

Stefan Paweł Gadał,  
Jan Kaczmarek,  
Wiera Oliferuk  
Zakład Układów Mechanicznych

## PROCES MAGAZYNOWANIA ENERGII PODCZAS ROZCIĄGANIA METALU

### 1. WPROWADZENIE

Podczas deformacji plastycznej część dostarczonej energii mechanicznej wydziela się w postaci ciepła, reszta zaś zostaje zmagazynowana w materiale powodując wzrost jego energii wewnętrznej:

$$(1) \quad \Delta E = Q + W ,$$

gdzie:  $\Delta E$  - zmiana energii wewnętrznej,

$Q$  - ciepło wydzielone lub pochłaniane przez próbkę /ma wartość dodatnią w przypadku pochłaniania/,

$W$  - praca wykonana nad próbką podczas deformacji.

Praca ta jest równa energii mechanicznej dostarczonej do próbki /oznaczamy ją  $E_w$ /. Wówczas energia zmagazynowana w próbce

$$(2) \quad E_s = Q + E_w .$$

Proces deformacji plastycznej jest uwarunkowany głównie zachowaniem się dyslokacji: ich ruchem, generacją i anihilacją. Od zjawisk tych zależą przemiany energetyczne zachodzące podczas deformacji. Przebieg magazynowania energii można więc uznać za charakterystykę zachowania się dyslokacji.

Dotychczas do wyznaczania energii zmagazynowanej były stosowane metody pomiaru statycznego. Można je podzielić na dwie

Grupy:

- a. Metody oparte na bezpośrednim zastosowaniu pierwszej zasady termodynamiki. Pracę oblicza się wówczas z wykresu siła-odkształcenie, a ciepło - jako iloczyn pojemności cieplnej i przyrostu temperatury próbki. Wymaga to prowadzenia odkształcenia bezpośrednio w kalorymetrze lub określenia ciepła przekazanego do otoczenia.
- b. Metody polegające na określeniu różnicy między wartościami entalpii próbki odkształconej i próbki odniesienia. Różnicę tę określa się podczas wygrzewania izotermicznego lub nieizotermicznego. W pierwszym przypadku określa się różnicę energii wyzwolonej po ogrzaniu obydwu próbek, a w drugim różnicę energii potrzebnej do nagrzania tych próbek.

Wymienione metody nie nadają się do badania procesu magazynowania energii. Umożliwiają one jedynie ocenę stanu energetycznego materiału po zakończeniu deformacji.

W niniejszej pracy badano proces magazynowania energii podczas rozciągania metali, stosując metodę dynamicznego pomiaru tej energii oraz podjęto próbę objaśnienia otrzymanych wyników na gruncie zjawisk dyslokacyjnych.

## 2. METODA BADANIA PROCESU MAGAZYNOWANIA ENERGII

Za teoretyczną podstawę metody przyjęto pierwszą zasadę termodynamiki. Pracę wykonaną nad próbką wyznaczano na podstawie wykresu siła-wydłużenie. Ciepło wydzielane podczas deformacji wyznaczano symulując proces nagrzewania się próbki przez dostarczanie do niej w sposób kontrolowany energii elektrycznej, która w całości zamienia się na ciepło. Energia dostarczona do próbki powinna być dobrana tak, aby narastanie temperatury w czasie modelowania było takie samo jak podczas deformacji. Jeżeli proces deformacji i nagrzewanie prądem prowadzi się w jednakowych warunkach, to ciepło wydzielone jest w obu wypadkach jednakowe i równe energii dostarczonej do próbki podczas symulacji.

Czyli

$$(3) \quad Q = - \int_0^t M(t) dt ,$$

gdzie:  $M$  - moc dostarczona próbce, zaś energia zmagazynowana

$$(4) \quad E_s = E_w - \int_0^t M(t) dt.$$

Wyznaczona w podany powyżej sposób energia zmagazynowana nie odpowiada żadnemu ze znanych potencjałów termodynamicznych, ponieważ jest odniesiona do temperatury początkowej próbki.

Narastanie temperatury podczas rozciągania próbek i podczas modelowania mierzone metodą bezstykową opartą na detekcji promieniowania podczerwonego. Moc promieniowania powierzchni jednorodnej /zgodnie z prawem Stefana Boltzmana/ jest jednoznaczną funkcją temperatury. Na podstawie pomiaru tej mocy można więc wyznaczyć temperaturę badanej powierzchni. Jednorodność powierzchni pod względem emisyjności uzyskiwano pokrywając części robocze próbek sadzą.

W przedstawionej pracy stosowano termograf szwedzkiej firmy AGA typ 680, umożliwiający wyznaczanie powierzchniowego rozkładu temperatury. Rejestrując w określonych odstępach czasu rozciągania rozkład temperatury na powierzchni roboczej próbki otrzymywano zależność przyrostu temperatury od czasu rozciągania. Proces nagrzewania się próbki symulowano przepuszczając przez nią prąd elektryczny o znanym natężeniu. Próbkę mocowano na maszynie wytrzymałościowej w taki sam sposób, jak przy rozciąganiu. Moc, równą szybkości wydzielania się ciepła, wyznaczano mierząc napięcie elektryczne na roboczej części próbki, której wydłużenie badano podczas rozciągania.

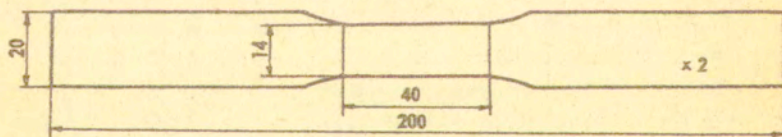
Symulacja nagrzewania się próbki umożliwia wyznaczenie energii zmagazynowanej w dowolnym punkcie procesu rozciągania, sprawia, że pomiar energii zmagazynowanej staje się pomiarem dynamicznym. Przedstawiona metoda umożliwia więc obserwację procesu magazynowania energii. Stosując ją można kontrolować, czy badany fragment próbki odkształcał się równomiernie. Przy równomiernym odkształceniu mierzona wartość wydłużenia jest wartością rzeczywistą /nie uśrednioną/. W związku z tym powstaje możliwość wyznaczenia zależności energii zmagazynowanej od rzeczywistej wartości wydłużenia.

Przy wyznaczaniu energii zmagazynowanej tą metodą względny błąd przypadkowy maleje, w miarę wzrostu odkształcenia. Według oszacowania metodą różniczki zupełnej na początku odkształcenia plastycznego wynosi on 60%, zaś przy odkształceniu 10% spada do 12% [1, 2].

### 3. OPIS I WYNIKI BADAŃ

Magazynowanie energii podczas rozciągania badano na próbkach ze stali austenitycznej 1H18N9T i żelaza armco. Materiałem wyjściowym do wykonania próbek były arkusze blachy walcowanej na gorąco. Grubość blachy ze stali 1H18N9T wynosiła 3,4 mm, żelaza armco - 2 mm. Wstępną obróbką powierzchni roboczych było szlifowanie.

Dla uzyskania jednorodności struktury próbki ze stali 1H18N9T wygrzewano w próżni w temperaturze 1070°C, a próbki z żelaza armco w temperaturze 960°C. Czas wygrzewania wynosił 40 minut. Wszystkie badane próbki miały kształt jak na rys.1.

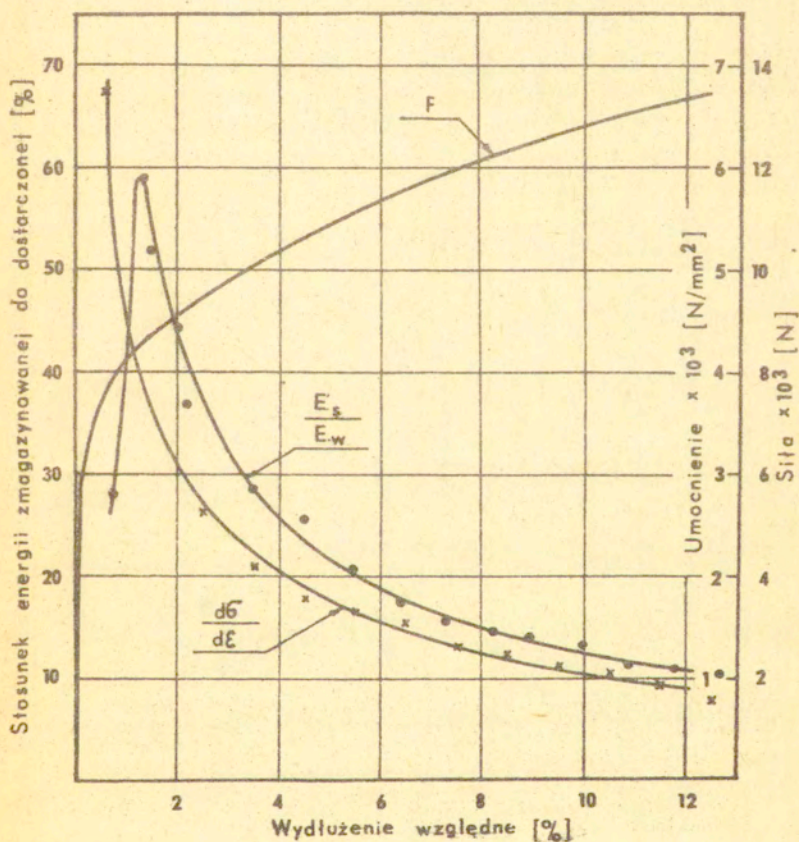


Rys. 1. Kształt i wymiary próbek

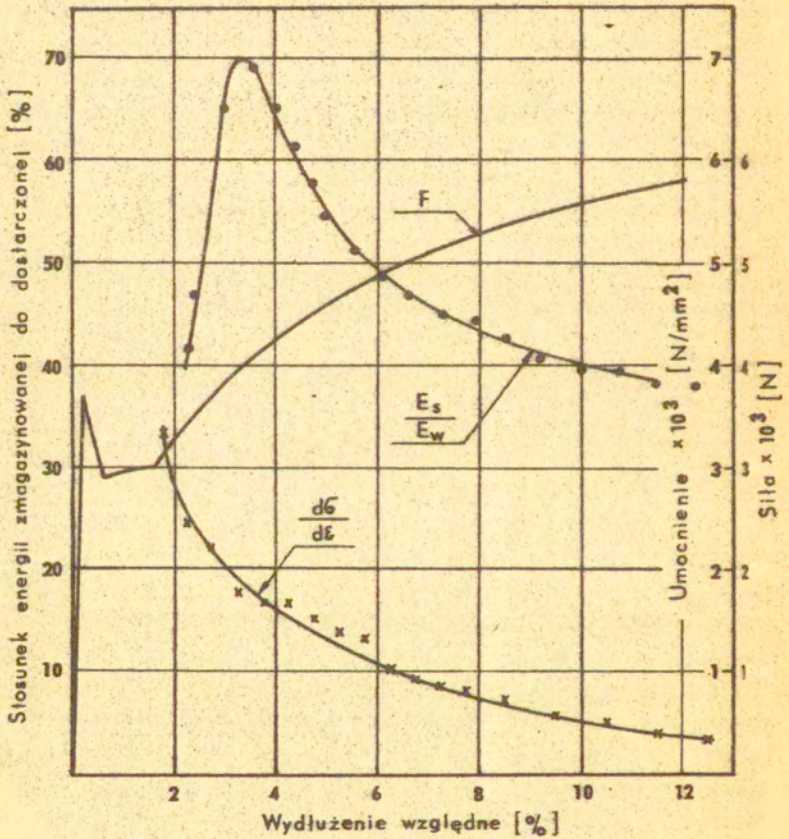
Rozciągano je na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron przy stałej szybkości przesuwania się szczęk równej: 10 mm/min dla stali 1H18N9T oraz 5 mm/min dla żelaza armco. Badano proces magazynowania energii w początkowym etapie odkształcenia plastycznego, gdy izotermiczność powierzchni roboczej próbki wskazywała, że można przyjąć równomierność odkształcenia.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono, na tle krzywych rozciągania

i umocnienia, zależności stosunku energii zmagazynowanej do włożonej od wydłużenia. Punkty pomiarowe zależności  $E_s/\bar{E}_w(t)$  są punktami uśrednionymi dla ~ 20 próbek każdego rodzaju. Krzywe rozciągania i umocnienia dotyczą jednej przykładowo wybranej próbki /rozrzuty między tego rodzaju krzywymi dla poszczególnych próbek były tak małe, że można je pominąć/.



Rys. 2. Zmiany stosunku energii zmagazynowanej do dostarczonej oraz umocnienia i siły w zależności od wydłużenia próbek ze stali 1H18N9T.



Rys. 3. Zmiany stosunku energii zmagazynowanej do dostarczonej oraz umocnienia i siły w zależności od wydłużenia próbek z żelaza armco.

Za początkowy stan energetyczny próbek ze stali 1H18N9T przyjęto stan, w którym zaczynało się odkształcenie plastyczne. Przyjęto, że zaczyna się ono wówczas, gdy temperatura próbek w wyniku efektu termosprężystego osiąga najniższą wartość. W próbkach z żelaza armco za początkowy stan energetyczny przyjęto natomiast stan próbek odpowiadający punktowi krzywej siła-wydłużenie łączącemu na końcu przystanku plastyczności, wcześniej bowiem, ze względu na niejednorodność odkształcenia, ocena zmian stanu energetycznego jest bardzo trudna.

Zależności  $E_s/E_u(\epsilon)$  dla stali 1H18N9T i żelaza armco /rys. 2, 3/ mają podobny charakter. Oznacza to, że mechanizmy magazynowania energii podczas rozciągania - mimo różnych prędkości deformacji i różnych materiałów - są podobne.

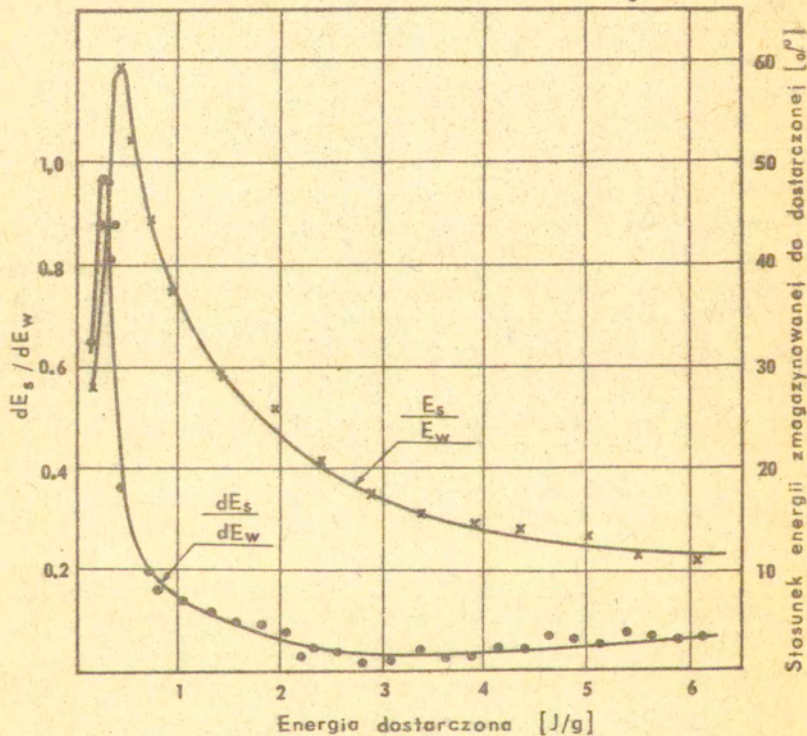
Na uwagę zasługuje istnienie maksimum wartości  $E_s/E_u$  występujące podczas rozciągania stali 1H18N9T przy odkształceniu  $\sim 1,5\%$ , a w żelazie armco przy  $\sim 3,7\%$ . Dalszy przebieg zależności  $E_s/E_u(\epsilon)$  jest zgodny z tego typu zależnościami przedstawianymi w literaturze [3]. Zależności te są zwykle przedłużane w stronę małych odkształceń na zasadzie ekstrapolacji.

Narastanie wartości  $E_s/E_u$  na początku deformacji plastycznej jest przejawem wzrostu udziału w przemianach energetycznych procesów endoenergetycznych. Spadek  $E_s/E_u$  świadczy o wzroście udziału zjawisk egzoenergetycznych.

Z punktu widzenia zachowania się dyslokacji zjawiskiem, któremu towarzyszy magazynowanie energii jest generowanie dyslokacji, a zjawiskami związanymi z rozpraszaniem energii - ich ruch i anihilacja.

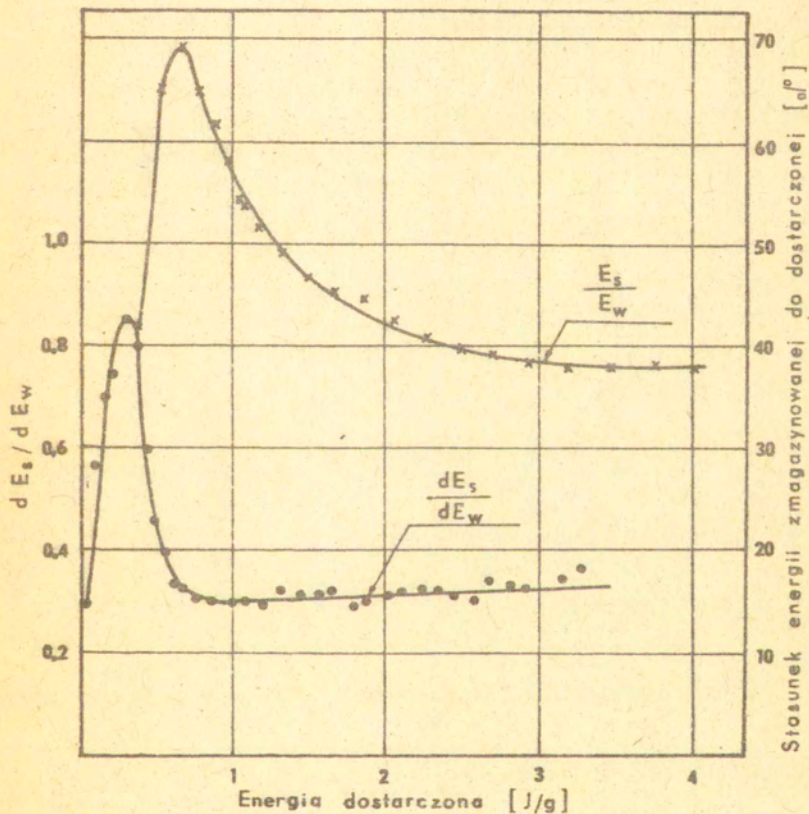
Wielkości  $E_s$  i  $E_u$  są wielkościami całkowitymi, ich stosunek w każdym punkcie procesu rozwiązywania  $E_s/E_u$  zależy więc od przebiegu tego procesu.

Dla uzyskania informacji o przemianach energetycznych zachodzących w dowolnym punkcie odkształcenia zróżniczkowane graficznie zależności energii zmagazynowanej do włożonej. Wyniki tej operacji przedstawiono na rys. 4 i 5. Na tych rysunkach przedstawiono także dla porównania zależności  $E_s/E_u(\epsilon)$ . Jeżeli stosunek  $E_s/E_u$  nazwiemy średnią zdolnością magazynowania energii, to  $\frac{1}{2} \frac{E_s}{E_u}$  jest jej wartością chwilową, charakteryzu-



Rys. 4. Zmiany  $\frac{E_s}{E_w}$  i  $\frac{dE_s}{dE_w}$  zachodzące podczas rozciągania próbek ze stali 1H18N9T w zależności od energii dostarczonej





Rys. 5. Zmiany  $\frac{E_s}{E_w}$  i  $\frac{dE_s}{dE_w}$  zachodzące podczas rozciągania próbek z żelaza armco, w zależności od energii dostarczonej.

jąca proces magazynowania energii w określonym punkcie procesu deformacji.

Wzrost  $\frac{dE_s}{dE_u}$  /rys. 4, 5/ oznacza, że na początku badanego zakresu odkształcenia rośnie udział procesów endoenergetycznych. Można przypuszczać, że zwiększa się wtedy w przemianach energetycznych przewaga zjawiska generowania dyslokacji. Spadek  $\frac{dE_s}{dE_u}$  świadczy o rosnącym udziale zjawisk związanych z dysypacją energii, takich jak anihilacja i ruch dyslokacji. Udział tych zjawisk rośnie aż do osiągnięcia stałego poziomu, któremu odpowiada stała wartość  $\frac{dE_s}{dE_u}$  /rys. 4, 5/.

W dalszym ciągu w przemianach energetycznych przeważają jednak zjawiska związane z pochłanianiem energii. Wskazuje na to dodatnia wartość  $\frac{dE_s}{dE_u}$ . Jest to zgodne z faktem podawanym w literaturze, że w miarę odkształcenia gęstości dyslokacji rośnie.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zastosowana w niniejszej pracy metoda wyznaczania energii zmagazynowanej jest metodą pomiaru dynamicznego. Umożliwia ona obserwację procesu zmiany stanu energetycznego metalu zachodzącego podczas deformacji plastycznej.

Zastosowanie systemu termowizyjnego zapewnia kontrolę równomierności odkształcenia roboczej części próbki. W związku z tym staje się możliwe określenie zależności energii zmagazynowanej od rzeczywistej /nie uśrednionej/ wartości wydłużenia.

Wyniki badań procesu magazynowania energii podczas rozciągania stali 1H18N9T i żelaza armco mogą świadczyć o tym, że mechanizmy tego procesu, mimo różnych materiałów i różnych szybkości deformacji, są podobne. W początkowym etapie odkształcenia plastycznego stwierdzono występowanie maksimum stosunku  $E_s/E_u$  - energii zmagazynowanej do włożonej. Analiza zależności  $\frac{dE_s}{dE_u}(e_w)$  wykazała, że w przemianach energetycznych początkowej fazy deformacji plastycznej rośnie udział zjawisk endoenergetycznych. Następnie udział ten maleje, co jest równoznaczne ze wzrostem udziału zjawisk egzoenergetycznych. W końcowej fazie badanego zakresu odkształcenia udział obu typów zjawisk jest

stały.

Wszystko to pozwala przypuszczać, że w przemianach energetycznych pierwszej fazy odkształcenia plastycznego rośnie udział generowania dyslokacji, następnie rośnie udział ich ruchu i annihilacji.

#### LITERATURA

1. S.P.Gadaj, E.Gałkowska, J.Kaczmarek, W.Oliferuk; Wyznaczenie energii zmagazynowanej w metalu podczas procesu rozciągania, Prace IPPT, nr 36, 1981.
2. S.P.Gadaj, E.Gałkowska, J.Kaczmarek, W.Oliferuk; Modified method of stored energy determination during metals deformation, Bulletin Pol.Acad.Scienc. v.31, no 1-2, 1982.
3. M.B.Baver, D.L.Holt, A.L.Titchonor, The Stored Energy of Cold Work, Pergamon Press, 1973.