartości doświadczalne. Obliczeń dokonano przy następujących wartościach stałych materiałowych:

$$\text{Cu: } C = 1,447 \cdot 10^5 \text{ kG/mm}^2, \quad q = 2,854 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{K}, \quad T_m = 1356^\circ\text{K}, \\ m_0 = 0,790, \quad \alpha = 4,725 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{K},$$

$$\text{Al: } C = 3,495 \cdot 10^5 \text{ kG/mm}^2, \quad q = 2,483 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{K}, \quad T_m = 933^\circ\text{K}, \\ m_0 = 0,569, \quad \alpha = 5,86 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{K}.$$

Podane wartości stałych przyjęto według pracy [3], jednak niektóre z nich zmieniiono, aby wzór (1.3) dobrze opisywał otrzymane krzywe umocnienia w temperaturze $T = 290^\circ\text{K}$. Na przykład, w wyniku obliczeń dla temperatury pokojowej ($T = 290^\circ\text{K}$) otrzymano Cu: $w_r = 10,55 \text{ kGmm/mm}^3$, Al: $w_r = 3,146 \text{ kGmm/mm}^3$; zgodność tych wartości z uprzednio podanymi wartościami doświadczalnymi należy uznać za dobrą zarówno dla miedzi jak i dla aluminium. Różnice pomiędzy wartościami doświadczalnymi i obliczonymi nie przekraczają dla miedzi 10%, dla aluminium 20%, przy czym wskutek pominięcia energii dysypowanej w szyjce obliczone wartości są zawsze mniejsze od doświadczalnych. Należy również dodać, że w obydwu przypadkach obliczone energie jednostkowe zmniejszają się prawie liniowo ze wzrostem temperatury.

3. Oszacowanie energii po wstępnym odkształceniu plastycznym

Jeżeli odkształcić próbkę z prędkością odkształcenia η_w i w temperaturze T_w lub w skali homologicznej $\theta_w = T_w/T_m$ do wartości odkształcenia φ_w , a następnie odkształcać dalej lecz z prędkością η_d i w temperaturze T_d lub $\theta_d = T_d/T_m$ do wartości odkształcenia φ_d , to i w tym przypadku istnieje możliwość oszacowania energii dysypowanej w takim procesie. Przyjmując $\eta_w = \text{const}$, $T_w = \text{const}$ oraz $\eta_d = \text{const}$, $T_d = \text{const}$, można wykorzystać zależność (1.4); wówczas

$$(3.1) \quad W_w = \frac{VB(T_w) \eta_w^{n(T_w)}}{m(T_w)+1} \varphi_w^{m(T_w)+1},$$

$$(3.2) \quad W_d = \frac{VB(T_d) \eta_d^{n(T_d)}}{m(T_d)+1} (\varphi_d^{m(T_d)+1} - \varphi_w^{m(T_d)+1}).$$

Stosunek energii w_d/w_w przedstawi się w postaci

$$(3.3) \quad \frac{w_d}{w_w} = \frac{B(T_d)}{B(T_w)} \frac{m(T_w)+1}{m(T_d)+1} \frac{\eta_d^{n(T_d)}}{\eta_w^{n(T_w)}} \left(\frac{\varphi_d^{m(T_d)+1}}{\varphi_w^{m(T_w)+1}} - \varphi_w^{m(T_d)-m(T_w)} \right).$$

Po uwzględnieniu uprzednio podanych postaci funkcji $B(T)$, $m(T)$ i $n(T)$ wzór (3.3) przyjmie formę

$$(3.4) \quad \frac{w_d}{w_w} = \frac{\eta_d^{\alpha T_d}}{\eta_w^{\alpha T_w}} \frac{m_0(1-\theta_w)+1}{m_0(1-\theta_d)+1} \left(\frac{\varphi_d^{m_0(1-\theta_d)+1}}{\varphi_w^{m_0(1-\theta_w)+1}} - \varphi_w^{m_0(\theta_w-\theta_d)} \right) \times \\ \times \exp \frac{q(T_w - T_d)}{(T_d - 3T_m)(T_w - 3T_m)}.$$

Jeżeli zmianom ulega tylko temperatura przy stałej prędkości odkształcenia, tj. $\eta_d = \eta_w = \eta = \text{const}$, to wówczas we wzorze (3.4) trzeba przyjąć

$$\frac{\eta_d^{\alpha T_d}}{\eta_w^{\alpha T_w}} = 1.$$

O ile zmienia się tylko prędkość odkształcenia, tj. $T_d = T_w = T = \text{const}$, to zależność (3.4) znacznie się upraszcza:

$$(3.5) \quad \frac{w_d}{w_w} = \left(\frac{\eta_d}{\eta_w} \right)^{\alpha T} \left[\left(\frac{\varphi_d}{\varphi_w} \right)^{m_0 \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) + 1} \right];$$

temperatura T występuje w tym przypadku jako parametr.

Całkowita energia dysypowana podczas takiego procesu wyniesie

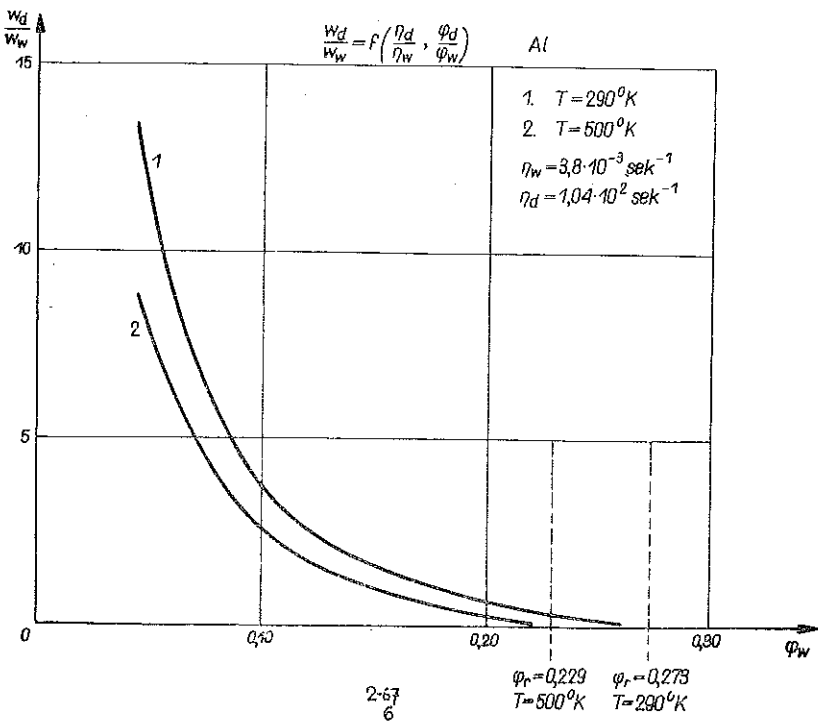
$$W = W_w + W_d.$$

Ponieważ

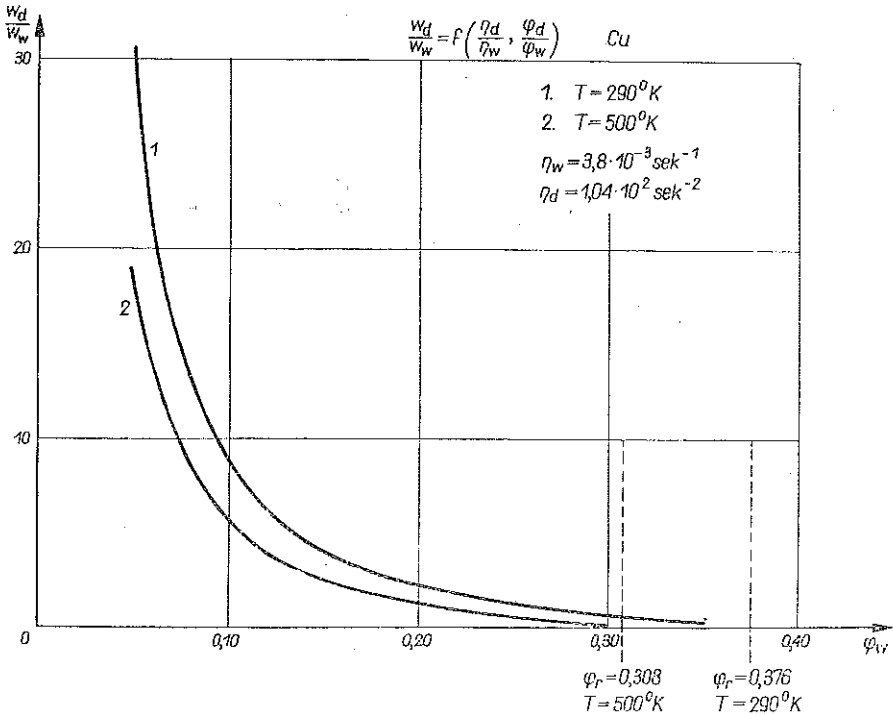
$$W_d = W_w f \left[\left(\frac{\eta_d}{\eta_w} \right), \left(\frac{\varphi_d}{\varphi_w} \right) \right],$$

to

$$W = W_w \left\{ 1 + f \left[\left(\frac{\eta_d}{\eta_w} \right), \left(\frac{\varphi_d}{\varphi_w} \right) \right] \right\}.$$



Rys. 5. Wyniki obliczeń dla aluminium stosunku w_d/w_w dla dwóch wartości temperatur $T = 290^{\circ}\text{K}$ i $T = 500^{\circ}\text{K}$ przy rosnących wartościach odkształcenia wstępnego φ_w . Wartości $\varphi_r(T)$ przyjęto wg aproksymacji linią przerywaną na rys. 2



Rys. 6. Obliczone dla miedzi zmiany stosunku w_d/w_w dla dwóch wartości temperatur $T = 290^{\circ}\text{K}$ i $T = 500^{\circ}\text{K}$ przy rosnących wartościach odkształcenia wstępnego φ_w . Wartości $\varphi_r(T)$ przyjęto wg aproksymacji linią przerywaną na rys. 2

A więc całkowitą energię W można obliczyć znając tylko energię odkształcenia wstępnego W_w oraz prędkości odkształcenia η_a i η_w .

Wzór (3.5) został wykorzystany do konkretnych obliczeń dla miedzi i aluminium przy tych samych wartościach prędkości η_w i η_a , jakie stosowano w próbach statycznych i na młocie Charpy'ego, mianowicie $\eta_w = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ sek}^{-1}$, $\eta_a = 1,04 \cdot 10^2 \text{ sek}^{-1}$. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch temperatur $T = 290^\circ\text{K}$ i $T = 500^\circ\text{K}$ przy różnych wartościach odkształcenia wstępnego φ_w , $0,05 \leq \varphi_w \leq \varphi_r$, zakładając równocześnie $\varphi_a = \varphi_r$. Uzyskane w ten sposób wykresy $w_a/w_w = f(\eta_a/\eta_w, \varphi_a/\varphi_w)$ zostały przedstawione na rysunkach 5 i 6. Na podstawie otrzymanych wykresów można stwierdzić, że w miarę wzrostu φ_w stosunek w_a/w_w szybko maleje zdążając do zera dla $\varphi_w = \varphi_r$. Przy wyższych temperaturach wartości stosunku w_a/w_w są odpowiednio mniejsze.

4. Dyskusja

Przeprowadzona analiza energii dysypowanej podczas procesu deformacji plastycznej została oparta na zależności opisującej krzywą umocnienia niektórych metali [wzór (1.3)] umożliwiając obliczenia ilościowe. W rozważaniach pominięto efekty historii prędkości [4], tj. występującą niejednoznaczność funkcji (1.2) przy zmianach prędkości odkształcenia i temperatury. Pominięcie tych efektów nie powoduje jednak w obecnym przypadku zbyt dużych błędów.

Wyprowadzone zależności umożliwiają ilościowe obliczenia dysypowanej energii w różnych temperaturach i przy różnych prędkościach odkształcenia, a także przy zmianach prędkości odkształcenia i temperatury. Otrzymane rezultaty są również jakościowo zgodne z wynikami doświadczeń, uzyskanymi dla miękkiej stali w pracy [2].

Wykorzystując np. zależności (3.3)–(3.5) można obliczać udarność przy różnych temperaturach dla wstępnie odkształconego metalu przy danej temperaturze w warunkach statycznych. Oczywiście istnieje poza tym znaczna liczba możliwości wykorzystania wprowadzonych związków.

Literatura cytowana w tekście

1. R. P. CARREKER, W. R. HIBBARD, *Tensile deformation of high purity copper as a function of temperature, strain rate, and grain size*, Acta Met., **1** (1953), 654.
2. E. DRESCHER, *Wpływ wstępnego odkształcenia plastycznego na energię zrywania udarowego*, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, **4**, 4 (1966), (w druku).
3. J. KLEPACZKO, *O potęgowej postaci mechanicznego równania stanu z uwzględnieniem temperatury*, Rozpr. Inżyn., **3**, 13 (1965), 561.
4. J. KLEPACZKO, *Wpływ zmian prędkości odkształcenia na krzywą umocnienia aluminium*, Rozprawa doktorska, IPPT PAN, 1965.
5. Z. MARCINIĄK, *Wydłużenie równomierne próbek o kilku szczególnych rodzajach niejednorodności*, Arch. Hutn., **3**, 11 (1966), 273.
6. В. А. ПАВЛОВ, *Физические основы пластических деформации металлов*, Изд. АН СССР, Москва 1962.
7. W. TRUSZKOWSKI, Z. JASIEŃSKI, *An experimental analysis of the strain distribution in the neck of a tensile specimen*, J. Inst. Metals, **92** (1963–64), 225.

Резюме

ОЦЕНКА ДИССИПИЦИРОВАННОЙ ЭНЕРГИИ
В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе проводится анализ, в результате которого получены зависимости, дающие возможность оценки, диссипицированной энергии в процессе пластической деформации некоторых металлов при разных скоростях деформации и разных температурах. Числовые расчеты и эксперименты проводились для двух металлов, а именно: для меди и алюминия. В результате проведенных экспериментов констатировано, надлежащее согласие оценки со значениями полученными аналитическим путем.

В дальнейшей части работы даются зависимости, позволяющие оценить энергию для случая металла, деформированного до некоторой степени деформации φ_w с данной скоростью деформации η_w и при данной температуре T_w ; затем этот металл подвергается дальнейшей деформации, но с другой скоростью η_a и при другой температуре T_a .

Разработка этого вопроса позволяет напр. оценить ударную вязкость предварительно деформированных металлов в статических условиях.

Summary

ESTIMATION OF THE ENERGY DISSIPATED IN THE COURSE OF A PLASTIC STRAIN
PROCESS OF SOME METALS

As a result of the present analysis relations are obtained enabling an estimation of the energy dissipated in the course of a plastic strain process of some metals at various strain rates and various temperatures. Numerical computations and experiments have been performed for two metals: copper and aluminium. As a result of the experiments it is found that the agreement between the estimations with the values obtained by experiment is good.

In the next part of the paper relations are given enabling an estimation of the energy in the case of a metal element deformed to a certain value of strain φ_w at a given strain rate η_w and a given temperature T_w the deformation being continued then at a different strain rate η_a and a different temperature T_a .

The study of this problem enables, for instance, the estimation of the impact energy of a metal which was subjected to initial static strain.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 21 lipca 1966 r.
