

Tadeusz Lamber, Jacek Mazurkiewicz  
Instytut Inżynierii Materiałowej

## KSZTAŁTOWANIE WŁASNOŚCI PLASTYCZNYCH TAŚM POPRAZ UNIEJEDNORODNIENIE PLASTYCZNE PRZED WALCOWANIEM

**Streszczenie.** Wyprowadzono zależności na wskaźnik stanu naprężenia i stopień wykorzystania zapasu plastyczności w warstwowo niejednorodnych plastycznie, płaskich wyrobach podczas ich walcowania. W charakterze przykładu, jako zastosowanie wyprowadzonych zależności, określono obszary o zwiększonym prawdopodobieństwie powstawania pęknięć.

### 1. Wstęp

Duże zapotrzebowanie na wyroby walcowane a szczególnie taśmy spowodowało intensywny rozwój ich produkcji. Dalszy dynamiczny rozwój uzależniony jest przede wszystkim od kosztów wytwarzania i związany z tym wzrost zapotrzebowania.

Istotnym czynnikiem powiększającym koszty produkcji są międzyoperacyjne wyżarzenia rekrystalizujące, które ze względu na mechanizm umocnienia materiału są niezbędnym elementem procesu technologicznego.

Wraz ze wzrostem odkształcenia na zimno wrastają niekorzystne dla przeróbki plastycznej własności walcowanego materiału, wyrażone w postaci wskaźników takich jak  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $HV$ , ogólnie obrazujące utratę własności plastycznych. Przejawia się to w postaci wzrostu kruchości, mniejszej podatności do odkształceń, co w efekcie prowadzi do zmniejszenia zapasu plastyczności, tzn. zmniejszenia możliwości odkształcenia. Zmniejszanie zapasu plastyczności trwa do momentu jego całkowitego wyczerpania, co jest równoznaczne ze zniszczeniem odkształconego materiału na skutek powstawania i rozprzestrzeniania się pęknięć.

Celem zapobieżenia temu zjawisku stosuje się wyżarzenia rekrystalizujące przerabianego materiału. Liczba tych wyżarzeń zależy od szybkości utraty własności plastycznych odkształconego materiału oraz od całkowitego odkształcenia wymaganego przez technologię produkcji. Równocześnie, aby możliwe było dalsze efektywne walcowanie, konieczne jest otrzymanie odpowiedniej powierzchni. W tym celu stosuje się trawienie powstałej zgorzeliny lub usuwanie jej innymi sposobami oraz płukanie i suszenie. Po tym kompleksie operacji możliwa jest dopiero dalsza przeróbka plastyczna taśmy.

Operacje te wybitnie podwyższają koszty produkcji nie tylko przez wzrost pracochłonności ich wykonania, amortyzacji dodatkowych urządzeń, zużycie dodatkowych materiałów, ale także przez zmniejszenie uzysku gotowego wyrobu.

Badając zagadnienie walcowania na zimno oraz zapasu plastyczności stwierdzono, że wyczerpywanie zapasu plastyczności nie przebiega równomiernie w całej objętości taśmy. Istnieją takie obszary, w których wyczerpywanie zapasu plastyczności przebiega bardzo szybko w stosunku do innych i tam właśnie powstają najwcześniej pęknięcia. Na tej podstawie stwierdzono, że istnieją realne możliwości zmniejszenia prędkości wyczerpywania zapasu plastyczności drogą zmian stanu naprężeń i odkształceń w strefie plastycznego kształtowania między wałkami. Zmniejszenie prędkości wyczerpywania zapasu plastyczności jest równoznaczne ze zmniejszeniem ilości wywarzeń i kosztów produkcji.

## 2. Cel i zakres pracy

Tezą pracy jest stwierdzenie, że w ramach procesu walcowania istnieje taka technologia, która gwarantuje bardziej równomierne w stosunku do innych wyczerpywanie własności plastycznych w objętości walcowanej taśmy.

Na tej podstawie zbudowano model matematyczny, który zapewnił otrzymanie zadowalających wyników potwierdzonych doświadczalnie. Zgodnie z przedstawią tezą celem pracy jest wyznaczenie wskaźników stanu naprężeń, odkształceń, zapasu plastyczności i stopnia wyczerpania zapasu plastyczności w procesie walcowania taśm plastycznie niejednorodnych. Wielkości te ustalone na drodze teoretycznej dla przyjętego modelu pozwolą na zlokalizowanie obszarów o zwiększonym wyczerpywaniu się własności plastycznych. Zakres pracy związany jest z różnorodnością przyjmowanych modeli do rozważań teoretycznych.

## 3. Podstawowe pojęcie

Stopniem wykorzystania zapasu plastyczności, wg teorii proponowanej przez Kołmogorowa [1], nazwano następującą funkcję

$$\psi = \int_{t_0}^{t_1} \frac{\dot{\epsilon}_1}{\epsilon_p \left[ \frac{\sigma_m}{\tau_1} (t) \right]} dt \quad (1)$$

W wyrażeniu tym wskaźnik stanu naprężeń  $\frac{\sigma_m}{\tau_1}$  jest stosunkiem średniego naprężenia  $\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$  (pierwszy niezmiennik tensora naprężeń) do intensywności naprężeń stycznych

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$$

(drugi niezmiennik dewiatora naprężeń).

W celu wyznaczenia dopuszczalnego stopnia odkształcenia  $\varepsilon_p$  przeprowadzono badania tej wielkości w zależności od stanu naprężeń podczas odkształcenia [2].

Otrzymane wyniki pozwoliły na aproksymację wielkości  $\varepsilon_p$  liniową funkcją zmiennej  $\frac{\sigma_m}{\tau_1}$ .

Wielkość ta przyjętą następującą postać:

$$\varepsilon_p = p \frac{\sigma_m}{\tau_1} + b \quad (2)$$

gdzie  $p$  i  $b$  są estymatorami aproksymowanej liniową funkcją odkształcalności granicznej.

W płaskim stanie odkształcenia, jakiemu podlega taśma podczas walcowania, zachodzą następujące zależności:

$$\dot{\varepsilon}_x = \dot{\varepsilon}_y, \quad \dot{\varepsilon}_z = 0, \quad \dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{yz} = \dot{\gamma}_{zx} = 0$$

Intensywność prędkości odkształcenia postaciowego przyjmuje w tym przypadku postać:

$$\dot{\gamma}_1 = 2|\dot{\varepsilon}_y|, \quad (3)$$

A stopień wykorzystania zapasu plastyczności po uwzględnieniu powyższych zależności wynosi:

$$\psi = 2 \int_{t_0}^{t_1} \frac{|\dot{\varepsilon}_y|}{p \frac{\sigma_m}{\tau_1} + b} dt \quad (4)$$

#### 4. Wskaźniki stanu naprężeń

Jak wynika z zależności (4) wyznaczenie wartości stopnia wykorzystania zapasu plastyczności bez określenia naprężenia średniego, intensywności naprężeń stycznych lub prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}_y$  na grubości  $h$  jest niemożliwe. W tym celu skorzystano z wyników [2] określających naprężenia występujące w taśmie niejednorodnej plastycznie podczas walcowania. Przyjęta w pracy [2] niejednorodna na wysokości taśma trójwarstwowa o symetrycznym względem jej podłużnej osi rozkładzie własności plastycznych, odpowiada przede wszystkim modelowi taśmy dwustronnie platerowanej o znikomej grubości, w porównaniu z trzema podstawowymi warstwami, warstwy dyfuzyjnej. Nie istnieją także istotne przeszkody, by model ten odwzorowywał stan odkształceń a także i naprężeń w taśmie, w której można wyodrębnić pojedynczo warstwy, podczas procesu walcowania. Przyjmując modele niejednorodnych taśm o warstwach "tmt" (kolejność warstw twarda, miękka, twarda - materiał warstwy twardej posiada w odniesieniu do miękkiej wyższą granicę plastyczności) i "mtm" (rys, 1, 2) otrzymano dla dziesięciu występujących w tych modelach stref odkształcenia uogólnioną postać na składową naprężenia normalnego  $\sigma_{x(1)}^0$  w kierunku osi  $x$  występującego w strefie (1) położonej w miejscu "o" (p - początek, s - środek, k - koniec obszaru odkształcenia)

$$\sigma_{x(1)}^0 = \frac{\sigma_{p1}^x}{2} (A_{(1)}^0)^{\varphi} + B_{(1)}^0 + 1) \quad (5)$$

gdzie:

$$A_{(1)}^0 = A_{(1)}^0 (\theta, \frac{\tau}{\sigma_{xp}}, \alpha, \frac{\sigma_{p1}}{\sigma_{p2}})$$

$$B_{(1)}^0 = B_{(1)}^0 (\theta, \frac{\tau}{\sigma_{xp}} \alpha, \frac{\sigma_{p1}}{\sigma_{p2}} \varphi_n)$$

$\theta_1$  - względny udział grubości warstwy 1-tej do grubości całej taśmy,

$\tau$  - naprężenia styczne na powierzchni styku z walcem,

$$\sigma_{p1}^x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{p1},$$

$\sigma_{p1}$  - naprężenia uplastyczniające materiału 1-tej warstwy,

$\alpha$  - kąt walcowania,

$\varphi_k$  - całkowite rzeczywiste odkształcenie do płaszczyzny wyjścia,

$\varphi$  - rzeczywiste odkształcenie do badanego momentu.

Ponieważ z badanego procesu walcowania wyeliminowano naciąg i przeciwnaciąg dlatego nie występuje on w wielkościach  $A_{(1)}^0$  i  $B_{(1)}^0$ .

Dla przyjętych modeli odkształcenia ciała niejednorodnego typu "tmt" i "mtm" zależności opisujące wielkości  $A_{(1)}^0$ ,  $B_{(1)}^0$  wynoszą:

$$A_{(3)}^p = A_{(3)}^s = 2 (a_1 \Theta_1 - 1)$$

$$A_{(4)}^p = A_{(4)}^s = 2 (a_1 - a_1 \Theta_1 - 1)$$

$$A_{(5)}^p = A_{(5)}^k = 2 (a_2 - 1)$$

$$A_{(6)}^p = A_{(6)}^k = -2 (a_2 + 1)$$

$$A_{(1)}^k = -2 (a_1 - a_1 \Theta_1 + 1)$$

$$A_{(2)}^k = -2 (a_1 \Theta_1 + 1)$$

$$B_{(3)}^p = B_{(4)}^p = 1 - 2 \frac{\sigma_p}{\sigma_{p1}}$$

$$B_{(5)}^p = B_{(6)}^p = 1 - 2 \frac{\sigma_p}{\sigma_{p2}} \quad (6)$$

$$B_{(3)}^s = \frac{a_1}{a_2} (a_2 - 1) \Theta_2 \varphi_k + B_{(3)}^p$$

$$B_{(4)}^s = -\frac{a_1}{a_2} (a_2 + 1) \Theta_2 \varphi_k + B_{(4)}^p$$

$$B_{(1)}^k = -A_{(1)}^k \varphi_k + B_{(3)}^p$$

$$B_{(2)}^k = -A_{(2)}^k \varphi_k + B_{(3)}^p$$

$$B_{(5)}^k = -A_{(5)}^k \varphi_k + B_{(5)}^p$$

$$B_{(6)}^k = -A_{(6)}^k \varphi_k + B_{(6)}^p$$

gdzie

$$a_1 = \frac{\tau_{1,0}}{\sigma_{p1}} \cdot \frac{2l}{\Delta h_1}$$

$$a_2 = \frac{\tau_{1,0}}{\sigma_{p2}} \cdot \frac{2l}{\Delta h_2}$$

Granice stref odkształcenia (w płaszczyznach pionowych), dla których podano poprzednio wielkości  $\sigma_x$ , określono poprzez porównanie wartości naprężeń dla sąsiadujących stref. Wyznaczono w ten sposób wysokość taśmy w płaszczyznach granic stref (5, 6), (6, 5), (3, 1), (4, 2), gdzie kolejność cyfr odpowiada kolejności stref. Wynoszą one

$$h_{(5,6)} = h_p \delta^t \frac{1 + a_2}{2a_2}$$

$$h_{(6,5)} = h_p \delta^t \frac{a_2 - 1}{2a_2} \quad (7)$$

$$h_{(3,1)} = h_{(4,2)} = h_p \delta^t \left( \frac{a_2 + 1}{2a_2} + \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right)$$

Płaszczyzna przechodząca przez  $h_{(3,1)} = h_{(4,2)}$  jest dla zewnętrznych stref odpowiednikiem płaszczyzny podziałowej w kotlinie walcowania.

Z warunku plastyczności wg Hubera wynika, że dla stref odkształconych plastycznie wartość  $\tau_1$  musi być równa  $\frac{\sigma_p^x}{2}$ , co odpowiada wytrzymałości na ścinanie. Przy czym największe różnice naprężeń głównych w obszarze plastycznego odkształcenia w płaskim stanie odkształcenia oznaczono przez  $\sigma_p^x$ . Dla płaskiego stanu odkształceń zgodnie z przyjętym układem osi zachodzą następujące zależności:

$$\sigma_z = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\sigma_p^x = \sigma_x - \sigma_y$$

oo w efekcie daje

$$\sigma_m = \sigma_x - \frac{1}{2} \sigma_p^x \quad (8)$$

a końcowa postać wskaźnika stanu naprężeń w tym przypadku wyrazi się zależnością:

$$\left(\frac{\sigma_m}{\tau_{II}}\right)_1 = 2 \frac{\sigma_x}{\sigma_{pI}} - 1 \quad (9)$$

W oparciu o zależności (5) i (9), czyli dla płaskiego stanu odkształcenia, wyznaczono wskaźnik stanu naprężenia w następującej postaci:

$$\left(\frac{\sigma_m}{\tau_{II}}\right)_1^0 = A_{(1)}^0 \varphi_1 + B_{(1)}^0 \quad (10)$$

##### 5. Stopień wykorzystania zapasu plastyczności taśm niejednorodnych plastycznie

Stopień wykorzystania zapasu plastyczności w tym przypadku po podstawieniu zależności (10) oraz równania

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{d\epsilon_y}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (11)$$

do wyrażenia (4), przyjmie postać:

$$\psi_{(1)}^0 = 2 \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{|d\varphi|}{p_1 A_{(1)}^0 \varphi_1 + p_1 B_{(1)}^0 + b_1} \quad (12)$$

Po scałkowaniu oraz uwzględnieniu nierówności  $\frac{d\varphi}{dt} < 0$  otrzymujemy:

$$\psi_{(1)}^0 = - \frac{2}{A_{(1)}^0 p_1} \ln \left| \frac{A_{(1)}^0 \varphi_1 p_1 + B_{(1)}^0 p_1 + b_1}{A_{(1)}^0 \varphi_0 p_1 + B_{(1)}^0 p_1 + b_1} \right| \quad (13)$$

gdzie:

$$\varphi_1 = \ln \varphi_1 |_{t = t_1}$$

$$\varphi_0 = \ln \varphi_0 |_{t = t_0}$$

$$t_0 < t_1$$

gdzie  $\varphi$  jest współczynnikiem gniotu.

Stopień wykorzystania zapasu plastyczności  $\psi_{(1)}^0$  zgodnie z przyjętymi oznaczeniami odnosi się do strefy (1) położonej w miejscu o.

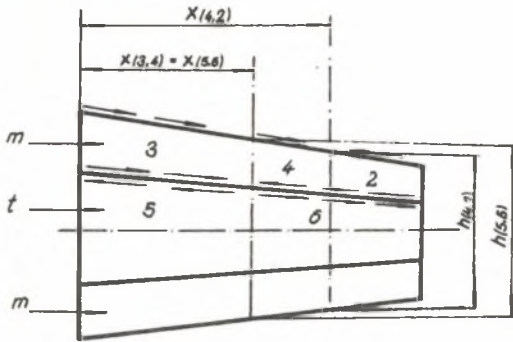
Ażeby znaleźć stopień wykorzystania zapasu plastyczności dla pojedynczej warstwy po przewalcowaniu należy zsumować stopnie wykorzystania zapasu plastyczności wszystkich stref, w których wybrana warstwa uległa odkształceniu. W przypadku walcowania taśm o niejednorodności typu "mtm" (rys. 1) otrzymano dla jej zewnętrznych warstw "m" stopień wykorzystania zapasu plastyczności w postaci

$$\begin{aligned} \psi_{k1} = & -\frac{2}{p_1} \left[ \frac{1}{A^p_{(3)}} \ln \left( \frac{A^p_{(3)} \varphi_{(5,6)}}{B^p_{(3)} + \frac{b_1}{p_1}} + 1 \right) + \frac{1}{A^s_{(4)}} \ln \left( \frac{A^s_{(4)} (\varphi_{(4,2)} - \varphi_{(5,6)})}{A^s_{(4)} \varphi_{(5,6)} + B^s_{(4)} + \frac{b_1}{p_1}} + 1 \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{A^k_{(2)}} \ln \left( \frac{A^k_{(2)} (\varphi_k - \varphi_{(4,2)})}{A^k_{(2)} \varphi_{(4,2)} + B^k_{(2)} + \frac{b_1}{p_1}} + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

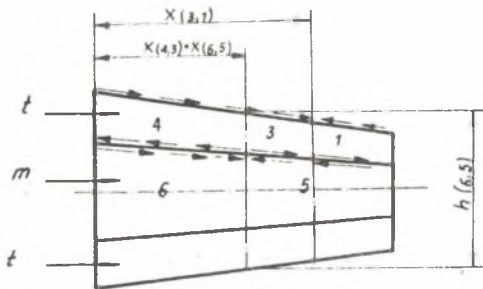
dla wewnętrznej warstwy "t" stopień wykorzystania zapasu plastyczności wynosi:

$$\psi_{k2} = -\frac{2}{p_2} \left( \frac{1}{A^p_{(5)}} - \frac{1}{A^k_{(6)}} \right) \ln \left( \frac{A^p_{(5)} \varphi_{(5,6)}}{B^p_{(5)} + \frac{b_2}{p_2}} + 1 \right) \quad (15)$$





Rys. 1. Rozkład sił stycznych przy  $x_{(5,6)} = x_{(3,4)} < x_{(4,2)}$  oraz dla  $p_1 > p_2$



Rys. 2. Rozkład sił stycznych przy  $x_{(3,1)} > x_{(4,3)} = x_{(6,3)}$  oraz dla  $p_1 < p_2$

Analogicznie wyliczono stopnie wykorzystania zapasu plastycznosci warstwy t i m z modelu taśmy niejednorodnej typu "tmt" (rys. 2) i tak dla warstwy "t":

$$\psi_{k1} = -\frac{2}{p_1} \left[ \frac{1}{A_{(4)}^D} \ln \left( \frac{A_{(4)}^D \varphi_{(6,5)}^D}{B_{(4)}^D + \frac{b_1}{p_1}} + 1 \right) + \frac{1}{A_{(3)}^S} \ln \left( \frac{A_{(3)}^S (\varphi_{(3,1)}^S - \varphi_{(6,5)}^S)}{A_{(3)}^S \varphi_{(6,5)}^S + B_{(3)}^S + \frac{b_1}{p_1}} + 1 \right) + \frac{1}{A_{(1)}^K} \ln \left( \frac{A_{(1)}^K (\varphi_{(3,1)}^K - \varphi_{(2,1)}^K)}{A_{(1)}^K \varphi_{(3,1)}^K + B_{(1)}^K + \frac{b_1}{p_1}} + 1 \right) \right] \quad (16)$$

a dla warstwy "m"

$$\psi_{k2} = -\frac{2}{p_2} \left( \frac{1}{A_{(6)}^p} - \frac{1}{A_{(5)}^k} \right) \ln \left( \frac{A_{(6)}^p \varphi_{(6,5)}}{B_{(6)}^p + \frac{b_2}{p_2}} + 1 \right) \quad (17)$$

Otrzymane zależności (14) do (17) charakteryzują wpływ parametrów procesu waloowania oraz własności plastycznych metalu na stopień wykorzystania zapasu plastyczności, a tym samym na możliwość dalszych odkształceń tych taśm bez ich zniszczenia.

## 6. Stopień wykorzystania zapasu plastyczności taśm jednorodnych plastycznych

Wyznaczenie stopnia wykorzystania zapasu plastyczności dla waloowanej taśmy jednorodnej można dokonać w oo najmniej dwójaki sposób:

1. Przyjąć, że dla modelu "mtm" własności wszystkich warstw badanego materiału są identyczne.
2. Warstwę środkową w powyższym modelu "mtm" pogrubić do całej wysokości taśmy.

Oba rozwiązania we wspólnych punktach dają identyczne wyniki. Różnice w pozostałych są spowodowane różnym systemem odkształcających się oddzielnie zezwala na oszczędowe omińnięcie hipotezy płaskich przekrojów dla całości taśmy i ograniczenie jej do warstw. Drugi sposób przyjmuje hipotezę płaskich przekrojów dla całej grubości taśmy. Dla pierwszego sposobu stopień wykorzystania zapasu plastyczności wyznacza się z zależności (14) i (15) przy założeniach  $b_1 = b_2$ ,  $p_1 = p_2$ ,  $6_{p_1}^x = 6_{p_1}^x = 6_{p_2}^x$ ; tedy ogólną postać zmienia tylko wartość "B", która wynosi:

$$B_{(5)}^p = -1,$$

$$B_{(4)}^s = \frac{a_1(a_2 + 1)(1 - 2\theta_1)}{a_2} \varphi_k - 1,$$

$$B_{(2)}^k = 2(a_1\theta_1 + 1)\varphi_k - 1,$$

$$B_{(5)}^p = -1,$$

$$B_{(6)}^k = 2(a_2 + 1)\varphi_k - 1,$$

Pozostałe wielkości ulegają zmianie, ale nie w postaci ogólnej.

Drugi sposób może być stosowany do analizy całości taśmy. Postać stopnia wykorzystania zapasu plastyczności w ten sposób wyznaczona przedstawia się następująco:

$$\psi_k = -\frac{2}{p_2} \frac{a_2}{a_2^2 - 1} \ln\left(\frac{a_2 - 1}{2a_2}\right) \frac{\varphi_k}{\frac{b_2}{p_2} - 1} + 1 \quad (18)$$

Indeks "2" odnosi się do pogrubionej warstwy "2".

Analiza stopnia wykorzystania zapasu plastyczności dla taśmy jednorodnej, określonego równaniem (18) wskazuje na kierunki zmian technologii walcowania, w celu zwiększenia stopnia odkształcenia między wyżarzzeniami. Proponowane zmiany powodujące powiększenie dopuszczalnego stopnia odkształcenia to:

1. małe kąty walcowania (wzrost średnicy walców),
2. brak naciągu i przeciwciągu (na podstawie wzoru 2 lub 4),
3. duże gnioty i mała ilość przepustów.

## 7. Analiza otrzymanych zależności

Badane w niniejszej pracy modele odkształcenia taśmy posiadają zasadniczo równomierne na całej wysokości jak i szerokości odkształcenia końcowe. Istnienie zatem możliwość porównywania szybkości wyczerpywania zapasu plastyczności na drodze analizy zmian wskaźnika stanu naprężeń.

W tym celu przeprowadzono badanie zmian wartości wskaźnika stanu naprężeń opisanego zależnościami od (6) do (10). Stwierdzono, że różnice wartości wskaźnika  $\frac{\sigma}{\tau_1}$  w zależności od rozpatrywanej warstwy i modelu odkształcenia są dość istotne. Największe różnice wartości wskaźnika dla poszczególnych warstw otrzymano w modelu "mtm". W warstwie środkowej tego modelu wartości  $\frac{\sigma}{\tau_1}$  mogły posiadać nawet znak dodatni, natomiast w warstwie zewnętrznej wskaźnik osiągał najniższe dla wszystkich modeli i warstw wartości. Z powyższych rozważań wynika, że dla odkształcenia zgodnego z przyjętym modelem nastąpiłoby bardzo szybkie zniszczenie warstw środkowych, co jest zjawiskiem niepożądanym. Model "mtm" daje mniejsze zróżnicowanie wskaźników, które mogą osiągnąć nawet jednakowe wartości dla obu warstw. Zmiana niejednorodności plastycznej taśmy z typu "mtm" w kierunku typu "tmt" powoduje w warstwach zewnętrznych zmniejszenie wskaźnika  $\frac{\sigma}{\tau_1}$  i jego wzrost w warstwach wewnętrznych. Ustalenie właściwej niejednorodności plastycznej daje możliwość zlokalizowania w wybranej warstwie pierwszych pęknięć. Innym sposobem wykorzystania celowo wytworzonej niejednorodności plastycznej jest wytworzenie takiej taśmy, w oparciu o zależność (14) - (17), która charakteryzowałaby się podwyższonym stopniem wykorzystania zapasu plastyczności na powierzchni i tylko niewiele

mniejszym w warstwie wewnętrznej. Dla tak dobranej niejednorodności plastycznej wskaźnik posiadałby dla wszystkich warstw modelu odkształcenia taśmy typu "mtm" - wartość zdecydowanie ujemną.

Jak się okazało na podstawie prowadzonych badań teoretycznych, wskaźnik stanu naprężeń i stopień wykorzystania zapasu plastyczności dla taśmy jednorodnej opisanej zależnością (18) jest szczególnym przypadkiem rozwiązań (14), (16), (17). Bardziej zbliżony do modelu obrazującego płynięcie taśmy jednorodnej w trakcie walcowania jest model odkształcenia taśmy "mtm". Także najwygodniej z niego otrzymać można model odkształcenia taśmy jednorodnej poprzez ujednorodnienie materiału wszystkich warstw lub pogrubienie warstwy środkowej do całej wysokości taśmy.

## 8. Wnioski

1. Niejednorodność własności plastycznych materiału na grubości w płaskich wyrobach powoduje zmiany stopnia wykorzystania zapasu plastyczności.
2. Wyroby płaskie o niejednorodności typu "tmt" są bardziej narażone na zniszczenie niż typu "mtm", co wynika z bardziej równomiernego wyczerpania zapasu plastyczności niż w wyrobach o niejednorodności "tmt" czy też o całkowicie jednorodnych.

## LITERATURA

- [1] Kołmogorow W.L.: Naprężenia i deformacji, rozruszenie, Metalurgia, Moskwa 1970.
- [2] Mazurkiewicz J.: Badania zapasu plastyczności w procesie walcowania taśm stalowych niejednorodnych plastycznie. Praca doktorska. Pol. Śląska Wydział Metalurgiczny - Katowice 1972.
- [3] Mazurkiewicz J., Steinerowski St.: Badanie rozkładu poszerzenia na szerokości przy walcowaniu na gładkiej bezosie. Hutnik 1973 nr 1 s.10-14.

### Wykaz stosowanych oznaczeń

h	wysokość (grubość) taśmy
L	długość rzutu łuku styku metalu z walcem na płaszczyznę środkową taśmy
⊙	względny udział pojedynczej warstwy w całej taśmie
Δh	gniot bezwzględny
ϕ	współczynnik gniotu
ϕ	gniot rzeczywisty

$\xi_p$	dopuszczalny (graniczny) stopień odkształcenia
$\dot{\epsilon}$	prędkość odkształceń normalnych
$\dot{\sigma}$	prędkość odkształceń postaciowych
$\sigma$	naprężenie normalne
$\tau$	naprężenie styczne
$\tau_1$	intensywność naprężeń stycznych
$\sigma_m$	naprężenie średnie
$\sigma_p$	naprężenie uplastyczniające w jednoosiowym stanie naprężeń
$\sigma_p^x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_p$	naprężenie uplastyczniające w płaskim stanie odkształceń
$\psi$	stopień wykorzystania zapasu plastyczności
$t$	czas
$\left. \begin{matrix} mtm \\ tmt \end{matrix} \right\}$	oznacza rozkład niejednorodności plastycznej na grubości taśmy lub model odkształcenia tego rodzaju taśmy, kolejności warstw odpowiada uszeregowanie liter $m$ i $t$ , gdzie $m$ - materiał o małym $\sigma_p$ i $t$ - materiał o dużym $\sigma_p$ .
$v$	prędkość płynięcia odkształcanej warstwy.

Wskaźniki dodawane do powyższych oznaczeń

$x, y, z$ ,	oraz ich kombinacje przyjęto jak w teorii plastyczności
$p, k,$	odnoszą się kolejno do płaszczyzny wejścia, wyjścia
$0, 1$	odnoszą się kolejno do początku, końca, badanej strefy
$1$	odnosi się do warstw "1..."
$1, 1-1$	odnosi się do granicy warstw "1" oraz "1-1"
$(1)$	odnosi się do strefy "1"
$(1, 1-1)$	odnosi się do granicy pomiędzy strefami "1" oraz "1-1"

Brak wskaźnika warstwy lub strefy przyporządkowuje do danej taśmy wielkość do niej się odnoszącą.

ФОРМОВКА ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛОС ПУТЕМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ  
ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ

Р е з ю м е

В работе представлено теоретические исследования степени использования запаса пластичности в процессе прокатки пластическим неоднородных тонколистовых полос. Результаты исследований показали функциональную зависимость коэффициента состояния напряжения использования запаса пластичности для слоистых пластическо неоднородных материалов. Проведенный анализ полученных зависимостей дал возможность локализации зон увеличенной вероятности инициаций разрушения в процессе прокатки.

FORMING OF PLASTICITY PROPERTIES OF STRIPS BY  
PLASTIC NONHOMOGENIZING BEFORE ROLLING

S u m m a r y

The article presents theoretical research of the utilization grade of the plasticity margin in rolling plastic nonhomogenous plate products. As the result of the research the final forms of the stress state ratio and the utilization grade of the plasticity margin in plastic nonhomogenous materials of layery structure are formulated. Analysis of the interdependencies received allow to localize the areas of higher probability of cracks forming in the rolling process of plate products.