

SYMULACJA ZAMYKANIA I SPAJANIA NIECIĄGŁOŚCI WSADU W PROCESACH WALCOWANIA BLACH I PRĘTÓW

W artykule przedstawiono model numeryczny oraz wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji wstępnej fazy walcowania prętów oraz blach. Zastosowano modele geometryczne wlewków ciągłych, w których wprowadzono modelowe nieciągłości materiałowe. Model i parametry symulacji odpowiadały warunkom walcowania na uruchomionej w Instytucie Metalurgii Żelaza linii LPS. Przeanalizowano rozkład stanu naprężenia w kotlinie walcowniczej, jak również zmiany kształtu modelowych nieciągłości materiałowych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników symulacji sformułowano zalecenia dotyczące doboru warunków początkowej fazy walcowania na gorąco blach i prętów, korzystnych ze względu na zamykanie i spajanie wewnętrznych nieciągłości materiałowych we wlewkach z ciągłego odlewania.

Słowa kluczowe: walcowanie wstępne, nieciągłość materiałowa, stan naprężenia, symulacja numeryczna

SIMULATION OF CLOSING AND WELDING OF STOCK MATERIAL VOIDS DURING SHEET AND BAR ROLLING

A numerical model and selected simulation results of the roughing phase of sheet and bar rolling are presented in the paper. Simulations have been performed for geometric models of continuous ingots with introduced internal material voids. The model and rolling simulation parameters have corresponded to rolling conditions in the LPS rolling line at the Institute for Ferrous Metallurgy. Stress distribution in a roll gap and changes in the voids shape were analysed. Based on the results of simulation, some recommendations have been formulated on selection of process parameters for the roughing phase of sheet and bar rolling, resulting in effective closing and welding of material voids in continuous ingots.

Key words: rough rolling, material void, state of stress, numerical simulation

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie zamykania i spajania nieciągłości w odkształcanym plastycznie materiale było przedmiotem licznych badań prowadzonych w Politechnice Śląskiej i w Instytucie Metalurgii Żelaza, zarówno dla procesu walcowania [1–7], jak i kucia [7–10]. Badania te potwierdziły, że pomiędzy intensywnością zamykania i spajania nieciągłości materiałowych, a lokalnymi zmianami odkształcenia i naprężenia w obszarze występowania tych wad istnieje ścisły związek. Na podstawie zdobytych doświadczeń sformułowano ogólne zalecenie, by wstępny przerób wlewków, w których po procesie odlewania występują nieciągłości materiałowe w postaci pustek o przekroju zbliżonym do okrągłego, prowadzić z podziałem na dwie fazy, istotnie różniące się schematem stanu mechanicznego w kotlinie odkształcenia. Celem pierwszej fazy procesu przeróbki plastycznej jest jak najszybsze zamknięcie nieciągłości. Najskuteczniejsze pod tym względem są takie warianty walcowania lub kucia, które umożliwiają szybkie zetknięcie się przeciwległych powierzchni nieciągłości, co następuje w wyniku współdziałania ściskającej pionowej oraz rozciągającej poprzecznej składowej normalnej naprężenia. Wczesne zamknięcie nieciągłości daje większe szanse jej spojenia w dalszej fazie kształtowa-

nia, szczególnie wtedy, gdy otaczający ją obszar może ulegać odkształceniom plastycznym w warunkach występowania ściskającej składowej naprężenia, prostopadłej do stykających się powierzchni wady oraz wysokiej temperatury [11, 12]. Po zamknięciu nieciągłości korzystne jest zatem zastosowanie takich wykrojów oraz parametrów procesu, które pozwolą wytworzyć nacisk na powierzchni nieciągłości, zabezpieczając przed ponownym jej otwarciem i powodując odkształcenie plastyczne w obszarze jej występowania. Jest to szczególnie ważne w przypadku stosowania dużych współczynników przejścia przy kantowaniu, gdyż w paśmie o dużej „smukłości” poprzeczne naprężenia rozciągające mogą występować w całej kotlinie odkształcenia. Przy doborze parametrów procesu należy również mieć na uwadze ograniczenia związane z odkształcalnością graniczną przerabianego materiału w określonych warunkach kształtowania. W przeciwnym razie można stworzyć niebezpieczeństwo powstawania pęknięć, spowodowanych działaniem rozciągających naprężeń wzdłużnych na powierzchniach bocznych wsadu.

W niniejszym artykule przedstawiono opracowany model numeryczny oraz wybrane wyniki symulacji prowadzonych w celu ustalenia wpływu warunków wstępnej fazy walcowania na gorąco prętów i blach na zamykanie i spajanie nieciągłości materiałowych. Ocena wa-

runków sprzyjających likwidacji nieciągłości dokonano na podstawie zmian geometrii modelowych wad oraz analizy lokalnego stanu naprężenia i odkształcenia w miejscu występowania nieciągłości. Symulacje przeprowadzono za pomocą oprogramowania Forge2008 według założeń i parametrów technologicznych opracowanych przez Instytut Metalurgii Żelaza.

2. MODEL NUMERYCZNY

W symulacjach wstępnego walcowania wsadu na blachy zastosowano modele wlewków ciągłych płaskich o wymiarach poprzecznych 50×250 mm ze stali konstrukcyjnej o strukturze wielofazowej. W przypadku walcowania prętów wsadem był wlewek ciągły o przekroju kwadratowym 100×100 mm z superdrobnoziarnistej stali konstrukcyjnej. Obie stale zostały opracowane w Instytucie Metalurgii Żelaza. We wsadach wygenerowano modele typowych nieciągłości materiałowych występujących we wlewkach z ciągłego odlewania, tj. pustki, pęcherze i pęknięcia, o różnej wielkości i rozmieszczeniu.

Do opisu zmian naprężenia uplastyczniającego analizowanych stali, w zależności od parametrów kształtowania, wykorzystano funkcję Hansla-Spittla w postaci:

$$\sigma_p = A \exp(m_1 T) \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\varepsilon}\right) \quad (1)$$

gdzie: ε – odkształcenie zastępcze, $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia, [s⁻¹], T – temperatura, [°C], A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – współczynniki materiałowe, których wartości (tabl. 1) wyznaczono na podstawie wyników prób skręcania na gorąco przeprowadzonych w Katedrze Technologii Materiałów Politechniki Śląskiej. Z uwagi na brak wyników badań właściwości cieplnych nowo opracowywanych stali, w przygotowanym modelu przyjęto właściwości fizyczne i cieplne stali o zbliżonym składzie chemicznym z bazy danych programu Forge2008.

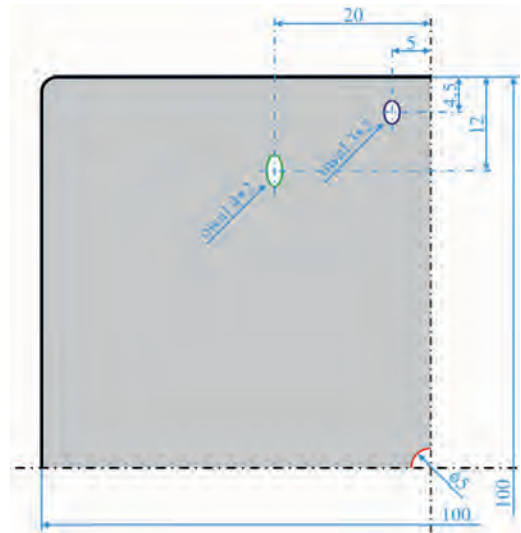
Symulacje walcowania wykonano z uwzględnieniem warunków kształtowania na linii LPS w IMŻ [13]. Zastosowano zarówno wykrój otwarty, jak i złożenie czterowalcowe. Średnice walców wynosiły 550 mm, prędkość liniowa walcowania ok. 1,1 m/s, współczynnik tarcia 0,4, temperatura początku walcowania 1150°C, temperatura walców 100°C, temperatura otoczenia 50°C, współczynnik wymiany ciepła z narzędziami 20 kW/m²·K, współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem 10 W/m²·K.

3. WYBRANE WYNIKI SYMULACJI

3.1. WPŁYW WARUNKÓW WALCOWANIA NA ZAMYKANIE NIECIĄGŁOŚCI WE WLEWKACH CIĄGŁYCH O PRZEKROJU KWADRATOWYM

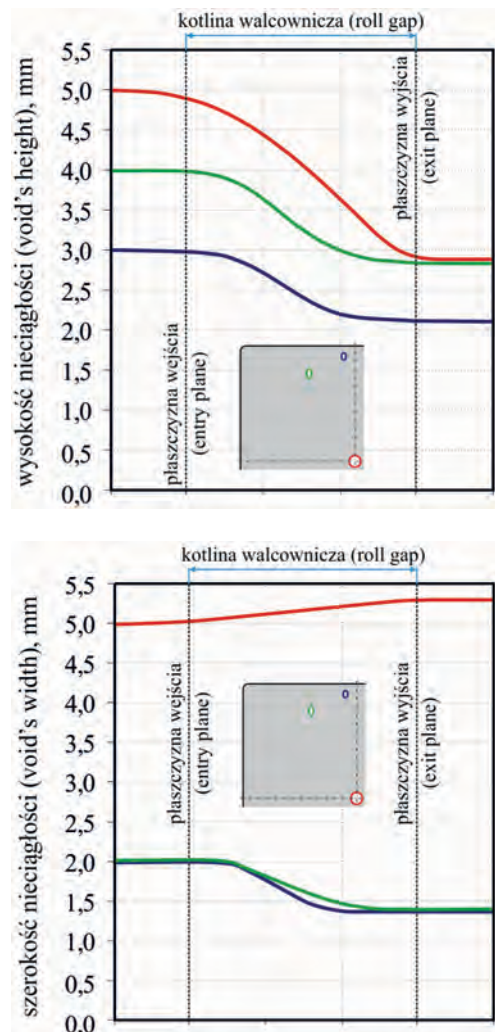
Typowymi nieciągłościami występującymi we wlewkach ciągłych o przekroju kwadratowym są m.in. pustki środkowe o przekroju zbliżonym do kołowego oraz pęcherze powierzchniowe o przekroju kołowym bądź owalnym. Kształt i rozmieszczenie modelowych nieciągłości przedstawiono na rysunku 1.

Celem prowadzonych symulacji było m.in. dokonanie analizy zmian cech geometrycznych modelowych



Rys. 1. Początkowe kształty przekrojów poprzecznych i położenie modelowych nieciągłości we wlewkach o przekroju kwadratowym

Fig. 1. Initial cross-section shapes and location of the model voids in the square billet



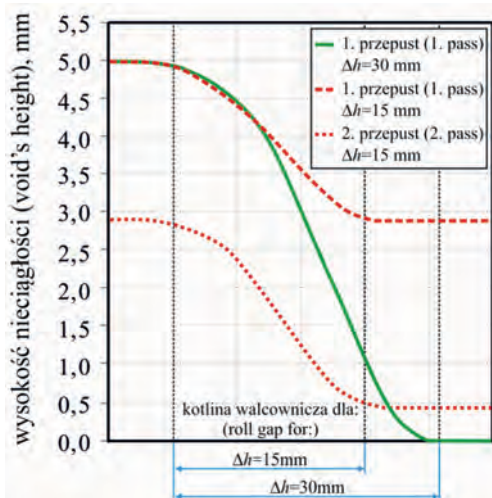
Rys. 2. Zmiana wysokości i szerokości analizowanych nieciągłości wzdłuż kotliny walcowniczej w pierwszej fazie walcowania (gniot 15 mm (15%))

Fig. 2. Change in height and width of the analysed voids over the roll gap in the first pass of rough rolling (draft 15 mm (15%))

Tablica 1. Zestawienie współczynników funkcji naprężenia uplastyczniającego dla badanych stali
Table 1. Collection of flow stress function coefficients for the analyzed steels

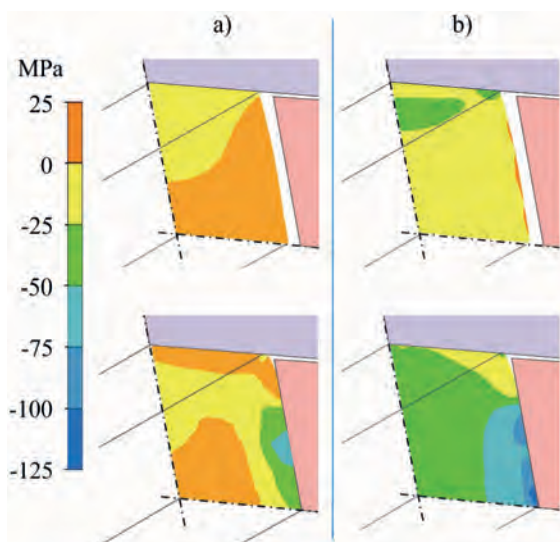
Material	A	m_1	m_2	m_3	m_4
stal na blachy	2735	-0,003253	0,021971	0,071349	-0,027987
stal na pręty	3017	-0,003261	-0,028163	0,080702	-0,024433

nieciągłości oraz stanu mechanicznego wzdłuż kotliny walcowniczej, w zależności od zastosowanego wariantu technologicznego. Z rysunku 2 wynika, że umiejscowienie nieciągłości istotnie wpływa na charakter zmian ich kształtu. Z uwagi na większą wartość pionowej składowej naprężenia w obszarze środkowym, zmiana wysokości pustki środkowej jest większa niż zmiana



Rys. 3. Zmiana wysokości pustki środkowej wzdłuż kotliny walcowniczej dla dwóch różnych wariantów wstępnej fazy walcowania

Fig. 3. Height reduction of the central void over the roll gap for two different pass schedules of rough rolling



Rys. 4. Rozkłady wartości wzdłużnej (a) i poprzecznej (b) składowej normalnej naprężenia na przekroju poprzecznym pasma w złożeniu czterowalcowym, tuż przed i po zetknięciu z walcami pionowymi, przepust 2 (po kantowaniu)

Fig. 4. Distributions of the longitudinal (a) and transverse (b) normal stress components on the workpiece cross-section in the universal rolling stand, right before and after the first contact with the vertical rolls, the second pass (after workpiece rotation)

wysokości pęcherzy przypowierzchniowych. W wyniku występujących poprzecznych naprężeń rozciągających w pobliżu pustki środkowej ulega ona poszerzeniu. Natomiast w wyniku odmiennego stanu naprężenia w obszarze przypowierzchniowym, zlokalizowane tam pęcherze zwężają się.

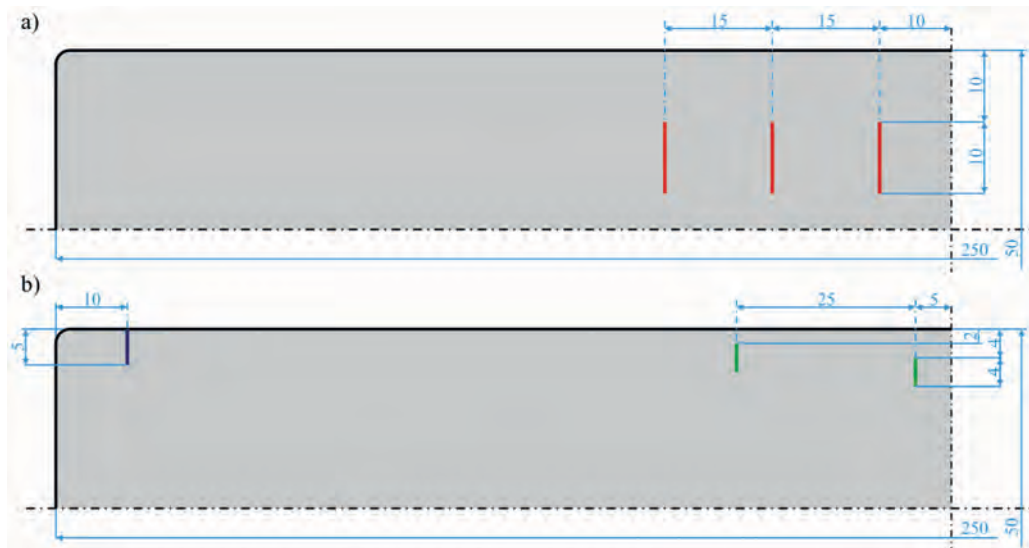
Rysunek 3 ilustruje wpływ gniotu pojedynczego na efektywność zamykania pustki środkowej. Wyniki symulacji wskazują, że zastosowanie małych gniotów – wynoszących 15% i 17,6% – w dwóch następujących po sobie przepustach bez kantowania pasma, jest mniej efektywne niż zastosowanie dużego gniotu (30%) w jednym przepuszczeniu, dającego w efekcie tę samą wysokość pasma. W tym drugim przypadku pustka środkowa, o wymiarach porównywalnych do największych tego typu wad spotykanych we wlewkach ciągłych, została zamknięta. Nastąpiło to jednak dopiero w okolicach płaszczyzny wyjścia. Można zatem przypuszczać, że nie zaistniały tam warunki konieczne do spojenia nieciągłości. Po kantowaniu pasma nieciągłość będzie miała orientację pionową, wobec czego jej spojenie w kolejnym przepuszczeniu, przy dużej „smukłości” pasma, jest mało prawdopodobne, z uwagi na niekorzystny schemat stanu naprężenia występujący w obszarze środkowym prawie na całej długości kotliny walcowniczej.

Poprawa stanu mechanicznego jest w tym przypadku możliwa poprzez ograniczenie poszerzenia pasma, np. poprzez zastosowanie złożenia czterowalcowego. Wpływ walców pionowych na stan mechaniczny w walcowanym paśmie dobrze opisują rozkłady poprzecznej i wzdłużnej składowej naprężenia zaprezentowane na rysunku 4. Przed zetknięciem walcowanego pasma z walcami pionowymi, wartości tych składowych naprężeń na przekroju poprzecznym pasma są dodatnie lub bliskie zero. Po zetknięciu pasma z walcami pionowymi następuje natychmiastowa zmiana schematu stanu naprężenia, korzystna zarówno dla spajania nieciągłości jak i z powodu ograniczenia możliwości pęknięć w obszarach przypowierzchniowych, w których podczas walcowania bez bocznego docisku występują wzdłużne naprężenia rozciągające.

3.2. ANALIZA MOŻLIWOŚCI LIKWIDACJI NIECIĄGŁOŚCI WE WLEWKACH CIĄGŁYCH PŁASKICH

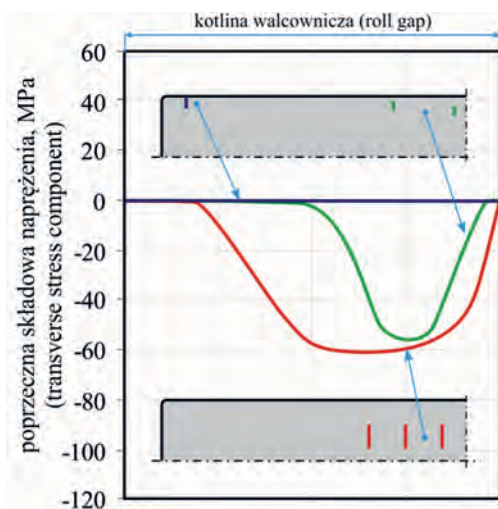
Podczas walcowania blach z płaskiego wlewka ciągłego pasmo nie podlega kantowaniu, zatem najbardziej nurtującym zagadnieniem jest w tym przypadku zachowanie się nieciągłości w postaci pionowych pęknięć. Występują one zarówno w pobliżu środka wlewka, jak i w okolicach naroży (rys. 5).

Wyniki symulacji wskazują, że pęknięcia, zarówno w pobliżu środka pasma, jak i w okolicach naroży, nie wykazują tendencji do otwierania. Dzieje się tak z uwagi na korzystny schemat stanu naprężenia w obszarach występowania pęknięć, w którym przeważają naprężenia ściskające, szczególnie pomiędzy płaszczyzną podziałową a płaszczyzną wyjścia (rys. 6). Możliwości



Rys. 5. Początkowe kształty przekrojów poprzecznych i położenie pionowych modelowych nieciągłości we wlewkowi płaskim a) pęknięcia w obszarze środkowym, b) pęknięcia powierzchniowe i podpowierzchniowe

Fig. 5. Initial cross-section shapes and location of the vertical model voids in the slab a) cracks in the central area, b) surface and undersurface cracks



Rys. 6. Zmiany wartości składowej normalnej naprężenia, poprzecznej do kierunku walcowania i powierzchni pionowych pęknięć, wzdłuż kotliny walcowniczej we wsadzie płaskim (gniot 8 mm (16%))

Fig. 6. Changes of the normal stress component, transverse both to rolling direction and to the surfaces of vertical cracks, over the roll gap in the flat workpiece (draft: 8 mm (16%))

spojenia pęknięć umiejscowionych w różnych strefach pasma są jednak zróżnicowane, gdy weźmie się pod uwagę, że dla zgrzania pęknięcia niezbędny jest nacisk prostopadły do stykających się powierzchni wady. W pobliżu naroża składowa poprzeczna naprężenia jest bliska zeru, wobec czego zgrzanie pionowego pęknięcia w tym obszarze może być utrudnione. Tym bardziej, że obszar w pobliżu powierzchni styku z walcami narażony jest na szybki spadek temperatury, co może utrudnić trwałe spojenie nieciągłości [23, 24].

4. PODSUMOWANIE

Analiza wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu walcowania wlewkowi ciągłych

przeznaczonych na pręty i blachę pozwoliła na wyciągnięcie szeregu wniosków, które należy uwzględnić przy doborze parametrów wstępnej fazy walcowania.

- Schemat walcowania wlewkowi ciągłych o przekroju kwadratowym, zakładający wykorzystanie płaskownicy i stosunkowo niewielkich gniotów pojedynczych w pierwszych dwóch przepustach, pomimo występowania korzystnego schematu stanu naprężenia (niewielkie zróżnicowanie poszerzenia na wysokości pasma) nie pozwala na szybkie zamknięcie nieciągłości w postaci pustek czy pęcherzy. Zwiększenie gniotu jednostkowego powoduje wzrost odkształcenia plastycznego w centralnej części pasma, co jest korzystne dla likwidacji pustki, zlokalizowanej w środkowej strefie przekroju.
- Ograniczenie swobodnego poszerzenia pasma podczas walcowania wywiera korzystny wpływ na schemat stanu mechanicznego w kotlinie walcowniczej, co z kolei istotnie wpływa na skuteczność zamykania nieciągłości materiałowych i możliwość ich spajania. Jednym ze sposobów ograniczania poszerzenia pasma jest zastosowanie uniwersalnych klatek walcowniczych o złożeniu czterowalcowym.
- Walcowanie w złożeniu czterowalcowym jest szczególnie korzystne w przypadku wlewkowi ciągłych, charakteryzujących się występowaniem nieciągłości zlokalizowanych w różnych miejscach. Poprzez oddziaływanie walców o osi pionowej na powierzchnie boczne walcowanego pasma, w końcowej fazie przepustu osiąga się trójosiowy ściskający stan naprężenia, co przyczynia się do intensywniejszego zamykania istniejących nieciągłości, stwarzając również możliwość spojenia wad. Dodatkowo, kontakt powierzchni bocznych pasma z walcami zabezpiecza przed możliwością tworzenia się wzdłużnych pęknięć powierzchniowych.
- Z uwagi na niewielki stosunek wysokości do szerokości oraz większą powierzchnię styku wsadu z walcami, korzystny schemat stanu naprężenia we wsadzie na blachy występuje prawie w całej kotlinie walcowniczej. Nieciągłości wewnętrzne nie wykazują

tendencji do otwierania się, jednak najkorzystniejsze warunki do spojenia pionowych pęknięć występują w strefie przysiosowej pasma.

- Określenie najkorzystniejszych parametrów procesu walcowania w fazie wstępnego przerobu dla blach i prętów wymaga uwzględnienia lokalnych stanów termomechanicznych. Niezależnie od temperatury walcowania, należy stosować duże gnioty w przepuszczeniu, które zapewniają korzystny stan naprężenia, wyrażony dużą ujemną wartością wskaźnika stanu naprężenia k_c . Zależnie od właściwości materiału wsadowego zastosować można jeden z dwóch wariantów walcowania: I – dla materiału wsadowego o dobrej plastyczności – należy stosować duże gnioty od pierwszych przepustów, II – dla materiału wsadowego o małej plastyczności – pierwsze przepusty należy dobrać stosownie do wykazywanego odkształcenia granicznego, a po osiągnięciu dobrej plastyczności, zastosować duże gnioty, zapewniające skuteczne zamykanie i spajanie wewnętrznych nieciągłości. Powyższe zalecenia powinny zostać zweryfikowane doświadczalnie w warunkach linii LPS. Z powodu bra-

ku odpowiednich modeli procesu spajania nieciągłości w materiale odkształcanym plastycznie, celowe byłoby przeprowadzenie badań eksperymentalnych umożliwiających określenie takiej kombinacji parametrów, tj. temperatura walcowania i gniot pojedynczy, która umożliwi spojenie przylegających powierzchni nieciągłości. Na bazie tych badań oraz odpowiadających im symulacji komputerowych, można będzie określić stan termomechaniczny w obszarze nieciągłości, który zapewni ich zamykanie i spajanie.

Publikacja została opracowana na podstawie pracy wykonanej w projekcie badawczym rozwojowym nr N R07 0008 04 pt. „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Śląską i Politechnikę Warszawską.

LITERATURA

1. Woźniak D.: Teoretyczna analiza czynników wpływających na kierunek rozwoju wewnętrznych nieciągłości materiału podczas walcowania na gorąco. Prace IMŻ, nr 2, 2004, 3-7.
2. Woźniak D.: Analysis of stress and strain states during deformation of a feedstock with axial material discontinuities in a diamond – square sequences. Acta Metallurgica Slovaca, nr 2/2005, 11, 2005, 232-237.
3. Woźniak D.: Effect of mechanical conditions in the roll gap on closing and welding of material discontinuities in groove rolling process. Materiały konferencji 8th Int. Conf. on Technology of Plasticity, 2005, University of Padova, vol. 1, 559-564.
4. Woźniak D.: Wpływ kształtu wykroju na stany naprężenia i odkształcenia w kotlinie walcowniczej oraz na intensywność zamykania osiowych nieciągłości materiałowych w układzie owal – okrągły. Mat. konf. Walcownictwo 2005 Procesy-Narzędzia-Materiały, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków, 2005, 85-90.
5. Woźniak D., Grosman F.: Schließen und schweißen von axialen Materialdiskontinuitäten im Prozess des Walzens in Kalibern. Der Kalibreur, 71, 2010, 95-103.
6. Woźniak D., Tkocz M., Cyganek Z.: Zmiany stanów termomechanicznych w pobliżu pęknięć w strefach przypowierzchniowej i środkowej ciągłego wlewka płaskiego w procesie walcowania na gorąco blach, Mat. konf. Forming 2009, Zakopane 2009, Hutnik -Wiadomości Hutnicze, Wyd. Sigma-Not, Warszawa, 2009, nr 8, 670-673.
7. Grosman F., Tkocz M., Woźniak D.: Analiza stanów mechanicznych towarzyszących zamykaniu i spajaniu nieciągłości materiału w procesach przerobki plastycznej, Prace IMŻ, nr 1, 2010, 68-72.
8. Tkocz M.: Analiza przestrzenna lokalnych stanów termomechanicznych w procesie kucia wydłużającego w kowadłach kształtowych, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Katowice, 2005.
9. Tkocz M., Kusiak J., Grosman F.: Recommendations for selection of parameters of cogging in V-dies, Acta Metallurgica Slovaca, Emilena Koszyce, t. 13, 2007, nr 2, 221-228.
10. Tkocz M., Grosman F.: Pass schedule design for cogging in v-dies, Steel Research Int., Special Edition – Proc. 12th Int. Conf. Metal Forming 2008, AGH Kraków, Publ. Verlag Stahleisen GmbH, Vol. 1 2008, 584-590.
11. Stahlberg U., Keife H., Lundberg M., Melander A.: A study of void closure during plastic deformation, J. Mech. Work. Technol., 4, 1980, 51-63.
12. Wang, A., Thomson, P.F., Hodgson, P.D.: A study of pore closure and welding in hot rolling process. J. Mater. Proc. Technol., 60, 1996, 95-102.
13. Woźniak D., Garbarz B.: Linia do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania stopów metali i wyrobów metalowych, Prace IMŻ, nr 1, 2010, 61-67.