

Dariusz WOŹNIAK, Bogdan GARBARZ, Roman KUZIAK

Instytut Metalurgii Żelaza

ROZWÓJ WYKORZYSTANIA METODY PÓŁPRZEMYSŁOWEJ SYMULACJI WALCOWANIA NA GORĄCO I OBRÓBKI CIEPLNOPLASTYCZNEJ W PROJEKTACH BADAWCZYCH I TECHNOLOGICZNYCH

Prezentowano zakres wykorzystania modułu B linii do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania wyrobów z metali i stopów (LPS) oraz wyniki badań uzyskane w ramach aktualnie realizowanych i zakończonych w latach 2012–2014 wybranych projektów europejskich i krajowych oraz prac zleconych przez ośrodki badawcze i przedsiębiorców przemysłowych krajowych i zagranicznych. W module B-LPS wykonano fizyczne symulacje walcowania na gorąco wlewków pochodzących z wytopów doświadczalnych i z wsadów z zewnątrz, na pręty i blachy. Walcowanie wyrobów płaskich prowadzono z zastosowaniem regulowanego walcowania z obróbką cieplno-plastyczną i regulowanego chłodzenia po walcowaniu. Materiał po walcowaniu poddano badaniom obejmującym pomiar właściwości mechanicznych i metalograficzną ocenę stanu struktury.

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

DEVELOPMENT OF THE APPLICATION OF THE METHOD FOR SEMI-INDUSTRIAL SIMULATION OF HOT ROLLING AND THERMO-MECHANICAL TREATMENT IN THE RESEARCH AND TECHNOLOGICAL PROJECTS

This paper presents the range of application of module B of the line for semi-industrial simulation of processes related to manufacturing of metal alloys and products (LPS) as well as results of investigations obtained under selected European and domestic projects in progress and completed in the years 2012–2014 and works commissioned by the research centres and domestic and foreign industrial entrepreneurs. Physical simulations of hot rolling of ingots from experimental melts and external charges for bars and sheets were carried out in the B-LPS module. The rolling of flat products was carried out using controlled rolling with thermo-mechanical treatment and controlled cooling after rolling. After rolling, the material was subject to investigations including the measurement of mechanical properties and metallographic assessment of structure condition.

Key words: physical simulation, hot rolling, heat treatment, sheet, bar

1. WPROWADZENIE

Moduł B linii do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania wyrobów z metali i stopów (LPS) jest unikatowym specjalnym urządzeniem badawczym zbudowanym według koncepcji Instytutu Metalurgii Żelaza, przeznaczonym do fizycznej symulacji w skali półprzemysłowej procesów kształtowania struktury, właściwości i formy zewnętrznej wyrobów ze stopów metali w procesach walcowania na gorąco, obróbki cieplno-plastycznej i obróbki cieplnej. Moduł B-LPS jest używany do prowadzenia badań związanych z technologią wytwarzania nowych materiałów realizowanych w ramach krajowych projektów badawczych finansowanych przez NCBR i NCN, prac zleconych przez ośrodki badawcze i przedsiębiorstwa przemysłowe oraz w ramach projektów europejskich. Planowane jest m.in. wykorzystanie modułu B-LPS do prac badawczych nad nowym materiałem wydłużającym żywotność walców w walcowniach bruzdowych w ramach programu RFCS. Metody symulacji fizycznej w skali półprzemysłowej dają

możliwość szybszej i tańszej weryfikacji nowych technologii, niż próby w pełnej skali przemysłowej.

Celem artykułu jest pokazanie możliwości i zakresu wykorzystania modułu B-LPS w badaniach nad nowymi materiałami i technologiami wytwarzania, co wpływa na rozszerzenie współpracy krajowej i międzynarodowej oraz aktywne włączenie się do europejskiej przestrzeni badawczej.

2. PODSTAWOWE PARAMETRY TECHNICZNE ORAZ MOŻLIWOŚCI WYKONYWANIA BADAŃ Z WYKORZYSTANIEM URZĄDZEŃ MODUŁU B-LPS

2.1. OBECNE MOŻLIWOŚCI BADAWCZE B-LPS

Linia do półprzemysłowej symulacji przeznaczona jest do badań polegających na fizycznej symulacji procesów wytwarzania nowych materiałów i wyrobów

z metali i stopów w warunkach półprzemysłowych. Infrastruktura LPS umożliwiła prowadzenie prac badawczych w zakresie opracowywania nowych materiałów metalowych i technologii ich wytwarzania na potrzeby przemysłu oraz jest wykorzystywana do prowadzenia podstawowych prac naukowych ukierunkowanych na poznanie fizycznych mechanizmów powstawania struktury metali i stopów w procesach wytwarzania w celu optymalizacji właściwości wyrobów. Według przyjętej koncepcji LPS składa się z modułów umożliwiających półprzemysłową symulację fizyczną procesów wytapiania i odlewania (moduł A), walcowania na gorąco wyrobów płaskich i prętów (moduł B) z wlewków pochodzących z modułu A oraz ciągnięcia prętów, rur i kształtowników (moduł F) prętów walcowanych w module B. W zakresie walcownictwa realizowanego w module B możliwe jest prowadzenie symulacji technologii regulowanego walcowania, regulowanego chłodzenia po walcowaniu i obróbki cieplnej wyrobów walcowanych. Moduł B-LPS obejmuje następujące podstawowe urządzenia technologiczne [1–3]:

- piec grzewczy rezystancyjny, komorowy z wysuwającym trzonem umożliwiającym nagrzewanie wsadu do temperatury 1400°C, z możliwością wprowadzania atmosfery ochronnej z gazu obojętnego,
- hydrauliczny zbiornik zgorzeliny o ciśnieniu roboczym strumienia wody 28 MPa,
- samotoki robocze z tunelami izotermicznymi z opcją dogrzewania do temperatury 500°C,
- jednoklatkową walcarkę nawrotną z możliwością zabudowy walców:
 - w układzie duo o średnicy 550 mm,
 - lub w układzie kwarto o średnicach 420 mm (walce oporowe) i 130 mm (walce robocze),
- urządzenie do cięcia walcowanego pasma,
- chłodnię natryskowo-nadmuchową chłodzącą wodą, mieszaniną wodny i powietrza oraz powietrzem walcowane pasmo w czasie i po walcowaniu w zakresie od 1100°C do 20°C,
- piec rezystancyjny, komorowy ze stałym trzonem do regulowanego studzenia pasma w zakresie od 1100°C do 20°C, z możliwością wprowadzenia atmosfery ochronnej z gazu obojętnego,
- zbiornik na media chłodzące z wyposażeniem pomocniczym do szybkiego chłodzenia przez zanurzenie.

Sterowanie urządzeniami modułu B jest zautomatyzowane w zakresie nastawiania parametrów technologicznych nagrzewania, usuwania zgorzeliny, walcowania oraz regulowanego chłodzenia w czasie i po walcowaniu. Urządzenia są wyposażone w aparaturę do ciągłego pomiaru i rejestracji podstawowych parametrów technologicznych [1].

Zakres symulacji procesów walcowania na gorąco wyrobów płaskich i prętów kwadratowych obejmuje:

- wsad:
 - wlewki z próżniowego pieca indukcyjnego (moduł A1) o masie 100 kg lub materiał pobrany z przemysłowych półwyrobów lub wyrobów gotowych,
 - rodzaj materiału: wszystkie gatunki stali, metale nieżelazne, stopy metali,
 - wymiary wlewków: płaskie maks. 60 × 250 × 1000 mm lub kwadratowe maks. 160 × 160 × 1000 mm,
- rodzaje symulowanych procesów:
 - walcowanie blach grubych,
 - walcowanie blach taśmowych (w ograniczonym zakresie),

- walcowanie prętów (w określonym zakresie wymiarowym),
- regulowane chłodzenie po walcowaniu,
- wymiary wyrobów gotowych:
 - blachy grube: grubość min. 6 mm, szerokość maks. 500 mm,
 - blachy taśmowe: grubość min. 2 mm, szerokość maks. 250 mm,
 - pręty: kwadrat 60 × 60 mm ÷ 25 × 25 mm.

2.2. PLANOWANY ROZWÓJ MOŻLIWOŚCI BADAWCZYCH B-LPS

Moduł B-LPS według przyjętych założeń służy obecnie do wykonywania symulacji w skali przemysłowej procesów walcowania blach grubych arkuszkowych i walcowania na gorąco blach taśmowych (w ograniczonym zakresie) oraz procesów walcowania prętów kwadratowych w wykrojach skrzynkowych stosowanych w walcowniach półwyrobów i w walcarkach wstępnych. Rozbudowa modułu B-LPS o prowadzenie badań symulacyjnych procesu walcowania prętów okrągłych w skali półprzemysłowej umożliwi rozszerzenie zakresu realizowanych prac badawczych i wdrożeniowych obejmujących zakres opracowywania nowych materiałów metalowych i technologii ich wytwarzania łącznie z weryfikacją fizyczną na potrzeby przemysłu oraz prowadzenie podstawowych badań naukowych ukierunkowanych na poznanie fizycznych mechanizmów powstawania struktury metali i stopów w procesach wytwarzania, w celu optymalizacji właściwości wyrobów. Wykonano prace koncepcyjno-projektowe obejmujące opracowanie metodyki symulacji, kalibrowania wykrojów i walców, założeń odnośnie do osprzętu walcowniczego. Proponowane rozwiązanie polega na walcowaniu wlewka odlanego w module A-LPS na pręty kwadratowe w zakresie 35÷50 mm, które będą wsadem do walcowania prętów okrągłych o średnicach 35, 40, 45 i 50 mm. Walcowanie prętów okrągłych w module B będzie odpowiadało fazie walcowania wykańczającego w walcowniach przemysłowych. Walcowanie pręta okrągłego prowadzone będzie w czterech przepustach w układzie wykrojów owal-okrągły. Układ wykrojów owal-okrągły charakteryzuje się dużą elastycznością w zakresie doboru współczynników wydłużenia w poszczególnych przepustach i małą stratą ciepła walcowanego pasma. Ponadto, ze względu na warunki techniczne i technologiczne modułu B ograniczające liczbę możliwych do zastosowania wykrojów do 4, zastosowanie układu owal-okrągły zapewni wymagany kształt przekroju poprzecznego prętów. Układ wykrojów owal-okrągły jest obecnie najczęściej stosowanym układem kalibrowania przy walcowaniu prętów i walcówki w nowoczesnych walcowniach średnich i małych w blokach walcowniczych wykańczających oraz we wszystkich klatkach walcowniczych oprócz klatek wstępnych. Według przyjętej koncepcji walcowania prętów okrągłych ze wsadu kwadratowego w układzie wykrojów owal-okrągły do pierwszego owalu wchodzi wsad o przekroju kwadratowym. W układzie wykrojów owal-okrągły pasmo jest odkształcane w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Kalibrowanie wykrojów dla układu wykrojów owal-okrągły opracowano według metody B.P. Bachtinowa. W przyjętej metodyce symulacji fizycznej walcowania prętów okrągłych, jednoklatkowa walcarka nawrotna duo będzie wykorzystywana jako klatka wykańczająca.

Wychodząc z takiego założenia kalibrowanie walców opracowano kierując się zasadami stosowanymi w projektowaniu wykrojów przedgotowych i gotowych, dla których współczynniki wydłużenia w poszczególnych wykrojach nie przekraczają wartości 1,4. Kalibrowanie wykroju okrągłego gotowego wykonano na podstawie obliczeń cech geometrycznych przekroju poprzecznego wyrobu z uwzględnieniem współczynnika rozszerzalności cieplnej. Opracowane kalibrowanie obejmuje łącznie cztery wykroje, dwa owalne i dwa okrągłe. Wykroje rozmieszczono w złożeniu walców według kolejności stosowania. Taki sposób rozmieszczenia wykrojów ułatwia prowadzenie pasma i minimalizuje jego krzywienie. Opracowany schemat przepustów i parametry technologiczne procesu walcowania prętów okrągłych obejmuje czas i temperaturę nagrzewania, temperaturę początku i końca walcowania, prędkość liniową walcowania oraz prędkość odkształcenia, pole przekroju wsadu i pasma po każdym przepuszczeniu, współczynnik wydłużenia w przepuszczeniu i siłę nacisku na walce. Wymienione parametry obliczane są z zależności znanych z teorii walcownictwa. Siła nacisku na walce została wyznaczona metodą Zjuzina. Do obliczenia wartości naprężenia uplastyczniającego wykorzystano metodę opracowaną przez Hensla i Spittla. Na podstawie obliczonych wielkości parametrów technologicznych sporządzono tabele przepustów dla walcowania prętów okrągłych o określonej średnicy. Pręty okrągłe o średnicach 35 i 40 mm będą mogły być wykorzystane jako wsady dla symulacji fizycznej procesu ciągnięcia w ciągarce ławowej stanowiącej moduł F1-LPS.

3. WYNIKI WYBRANYCH BADAŃ ILUSTRUJĄCE ZASTOSOWANIA PÓLPRZEMYSŁOWEJ SYMULACJI WALCOWANIA NA GORĄCO I OBRÓBKĘ CIEPLNO-PLASTYCZNĄ W LPS W PROJEKTOWANIU NOWYCH TECHNOLOGII

3.1. OPRACOWANIE NOWEJ STALI TYPU CP O WYSOKICH WŁAŚCIWOŚCIACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Praca jest realizowana dla szwajcarskiego koncernu stalowego [4]. W ramach badań realizowanych w module B-LPS opracowano technologię walcowania prętów

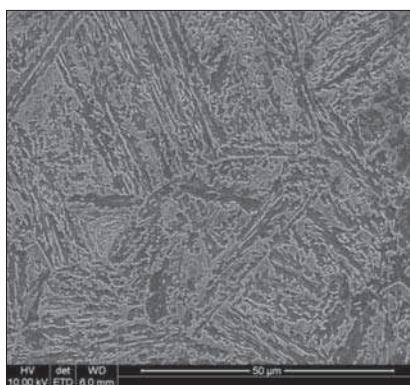


Rys. 1. Hydrauliczny zbijacz zgorzeliny modułu B-LPS
Fig. 1. Hydraulic scale breaker of the B-LPS module

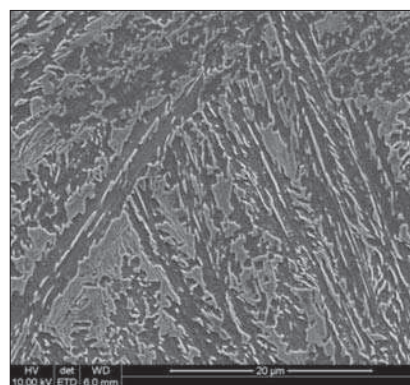


Rys. 2. Walcarka modułu B-LPS ze złożeniem walców z wykrojami skrzyńkowymi
Fig. 2. Rolling mill of the B-LPS module with assembly of box-pass rollers

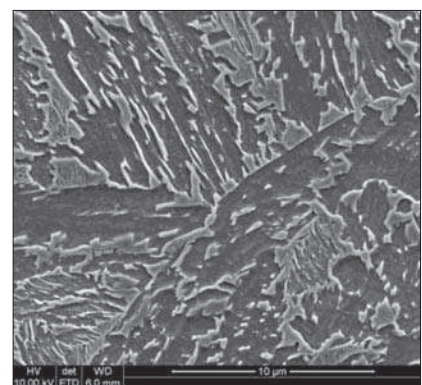
kwadratowych z komercyjnej stali Swiss Steel HSXZ i wykonano fizyczne symulacje walcowania wlewków z wytopów doświadczalnych o masie 70 kg, na pręty o przekroju 35 × 35 mm. Do badań wykorzystano następujące urządzenia modułu B: piec grzewczy, zbijacz zgorzeliny (Rys. 1) i walcarkę ze złożeniem walców z wykrojami skrzyńkowymi (Rys. 2).



1000×



2000×



4000×

Rys. 3. Struktura środka pręta o przekroju 35 × 35 mm, SEM

Fig. 3. Structure in the middle of bar with cross-section of 35 × 35 mm, SEM

Opracowano schemat i parametry procesu walcowania. Wsad w postaci wlewków kwadratowych o masie ok. 70 kg nagrzewano do walcowania do temperatury 1220°C w czasie 60 minut. Walcowanie podzielono na trzy etapy:

- etap I – walcowanie wlewka w 8 przepustach na pręt kwadratowy 60 mm,
- etap II – walcowanie pośrednie pręta □60 mm w 4 przepustach na pręt □45 mm,
- etap III – walcowanie końcowe pręta □45 mm w 2 przepustach na pręt □35 mm.

Temperatura powierzchni prętów po ostatnim przepuście wynosiła 1000÷1050°C. Pręty po walcowaniu poddano badaniom obejmującym metalograficzną ocenę stanu struktury (Rys. 3) i pomiar właściwości mechanicznych (Tab. 1). Opis wyników badań znajduje się w sprawozdaniu z pracy [4].

Tabela 1. Właściwości wytrzymałościowe i udurowość
Table 1. Strength properties and impact strength

$R_{p0,2}$	R_m	Z	A	KV_2 w temp. 20°C
MPa	MPa	%	%	J
705	1172	36	15	21

3.2. TECHNOLOGIA WYTWARZANIA I PRZETWARZANIA WYROBÓW PŁASKICH ZE STALI DP I STALI BAINITYCZNYCH

Badania są realizowane w ramach projektów europejskich [5, 6]. W części badań związanych z wykorzystaniem modułu B opracowano program symulacji i obliczono parametry technologiczne do programu sterującego procesem walcowania w skali półprzemysłowej. Wykonano symulacje półprzemysłowe walcowania na gorąco i regulowanego chłodzenia pasm płaskich oraz wykonano dodatkową obróbkę cieplną części walcowanych płaskowników przeznaczonych do walcowania na zimno. Do badań wykorzystano następujące urządzenia modułu B: piec grzewczy i walcarkę ze złożeniem walców gładkich (Rys. 4), tunel izotermiczny na samotoku za walcarką, chłodnię natryskową i piec termos do obróbki cieplnej.



Rys. 4. Walcowanie pasma płaskiego

Fig. 4. Flat strip rolling

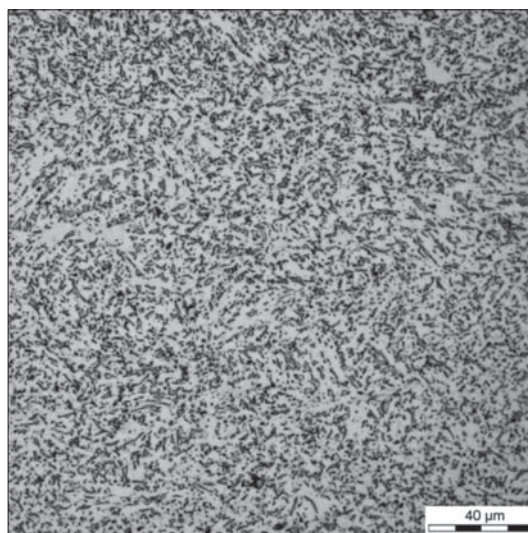
Do wykonywania prób w nawrotnej walcierce modułu B-LPS wykorzystano wyniki badań w symulatorze Gleeble 3800. Opracowano schemat i parametry procesu walcowania. Wsad w postaci wlewków płaskich o przekroju 60 × 150 mm ze stali bainitycznej nagrze-

wano do walcowania do temperatury 1200°C i wytrzymano w czasie 30 minut. Proces walcowania podzielono na dwa etapy:

- I etap – walcowanie wstępne do grubości 7,3 mm,
- II etap – walcowanie końcowe w trzech przepustach do osiągnięcia grubości 4 mm.

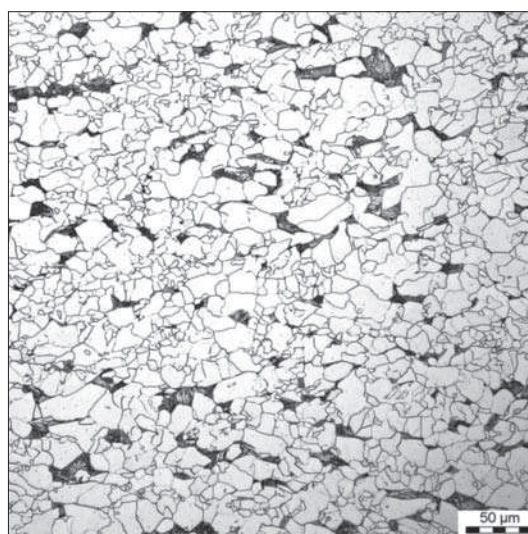
Podział na dwa etapy walcowania był konieczny ze względu na szybki spadek temperatury pasm o grubości końcowej 4 mm. Temperatura powierzchni pasma po ostatnim przepuście wynosiła 870°C. Po ostatnim przepuście, pasmo było chłodzone w spokojnym powietrzu do temperatury 400°C, a następnie umieszczone pod tunelem izotermicznym i wytrzymane przez 30 minut. Po opuszczeniu tunelu pasmo było chłodzone do temperatury otoczenia w swobodnym powietrzu. Uzyskana mikrostruktura pasma była złożona z alotriomorficznego ferrytu i ziarnistego bainitu (Rys. 5). Właściwości mechaniczne były następujące:

$$R_{p0,2} = 487 \text{ MPa}, \quad R_m = 920 \text{ MPa} \quad \text{ i } \quad A_5 = 17\%.$$



Rys. 5. Mikrostruktura pasma o grubości 4 mm ze stali bainitycznej po walcowaniu, mikroskop optyczny

Fig. 5. Microstructure of 4 mm thick bainitic steel strip after rolling, optic microscope



Rys. 6. Mikrostruktura pasma o grubości 4 mm ze stali DP po walcowaniu, mikroskop optyczny

Fig. 6. Microstructure of 4 mm thick DP steel strip after rolling, optic microscope

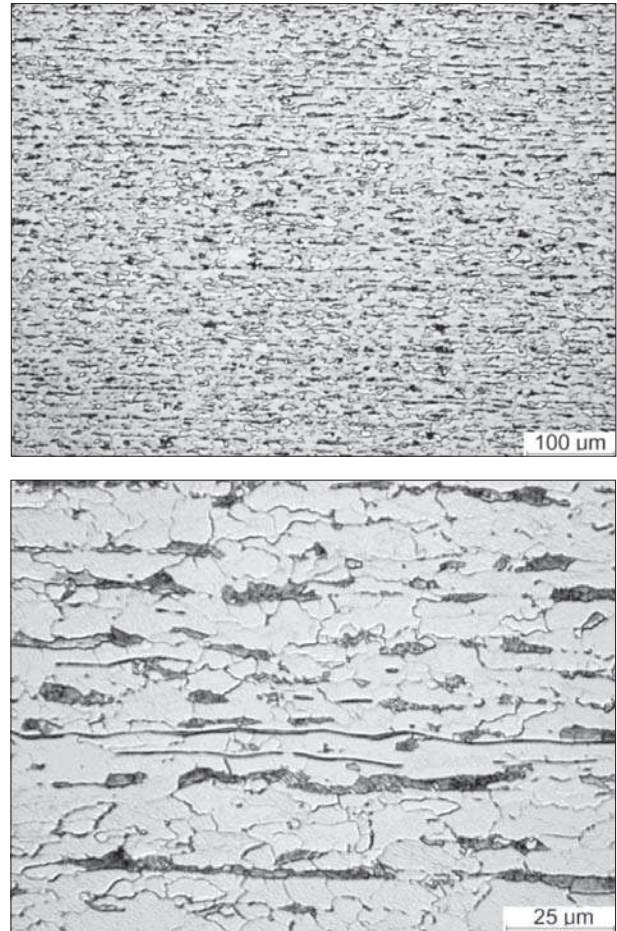
Walcowanie pasm płaskich ze stali DP przebiegało podobnie jak stali bainitycznej, jednak został zmieniony sposób chłodzenia po ostatnim przepuszczeniu. Pasma było chłodzone powietrzem do temperatury 680°C i przetrzymane w tunelu izotermicznym w czasie 10 sekund w tej temperaturze, a następnie chłodzone intensywnym natryskiem wodnym. W tym przypadku uzyskano mikrostrukturę złożoną z ferrytu i wysp martenzytu/bainitu (Rys. 6). Właściwości mechaniczne taśmy są następujące: $R_{p0,2} = 408$ MPa, $R_m = 632$ MPa, i $A_5 = 16,8\%$. Pełny opis wyników badań znajduje się w sprawozdaniach [5, 6].

3.3. TECHNOLOGIA WALCOWANIA BLACH Z OBRÓBKĄ CIEPLNO-PLASTYCZNĄ

Badania były wykonane w ramach pracy zleconej przez Politechnikę Gdańską [7]. Opracowano technologię walcowania na gorąco umożliwiającą uzyskanie wymaganej pasmowości mikrostruktury, powodującej anizotropię właściwości mechanicznych blach i wykonano partię blach o grubości 8 i 6 mm ze stali S235JR i S460ML. Opracowana technologia nagrzewania wsadu, walcowania na gorąco i chłodzenia po walcowaniu w module B-LPS, umożliwiła wykonanie próbek materiału o wymaganej pasmowości mikrostruktury z odkształconymi ziarnami ferrytu. Do badań wykorzystano następujące urządzenia modułu B-LPS: piec grzewczy, walcarkę i skrzynię z kruszywem izolacyjnym do spowolnionego chłodzenia. Wsadem były odcinki blach przemysłowych o wymiarach 12 × 250 × 1000 mm. Temperatura nagrzewania obu gatunków stali dobrana została na podstawie właściwości plastycznych z uwzględnieniem składu chemicznego, właściwości w zakresie temperatury przeróbki plastycznej i wymagań odnośnie do właściwości wyrobu końcowego. Parametry procesu walcowania na gorąco opracowano zakładając, że wielkość zadawanego gniotu jest uwarunkowana kątem chwytu i dopuszczalną siłą nacisku pasma na walce oraz momentem walcowania. Podstawą określenia siły nacisku w czasie walcowania jest wyznaczenie średniego nacisku jednostkowego. W wyniku przeprowadzonych analiz uznano, że do wyznaczenia średniego nacisku jednostkowego, jaki wywiera pasmo na walce w warunkach jednokłatkowej walcarki nawrotnej modułu B-LPS, najlepsze rezultaty daje metoda Zjuzina, którą zastosowano do obliczeń. Zastosowanie odpowiedniej funkcji opisującej naprężenie uplastyczniające ma podstawowe znaczenie dla optymalnego zaprojektowania intensywności gniotów w procesie walcowania. Do obliczenia wartości naprężenia uplastyczniającego posłużono się metodą opracowaną przez Hensla i Spittla. Obliczone parametry walcowania stanowiły podstawę do opracowania programu sterującego urządzeniami modułu B-LPS. Do prób walcowania użyto walców gładkich o średnicy 550 mm w układzie duo. Walcowanie prowadzono według opracowanych schematów i parametrów technologicznych, z zastosowaniem obróbki cieplno-plastycznej. Temperatura końca walcowania mieściła się w przedziale 680±650°C. Po zakończeniu walcowania wyroby chłodzono w powietrzu, a podczas walcowania doświadczalnego również w skrzyni wypełnionej kruszywem izolacyjnym. W czasie walcowania mierzono i rejestrowano wartości parametrów procesu m.in. zmian temperatury, parametrów siłowo-energetycznych i czasów

walcowania oraz przerw. Temperatura pasma w czasie walcowania odcinków blach na płaskowniki o grubości 8 i 6 mm mieściła się pomiędzy ok. 940°C a ok. 650°C w przepuszczeniu końcowym. Siła nacisku na walce w kolejnych przepustach mieściła się w przedziale od ok. 0,4 do ok. 1,9 MN. Wyniki pomiarów momentów walcowniczych potwierdziły prawidłowy, przebieg procesu walcowania w poszczególnych przepustach.

Mikrostruktura blachy eksperymentalnej ze stali S235JR jest kilkakrotnie bardziej drobnoziarnista w porównaniu z blachą w stanie wyjściowym i jest pasmowa z silnie odkształconymi wtrąceniami siarczkowymi MnS i ziarnami ferrytu (Rys. 7).



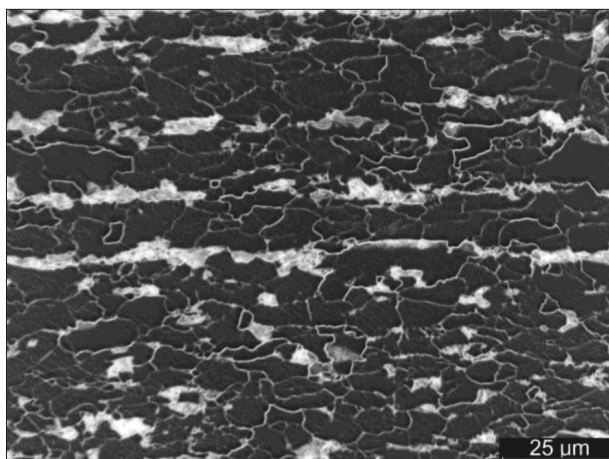
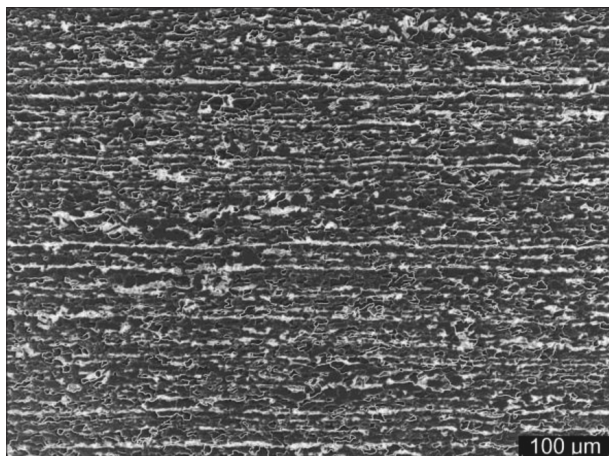
Rys. 7. Mikrostruktura blachy eksperymentalnej o grubości 5,5 mm ze stali S235JR walcowanej w LPS, chłodzenie w powietrzu. Zgląd wzdłużny trawiony nital, mikroskop optyczny

Fig. 7. Microstructure of 5.5 mm thick experimental S235JR steel sheet rolled in LPS, air-cooling. Nital etched longitudinal microsection, optic microscope

Twardość blachy eksperymentalnej o grubości 5,5 mm ze stali S235JR zmierzona w ¼ grubości wynosi 162 HV i jest znacznie wyższa niż blachy o grubości 12 mm w stanie wyjściowym (129 HV), co świadczy, że materiał blach podczas walcowania przy obniżonej temperaturze umacnia się przez zgniot, natomiast bezpośrednie chłodzenie po walcowaniu w powietrzu ujawnia strukturę pasmową.

Mikrografie optyczne struktury blachy o grubości 7,8 mm ze stali S460ML walcowanej eksperymentalnie w warunkach LPS dla uzyskania maksymalnej twardości przedstawiono na rysunku 8. Uzyskano silnie rozdrobnione ziarna ferrytu i odkształconą mikro-

strukturę pasmową ferrytyczno-perlityczną. Twardość blachy eksperymentalnej o grubości 7,8 mm ze stali S460ML w odległości 1/4 grubości wynosi 192 HV. Pełny opis wyników badań znajduje się w sprawozdaniu z pracy [7].



Rys. 8. Mikrostruktura blachy o grubości 7,8 mm ze stali S460 walcowanej w LPS, chłodzenie w powietrzu. Zgląd wzdłużny trawiony nitalem, mikroskop optyczny

Fig. 8. Microstructure of 7.8 mm thick S460 steel sheet rolled in LPS, air-cooling. Nital etched longitudinal micro-section, optic microscope

3.4. OPACOWANIE TECHNOLOGII WYTWARZANIA ULTRAWYTRZYMAŁEJ STALI KONSTRUKCYJNEJ O TRÓJFAZOWEJ STRUKTURZE NANOKOMPOZYTOWEJ O ZWIĘKSZONEJ ODPORNOŚCI NA PĘKANIE

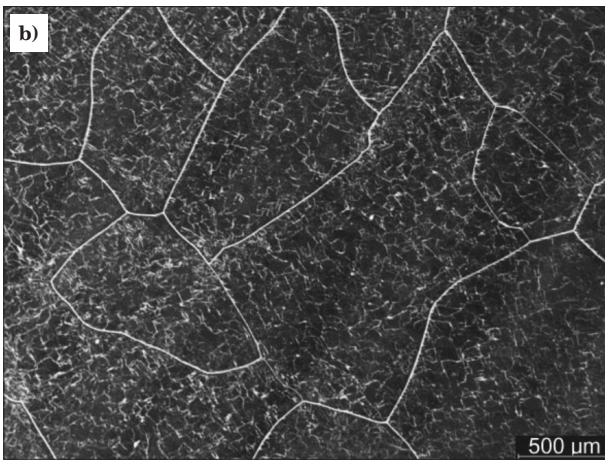
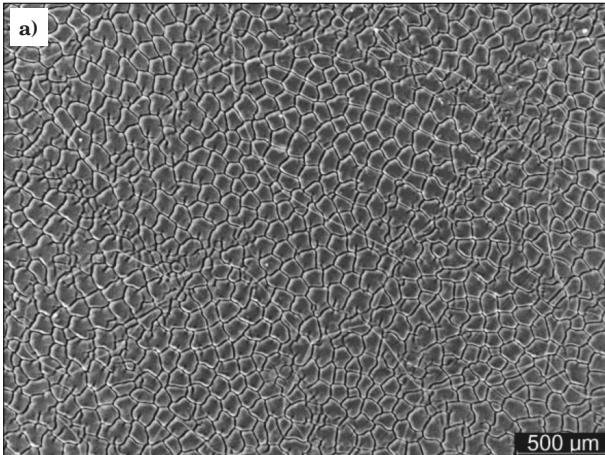
Badania były realizowane w ramach projektów [8–10]. Do badań wykorzystano następujące urządzenia modułu B-LPS: piec grzewczy, zbijacz zgorzeliny, walcarkę, tunele izotermiczne, chłodnię natryskową i piec termos do obróbki cieplnej. W pracy [8] za pomocą modułu B-LPS wykonano symulacje fizyczne obróbki cieplnej nazwanej standardową obróbką cieplną (SHT). SHT polega na chłodzeniu z temperatury austenitowania w powietrzu lub w sposób przyspieszony do założonej temperatury przemiany izotermicznej T_i ($T_i = M_S + 30^\circ\text{C}$) i wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 50÷100 godzin (wartości tych parametrów zależą od składu chemicznego konkretnego wytopu i od wymaganych właściwości finalnych wyrobu). Badania te dopro-

wadziły do osiągnięcia udarności KV do 8 J w temperaturze minus 40°C i do 15 J w temperaturze otoczenia, przy następujących pozostałych właściwościach mechanicznych: wytrzymałość powyżej 1,8 GPa, granica plastyczności powyżej 1,3 GPa, wydłużenie całkowite w statycznej próbie rozciągania w przedziale wartości 12÷20%, twardość w przedziale 550÷650 HV 10. Wynikiem pracy [8] jest określenie i ustalenie parametrów obróbki cieplnej prowadzących do wytworzenia zmodyfikowanej struktury stali NANOS-BA[®], zapewniającej jej wyższą udarność. W projekcie [9] za pomocą modułu B-LPS metodą walcowania według opracowanej technologii wykonano blachy na elementy pancerzy i konstrukcji przestrzennych oraz próbki do badań balistycznych. Niektóre z tych elementów poddano obróbce cieplnej w warunkach przemysłowych. Głównym celem wykorzystania LPS było przygotowanie kolejnych partii elementów do konstrukcji paneli ochronnych. Materiał miał postać płyt o różnych grubościach w zakresie od 5 mm do 12 mm, które wycięto z blach wytworzonych w warunkach półprzemysłowych w LPS. W ramach projektu [10] w module B-LPS wytworzono płaskowniki o szerokości 250 i 350 mm i grubości od 3 do 12 mm ze stali NANOS-BA[®] według opracowanej technologii. Z wytworzonych płaskowników wykonano próbki do badań wytrzymałościowych, mikrostruktury, udarności i do pomiarów twardości oraz do badań balistycznych.

3.5. OPACOWANIE TECHNOLOGII WALCOWANIA NA GORĄCO EKSPERYMENTALNEGO STOPU Ni-Cr

W ramach prac badawczych [11, 12] opracowano technologię walcowania i wytworzono płaskowniki ze stopów Ni80Cr20 i Ni90Cr10 stanowiące katody do przeprowadzenia prób napyłania szkła metodą magnetrionową. Do badań wykorzystano następujące urządzenia modułu B-LPS: piec grzewczy, walcarkę i chłodnię na samotoku.

Wyniki badań makrostruktury i mikrostruktury stopów Ni-Cr w stanie po odlewaniu pokazały, że w zależności od rodzaju wlewka krzepną one dendrytycznie lub komórkowo. Wlewki masywne o przekroju kwadratowym krzepną przez wzrost dendrytycznych kryształów kolumnowych obejmujących cały przekrój wlewka, natomiast wlewki płaskie krzepną poprzez wzrost kryształów komórkowych wydłużonych w strefie przypowierzchniowej i pośredniej oraz równoosiowych w strefie środkowej. Wlewki płaskie nie wykazują segregacji dendrytycznej, jednak na granicach komórek segreguje podczas krzepnięcia chrom, co może być przyczyną pęknięcia międzykrystalicznego podczas walcowania. W obydwu przypadkach wlewki były homogenizowane przed walcowaniem w temperaturze $1100\div 1150^\circ\text{C}$, w celu ujednorodnienia mikrostruktury. Mikrografie mikrostruktury wlewka po odlaniu i po homogenizacji przedstawiono na rysunku 9. Z porównania z mikrostrukturą przed homogenizacją wynika, że na skutek wygrzewania w temperaturze 1150°C w ciągu 24 godzin następuje rozrost ziarna osnowy stopu i częściowe ujednorodnienie segregacji Cr na granicach komórek krzepnięcia. Granice komórek są nieregularne, przerywane i/lub zanikające (Rys. 9). Wyższe temperatury są niewskazane, gdyż podczas homogenizacji następuje silny rozrost ziarn.



Rys. 9. Mikrostruktura wlewka ze stopu Ni90Cr10 w strefie kryształów równoosiowych: a) po odlaniu, b) po homogenizacji w temperaturze 1150° C/24 h/powietrze, mikroskop optyczny

Fig. 9. Microstructure of Ni90Cr10 alloy ingot within the area of equiaxed crystals: a) after rolling, b) after homogenising treatment at 1150°C/24 h/air, optic microscope

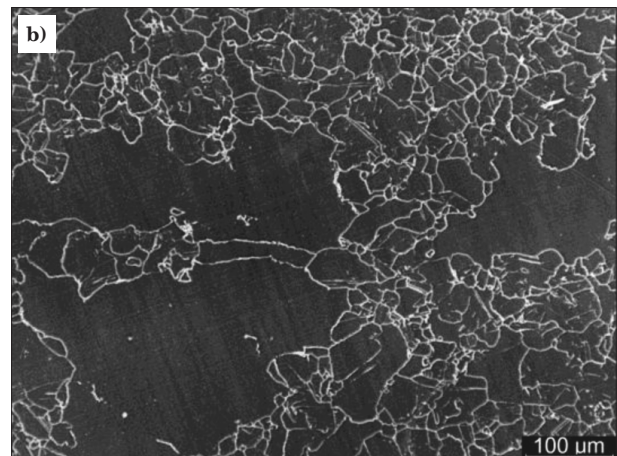
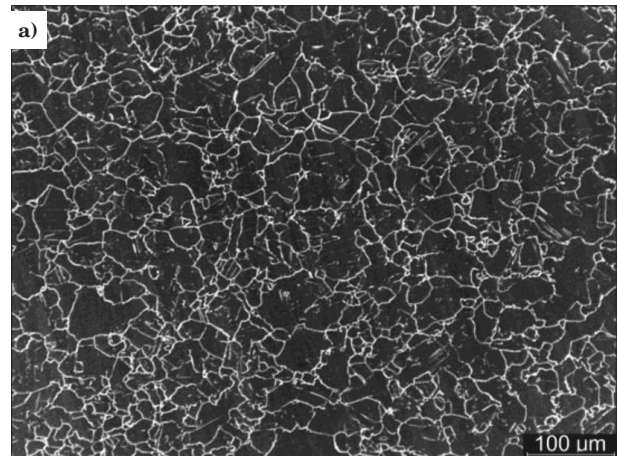
Przy opracowywaniu parametrów nagrzewania, walcowania i chłodzenia po walcowaniu wytworzonych stopów Ni-Cr o zawartości 10 i 20% mas. Cr brano pod uwagę wartość temperatury topnienia i przewodnictwo cieplne, które dla tych stopów jest stosunkowo małe. Ponieważ naprężenia cieplne przy nagrzewaniu lub chłodzeniu są z reguły odwrotnie proporcjonalne do przewodnictwa cieplnego, stopy Ni-Cr mogą być wrażliwe na naprężenia cieplne. Temperatura nagrzewania wlewków nie przekraczała 1250°C, a proces walcowania przeprowadzony był małymi gniotami z ewentualnym dogrzewaniem międzyoperacyjnym. Ustalono następujące parametry nagrzewania, walcowania i chłodzenia stopów Ni-Cr:

- temperatura nagrzewania do walcowania: 1250°C/60 min,
- chłodzenie w spokojnym powietrzu.

W wyniku dużej plastyczności tych stopów rozpoczęcie walcowania w wyższej temperaturze powoduje nawijanie i przyklejanie się materiału do walców. Stopy Ni-Cr na skutek słabej przewodności cieplnej są wrażliwe na naprężenia cieplne i powstający podczas walcowania gradient temperatury jest przyczyną przechłodzenia krawędzi i powstawania na nich drobnych

pęknięć poprzecznych, które w miarę spadku temperatury powiększają się. Zatem proces walcowania prowadzono dwuetapowo z międzyoperacyjnym dogrzewaniem. Schemat walcowania przedstawiono w postaci tablicy (Tab. 2). Występujące na krawędziach blach pęknięcia poprzeczne nie są głębokie i po walcowaniu można je usunąć przez oszlifowanie. Międzyoperacyjne dogrzewanie zapobiega powstawaniu nadmiernych pęknięć na krawędziach blach, jednak jak pokazały badania mikrostruktury zbyt wysoka temperatura końca walcowania prowadzi do nadmiernego rozrostu ziarna w wyniku zachodzącej rekrytalizacji wtórnej.

Walcowane wyroby miały mikrostrukturę składającą się z równoosiowych ziarn roztworu stałego (na zglądzie wzdłużnym ziarna są lekko wydłużone) o wielkości 10÷30 μm. Lokalnie występują obszary o silnie rozrośniętych ziarnach, co jest wynikiem zapoczątkowanej rekrytalizacji wtórnej (Rys. 10) powodującej nierównomierność rozrostu ziarn na przekroju płaskownika. Uzyskanie wyrobu o równomiernej wielkości ziarna jest warunkowane dotrzymywaniem wymaganej temperatury końca walcowania oraz chłodzenia po walcowaniu.



Rys. 10. Mikrostruktura blachy o grubości 12 mm ze stopu Ni-Cr walcowanej z wlewka płaskiego nr S 363, zgląd poprzeczny, mikroskop optyczny: a) równoosiowe ziarna roztworu stałego, b) lokalne obszary o silnie rozrośniętych ziarnach

Fig. 10. Microstructure of 12 mm thick Ni-Cr alloy sheet rolled from slab ingot no. S 363, transverse microsection, optic microscope: a) equiaxed solid solution grains, b) local areas with strongly grown grains

Tabela 2. Schemat walcowania wlewka kwadratowego 125 na płaskownik o grubości 12 mm

Table 2. Diagram of rolling square ingot 125 into flat bar of 12 mm in thickness

Przepust	Grubość po przepuszczeniu	Gniot	Wydłużenie	Prędkość walcowania	Długość pasma	Czas walcowania
	mm	%		m/s	m	s
Etap I						
wsad	125,00				0,370	
1	106,00	15,2	1,12	0,1	0,4	8,3
2	90,00	15,1	1,13	0,1	0,5	4,7
3	76,00	15,6	1,15	0,1	0,5	5,4
4	64,00	15,8	1,15	0,1	0,6	6,2
5	54,00	15,6	1,16	0,1	0,7	7,2
6	46,00	14,8	1,15	0,2	0,8	4,1
7	40,00	13,0	1,17	0,2	0,8	4,7
Etap II						
wsad	41,50				0,940	
1	32,00	22,9	1,27	0,1	1,2	23,9
2	25,00	21,9	1,26	0,1	1,5	15,0
3	19,50	22,0	1,27	0,1	1,9	19,1
4	15,20	22,1	1,27	0,1	2,4	24,3
5	12,00	21,1	1,26	0,1	3,1	30,6

4. PODSUMOWANIE

Linia do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania wyrobów z metali i stopów (LPS) umożliwia prowadzenie kompleksowych badań począwszy od opracowania nowego materiału, kończąc na opracowaniu technologii wytwarzania wyrobów przeznaczonej do wdrożenia w warunkach przemysłowych. LPS zwiększa w istotny sposób możliwości i kompleksowość badań eksperymentalnych prowadzonych w IMŻ oraz umożliwia rozszerzenie współpracy z innymi ośrodkami badawczymi i przemysłowymi. Charakterystyka techniczna i możliwości badawcze urządzeń będących obecnie na wyposażeniu IMŻ pokazują, że baza eksperymentalna rozwijana jest w kierunkach przewidywanych potrzeb krajowego i europejskiego przemysłu stalowego. Możliwości badawcze IMŻ w zakresie półprzemysłowej symulacji obejmują obecnie procesy: projektowania składów chemicznych i wytapiania stali i stopów, rafinacji ciekłej stali i stopów, odlewania oraz regulowanego walcowania i regulowanego chłodzenia po walcowaniu wyrobów płaskich i prętów, a także ciągnięcia prętów, rur i kształtowników. Rozwój LPS w latach 2014–2015 obejmuje:

- opracowanie metodyki symulacji fizycznej walcowania prętów okrągłych o średnicach od 35 do 50 mm w module B,
- możliwość symulacji fizycznej procesu ciągnięcia w cięgarni ławowej stanowiącej moduł F1-LPS, dla którego wsadem mogą być pręty okrągłe o średnicach 35 i 40 mm pochodzące z modułu B.

Nowe możliwości badań symulacyjnych procesu walcowania prętów okrągłych i ciągnięcia ułatwią rozszerzenie współpracy z ośrodkami badawczymi i partnerami przemysłowymi zagranicznymi oraz krajowymi.

Wykorzystanie metody półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplno-plastycznej zilustrowano przykładami najważniejszych wyników

prac zrealizowanych z istotnym udziałem badań wykonanych za pomocą urządzeń modułu B-LPS w okresie 2012–2014. Pełny opis wyników badań znajduje się w sprawozdaniach z tych prac [4–12]. Program badawczy zrealizowany z zastosowaniem modułu B-LPS obejmował prace badawcze i rozwojowe wykonywane przez Instytut Metalurgii Żelaza i prace realizowane na zlecenie lub we współpracy z innymi jednostkami badawczymi i z przedsiębiorcami, z zakresu następującej tematyki:

- wytwarzanie i przetwarzanie blach grubych o wysokiej wytrzymałości,
- technologia wytwarzania i przetwarzania wyrobów z nowych gatunków stali i stopów do zastosowań specjalnych:
 - na elementy konstrukcyjne do budowy maszyn do zastosowań w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych charakteryzujących się wysoką temperaturą, dynamicznie i udarowo zmiennymi obciążeniami oraz agresywnym środowiskiem korozyjno-kawitacyjnym,
 - na katody służące do uszlachetniania powierzchni szkła przez rozpylenie na niej cienkiej warstwy różnych metali i ich związków metodą magnetronową,
- doskonalenie technologii cieplno-plastycznego kształtowania wyrobów stalowych,
- rozwój technologii wytwarzania wyrobów metalowych o ultradrobnoziarnistej strukturze,
- przeróbka cieplnoplastyczna wyrobów o bardzo wysokiej wytrzymałości.

Planowane jest wykorzystanie modułu B-LPS w badaniach zużycia materiału walców w przygotowywanym projekcie europejskim w ramach programu RFCS i w przygotowywanym projekcie badawczym finansowanym przez NCBR, którego celem będzie zbudowanie na bazie opracowanych modeli, programu komputerowego

funkcjonującego w trybie „off-line” wspomagającego pracę technologa przy projektowaniu parametrów walcowania na gorąco taśm ze specjalnych gatunków stali i stopów metali. Metodyka planowanych badań jest rozwijana i będzie innowacyjna w zakresie fizycznych

symulacji w skali półprzemysłowej. Ponadto, moduł B-LPS jest używany w bieżących pracach badawczych o charakterze poznawczym, realizowanych w Instytucie Metalurgii Żelaza, umożliwiające rozwój młodych pracowników naukowych.

LITERATURA

1. Woźniak D., Garbarz B.: Linia do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania stopów metali i wyrobów metalowych. *Prace IMŻ* 1/2010, t.60, s. 61-67
2. Woźniak D., Garbarz B., Kuziak R., Bulkowski L.: Metody symulacji fizycznej i numerycznej procesów hutniczych rozwijane w Instytucie Metalurgii Żelaza. *Prace IMŻ*, t. 58, nr 2, rok 2006, s.1-10
3. Woźniak D., Garbarz B., Paduch J. i in.: Opracowanie wstępnej koncepcji rozwoju półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania półwyrobów i wyrobów stalowych. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t.57, nr 3, 2005, s. 30-33
4. Development of new high-strength complex-phases steel. Production process simulations of bainitic steels. Part I i II. Report from research work No. B0-1393 -02. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013 i 2013
5. Property oriented design of hard constituent hardness and morphology in continuously annealed / galvanized DP sheets. Production and hot rolling of experimental heats. Part III. Report from research work No. PE-0007-01. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2014
6. Virtual strip rolling mill. Advanced materials selection, production and modeling. Part II. Report from research work No. PE-0008-01. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2014
7. Opracowanie założeń do technologii walcowania z obróbką cieplno-plastyczną blach ze stali S235JR i S460ML i wykonanie partii próbnej w warunkach półprzemysłowych. Sprawozdanie z pracy badawczej nr B0-1400. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013
8. Opracowanie podstaw technologii obróbki cieplnej ultrawytrzymałej stali konstrukcyjnej w celu wytworzenia trójfazowej struktury nanokompozytowej o zwiększonej odporności na pękanie w stosunku do poziomu osiąganego obecnie. Sprawozdanie z pracy badawczej nr S0-0835. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013
9. Technologie wytwarzania supertwardych materiałów nanostrukturalnych ze stopów żelaza oraz ich zastosowanie w pancierzach pasywnych i pasywno-reaktywnych”, zadanie 10.2 pt.: Wykonanie elementów panczerzy z nowych gatunków stali według zweryfikowanej technologii. Cz. 2. Sprawozdanie z pracy badawczej nr PS-0001-10-2-cz.2. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013
10. Opracowanie nowoczesnej konstrukcji modułu pancierza odpornego na udarowe oddziaływanie strumienia kumulacyjnego i pocisków, zadanie 2 pt.: Opracowanie charakterystyk materiałowych nowych gatunków stali i zbadanie odporności wykonanych z nich blach na wielokrotne udary. Cz. 2. Sprawozdanie z pracy badawczej nr PI-0003-02. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013
11. Opracowanie technologii walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej eksperymentalnej stali austenitycznej i stopu Ni-Cr z zastosowaniem metody symulacji półprzemysłowej. Sprawozdanie z pracy badawczej nr S0-0861. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013
12. Opracowanie technologii wytwarzania katod do nanoszenia warstw metodą rozpylania magnetronowego na wielkoformatowe powierzchnie. Sprawozdanie z pracy badawczej nr S0-0846. Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, 2013