

## LOKALIZACJA ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH PODCZAS CIĘCIA W WARUNKACH ZANIŻONEJ ZDOLNOŚCI MATERIAŁU DO UMCNIENIA ODKSZTAŁCENIOWEGO

STANISŁAW D Z I D O W S K I (WROCLAW)

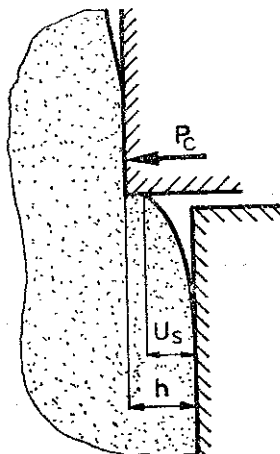
W jednej z poprzednich prac [1], autor niniejszego opracowania wykazał zależność stopnia lokalizacji odkształceń podczas cięcia od zdolności materiału do odkształceniowego umocnienia. W tej pracy przeprowadzono doświadczalną analizę skuteczności dwóch różnych sposobów osiągnięcia zamierzonej lokalizacji odkształceń podczas cięcia stali węglowych. Pierwszy ze sposobów polegał na nałożeniu ograniczeń na przebieg umocnienia przez wstępne odkształcenie, drugi przez obniżanie temperatury ciętego materiału.

Stwierdzono, że podczas cięcia w niskich temperaturach, a szczególnie poniżej 150 K, osiąga się znacznie większą lokalizację odkształceń niż w przypadku materiału wstępnie odkształconego i ciętego w temperaturze otoczenia (293 K). Obniżenie temperatury do 77 K pozwala ponadto osiągnąć stan zbliżony do czystego adiabatycznego ścinania, gwarantujący szczególnie wysoki stopień lokalizacji odkształceń. Przeprowadzone badania wykazały również, że lokalizacja odkształceń podczas cięcia w temperaturze 77 K nie zależy od wartości odkształceń wstępnych ciętego materiału. Odkształcenia wstępne o wartości od 0 do 20% uzyskano przez przeciąganie próbek.

### 1. WSTĘP

Lokalizacja odkształceń podczas cięcia materiałów metodami obróbki plastycznej jest zjawiskiem pożądanym, w przeciwieństwie do lokalizacji odkształceń występującej w innych procesach obróbki plastycznej. Ze wzrostem stopnia lokalizacji odkształceń w ciętym materiale następują mniejsze zmiany kształtu, co jest bardzo korzystne z technologicznego punktu widzenia.

Analizując obszar odkształceń plastycznych w strefie cięcia, można mówić o jego kształcie należnym od głębokości załęgania odkształceń w stosunku do powierzchni przecięcia oraz o zewnętrznym zarysie tego obszaru. Ten ostatni zarys zależy od przemieszczeń powierzchni ciętego materiału. Z punktu widzenia dokładności kształtu ciętego elementu bardziej istotny jest kształt zewnętrznego zarysu obszaru odkształceń plastycznych. Szczególnego znaczenia nabiera przy tym przemieszczenie  $U_s$  powierzchni swobodnej ciętego materiału (rys. 1). Jest ono przeważnie znacznie większe od przemieszczenia wywołanego bezpośrednim naciskiem noża na materiał [2]. Minimalizacja przemieszczenia  $U_s$  do dziś nastrocza technologom wiele problemów [3].



Rys. 1. Przesunięcie powierzchni swobodnej ciętego materiału:  $U_s$  — maksymalne przesunięcie,  $h$  — zagłębienie noża w materiał,  $P_c$  — siła tnąca

W pracy [1] wykazano liniowy związek przesunięcia  $U_s$  powierzchni swobodnej ze zdolnością materiału do odkształceniowego umocnienia, co wyrażono za pomocą wzoru

$$(1.1) \quad U_s = C + bn,$$

w którym  $U_s$  oznacza maksymalne przesunięcie powierzchni swobodnej,  $C$ ,  $b$  stałe oraz  $n$  współczynnik umocnienia wyznaczony ze wzoru

$$\sigma = C_1 (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n.$$

Wzór (1.1) sformułowano na podstawie badań kilku gatunków stali, hydronalium i mosiądzów.

Celem niniejszej pracy jest wykazanie i porównanie różnych możliwości wywoływania zamierzonej lokalizacji odkształceń materiału przez obniżanie jego zdolności do umocnienia podczas cięcia. Zdolność tę obniżano przez oziębienie materiału podczas cięcia [4, 5, 6] oraz wstępne odkształcenia materiału [7] przed cięciem.

## 2. MATERIAŁ I METODA BADAŃ

Badania przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy  $d = 22_{-0.05}^{+0.05}$  mm, wykonanych z wyżarzonych stali węglowych o zawartości węgla 0,09 i 0,44%. Skład chemiczny badanych stali podano w tablicy 1, a ich wyjściowe własności mechaniczne w tablicy 2. Do badań przygotowano dwie partie próbek o wymiarach  $\varnothing 22 \times 66$  mm. Pierwsza partia próbek miała własności materiału w stanie naturalnym. Drugą partię odkształcono wstępnie przez przeciąganie.

Celem zachowania jednakowej średnicy próbek w obu partiach, wykonano je z prętów o średnicy początkowej  $d_0 = 25$  mm. Wyjściowe średnice przecią-

ganych prętów wynosiły przy tym od 22,6 do 25 mm. a wartości dobranych gniotów

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100\%,$$

wynosiły odpowiednio 5,24; 10,01; 14,55; 20 i 22,56%, gdzie  $\varepsilon_s$  oznacza gniot,  $\Delta S$  różnicę pola powierzchni przekrojów, początkowego i końcowego,  $S_0$  pola powierzchni przekroju początkowego. Maksymalny gniot  $\varepsilon_s = 22,56\%$  odpowiadał w przybliżeniu maksymalnemu gniotowi stosowanemu w hutnictwie podczas przeciągania prętów o podobnym zakresie średnic.

Tablica 1. Skład chemiczny badanych stali

Lp.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,09	0,04	0,22	0,012	0,031	ślady	ślady	0,03
2	0,44	0,63	0,19	0,047	0,018	ślady	ślady	0,10

Próby cięcia materiału wyżarzonego przeprowadzono w siedmiu temperaturach z przedziału od 77 do 293 K. Materiał wstępnie odkształcony cięto tylko w temperaturach 77 i 293 K. Cięcie przeprowadzono w przyrządzie napędzanym prasą mimośrodową PMP63. Noże miały kształt tulei o wewnętrznej średnicy  $d_n = 22^{0,03}$  mm. Szczelina między krawędziami tnącymi noży wynosiła 0,6 mm.

Tablica 2. Własności mechaniczne badanych stali

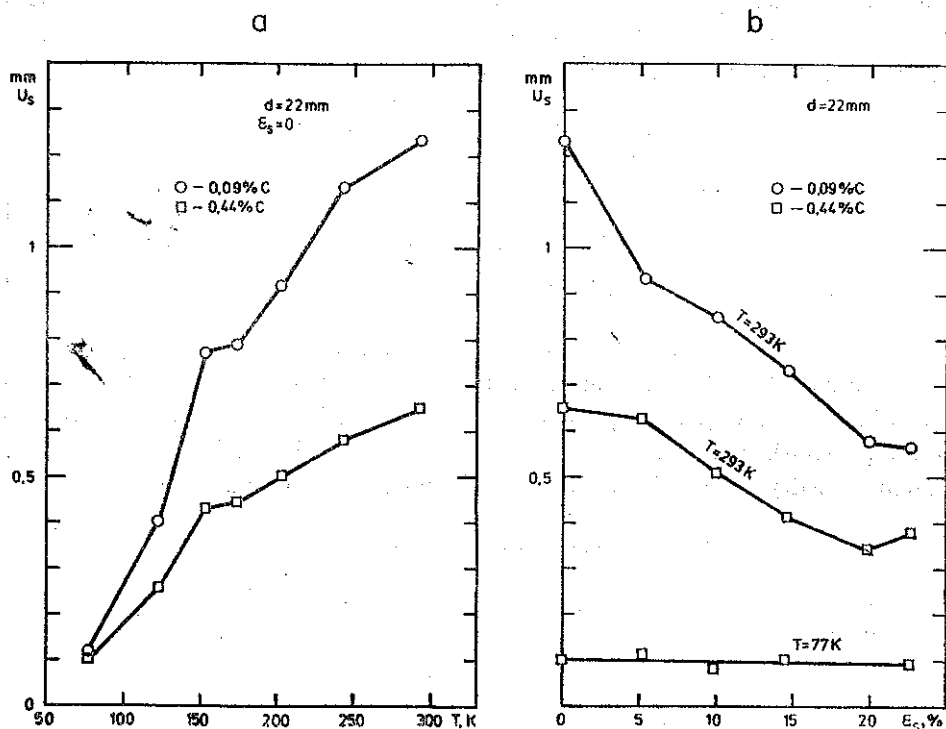
Zawartość węgla	$R_m$	$R_t$	$A_5$	Z	HV
%	$\times 10$ MPa	$\times 10$ MPa	%	%	$\times 10$ MPa
0,09	40	29	32	46	120
0,44	54	41	16	31	185

Zasadniczą miarą lokalizacji odkształceń była maksymalna wartość wspomnianego przemieszczenia  $U_s$  powierzchni swobodnej (rys. 1), mierzona po zakończeniu próby. Określano również rozkład przemieszczeń w strefie cięcia, stosując metodę paralaksy czasowej [8]. Dotyczyło to specjalnie przygotowanych próbek, ciętych w temperaturach 293 i 77 K. Próbki te były dzielone wzdłuż osi, celem naniesienia wzdłużnych rys o gęstości 4 linie/mm. Ponadto rejestrowano przebieg siły  $P_c$  cięcia jako funkcji zagłębienia  $h$  noża w materiał.

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki badań opracowano graficznie i zamieszczono na rysunkach 2-4. Wpływ temperatury  $T$  i wstępnego odkształcenia  $\varepsilon_s$  na przemieszczeniu  $U_s$  powierzchni swobodnej ciętych stali ilustruje rys. 2.

Z rys. 2a wynika, że obniżenie temperatury ciętego materiału z 293 do 77 K powoduje ponad 10-cio krotne zmniejszenie przemieszczenia  $U_s$  próbek wykonanych ze stali o zawartości 0,09% C i 6,5-krotne próbek ze stali o zawartości 0,44% C. Funkcja  $U_s=f(T)$  ma przy tym charakter funkcji wykładniczej. Znamiennym jest ut stopniowe zmniejszanie się różnic między wartościami  $U_s$  dla obu badanych stali w miarę obniżania temperatury. W efekcie tego w temperaturze 77 K przemiesz-



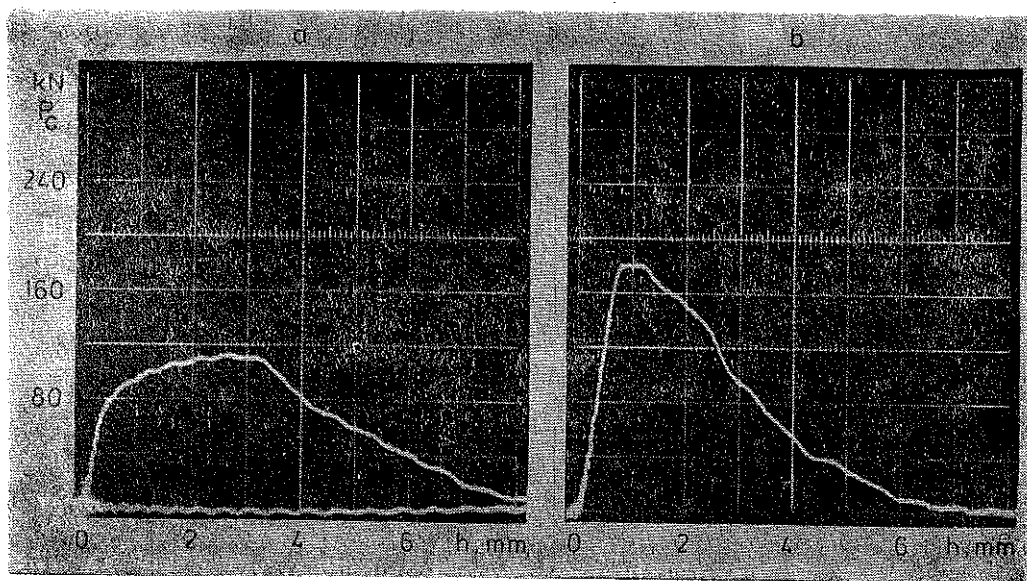
Rys. 2. Przemieszczenia  $U_s$  powierzchni swobodnej ciętych stali o zawartości 0,09 i 0,44% C: a) wpływ temperatury  $T$  na przemieszczenie  $U_s$ , b) wpływ odkształceń wstępnych  $\epsilon_s$  na przemieszczenie  $U_s$ .

czenia  $U_s$  dla stali 0,09 i 0,44% C są prawie jednakowe i dostatecznie małe z praktycznego punktu widzenia. W przypadku materiału wstępnie odkształconego i ciętego w temperaturze otoczenia 293 K (rys. 2b) omówiona wyżej tendencja jest mniej wyraźna. Widoczne odchylenie obu krzywych  $U_s=f(\epsilon_s)$  293 K w kierunku poziomym, po przekroczeniu gniotu  $\epsilon_s=20\%$ , wskazuje raczej na brak możliwości osiągnięcia takiego efektu, jaki uzyskano w temperaturze 77 K podczas cięcia wyżarzonych stali. Efekt zastosowania wstępnego odkształcenia występuje najwyraźniej w przedziale gniotów  $\epsilon_s$  wynoszącym  $[0; 20]$  %. W tym przedziale gniotów przemieszczenie  $U_s$  stali 0,09% C maleje około dwukrotnie, a stali 0,44% C około 1,7 razy.

Zupełnie odmiennie zachoduje się materiał wstępnie odkształcony i cięty w temperaturze 77 K (rys. 2b). Okazuje się, że wstępne odkształcenie materiału nie wpływa na zmianę przemieszczenia  $U_s$ . Przemieszczenie to zachowuje praktycznie stałą wartość. Obserwowane różnice przemieszczeń  $U_s$  mieszczą się w granicach błędu pomiaru, wynoszącego  $\pm 0,01$  mm. Średnie przemieszczenie  $U_s$  materiału wstępnie odkształconego i ciętego w temperaturze 77 K (rys. 2b) odpowiada wartości uzyskanej w temperaturze 77 K dla obu wyżarzonych stali (rys. 2a).

Jak wynika z powyższego, stale badane w temperaturze 77 K zachowują się podczas cięcia w zbliżony sposób, bez względu na zawartość węgla w stali i wartość wstępnego odkształcenia. Świadczy to o istotnej utracie zdolności materiału do umocnienia odkształceniowego. W efekcie tego nie obserwuje się nadmiernej migracji odkształceń wzdłuż osi próbki, począwszy od płaszczyzny cięcia. Można tu mówić o podobieństwie procesu do czystego ścinania podczas rozciągania [9, 10].

W przypadku cięcia w temperaturze 77 K będzie to proces zbliżony do czystego adiabatycznego ścinania. W pracy [11] stwierdzono, że adiabatycznemu przebiegowi odkształceń podczas próby rozciągania w niskich temperaturach towarzyszy natychmiastowa utrata stateczności materiału.

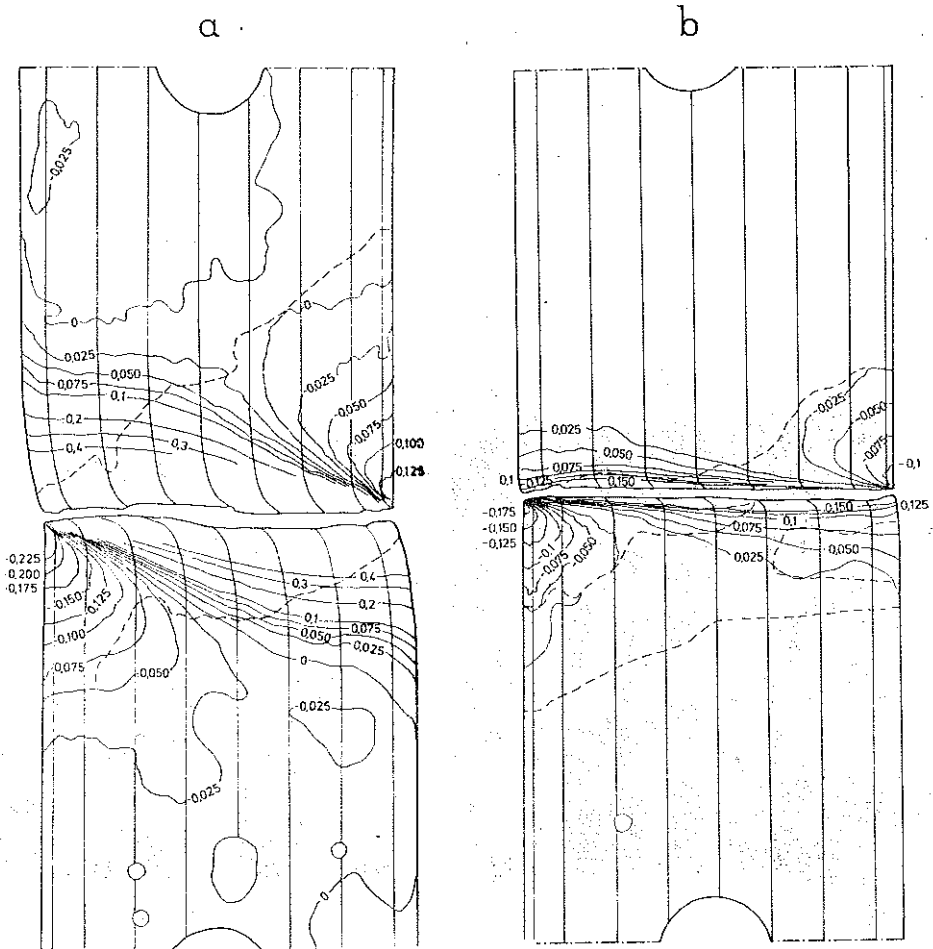


Rys. 3. Oscylogramy siły cięcia  $P_c$  jako funkcja zagłębienia noża  $h$ : a) temperatura cięcia  $T=293$  K, b) temperatura cięcia  $T=77$  K; materiał — stal 0,09% C

Jeżeli w rozważanym przypadku cięcia przyjmujemy maksimum siły cięcia za moment utraty stateczności (rys. 3), to z rys. 3b wynika, że stal cięta w temperaturze 77 K traci również stosunkowo szybko stateczność. Utrata stateczności ma miejsce prawie bezpośrednio po uplastycznieniu ciętego materiału.

Na rys. 4 pokazano rozkład przemieszczeń materiału w strefie cięcia, obrazujący zasięg obszarów uplastycznionych podczas cięcia w temperaturze otoczenia (rys. 4a)

i temperaturze 77 K (rys. 4b). Linie jednakowych przemieszczeń oznaczono cyframi, informującymi o wielkości przemieszczenia w milimetrach. Rysunek ten obrazuje rozkład przemieszczeń w kierunku cięcia. Przeciwne zwroty tych przemieszczeń rozrózniono znakiem (-). Przemieszczenia ze znakiem (-) są spowodowane bezpośrednio naciskiem noża na cięty materiał. Wielkość tych przemieszczeń waha się w granicach kilkunastu setnych części milimetra i jest najczęściej znacznie mniejsza od przemieszczenia powierzchni swobodnej. Porównując odległości izolinii ze



Rys. 4. Obszary przemieszczeń plastycznych w strefie cięcia stali o zawartości 0,09% C: a) ciętej w temperaturze 293 K, b) ciętej w temperaturze 77 K.

Na rysunku izolinie przemieszczeń w kierunku cięcia oznaczono cyframi

znakiem (+), posiadających te same wartości na rys. 4a i b, można wnioskować o stopniu lokalizacji odkształceń. Kształt obszaru wyznaczonego przez te izolinie wskazuje na to, że przyjęta miara lokalizacji odkształceń w postaci parametru  $U_s$  (rys. 1) jest dopuszczalna w rozważanym zakresie. Można ją oczywiście stosunkowo łatwo uzupełnić pełnym opisem kształtu powierzchni swobodnej, łącznie z określe-

niem zasięgu występowania tego przemieszczenia. Będzie to miało znaczenie np. podczas analitycznego opisu i analizy odkształceń w strefie cięcia, szczególnie w przypadku modelowania procesu cięcia z umocnieniem. Dość istotną rolę podczas analizy stanów krytycznych będzie jednak nadal odgrywał parametr  $U_s$  i jego związek ze zdolnością materiału do umocnienia.

#### 4. WNIOSKI

Doświadczalna analiza skuteczności omówionych sposobów obniżania zdolności materiału do umocnienia odkształceniowego, celem osiągnięcia zamierzonej lokalizacji odkształceń podczas cięcia, wykazała co następuje:

1. Wstępne odkształcanie materiału sprzyja lokalizacji odkształceń, ale w ograniczonym zakresie.

2. Obniżanie temperatury ciętego materiału intensyfikuje lokalizację odkształceń w większym stopniu niż wstępne odkształcanie materiału przed cięciem. W szczególnym przypadku obniżanie temperatury materiału może doprowadzać do procesu cięcia zbliżonego do czystego adiabatycznego ścinania.

3. W przypadku cięcia zbliżonego do czystego adiabatycznego ścinania lokalizacja odkształceń podczas cięcia nie zależała w istotny sposób od zawartości węgla w badanych stalach oraz od wartości odkształceń wstępnych.

4. Maksymalne przemieszczenie powierzchni swobodnej  $U_s$  może stanowić użyteczną miarę stopnia lokalizacji odkształceń podczas cięcia materiałów metodami obróbki plastycznej.

#### LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. S. DZIDOWSKI, *Wpływ zdolności materiału do umocnienia na odkształcenia plastyczne zachodzące przy cięciu*, Postępy Techn. Maszyn i Urząd., PAN, 1984.
2. S. DZIDOWSKI, *Znaczenie utraty stateczności i prędkości pęknięcia materiału w procesie cięcia plastycznego*, Materiały konferencyjne, Obróbka Plast., 79, KJM PAN 165—172, 1979.
3. S. DZIDOWSKI, *Perspektywy rozwoju technologii bezodpadowego cięcia materiałów prętowych*, Mechanik, 5, 249—251, 1984.
4. D. J. DINGLEY, D. MC LEAN, *Components of the flow stress of iron*, Acta Metallurgica, 15, 885—901, 1967.
5. G. S. PISARENKO, A. J. KRASOWSKY, T. YOKOBORI, *Studies on temperature rate sensitivity of plastic flow stress and on fracture toughness*, Repts Res. Inst. Strength and Fract. Mater., Tohoku Univ., 13, 1, 1—57, 1977.
6. S. DZIDOWSKI, *The effect of temperature, carbon content and grain size on the stability loss during transverse shearing*, Arch. Hutn. [przekazany do Redakcji].
7. Z. MARCINIAK, *Odkształcenia graniczne przy tłoczeniu blach*, WNT, Warszawa 1971.
8. S. DZIDOWSKI, *Zastosowanie makrostereofotogrametrii w badaniach przelomów i rozkładu przemieszczeń w procesie cięcia plastycznego*, Materiały konferencji „Postępy w Technice Wytwarzania”, cz. III, NOT, WSI Koszalin, Kolobrzeg 1978.
9. A. K. CHAKRABARTI, J. W. SPRETNAC, *Instability of plastic flow in the directions of pure shear. I. Theory*, Metallurgical Trans. A, 6A, 733—736, 1975.

10. A. ЧАКРАВАРТИ, J. W. СПРЕТНАК, *Instability of plastic flow in the directions of pure shear. II. Experimental*, Metallurgical Trans. A, 6A, 737—747, 1975.
11. J. КЛЕПАЦКО, *Generalized conditions for stability in tension tests*, Int. J. Mech. Sci., 10, 297—313, 1968.

## Резюме

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВО ВРЕМЯ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ СНИЖЕННОЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛА К ДЕФОРМАЦИОННОМУ УПРОЧНЕНИЮ

В одной из предыдущих работ [1], автор настоящей разработки показал зависимость степени локализации деформаций во время резания от способности материала к деформационному упрочнению. В этой работе проведен экспериментальный анализ эффективности двух разных способов достижения намеренной локализации деформаций во время резания углеродистых сталей. Первый из способов заключался в наложении ограничений на ход упрочнения вступительными деформациями, второй путем снижения температуры резанного материала.

Констатируется, что во время резания в низких температурах, а особенно ниже 150 К; достигается значительно большую локализацию деформаций, чем в случае материала вступительно деформированного и резанного в температуре окружения (293 К). Снижение температуры к 77 К позволяет кроме этого достигнуть состояния приближенного к чистому адиабатическому сдвигу, гарантирующего особенно высокую степень локализации деформаций. Проведенные исследования показали также, что локализация деформаций во время резания в температуре 77 К не зависит от значения вступительных деформаций резанного материала. Вступительные деформации со значениями от 0 до 20% получены путем волочения образцов.

## SUMMARY

LOCALIZATION OF PLASTIC STRAIN DURING SHEARING IN CONDITIONS OF REDUCED STRAIN-HARDENING CAPACITY OF THE MATERIAL

In one of his previous works [1], the author of the present paper showed the existence of a relationship between the degree of strain localization during shearing and the strain-hardening capacity of the material. Now, an experimental analysis of the effectiveness of two different methods of reaching the intended localization of strains during shearing of carbon steels is conducted. The two methods consisted in restricting the development of strain-hardening; the first — by initial deformation, and the second — by lowering the temperature of the sheared material. It has been found that during shearing at low temperatures, particularly below 150 K, a considerably greater localization of strains is obtained than in the case of initially deformed material sheared at ambient temperature (293 K). A reduction of the temperature to 77 K allows, moreover, to reach a state close to pure adiabatic shear which ensures a particularly high degree of strain localization. Tests showed that localization of strains during shearing at the temperature of 77 K does not depend on the values of the initial deformation of the sheared material. The initial deformation of the test pieces, ranging from 0 to 20%, were obtained by drawing.

POLITECHNIKA WROCLAWSKA  
INSTYTUT TECHNOLOGII BUDOWY MASZYN

Praca została złożona w Redakcji dnia 24 października 1983 r.