



Fizyczno-matematyczne modelowanie wysokotemperaturowych procesów przetwarzania stali w aspekcie wspomagania projektowania nowych technologii

The physico-mathematical modelling of high-temperature steel processing in the aspect of aiding in engineering new technologies

Marcin Hojny*

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 20.06.2018

Recenzja: 2.07.2018

Akceptacja: 3.12.2018

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości obliczeniowe autorskiego oprogramowania DEFFEM w zakresie symulacji nagrzewania/przetapiania oporowego wraz z przykładowymi wynikami walidującymi przyjęte założenia modelu numerycznego. Pakiet symulacyjny stanowi integralną część opracowanej metodyki i bazuje na metodzie elementów skończonych, hydrodynamiki cząstek rozmytych oraz metodzie Monte Carlo w zakresie pełnej symulacji 3D wybranych zjawisk wysokotemperaturowego przetwarzania stali. Opracowany model termiczny nagrzewania/przetapiania oporowego oparto na rozwiązaniu równania Fouriera-Kirchoffa. Warunki brzegowe w postaci strumieni cieplnych zostały przyjęte zgodnie z warunkami próby realizowanej w układzie symulatora termo-fizycznego Gleeble 3800. Zjawiska kontaktowe i wymiana ciepła z otoczeniem modelowana była z wykorzystaniem zastępczego współczynnika wymiany ciepła. Podczas numerycznej symulacji nagrzewania/przetapiania oporowego w układzie symulatora Gleeble 3800, ciepło towarzyszące przepływowi prądu zostało uwzględnione w równaniu F-K jako moc wewnętrznych źródeł ciepła. Modelując wytwarzanie ciepła w wyniku przepływu prądu, przyjęto, że jego ekwiwalentem w modelu numerycznym będzie objętościowe źródło ciepła o mocy proporcjonalnej do rezystancji, kwadratu natężenia przepływającego prądu oraz funkcji intensywności dobieranej na podstawie eksperymentów. Oprogramowanie DEFFEM może być wykorzystane m.in. do analizy i modelowania energooszczędnej, ulepszonej w stosunku konwencjonalnego procesu metalurgicznego (odlewnia, a następnie walcowania na zimno pasma) z nową technologią walcownia pasma, w którym współlistnieje faza stała i ciekła. Nowa technologia jest ekonomiczniejsza oraz korzystnie oddziałuje na środowisko naturalne, ze względu na zmniejszenie emisji gazów.

Słowa kluczowe: symulacja fizyczna, symulacja komputerowa, ekstra-wysoka temperatura, pakiet DEFFEM

Article info

Received: 20.06.2018

Reviewed: 2.07.2018

Accepted: 3.12.2018

Abstract

The paper presents computing capabilities of the original software DEFFEM as regards simulating resistance heating/remelting, along with examples of results validating the adopted assumptions of the numerical model. The simulation package is an integral part of the developed methodology, and is based upon the finite element method, the smoothed particle hydrodynamics, and the Monte Carlo method for the full 3D simulation of the selected effects of high temperature steel processing. The formulated thermal model of re-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 12 617 46 37; e-mail: mhojny@metal.agh.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 12 617 46 37; e-mail: mhojny@metal.agh.edu.pl

sistance heating/remelting is based upon the solution of the Fourier-Kirchoff equation. The boundary conditions in the form of heat fluxes have been adopted in accordance with the conditions of a test performed within the conditions of the Gleeble 3800 thermo-physical simulator system. Contact effects and heat transfer to the environment were modelled using a substitute heat transfer coefficient. During the numerical simulation of resistance heating/remelting within the Gleeble 3800 simulator system, the heat accompanying the electric current flow was included in the F-K equation as the power of internal heat sources. When modelling the heat generation resulting from the electricity flow, it was assumed that its equivalent in the numerical model would be a voluminal heat source with its power proportional to the resistance, the square of electric current intensity, and the intensity function selected on the basis of experiments. The DEFFEM software can be used, among others, for analysing and modelling a new energy-saving strand rolling process, in which the solid phase and the liquid phase coexist. This process is improved as compared to the conventional metallurgical process (casting followed by strand cold rolling). The new process is more cost effective and has an advantageous environmental impact, due to the reduction of gas emissions.

Keywords: *physical simulation, computer simulation, extra-high temperatures, DEFFEM package*

1. WSTĘP

W ostatnich latach obserwuje się rozwój zintegrowanych procesów metalurgicznych, w trakcie których następuje odlewanie połączone z walcowaniem pasma na kształt i wymiary zbliżone do kształtu i wymiarów wyrobu finalnego. Podczas gdy odlewanie cienkich pasm połączone z następującym po nim walcowaniem jest prostą, ulepszoną metodą konwencjonalnego procesu walcowania, to walcownie pasma, w którym współistnieje faza stała i ciekła, jest nową technologią. Zagadnienie to wiąże się ściśle z zastosowaniem technologii „soft-reduction”. Walcowanie na zimno, następujące po prostym odlewaniu pasma jest procesem długim i nieekonomicznym energetycznie. Dlatego w aspekcie technologicznym należy prowadzić proces w kierunku uproszczenia lub wyeliminowania niektórych operacji, przez co możliwe staje się obniżenie zużycia energii oraz zmniejszenie kosztów wytwarzania. Wiąże się to również z korzystnym oddziaływaniem na środowisko naturalne ze względu na zmniejszenie emisji gazów. Procesy odlewania i następującego bezpośrednio po nim walcowania mogą być realizowane w różny sposób, w zależności od firm, które je prowadzą; różnią się także szczegółami instalacji przemysłowej. Ponadto obecnie zauważalna jest konieczność regulowanego walcowania odlewanych pasm. W związku z tym wyniki symulacji komputerowej czy też symulacji fizycznej analizowanego procesu będą uży-

1. INTRODUCTION

In recent years, the development of integrated metallurgical processes, in which the strand is cast and rolled to shape and dimensions near the final product, has been observed. Whilst thin strip casting combined with subsequent rolling is a simple, improved method of the conventional rolling process, rolling a strip, where both the solid and the liquid phases coexist, is a new process. This issue is closely related to the application of the “soft-reduction” process. Cold rolling following simple strand casting is a long process and it is not energy efficient. Therefore, in the aspect of technology the process should be developed to simplify or eliminate some operations, to enable the energy consumption and manufacturing costs to be reduced. This also involves an advantageous environmental impact, due to the reduction of gas emissions. The processes of casting immediately followed by rolling may be performed in various manners, depending on the companies that apply them; they also differ in details of industrial installations. In addition, now the need for the controlled rolling of strands cast can be observed. Therefore, results of a computer simulation or a physical simulation of the process analysed will be useful to control the process parameters. The continuous development of new metal processing technologies forces the engineers to look for new

teczne do kontrolowania jego parametrów. Ciągły rozwój nowych technologii przetwórstwa metali wymusza na projektantach poszukiwanie nowych metod oraz narzędzi pozwalających na efektywne wspomaganie prac projektowych. Pierwsze próby projektowania nowych technologii związanych z wysokotemperaturowym przetwórstwem stali wykorzystywały wyłącznie wiedzę uzyskiwaną na drodze eksperymentów. W ostatnich latach w kontekście eksperymentalnej oceny właściwości materiałów pojawiła się nowa kategoria. Nosi ona nazwę „symulacji fizycznej” i jest bezpośrednio związana z nowym typem maszyn sterowanych komputerowo i mających możliwość automatycznej zmiany warunków eksperymentu w trakcie jego trwania według założonego programu. Celem symulacji fizycznej jest odtworzenie w warunkach laboratoryjnych przebiegu zmian temperatury, odkształcenia i naprężenia, jakim poddawany jest materiał w rzeczywistym procesie przemysłowym. W badaniach, poprzez symulacje fizyczne, wykorzystywane są małe próbki wykonane z tego samego materiału, jaki jest stosowany w procesie produkcyjnym. Ocena własności mechanicznych próbek, które poddawane są różnym wariantom symulacji fizycznej, stanowi podstawę do opracowania tzw. „mapy procesu” umożliwiającej wyznaczenie optymalnych parametrów pracy urządzeń linii technologicznej, np. maszyny ciągłego odlewania stali podczas odlewania określonego gatunku stali. Budowane także są przy tym specjalne wykresy, na których zaznacza się obszary o ograniczonej plastyczności [1]. Identyfikacja eksperymentalna tych obszarów pozwala na wprowadzenie korekty parametrów procesu odlewania takich, jak szybkość odlewania czy też szybkość chłodzenia w strefie pierwotnej i wtórnej w taki sposób, aby uniknąć potencjalnego zagrożenia, jakim jest powstawanie pęknięć. Staje się więc możliwe bezpośrednio wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych i transfer ich do praktyki przemysłowej. Dlatego numeryczne modelowanie stanowi bardzo efektywne wspomaganie projektowania tych procesów, pozwalające znacznie obniżyć koszty i czas projektowania.

Sam proces modelowania numerycznego odkształcania stali w ekstremalnie wysokiej temperaturze czy też w warunkach współistnienia fazy ciekłej i stałej, ze względu na swoją specyfikę

methods and tools to allow engineering work to be effectively aided. The first attempts to engineer new technologies related to the high-temperature steel processing only utilised the experimental knowledge. In recent years, a new category has emerged in the context of experimental evaluation of material properties. It is called the “physical simulation” and is directly related to a new type of computer controlled machines, able to change the experiment conditions automatically during the experiment according to the assumed programme. The purpose of the physical simulation is to reconstruct in the laboratory conditions the changes of temperature, strain and stress to which the material is subjected in the actual industrial process. In the research, small samples made of the same material that is applied in the production process are used for physical simulations. The evaluation of mechanical properties of samples, which are subjected to various physical simulation variants, is the basis for developing the so-called “process map”, enabling the optimal parameters of the process line equipment operation e.g. of a steel continuous casting machine during casting a specific steel grade to be determined. Special diagrams are then constructed, where the areas with a limited ductility are identified [1]. The experimental identification of these areas allows the casting process parameters (e.g. casting speed or the cooling rate in the primary and secondary zones) to be adjusted so as to avoid a potential threat of cracks. So, the laboratory test results may be applied directly and transferred to the industrial practice. Therefore, numerical modelling is a very effective aid for engineering these processes, allowing the engineering costs and time to be substantially reduced.

The process of numerical modelling of steel deformation in extreme temperatures, or when the solid and liquid phase coexist, due to its specificity and complexity is amongst the most diffi-

i złożoność, jest jednym z najtrudniejszych w obszarze przetwórstwa metali. Kompleksowy model numeryczny powinien obejmować między innymi zjawiska związane z krzepnięciem stali czy też zjawiska związane z przepływem ciekłej stali w obrębie zestalonego szkieletu [1, 2]. Nie bez znaczenia dla wyniku symulacji numerycznej jest istnienie adekwatnych równań konstytutywnych, pozwalających określić plastyczne zachowanie się stali w wysokiej temperaturze [1, 3]. Kolejnym istotnym aspektem są zjawiska cieplne (wytwarzanie i przepływ ciepła, wymiana ciepła z otoczeniem) czy też powstawanie i kumulacja naprężeń wewnętrznych w trakcie zmiany stanu skupienia [2]. Ponadto złożoność procesu modelowania numerycznego wynika między innymi z:

- złożonego charakteru modelu, wymagającego zastosowania cząstkowych modeli: mechanicznych, cieplnych, mechaniki płynów czy też rozwoju mikrostruktury,
- braku wielu danych podstawowych własności materiałowych i termo-fizycznych,
- bardzo dużych trudności w samej realizacji wysokotemperaturowego eksperymentu,
- i co najważniejsze, w większości przypadków braku możliwości przeprowadzania bezpośrednich pomiarów przemysłowych w celu dodatkowej weryfikacji modeli.

Z drugiej strony stale rosnące zapotrzebowanie na wyroby wysokiej jakości, otrzymywane drogą przeróbki plastycznej metali, zmusza do poszukiwania nowych technologii produkcji, dostarczających produktów najwyższej jakości przy równoczesnym zminimalizowaniu kosztów wytwarzania, w tym kosztów przygotowania nowych technologii [4, 5].

2. MODELOWANIE FIZYCZNE I NUMERYCZNE NAGRZEWANIA OPOROWEGO

2.1. Pakiet symulacyjny DEFFEM

Autorski pakiet symulacyjny projektowany jest zgodnie z zaproponowanym podejściem ONEDES (ONE DEcision Software), opierającym się na założeniu opracowania modułowego zestawu solverów wchodzących w skład pakietu

cult processes in the area of metal processing. A comprehensive numerical model should include effects related to the steel solidification or effects related to the flow of liquid steel within the solidified skeleton [1, 2]. The existence of adequate constitutive equations, allowing the plastic behaviour of steel in extremely high temperatures to be determined, has an impact on the result of a numerical simulation [1, 3]. Thermal effects (heat generation and flow, heat transfer to the environment,) or the formation and cumulation of internal stress during a change of the state of aggregation are another important aspects [2]. The complexity of the numerical modelling process stems from:

- *a complex nature of the model, requiring the application of partial models – mechanical, thermal, fluid mechanics, or the microstructure development,*
- *lack of many data concerning fundamental material and thermo-physical properties,*
- *very serious difficulties in the execution of a high-temperature experiment,*
- *and, most important, in most cases it is not possible to carry out direct additional industrial measurements to verify models.*

On the other hand, the continuously growing demand for high quality products obtained by metal working forces us to look for new manufacturing processes, providing top quality products while minimizing manufacturing costs, including costs of preparing new technologies [4, 5].

2. PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING OF RESISTANCE HEATING

2.1. The DEFFEM simulation package

The original simulation package is designed in line with the proposed ONEDES (ONE Decision Software) approach, which is based upon the assumption of developing a modular set of solvers comprising the DEFFEM package, which

DEFFEM, który umożliwia komputerowe wspomaganie symulacji fizycznych bez konieczności wspomagania się aplikacjami komercyjnymi [1]. Opracowany pakiet dostarcza także narzędzi zorientowanych na pełną identyfikację wybranych parametrów modeli numerycznych w oparciu o dane pochodzące z symulacji fizycznych. Sam proces modelowania z wykorzystaniem opracowanego systemu symulacji DEFFEM opiera się na edycyjnym procesie modelowania z wykorzystaniem tzw. kart kontrolnych. Karty kontrolne są z góry założoną strukturą danych, definiującą np. konkretny model materiału czy też kontrolującą krok całkowania. Cechy charakterystyczne wyróżniające oprogramowanie to między innymi:

1. aplikacja jako narzędzie domyślnie dedykowane do wspomagania symulacji fizycznych realizowanych z wykorzystaniem symulatorów termo-fizycznych serii Gleeble; zawiera m.in. zestawy narzędzi umożliwiającej szybką analizę i obróbkę danych eksperymentalnych na potrzeby ewentualnej symulacji numerycznej;
2. zaawansowane moduły wizualizacji, w tym wizualizacja stereoskopowa dedykowana systemom projekcji 3D Gemini Barco czy też wykorzystanie technologii CUDA do dynamicznej wizualizacji np. pola prędkości (pola wektorowe) solwera hydrodynamiki cząstek rozmytych;
3. modularna budowa kodu źródłowego umożliwiająca szybką adaptację rozwiązań do innej klasy zagadnień;
4. unikatowy moduł symulacji rozrostu ziarna, który ujmuje kompleksowo procesy nagrzewania/przetapiania/chłodzenia, traktując przy tym całą próbkę jako jedną domenę obliczeniową;
5. unikatowe moduły wspomagające projektowanie nowych technologii; rozwiązania niedostępne w żadnej innej dostępnej aplikacji na rynku, np. moduł wspomagający projektowanie ruchu rolek w procesach kształtowania obrotowego (kontrola styczności rolki z materiałem odkształcanym).

2.2. Metodyka badań eksperymentalnych

Symulacje fizyczne procesu nagrzewania oporowego zrealizowano z wykorzystaniem symulatora termo-mechanicznego Gleeble 3800. Ma-

enables computer aid of physical simulations without the need for support with commercial applications [1]. The developed package also provides tools oriented at the full identification of the selected parameters of numerical models on the basis of data from physical simulations. The very process of modelling with the use of the developed DEFFEM package is based upon the editing modelling process using so-called control cards. The control cards constitute a data structure, assumed in advance, defining e.g. a specific material model or controlling the integration step. The following include characteristic features of the software:

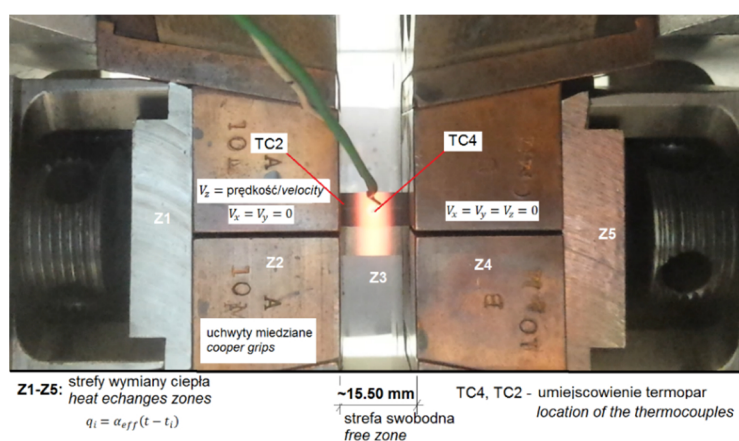
- 1. the application is a tool by default dedicated to aid physical simulations performed with Gleeble thermo-physical simulators; it contains tool sets to enable fast analysis and processing of experimental data for the needs of a potential numerical simulation;*
- 2. advanced visualization modules, including stereoscopic visualization dedicated to the Gemini Barco 3D projection system, or utilization of the CUDA technology for dynamic visualization of e.g. the velocity field (vector field) of the smoothed particle velocity hydrodynamics;*
- 3. the modular construction of the source code to enable fast adaptation of solutions to another issue class;*
- 4. the unique grain growth simulation module, which comprehensively presents heating/remelting/cooling processes, while treating the whole sample as a single solution domain;*
- 5. unique modules aiding engineering new technologies; solutions not available in any other available application in the market, e.g. module aiding design of forming roll movement in the roll forming processes (check of the roll contact with the material deformed).*

2.2. Experimental research methodology

Physical simulations of the resistance heating were carried out with a Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator. Steel S355 was the tested

teriałem badanym była stal S355. Temperatury solidus i likwidus wyniosły odpowiednio 1465°C oraz 1513°C. W badaniach wykorzystano próbki o kształcie sześciociennym o wymiarach 10x10x76 mm (typ A) oraz nowy typ uchwytów miedzianych zaadaptowany do nowego kształtu próbek. Dodatkowo zrezygnowano z zastosowania osłony kwarcowej, której głównym zadaniem jest ochrona wnętrza symulatora przed przypadkowym wyciekami ciekłego metalu w trakcie realizacji eksperymentu. Podejście to pozwoliło na ograniczenie zaburzeń wpływających na mechanizm wymiany ciepła pomiędzy próbką a otoczeniem (wnętrzem symulatora). Na rys. 1 przedstawiono widok układu symulatora Gleeble 3800 z zamontowaną próbką sześciocienną typu A oraz termoparą sterującą w środku strefy nagrzewania próbki (TC4). Dodatkowo w trakcie badań zasadniczych zamontowano dodatkową termoparę w pobliżu styku próbki z uchwytem miedzianym (TC2).

material. The solidus and liquidus temperatures were 1465°C and 1513°C, respectively. Hexahedral samples, with dimensions 10x10x76 mm (Type A), and a new type of copper grips, adopted to the new sample shape, were used in the tests. In addition, the application of a quartz shield, which was primarily to protect the simulator's inside against an accidental leak of liquid metal during the execution of the experiment, was given up. This approach allowed disturbances influencing the mechanism of heat transfer between the sample and the environment (the simulator's inside) to be limited. Fig. 1 presents the view of the Gleeble 3800 simulator system with the Type A hexahedral sample, and a control thermocouple in the middle of the sample heating zone (TC4) installed. Additionally, during the principal tests, an additional thermocouple was installed near the contact place of the sample and the copper grip (TC2).



Rys. 1. Widok układu symulatora Gleeble 3800 z zamontowaną próbką typu A w trakcie realizacji procesu nagrzewania/przetapiania oporowego

Fig. 1. View of the Gleeble 3800 simulator system with the installed Type A hexahedral sample during the execution of the resistance heating/remelting process

W oparciu o wyznaczone temperatury solidus i likwidus badanej stali, a także mając na uwadze, że w wyniku nagrzewania oporowego największa temperatura występuje w rdzeniu próbki, zaproponowano program eksperymentów polegający na nagrzewaniu próbki do temperatury 1400°C ze stałą szybkością nagrzewania równą 20°C/s, a następnie do temperatury 1450°C z szybkością 1°C/s. Kolejnym etapem było kontrolowane chłodzenie z szybkością 10°C/s do temperatury nominalnej równej 1200°C. Ostat-

On the basis of the determined solidus and liquidus temperatures of the steel tested, and also bearing in mind that as a result of resistance heating the highest temperatures occur in the sample core, an experiment programme was proposed, where a sample was heated to a temperature of 1400°C at a constant heating rate of 20°C/s, and next to 1450°C at a rate of 1°C/s. The next stage was controlled cooling at a rate of 10°C/s to a nominal temperature of 1200°C. At the last experiment stage the samples were cooled to the

nim etapem eksperymentu było swobodne chłodzenie próbki w układzie narzędzi symulatora Gleeble 3800 do temperatury otoczenia. W trakcie eksperymentu rejestrowano temperaturę, napięcie oraz natężenie prądu.

2.3. Model numeryczny nagrzewania oporowego

W przyjętym modelu numerycznym rozpatrywano zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła, z występującym wewnętrznym, objętościowym źródłem ciepła. Zagadnienie tej klasy opisywane jest w ogólnym przypadku, dla prostokątnego układu współrzędnych, przez równanie różniczkowe Fouriera-Kirchhoffa [1]:

$$\nabla^T(\lambda \nabla T) + \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau}\right) = 0 \quad (1)$$

Występujące w równaniu (1) Q reprezentuje prędkość generowania ciepła, jakie powstaje w wyniku przepływu prądu; ρ jest gęstością metalu w temperaturze T , a ciepło właściwe c_p reprezentuje jego pojemność cieplną w tejże temperaturze; λ jest wektorem funkcji rozkładu współczynnika przewodzenia ciepła, a τ to czas. Dokładność wyznaczenia pola temperatury w objętości próbki zależy głównie od prawidłowego określenia warunków brzegowych niezbędnych do rozwiązania zagadnienia przepływu ciepła. Na rys. 1 przedstawiono zdefiniowane w modelu numerycznym pięć stref wymiany ciepła, oznaczonych odpowiednio od Z1 do Z5, dla których muszą zostać zdefiniowane różne warunki brzegowe. Strefy oznaczone jako Z2 i Z4 definiują obszar kontaktu próbki z miedzianymi uchwytami. Z perspektywy modelu numerycznego jest to jedna z kluczowych stref, gdzie następuje intensywne odprowadzanie ciepła do narzędzia. Strefy Z1, Z3 i Z5 definiują obszary próbki, gdzie występuje swobodna wymiana ciepła z otoczeniem (wnętrze symulatora). W prezentowanym modelu zdefiniowano warunki brzegowe w każdej z stref w postaci strumieni cieplnych q_i :

$$q_i = \alpha_{eff}(t - t_i) \quad (2)$$

gdzie α_{eff} jest zastępczym współczynnikiem wymiany ciepła dla danej strefy, t_i jest temperaturą medium będącym w kontakcie z obszarem strefy. Warunek początkowy przyjęto w postaci znanego rozkładu temperatury:

ambient temperature in the Gleeble 3800 simulator tool system. During the experiment, the temperature, voltage and electrical current were recorded.

2.3. Numerical model of resistance heating

In the adopted numerical model, the problem of the transient heat conduction with a present internal, voluminal heat source was considered. The problem of this class is described in the general case, for the rectangular system of coordinates, by the Fourier-Kirchhoff differential equation [1]:

$$\nabla^T(\lambda \nabla T) + \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau}\right) = 0 \quad (1)$$

Q present in equation (1) represents the generation rate of heat generated as a result of the electricity flow, ρ is metal density at a temperature T , and the specific heat c_p represents its thermal capacity at this temperature, λ is the vector of heat transfer coefficient distribution function, and τ is time. The accuracy of determination of the temperature field within the sample volume depends primarily on the correct determination of the boundary conditions necessary to solve the heat flow problem. Fig. 1 presents five heat transfer zones defined in the numerical model, designated as Z1 to Z5 respectively, for which different boundary conditions must be defined. Zones identified as Z2 and Z4 define the contact area of the sample and the copper grips. From the perspective of the numerical model it is one of the key zones, where heat is intensively discharged to the tool. Zones Z1, Z3 and Z5 define the sample areas where free heat transfer to the environment (simulator's inside) occurs. In the presented model the boundary conditions were defined in each zone in the form of heat fluxes q_i :

$$q_i = \alpha_{eff}(t - t_i) \quad (2)$$

where α_{eff} is the substitute heat transfer coefficient for a given zone, t_i is the temperature of the medium being in contact with the zone area. The initial condition was assumed in the form of the known temperature distribution:

$$t(r) = t_0(r) \quad (3)$$

W większości prac związanych z tematyką wymiany ciepła zjawiska stykowe modelowane są za pomocą współczynnika wymiany ciepła α . Największym problemem jest odpowiedni dobór tego współczynnika. Wartości podawane w licznych publikacjach różnią się znacznie od siebie, nawet o rząd wielkości. W większości prac wartości współczynników α wyznaczano przez dopasowanie wyników obliczeń temperatury różnymi metodami do rezultatów pomiarów prowadzonych w trakcie procesu. Na potrzeby opracowanego modelu numerycznego przyjęto stałą wartość zastępczego współczynnika α w obszarze kontaktu próbki z uchwytyami miedzianymi 5000 W/m²K (strefy Z2 i Z4). Dla pozostałych stref (Z1, Z3, Z5) przyjęto wartość zastępczego współczynnika wymiany ciepła równą 120 W/m²K. Kolejnym elementem składowym modelu nagrzewania oporowego, jest sposób uwzględnienia wydzielanego ciepła powstającego w wyniku przepływu prądu. Przepływowi prądu przez przewodnik (rezystor) towarzyszy zawsze wydzielanie się ciepła. Oznacza to, że w elementach o pewnej rezystancji energia elektryczna zamienia się w energię cieplną. Podczas modelowania symulacji nagrzewania oporowego ciepło towarzyszące przepływowi prądu zostało uwzględnione w równaniu (1) jako moc wewnętrznych źródeł ciepła Q . Modelując wytwarzanie ciepła w wyniku przepływu prądu, przyjęto, że jego ekwiwalentem w modelu numerycznym będzie objętościowe źródło ciepła o mocy proporcjonalnej do rezystancji R , kwadratu natężenia przepływającego prądu I oraz funkcji intensywności A dobieranej na podstawie eksperymentów [1]:

$$Q = A(\tau)[I^2(\tau)R(T)] \quad (4)$$

W rzeczywistości zarówno rezystancja R , jak i natężenie prądu I są zależne od szeregu parametrów, a w szczególności od temperatury T i czasu τ . W trakcie procesu nagrzewania oporowego następuje zmiana struktury wewnętrznej, co w efekcie prowadzi także do zmiany warunków przewodzenia ciepła i natężenia prądu. Wydajność źródła ciepła jest funkcją rezystancji R , która z kolei zależy od temperatury T . Odpowiada to zmianie rezystancji R w modelu, a wraz z nią zmianie wydajności wewnętrznych źródeł ciepła Q . Ostatnim ważnym czynnikiem niezbęd-

$$t(r) = t_0(r) \quad (3)$$

In most studies related to the subject of heat transfer, contact effects are modelled with the heat transfer coefficient α . The main problem is related to the proper selection of this coefficient. The values given in numerous publications considerably differ from each other, even by an order of magnitude. In most papers the coefficient values α were determined by matching the temperature calculation results obtained with various methods to the results of measurements carried out during the process. For the purposes of the developed numerical model a constant value of the substitute coefficient α in the area of contact of the sample and the copper grips of 5000 W/m²K was assumed (zones Z2 and Z4). For the other zones (Z1, Z3, Z5) the assumed value of substitute heat transfer coefficient was 120 W/m²K. The next component of the resistance heating model is the method of taking into account the emitted heat resulting from the current flow. The flow of electric current through a conductor (resistor) is always accompanied by a heat release. It means that in elements with a certain resistance, the electrical energy turns into the thermal energy. During modelling the simulation of resistance heating the heat accompanying the electrical current flow was included in the equation (1) as the power of internal heat sources Q . When modelling the heat generation resulting from the electricity flow, it was assumed that its equivalent in the numerical model would be a voluminal heat source with its power proportional to the resistance R , the square of electric current intensity I , and the intensity function A selected on the basis of experiments [1]:

$$Q = A(\tau)[I^2(\tau)R(T)] \quad (4)$$

In fact, both the resistance R , and the current intensity I , depend on a number of parameters, in particular on temperature T and time τ . During the resistance heating process, the internal structure changes, which ultimately also leads to a change in the electricity conduction conditions and the current intensity. The heat source efficiency is a function of resistance R , which in turn depends on temperature T . It corresponds to a change in resistance R in the model, and thus a change in the efficiency of internal heat sources Q . The last important factor necessary to solve the

nym do rozwiązania zagadnienia przepływu ciepła jest odpowiedni dobór zależności uwzględniających zmiany podstawowych własności termofizycznych w funkcji temperatury. Niezbędne charakterystyki termofizyczne na potrzeby symulacji numerycznych zostały wyznaczone na podstawie składu chemicznego badanej stali S355 z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania JmatPro v.8.

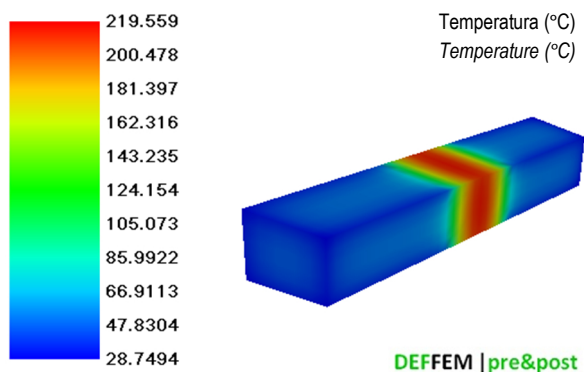
2.4. Przykładowe wyniki

Symulacje numeryczne zrealizowano zgodnie z przyjętym planem eksperymentalnym przedstawionym w podrozdziale 2.2. Na rys. 2–4 przedstawiono otrzymane pola temperatury dla trzech wybranych etapów symulacji tj. 10, 20 i 120 sekundy procesu nagrzewania. Z kolei na rys. 5 przedstawiono pole temperatury dla 145 sekundy kontrolowanego chłodzenia (etap przed rozpoczęciem swobodnego chłodzenia). Analizując otrzymane wyniki, można zaobserwować formujący się intensywny gradient temperatury wzdłuż strefy nagrzewania całej próbki. Obszary znajdujące się w bezpośrednim oddziaływaniu uchwytych miedzianych osiągają maksymalną temperaturę na powierzchni nieprzekraczającą 68°C (rys. 4). Obszar swobodny próbki (strefa Z3), który charakteryzuje się największą intensywnością wydzielanego ciepła, osiąga wartości temperatury z przedziału $950\text{--}1450^{\circ}\text{C}$ w momencie osiągnięcia maksymalnej nominalnej temperatury próby równej 1450°C (rys. 4). Analizując otrzymane wyniki pod kątem rozkładu temperatury na przekroju poprzecznym, stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury nominalnej nagrzewania (wskazanie sensora numerycznego na powierzchni próbki) i osiąganą maksymalną temperaturę w rdzeniu próbki (wskazanie sensora numerycznego rdzenia próbki) następuje wzrost różnicy temperatury pomiędzy wskazaniem obydwu sensorów. Po 10 sekundach nagrzewania różnica pomiędzy powierzchnią próbki a rdzeniem wyniosła około 20°C , uzyskując maksymalną wartość około 39°C w końcowym etapie wolnego nagrzewania (szybkość nagrzewania równa 1°C/s), a tuż przed realizacją etapu kontrolowanego chłodzenia (szybkość chłodzenia równa 10°C/s). Różnica ta zmalała do około 22°C (rys. 5) po schłodzeniu do temperatury nominalnej równej 1200°C .

heat flow problem is the correct selection of dependences taking into account the changes in the basic thermo-physical properties as a function of temperature. The necessary thermo-physical characteristics for the needs of the numerical simulation were determined with commercial software JMatPro v.8. on the basis of chemical composition of the steel S355 tested.

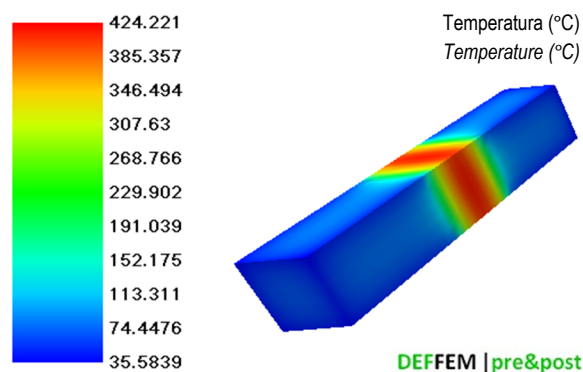
2.4. Examples of results

The numerical simulations were performed in accordance with the assumed experimental schedule presented in section 2.2. Fig. 2. to Fig. 4 present the obtained temperature fields for three selected simulation stages, i.e. after 10, 20 and 120 seconds of the heating process. On the other hand Fig. 5 presents the temperature field for 145 seconds of controlled cooling (the stage before starting free cooling). Analysing the obtained results one may observe a forming intensive temperature gradient along the heating zone of the whole sample. The areas located within the immediate impact of the copper grips achieve their maximum temperature at the surface not exceeding 68°C (Fig. 4). The free area of the sample (zone Z3), which is characterised by the highest intensity of the heat emitted, achieves the temperatures between 950°C and 1450°C at the time of achieving the maximum nominal test temperature of 1450°C (Fig. 4). Analysing the obtained results for the temperature distribution it has been found that as the nominal heating temperature increases, the temperature difference between the sample surface (reading of the numerical sensor at the sample surface) and its core (reading of the numerical sensor at the sample core) increases. After 10 seconds of heating the difference between the sample surface and its core was about 20°C , having reached its maximum value of about 39°C at the final stage of slow heating (heating rate of 1°C/s), and just before the controlled cooling stage (cooling rate of 10°C/s). This difference decreased to about 22°C (Fig. 5) after cooling to a nominal temperature of 1200°C .



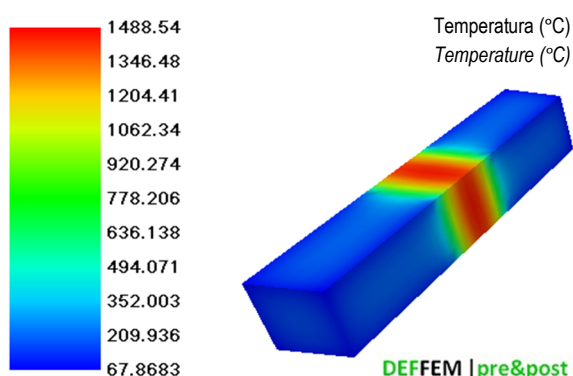
Rys. 2. Pole temperatury w trakcie procesu nagrzewania z szybkością 20°C/s (10 sekunda procesu)

Fig. 2. The temperature field during the process of heating at a rate of 20°C/s (10th second of the process)



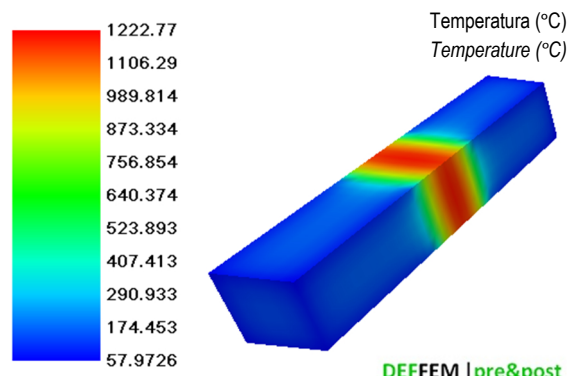
Rys. 3. Pole temperatury w trakcie procesu nagrzewania z szybkością 20°C/s (20 sekunda procesu)

Fig. 3. The temperature field during the process of heating at a rate of 20°C/s (20th second of the process)



Rys. 4. Pole temperatury w trakcie procesu nagrzewania z szybkością 1°C/s (120 sekunda procesu)

Fig. 4. The temperature field during the process of heating at a rate of 1°C/s (120th second of the process)

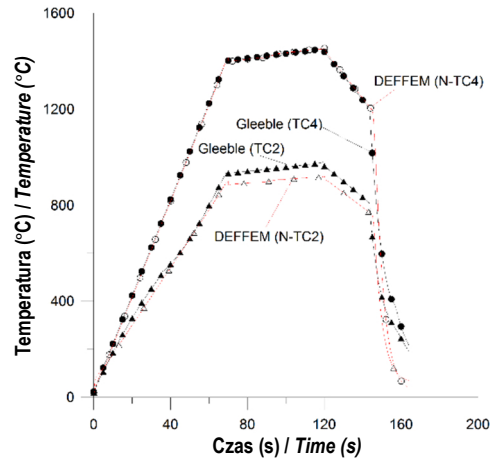


Rys. 5. Pole temperatury w trakcie procesu kontrolowanego chłodzenia z szybkością 10°C/s (145 sekunda procesu)

Fig. 5. The temperature field during the process of controlled cooling at a rate of 10°C/s (145-th second of the process)

Przebiegi zmian temperatury otrzymanej na drodze symulacji fizycznej i numerycznej (rys. 6) cechują się dobrą zgodnością. Na etapie szybkiego nagrzewania (20°C/s) wskazania termopar (TC2 i TC4) oraz sensorów numerycznych (N-TC2 i N-TC4) są praktycznie zbliżone. Nieznaczące różnice pojawiają się na etapie wolnego nagrzewania (1°C/s) oraz kontrolowanego chłodzenia (10°C/s) dla wskazań termopary TC2 oraz sensora numerycznego N-TC2 w pobliżu styku próbka–uchwyt miedziany.

The changes of temperature obtained by physical and numerical simulations (Fig. 6) show a good compliance. At the stage of fast heating (20°C/s) the readings of thermocouples (TC2 and TC4) and numerical sensors (N-TC2 and N-TC4) are practically similar. Insignificant differences appear at the slow heating stage (1°C/s) and the controlled cooling stage (10°C/s) for the readings of thermocouple TC2 and numerical sensor N-TC2 near the sample–copper grip contact.



Rys. 6. Przebieg zmian temperatury otrzymany w wyniku symulacji fizycznej oraz numerycznej według wskazań termopar i sensorów numerycznych
 Fig. 6. Changes in temperature obtained by physical and numerical simulations according to the readings of thermocouples and numerical sensors

Z kolei etap swobodnego chłodzenia w układzie narzędzi cechuje się dobrą zgodnością pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi do zakresu temperatury około 600°C. Poniżej tej temperatury można zaobserwować znaczne różnice pomiędzy wskazaniami termopar i sensorów numerycznych. Wynika to z faktu przyjęcia w rozwiązaniu numerycznym stałej wartości zastępczego współczynnika wymiany ciepła. Można wnioskować, że wprowadzenie modyfikacji w modelu numerycznym, polegającej na uwzględnieniu zmiany zastępczego współczynnika wymiany ciepła w funkcji temperatury, pozwoli na dokładniejsze odwzorowanie przebiegów zmian temperatury na etapie swobodnego chłodzenia.

3. PODSUMOWANIE

Opracowany pakiet symulacyjny DEFFEM może zostać wykorzystany do wspomagania symulacji fizycznych realizowanych z wykorzystaniem jednostek serii Gleeble np. szacowania rozkładu temperatury w objętości próbki, szacowania lokalnych szybkości chłodzenia w dowolnym punkcie objętości próbki, co umożliwi modelowanie mikrostruktury pod względem składu fazowego w oparciu o wyznaczone „wysokotemperaturowe wykresy CTPc”, symulacje krzepnięcia, odkształcania wysokotemperaturowego czy też symulacje rozrostu ziarna. Dłazszy rozwój opro-

In turn, the free cooling stage in the tool system features a good compliance between the measured and calculated values for the temperature of about 600°C. One can observe significant differences between the readings of thermocouples and numerical sensors below this temperature. This results from the fact that a constant value of the substitute heat transfer coefficient was assumed in the numerical solution. One can conclude that modifying the numerical model by taking into account the change of the substitute heat transfer coefficient as a function of temperature will allow the temperature changes to be better reproduced at the stage of free cooling.

3. SUMMARY

The developed simulation package DEFFEM may be utilized to aid physical simulations performed with Gleeble series units, e.g. to estimate the temperature distribution within the sample volume, to estimate local cooling rates at any point within the sample volume, which in conjunction with new simulator modules will enable the microstructure to be modeled in terms of the phase constitution on the basis of the established “high-temperature CCT diagrams”, to simulate the solidification, high-temperature deformation, or grain growth. The further development of the

gramowania ze względu na swoją specyfikę i pierwotne zastosowanie do modelowania wysokotemperaturowego przetwarzania stali, jak też i przyjęte modele matematyczne dla solverów bazujących na metodzie elementów skończonych, został ukierunkowany pod kątem rozwoju o procesy kucia na gorąco w matrycach zamkniętych czy też procesy plastycznego formowania z dużymi odkształceniami. Z drugiej strony nadal będą rozwijane rozwiązania bazujące na metodzie cząstek rozmytych, ukierunkowane na procesy odlewania i krzepnięcia w kontekście między innymi identyfikacji defektów czy też określania złożonych warunków cieplnych.

PODZIĘKOWANIA

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki (2012–2017).
Decyzja numer: DEC 2011/03/D/ST8/04041.

LITERATURA

- [1] Hojny M. 2018. *Modeling steel deformation in the semi-solid state*. Szwajcaria: Springer International Publishing.
- [2] Zhang L., H. Shen, Y. Rong. 2007. „Numerical simulation on solidification and thermal stress of continuous casting billet in mold based on meshless methods”. *Materials Science and Engineering* 466 (1–2): 71–78.
- [3] Kalaki A, M. Ketabchi. 2013. „Predicting the rheological behavior of AISI D2 semi-solid steel by plastic instability approach”. *American J of Mat Eng and Tech* 1 (3): 41–45.
- [4] Haga T, S. Suzuki. 2003. „Study on high-speed twin-roll caster for aluminum alloys”. *J Mat Proc Tech* 143–144 (1): 895–900.
- [5] Haga T., K. Tkahashi, M. Ikawa. 2004. „Twin roll casting of aluminum alloy strips”. *J Mat Proc Tech* 153–154 (2): 42–47.

software, due to its specificity and original application to modelling high-temperature steel processing, as well as the assumed mathematical models for solvers based upon the finite element method, has been focused on the development of hot die forging processes, or plastic forming processes with large strains. On the other hand, solutions based upon the smoothed particle hydrodynamics focused on casting and solidifying processes will continue to be developed in the context including the identification of defects or determination of complex thermal conditions.

ACKNOWLEDGEMENTS

*The project has been supported by the Polish National Science Centre.
Decision number: DEC-2011/03/D/ST8/04041.*

REFERENCES

- [1] Hojny M. 2018. *Modeling steel deformation in the semi-solid state*. Switzerland: Springer International Publishing.
- [2] Zhang L., H. Shen, Y. Rong. 2007. “Numerical simulation on solidification and thermal stress of continuous casting billet in mold based on meshless methods”. *Materials Science and Engineering* 466 (1–2): 71–78.
- [3] Kalaki A, M. Ketabchi. 2013. “Predicting the rheological behavior of AISI D2 semi-solid steel by plastic instability approach”. *American J of Mat Eng and Tech* 1 (3): 41–45.
- [4] Haga T, S. Suzuki. 2003. “Study on high-speed twin-roll caster for aluminum alloys”. *J Mat Proc Tech* 143–144 (1): 895–900.
- [5] Haga T., K. Tkahashi, M. Ikawa. 2004. “Twin roll casting of aluminum alloy strips”. *J Mat Proc Tech* 153–154 (2): 42–47.