

Dariusz WOŹNIAK, Marek BURDEK, Józef GAWOR,
Mariusz ADAMCZYK, Rafał PALUS

Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica

OPRACOWANIE METODYKI PÓLPRZEMYSŁOWEJ SYMULACJI WALCOWANIA NA GORĄCO I OBRÓBK CIEPLNOPLASTYCZNEJ BLACH I PRĘTÓW Z ZASTOSOWANIEM MODUŁU B-LPS OBEJMUJĄCEGO JEDNOKŁATKOWĄ WALCARKĘ NAWROTNĄ ORAZ URZĄDZENIA POMOCNICZE I STERUJĄCO-REJESTRUJĄCE

Na podstawie badań eksperymentalnych i analizy teoretycznej opracowano metodykę półprzemysłowej symulacji procesów walcowania na gorąco i obróbki cieplno-plastycznej w LPS stali uwzględniającą geometryczne i fizyczne podobieństwo odkształcanego materiału oraz narzędzi w stosunku do obiektów rzeczywistych. Określono stosunki prędkości obrotowych walców i czasów trwania odkształcenia oraz prędkości odkształcenia modelu i obiektu rzeczywistego. W oparciu o opracowaną metodykę wykonano symulacje przemysłowego procesu walcowania i przyspieszonego chłodzenia blach oraz prętów w istniejącym module B-LPS oraz porównano właściwości mechaniczne i strukturę wyrobów z procesu przemysłowego i z LPS.

Słowa kluczowe: półprzemysłowa symulacja fizyczna, walcowanie na gorąco, obróbka cieplna, blacha, pręt

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY OF SEMI-INDUSTRIAL SIMULATION OF HOT ROLLING AND THERMO-MECHANICAL TREATMENT OF PLATES AND BARS IN THE MODULE B-LPS COMPRISING ONE-STAND REVERSING MILL, AUXILIARY DEVICES AND CONTROLLING-RECORDING SYSTEMS

Based on the experimental tests and theoretical analysis, the methodology of semi-industrial simulation of hot rolling and thermo-mechanical treatment in LPS was developed taking into consideration the geometric and physical similarity of the processed material and tools in relation to real objects. The relationships between roll speeds and deformation durations as well as strain rates of model and real object were determined. Based on the developed methodology, simulations of industrial rolling and accelerated cooling of plates and bars in the B-LPS module were carried out. The mechanical properties and microstructure of products from the industrial process and the LPS simulation were compared.

Key words: semi-industrial physical simulation, hot rolling, heat treatment, plate, bar

1. WPROWADZENIE

Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplno-plastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu B-LPS obejmującego walcarkę nawrotną oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące wymagało uwzględnienia obecnie stosowanych w warunkach przemysłowych operacji i parametrów technologicznych wytwarzania i przetwarzania wyrobów oraz zasad modelowania tych procesów zgodnie z prawami podobieństwa. Podczas symulacji procesów walcowania na gorąco i obróbki cieplno-plastycznej stali odkształcane przy wysokiej temperaturze modelowe materiały powinny być geome-

trycznie i fizycznie podobne (skład chemiczny, mikrostruktura) jednakowe w stosunku do obiektów rzeczywistych. Również narzędzia do odkształcania modelu i obiektu rzeczywistego powinny być geometrycznie podobne, to znaczy stosunki ich liniowych wymiarów (długość, szerokość, wysokość) powinny być równe i odpowiadać przyjętej skali modelowania. Dla określenia skali modelowania i warunków podobieństwa fizycznego w symulacji procesów przeróbki plastycznej na gorąco konieczne było przeprowadzenie analizy aktualnych procesów walcowania na gorąco blach i prętów w warunkach przemysłowych oraz porównanie stosowanych narzędzi i parametrów technologicznych z narzędziami i parametrami procesów linii LPS.

2. ANALIZA PRZEMYSŁOWYCH PROCESÓW WALCOWANIA NA GORĄCO BLACH I PRĘTÓW

2.1. WALCOWANIE BLACH

Stosowane operacje technologiczne

Walcowanie konwencjonalne

Podczas konwencjonalnego walcowania na gorąco stal konstrukcyjną nagrzewa się do temperatury około 1250÷1200°C, a walcowanie zostaje zakończone w temperaturze około 1000÷950°C. Po takim walcowaniu uzyskuje się całkowicie zrekrystalizowany austenit gruboziarnisty, który podczas chłodzenia przemienia się w gruboziarnistą mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną. Materiał taki charakteryzuje się wysoką temperaturą przejścia w stan kruchy, dlatego konieczne jest normalizowanie w celu rozdrobnienia struktury.

Walcowanie regulowane

Istotę technologii regulowanego walcowania stanowi uzyskanie drobnoziarnistej struktury stali, zapewniającej wysoką wytrzymałość, granicę plastyczności, udarność i ciągliwość oraz niską temperaturę przejścia w stan kruchy. Ograniczenie rozrostu ziarn austenitu zrekrystalizowanego dynamicznie, metadynamicznie lub statycznie, w procesach przeróbki plastycznej na gorąco wymaga obniżenia temperatury końcowej fazy walcowania do około 850°C i poniżej [1]. Stal poddawana jest walcowaniu wstępnemu w temperaturze wyższej od temperatury rekrytalizacji, kiedy zachodzi rekrytalizacja dynamiczna, a w przerwach między kolejnymi przepustami – rekrytalizacja metadynamiczna austenitu, a następnie walcowaniu wykańczającemu w temperaturze niższej od temperatury rekrytalizacji TR, kiedy przebiega już tylko zdrowienie dynamiczne i statyczne austenitu. W wyniku przemiany silnie wydłużonych i spłaszczonych ziaren austenitu podczas chłodzenia w powietrzu z temperatury końca walcowania niższej od A_{r3} , powstaje drobnoziarnista struktura ferrytu. W wyniku zastosowania kontrolowanej obróbki cieplno-plastycznej można uzyskać bardzo drobne ziarno ferrytu w strukturze stali o wielkości około 5 μm [2]. Można wyróżnić następujące rodzaje technologii regulowanego walcowania [3]:

- walcowanie normalizujące,
- walcowanie rekrytalizujące,
- walcowanie z obróbką cieplno-plastyczną w pobliżu temperatury A_{r3} ,
- walcowanie z obróbką cieplno-plastyczną poniżej temperatury A_{r3} w zakresie dwufazowym.

Regulowane chłodzenie po walcowaniu

Duży wpływ na mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną ma zastosowanie przyspieszonego chłodzenia bezpośrednio po ostatnim przepuście procesu walcowania, co związane jest z obniżeniem temperatury początku przemiany. Szybkość takiego chłodzenia (10÷15°C/s) uzyskiwana jest za pomocą strumienia wody. Przyspieszone chłodzenie po walcowaniu powoduje silniejsze rozdrobnienie struktury. W wyniku regulowanego chłodzenia po walcowaniu można uzyskać ziarna austenitu nie mniejsze od ok. 15 μm [4].

Bardzo intensywne regulowane chłodzenie daje możliwość zastosowania bezpośredniego hartowania blach z temperatury walcowania, polegającego na schłodzeniu

blach z szybkością 25÷120°C/s, bez konieczności grzania międzyoperacyjnego do temperatury austenitizacji [3]. Dla właściwej realizacji regulowanego walcowania i chłodzenia konieczna jest znajomość temperatury rekrytalizacji. Stale konstrukcyjne o podwyższonej wytrzymałości ulepszone cieplnie mogą być hartowane bezpośrednio z temperatury końca walcowania. Takie hartowanie z następnym odpuszczaniem jest uznawane za odpowiadające tradycyjnemu ulepszeniu cieplnemu.

Cechy geometryczne narzędzi – wymiary walców stosowanych w walcowniach blach

Zespoły walcownicze nowoczesnych walcowni blach grubych są wyposażone w jedną lub dwie walcarki typu kwarto usytuowanych w układzie posobnym o następujących wymiarach walców [5, 6, 9]:

- średnice walców roboczych: 920÷1250 mm,
- średnice walców oporowych: 1400÷2400 mm,
- długość beczek walców: 3300÷5500 mm.

Zespoły walcownicze nowoczesnych walcowni gorących blach taśmowych składają się z dwóch grup walcarek typu kwarto usytuowanych w układzie ciągłym, $\frac{3}{4}$ – ciągłym lub półciągłym o następujących wymiarach walców [6, 9]:

- średnice walców roboczych: 650÷900 mm,
- średnice walców oporowych: 1400÷1600 mm,
- długość beczek walców: 1700÷2500 mm.

2.2. WALCOWANIE PRĘTÓW

Stosowane operacje technologiczne

Podstawowym sposobem wytwarzania prętów jest walcowanie konwencjonalne i ewentualne przyspieszone chłodzenie. Spośród wielu sposobów przyspieszonego chłodzenia w stosunku do prętów stosowane są następujące:

- przerywane chłodzenie wodne natryskowe lub strumieniowe,
- przyspieszone chłodzenie strugami wodno-powietrznymi,
- przyspieszone chłodzenie strumieniem wody (drobnych wyrobów),
- przyspieszone chłodzenie strugami powietrznymi i wodnymi.

Cechy geometryczne narzędzi – wymiary walców stosowanych w walcowniach bruzdowych

Zespoły walcownicze nowoczesnych walcowni bruzdowych produkujących pręty składają się z 2÷4 grup walcarek typu duo usytuowanych w układzie ciągłym lub półciągłym o następujących średnicach walców:

- 650÷1300 mm – walcownie duże,
- 450÷650 mm – walcownie średnie,
- 250÷450 mm – walcownie małe.

3. MOŻLIWOŚCI SYMULACJI PÓLPRZEMYSŁOWEJ PROCESÓW WALCOWANIA NA GORĄCO W LPS

Procesy i operacje technologiczne

Zakres symulacji procesów walcowania na gorąco obejmuje technologie walcowania w zakresie wysokotemperaturowym (walcowanie klasyczne), niskotempe-

raturowym i z obróbką cieploplastyczną (walcowanie regulowane) oraz regulowanego chłodzenia po walcowaniu. Regulowane chłodzenie po walcowaniu obejmuje: chłodzenie w swobodnym powietrzu, przyspieszone chłodzenie strumieniem powietrza, przyspieszone chłodzenie natryskiem wodnym, przyspieszone chłodzenie mgłą wodną, sterowane spowolnione chłodzenie w piecu, szybkie chłodzenie przez zanurzenie w wodzie, oleju lub soli (hartowanie).

Wsad

Wsadem dla walcarki duo / kwarto są:

- wlewki kwadratowe o wymiarach $100 \div 140/160 \times 500 \div 1000$ mm,
- wlewki płaskie o wymiarach $120 \div 250 \times 50 \div 60 \times 500 \div 1000$ mm,

Wyrób

Wyrobem gotowym są:

- blachy arkuszowe o grubości min. $2,0 \div 25,0$ mm,
- pręty kwadratowe o powierzchni przekroju poprzecznego min. 650 mm².

Nagrzewanie wsadu

Zakres temperatury nagrzewania wsadu w piecu grzewczym LPS obejmuje przedział $20 \div 1450^\circ\text{C}$. Zakres temperatury nagrzewania stosowny w piecach przemysłowych używanych w walcowniach blach grubych, to maks. 1300°C . Zatem, symulacja procesu nagrzewania wsadu do walcowania odnosząca się do temperatury może w pełni odpowiadać procesowi przemysłowemu.

Czyszczenie ze zgorzeli

W module B LPS czyszczenie wsadu ze zgorzeli pierwotnej odbywa się w hydraulicznym zbijaczu zgorzeli za pomocą strumieni wody uderzających w powierzchnię wsadu pod ciśnieniem $16 \div 28$ MPa [7]. Z porównania ciśnienia natrysku wody wynika, że symulacja usuwania zgorzeli w LPS może w pełni odpowiadać parametrom operacji przemysłowej.

Wymiana ciepła i temperatura walcowania

Przepływ energii cieplnej od nagrzanego wsadu i od walcowanego pasma zachodzi głównie przez przewodzenie ciepła (kondukcję) do rolek samotoków, walców, osprzętu walcowniczego oraz innych urządzeń pomocniczych, ale także przez unoszenie (konwekcję) i promieniowanie (radiację).

Przewodzenie ciepła opisuje równanie Fouriera:

$$Q_p = -\lambda F \tau \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

gdzie:

- F – powierzchnia przenikania ciepła (kondukcji),
- τ – czas,
- λ – współczynnik przewodnictwa cieplnego,

$\frac{dt}{dx}$ – gradient temperatury.

Ilość unoszonego ciepła określa równanie

$$Q_u = \alpha_u F (t_s - t) \tau \quad (2)$$

gdzie:

- α_u – współczynnik unoszenia (konwekcji),
- F – powierzchnia przejmująca lub oddająca ciepło,
- t_s – temperatura powierzchni ciała przejmującego lub oddającego ciepło,
- t – temperatura czynnika,

τ – czas.

Ilość ciepła wypromieniowanego oblicza się za pomocą równania Stefana i Boltzmann

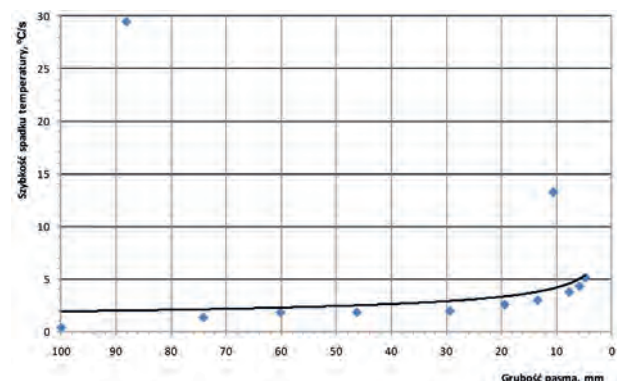
$$Q_{pr} = \varepsilon C_0 F (T_1^4 - T_2^4) \tau \quad (3)$$

gdzie:

- ε – współczynnik czarności,
- C_0 – stała promieniowania ciała doskonale czarnego,
- F – powierzchnia przejmująca lub oddająca ciepło,
- T_1 – temperatura ciała promieniującego,
- T_2 – temperatura ciała przejmującego ciepło,
- τ – czas.

Wsad stosowany w LPS ma mniejszą objętość od wsadu przemysłowego, zatem magazynuje mniej ciepła, co jest przyczyną szybszego spadku temperatury niż w przypadku dużego wsadu przemysłowego. W celu zapewnienia utrzymania podobieństwa cieplnego, w LPS na całej długości samotoków roboczych przed i za klatką walcowniczą zastosowano tunele izotermiczne ogrzewane rezystancyjnie. Temperatura w tunelach jest regulowana w zakresie od 20 do 500°C . Rozwiązanie to umożliwi dostosowanie szybkości spadku temperatury pasma walcowanego w LPS do szybkości spadku temperatury w procesach przemysłowych. W celu określenia szybkości spadku temperatury walcowanego pasma w warunkach LPS w module B przeprowadzono analizę raportów z walcowania blach o grubościach $8 \div 12$ mm i szerokościach $150 \div 250$ mm z wsadu o grubości 60 i 100 mm oraz prętów $35 \div 60$ mm walcowanych z wsadu 60 mm [7, 10]. Temperatura wsadu bezpośrednio przed walcowaniem mieściła się w przedziale $1150 \div 1050^\circ\text{C}$ (po użyciu zbijacza zgorzeli), a temperatura końca walcowania mieściła się w przedziale $640 \div 900^\circ\text{C}$. Szybkość spadku temperatury na przykładzie blachy o grubości 6 mm pokazano na rysunku 1 [7]. Obserwowane na rysunku dwa punkty usytuowane wyraźnie powyżej krzywej szybkości spadku temperatury są punktami odpowiadającymi zbijaniu zgorzeli i wykonywaniu operacji cięcia.

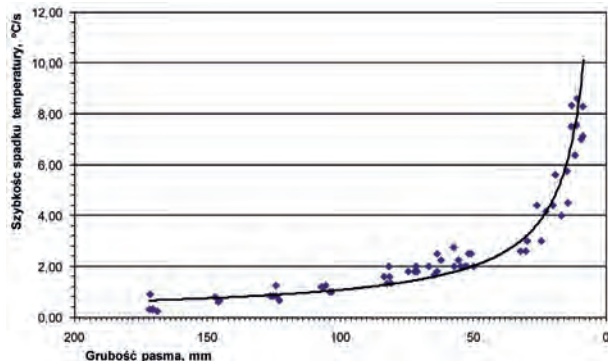
Dla porównania określono szybkości spadku temperatury walcowanego pasma w warunkach procesu przemysłowego. W tym celu przeprowadzono analizę dostępnych raportów z walcowania blach o grubościach



Rys. 1. Szybkość spadku temperatury pasma w czasie walcowania w LPS pasm o grubości końcowej 6 mm ze wsadu o grubości 100 mm i temperaturze początku walcowania 1132°C

Fig. 1. Rate of strand temperature decrease during rolling of products with final thickness of 6 mm from 100 mm thick charge with rolling start temperature of 1132°C in the LPS

6÷13 mm i szerokościach 2150÷3180 mm z wsadu o grubości 180 mm. Temperatura wsadu bezpośrednio przed walcowaniem wynosiła średnio około 1120°C, a temperatura końca walcowania mieściła się w przedziale 700÷920°C. Przebieg szybkości spadku temperatury pokazano na rysunku 2 [7].



Rys. 2. Szybkość spadku temperatury pasma w czasie walcowania pasm o grubościach końcowych 8÷13 mm ze wsadu o grubości 180 mm w walcowni przemysłowej

Fig. 2. Rate of strand temperature decrease during rolling of products with final thickness of 8÷13 mm from 180 mm thick charge in industrial rolling mill

Z porównania przebiegów zmian temperatury w czasie walcowania w LPS nie odbiega znacząco od temperatury rejestrowanej w procesie przemysłowym do czasu wykonania operacji cięcia pasma. W obu przypadkach wsad bezpośrednio przed walcowaniem miał podobną temperaturę (1132°C w LPS i 1120°C w walcowni przemysłowej). Liczba przepustów różniła się o 2 (11 w LPS i 13 w walcowni przemysłowej). Natomiast temperatura końca walcowania była znacznie niższa w LPS (~650°C) niż w walcowni przemysłowej (~800°C). Przyczyną tej różnicy jest konieczność wykonania operacji cięcia pasma w LPS w celu umożliwienia kontynuacji procesu. Spadek temperatury pasma spowodowany operacją cięcia to około 200°C. Z porównania szybkości spadku temperatury pasma w czasie walcowania pasm w LPS (rys. 1) i w walcowni przemysłowej (rys. 2) wynika, że temperatura pasma w czasie walcowania w LPS nie odbiega znacząco od temperatury rejestrowanej w procesie przemysłowym. W obu przypadkach szybkość spadku temperatury dla grubości pasma około 50 mm mieści się w przedziale 0,5÷2°C/s, dla grubości 50 mm do 15 mm w przedziale 2÷4°C/s i dla grubości 15 mm do 8 mm w przedziale 4÷6°C/s [7].

Wielkość gniotów

Przy zachowaniu skali podobieństwa geometrycznego walcowanego wsadu i średnicy walców mieszcząca się w przedziale wartości od 1:1 do 1:2 wielkość gniotów podczas symulacji procesu walcowania blach i prętów może w pełni odpowiadać procesowi przemysłowemu. Stwierdzenie to wynika z przeprowadzonych prób walcowania w LPS pasm płaskich, podczas których dla pasm o grubości poniżej 12 mm stosowano gnioty do 40%.

Prędkość walcowania

Bezpieczna dla obsługi i urządzeń prędkość walcowania w LPS nie powinna przekraczać 1,3 m/s, co w zależności od średnicy walców, grubości pasma i wielkości gniotu, daje prędkość odkształcenia do 10 s⁻¹. Prędkości

walcowania stosowane w walcowniach przemysłowych w zależności od ich typu, konfiguracji i urządzeń mieszczą się w przedziale od 2 do ok. 20 m/s (w walcowniach walcówki do 140 m/s). Porównując podane zakresy prędkości walcowania i szybkości odkształcenia pasma w LPS oraz w walcowniach przemysłowych skalę podobieństwa odnoszącą się do prędkości liniowej walcowania i szybkości odkształcenia pasma należy dobrać odpowiednio do celu planowanej symulacji.

Walce

Walcarka nawrotna może pracować ze złożeniem walców w układzie duo lub kwarto. Wymiary walców są następujące dla złożenia duo – średnica 450÷550 mm i długość becзки 700 mm, dla złożenia kwarto – średnica walców oporowych 380÷420 mm, średnica walców roboczych 120÷130 mm i długość becзки walców 700 mm. Jednoklatkowa walcarka nawrotna umożliwia walcowanie wyrobów płaskich zarówno w złożeniu kwarto jak i w złożeniu duo. Symulacja walcowania blach może być prowadzona w obu typach złożenia walców, w zależności od parametrów technologicznych, skali modelowania i możliwości technicznych.

4. WARUNKI PODOBIEŃSTWA FIZYCZNEGO MODELU I OBIEKTU RZECZYWISTEGO

Skala modelowania

Zgodnie z prawem podobieństwa procesów przeróbki plastycznej odkształcane ciała powinny być geometrycznie podobne i fizycznie jednakowe. Podobieństwo geometryczne dotyczy zachowania odpowiednich wymiarów liniowych modelu, obiektu rzeczywistego i narzędzi do odkształcania. Skalę modelowania wyznacza się z warunku podobieństwa geometrycznego, które jest zachowane, gdy stosunki odpowiednich wymiarów: długości l , szerokości b i wysokości h modelu (m) i wyrobu naturalnego (n) są jednakowe:

$$l_n/l_m = b_n/b_m = h_n/h_m = s \quad (4)$$

gdzie s jest skalą modelowania.

W przypadku geometrycznego podobieństwa w procesie odkształcania stopień odkształcenia modelu i wyrobu gotowego powinien być jednakowy $\epsilon_n = \epsilon_m$. Dla zachowania podobieństwa fizycznego musi być zachowane podobieństwo cieplne procesu, a to oznacza, że stosunki prędkości ruchu narzędzia (v_n) i czasów trwania odkształcenia (τ_n) oraz prędkości odkształcenia (w_n) modelu i obiektu rzeczywistego (v_n , τ_n , w_n) powinny być różne dla zapewnienia jednakowej temperatury, jednakowych warunków tarcia i jednakowych warunków przebiegu umocnienia. Wartości tych stosunków związane są z przyjętą skalą modelowania zależnościami podanymi w tablicy 1.

Warunkiem prawidłowego modelowania jest zachowanie stałej wartości skali modelowania dla każdego z parametrów równań opisujących dany proces. Takie modelowanie procesów obróbki plastycznej, szczególnie procesów prowadzonych na gorąco, w których zapewniona byłaby jednakowa temperatura, jednakowe warunki tarcia oraz takie same zjawiska zachodziłyby w odkształcanym materiale, wymaga zastosowania różnych skal modelowania dla tych samych parame-

Tablica 1. Warunki podobieństwa fizycznego przy modelowaniu procesów przeróbki plastycznej na gorąco [12]
Table 1. Criteria of physical similarity at modelling of hot plastic working processes [12]

Warunek	Prędkość ruchu narzędzia	Prędkość odkształcenia	Czas trwania odkształcenia
Zapewnienia podobieństwa cieplnego	$v_m/v_n = s$	$w_m/w_n = s^2$	$\tau_m/\tau_n = s^{-2}$
Zapewnienia jednakowych warunków tarcia	$v_m/v_n = 1$	$w_m/w_n = s$	$\tau_m/\tau_n = s^{-1}$
Zapewnienia jednakowych warunków umocnienia	$v_m/v_n = s^{-1}$	$w_m/w_n = 1$	$\tau_m/\tau_n = 1$

Tablica 2. Parametry walcowania w LPS
Table 2. LPS rolling parameters

Przepust	Grubość po przepuście [mm]	Gniot [%]	Wydlużenie	Szerokość pasma [mm]	Temperatura pasma [°C]	Odształcenie rzeczywiste	Prędkość odkształcenia [s ⁻¹]	Prędkość walcowania [m/s]
wsad	60,00			150				
1	46,06	23,2	1,26	155	1080	0,23	2,65	1,0
2	38,26	16,9	1,54	157	1050	0,43	2,59	1,0
3	30,58	20,1	1,48	160	1010	0,39	3,09	1,0
4	24,33	20,4	1,55	162	960	0,44	3,49	1,0
5	19,00	21,9	1,59	164	700	0,46	4,05	1,0

Tablica 3. Parametry walcowania przemysłowego
Table 3. Industrial rolling parameters

Przepust	Grubość po przepuście [mm]	Gniot [%]	Wydlużenie	Szerokość pasma [mm]	Odształcenie rzeczywiste	Prędkość odkształcenia [s ⁻¹]	Prędkość walcowania [m/s]
wsad	55,20			2550			
1	46,06	16,6	1,20	2550	0,18	2,34	1,0
2	38,26	16,9	1,44	2550	0,37	2,59	1,0
3	30,58	20,1	1,50	2550	0,41	3,09	1,0
4	24,33	20,4	1,57	2550	0,45	3,49	1,0
5	21,43	11,9	1,43	2553	0,36	2,98	1,0
6	20,00	5,7	1,20	2556	0,19	2,21	1,0

trów. Dlatego modelowanie należy przeprowadzać ze względu na najważniejsze w danym procesie zjawisko i dla niego ustalać skalę i kryteria modelowania. Podsumowując, należy podkreślić, że w przeróbce plastycznej na gorąco nie można stworzyć jednego, ogólnego kryterium podobieństwa.

5. SYMULACJA PRZEMYSŁOWEGO PROCESU WALCOWANIA

Wykonano symulacje przemysłowych procesów walcowania blach o grubościach z zakresu 2 do 20 mm i prętów □60, 55, 50, 45, 40, 35 i 30 mm w module B LPS [8, 11]. Wyniki tych symulacji omówiono na przykładzie blachy o grubości 20 mm z niskowęglowej stali konstrukcyjnej [8].

Przebieg symulacji

Wsad do walcowania nagrzewano do temperatury 1200°C w czasie 1 godziny. Nagrzany do temperatury walcowania wsad przed walcowaniem został oczyszczony ze zgorzeliny wodą pod ciśnieniem 25 MPa. Walcowanie prowadzono według parametrów zamieszczonych w tablicy 2. Symulacja procesu walcowania obejmowała przemysłowy etap walcowania wykańczającego. Ten etap walcowania ma decydujące znaczenie dla końcowych właściwości wyrobów.

Porównanie parametrów walcowania w LPS (tabl. 2) i walcowania przemysłowego (tabl. 3) w zakresie grubości pasma w kolejnych przepustach, gniotu i odkształcenia rzeczywistego wykazuje niewielkie różnice w przepuście 1 i 5. Różnica w przepuście 1 wynika z grubości przemysłowego pasma pośredniego w tym konkretnym przypadku wynoszącej ok. 55,2 mm i dysponowanego wsadu w LPS (60 mm). Natomiast różnica w przepuście 5 wynika z możliwości technicznych konkretnej walcowni przemysłowej dotyczących maksymalnego obciążenia klatki walcowniczej. Dodatkowy przepust 6 zastosowany w walcowni przemysłowej jest przepustem mającym na celu uzyskanie wymaganej grubości blachy i nie ma wpływu na uzyskanie wymaganych właściwości. Zaplanowana operacja walcowania z obróbką cieplno-plastyczną została zrealizowana, co potwierdzają uzyskane w ostatnim przepuście wielkość gniotu i temperatura pasma.

W celu wykonania obróbki cieplnoplastycznej przy temperaturze około 780°C zastosowano przed ostatnim przepustem chłodzenie międzyoperacyjne. Zarejestrowana temperatura pasma mierzona bezpośrednio po ostatnim przepuście miała wartość 776°C, co odpowiada wartości zaplanowanej. Bezpośrednio po zakończeniu walcowania pasmo chłodzono natryskiem wodnym o intensywności 400 l/min do temperatury otoczenia. Ze względu na to, że nie dysponowano informacją na temat parametrów technologicznych przyspieszonego

Tablica 4. Wyniki badań wytrzymałości i twardości blach

Table 4. Results of plate strength and hardness tests

Walcowanie	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	HV 10
LPS	474	774	25,2	60	241
przemysłowe	521	636	27,1	74	202

chłodzenia blach w warunkach przemysłowych, dane do symulacji w LPS opracowano bez odniesienia do warunków przemysłowych.

Porównanie właściwości mechanicznych i struktury blach z procesu przemysłowego i z LPS

Badania wytrzymałości i twardości

Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono dla blach o grubości 20 mm ze stali konstrukcyjnej walcowanych w przemysłowej walcowni blach grubych i w LPS moduł B.

Zakres badań obejmował:

- próbę rozciągania w temperaturze otoczenia,
- pomiar twardości na grubości blach.

Badania wytrzymałości wykonano w próbie rozciągania na próbkach okrągłych wzdłużnych. Długość pomiarowa próbki wynosiła 80 mm, a średnica 10 mm.

Próbki rozciągano z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick Z 250.

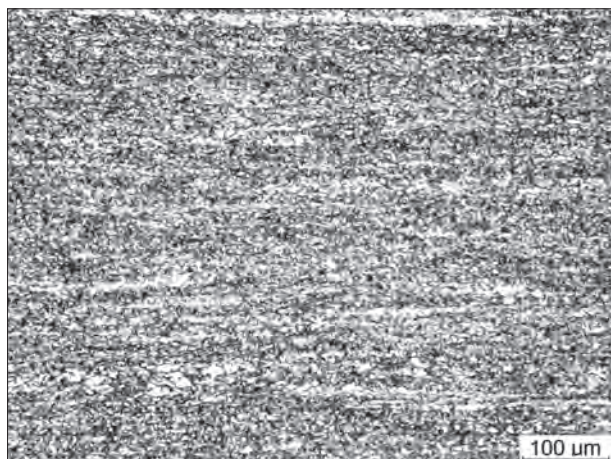
Pomiary twardości przeprowadzono metodą Vickersa HV 10 na zglądach metalograficznych wykonanych na przekroju grubości blach.

Wyniki badań zestawiono w tablicy 4.

Z porównania wynika, że blacha walcowana w module B-LPS uzyskała większą twardość i wytrzymałość na rozciąganie oraz nieco niższą granicę plastyczności niż blacha walcowana w warunkach przemysłowych. Stosunek R_e/R_m wynosi odpowiednio 0,61 dla blachy walcowanej w LPS i 0,82 dla blachy przemysłowej.

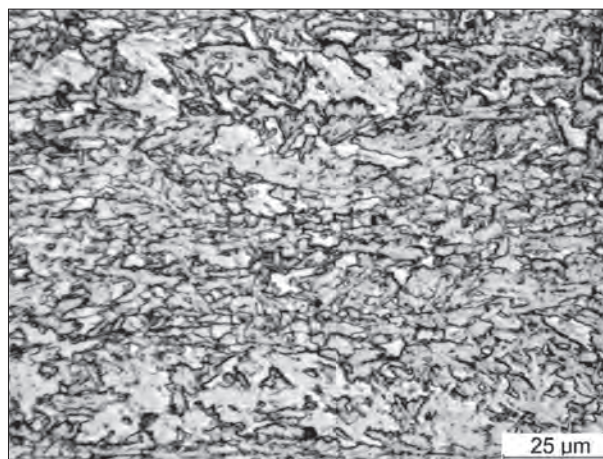
Badania mikrostruktury

Badania mikrostruktury blach walcowanych w warunkach przemysłowych i w LPS wykonano metodą mikroskopii świetlnej na zglądach wzdłużnych. Przykładowe mikrofotografie struktury blach walcowanych w warunkach przemysłowych i w module B-LPS przed-



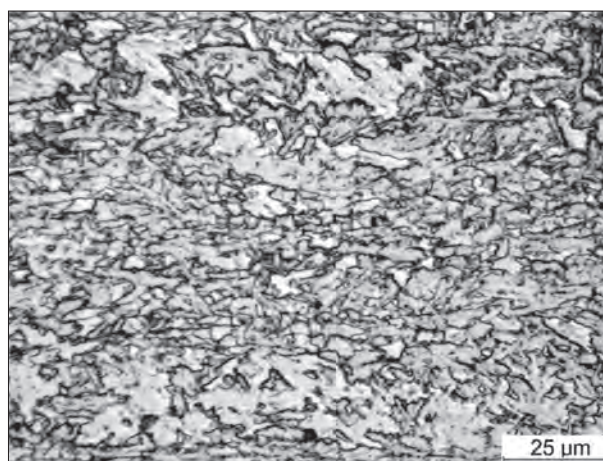
Rys. 3. Mikrostruktura blachy walcowanej w warunkach przemysłowych

Fig. 3. Microstructure of plate after rolling under industrial conditions



Rys. 4. Mikrostruktura blachy walcowanej z obróbką cieplno-plastyczną i regulowanym chłodzeniem po walcowaniu w module B-LPS.

Fig. 4. Microstructure of plate after rolling with thermo-mechanical treatment and controlled cooling in B-LPS module



stawiono na rysunkach 3 i 4. W obu przypadkach mikrostruktura blach składa się z bainitu i śladowych wydzieleni wolnego ferrytu. Jednak budowa morfologiczna bainitu jest zróżnicowana. Mikrostruktura blachy walcowanej w warunkach przemysłowych jest drobnodyspersyjna ze skoagulowanymi węglnikami w obszarach bainitycznych (bainit ziarnisty) i z wydzieleniami wolnego ferrytu rozmieszczonego pasemkowo (rys. 3). Natomiast mikrostruktura blachy walcowanej w module B-LPS jest w mniejszym stopniu zdyspergowana i składa się z bainitu listwowego z płytkowymi wydzieleniami cementytu w obrębie byłych ziarn austenitu oraz śladowych wydzieleni wolnego ferrytu rozmieszczonego równomiernie na granicach ziarn (rys. 4). Odmienne ukształtowanie mikrostruktury bainitu jest spowodowane prawdopodobnie różną temperaturą końca walcowania wstępnego w zakresie austenitycznym.

6. PODSUMOWANE

W celu identyfikacji charakterystyk istniejących urządzeń przemysłowych oraz stosowanych parametrów technologicznych, które stanowią podstawę do określenia warunków podobieństwa obiektu rzeczywistego i modelu w postaci modułu B LPS, dokonano przeglądu i analizy przemysłowych procesów walcowania na gorąco blach i prętów. Przedstawiono możliwości symulowania technologii i operacji procesów walcowania na gorąco blach i prętów w module B linii do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania wyrobów z metali i stopów LPS w odniesieniu do operacji i parametrów technologicznych stosowanych w warunkach przemysłowych. Z przedstawionych analiz wynika, że w wielu przypadkach możliwe jest stosowanie skali modelowania 1:1 lub 1:2 najkorzystniejszej dla prowadzenia symulacji procesów walcowania. W zależności od celu prowadzenia symulacji można używać innych skal modelowania. Wstępnie opracowano warunki podobieństwa fizycznego modelu i obiektu rzeczywistego dla procesów walcowania blach grubych i prętów stanowiące podstawę do projektowania symulacji fizycznej w LPS.

Przeprowadzone walcowania eksperymentalne umożliwiły wyznaczenie spadków temperatury w czasie trwania poszczególnych operacji procesu walcowania na gorąco w LPS (zbijanie zgorzeliny, walcowanie, cięcie) niezbędnych do projektowania symulacji. Badania umożliwiły wskazanie operacji i punktów, w których temperatura pasma spada najszybciej oraz liczbowe określenie tego spadku.

Badania eksperymentalne prowadzone z użyciem chłodni natryskowo-nadmuchowej i zbiornika wodnego umożliwiły sporządzenie krzywych chłodzenia w układzie temperatura – czas. Krzywe chłodzenia są niezbędne dla projektowania symulacji procesów wal-

cowania z obróbką cieplno-plastyczną i regulowanym chłodzeniem po walcowaniu. Z porównania krzywych dla obu procesów chłodzenia w chłodni natryskowej i w zbiorniku wodnym wynika, że szybkości chłodzenia prętów w zbiorniku wodnym są porównywalne z szybkością chłodzenia natryskowego przy wydatku wody wynoszącym 400 l/min.

Symulacje przemysłowego procesu walcowania blach obejmowały przepusty wydłużające i wykańczające, które mają istotny wpływ na właściwości wyrobu gotowego. Symulacji podlegały technologie walcowania z obróbką cieplno-plastyczną i z przyspieszonym chłodzeniem. Porównano właściwości mechaniczne i mikrostrukturę blach walcowanych w LPS i w walcowni przemysłowej. Wyniki badań wskazują, że zastosowanie dla stali niskowęglowej walcowania z obróbką cieplno-plastyczną i regulowanego chłodzenia bezpośrednio po walcowaniu stwarza szerokie możliwości kształtowania mikrostruktury i właściwości wyrobów, a opracowana technologia takiego walcowania dla półprzemysłowej linii LPS może być zrealizowana w walcowniach posiadających system regulowanego chłodzenia wodnego.

Symulacje przemysłowego procesu walcowania prętów kwadratowych w istniejącym module B zostały wykonane dla prętów $\square 60$ 55, 50, 45, 40, 35 i 30 mm ze stali konstrukcyjnej niskostopowej oznaczonej w projekcie symbolem A. Symulacje obejmowały przepusty wydłużające i wykańczające, które mają istotny wpływ na właściwości wyrobu gotowego. Symulację wykonano w odniesieniu do wielkości gniotów (ubytku przekroju) w kolejnych przepustach ze względu na odmienne kalibrowanie walcowni bruzdowych w stosunku do LPS. Z porównania wartości gniotów (ubytków przekroju) stosowanych w przemysłowych walcowniach bruzdowych z wartościami gniotów (ubytków przekroju) zastosowanymi w LPS wynika, że odkształcanie pasma w obu procesach ma podobną intensywność.

Opracowaną metodykę półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu B – LPS oraz uzyskane dane i wyniki wykorzystano do opracowania wszystkich symulacji realizowanych w ramach innych zadań projektu nr N R07 0008 04.

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. Illert K.-G., Lackinger V.: Modern plate mills. State of development and trends. Materiały informacyjne firmy Schloemann-Siemag SMS – Technical Report Rolling Mills, 1998.
2. Kuziak R.: Modelowanie zmian struktury i przemian fazowych zachodzących w procesach obróbki cieplno-plastycznej stali, Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, Gliwice 2005.
3. Bobrov V.: Mechanism and kinetics of transitional metal deformation during rolling. Ironmaking and Steelmaking. 1995, t. 22, nr 3, s. 256-260.
4. Dobrzański L.A.: Metalowe materiały inżynierskie, WNT Warszawa 2004, wyd. 1.
5. Werme A., Eckelsbach K., Knepe G.: The new SSAB Oxelösund heavy plate mill. MPT, 1997, nr 4, s. 134-143.
6. Woźniak D., Gawor J.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego jednoklatkową walcarkę nawrotną oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Cz. 1. Sprawozdanie nr PR0015-23 cz. 1 (niepublikowane), Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2008.
7. Woźniak D., Gawor J., Adamczyk M., Palus R.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego jednoklatkową walcarkę nawrotną oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Cz. 2. Sprawozdanie nr PR0015-23 cz. 2 (niepublikowane), Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2010.
8. Woźniak D., Gawor J., Adamczyk M., Palus R.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego jednoklatkową walcarkę nawrotną oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Cz. 3. Sprawozdanie nr PR0015-23 cz. 3 (niepublikowane), Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2011.
9. Burdek M., Woźniak D.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej taśm i cienkich prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego czteroklatkowy ciągły układ walcowniczy oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Cz. I. Sprawozdanie nr PR0015-24 cz. I (niepublikowane), Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2008.
10. Burdek M., Woźniak D., Adamczyk M., Palus R., Walnik B.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej taśm i cienkich prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego czteroklatkowy ciągły układ walcowniczy oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Cz. II. Sprawozdanie nr PR0015-24 cz. II (niepublikowane), Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2010.
11. Burdek M., Woźniak D., Adamczyk M., Palus R., Walnik B.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej taśm i cienkich prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego czteroklatkowy ciągły układ walcowniczy oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Cz. III. Sprawozdanie nr PR0015-24 cz. III (niepublikowane), Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2011.
12. Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: Przeróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1977, 1986, s. 106-108.