ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 18 Nr kol. 606

Eugeniusz WOSIEK
Instytut Metalurgii AGH

Henryk DYJA
Politechnika Częstochowska

ODKSZTAŁCENIE WARSTW BIMETALU W PROCESIE WALCOWANIA

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę teoretyczną odkształceń blach platerowanych wstępnie połączonych wybuchem. Uzyskane wyniki porównano z doświadczeniem. Stwierdzono, że zaproponowana metoda matematyczna jest przydatna dla walcowni blach grubych posiadających maszyny cyfrowe.

1. WSTĘP

W kraju w ciągu najbliższych lat produkcja blach platerowanych ma wzrosnąć około 20-krotnie i wynosić 10 tys. ton w ciągu roku. W związku z tym w pracach [4, 5, 6] opracowano nową technologię otrzymywania blach platerowanych polegającą na walcowaniu kęsisk platerowanych połączonych wstępnie wybuchem.

Do opracowania nowej technologii konieczna jest znajomość wartości odkształceń bezwzględnych lub względnych poszczególnych warstw: podstawowej (zwykle ze stali węglowej) i platerującej (najczęściej ze stali odpornej na korozję) blachy platerowanej przy znanej wartości odkształcenia całkowitego tej blachy, dla różnych warunków procesu walcowania.

Do obliczania odkształceń poszczególnych warstw w walcowanej blasze platerowanej zostało zaproponowanych kilka zależności empirycznych [2, 3 12] i teoretycznych [1, 8, 9, 10, 11]. Wzory te nie ujmują wszystkich czynników wpływających na odkształcenie warstw blachy platerowanej, bądź też dotyczą przypadków walcowania na zimno metali nieżelaznych lub spęczania [4].

2. ROZWAŻANIA TEORETYCZNE NAD ODKSZTAŁCENIEM BLACH PLATEROWANYCH WSTĘPNIE POŁĄCZONYCH WYBUCHEM

Odkształcenie poszczególnych warstw blachy platerowej wstępnie połączonej wybuchem, podczas walcowania na gorąco, jest procesem złożonym i zależy od: grubości warstw w platerowanym półwyrobie zgrzanym wybuchowo, oporów odkształcenia metali (składników blachy), kształtu kotliny odkształcenia oraz współczynnika tarcia na powierzchni styku metali z walcami, co można zapisać ogólnie w następującej postaci:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon} &= f_1\left(\frac{P_T}{P_M}, \frac{H_T}{H}, \frac{l_d}{H_{śr}}, f\right) \\ \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon} &= f_2\left(\frac{P_T}{P_M}, \frac{H_M}{H}, \frac{l_d}{H_{śr}}, f\right) \\ \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_T} &= f_3\left(\frac{P_T}{P_M}, \frac{H_M}{H_T}, \frac{l_d}{H_{śr}}, f\right) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon_T, \varepsilon_M, \varepsilon$ - odpowiednio odkształcenie względne warstwy o większym oporze plastycznym (warstwy twardej), odkształcenie względne warstwy o mniejszym oporze plastycznym (warstwy miękkiej) i odkształcenie względne całego bimetalu,

P_T, P_M - opór plastyczny warstwy twardej i miękkiej,

H - grubość bimetalowego pasma przed przepustem,

H_M, H_T - grubość warstwy miękkiej i twardej w bimetalowym paśmie przed przepustem,

$l_d/H_{śr}$ - parametr kotliny odkształcenia,

l_d - długość rzutu łuku styku,

$H_{śr}$ - średnia wysokość walcowanego pasma,

f - współczynnik tarcia na powierzchni styku metalu z walcami.

Ze względu na złożoności zagadnienia do analizy teoretycznej zastosowano metodę wariacyjną, która pozwala na najwierniejsze odwzorowanie wpływu poszczególnych czynników na proces odkształcenia warstw blachy platerowej.

Całość zagadnienia rozwiązano stosując założenia:

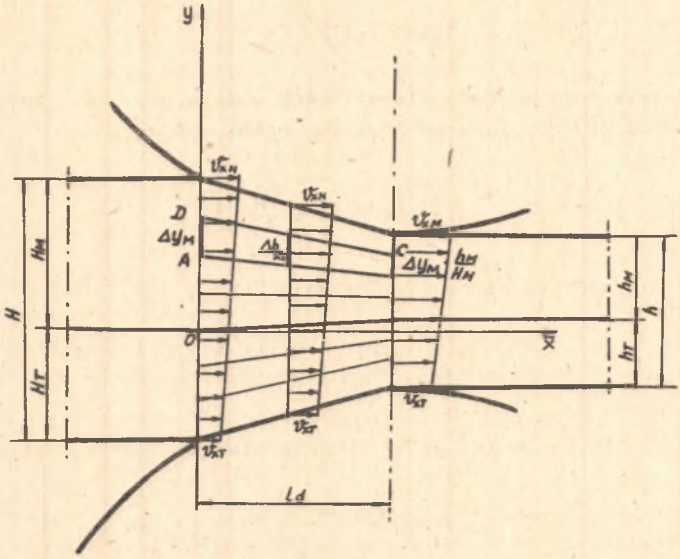
a) płaskiego stanu odkształcenia - założenie takie jest możliwe ze względu na to, że występujące w tym procesie poszerzenie jest pomijalnie małe,

b) łuki styku metali z walcami zastąpiono cięciwami (rys. 1) i przyjęto, że ich długość jest jednakowa,

c) w kotlinie odkształcenia występuje liniowy rozkład prędkości płynięcia warstw wzdłuż jej wysokości.

Na rys. 1 przedstawiono schemat walcowania pasma dwuwarstwowego, z zaznaczeniem przyjętej w założeniach geometrii kotliny walcowniczej, rozkładu prędkości płynięcia warstw wzdłuż wysokości kotliny walcowniczej i układu współrzędnych $(\bar{x}, y)$. Współrzędna $\bar{x} = \frac{x}{l_d}$ jest współrzędną względną, odniesioną do długości kotliny odkształcenia. Przyjęcie takie znacznie upraszcza obliczenia. Całkowitą grubość bimetalu pasma przed walcowaniem, która jest sumą grubości warstwy twardej H_T i grubości warstwy miękkiej H_M, oznaczono przez H

$$H = H_M + H_T. \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat walcowania pasma dwuwarstwowego

Po przepuście grubości pasma oznaczono przez h. Grubość ta jest sumę grubości warstwy miękkiej h_M i warstwy twardej h_T po przepuście

$$h = h_M + h_T. \tag{3}$$

Cały problem w procesie walcowania blach wstępnie połączonych wybuchem sprowadza się do wcześniejszego przewidywania grubości poszczególnych warstw h_M i h_T, jakie uzyskamy po odkształceniu. Stosunek tych nieznanych grubości h_M i h_T na końcu procesu walcowania oznaczono przez a i przyjęto za parametr wariacyjny

$$a = \frac{h_M}{h_T}. \tag{4}$$

Równanie składowej poziomej prędkości płynięcia warstw $V_{\bar{x}}$ ma postać

$$V_{\bar{x}} = \frac{V_{\bar{x}M} - V_{\bar{x}T}}{H_M + H_T}(y - H_M) + V_{\bar{x}M}. \tag{5}$$

Składowe poziome prędkości płynięcia poszczególnych warstw $V_{\bar{x}M}$ i $V_{\bar{x}T}$, dla pasma o szerokości b = 1 i prędkości wejścia pasma do kotliny walcowniczej V_o, określić można z warunku niezmiennej objętości

$$V_{\bar{x}M} = V_o \frac{\Delta y_M}{\Delta h_{\bar{x}M}} \tag{6}$$

$$v_{\bar{x}T} = V_i \frac{\Delta y_T}{\Delta h_{\bar{x}T}}. \tag{7}$$

Rozpatrując nieskończenie mały element ABCD wydzielony w kotlinie odkształcenia (rys. 1) dla warstwy miękkiej można zapisać:

$$\Delta h_{\bar{x}M} = \Delta_{yM} \left[1 - (1 - \frac{h_M}{H_M}) \bar{x}\right]. \tag{8}$$

Analogicznie dla warstwy twardej zapiszemy:

$$\Delta h_{\bar{x}T} = \Delta y_T \left[1 - (1 - \frac{h_T}{H_T}) \bar{x}\right]. \tag{9}$$

Podstawiając (8) do (6) i (9) do (7), otrzymuje się

$$V_{\bar{x}M} = \frac{V_o}{1 - (1 - \frac{h_M}{H_M}) \bar{x}}, \tag{10}$$

$$V_{\bar{x}T} = \frac{V_o}{1 - (1 - \frac{h_T}{H_T}) \bar{x}}, \tag{11}$$

z zależności

$$\frac{h}{H} = 1 - \varepsilon, \tag{12}$$

za pomocą parametru wariacyjnego (a) można wyznaczyć wielkości h_M i h_T oraz dalej $V_{\bar{x}M}$ i $V_{\bar{x}T}$:

$$V_{\bar{x}M} = \frac{V_o}{1 - (1 - a \frac{1 - \varepsilon}{1 + a} \frac{H}{H_M}) \bar{x}} \tag{13}$$

$$V_{\bar{x}T} = \frac{V_o}{1 - (1 - \frac{1 - \varepsilon}{1 + a} \frac{H}{H_T}) \bar{x}}. \tag{14}$$

Dla procesu walcowania blach, wstępnie połączonych wybuchem, parametr wariacyjny (a) musi osiągnąć taką wartość, aby całkowita moc odkształcenia P_Σ osiągnęła minimum.
Warunek ten można zapisać w postaci:

$$\delta P_\Sigma = 0. \tag{15}$$

Zakładając, że odkształcany na gorąco metal spełnia warunki modelu ciała lepko-plastycznego, równanie (15) można zapisać w formie rozwiniętej [7, 10]

$$\delta\left[\iiint_V \frac{1}{2}\mu\dot{\varepsilon}_i^2\, dV + \iint_S \tau v_p\, dS\right] = 0, \tag{16}$$

gdzie:

μ - współczynnik lepkości,

$\dot{\varepsilon}_i$ - prędkość odkształcenia zastępczego,

τ - naprężenie styczne na powierzchni styku metalu z walcami,

v_p - prędkość poślizgu na powierzchni styku metalu z walcami.

Po odpowiednich przekształceniach i podstawieniach [4] równanie to można zapisać w formie rozwiniętej:

$$\int_0^1\int_0^{H_m} \frac{\mu_1}{2}\dot{\varepsilon}_i^2\, l_d(1-z_1\bar{x})\, d\bar{x}dy + \int_0^1\int_0^{H_T} \frac{\mu_2}{2}\dot{\varepsilon}_i^2\, l_d(1-z_2\bar{x})\, d\bar{x}dy +$$

$$+\int_0^1 \sqrt{3}\alpha_1\dot{\varepsilon}\, v_p\, l_d\, d\bar{x} + \int_0^1 \sqrt{3}\alpha\mu_2\dot{\varepsilon}\, v_p\, l_d\, d\bar{x}\Big] = 0,$$

gdzie:

$$z_1 = 1 - a\frac{1-\varepsilon}{1+a}\frac{H}{H_M}, \tag{18}$$

$$z_2 = 1 - \frac{1-\varepsilon}{1+a}\frac{H}{H_M}, \tag{19}$$

α - współczynnik uwzględniający tarcie na powierzchni styku metali z walcami oraz kształt walcowanego pasma [10],

$\dot{\varepsilon}$ - średnia prędkość odkształcenia na powierzchni styku metali z walcami.

Po rozwiązaniu całek znajdujących się w nawiasie kwadratowym równanie (17) otrzymuje się równanie wariacyjne w postaci

$$\delta P_\Sigma = 0,$$

gdzie P_Σ - jest to moc potrzebna do odkształcenia poprzez walcowanie dwuwarstwowego pasma wstępnie połączonego wybuchem. Jest ona sumą całek równania (17).

Różniczkowanie funkcji P_Σ względem parametru wariacyjnego a jest bardzo utrudnione, dlatego też łatwiej jest znaleźć metodę numeryczną, za pomocą maszyny matematycznej, minimum funkcji P_Σ względem nieznanego pa-

$$\frac{P_5}{A\mu_2} = \frac{1}{g}\ (GH_M w_1 + H_1 w_3) z_1 \frac{1}{(1-z_1)^3} - 1) + \frac{4}{g}\ (GH_M^3 + H_T w_4)\ z_2 \frac{1}{(1-z_2)^3} - 1) +$$

$$+ \frac{4}{3}(2GH_M w_2 - GH_M^2 w_2 - 2H_T^2 w_5) \frac{z_1^2\ z_2^2}{(z_1-z_2)^3} + \frac{2}{3}(2GH_M w_2 - 2H_T^2 w_5 - GH_T^2 w_5) \frac{z_1^3\ z_2}{(z_1-z_2)^2(1-z_1)} +$$

$$+ \frac{2}{3}(2GH_M w_2 - 2H_T^2 w_5 - GH_M^2 w_2) \frac{z_1\ z_2^3}{(z_1-z_2)^2(1-z_2)} + \frac{H_T}{1-z_1} + (GH_M + H_T)\frac{1}{1-z_2} + 2(GH_M + H_T \frac{\left|\ln a \frac{H_T}{H_M}\right|}{z_1-z_2} -$$

$$- \frac{1}{18}\ GH_M w_1 \frac{z_1^3(3-z_1)}{(1-z_1)^3} - \frac{2}{3} GH_M^2 w_2 z_1 - \frac{2}{g} GH_M^3 \frac{z_1 z_2^2(3-z_2)}{(1-z_2)^3} + \frac{2}{3} GH_M^2 w_2 \frac{z_1}{(1-z_1)\ (1-z_2)} +$$

$$+ \frac{1}{6}(-4GH_M^2 w_2 + H_T^2 w_5) \frac{z_1^2\ z_2^2}{(z_1-z_1)^2(1-z_1)} - GH_M \frac{z_1}{z_2(1-z_2)} + \frac{1}{6}(-4GH_M^2 w_2 + H_T^2 w_5) \frac{z_2^4}{(z_1-z_2)(1-z_2)} -$$

$$- GH_M \frac{z_1 \ln|1-z_2|}{z_2^2} + \frac{1}{3}(-4GH_M^2 w_2 + H_T^2 w_5)(\ln\left|a \frac{H_T}{H_M}\right|) \frac{z_1\ z_2^3}{(z_1-z_2)^3} + (-GH_M + 2H_T +$$

$$+ \frac{2\sqrt{6D}\alpha\varepsilon(H_M+H_T)^2}{(D-E(H_M+H_T))\sqrt{\varepsilon(H_M+H_T)}(1-\varepsilon)} G) \frac{\ln|1-z_2|}{z_1} - 2(GH_M+H_T)\frac{\ln|1-z_1|}{z_1-z_2} + 2(-GH_M+H_T)\frac{\ln|1-z_2|}{z_1-z_2} +$$

$$+ 2(GH_M + \frac{2\sqrt{6D}\alpha\varepsilon(H_M+H_T)^2}{(D-\varepsilon(H_M+H_T)(1-\varepsilon)\sqrt{\varepsilon(H_M+H_T)}}) \frac{\ln|1-z_2|}{z_2} - \frac{1}{6} H_T w_3 \frac{z_1^2\ z_2}{(1-z_1)^3} + \frac{1}{6} H_T w_3 \frac{z_1^3\ z_2}{(1-z_1)^3} -$$

$$- \frac{2}{g}\ H_T w_3 \frac{z_1^3(3-z_2)}{(1-z_1)^3} + \frac{1}{6}\ H_T^2 w_5 z_2 - \frac{1}{6}\ H_T^2 w_5 \frac{z_2}{(1-z_1)(1-z_2)} + \frac{1}{6}\ H_T^2 w_5 \frac{z_1\ z_2^3}{(z_1-z_2)^2(1-z_1)} +$$

$$+ \frac{1}{6}\ H_T^2 w_5\ \frac{z_2^5}{z_1(z_1-z_2)^2\ (1-z_2)} + \frac{1}{3}\ H_T^2 w_5\ \frac{z_2^4}{(z_1-z_2)^3} \ln\left|a \frac{H_T}{H_M}\right| - H(\frac{z_2}{1-z_1} + \frac{z_2}{1-z_2} +$$

$$+ \frac{z_2 \ln|1-z_1|}{z_1} + \ln|1-z_2|) + \frac{2\sqrt{6D}\alpha\varepsilon(H_M+H_T)^2}{(1-\varepsilon)^2\sqrt{D\varepsilon(H_M+H_T)}} \tag{20}$$

rametru a, przy zadanych pozostałych wielkościach. Minimum funkcji P_Σ nie zmieni się, jeżeli funkcję tę podzieli się przez stałą wartość. W celu uproszczenia obliczeń funkcję P_Σ podzielono przez $\mu_2 \cdot A$, otrzymując równanie (20). W równaniu tym poszczególne wielkości oznaczają:

$$A = \frac{l_d v_o^2}{2 H^2} \tag{21}$$

$$w_1 = 3H_T^2 - 6 H_T H_M - 2 H_m^2 \tag{22}$$

$$w_2 = 3H_T + H_M \tag{23}$$

$$w_3 = 11H_T - 10 H_T H_M + 7 H_M^2 \tag{24}$$

$$w_4 = H_T^2 - 3 H_T H_M + 3 H_M^2 \tag{25}$$

$$w_5 = 5H_T - 9 H_M \tag{26}$$

$\varepsilon = \frac{H - h}{H}$ - gniot względny,

D - średnica walców,

$G = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ - współczynnik uwzględniający własności mechaniczne odkształconych metali.

Znając parametr wariacyjny a, dla którego funkcja (20) osiąga minimum, można łatwo obliczyć grubości poszczególnych warstw h_M i h_T blachy platerowanej po odkształceniu.

3. PORÓWNANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZALNYCH Z WYNIKAMI UZYSKANYMI NA DRODZE TEORETYCZNEJ

Ze względu na nowe ujęcie omawianego problemu opracowana metoda została porównana z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej.

Dla określonych parametrów walcowania, występujących w badaniach eksperymentalnych [4] i znanych własności mechanicznych badanych metali, za pomocą maszyny cyfrowej CYBER 72 obliczono minimum funkcji P_Σ (20) i odczytano wartość parametru wariacyjnego a_{obl}, który odpowiadał obliczonemu minimum. Dla wyznaczonego parametru a_{obl} obliczono grubości warstwy twardej h_{Tobl} i warstwy miękkiej h_{Mobl} po walcowaniu, a także odkształcenia względne.

Wyniki z badań eksperymentalnych oraz wartości obliczone na podstawie metody teoretycznej przedstawione zostały w tablicy 1.

Tablica 1

Zestawienie grubości warstw blachy platerowanej

Lp.	H mm	H_M mm	H_T mm	h mm	h_T mm	h_M mm	$\varepsilon = \frac{H-h}{H}$	$a = \frac{h_M}{h_T}$	a_{obl}	h_{Tobl} mm	h_{Mobl} mm	$\frac{h_T-h_{Tobl}}{h_T} \cdot 100\%$	$\frac{h_M-h_{Mobl}}{h_M} \cdot 100\%$
1	29,12	24,72	4,40	23,00	4,35	18,65	0,210	4,29	3,81	4,78	18,22	+ 9,9	2,3
2	29,25	24,84	4,41	20,60	4,18	16,42	0,296	3,93	3,98	4,13	16,44	- 1,2	0,1
3	29,12	24,73	4,39	18,30	3,25	15,05	0,372	4,63	4,35	3,42	14,88	+ 5,2	1,1
4	29,20	24,83	4,37	15,90	3,25	12,65	0,455	3,89	3,47	3,57	12,39	+ 9,8	2,1
5	29,63	26,88	2,75	23,00	2,55	20,45	0,224	8,02	7,44	2,72	20,24	+ 6,7	1,0
6	29,55	26,79	2,76	20,60	2,21	18,39	0,303	8,32	7,51	2,42	18,17	+ 9,5	1,2
7	29,55	26,77	2,78	18,30	1,91	16,39	0,381	8,58	7,82	2,07	16,19	+ 8,4	1,2
8	29,53	26,78	2,75	15,50	1,91	13,59	0,475	7,12	6,66	2,02	13,45	+ 5,7	1,0
9	29,15	24,82	4,33	10,10	2,24	7,86	0,653	3,51	4,00	2,02	8,08	- 9,8	2,8
10	29,07	24,70	4,37	6,20	1,55	4,65	0,787	3,00	4,00	1,24	4,96	-20,0	6,7
11	29,17	24,81	4,36	4,80	1,11	3,69	0,835	3,30	4,00	0,96	3,84	-13,5	4,1
12	29,23	24,87	4,36	4,00	0,94	3,06	0,863	3,26	4,00	0,80	3,20	-14,9	4,6
13	29,48	24,73	2,75	10,10	1,35	8,75	0,657	6,48	7,56	1,18	8,92	-12,6	1,9
14	29,57	26,80	2,77	6,30	0,75	5,55	0,787	7,40	7,51	0,74	5,56	- 1,3	0,2
15	29,45	26,69	2,76	4,80	0,55	4,25	0,837	7,73	7,57	0,56	4,24	- 1,8	0,2
16	29,57	26,79	2,78	4,00	0,45	3,55	0,865	7,89	7,51	0,47	3,53	+ 4,4	0,6

Z danych przedstawionych w tablicy 1 wynika, że różnica pomiędzy grubością warstwy twardej po walcowaniu h_T, a grubością tej warstwy obliczona metodą wariacyjną, nie przekracza 20%.

4. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników badań i obliczeń zawartych w tablicy 1 można stwierdzić, że zaproponowana metoda wariacyjna na określenie odkształceń poszczególnych warstw blachy platerowanej, wstępnie połączonej wybuchem, w procesie walcowania jest metodą w pełni przydatną i dogodną przy aktualnym wyposażeniu walcowni blach grubych w maszyny cyfrowe.

LITERATURA

[1] Arkulis G.E.: Zakonomernosti sowmestnoj plasticzeskoj deformacji raznorodnych metałłow. Zb. naucznych trudow MGMI, wyp. 14, Magnitogorsk 1958.

[2] Bażenow-Korczemnyj M.I., Mazurik P.N.: Proizwodstwo listowoj dwuchsłojnoj stali. Metallurg, 1959, nr 12.

[3] Braunsztejn R.A.: Proizwodstwo dwuchsłojnoj listowoj stali. Biull. CNIICzM, 1958.

[4] Dyja H.: Proces walcowania blach platerowanych wstępnie połączonych wybuchem. Praca doktorska. AGH, Kraków 1977 (nie publikowana).

[5] Dyja H., Cichoń C., Łabuda E.: Opracowanie technologii walcowania kęsisk platerowanych wybuchowo stalą OOH17N14M2. Instytut Technologii Metali Politechniki Częstochowskiej. Praca nauk.-bad. 139. Częstochowa 1977 (nie publikowana).

[6] Dyja H., Jeziorski L., Lis A., Cichoń C., Muskalski Z., Łabuda E.: Przeprowadzenie badań nad procesem walcowania i obróbką cieplną blach platerowanych wstępnie połączonych wybuchem. ITM Politechniki Częstochowskiej. Praca nauk.-bad. 163, Częstochowa 1978 (nie publikowana).

[7] Golowanenko S.A., Meandrow L.W.: Proizwodstwo bimetallow. Metalurgija, Moskwa 1966.

[8] Pawłow I.M.: Materialy po teorii prokatki, Moskwa, Metallurgizdat 1960.

[9] Sinicyn W.G., Gromow N.P.: Issledowanie izgiba bimetalliczeskich polos pri prokatke. Precizionnyje spławy. Trudy CNIICzM, wyp. 23, Metallurgizdat 1959.

[10] Tarnowskij i Ja., Pozdeew A.A. i in.: Teorija obrabotki metallow dawleniem. Metallurgizdat 1963.

[11] Zasucha P.F., Korszczikow W.D., Buchwalow O.B., Erszow A.A.: Bimetalliczeskij prokat. Moskwa, Metalurgija 1970.

[12] Żidek M., Glatz B.: Valcovani tlustych ocelovych plechu jednostranne platovanych nerezavejicimi ocelemi zatepla. Hutnicke Listy, R. XIII, srpen, 1958.

ДЕФОРМАЦИЯ СЛОЕВ БИМЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ

Р е з ю м е

В статье приводится теоретический анализ деформаций патерованной жести предварительно соединённых взрывом. Полученные результаты были сравнены с исследованием. Доказывается, что предполагаемый математический метод пригоден для прокатного завода толстолистового металла снабжённые цифровыми машинами.

BIMETAL LAYERS STRAINING IN THE COURSE OF ROLLING

S u m m a r y —

The paper presents the theoretical analysis of straining of initially clad plates connected by explosion. The results were compared with experiments. The presented method was stated to be useful in thick plates mills equipped with computers.