

Bogdan GARBARZ

Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica

PLANOWANE CELE I OSIĄGNIĘTE WYNIKI PROJEKTU: „OPRACOWANIE PODSTAW PRZEMYSŁOWYCH TECHNOLOGII KSZTAŁTOWANIA STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI WYROBÓW Z METALI I STOPÓW Z WYKORZYSTANIEM SYMULACJI FIZYCZNEJ I NUMERYCZNEJ”

Artykuł zawiera główne wyniki projektu badawczego rozwojowego 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” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, wykonanego przez Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą (Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej), Politechnikę Częstochowską (Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej), Politechnikę Śląską (Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii) i Politechnikę Warszawską (Wydział Inżynierii Materiałowej). Zasadniczym celem projektu było unowocześnienie, rozwinięcie i dostosowanie do aktualnych potrzeb metod symulacji numerycznej, fizycznej laboratoryjnej i fizycznej półprzemysłowej, mających zastosowanie do projektowania wymaganej mikrostruktury i właściwości wyrobów z metali i stopów oraz wykorzystanie tych metod do opracowania podstaw przemysłowych technologii wytwarzania wyrobów walcowanych z nowych gatunków stali. W wyniku realizacji projektu opracowano modele numeryczne przeznaczone do symulacji procesów fizycznych i operacji technologicznych dotyczących wytwarzania i przetwarzania półwyrobów i wyrobów ze stali i stopów metali, rozwinięto metody modelowania fizycznego obróbki cieplnoplastycznej stali i stopów żelaza w warunkach laboratoryjnych i półprzemysłowych oraz opracowano podstawy przemysłowych technologii wytwarzania wyrobów stalowych z następujących nowych grup gatunkowych stali: niestopowej ultradrobnoziarnistej, wielofazowej oraz ultrawytrzymałej nanokompozytowej bainityczno-austenitycznej.

Słowa kluczowe: symulacja fizyczna i numeryczna, wyroby z metali i stopów

PLANNED OBJECTIVES AND ATTAINED RESULTS OF THE PROJECT: ”DEVELOPMENT OF BASIC KNOWLEDGE FOR INDUSTRIAL TECHNOLOGIES OF METAL AND ALLOY PRODUCTS MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES FORMATION USING NUMERICAL AND PHYSICAL SIMULATION METHODS”

The paper contains the essential results of research and development project no N R07 0008 04 entitled ”Development of basic knowledge for industrial technologies of microstructure and properties formation of metal and alloy products with the use of numerical and physical simulation” financed by the National Centre for Research and Development of Poland (NCBiR) and carried out by the Institute for Ferrous Metallurgy in Gliwice (coordinator), AGH University of Science and Technology – Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, Czestochowa University of Technology – Faculty of Materials Processing Technology and Applied Physics, Silesian University of Technology – Faculty of Materials Engineering and Metallurgy and Warsaw University of Technology – Faculty of Materials Engineering. The main aims of the project were to update and develop numerical and physical simulation methods at laboratory and semi-industrial scale and adapt them to current requirements of application to designing requested microstructure and properties of metal and alloy products. The simulation methods were used to develop basic technological parameters of industrial processes of manufacturing of rolled products from new steel grades. As the result of the accomplished project numerical models concerning manufacturing and processing of semi-products and products from steel and alloys have been worked out, laboratory and semi-industrial scale physical modelling of thermo-mechanical processing of steel and iron alloys have been developed and basic parameters of industrial technologies for manufacturing products from new steel grades: unalloyed ultra-fine-grained, multi-phase and nano-composite bainite-austenite, have been prepared.

Key words: physical and numerical simulation, metal and alloy products

1. CEL I IDEA PROJEKTU

Projekt badawczy rozwojowy 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” finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, zrealizowano w okresie 01.06.2008 – 31.05.2011 przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator i główny wykonawca), Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Akademii Górniczo-Hutniczej, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej i Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Głównym celem projektu było unowocześnienie, rozwinięcie i dostosowanie do aktualnych potrzeb metod symulacji numerycznej, fizycznej laboratoryjnej i fizycznej półprzemysłowej, mających zastosowanie do kształtowania mikrostruktury i właściwości wyrobów z metali i stopów oraz wykorzystanie tych metod do opracowania podstaw przemysłowych technologii wytwarzania wyrobów walcowanych z nowych gatunków stali. Realizacja projektu uzyskała rekomendację Komitetu Sterującego Polskiej Platformy Technologicznej Stali (PPTS), która działa w obszarze: wytwarzanie, przetwórstwo i rozwój zastosowań wyrobów stalowych oraz CZMT CAMAT, wiodącego uczestnika Polskiej Platformy Technologicznej Zaawansowanych Materiałów. Polska Platforma Technologiczna Stali realizuje Strategiczny Program Badań przygotowany w oparciu o wizję rozwoju polskiego przemysłu stalowego do

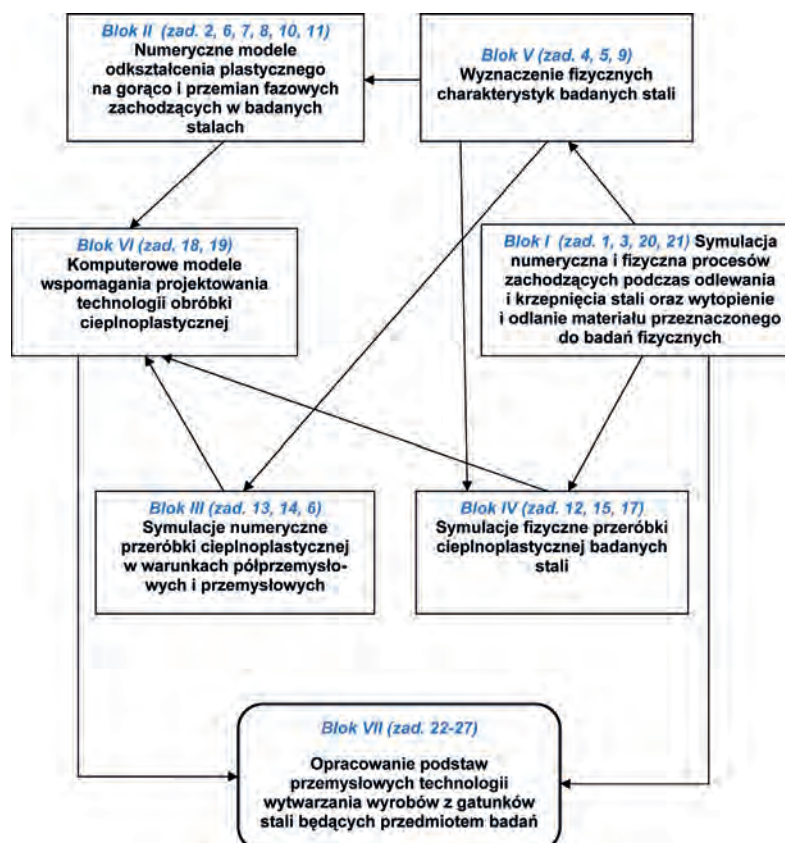
roku 2030, w którego tematykę wpisuje się niniejszy projekt.

Wytypowanymi do badań materiałami były następujące gatunki stali znajdujące się w różnych fazach rozwoju: stal superdrobnoziarnista konstrukcyjna – na etapie prób przemysłowych (materiał oznaczony w projekcie symbolem A), stal konstrukcyjna o strukturze wielofazowej – w początkowej fazie zastosowań przemysłowych (materiał oznaczony w projekcie symbolem B) oraz supertwarda wysokowęglowa stal bainityczna – na etapie badań i prób wdrożeniowych (materiał oznaczony w projekcie symbolem C). Rozwój wymienionych nowoczesnych klas stali wytypowano jako priorytetowy kierunek badań w wyniku realizacji bloku tematycznego dotyczącego stopów żelaza w ramach projektu „Foresight Materiałowy – Foremat” (projekt nr WKP 1/1.4.5/2/2006/26/604 pt.: *Scenariusze rozwoju technologii nowoczesnych materiałów metalicznych, ceramicznych i kompozytowych*).

W artykule zamieszczono przykładowe reprezentatywne wyniki i główne wnioski uzyskane w poszczególnych zadaniach projektu. Pełne rezultaty badań zawarte są w sprawozdaniach, których dane bibliograficzne zestawiono w rozdziale Literatura.

2. STRUKTURA TEMATYCZNA PROJEKTU ORAZ METODYKA I ORGANIZACJA BADAŃ

Badania realizowano w formie 27 zadań pogrupowanych w 7 bloków tematycznych (I–VII), wyszczegół-



Rys. 1. Struktura tematyczna projektu

Fig. 1. Subject structure of the project

Tablica 1. Zestawienie zadań badawczych

Table 1. A list of research tasks

Nr zad.	Tytuł zadania
1.	Opracowanie numerycznego modelu wlewka ciągłego dla wybranych gatunków stali: konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej wielofazowej i wysokowęglowej bainitycznej
2.	Opracowanie numerycznego modelu przebiegu zjawisk zamykania i spajania nieciągłości materiałowych w procesach walcowania blach i prętów
3.	Zbadanie wpływu geometrii wlewnic na strukturę wewnętrzną wlewka i na lokalizację jamy skurczowej
4.	Badania przemian fazowych podczas różnych wariantów chłodzenia oraz opracowanie wykresów przemian fazowych CTPc i CTPi dla eksperymentalnych gatunków stali: konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej wielofazowej i wysokowęglowej bainitycznej
5.	Wyznaczenie charakterystyk technologicznej plastyczności dla wybranych eksperymentalnych gatunków stali: konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej wielofazowej i wysokowęglowej bainitycznej
6.	Opracowanie numerycznego modelu stanu odkształceń i naprężeń podczas odkształcania w walcarkach wchodzących w skład linii do półprzemysłowej symulacji walcowania
7.	Opracowanie numerycznego modelu rozkładu wielkości ziarna w materiale odkształcanym w walcarkach wchodzących w skład linii do półprzemysłowej symulacji walcowania
8.	Weryfikacja numerycznych modeli stanu odkształceń i naprężeń oraz rozkładu wielkości ziarna w materiale odkształconym w walcarkach wchodzących w skład linii do półprzemysłowej symulacji walcowania w oparciu o wyniki prób
9.	Opracowanie bazy danych do symulacji numerycznej procesu walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej na podstawie wyników badań plastometrycznych, dylatometrycznych i obliczeń numerycznych
10.	Opracowanie numerycznego modelu zmian mikrostruktury austenitu w procesie walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej
11.	Opracowanie numerycznego modelu przemian fazowych zachodzących w stali konstrukcyjnej wielofazowej
12.	Wykonanie symulacji fizycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800
13.	Wykonanie symulacji numerycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem programów Forge 2D/3D
14.	Opracowanie modelu i wykonanie symulacji numerycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej z zastosowaniem programów Forge 3TM i Simufact.Forming
15.	Wykonanie symulacji fizycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800
16.	Opracowanie modelu i wykonanie symulacji numerycznej walcowania prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej z zastosowaniem programów Forge 3TM i Simufact.Forming
17.	Wykonanie symulacji fizycznej walcowania prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800
18.	Opracowanie komputerowego systemu wspomagania projektowania technologii dla półprzemysłowej symulacji wytwarzania wyrobów z metali i stopów
19.	Identyfikacja warunków brzegowych oraz opracowanie modeli numerycznych wymiany ciepła w procesach walcowania
20.	Opracowanie technologii wytapiania, rafinacji i odlewania w próżniowym piecu indukcyjnym stali wysokowęglowej bainitycznej i stali konstrukcyjnych przeznaczonych na wyroby o strukturze superdrobnoziarnistej oraz wielofazowej
21.	Wykonanie wytopów i odlanie ich w postaci wlewków przeznaczonych na materiał badawczy do symulacji fizycznych w skali laboratoryjnej i w skali półprzemysłowej
22.	Opracowanie zaleceń technologicznych do wykonania półprzemysłowych prób walcowania blach i prętów z wytypowanych gatunków stali
23.	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
24.	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
25.	Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej z zastosowaniem metody półprzemysłowej symulacji
26.	Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem metody półprzemysłowej symulacji
27.	Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach z supertwardej wysokowęglowej stali bainitycznej z zastosowaniem metody półprzemysłowej symulacji

nionych na schemacie na rys. 1. Tytuły zadań podano w tablicy 1.

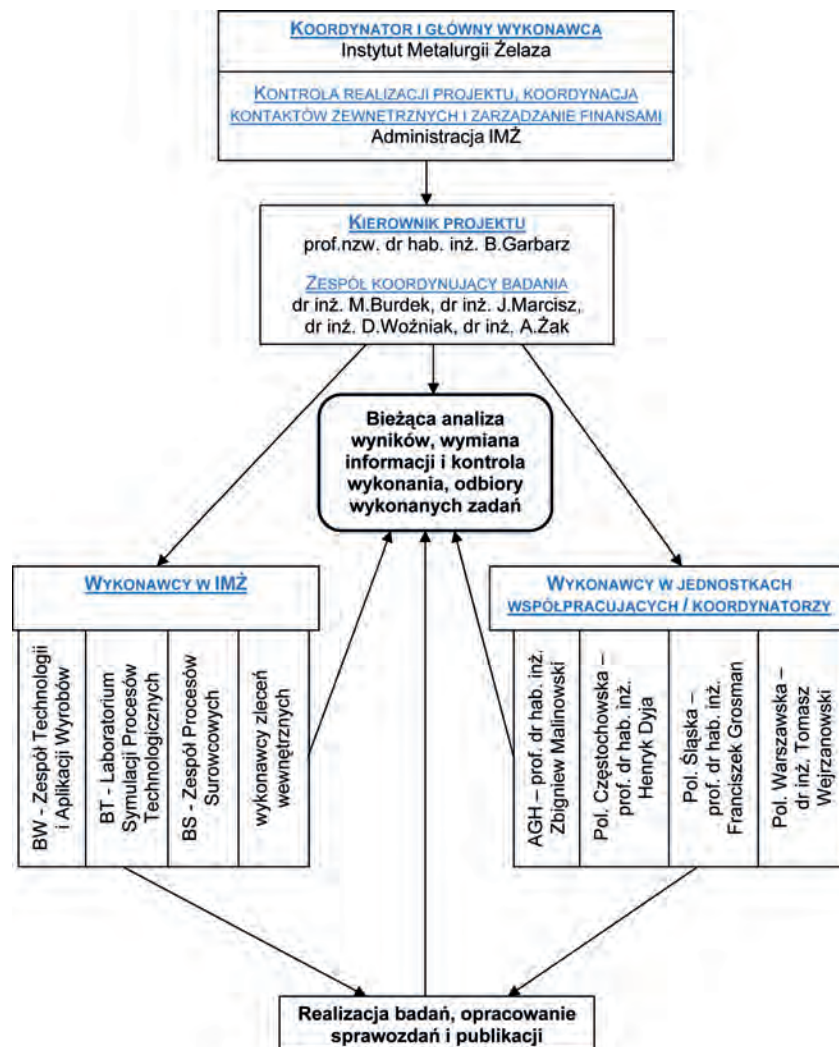
Projekt wykonywano z zastosowaniem trzech głównych rodzajów metod badań: modelowania numerycznego, modelowania fizycznego w skali laboratoryjnej i modelowania fizycznego w skali półprzemysłowej, które scharakteryzowano poniżej.

Modelowanie numeryczne zastosowano do optymalizacji właściwości materiałów przez wykorzystanie zależności pomiędzy mikrostrukturą a parametrami procesów jej kształtowania. Narzędziami do osiągnięcia tego celu są modele teoretyczne i empiryczne do opisu przemian fazowych zachodzących w materiałach podczas ich wytapiania, odlewania, kształtowania cieplnoplastycznego i obróbki cieplnej. W procesie projektowania wyrobów o wymaganych właściwościach użytkowych należy uwzględnić oddziaływanie poszczególnych pierwiastków. Dobór składu chemicznego stopów pod kątem określonych zastosowań wymaga osiągnięcia kompromisu między właściwościami wyrobu, które wzajemnie konkurują, np. między wysoką wytrzymałością a ciągliwością, masą wyrobu a właściwościami użytkowymi.

Symulacja fizyczna w skali laboratoryjnej stanowi pierwszy etap doświadczalnej weryfikacji zależności teoretycznych. Rozwój symulacji fizycznej obejmował

prace metodyczne w zakresie wykorzystania potencjalnych możliwości badawczych nowoczesnej aparatury, takiej jak symulator Gleeble 3800, symulator MAX-Strain, dylatometr odkształceniowy i plastomer skrętny. Metoda symulacji fizycznej stosowana jest zarówno w badaniach podstawowych, jak i coraz częściej w badaniach aplikacyjnych, których celem jest przeniesienie wyników badań laboratoryjnych na obiekt przemysłowy. Zaletą laboratoryjnych symulatorów fizycznych jest możliwość zastosowania niewielkich próbek, które poddawane są kontrolowanym zmianom temperatury z równoczesnym odkształceniem w warunkach zbliżonych do występujących w przemysłowych procesach obróbki cieplnoplastycznej z jednoczesną rejestracją reakcji materiału na zastosowane obciążenia cieplno-mechaniczne.

Jednym z głównych celów projektu było opracowanie podstaw metody **symulacji w skali półprzemysłowej**, w zastosowaniu do procesów wytwarzania metali i stopów oraz półwyrobów i wyrobów walcowanych. Półprzemysłowa skala symulacji oznacza osiągnięcie wartości parametrów procesu zbliżonych do wartości stosowanych w warunkach przemysłowych, na próbkach materiału o znacznie mniejszej masie i z zastosowaniem urządzeń o znacznie niższych kosztach eksploatacji w stosunku do procesów przemysłowych. Wy-



Rys. 2. Schemat organizacji badań i zarządzania realizacją projektu

Fig. 2. Scheme of research organization and project administration

mienione czynniki decydują o niskich kosztach badań symulacyjnych w skali półprzemysłowej w porównaniu z próbami na urządzeniach przemysłowych. Z powodu różnic skali pomiędzy symulacją półprzemysłową a procesem przemysłowym, konieczne jest opracowanie zasad podobieństwa, określających sposób przejścia od wyników symulacji półprzemysłowej do parametrów technologii przemysłowej.

Do badań w zakresie symulacji fizycznej zastosowano trzy klasy nowoczesnych stali, które zostały poniżej krótko scharakteryzowane.

Stal konstrukcyjna superdrobnoziarnista (oznaczona w projekcie symbolem A, a jej odmiany symbolami A1, A2 itd.) o średnicy ziarna 2–4 μm charakteryzuje się bardzo wysoką wytrzymałością w klasie gatunków niestopowych lub niskostopowych i jednocześnie dobrą plastycznością. Uzyskanie takiej struktury w stalach konstrukcyjnych niskowęglowych niestopowych (ewentualnie z mikrododatkami niektórych pierwiastków) metodą obróbki cieplnoplastycznej umożliwia produkcję wyrobów o dobrych właściwościach (o wytrzymałości powyżej 700 MPa) oraz stosunkowo niskich kosztach wytwarzania i znacznej podatności do recyklingu.

Stal konstrukcyjna wielofazowa CP – Complex Phase (oznaczona w projekcie symbolem B, a jej odmiany symbolami B1, B2 itd.) o osnowie bainitycznej, zawierająca również ferryt i martenzyt, charakteryzuje się bardzo dobrą tłocznością i stosunkowo wysoką wytrzymałością. W statycznej próbie rozciągania, stale CP nie wykazują wyraźnej granicy plastyczności, a odkształcenie równomierne osiąga dużą wartość. W przeciwieństwie do stali dwufazowych (DP), w stalach tych nie występuje ferryt poligonalny, który zostaje zastąpiony ferrytem bainitycznym. Wytrzymałość ferrytu bainitycznego jest duża w wyniku występowania w nim podwyższonej w stosunku do ferrytu poligonalnego gęstości dyslokacji oraz bardzo drobnych cząstek wydzielen. Z uwagi na konieczność kontroli udziału objętościowego ferrytu w strukturze tych stali, maksymalna zawartość węgla jest ograniczona do 0,2%. Spośród stali stosowanych do produkcji samochodów stale typu CP ustępują wytrzymałością jedynie stalom martenzytycznym, ale plastyczność stali CP jest wyższa w porównaniu ze stalami martenzytycznymi.

Supertwarda stal bainityczna (oznaczona w projekcie symbolem C, a jej odmiany symbolami C1, C2 itd.) jest stalą wysokowęglową (0,6–0,8%C) stopową zawierającą dodatki Si, Mn, Mo, Cr i mikrododatki innych pierwiastków. Skład taki pozwala na uzyskanie bardzo wysokiej twardości w przedziale 600÷700 HV i wysokiej wytrzymałości do 2,5 GPa, przy dobrych właściwościach plastycznych. Szczególną cechą tej stali jest bardzo duża odporność na oddziaływanie udarowe, dlatego głównym jej zastosowaniem mogą stać się osłony balistyczne (pancerne). Mikrostruktura supertwardej stali bainitycznej składa się z bezwęglowego bainitu w postaci listew o szerokości 20–60 nanometrów i austenitu resztkowego wykazującego efekt TRIP w procesie odkształcania na zimno.

Schemat organizacji i kontroli badań oraz zarządzania projektem przedstawiono na schemacie na rysunku 2.

3. GŁÓWNE WYNIKI PROJEKTU

3.1. SYMULACJA NUMERYCZNA I FIZYCZNA PROCESÓW ZACHODZĄCYCH PODCZAS ODLEWANIA I KRZEPNIĘCIA STALI ORAZ WYTOPIENIE I ODLANIE MATERIAŁU PRZEZNACZONEGO DO BADAŃ FIZYCZNYCH [1–5]

Opracowano numeryczne modele wlewka ciągłego oraz model wlewka laboratoryjnego, przeznaczony do doboru parametrów odlewania do statycznych wlewnic w warunkach linii do półprzemysłowej symulacji procesów odlewania i walcowania na gorąco (LPS). Symulacje numeryczne obejmujące obliczenia rozkładu temperatury i naprężeń na przekrojach poprzecznych i wzdłużnych oraz zasięgu fazy ciekłej wykonano dla wlewków ciągłych z gatunków stali: konstrukcyjnej wielofazowej oznaczonej symbolem B1 oraz wysokowęglowej bainitycznej o symbolu C1. Symulacje zostały wykonane za pomocą dwóch programów komputerowych: komercyjnego programu ProCAST firmy ESI Group oraz autorskiego programu komputerowego opracowanego w Akademii Górniczo-Hutniczej (oznaczonego AGH ZM). Za pomocą programu ProCAST i z wykorzystaniem opracowanego modelu wlewka ciągłego wykonano symulacje numeryczne rozkładu temperatury na przekrojach poprzecznych i wzdłużnych wlewków o przekroju kwadratowym oraz zasięgu fazy ciekłej na długości odlewanej pasma. Czas obliczeń dla wlewka o przekroju kwadratowym wynosił około jednego tygodnia. Czas obliczeń pola temperatury, odkształceń i naprężeń na przekroju wlewka z wykorzystaniem programu AGH ZM jest znacznie krótszy i nie przekracza jednej godziny. Obliczone pola temperatury, odkształceń i naprężeń we wlewkach ciągłych pozwalają m.in. na określenie wpływu parametrów technologicznych procesu ciągłego odlewania oraz parametrów technicznych maszyny COS na proces formowania się wlewka oraz na opracowanie sposobów modyfikacji technologii odlewania w celu podwyższenia jakości wlewków ciągłych. Za pomocą programu ProCAST wykonano symulacje procesu odlewania stali B1 i C1 do wlewnicy stacjonarnej (poprzeczny przekrój wewnętrzny 100×100 mm, masa odlewanej metalu ok. 100 kg, ściany chłodzone wodą) stosowanej w fizycznej symulacji półprzemysłowej w LPS. Z porównania obrazu struktury uzyskanego w wyniku symulacji numerycznej z rzeczywistym obrazem makrostruktury wlewka wynika, że otrzymany obraz numeryczny struktury oddaje wszystkie istotne parametry makrostruktury.

Opracowano technologie wytapiania, rafinacji i odlewania w próżniowym piecu indukcyjnym VSG-100S (moduł A1-LPS) stali konstrukcyjnej mikrostopowej superdrobnoziarnistej, stali konstrukcyjnej wielofazowej oraz wysokowęglowej stali bainitycznej, z uwzględnieniem wymaganej wysokiej czystości metalurgicznej. Wykonano 25 wytopów półprzemysłowych o składach chemicznych odpowiadających wymienionym gatunkom stali i odlano je w postaci wlewków przeznaczonych do badań symulacyjnych w skali laboratoryjnej i półprzemysłowej w LPS.

3.2. NUMERYCZNE MODELE ODKSZTAŁCENIA PLASTYCZNEGO NA GORĄCO I PRZEMIAN FAZOWYCH ZACHODZĄCYCH W BADANYCH STALACH [6-12]

Zaprojektowano i wykonano numeryczny model symulujący zamykanie i spajanie wewnętrznych nieciągłości materiałowych w trakcie walcowania na gorąco blach i prętów. Model został opracowany w programie Forge2008. W modelu wsadu do symulacji walcowania prętów i blach wprowadzono wady w postaci nieciągłości o zróżnicowanych parametrach: kształcie, wielkości i rozmieszczeniu w całej objętości. Symulacje dla wlewka o przekroju kwadratowym przeprowadzono dla czterech wsadów różniących się typem i zlokalizowaniem nieciągłości, natomiast dla wlewków płaskich analizowano dwa warianty z konfiguracjami różnych modelowych nieciągłości. W celu zobrazowania zmian cech geometrycznych pustek i pęcherzy w kotlinie walcowniczej, na ich obwodzie w osi pionowej i poziomej umieszczono markery umożliwiające śledzenie zmian ich współrzędnych. Określono wartości parametrów walcowania sprzyjające zamykaniu nieciągłości. Oprócz korzystnego schematu stanu naprężenia oraz odpowiednio wysokiej temperatury, do spojenia nieciągłości wymagany jest także odpowiednio duży nacisk na przylegające, czyste metalurgicznie powierzchnie nieciągłości. Symulacje nie wykazały dużych różnic w zakresie płynięcia materiału i zamykania nieciągłości dla stali z gatunków B1 i C1. Stwierdzono również, że stan termomechaniczny jest korzystniejszy we wsadzie o przekroju prostokątnym, niż we wsadzie o przekroju kwadratowym. Wyniki symulacji zostały wykorzystane do opracowania zaleceń technologicznych do półprzemysłowych prób walcowania w LPS.

Z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania o nazwie ANSYS i ABAQUS opracowano model numeryczny stanu odkształceń i naprężeń powstających w trakcie walcowania na gorąco blach i prętów w module B-LPS z gatunków stali będących przedmiotem badań w projekcie (A, B i C) i model rozkładu wielkości ziarna austenitu w odkształcanym materiale oraz wykonano eksperymentalną weryfikację opracowanych modeli. Zbudowano modele geometryczne dwóch podstawowych układów walcowniczych mających zastosowanie odpowiednio do walcowania blach i półwyrobów płaskich oraz prętów i półwyrobów o przekroju kwadratowym lub prostokątnym. Modele te ze względu na parametryzację pozwalają na stosunkowo swobodną zmianę geometrii w ramach każdego z podstawowych modeli geometrycznych. Wyniki symulacji numerycznej oraz wyniki badań eksperymentalnych z wykorzystaniem LPS pozwalają stwierdzić dobrą zgodność pomiędzy zmianami parametrów termomechanicznych i strukturalnych wyliczonych za pomocą modelu oraz otrzymanych w warunkach rzeczywistych.

Opracowano model ewolucji mikrostruktury austenitu dla stali wielofazowej (B), który umożliwia przeprowadzenie symulacji numerycznej wielostopniowego odkształcenia i jest przeznaczony m.in. do analizy procesu walcowania blach cienkich, z wykorzystaniem programów komputerowych opartych o metodę elementów skończonych. Model ten uwzględnia wielkości ziarna początkowego, rekrytalizację dynamiczną, metadynamiczną oraz statyczną, a także rozrost ziarna po zajęciu rekrytalizacji. Opracowany model może

być wykorzystany do symulacji numerycznej przebiegu prób sekwencyjnego odkształcenia próbek ze stali B realizowanych za pomocą symulatora Gleeble 3800. Dla stali B opracowano także model przemian fazowych zachodzących w trakcie ciągłego chłodzenia. Do opracowania modelu przemian fazowych wymagana była dokładna identyfikacja i matematyczny opis mechanizmów mikrostrukturalnych. Model przewiduje postęp przemian w wyrobie poddawanych zabiegom obróbki cieplnoplastycznej i/lub obróbki cieplnej. Praktycznym efektem tych badań jest możliwość zastosowania opracowanego modelu do symulacji komputerowej procesów technologicznych.

3.3. SYMULACJE NUMERYCZNE PRZERÓBKIE CIEPLNOPLASTYCZNEJ W WARUNKACH PÓLPRZEMYSŁOWYCH I PRZEMYSŁOWYCH [13-15]

Model rozwoju mikrostruktury austenitu stali wielofazowej (B) w trakcie obróbki cieplnoplastycznej blach zaimplementowano do opracowanego do tego celu arkusza Excel, programu Elroll i programu FORGE@2008. Przeprowadzono weryfikację i wyskalowanie modelu. Wykonano symulacje numeryczne dla procesu walcowania w LPS i dla przemysłowego procesu walcowania blach taśmowych. Wyniki wykonanych symulacji numerycznych procesu walcowania blach wykazały dużą dokładność opracowanego modelu matematycznego przewidywania zmian zachodzących w strukturze badanej stali.

Opracowano numeryczne modele walcowania na gorąco i walcowania z zastosowaniem obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów ze stali A i C oraz wykonano przykładowe symulacje dla typowych warunków technologicznych LPS. Opracowane modele są przeznaczone głównie do projektowania i realizacji procesów technologicznych z zastosowaniem LPS, ale umożliwiają również symulację numeryczną procesów przemysłowych. Modele opracowano w programie FORGE2008. Programy zawierają trzy sekwencje symulacji numerycznych: chłodzenie wsadu w trakcie transportu z pieca do klatki walcowniczej oraz podczas przerw między przepustami, lokalne zmiany temperatury wsadu wywołane przejściem przez zbijacz zgorzeli i zmiany stanów termomechanicznych w kotlinie walcowniczej w trakcie kolejnych przepustów. Przeprowadzone obliczenia i analizy porównawcze z rzeczywistymi procesami przemysłowymi wykazały, że opracowane modele walcowania i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów działają prawidłowo.

3.4. SYMULACJE FIZYCZNE PRZERÓBKIE CIEPLNOPLASTYCZNEJ BADANYCH STALI [25-31]

Zastosowano opracowany w projekcie model rozwoju mikrostruktury austenitu w procesach obróbki cieplnoplastycznej w stali typu B do zaprojektowania wstępnych parametrów technologii walcowania blach z tej stali, z wykorzystaniem fizycznej symulacji laboratoryjnej. Symulacje wykonano w symulatorze Gleeble 3800 dla wariantu walcowania blach w warunkach przemysłowych i wariantu walcowania blach w warunkach półprzemysłowych w LPS. W celu określenia wpływu parametrów odkształcenia i chłodzenia po ostatnim odkształceniu na strukturę i właściwości mechaniczne

badanej stali wykonano testy w symulatorze Gleeble 3800 z zastosowaniem sekwencji gniotów, temperatury i szybkości chłodzenia odpowiadających wartościom charakterystycznym dla walcowania blach ze stali wielofazowej. Na podstawie wyników symulacji fizycznych walcowania blach stwierdzono dużą dokładność opracowanego modelu matematycznego w przewidywaniu zmian zachodzących w strukturze badanej stali.

Wykonano symulacje walcowania blach z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej (A) i wysokowęglowej bainitycznej (C) z wykorzystaniem symulatora procesów metalurgicznych Gleeble 3800. Określono optymalny schemat odkształceń umożliwiających uzyskanie struktury superdrobnoziarnistej w warunkach walcowania blach ze stali A. Opracowano schematy odkształceń dla trzech różnych temperatur końca odkształcania i dla dwóch prędkości odkształcania, odpowiadających walcowaniu blach w warunkach walcowni nawrotnych i ciągłych. Jako optymalny schemat do wykorzystania przy projektowaniu technologii obróbki cieplnoplastycznej stali A wybrano schemat przepustów technologicznie możliwy do zrealizowania w warunkach przemysłowych, w którym walcowanie kończy się w temperaturze 815°C. W związku z faktem, że stal C jest materiałem bardzo twardym i wykazuje dużą podatność do utraty ciągłości już podczas odlewania, przeprowadzono symulację w dwóch etapach. Pierwszym etapem była ocena plastyczności materiału w zakresie temperatury i prędkości odkształcania odpowiadających walcowaniu blach grubych w warunkach przemysłowych, a drugim – ocena plastyczności dla warunków technologicznych LPS. Ustalono, że stal w gatunku C jest dobrze odkształcalna na gorąco i podczas odkształcania w zakresie 800÷1200°C nie powinny powstawać pęknięcia. Podobne symulacje z wykorzystaniem symulatora procesów metalurgicznych Gleeble 3800 wykonano dla procesu walcowania prętów ze stali superdrobnoziarnistej (A). W wyniku przeprowadzonych symulacji określono optymalny, ze względu na uzyskanie wymaganej mikrostruktury i właściwości wyrobu końcowego, schemat walcowania z podaniem temperatury początku i końca walcowania, wielkości gniotów, czasów przerw pomiędzy kolejnymi gniotami i sposobu chłodzenia po ostatnim gniocie. Przeprowadzone symulacje fizyczne procesu walcowania prętów w urządzeniu Gleeble 3800 umożliwiły określenie mikrostruktury po czterech ostatnich przepustach w warunkach walcowni liniowej oraz w warunkach walcowni ciągłej.

3.5. WYZNACZENIE FIZYCZNYCH CHARAKTERYSTYK BADANYCH STALI [18–24]

Opracowano wykresy przemian fazowych CTPi, CTPc i OCTPc dla materiałów będących przedmiotem badań w projekcie, tj. dla stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej wielofazowej oraz wysokowęglowej stali bainitycznej. Efektem wykonanych badań dylatometrycznych są wykresy CTPi, CTP i OCTPc dla stali A1, B1 i C1, sporządzone po austenitowaniu w różnych temperaturach. Wyniki badań dylatometrycznych zostały wykorzystane w innych zadaniach projektu, m.in. jako dane materiałowe niezbędne do wykonywania symulacji numerycznych i do opracowania podstaw technologii przeróbki cieplnoplastycznej

i obróbki cieplnej prętów i blach z nowych gatunków stali, które były przedmiotem badań w projekcie.

Opracowane charakterystyki technologiczne stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej (A), stali konstrukcyjnej wielofazowej (B) i stali wysokowęglowej bainitycznej (C), obejmują:

- Funkcje naprężenia uplastyczniającego dla wymaganych wartości zakresu temperatury i prędkości skrećcia w postaci tabelarycznej,
- Wartości maksymalnego poziomu naprężenia uplastyczniającego σ_{pmax} , odkształcenia pikowego ϵ_p oraz odkształcenia granicznego ϵ_g ,
- Równania określające zależności naprężenia uplastyczniającego od parametrów odkształcania (odkształcenia, prędkości odkształcania i temperatury) dla ustalonego zakresu zmienności parametrów odkształcania,
- Obliczone na podstawie wyników pomiarów wartości energii aktywacji odkształcenia plastycznego,
- Przebiegi kinetyki osłabienia na podstawie analizy relaksacji naprężenia (dla temperatur 1100°C i 1000°C i prędkości odkształcania $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$),
- Opis ilościowy mikrostruktury wyjściowej stali i po odkształceniu plastycznym (dla temperatur 800°C, 900°C, 1000°C i 1100°C, prędkość odkształcania $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ i 10 s^{-1}).

Jako podstawową metodę badawczą zastosowano odkształcanie próbek w plastometrze skrętnym. Matematyczna postać naprężenia uplastyczniającego, jako funkcji parametrów odkształcania, może zostać zaimplementowana do programów wykorzystujących metodę elementów skończonych w matematycznym modelowaniu procesów technologicznych. Wyniki badań plastometrycznych mają także zastosowanie do opracowania półprzemysłowej technologii przeróbki cieplnoplastycznej prętów i blach z nowych gatunków stali.

Zaprojektowano i zbudowano bazę danych fizycznych i technologicznych dla wielofazowej stali konstrukcyjnej oznaczonej symbolem B1/1, w oparciu o wyniki badań plastometrycznych, dylatometrycznych, metalograficznych oraz obliczeń numerycznych. Baza ta pozwala na analizę wpływu wielkości ziarna austenitu i parametrów odkształcania na odpowiedź mechaniczną materiału, kinetykę rekrytalizacji dynamicznej, metadynamicznej i statycznej oraz kinetykę rozrostu ziarna. Ponadto, umożliwia śledzenie przemian fazowych w oparciu o wykres CTP_c i wizualizację uzyskanej struktury dla różnych szybkości chłodzenia. Utworzona baza danych ma charakter otwarty, który pozwala na jej rozszerzenie o kolejne gatunki stali i zwiększenie możliwości, o np. implementację modeli przemian fazowych.

3.6. KOMPUTEROWE MODELE WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII OBRÓBKI CIEPLNOPLASTYCZNEJ [32–38]

Opracowano program komputerowy do symulacji zmian temperatury podczas walcowania prętów i blach w LPS o nazwie Kształt_t2D. Warunki brzegowe zostały ustalone w oparciu o badania eksperymentalne na LPS. Program Kształt_t2D pozwala na projektowanie warunków chłodzenia podczas walcowania na gorąco, dla określonej geometrii wsadu, przekrojów po przepustach i gatunku walcowanej stali. Wykorzystany w programie model matematyczny oraz algorytmy nu-

meryczne pozwalają na szybkie obliczenia zmian temperatury walcowanego pasma. Dane wyjściowe z modelu, pozwalają na wyznaczenie temperatury powierzchni pasma, boku pasma i średniej temperatury pasma. Na podstawie testowych obliczeń stwierdzono, że program działa prawidłowo w zakresie edycji i modyfikacji danych wejściowych i wyjściowych oraz umożliwia ich dalszą obróbkę graficzną. Uzyskane przebiegi zmian temperatury są zgodne z wynikami pomiarów wykonanych w trakcie walcowania w LPS. Należy podkreślić dużą szybkość programu *Kształt_t2D* – czas obliczeń testowych nie przekraczał 13 s.

Do wspomaganie projektowania i realizacji półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i walcowania termomechanicznego wyrobów płaskich i długich ze stali i stopów na urządzeniach modułu B – LPS opracowano komputerowy system ekspercki (nazwany *LPS*). Baza danych systemu *LPS* jest przystosowana do przechowywania informacji na temat materiałów oraz ich właściwości, a także projektów użytkownika. Użytkownik ma możliwość przeprowadzenia symulacji numerycznych procesu walcowania wyrobów płaskich i prętów o przekroju kwadratowym. Umożliwia to m.in. konfigurację urządzeń wykorzystywanych w procesie walcowania, wykonanie obliczeń oraz analizę wyników. System podpowiada także jak dobrać liczbę przepustów w procesie lub jak dobrać parametry procesu przy zadanej liczbie przepustów. Program umożliwia także obliczenia rozwoju mikrostruktury w czasie walcowania na gorąco (wielkości ziarna zrekrystalizowanego austenitu) oraz wartości sił, momentów, mocy oraz natężenia prądu walcarki w trakcie walcowania.

3.7. OPACOWANIE PODSTAW PRZEMYSŁOWYCH TECHNOLOGII WYTWARZANIA WYROBÓW Z NOWYCH GATUNKÓW STALI BĘDĄCYCH PRZEDMIOTEM BADAŃ [39–44]

3.7.1. Opracowanie zaleceń technologicznych do wykonania półprzemysłowych prób walcowania

Opracowano zalecenia technologiczne do wykonania półprzemysłowych symulacji walcowania w LPS blach i prętów z gatunków stali stanowiących materiał badań w projekcie. Wykorzystano wyniki badań wykonanych w innych zadaniach projektu: symulacji numerycznych i fizycznych, badań dylatometrycznych oraz obliczeń wykonanych za pomocą programu *TTSteel*. Dla każdego wariantu walcowania opracowano krzywe chłodzenia pasma na tle wykresu *CTPc* oraz podano prognozowane na podstawie obliczeń strukturę i właściwości mechaniczne. Obliczono wielkości sił nacisku na walce i momentów walcowania.

3.7.2. Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego jednoklatkową walcarkę nawrotną

Półprzemysłowa linia do symulacji procesów walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej stali i stopów metali (LPS) powinna w maksymalnym stopniu uwzględniać stosowane w warunkach przemysłowych operacje i parametry technologiczne wytwarzania i przetwarzania wyrobów ze stali i stopów metali, tendencje rozwojowe w tym zakresie oraz zasady mode-

lowania procesów zgodnie z prawami podobieństwa. Odkształcane w LPS modelowe materiały powinny być geometrycznie podobne i fizycznie jednakowe (skład chemiczny, mikrostruktura) 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. Wykorzystując parametry procesów realizowanych w LPS wynikające z opracowanej metodyki symulacji określono zasady podobieństwa w odniesieniu do poszczególnych parametrów procesowych i konstrukcyjnych. Skala podobieństwa geometrycznego wsadu do walcowania stosowanego w LPS do wsadu przemysłowego może osiągnąć stosunek 1:2, a dla wybranych operacji wartość 1:1. Symulacja procesu nagrzewania wsadu do walcowania odnosząca się do temperatury może w pełni odpowiadać procesowi przemysłowemu. Uwzględniając niezmienność średnicy walców, gdyż jest to cecha charakterystyczna urządzenia, skala modelowania w odniesieniu do narzędzi odkształcających materiał wynosi od 1:1 do 1:2. Temperatura pasma w trakcie walcowania w LPS nie odbiega znacząco od temperatury rejestrowanej w procesie przemysłowym do momentu wykonania operacji cięcia pasma. Z porównania zakresów prędkości walcowania w LPS i w walcowniach przemysłowych wynika, że skala podobieństwa odnosząca się do prędkości liniowej walcowania może osiągnąć stosunek 1:2 dla blach grubych, a dla prętów od 1:2 do 1:6.

3.7.3. Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej taśm i cienkich prętów z zastosowaniem modułu LPS obejmującego czteroklatkowy ciągły układ walcowniczy

Jako kolejny etap rozwoju LPS zaplanowano budowę modułów obejmujących nawrotny ciągły układ walcowniczy i urządzenia pomocnicze do symulacji procesów walcowania na gorąco taśm cienkich (moduł C) oraz prętów i kształtowników drobnych (moduł D). Wykorzystanie modułów C i D w połączeniu z istniejącymi modułami A i B umożliwi prowadzenie symulacji półprzemysłowej walcowania i obróbki cieplnoplastycznej wyrobów płaskich i długich w jednym ciągu, tak jak w instalacjach przemysłowych. W celu przygotowania bazy danych do projektu modułów C i D, opracowano koncepcję układu technologicznego tych modułów oraz określono podstawowe wymagania techniczne niezbędne do ich zaprojektowania.

3.7.4. Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej

Opracowano wytyczne do przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej (lub nazywanej ultradrobnoziarnistą – UDZ, oznaczoną w projekcie symbolem A), z zastosowaniem metody symulacji półprzemysłowej, za pomocą urządzeń wchodzących w skład modułu B – LPS. Dane wstępne do zaprojektowania programu symulacji walcowania i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów w linii LPS stanowiły wyniki symulacji numerycznych i laboratoryjnych fizycznych wykonanych w projekcie. W LPS przeprowadzono walcowanie

blach o grubości w zakresie 4–12 mm i prętów kwadratowych o wymiarach boku 38 i 45 mm. Na podstawie wykonanych symulacji półprzemysłowych walcowania i obróbki cieplnoplastycznej w LPS oraz badań mikrostrukturalnych stwierdzono, że korzystne warunki do powstawania struktury UDZ występują podczas walcowania silnie przechłodzonego austenitu i/lub austenitu i ferrytu, przy zastosowaniu odkształceń w pojedynczych przepustach przekraczających wartości standardowo stosowane w obecnie istniejących liniach walcowniczych. Podstawy technologii wytwarzania wyrobów o strukturze UDZ dotyczą głównie parametrów regulowanego chłodzenia przed ostatnimi przepustami i walcowania z maksymalnie dużymi wartościami odkształcenia w ostatnich przepustach. Tego typu rozwiązania są możliwe do zastosowania w walcowniach ciągłych, w których możliwe jest schłodzenie pasma i jego odkształcanie z krótkimi przerwami pomiędzy przepustami. Dla wytypowanego gatunku stali i określonej linii walcowniczej należy ustalić zakres maksymalnych temperatur i minimalnych wielkości odkształceń oraz szybkości chłodzenia zarówno przed, jak i po ostatnich przepustach, dla których powstaje mikrostruktura UDZ. Na podstawie wyników badań stali A ustalono, że aby uzyskać ultradrobne ziarno ferrytu o wielkości (mierzonej średnią cięciwą) poniżej 3–4 μm należy zastosować ekstremalne parametry obróbki cieplnoplastycznej: szybkość chłodzenia austenitu do temperatury odkształcenia powinna zawierać się w zakresie 50–100 K/s, temperatura odkształcenia powinna mieścić się w zakresie 700–650°C, a wielkość odkształcenia zadana w dwóch ostatnich przepustach powinna być równa ok. 0,50. Po ostatnim przepuszczeniu blachę lub pręt należy chłodzić z szybkością ok. 100 K/s.

3.7.5. Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej wielofazowej

Podstawą do opracowania programu obróbki cieplnoplastycznej blach ze stali o strukturze wielofazowej (B) były wyniki symulacji numerycznych i fizycznych wykonanych w projekcie oraz możliwości techniczne linii LPS. Oceniając wpływ składu chemicznego stali na właściwości blach stwierdzono, że najkorzystniejsze parametry wytrzymałościowo-plastyczne uzyskano dla stali o zawartości tytanu równej 0,12% i z dodatkiem wanadu w ilości 0,035–0,045%. Najlepsze połączenie wysokiej wytrzymałości i plastyczności uzyskano w blachach po operacji obejmującej przyspieszone chłodzenie natryskiem wodnym do temperatury z zakresu 400–450°C, wytrzymanie w czasie 60 s i następujące po nim intensywne chłodzenie do temperatury otoczenia. Możliwe do uzyskania właściwości mechaniczne blach o grubości 4 mm są zbliżone do zawartych w normie właściwości blach klasy S700MC po walcowaniu termomechanicznym. Maksymalna wytrzymałość blach według opracowanej technologii wynosi 940 MPa, co jest wartością wyższą od maksymalnej wytrzymałości wytwarzanych obecnie w warunkach przemysłowych taśm ze stali typu CP.

3.7.6. Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach z supertwardej wysokowęglowej stali bainitycznej

Na podstawie wyników symulacji numerycznych i fizycznych z zastosowaniem LPS zoptymalizowano

skład chemiczny supertwardej wysokowęglowej stali bainitycznej (C) dla warunków procesu próżniowego oraz dla wariantu technologicznego obejmującego wytapianie w piecu elektrycznym, rafinację w piecokadzi oraz odgazowanie próżniowe. Opracowano podstawy technologii przemysłowej wytwarzania stali C i blach arkuszywych z tej stali w dwóch odmianach: jako technologię zintegrowaną i jako technologię etapową. Opracowane parametry przemysłowej technologii wytwarzania stali C i ultrawytrzymałych blach z tej stali zweryfikowano metodą fizycznej symulacji półprzemysłowej z zastosowaniem LPS. Wyniki badań wykazały, że opracowane parametry umożliwiają wytworzenie blach o zakładanej strukturze i wymaganych właściwościach: granicy plastyczności 1,3–1,5 GPa, twardości minimum 600 HV i wystarczającej ciągliwości do planowanych zastosowań, w tym do zastosowań na nowoczesne pancerze.

Zintegrowany ciągły sposób wytwarzania ultrawytrzymałych blach ze stali C obejmuje nagrzewanie wsadu, regulowane walcowanie na gorąco, operację regulowanego chłodzenia blachy z określoną szybkością i z zapewnieniem jednorodności temperatury na przekroju blachy bezpośrednio po zakończeniu walcowania na gorąco oraz bezpośrednie wygrzewanie izotermiczne. Ciągłość procesu powoduje maksymalne wykorzystanie pierwiastków stopowych rozpuszczonych w austenicie podczas nagrzewania do walcowania oraz wytworzenie odpowiedniej wielkości ziarna austenitu w ostatnich regulowanych przepustach walcowania. W przypadku braku technicznych możliwości zastosowania zintegrowanej technologii wytwarzania ultrawytrzymałych blach ze stali C, należy zastosować technologię etapową składającą się z etapu walcowania na gorąco na grubość finalną i z etapu obróbki cieplnej.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Głównymi celami projektu były: unowocześnienie, rozwinięcie i dostosowanie do aktualnych potrzeb modeli i metod symulacji numerycznej, fizycznej laboratoryjnej i fizycznej symulacji półprzemysłowej, stosowanych do kształtowania mikrostruktury i właściwości wyrobów z metali i stopów oraz aplikacja tych modeli i metod symulacyjnych do opracowania podstaw przemysłowych technologii wytwarzania wyrobów walcowanych z wytypowanych nowych gatunków stali.

Zadania badawcze, które doprowadziły do osiągnięcia założonych celów zostały wykonane przez specjalistów z ośrodków prowadzących zaawansowane badania w obszarach objętych tematyką projektu: Instytutu Metalurgii Żelaza – który był głównym wykonawcą i koordynatorem, Akademii Górniczo-Hutniczej (Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej), Politechniki Częstochowskiej (Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej), Politechniki Śląskiej (Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii) i Politechniki Warszawskiej (Wydział Inżynierii Materiałowej).

Poniżej podano najistotniejsze wyniki projektu.

Opracowano następujące modele numeryczne przeznaczone do symulacji procesów fizycznych i operacji technologicznych przebiegających w warunkach półprzemysłowych i przemysłowych:

– model wlewka ciągłego oraz model wlewka laboratoryjnego opracowane w programie ProCAST; model wlewka ciągłego opracowany w programie AGH ZM; model symulujący zamykanie i spajanie wewnętrznych nieciągłości materiałowych w trakcie walcowania na gorąco blach i prętów opracowany w programie Forge2008; model stanu odkształceń i naprężeń powstających w trakcie walcowania na gorąco blach i prętów w module B-LPS z gatunków stali A, B i C opracowany w programie ABAQUS; model ewolucji mikrostruktury austenitu dla stali wielofazowej (B) umożliwiający przeprowadzenie symulacji numerycznej wielostopniowego odkształcenia z wykorzystaniem programów opartych o metodę elementów skończonych; model przemian fazowych zachodzących w trakcie ciągłego chłodzenia stali wielofazowej (B); modele w programie Forge2008 walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów ze stali A i C dla warunków technologicznych LPS z możliwością adaptacji do warunków przemysłowych; program komputerowy Kształt_2D do symulacji zmian temperatury podczas walcowania prętów i blach w LPS z możliwością zastosowania do procesów przemysłowych; komputerowy system ekspercki (nazwany LPS) przeznaczony do wspomagania projektowania i realizacji półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej wyrobów płaskich i długich ze stali i stopów na urządzeniach modułu B – LPS.

Utworzono bazy danych zawierające parametry fizyczne i technologiczne charakteryzujące badane gatunki stali A, B i C:

– wykresy przemian fazowych CTPi, CTPc i OCTPc; charakterystyki technologiczne odkształcalności w szerokim zakresie temperatury; zbiory danych fizycznych i technologicznych.

Opracowano założenia do przemysłowych technologii wytwarzania wyrobów stalowych z nowoczesnych gatunków stali będących przedmiotem badań w projekcie:

– podstawy metalurgiczne wytapiania i odlewania stali A, B i C; podstawy obróbki cieplnoplastycznej i cieplnej stali A, B i C; wytyczne do przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej; wytyczne do przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej wielofazowej; wytyczne do przemysłowej technologii wytwarzania blach z przetwardej wysokowęglowej stali bainitycznej.

Uzyskane wyniki projektu świadczą o dużej efektywności metod symulacyjnych w projektowaniu i przygotowywaniu do wdrażania technologii z dziedziny wytwarzania materiałów metalowych oraz półwyrobów i wyrobów z tych materiałów. Zastosowanie sekwencji: modelowanie numeryczne – fizyczna symulacja laboratoryjna – fizyczna symulacja półprzemysłowa, stwarza możliwości minimalizowania kosztów i zwiększania dokładności opracowywania i przygotowywania do przemysłowego zastosowania technologii materiałowych.

LITERATURA

Sprawozdania z zadań wykonanych w projekcie nr N R07 0008 04

1. Blacha L., Kudliński Z., Kapturkiewicz W., Burbiełko A., Merder T., Pieprzyca J.: *Opracowanie metodyki realizacji pracy oraz zaprojektowanie struktury bazy danych parametrów procesu ciągłego odlewania niezbędnych do budowy numerycznego modelu wlewka* (praca wykonana w ramach zadania 1), Politechnika Śląska, grudzień 2008
2. Blacha L., Kudliński Z., Kapturkiewicz W., Burbiełko A., Merder T., Pieprzyca J., Malinowski Z., Gołasz A., Hadała B., Cebo A.: *Nmeryczna symulacja procesu ciągłego odlewania wlewków płaskich i kwadratowych z wybranych gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej wielofazowej i wysokowęglowej stali bainitycznej* (praca wykonana w ramach zadania 1), Politechnika Śląska, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – listopad 2009
3. Bulkowski L., Pogorzałek J., Galisz U.: *Zbadanie wpływu geometrii wlewnic na strukturę wewnętrzną wlewka i na lokalizację jamy skurczowej* (praca wykonana w ramach zadania 3), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – kwiecień 2009
4. Galisz U., Bulkowski L., Pogorzałek J.: *Opracowanie technologii wytapiania, rafinacji i odlewania w próżniowym piecu indukcyjnym stali wysokowęglowej bainitycznej i stali konstrukcyjnych przeznaczonych na wyroby o strukturze superdrobnoziarnistej oraz wielofazowej* (praca wykonana w ramach zadania 20), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – kwiecień 2009
5. Pogorzałek J., Bulkowski L., Galisz U.: *Wykonanie wytopów i odlanie ich w postaci wlewków przeznaczonych na materiał badawczy do symulacji fizycznych w skali laboratoryjnej i w skali półprzemysłowej* (praca wykonana w ramach zadania 21), Instytut Metalurgii Żelaza, grudzień 2008
6. Grosman F., Hadasik F., Tkocz M., Cyganek Z.: *Opracowanie metodyki i szczegółowego zakresu pracy, danych wejściowych oraz modeli do symulacji zjawisk zamykania i spajania nieciągłości wsadu w procesach walcowania blach i prętów* (praca wykonana w ramach zadania 2), Politechnika Śląska, listopad 2008
7. Grosman F., Hadasik F., Tkocz M., Cyganek Z.: *Wykonanie symulacji numerycznej i określenie najkorzystniejszych parametrów prowadzenia walcowania blach i prętów* (praca wykonana w ramach zadania 2), Politechnika Śląska, cz.1 – grudzień 2008, cz. 2 – maj 2009
8. Wejrzanowski T., Spychalski M., Dobosz R.: *Model numeryczny stanów mechanicznych w materiałach odkształczanych w procesie walcowania na gorąco* (praca wykonana w ramach zadania 6), Politechnika Warszawska, cz. 1 – listopad 2008, cz. 2 – październik 2009, cz. 3 – kwiecień 2010
9. Lewandowska M., Wejrzanowski T., Spychalski M.: *Badania wytrzymałościowe i metalograficzne materiałów walcowanych na gorąco i weryfikacja eksperymentalna opracowanych modeli* (praca wykonana w ramach zadania 8), Politechnika Warszawska, cz. 1 – listopad 2008, cz. 2 – listopad 2009, cz. 3 – styczeń 2011
10. Wejrzanowski T., Spychalski M., Dobosz R.: *Model numeryczny wielkości ziarna w materiałach odkształczanych w procesie walcowania na gorąco* (praca wykonana w ramach zadania 7), Politechnika Warszawska, listopad 2008
11. Kuziak R., Zalecki W., Molenda R., Pidvysots'kyy V., Łapczyński Z.: *Opracowanie numerycznego modelu zmian mikrostruktury austenitu w procesie walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej* (praca wykonana w ramach zadania 10), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – listopad 2009
12. Zalecki W., Molenda R.: *Opracowanie numerycznego modelu przemian fazowych zachodzących w stali konstrukcyjnej wie-*

- lofazowej (praca wykonana w ramach zadania 11), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – listopad 2008, cz. 2 – listopad 2009
13. Pidvysots'kyy V., Kuziak R., Zalecki W., Molenda R.: *Wykonanie symulacji numerycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem programów Forge 2D/3D* (praca wykonana w ramach zadania 13), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – grudzień 2009
 14. Grosman F., Hadasik F., Tkocz M., Cyganek Z.: *Opracowanie numerycznego modelu walcowania blach z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej z wykorzystaniem programów FORGE3 i SIMUFACT.FORMING i wykonanie symulacji dla warunków technicznych LPS* (praca wykonana w ramach zadania 14), Politechnika Śląska, cz. 1 – listopad 2008, cz. 2 – luty 2010, cz. 3 – luty 2010
 15. Hadasik F., Tkocz M., Cyganek Z.: *Opracowanie numerycznego modelu walcowania prętów z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej z wykorzystaniem programów FORGE3 i SIMUFACT.FORMING i wykonanie symulacji dla warunków technicznych LPS* (praca wykonana w ramach zadania 16), Politechnika Śląska, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – luty 2010, cz. 3 – luty 2010
 16. Dyja H., Mróz S., Kawalek A., Szota P., Stefanik A.: *Testowanie i weryfikacja numerycznego modelu walcowania blach z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej, opracowanego dla warunków technicznych LPS i procesów przemysłowych* (praca wykonana w ramach zadania 14), Politechnika Częstochowska, kwiecień 2010
 17. Dyja H., Mróz S., Kawalek A., Szota P., Stefanik A.: *Testowanie i weryfikacja numerycznego modelu walcowania prętów z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej, opracowanego dla warunków technicznych LPS i procesów przemysłowych* (praca wykonana w ramach zadania 16), Politechnika Częstochowska, kwiecień 2010
 18. Dyja H., Koczurkiewicz B.: *Opracowanie wykresów przemian fazowych CTPi, CTPc i OCTPc dla eksperymentalnych gatunków stali: konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wielofazowej oraz wysokowęglowej bainitycznej* (praca wykonana w ramach zadania 4), Politechnika Częstochowska, cz. 1 – listopad 2008, cz. 2 – październik 2009, cz. 3 – kwiecień 2010
 19. Płachta A., Kuc D., Niewielski G.: *Przygotowanie metodyki pracy – Opracowanie charakterystyk technologicznej plastyczności wybranych gatunków stali* (praca wykonana w ramach zadania 5), Politechnika Śląska, listopad 2008
 20. Płachta A.: *Wyznaczenie funkcji naprężenia uplastyczniającego dla wybranych gatunków stali* (praca wykonana w ramach zadania 5), Politechnika Śląska, kwiecień 2009
 21. Płachta A., Kuc D.: *Opracowanie charakterystyk technologicznej plastyczności stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej* (praca wykonana w ramach zadania 5), Politechnika Śląska, sierpień 2009
 22. Płachta A., Kuc D.: *Opracowanie charakterystyki technologicznej plastyczności stali konstrukcyjnej wielofazowej* (praca wykonana w ramach zadania 5), Politechnika Śląska, listopad 2009
 23. Płachta A., Kuc D.: *Opracowanie charakterystyki technologicznej plastyczności stali wysokowęglowej bainitycznej* (praca wykonana w ramach zadania 5), Politechnika Śląska, kwiecień 2010
 24. Pidvysots'kyy V., Kuziak R., Zalecki W., Molenda R.: *Opracowanie bazy danych do symulacji numerycznej procesu walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej na podstawie wyników badań plastometrycznych, dylatometrycznych i obliczeń numerycznych* (praca wykonana w ramach zadania 9), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – sierpień 2009
 25. Pidvysots'kyy V., Kuziak R., Zalecki W., Molenda R.: *Wykonanie symulacji fizycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800* (praca wykonana w ramach zadania 12), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2009, cz. 2 – kwiecień 2010
 26. Dyja H., Knapieński M., Szota P.: *Opracowanie metodyki symulacji fizycznej walcowania blach i harmonogramu badań próbek z eksperymentalnej stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej stali bainitycznej* (praca wykonana w ramach zadania 15), Politechnika Częstochowska, listopad 2008
 27. Dyja H., Knapieński M., Kwapisz M.: *Wykonanie próbek do badań, przeprowadzenie symulacji fizycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800 oraz wykonanie badań metalograficznych i badań wybranych właściwości materiału po próbach odkształcenia* (praca wykonana w ramach zadania 15), Politechnika Częstochowska, styczeń 2010
 28. Dyja H., Knapieński M.: *Wykonanie próbek do badań, przeprowadzenie symulacji fizycznej walcowania blach z wysokowęglowej stali bainitycznej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800 oraz wykonanie badań metalograficznych i badań wybranych właściwości materiału po próbach odkształcenia* (praca wykonana w ramach zadania 15), Politechnika Częstochowska, sierpień 2010
 29. Dyja H., Szota P., Knapieński M.: *Opracowanie metodyki symulacji fizycznej walcowania prętów i harmonogramu badań próbek z eksperymentalnej stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej* (praca wykonana w ramach zadania 17), Politechnika Częstochowska, listopad 2008
 30. Dyja H., Szota P., Knapieński M.: *Wykonanie próbek do badań i przeprowadzenie symulacji fizycznej walcowania prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej* (praca wykonana w ramach zadania 17), Politechnika Częstochowska, listopad 2009
 31. Dyja H., Szota P., Knapieński M.: *Badania próbek poddanych symulacji fizycznej i określenie optymalnych zakresów parametrów walcowania prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej* (praca wykonana w ramach zadania 17), Politechnika Częstochowska, sierpień 2010
 32. Malinowski Z., Gołasz A., Hadała B., Cebo A.: *Identyfikacja warunków brzegowych w procesach walcowania wlewków laboratoryjnych w linii LPS i przemysłowych wlewków ciągłych – metodyka i oczekiwane wyniki badań* (praca wykonana w ramach zadania 19), AGH, listopad 2008
 33. Malinowski Z., Cebo-Rudnicka A., Gołasz A., Hadała B., Hojny M.: *Opracowanie modeli numerycznych wymiany ciepła w procesach walcowania wlewków laboratoryjnych w linii LPS i wlewków ciągłych w walcowniach blach i prętów* (praca wykonana w ramach zadania 19), AGH, cz. 1 – listopad 2009, cz. 2 – styczeń 2010
 34. Malinowski Z., Cebo-Rudnicka A., Gołasz A., Hadała B., Hojny M.: *Weryfikacja opracowanych modeli w oparciu o dane z laboratoryjnych prób walcowania na linii LPS* (praca wykonana w ramach zadania 19), AGH, kwiecień 2010
 35. Rauch Ł., Pietrzyk M.: *Zaprojektowanie struktury systemu eksperckiego oraz opracowanie metodyki jego budowy dostosowanej do potrzeb symulacji półprzemysłowej na urządzeniach LPS* (praca wykonana w ramach zadania 18), AGH, grudzień 2008
 36. Pietrzyk M., Rauch Ł.: *Przygotowanie baz danych, przeprowadzenie analizy odwrotnej i opracowanie modeli reologicznych dla wytypowanych trzech grup gatunkowych stali: mikrostopowej konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej, konstrukcyjnej o strukturze wielofazowej i supertwardej wysokowęglowej bainitycznej* (praca wykonana w ramach zadania 18), AGH, grudzień 2008
 37. Pietrzyk M., Rauch Ł.: *Opracowanie komputerowego systemu eksperckiego wspomagającego projektowanie i realizację półprzemysłowego walcowania na gorąco i obróbki termomechanicznej blach i prętów na urządzeniach LPS* (praca wykonana w ramach zadania 18), AGH, cz. 1 – listopad 2009, cz. 2 – styczeń 2010
 38. Pietrzyk M., Rauch Ł.: *Zaprojektowanie i wykonanie interfejsu użytkownika oraz wdrożenie opracowanego systemu eksperckiego* (praca wykonana w ramach zadania 18), AGH, marzec 2010
 39. Hetmańczyk M., Niewielski G., Hadasik E., Kuc D.: *Opracowanie wstępnych zaleceń technologicznych do walcowania blach i prętów w LPS na podstawie wyników z symulacji numerycznych i fizycznych* (praca wykonana w ramach zadania 22), Politechnika Śląska, styczeń 2009
 40. 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* (praca wykonana w ramach zadania 23), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – grudzień 2010, cz. 3 – maj 2011

41. 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* (praca wykonana w ramach zadania 24), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2008, cz. 2 – grudzień 2010, cz. 3 – maj 2011
42. Marcisz J., Adamczyk M., Walnik B., Woźniak D., Palus R.: *Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej z zastosowaniem metody półprzemysłowej symulacji* (praca wykonana w ramach zadania 25), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2010, cz. 2 – maj 2011
43. Żak, A., Woźniak D., Pidvysots'kyy V., Palus R.: *Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach i prętów ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem metody półprzemysłowej symulacji* (praca wykonana w ramach zadania 26), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2010, cz. 2 – maj 2011
44. Garbarz B., Woźniak D., Palus R., Burian W., Niżnik B.: *Opracowanie podstaw przemysłowej technologii wytwarzania blach z supertwardej wysokowęglowej stali bainitycznej z zastosowaniem metody półprzemysłowej symulacji* (praca wykonana w ramach zadania 27), Instytut Metalurgii Żelaza, cz. 1 – grudzień 2010, cz. 2 – maj 2011