

7.75 — warstwa wierzchnia

36 / 1981

S. P. Gadaj, E. Gałkowska  
J. Kaczmarek, W. Otiferuk

WYZNACZENIE ENERGII  
ZMAGAZYNOWANEJ W METALU  
PODZAS PROCESU ROZCIĄGANIA

P. 269

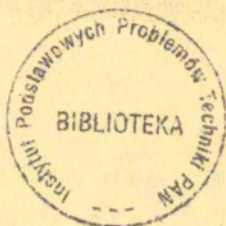


WARSZAWA 1981

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 31 lipca 1981 r.

Zarejestrowana pod nr 36/1981



57077



N a   p r a w a c h   r ę k o p i s u

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 160 egz. Ark. wyd. 1. Ark. druk. 1,5.

Oddano do drukarni w październiku 1981

Nr zamówienia 598/0

2-97

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul. Śniadeckich 8

<http://rcin.org.pl>

Stefan Paweł Gadał, Elżbieta Gałkowska,  
Jan Kaczmarek, Wiera Ołiferuk  
Zakład Układów Mechanicznych

## WYZNACZENIE ENERGII ZMAGAZYNOWANEJ W METALU PODCZAS PROCESU ROZCIĄGANIA

W pierwszej części pracy przedstawiono zmodyfikowaną metodę wyznaczania energii zmagazynowanej. Energię tę wyznaczono jako różnicę między energią mechaniczną dostarczoną do próbki i ciepłem wydzielonym podczas jej deformacji. Modyfikacja metody polegała na tym, że do próbki dostarczoneo energię elektryczną w taki sposób, iż proces jej nagrzewania był taki sam jak podczas rozciągania. Pozwoliło to obliczyć ilość ciepła wydzielonego przez próbkę bez znajomości współczynników wymiany ciepła z otoczeniem.

W drugiej części pracy przedstawiono zastosowanie tej metody do badania wpływu obróbki powierzchniowej na przebieg magazynowania energii podczas rozciągania stali 1H18N9T. Otrzymane wyniki wskazują, że wpływ ten jest stosunkowo duży.

### 1. Teoretyczne podstawy wyznaczania energii zmagazynowanej

Podczas deformacji plastycznej metalu znaczna część dostarczonej energii mechanicznej wydziela się w postaci ciepła. Pewna jej część pozostaje w metalu. Tę część nazwano energią zmagazynowaną.

Magazynowanie energii stanowi charakterystyczną cechę procesu deformacji metalu, zaś energia zmagazynowana określa stan materiału.

Proces deformacji można opisać za pomocą pierwszej zasady termodynamiki:

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

gdzie:  $\Delta E$  - zmiana energii wewnętrznej w procesie deformacji,  
 $Q$  - ciepło wydzielane lub pochłaniane przez próbkę podczas deformacji /ma wartość dodatnią, gdy jest pochłaniane przez próbkę/,  
 $W$  - praca wykonana nad próbką w procesie deformacji /ma wartość dodatnią/. Jest ona równa energii mechanicznej dostarczonej do próbki.

Pierwsza zasada termodynamiki jest spełniona dla dowolnych warunków i rodzajów deformacji. Można ją stosować do opisu zarówno odkształceń sprężystych jak i plastycznych.

Gdy występuje odkształcenie sprężyste, wówczas zmiana energii wewnętrznej  $\Delta E$  zawiera energię sprężystości, kosztem której, po usunięciu obciążenia, siły sprężystości wykonują pracę. Odkształceniu idealnie plastycznemu również towarzyszy zmiana energii wewnętrznej. Zmiana ta jest nazywana w literaturze energią zmagazynowaną lub energią utajoną odkształcenia plastycznego.

$$(2) \quad E_s \cong \Delta E = Q + E_w$$

gdzie:  $E_s$  - energia zmagazynowana,  
 $Q$  - ilość ciepła wydzielanego podczas odkształcenia plastycznego,  
 $E_w$  - energia mechaniczna dostarczona do próbki podczas odkształcenia plastycznego.

Mierząc  $Q$  i  $E_w$  i podstawiając otrzymane wartości do równania (2) można obliczyć  $E_s$ . Tego typu pomiary stanowią podstawę niektórych metod wyznaczania energii zmagazynowanej. Inna grupa tych metod jest oparta na wyznaczaniu zmiany entalpii  $\Delta H$ .

Przy stałym ciśnieniu:

$$\Delta H = \Delta E + p \Delta V,$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie hydrostatyczne,  
 $\Delta V$  - zmiana objętości próbki w procesie deformacji.

Dla ciał stałych przy ciśnieniu bliskim ciśnieniu atmosferycznemu iloczyn  $p \Delta V$  jest pomijalnie mały, można więc przyjąć, że zmiana entalpii  $\Delta H$  jest równa zmianie energii wewnętrznej, czyli równa energii zmagazynowanej w próbce.

## 2. Metody wyznaczania energii zmagazynowanej

Metody te można podzielić na dwie grupy [1]:

- a/ Metody, w których pomiary przeprowadza się podczas trwania deformacji lub natychmiast po jej zakończeniu. Nazwano je metodami jednostopniowymi.
- b/ Metody, w których najpierw odkształca się próbkę, zaś energię zmagazynowaną wyznacza się w późniejszym czasie. Takie metody nazwano dwustopniowymi.

### 2.1. Metody jednostopniowe

Metody te są oparte na bezpośrednim zastosowaniu pierwszej zasady termodynamiki. Energię zmagazynowaną w próbce wyznacza się jako różnicę między pracą wykonaną nad próbką w procesie deformacji a ciepłem wydzielonym podczas tego procesu.

Pracę wykonaną nad próbką oblicza się zwykle z wykresu zależności siły od odkształcenia. Ciepło wydzielone podczas deformacji wyznacza się jako iloczyn pojemności cieplnej próbki i przyrostu temperatury. Można je także wyznaczyć zanurzając próbkę, natychmiast po zakończeniu deformacji, do kalorymetru lub prowadząc deformację w kalorymetrze.

W metodach jednostopniowych błędy systematyczne pomiarów pracy i ciepła są od siebie niezależne, dlatego też przy obliczaniu wartości energii zmagazynowanej błędy te nie kompensują się. Jest to wada metod jednostopniowych w porównaniu z dwustopniowymi.

### 2.2. Metody dwustopniowe

Istotą tych metod jest to, że energię zmagazynowaną w odkształconej próbce wyznaczamy porównując jej zachowanie się termiczne podczas odpowiednio wybranego procesu /np. podczas wygrzewania/ z zachowaniem się próbki nieodkształconej. Tę

ostatnią będziemy nazywać próbką odniesienia.

W metodach dwustopniowych wyznaczanie energii zmagazynowanej jest oparte na określeniu różnicy entalpii między próbkami: odkształconą i odniesienia.

Metody te można podzielić na:

a/ Metody z zastosowaniem wygrzewania nieizotermicznego.

Energię zmagazynowaną wyznacza się wówczas na podstawie różnicy między ciepłem potrzebnym do ogrzania próbki odkształconej i próbki odniesienia o określony przyrost temperatury. Różnica ta jest wywołana uwalnianiem przez odkształconą próbkę energii, która uprzednio została w niej zmagazynowana.

b/ Metody z zastosowaniem wygrzewania izotermicznego.

W tym przypadku badaną próbkę po rozciągnięciu umieszcza się w izotermicznej komorze o dużej pojemności cieplnej. Próbka i komora muszą mieć jednakowe temperatury początkowe. W miarę upływu czasu próbka uwalnia zmagazynowaną w niej energię. Wskutek tego jej temperatura staje się wyższą niż temperatura komory. Przebieg różnicy tych temperatur jest funkcją szybkości uwalniania się energii zmagazynowanej.

Metody dwustopniowe nie pozwalają na wyznaczenie energii uwalniającej się tuż po zakończeniu procesu deformacji.

### 2.3. Wnioski z przeglądu metod wyznaczania energii zmagazynowanej

Omówione metody nie umożliwiają badania procesu magazynowania energii w czasie trwania deformacji. Pozwalają one ocenić raczej stan energetyczny materiału po zakończeniu deformacji.

Teoretycznie istnieje możliwość pomiaru energii zmagazynowanej podczas trwania deformacji, jeżeli próbkę będziemy odkształcać w kalorymetrze. Praktycznie realizacja tego jest jednak dość trudna, ponieważ ustalanie się temperatury w kalorymetrze jest procesem inercyjnym.

Pomiar wydzielonego przez próbkę ciepła przeprowadza się zwykle po zatrzymaniu procesu deformacji. Zatrzymaniu procesu deformacji może towarzyszyć uwalnianie poprzednio zgromadzonej

energii. W takim przypadku uwolniona energia nie tylko nie zostanie zarejestrowana, lecz przyczyni się do tego, iż mierzona ilość ciepła będzie większa od rzeczywistej. Wyznaczając energię zmagazynowaną jako różnicę między pracą wykonaną nad próbką i ciepłem wydzielonym przez nią, otrzymamy wartość zaniżoną.

Metody dwustopniowe z założenia nie pozwalają badać procesu magazynowania energii podczas trwania deformacji. Ponadto, jak już wspomniano, stosując te metody nie można zmierzyć energii uwalniającej się tuż po zakończeniu deformacji, co również prowadzi do otrzymania zaniżonej wartości energii zmagazynowanej w stosunku do wartości rzeczywistej. Wszystko to skłoniło autorów niniejszej pracy do podjęcia próby modyfikacji metody jednostopniowej przez zastosowanie bezstykowego pomiaru temperatury deformowanej próbki, opartego na detekcji promieniowania podczerwonego.

### 3. Metoda pomiaru temperatury oparta na detekcji promieniowania podczerwonego

Każde ciało o temperaturze większej od zera K emituje promieniowanie podczerwone. Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana moc tego promieniowania jest jednoznaczna funkcją temperatury emitującej powierzchni. Pomiar mocy można więc wykorzystać do wyznaczenia temperatury. Podczas tego pomiaru nie ma oddziaływania układu pomiarowego na badany obiekt. Ponadto pomiar ten jest praktycznie bezinercyjny.

W przedstawionej pracy temperaturę wyznaczono za pomocą systemu termowizyjnego szwedzkiej firmy AGA typ 680. Pozwala on na rejestrację powierzchniowego rozkładu promieniowania emitowanego przez badaną powierzchnię. Promieniowanie z badanej powierzchni jest kolejno zbierane za pomocą mechaniczno- optycznego układu skaningowego i ogniskowane na powierzchni detektora. Detektorem jest antymonek indu chłodzony ciekłym azotem.

Sygnal elektryczny na wyjściu detektora zostaje wzmacniony i wykorzystany do modulacji strumienia elektronowego w lampie obrazowej. Daje to na ekranie lampy obraz termiczny badanej powierzchni. Obszary emitujące silniej są zobrazowane jako jaśniejsze, emitujące słabiej - jako ciemniejsze. Stopień szaro-

ści obszarów obrazu można określić za pomocą dyskryminatora poziomą czerni. Otrzymany w ten sposób kontury o jednakowej szerokości odpowiadające obszarom badanej powierzchni o jednakowej mocy promieniowania. Jeżeli powierzchnia jest jednorodna, są to obszary o jednakowej temperaturze. Każdy poziom temperatury może być zarejestrowany w innym kolorze. Służy do tego przystawka fotograficzna z siedmioma barwnymi filtrami.

Poszczególne kontury temperaturowe można rejestrować na jednej klatce błony filmowej, stosując do kolejnego poziomu inny filtr. Filtry są osadzone na umieszczonej przed ekranem lampy obrazowej okrągłej tarczy, której ruch obrotowy jest zsynchronizowany z przesuwaniem się poziomu dyskryminatora. Czas potrzebny na zarejestrowanie pełnego obrazu termicznego badanego obiektu zależy od czułości filmu i jest nie większy niż 7 sekund. Rejestrowanie jednego poziomu temperaturowego trwa więc nie więcej niż 1 sekundę.

#### 4. Zastosowanie bezkontaktowego pomiaru temperatury do wyznaczania energii zmagazynowanej.

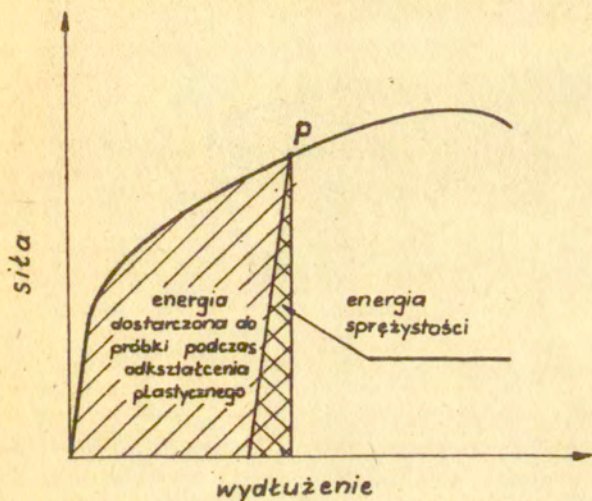
Podczas deformacji plastycznej metal nagrzewa się i emituje promieniowanie podczerwone. Zastosowanie systemu termowizyjnego pozwala na zmierzenie temperatury deformowanego metalu a stąd na wyznaczenie ciepła wydzielonego w dowolnej chwili procesu deformacji. Znając wartość dostarczonej energii mechanicznej i ilość wydzielonego przy tym ciepła można określić energię zmagazynowaną w metalu /wzór 2/.

Badano proces rozciągania rejestrując zależność siły od odkształcenia. W określonych odstępach czasu wykonywano zdjęcia obrazu termowizyjnego próbki. Na podstawie tych zdjęć określono temperaturę powierzchni próbki.

Podczas odkształcania materiałów rzeczywistych, poza odkształceniem plastycznym występuje odkształcenie sprężyste. Pole powierzchni pod krzywą siła-wydłużenie jest więc miarą energii mechanicznej, którą dostarczone do próbki podczas jej deformacji sprężystej i plastycznej. Aby otrzymać wartość energii  $E_w$  /wzór 2/ odpowiadającej określonej wartości wydłużenia należy od całkowitego pola powierzchni pod krzywą rozciągania



odjąć pole odpowiadające energii sprężystości. Pola te dla wybranego punktu krzywej pokazano przykładowo na rys.1.



Rys.1. Sposób wyznaczania energii dostarczonej do próbki -  $E_w$

Ciepło wydzielane przez próbkę podczas rozciągania wynosi:

$$(3) \quad Q = c m \Delta T_L + Q_s$$

gdzie:  $c$  - ciepło właściwe badanego metalu,

$m$  - masa części roboczej próbki,

$\Delta T_L$  - przyrost temperatury części roboczej próbki po osiągnięciu określonego wydłużenia,

$Q_s$  - ciepło oddane do otoczenia drogą przewodzenia, konwekcji i promieniowania.

Obliczenie ilości ciepła przekazanego do otoczenia wymaga znajomości współczynników wymiany, a ponadto jest bardzo trudne ze względu na złożony kształt próbki. Dlatego też wybrano inną drogę. W sposób kontrolowany dostarczone do próbki energię elektryczną tak, aby przebieg jej nagrzewania był taki sam jak podczas rozciągania. Jeśli założymy, że przebiegi temperatury w czasie, w obydwu przypadkach są takie same, to ciepło wydzie-

lane przez próbkę w dowolnej chwili deformacji jest równe energii elektrycznej dostarczanej do próbki.

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

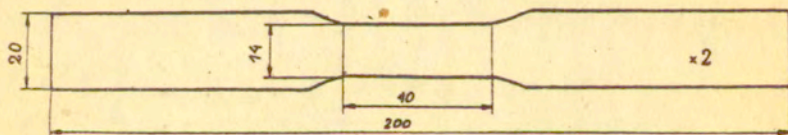
gdzie:  $M$  - moc prądu elektrycznego.

Wówczas energia zmagazynowana w próbce:

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

#### 5. Opis eksperymentu

Magazynowanie energii w procesie rozciągania badano na próbkach o kształcie pokazanym na rys.2, wykonanych ze stali austenitycznej 1H18N9T. Rozciągano je za pomocą maszyny wytrzymałościowej firmy Instron. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.3.

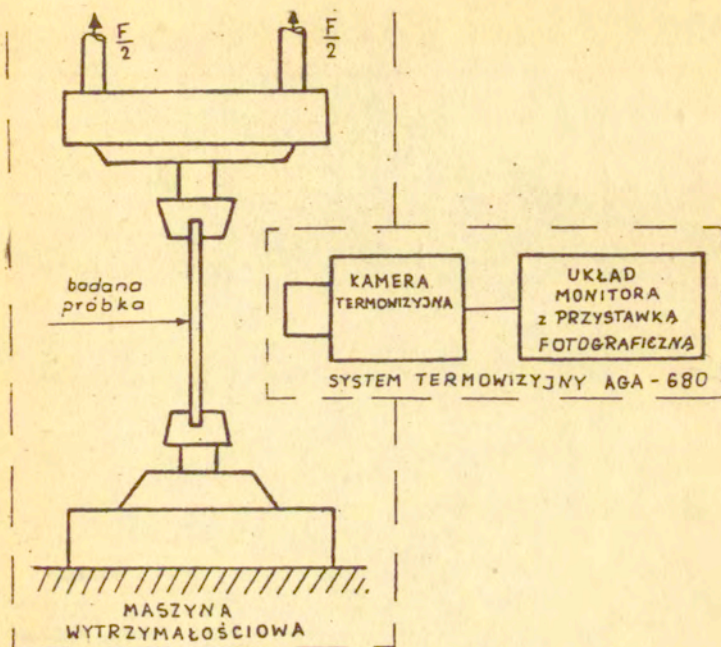


Rys.2. Kształt i wymiary próbek

Rozciąganie prowadzono przy stałej prędkości wybranej tak, aby temperatura badanego fragmentu próbki w czasie trwania rejestracji jednej izotermy (1s) nie uległa zauważalnej zmianie. Wartość tej prędkości była równa 10 mm/min.

Długość części roboczej próbki, na której rejestrowano wydłużenie wynosiła 26 mm. Przykładowy wykres zależności siła-wydłużenie jest przedstawiony na rys.4. Zaznaczono na nim punkty, w których rejestrowano temperaturę próbki. Obok podano czas, liczony od chwili rozpoczęcia procesu.

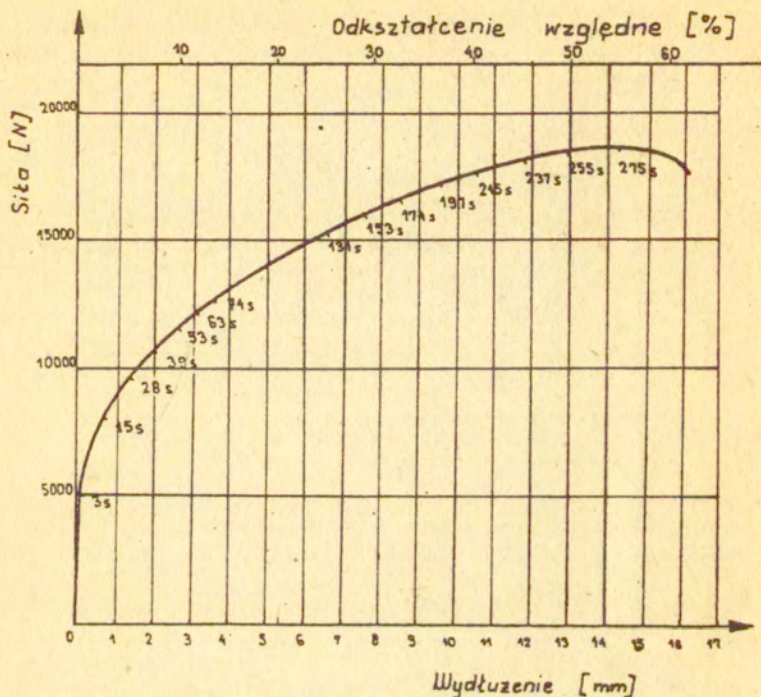
Przykładowe rozkłady temperatury na powierzchni badanego fragmentu próbki przedstawiono na rys.5.



Rys.3. Schemat układu do wyznaczania energii zmagazynowanej w procesie rozciągania

Fotografia /b/ przedstawia próbkę w czasie odkształcania sprężystego. Widać tu efekt termosprężysty polegający na obniżaniu się temperatury. Fotografie /c/ i /d/ dotyczą pierwszego etapu odkształcania plastycznego. Izotermiczność powierzchni świadczy o tym, że badany fragment próbki odkształcał się równomiernie. Równomierność ta występowała do osiągnięcia względnego wydłużenia  $\sim 15\%$ . Pozwoliło to przyjąć, że nie ma zauważalnego gradientu temperatury wzdłuż długości próbki.

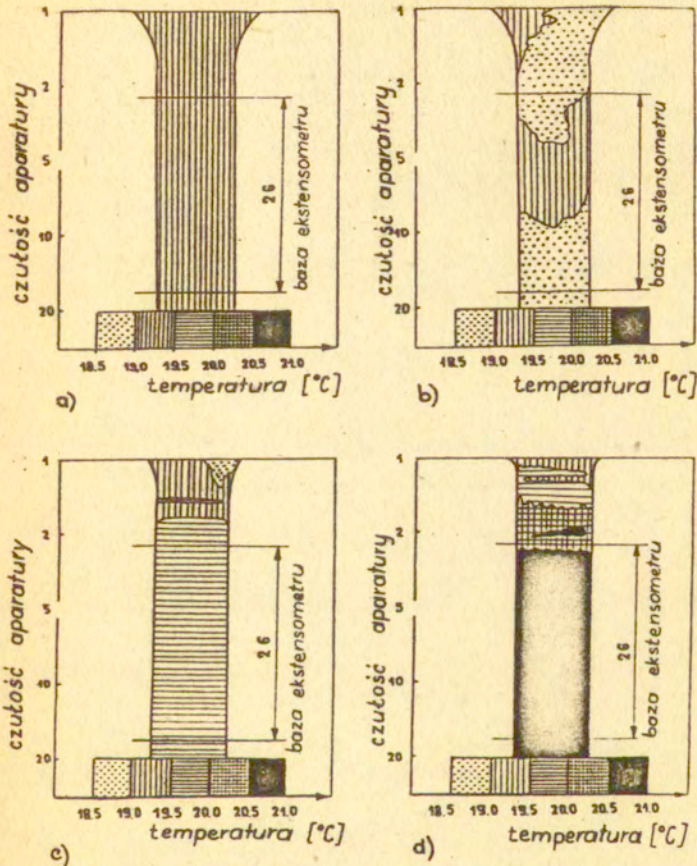
Na podstawie tych pomiarów sporządzono wykres zależności przyrostu temperatury od czasu rozciągania. Przyrost ten mierzono od wartości temperatury, którą miała próbka na początku odkształcania plastycznego. Pomiaru temperatury próbki podczas przepływu prądu elektrycznego prowadzono taką samą metodą i w takich samych warunkach jak przy rozciąganiu.



Rys. 4. Wykres zależności siła - wydłużenie dla stali 1H18N9T. Na krzywej zaznaczono czasy, w których mierzono temperaturę próbki

Przez próbkę zamocowaną w maszynie wytrzymałościowej przepuszczano prąd o znanym natężeniu /rys.6/. Mierząc spadek potencjału na części roboczej wyznaczono energię elektryczną dostarczoną do próbki. Podczas przepływu prądu badano zmiany temperatury próbki w funkcji czasu. Okazało się, że do otrzymania wzrostu temperatury próbki, zgodnego ze wzrostem temperatury takiej samej próbki podczas rozciągania, nie wystarczy przepuszczanie przez nią prądu o odpowiednio dobranym, stałym w czasie natężeniu. Moc źródeł ciepła działających w próbce podczas rozciągania rośnie wraz z czasem. Modelowanie wzrostu temperatury wymaga więc zwiększenia w miarę upływu czasu natężenia prądu grzejącego próbkę. Zależność natężenia prądu od czasu zapewniającą takie modelowanie można określić metodą kolejnych

prób. Jest to jednak bardzo pracochłonne. Wybrano więc inny sposób. Zarejestrowano wzrost temperatury od czasu przy różnych

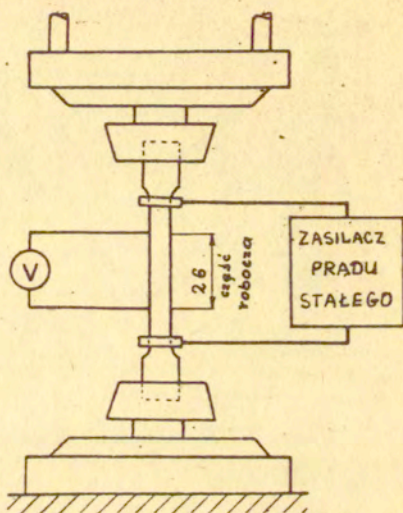


Rys.5. Rozkład temperatury na powierzchni badanych próbek:

- a/ - przed rozciąganiem,
- b/ - w okresie odkształceń sprężystych, po 3s rozciągania,
- c/ - w okresie odkształceń plastycznych, po 15s rozciągania,
- d/ - po 28s rozciągania.

natężeniach prądu /każdej wartości natężenia prądu odpowiada określona wartość mocy wydzielającej w roboczej części próbki/. Otrzymano rodzinę krzywych  $\Delta T(t)$ , w których parametrem jest

wartość mocy prądu elektrycznego.

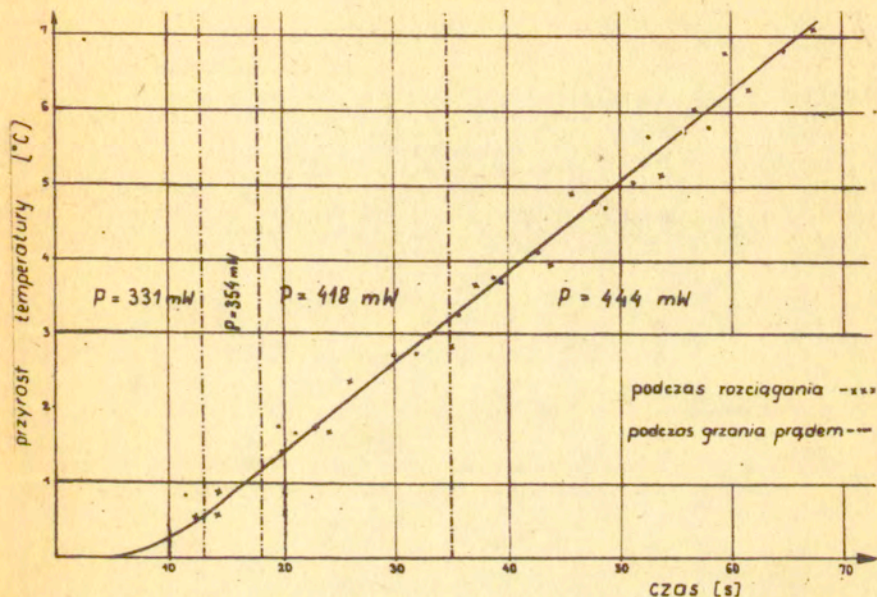


Rys.6. Schemat układu pomiarowego do nagrzewania próbek prądem elektrycznym

Z dobrym przybliżeniem można uznać, że w stosunkowo niewielkich odstępach czasu źródła ciepła działające w próbce podczas jej rozciągania mają stałą moc. W następujących po sobie odstępach czasu moc ta ma wartość wyższą. Kolejnym fragmentem krzywej wzrostu temperatury podczas rozciągania przyporządkowano odpowiednie fragmenty wykresów  $\Delta T(t)$  z rodziny krzywych otrzymanych podczas grzania prądem. W ten sposób określono jak należałoby zwiększać w czasie moc prądu elektrycznego, aby wzrost temperatury próbki pokrywał się ze wzrostem temperatury podczas rozciągania. Przykładowe wyniki takiego dopasowania przedstawiono na rys.7. Linia ciągła na tym rysunku jest wykresem zależności wzrostu temperatury od czasu podczas rozciągania. Na jej tle zaznaczono punkty pomiarowe otrzymane podczas grzania próbki prądem.

Jak więc pokazano powyżej, moc prądu elektrycznego nie była stała /ulegała skokowym zmianom/. Zależność tej mocy od czasu przedstawia rys.8. Pole powierzchni pod krzywą jest miarą ener-

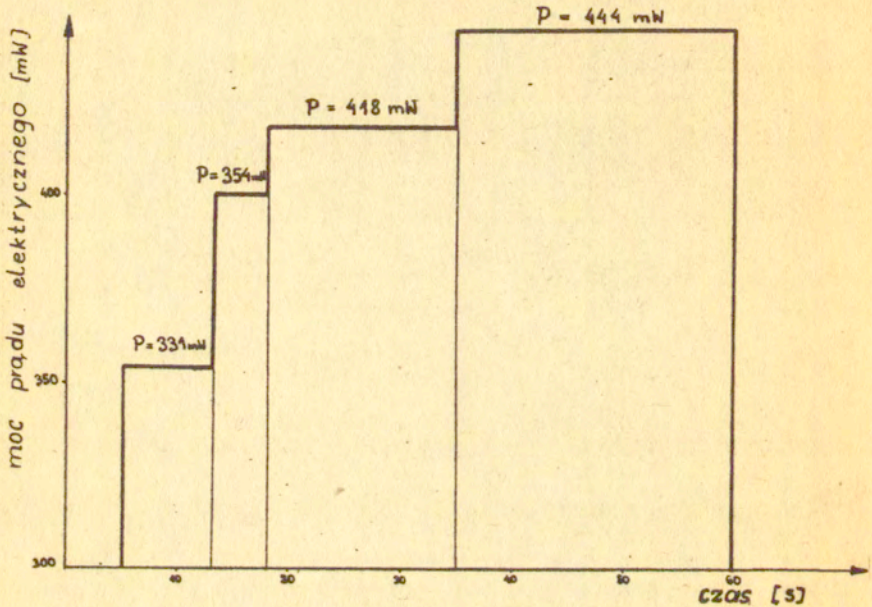
gii wydzielonej w postaci ciepła podczas rozciągania próbki.



Rys.7. Przykładowe wyniki dopasowania przebiegów temperatury podczas rozciągania i nagrzewania prądem elektrycznym /P- moc prądu elektrycznego/

## 6. Wyniki pomiarów i ich analiza

Wyznaczono zależność energii zmagazynowanej od wydłużenia badanej części próbki. Na rys.9 przedstawiono tę zależność dla próbek, które przed rozciąganiem były wygrzewane przez 40 minut w temperaturze  $1070^{\circ}\text{C}$ . Podane wartości energii zmagazynowanej odniesione są do jednostkowej masy. Za początkowy stan energetyczny próbki przyjęto stan, w którym zaczynało się odkształcenie plastyczne. Początek tego odkształcenia określono z krzywej siła-wydłużenie. Podczas odkształcenia sprężystego temperatura próbki spada /efekt termosprężysty/, staje się niż-



Rys.8. Zmiany mocy prądu przy modelowaniu przyrostu temperatury próbki

sza od temperatury otoczenia. Pomiar najniższej wartości tej temperatury jest dość trudny, bowiem proces odkształcenia sprężystego trwa stosunkowo krótko. Obniżenie temperatury próbki podczas odkształcenia sprężystego obliczono ze wzoru W.Thomsona [1].

$$(5) \quad T_s = - \frac{\alpha T \Delta \theta}{c} s$$

gdzie:

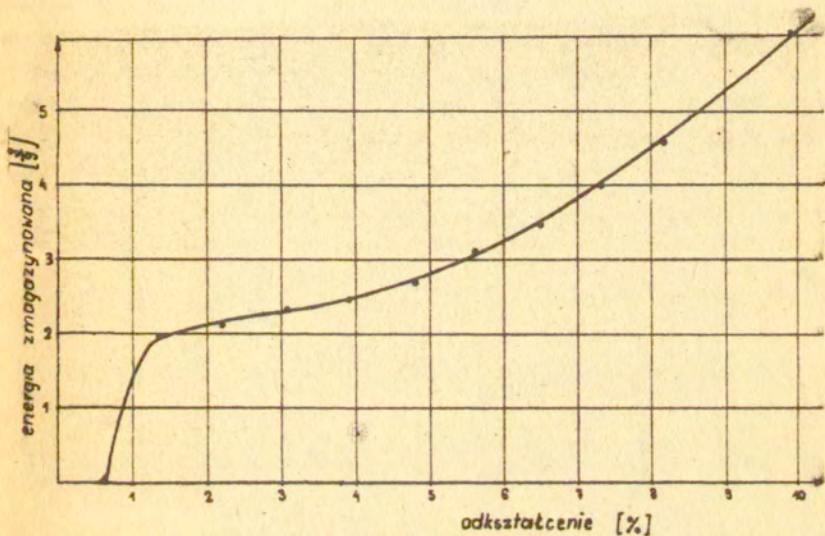
$\alpha$  - współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej badanego materiału,

$T$  - temperatura początkowa próbki,



$\Delta \epsilon_s$  - zmiana naprężenia podczas odkształcenia sprężystego,

c - pojemność cieplna jednostkowej objętości badanego materiału.



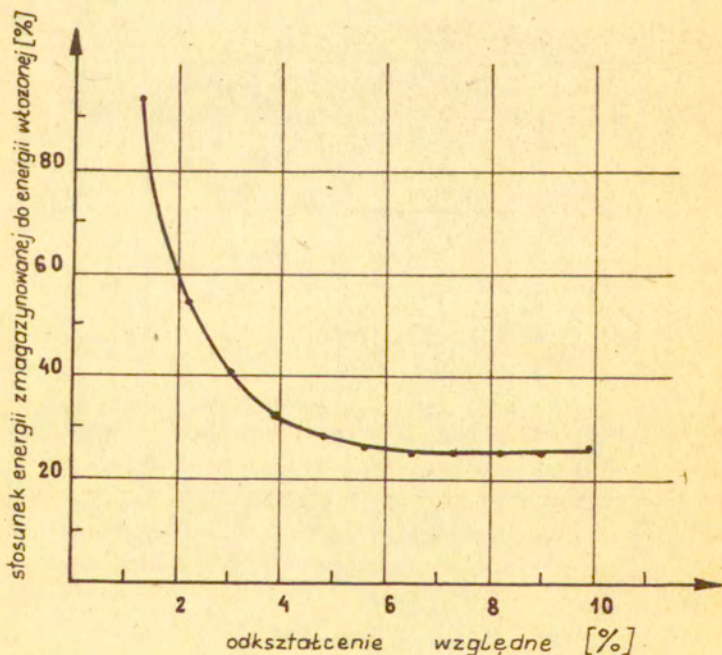
Rys.9. Zależność energii zmagazynowanej od wydłużenia próbek ze stali 1H18N9T

Wzrost temperatury próbki następuje z chwilą rozpoczęcia odkształcenia plastycznego. Pierwszy punkt na krzywej  $E_s(\frac{\Delta L}{L})$  /rys.9/ odpowiada chwili, gdy temperatura próbki znów osiąga wartość temperatury otoczenia, a więc chwili, w której próbka w wyniku deformacji plastycznej ogrzała się o poprzednio obliczoną wartość ( $\Delta T_s$ ). Wartość ta wynosi  $\sim 0,2^\circ\text{C}$ . Modelowanie takiego wzrostu temperatury jest trudne ze względów technicznych. Dlatego energię zmagazynowaną w tym punkcie obliczono jako różnicę między pracą odkształcenia plastycznego

i ciepłem potrzebnym do ogrzania próbki o  $|\Delta T_s|$ . Tak otrzymaną wartość energii w tym punkcie należy traktować, w porównaniu z innymi, jako orientacyjną. Magazynowanie energii w początkowym okresie deformacji plastycznej wymaga bardziej precyzyjnych metod badawczych.

Charakter otrzymanej zależności jest podobny do takich samych zależności przedstawionych w literaturze dla innych materiałów [1]. Porównanie otrzymanych przez nas wartości bezwzględnych energii zmagazynowanej z wartościami otrzymanymi innymi metodami okazało się niemożliwe, nie spotkano bowiem w literaturze danych dotyczących energii zmagazynowanej w stali 1H18N9T.

Na pod stawie otrzymanych wyników sporządzono wykres zależności stosunku energii zmagazynowanej do energii włożonej od wydłużenia badanej części próbki /rys.10/. Otrzymane przez nas



Rys.10. Zależność stosunku energii zmagazynowanej do energii włożonej od odkształcenia

wartości stosunku energii zmagazynowanej do energii włożonej dla stali 1H18N9T w procesie rozciągania są nieco większe w porównaniu z danymi literaturowymi dla innych materiałów.

Zastosowanie bezkontaktowego pomiaru temperatury powinno dać wyższe wartości energii zmagazynowanej w stosunku do wartości otrzymanych metodami kalorymetrycznymi. W metodach kalorymetrycznych mierzy się bowiem energię zmagazynowaną po zakończeniu pewnego etapu odkształcenia i nie uwzględnia się energii, która uwolniła się po zatrzymaniu deformacji /patrz 2.3/. Sądzymy więc, iż otrzymane przez nas wyższe wartości stosunku energii zmagazynowanej do energii włożonej  $E_s/E_w$  wynikają stąd, że przedstawiona metoda pozwala wyznaczyć całkowitą energię zmagazynowaną w materiale w chwili pomiaru. Stosując tę metodę można kontrolować, czy badany fragment próbki odkształcał się równomiernie. Przy równomiernym odkształceniu próbki mierzona wartość wydłużenia jest wartością rzeczywistą /nie uśrednioną/. W związku z tym metoda ta umożliwia wyznaczenie zależności energii zmagazynowanej od rzeczywistej wartości wydłużenia. Jest to niewątpliwa zaleta przedstawionej metody.

Metodę tę można stosować również wówczas, gdy odkształcenie staje się niejednorodne. Wtedy jednak modelowanie wzrostu temperatury próbki towarzyszące temu odkształceniu jest znacznie trudniejsze.

## 7. Ocena błędów

Wielkości potrzebne do wyznaczania energii zmagazynowanej są od siebie niezależne /patrz wzór 4/. Wpływ przypadkowych błędów pomiarowych poszczególnych wielkości na dokładność wyznaczania energii zmagazynowanej można więc oszacować metodą różniczki zupełnej. Stosując tę metodę, ze wzoru (4) otrzymujemy:

$$(6) \quad \frac{\Delta E_s}{E_s} = \frac{\Delta E_w + \Delta IUt + \Delta UIt + \Delta tIU}{E_w - IUt}$$

gdzie: I - natężenie prądu płynącego przez próbkę,

U - spadek potencjału na części roboczej próbki.

Przyjęto, że:

$\Delta E_w$  - bezwzględny błąd wyznaczania pracy wykonanej nad próbką jest określony przez dokładność odczytu przy obliczaniu pola powierzchni pod krzywą  $F = f(\Delta l)$ . Błąd ten rośnie wraz ze wzrostem odkształcenia, a jego maksymalna wartość wynosiła 0,42 J.

$$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2$$

$\Delta I_1 \leq 0,2A$  - wartość wynikająca z wpływu błędu pomiaru temperatury na dobór natężenia prądu. Wyznaczano ją doświadczalnie.

$\Delta I_2 \leq 0,1A$  - błąd pomiaru natężenia prądu,

$\Delta U \leq 0,2mV$  - błąd pomiaru napięcia,

$\Delta t \leq 1s$  - czas rejestracji pojedynczej izotermy.

Podstawiając dane liczbowe dla poszczególnych punktów pomiarowych do wzoru (6) stwierdziliśmy, że względny błąd przypadkowy wyznaczania energii zmagazynowanej maleje w miarę wzrostu odkształcenia /przy wydłużeniu 1% wynosi on 60%, zaś przy wydłużeniu 10% spada do 12%/. Zmniejszenie się błędu względnego jest spowodowane tym, że wraz ze wzrostem wydłużenia wartość pracy wykonanej nad próbką rośnie szybciej niż jej błąd bezwzględny.

W przedstawionej metodzie bardzo istotną sprawą jest dokładne dopasowanie przebiegów temperatury podczas rozciągania i podczas nagrzewania próbki prądem. W wyniku niedopasowania tych przebiegów powstaje błąd systematyczny pomiaru energii zmagazynowanej.

#### 8. Wpływ obróbki próbek ze stali na przebieg magazynowania energii podczas rozciągania.

Opracowaną metodę zastosowano do badania wpływu obróbki próbek ze stali na przebieg magazynowania energii podczas rozciągania. Były to badania porównawcze. Wyniki uzyskane dla próbek po szlifowaniu porównywano z wynikami odpowiednio wybranego stanu obróbki jako stanu odniesienia.

Materiałem wyjściowym do wykonania próbek były arkusze blachy 1118N9T o grubości 3,4 mm, walcowanej na gorąco. Wszystkie próbki wykonywano z pasków o wymiarach 200 x 20 x 3,4 mm cię-

tych zgodnie z kierunkiem walcowania.

W stanie wyjściowym w materiale tym mogą występować niejednorodności struktury. Na powierzchni widoczne są ślady walcowania w postaci zanieczyszczeń oraz dużej chropowatości i faliściwości. Materiał taki nie może stanowić stamu odniesienia. W związku z tym opracowano technologię przygotowania stamu odniesienia, względem którego można ocenić wpływ poszczególnych obróbek. Stan ten jest również punktem wyjścia do dalszych obróbek powierzchni roboczych próbek.

Wstępną obróbką powierzchni roboczych było szlifowanie /w wypadku gdy usuwana warstwa była zbyt gruba, próbki były wstępnie frezowane/. Po wstępnym szlifowaniu próbki frezowano do odpowiedniego kształtu /rys.2/. Następnie dla uzyskania jednorodności struktury i usunięcia skutków wstępnej obróbki wygrzewano je w próżni w temperaturze 1070°C przez 40 minut.

W zakresie temperatur 900-500°C próbki te były szybko chłodzone, aby nie nastąpiło wydzielenie się węglików. Szybkie chłodzenie może wprowadzić naprężenia toteż próbki wygrzewano później przez 5 godzin w próżni w temperaturze 400°C. Część tak przygotowanych próbek /o grubości 2mm/ jest traktowana jako stan odniesienia /oznaczany dalej SO/. Pozostałe próbki poddano szlifowaniu mechanicznemu /AMM-Abrasive Mechanical Machining/.

Przygotowano 3 stany tej obróbki różniące się prędkością posuwu:

Stan 1 /nazwano go AMM 1/ - prędkość posuwu  $p_1 = 6,5 \text{ m/min}$

Stan 2 /AMM 2/-  $p_2 = 10 \text{ m/min}$

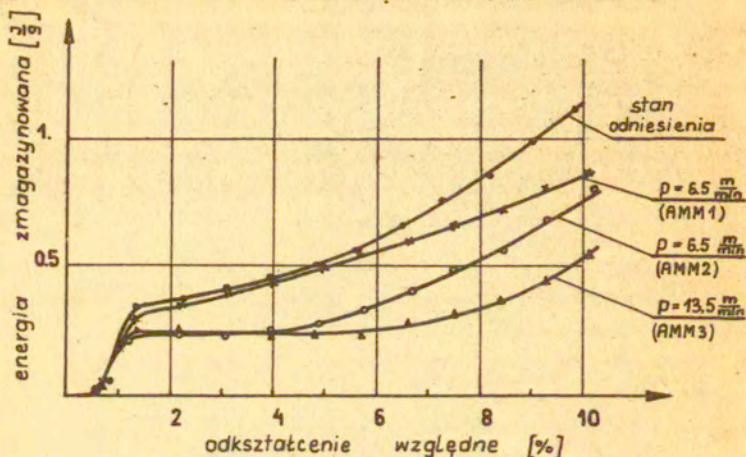
Stan 3 /AMM 3/-  $p_3 = 13,5 \text{ m/min}$ .

Taki zakres posuwu uwarunkowany był możliwościami technologicznymi wykonawcy <sup>\*/</sup>. Pozostałe parametry obróbki AMM były jednakowe dla wszystkich próbek. Prędkość obwodowa tarczy  $\mathcal{V}$  wynosiła 20 m/s, głębokość szlifowania 0,01 mm/skok.

Na rysunku 11 przedstawiono dla wszystkich badanych stanów obróbki wykresy zależności energii zmagazynowanej od odkształcenia (podczas procesu rozciągania). Wykresy dotyczą zakresu de-

<sup>\*/</sup> Próbki wykonywane były przez Zakład Doświadczalny Instytutu Obróbki Skrawaniem.

formacji, w którym robocza część próbek odkształcała się równomiernie. Przedstawiono także stosunek energii zmagazynowanej do



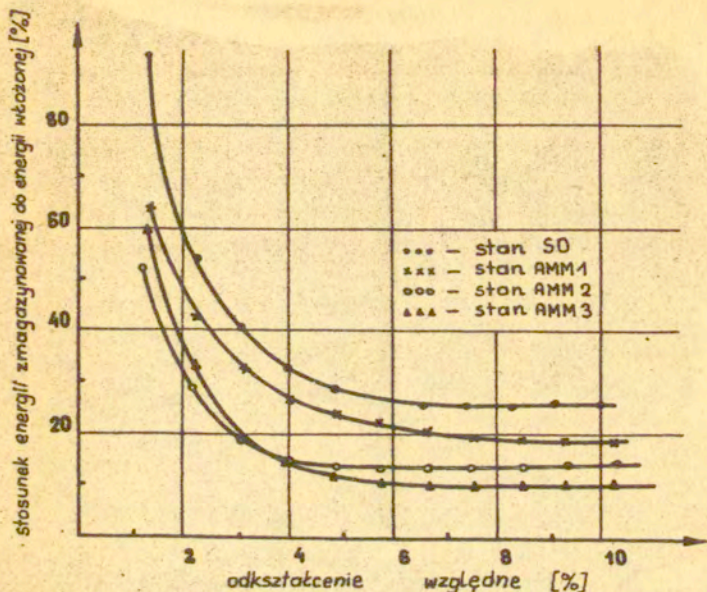
Rys.11. Zależność energii zmagazynowanej od odkształcenia próbek po różnej obróbce powierzchniowej

włożonej w funkcji odkształcenia /rys.12/.

Przebieg tej zależności jest podobny do przebiegów otrzymanych w wyniku badań kalorymetrycznych [1], mimo, że dotyczyły one czystych metali /Al, Cu/.

Z wykresów przedstawionych na rys.12 wynika, że w miarę rozciągania, stosunek energii zmagazynowanej do włożonej dąży asymptotycznie do wartości stałej. Wartość ta zależy od rodzaju obróbki powierzchniowej; dla próbek wygrzewanych jest ona wyższa niż dla próbek szlifowanych.

Podczas rozciągania wyznaczono energię zmagazynowaną w całej objętości części roboczej próbki. Głębokość warstwy odkształconej podczas szlifowania jest nie większa niż  $50 \mu m$  [2], co w wypadku badanych próbek wynosi około 3% objętości. Zakładając, że ilość zmagazynowanej energii jest proporcjonalna do objętości materiału, otrzymane wyniki wskazują, że obróbka powierzchniowa silnie wpływa na przebieg procesu magazynowania energii podczas rozciągania.



Rys.12. Zależność stosunku  $E_s/E$  od odkształcenia próbek po różnej obróbce powierzchniowej

Przedstawione wyniki badań /rys.11,12/ wskazują, że mimo małych różnic w parametrach szlifowania występują zauważalne różnice w wartościach energii zmagazynowanej. Próbki szlifowane z większą prędkością posuwu magazynują mniej energii. Powiązanie przebiegu magazynowania energii podczas rozciągania z parametrami fizycznymi warstwy wierzchniej ukształtowanej obróbką powierzchniową wymaga dalszych badań.

### 9. Podsumowanie

Przedstawiona metoda pozwala na wyznaczenie zależności energii zmagazynowanej od odkształcenia bez przerywania procesu deformacji a więc umożliwia badanie przebiegu magazynowania energii. Jednym z najważniejszych problemów w tej metodzie jest dokładne modelowanie zmian temperatury próbki, a co za tym idzie dokładne wyznaczenie ciepła wydzielonego podczas jej rozciągania. Dokładność tę można zwiększyć przez zagęszczenie liczby

krzywych  $\Delta T(t)$  otrzymanych przy stałych wartościach mocy prądu, co pozwoli na bardziej płynne modelowanie grzania się próbki podczas rozciągania oraz przez polepszenie stabilizacji prądu przepuszczanego przez próbkę.

Zastosowanie przedstawionej metody do wyznaczania energii zmagazynowanej podczas rozciągania próbek poddanych różnym obróbkom powierzchniowym wykazało, że niewielkie zmiany parametrów obróbki powierzchniowej wpływają na przebieg magazynowania energii.

#### Literatura

1. M.B.BEVER, D.L.HOLT, A.L.TITCHENER - "The Stored Energy of Cold Work", Pergamon Press, 1973.
2. J.KACZMAREK - "Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej" WNT, Warszawa 1971.