

Franciszek GROSMAN, Eugeniusz HADASIK, Zdzisław CYGANEK, Marek TKOCZ

Politechnika Śląska, Katedra Technologii Materiałów

MODEL NUMERYCZNY PROCESU WALCOWANIA BLACH I PRĘTÓW DLA WARUNKÓW LINII LPS I WARUNKÓW PRZEMYSŁOWYCH

Tematyka modelowania komputerowego procesu walcowania blach i prętów jest w chwili obecnej szeroko poruszana w literaturze polskiej i światowej. Jest to związane z ciągłym rozwojem metod numerycznych oraz ich znaczenia w przygotowaniu produkcji wyrobów walcowanych. Prowadzenie symulacji numerycznych na etapie projektowania procesu walcowania pozwala określić m.in. efekty, jakie zostaną uzyskane w materiale po procesie odkształcania, a co za tym idzie, właściwości wyrobu. W zastosowaniach przemysłowych pozwala to na obniżenie kosztów planowania produkcji i szybkie dopasowanie profilu produkcji do potrzeb zmieniającego się rynku. W Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach powstała linia walcownicza LPS, która umożliwia m.in. eksperymentalne sprawdzenie poprawności zaprojektowanego procesu walcowania blach i prętów z nowych gatunków materiałów. Aby prawidłowo przewidywać zachowanie się materiału w trakcie walcowania, uzyskane efekty strukturalne oraz parametry siłowe procesu walcowania, badania fizyczne, prowadzone na linii LPS, będą wspomagane obliczeniami numerycznymi. Model numeryczny procesu walcowania blach i prętów został przygotowany w Katedrze Technologii Materiałów Politechniki Śląskiej.

Słowa kluczowe: walcowanie blach, walcowanie prętów, modelowanie numeryczne, technologiczna plastyczność

NUMERICAL MODEL OF PLATES AND BARS ROLLING IN THE LPS SEMI-INDUSTRIAL SCALE AND IN INDUSTRIAL CONDITIONS

The numerical modeling of plate and bar rolling process is now being widely discussed in domestic and foreign literature. This is due to the continuous development of numerical methods and their importance in preparation of rolled products manufacturing. Conducting numerical simulations at the design stage of rolling process allows to specify the effects to be obtained in the material after deformation process, and hence the properties of the product. It allows to reduce the cost of production planning and quickly adjust the production profile to the needs of a changing market. In the Institute for Ferrous Metallurgy, the line for semi-industrial rolling (LPS) has been constructed. It enables the experimental verification of the designed process of rolling plates and bars of new material grades. To correctly predict the material behavior during rolling, the structural effects and force-energy parameters of the process carried out on the LPS line will be supported by numerical simulations. The numerical model of plate and bar rolling process has been prepared in the Department of Materials Technology, Silesian University of Technology, and is presented in this paper.

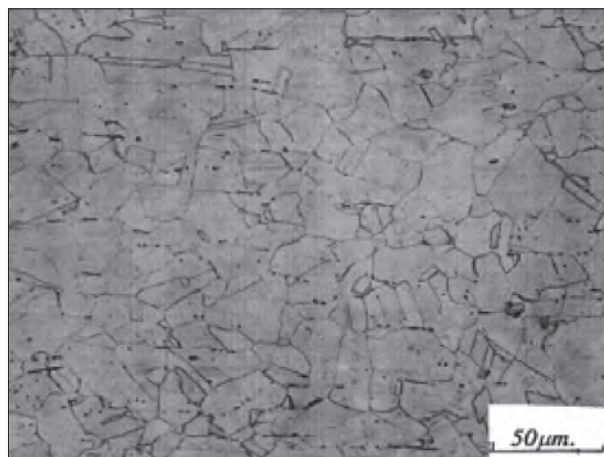
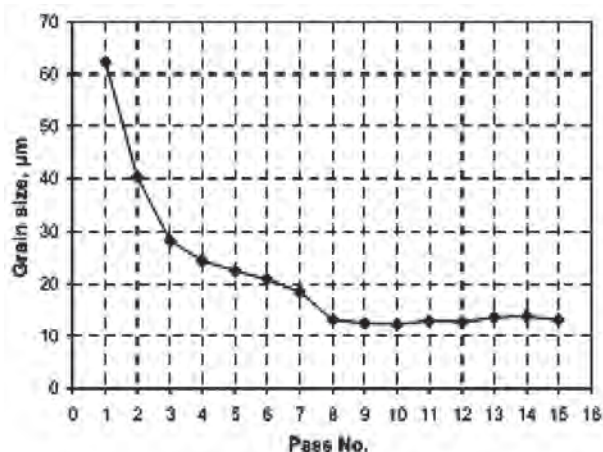
Key words: rolling, bar rolling, numerical simulation, formability

1. ZASTOSOWANIA SYMULACJI KOMPUTEROWEJ DO MODELOWANIA PROCESU WALCOWANIA BLACH I TAŚM

Modelowanie numeryczne procesów przeróbki plastycznej jest obecnie powszechnie stosowaną metodą numerycznej weryfikacji projektów technologicznych oraz analizy zjawisk zachodzących w trakcie procesu. Dotyczy to również procesów walcowania blach i prętów. Jednymi z najczęściej modelowanych grup wyrobów płaskich ze stali są blachy dla przemysłu samochodowego. Rozwój przemysłu motoryzacyjnego spowodował wzrost zapotrzebowania na stale konwencjonalne tzn. stale miękkie, stale typu IF, IS, BH, stale węglowo-manganowe oraz stale wysokowytrzymałe takie jak: stale dwufazowe (DP), stale wielofazowe (CP), stale typu TRIP, stale martenzytyczne [1]. Prowadzone

w tym zakresie badania dotyczą m.in. charakterystyk technologicznej plastyczności nowoczesnych stali i ich aplikacji w programach do symulacji numerycznej procesów przeróbki plastycznej [2–4].

Jednym z głównych wyzwań komputerowej symulacji procesów walcowania na gorąco jest stworzenie matematycznego modelu zmian strukturalnych zachodzących w odkształcanym materiale. Szczególnie istotne są zjawiska rekrytalizacji oraz zdrowienia, które są procesami „konkurencyjnymi”. Metale wykazujące wysoką zdolność do dynamicznego zdrowienia są niezdolne do dynamicznej rekrytalizacji, ze względu na małą gęstość dyslokacji. Rekrytalizacja może przebiegać również po zakończeniu procesu przeróbki plastycznej na gorąco, np. w procesach wieloprzepustowego walcowania na gorąco. W pracach [5, 6] przedstawiono lepko-plastyczny model dla stali superdrobnoziarnistych,



Rys. 1. Wielkość ziarna po procesie walcowania na gorąco blachy ze stali 316L. Prognozowana (po lewej) – 13,1 µm, otrzymana (po prawej) – 13,6 µm [7].

Fig. 1. Grain size after hot rolling of 316L steel sheet: predicted (left) – 13,1 µm, obtained (right) – 13,6 µm [7]

uwzględniający rozwój dyslokacji, rekrytalizacji i wielkości ziarna. Do wyznaczenia stałych materiałowych ze zbioru danych eksperymentalnych zastosowano algorytmy genetyczne.

W modelowaniu zmian struktury stali po procesie walcowania prezentowane są różne podejścia. W większości przypadków bazują one na autorskich modelach do prognozowania zmian mikrostruktury po procesie przeróbki plastycznej. W modelach tych wykorzystywane są m.in.:

- Znane z literatury zależności – np. równanie Avramiego – wykorzystuje opisywany w literaturze model MICDEL [7]. W połączeniu z modelem do obliczania parametrów procesu walcowania na gorąco tj. odkształcenia i prędkości odkształcenia zaproponowano model, który został zweryfikowany dla procesu walcowania stali 316L. Walcowanie na gorąco prowadzono w 15 przepustach, z początkowej wysokości pasma 195 mm na wysokość 2,5 mm. Porównanie wyników modelowania z wynikami badań wykazały dużą zbieżność otrzymanych wyników (rys. 1).
- Cyfrowa obróbka obrazu – w pracy [8] zaproponowano narzędzie DMR (Digital Material Representation), pozwalające na automatyczną analizę obrazu mikrostruktury metalu. W pracy [9] narzędzie to połączono z metodą elementów skończonych w celu zamodelowania zachowania się stali typu DP w procesie odkształcenia. Wykorzystanie ilościowych opisów mikrostruktury tej stali w programie FORGE2, pozwoliło na przeprowadzenie analizy rozwoju mikrostruktury stali w trakcie procesu przeróbki plastycznej.
- Multiskalowe modele wykorzystujące np. metodę CAFE, łączącą metodę elementów skończonych z automatami komórkowymi [10, 11]. Dzięki odpowiednim połączeniom pomiędzy MES a automatami komórkowymi wyniki z obliczeń MES są wykorzystywane do prognozowania zmian mikrostruktury przez automaty komórkowe. Z kolei ilościowy opis wpływu struktury na naprężenie uplastyczniające pozwala na wyznaczenie przebiegu procesu odkształcenia.

Bardzo istotne jest również wykorzystanie modelowania numerycznego do analizy zmian stanów termomechanicznych w walcowanym paśmie [12, 13]. Wybrane

wyniki prowadzonych pod tym kątem symulacji walcowania zostały przedstawione w niniejszym artykule.

2. MODEL NUMERYCZNY PROCESU WALCOWANIA DLA LINII LPS

2.1. GŁÓWNE ZAŁOŻENIA

Do opracowania modelu numerycznego procesu walcowania blach i prętów w warunkach linii LPS konieczne było uwzględnienie informacji na temat charakterystyki linii oraz asortymentu wyrobów. Założono, że symulacja numeryczna pozwoli na analizę zjawisk zachodzących w materiale od momentu nagrzania wsadu do walcowania w piecu grzewczym, poprzez operacje pomocnicze, takie jak transport czy cięcie wlewka, aż do kolejnych przepustów walcowania.

Z tego względu przy budowie modelu uzgodniono m.in. położenie poszczególnych urządzeń na linii LPS, dane techniczne urządzeń wchodzących w skład linii oraz wybrane warianty prowadzenia procesu walcowania. W oparciu o założone warianty walcowania i charakterystykę linii określono czas trwania poszczególnych czynności, zabiegów i operacji, który został następnie uwzględniony w modelu numerycznym. W tabelicy 1 przedstawiono przykładowy wariant prowadzenia procesu walcowania dla blach.

2.2. MODEL MATERIAŁOWY

Symulacje numeryczne procesu walcowania blach na gorąco zostały przeprowadzone dla stali z grupy gatunkowej stali superdrobnoziarnistych konstrukcyjnych (oznaczenie A) oraz stali z grupy gatunkowej stali wysokowęglowych bainitycznych (oznaczenie C). Na podstawie wyników badań plastometrycznych, prowadzonych na plastometrze skrętnym w Katedrze Technologii Materiałów Politechniki Śląskiej, została przygotowana funkcja naprężenia uplastyczniającego Hansla-Spittla:

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

gdzie:

ε – odkształcenie zastępcze,

Tablica 1. Schemat walcowania blachy 4x250 mm z wlewka płaskiego 50x250 mm

Table 1. A schedule of 4x250 mm plate rolling from 50x250 mm slab

Nr operacji	Nazwa operacji	Wymiary pasma, mm			Czas trwania operacji, s
		Wysokość	Szerokość	Długość	
1	Nagrzewanie wsadu	50	250	1000	b.d.
2	Przenoszenie wsadu na samotok	50	250	1000	120,0
3	Transport wsadu do zbijacza zgorzeliny	50	250	1000	5,0
4	Zbijanie zgorzeliny	50	250	1000	10,0
5	Transport wsadu do walcarki	50	250	1000	3,8
6	Walcowanie – 1. Przepust	42	250	1190	1,2
7	Cięcie i nawracanie pasma	42	250	1000	60,0
8	Walcowanie – 2. przepust	28	250	1500	1,5
9	Nawracanie pasma	28	250	1500	15,0
10	Walcowanie – 3. przepust	18	250	2340	2,3
11	Cięcie i nawracanie pasma	18	250	1000	60,0
12	Walcowanie – 4. przepust	12	250	1420	1,4
13	Nawracanie pasma	12	250	1420	15,0
14	Walcowanie – 5. przepust	9	250	1889	1,9
15	Cięcie i nawracanie pasma	9	250	1000	60,0
16	Walcowanie – 6. przepust	5,8	250	1550	1,6
17	Nawracanie pasma	5,8	250	1550	15,0
18	Walcowanie – 7. przepust	4	250	2248	2,2

Tablica 2. Zestawienie współczynników funkcji naprężenia uplastyczniającego analizowanych stali

Table 2. Collection of the flow stress function coefficients for the analyzed steels

Material	A	m_1	m_2	m_3	m_4
stal A	2735	-0,003253	0,021971	0,0713493	-0,027987
stal C	3567	-0,003242	-0,035821	0,122397	-0,023156

Tablica 3. Zestawienie właściwości fizycznych i cieplnych analizowanych gatunków stali

Table 3. Collection of the physical and thermal properties for the analyzed steels

Material	Parametr	Symbol	Wartość	Wymiar
Stal A	gęstość	ρ (800÷1200°C)	7605÷7437	kg/m ³
	ciepło właściwe	c (800÷1200°C)	659÷667	J/kgK
	współczynnik przewodzenia ciepła	λq (800÷1200°C)	28,3÷29,4	W/mK
	emisyjność	ε	0,88	÷
Stal C	gęstość	ρ (800÷1200°C)	7540÷7332	kg/m ³
	ciepło właściwe	c (800÷1200°C)	660÷663	J/kgK
	współczynnik przewodzenia ciepła	λq (800÷1200°C)	24,8÷27,5	W/mK
	emisyjność	ε	0,88	÷

$\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia, s⁻¹,

T – temperatura, °C,

A, m_1, m_2, m_3, m_4 – współczynniki materiałowe, wyznaczone na podstawie badań plastometrycznych.

W tabelicy 2 przedstawiono wartości współczynników funkcji Hansla-Spittla dla analizowanych gatunków stali. Do ich wyznaczenia wykorzystano wyniki prób skręcania na gorąco w zakresie temperatur 850÷1150°C i prędkości odkształcenia 0,1÷10 s⁻¹.

2.3. DOBÓR WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH I WARUNKÓW BRZEGOWYCH

Dobór właściwości fizycznych oraz warunków brzegowych do symulacji numerycznych ma kluczowe znaczenie dla poprawności otrzymanych wyników. W opracowanym modelu założono, że właściwości cieplne oraz gęstość odkształczanych materiałów są zależne od temperatury. W tabelicy 3 przedstawiono graniczne warto-

ści wielkości charakteryzujących właściwości fizyczne i cieplne dla analizowanego zakresu temperatury, jakie zostały przyjęte w modelu numerycznych.

Wartości zastępczych (wspólnych dla konwekcji i przewodzenia) współczynników wymiany ciepła przedstawiono w tabelicy 4. Wartość tego współczynnika dla kontaktu pasma z walcami została dobrana na podstawie analizy wyników badań Li i Sellarsa [14]. Wykazały one, że podczas walcowania na gorąco z zastosowaniem gniotów w zakresie 10÷20%, dla średniego nacisku jednostkowego ok. 90÷100 MPa, wartość współczynnika α mieści się w zakresie 8,6÷13,6 kW/m²K.

Tabela 4. Zastosowane w modelu numerycznym wartości zastępczych współczynników wymiany ciepła

Table 4. Equivalent values of the heat exchange coefficients used in the numerical model

Ośrodek	Wartość	Wymiar
walce	10 000	W/m ² K
powietrze	10	W/m ² K
intensywny natrysk wody	5 500	W/m ² K

Warunki tarcia zdefiniowano za pomocą modelu Coulomba opisanego zależnościami:

$$\tau = \mu \sigma_n \frac{|v_p|}{v_p} \quad \text{gdy} \quad \mu \sigma_n < \frac{\sigma_p}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\tau = m \frac{\sigma_p}{\sqrt{3}} \frac{|v_p|}{v_p} \quad \text{gdy} \quad \mu \sigma_n > m \frac{\sigma_p}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

gdzie:

τ – naprężenie styczne tarcia, MPa

μ – współczynnik tarcia,

m – czynnik tarcia,

σ_n – naprężenie normalne, MPa

σ_p – naprężenie uplastyczniające, MPa

v_p – prędkość poślizgu, mm/s.

Przyjęto, że współczynnik tarcia jest równy 0,4, a czynnik tarcia – 0,8. Model ten jest zgodny m.in. z wynikami badań przeprowadzonych przez Lundberga w walcowni prętów, które wskazują, że w warunkach przemysłowych współczynnik tarcia podczas walcowania

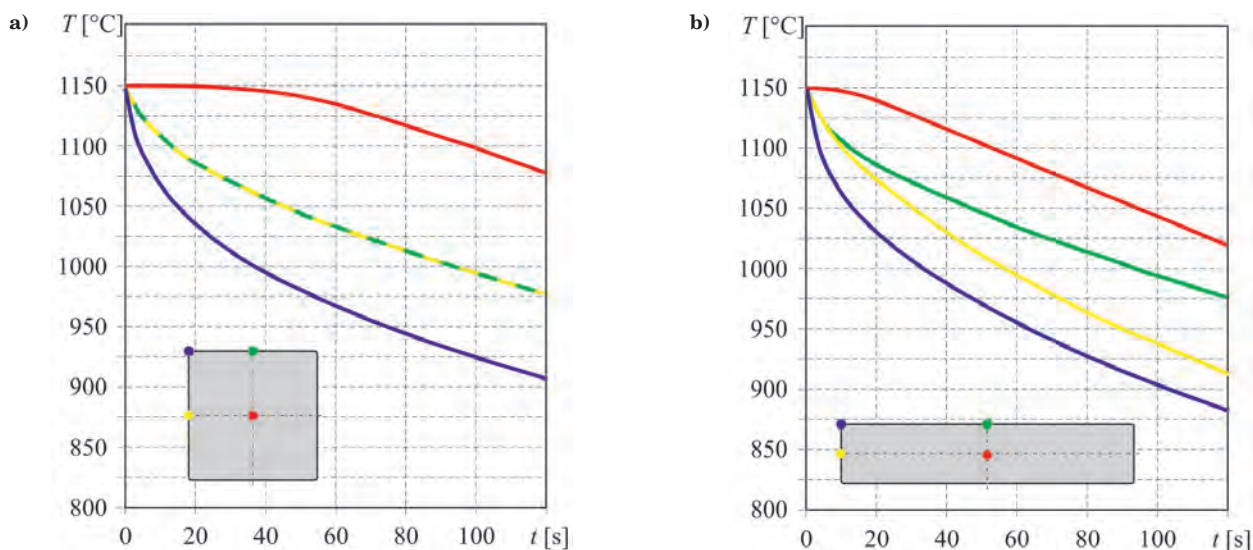
w zakresie temperatur 1000÷1150°C mieści się w przedziale 0,35÷0,40 [15].

3. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Symulacje walcowania blach i prętów prowadzono dla dwóch nowo opracowywanych gatunków stali, które wykazują różny poziom naprężenia uplastyczniającego. Wyniki symulacji numerycznych wykazały, że już podczas transportu wlewka z pieca na samotok zbijacza zgorzeliny powstaje znaczny gradient temperatury, dochodzący do 140°C w przypadku wlewów płaskich oraz 170°C w przypadku wlewów kwadratowych (rys. 2).

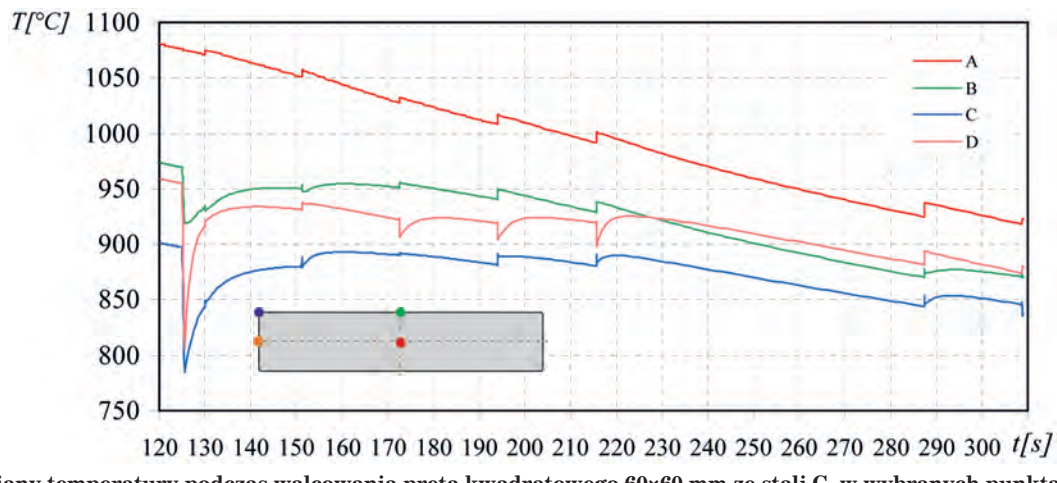
Przejście wlewka przez zbijacz zgorzeliny powoduje gwałtowne obniżenie temperatury powierzchni, ale zaraz za zbijaczem temperatura powierzchni wsadu intensywnie wzrasta (rys. 3). Podczas walcowania w niektórych obszarach (w środku pasma i strefie przy powierzchni bocznej) następuje wzrost temperatury w wyniku zamiany pracy odkształcenia na ciepło, natomiast w pobliżu styku z walcami odnotowuje się spadek temperatury.

Częstą przyczyną pęknięć na powierzchniach bocznych walcowanego pasma są rozciągające naprężenia wzdłużne. Symulacja numeryczna daje możliwość identyfikacji miejsca występowania niekorzystnych stanów naprężenia i określenia wartości poszczególnych składowych tensora naprężenia, bądź wskaźnika stanu naprężenia. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany wzdłużnej normalnej składowej naprężenia, jak również naprężenia zastępczego wzdłuż kotliny walcowniczej, na środku powierzchni bocznej pręta kwadratowego. Wzdłużna składowa naprężenia jest dodatnia praktycznie na całej długości geometrycznej kotliny walcowniczej, przy czym na jej końcu jej wartość wyraźnie spada. Maksymalna wartość składowej wzdłużnej naprężenia dla stali C jest prawie trzykrotnie wyższa niż dla stali A w procesie walcowania prętów oraz dwukrotnie wyższa w procesie walcowania blach. Odnosząc



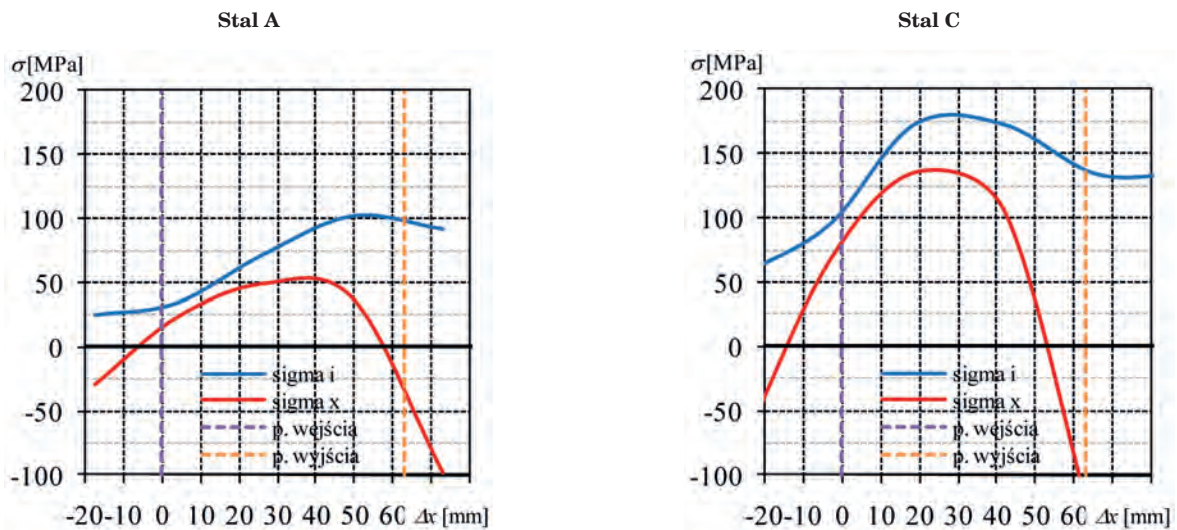
Rys. 2. Zmiany temperatury w wybranych punktach na przekroju poprzecznym wlewka kwadratowego (a) i wlewka płaskiego (b) podczas transportu z pieca do zbijacza zgorzeliny

Fig. 2. Temperature changes at the selected points on cross-sections of the square billet (a) and the slab (b) during transportation from the furnace to the descaler



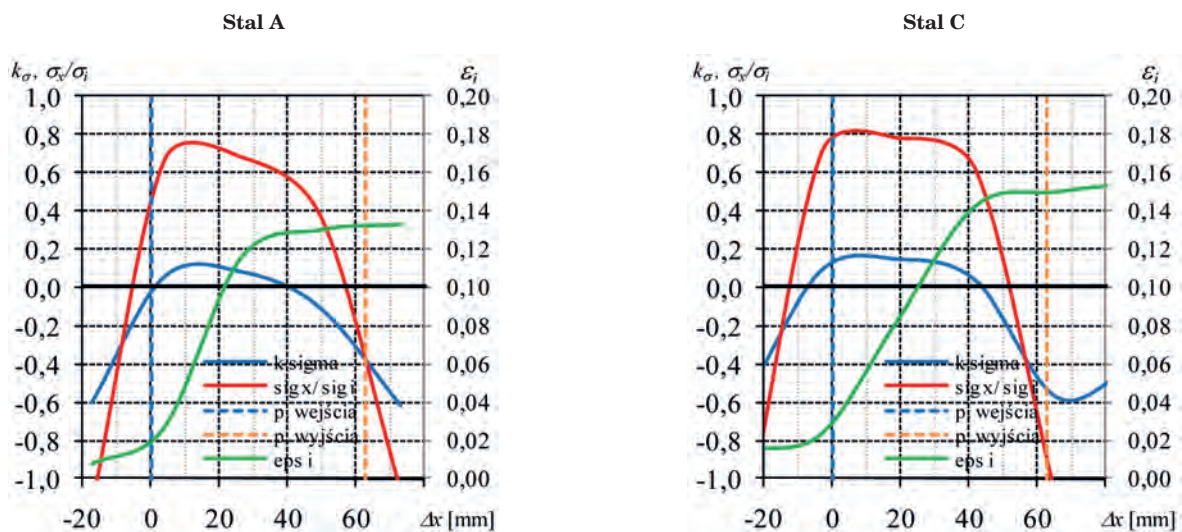
Rys. 3. Zmiany temperatury podczas walcowania pręta kwadratowego 60×60 mm ze stali C, w wybranych punktach na przekroju poprzecznym pasma (od zbijacza zgorzeliny do 7. przepustu)

Fig. 3. Temperature changes during 60×60 mm square bar rolling at the selected points on the cross section of a workpiece made of steel C (since descaling till the 7. pass)



Rys. 4. Przebieg zmian naprężenia zastępczego σ_i oraz wzdłużnej normalnej składowej naprężenia σ_x wzdłuż środka wysokości na powierzchni bocznej pasma w wykoju kwadratowym (1 przepust)

Fig. 4. Changes in equivalent stress σ_i and longitudinal normal stress component σ_x along the side surface center of a workpiece in the first square pass



Rys. 5. Przebieg zmian stanu naprężenia i odkształcenia lokalnego wzdłuż środka wysokości na powierzchni bocznej pasma w wykoju kwadratowym (1 przepust)

Fig. 5. Changes in the stress state and the local strain along the side surface center of a workpiece in the first square pass

jednak wartości tej składowej do poziomu naprężenia zastępczego, można zauważyć, że przebieg zmian tego wskaźnika dla obu stali jest bardzo podobny (rys. 5).

Zielona krzywa na rysunku 5 przedstawia przyrost lokalnego odkształcenia zastępczego na środku powierzchni bocznej pręta kwadratowego. Można zauważyć, że odkształcenie lokalne tego obszaru następuje wtedy, gdy wzdłużne naprężenia rozciągające są największe. W przypadku materiałów trudno odkształcalnych, takich jak stal typu C może to stwarzać zagrożenie pęknięcia.

4. PODSUMOWANIE

Zbudowana w Instytucie Metalurgii Żelaza linia LPS jest w chwili obecnej jedynym ciągiem technologicznym, gdzie możliwe jest prowadzenie badań fizycznych związanych z wytwarzaniem walcowanych wyrobów płaskich oraz długich. Dzięki opracowanemu w Katedrze Technologii Materiałów Politechniki Śląskiej modelowi numerycznemu procesu walcowania blach i prętów, Instytut dysponuje kompleksowymi możliwościami w zakresie projektowania i badania procesów walcowania.

Przedstawione w artykule wyniki pozwoliły na analizę walcowania wyrobów płaskich i prętów ze stali su-

perdrobnoziarnistych konstrukcyjnych oraz stali wysokowęglowych bainitycznych, które mogą w przyszłości zastąpić gatunki obecnie stosowane. Przeprowadzone symulacje numeryczne procesu walcowania wybranych wyrobów płaskich oraz prętów pozwoliły m.in. zweryfikować przyjęte schematy walcowania wyrobów, ocenić poprawność przyjętych parametrów walcowania (temperatura nagrzewania wsadu, wielkość gniotów) oraz przeanalizować możliwość występowania pęknięć w walcowanym materiale. Wyniki analiz numerycznych zostaną porównane z wynikami badań fizycznych, które zostaną przeprowadzone na linii LPS w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach.

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. USLAB-AVC Body Structure Materials. Technical Transfer Dispatch No. 6, May 2001.
2. Grosman F., Hadasik E.: Technologiczna plastyczność metali – Badania plastometryczne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
3. Pidvysotskyy V., Adamczyk M., Kuziak R., Pietrzyk M.: Fizyczne i numeryczne modelowanie procesu walcowania blach ze stali IF. *Walcownictwo 2005*, Ustroń 2005, s. 41-48.
4. Hadasik E., Kuziak R., Kawalla R., Adamczyk M., Pietrzyk M.: Rheological model for simulation of hot rolling of new generation steel strips for automotive applications, *Steel Research int.* 77 nr 12, 2006, s. 927-933.
5. Lin J., Liu Y.: A set of unified constitutive equations for modelling microstructure evolution in hot deformation, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 2003, s. 281-285.
6. Lin J., Dean T.A.: Modelling of microstructure evolution in hot forming using unified constitutive equations, *Journal of Materials Processing Technology* 167, 2005, s. 354-362.
7. Luo C., Siwecki T.: Modelling microstructure evolution during hot rolling of flat and long products of stainless steel, *Metal Forming Conference 2008, Steel Research International 79 (2008), Special Edition, Vol. 1*, s. 208-214.
8. Rauch Ł., Madej Ł., Jurczyk T., Pietrzyk M.: Complex modelling platform based on digital material representation, *Proc. Concurrent Engineering 2007, Springer-Verlag, Sao Jose dos Campos*, s. 403-410.
9. Rauch Ł., Madej Ł.: Deformation of the dual phase material on the basis of digital representation of microstructure, *Metal Forming Conference 2008, Steel Research International 79 (2008), Special Edition, Vol. 2*, s. 247-254.
10. Pietrzyk M., Gawąd J., Madej Ł.: Multi-scale modelling of microstructure in rolling, *Proc. MEFORM 2008 Simulation von Umformprozessen*, 26-28 marca 2008, Freiberg, Niemcy, s. 33-42.
11. Gawąd J., Paszyński M., Matuszyk P., Madej Ł.: Cellular automata coupled with hp-adaptive finite element method applied to simulation of austenite-ferrite phase transformation with a moving interface, *Metal Forming Conference 2008, Steel Research International 79 (2008), Special Edition, Vol. 2*, s. 579-586.
12. 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, *Hutnik -Wiadomości Hutnicze*, Wyd. Sigma-Not, Warszawa, 2009, nr 8, s. 670-673.
13. Grosman F., Tkocz M., Woźniak D.: Analiza stanów mechanicznych towarzyszących zamykaniu i spajaniu nieciągłości materiału w procesach przeróbki plastycznej, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t.62, 2010, s. 68-72.
14. Li, Y.H., Sellars, C.M.: Comparative investigations of interfacial heat transfer behaviour during hot forging and rolling of steel with oxide scale formation. *J. Mater. Proc. Technol.*, 80-81, 1998, 282-286.
15. Lundberg, S.E.: Evaluation of friction in the hot rolling of steel bars by means of on line forward slip measurements, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2004, 33, 3, 129-145.