

**Zastosowanie Zintegrowanego Systemu Modelowania Materiałów i Procesów
Inżynierskich (ICME) w odlewnictwie**

**The application of Integrated Computational Materials Engineering (ICME)
in foundry practice**

Stanisław Pysz¹, Jarosław Piekło²

¹ Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

¹ Foundry Research Institute, Design and Prototyping Center, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

² AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

E-mail: stanislaw.pysz@iod.krakow.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono najnowocześniejsze tendencje w zakresie wykorzystania symulacji komputerowej w procesie opracowywania nowych rozwiązań, w tym również rozwiązań w branży odlewniczej. Opisano działanie Zintegrowanego Systemu Modelowania Materiałów i Procesów Inżynierskich (ang. Integrated Computational Materials Engineering – ICME) zaakceptowanego w roli wiodącego narzędzia w opracowywaniu nowych materiałów, konstrukcji oraz technologii w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, okrętowym, energetyce w USA oraz w Unii Europejskiej. Prześledzono funkcjonowanie zintegrowanego systemu w procesie opracowywania konstrukcji odlewanej przez modelowanie stanów naprężeń podczas pracy odlewu, modelowanie właściwości stopu oraz samej technologii. Przedstawiono zagrożenia i korzyści ze stosowania systemu.

Słowa kluczowe: odlew, ICME, Integrated Computational Materials Engineering, modelowanie

Abstract

This article presents the latest tendencies within the scope of the application of computer simulation in the process of developing new solutions, including solutions in foundry practice. The functioning of Integrated Computational Materials Engineering is described, which is regarded as a leading tool for developing new materials, constructions and technologies in aerospace, automotive and maritime industries in the USA and the European Union. The functioning of ICME was studied in the process of developing a cast construction by modelling stresses of the cast at work, modelling alloy properties and the technology itself. Threats and benefits resulting from the application of ICME are also presented.

Key words: cast, ICME, Integrated Computational Materials Engineering, modelling

Wstęp

Metody przyspieszające tempo odkrywania i wdrażania zaawansowanych materiałów oraz technologii będą miały decydujące znaczenie dla osiągnięcia globalnej konkurencyjności w XXI wieku. Wydłużony czas wprowadzania nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych jest częściowo wynikiem oparcia prac nad nowymi materiałami na metodzie prób i błędów. Znaczną część procesu projektowania i testowania materiałów zajmują obecnie czasochłonne i powtarzane wielokrotnie eksperymenty.

Introduction

Methods which increase the speed of discovering and implementing advanced materials and technologies will have a decisive importance to achieve global competitiveness in the 21st century. Prolonged time connected with the introduction of new materials and design solutions partially results from the trial and error method applied to developing new materials. A considerable part of the design and testing processes is currently taken by time-consuming and multiple trials. Some of these might be potentially conducted

Niektóre z nich mogą być potencjalnie prowadzone za pomocą potężnych i precyzyjnych narzędzi obliczeniowych, choć należy zaznaczyć, że odpowiedni poziom dokładności w takich symulacjach jeszcze nie został osiągnięty. Jednakże wraz z powstawaniem dokładniejszych modeli opisujących przebieg procesów fizykochemicznych, w tym np. proces przechodzenia z fazy ciekłej do stałej podczas krzepnięcia, jak również modeli do analiz naprężeniowych oraz możliwości transferu informacji z jednego modelu do drugiego, zrodziła się konieczność integracji baz danych w jeden ciąg twórczego inżynierskiego projektowania, wykorzystujący w analizach wyniki najnowszych badań materiałowych.

Proces ten nazwano Zintegrowanym System Modelowania Materiałów i Procesów Inżynierskich (ang. *Integrated Computational Materials Engineering* – ICME).

Istota procesu polega na zarządzaniu całością zagadnień projektowych, które do tej pory były rozproszone w różnych jednostkach badawczych i biurach konstrukcyjnych. Coraz częściej odchodzi się od badań nieumocowanych w konkretnej aplikacji przemysłowej. W publikacjach dotyczących systemu ICME [1–6] podkreśla się, że dotychczasowe słabe umocowanie wyników badań w aplikacjach przemysłowych oraz ich rozproszenie jest przyczyną nadmiernych kosztów i bardzo długiego czasu ich wdrażania. Z założenia system ICME ma obniżyć koszty opracowania nowych rozwiązań oraz skrócić czas wdrożenia. Zastosowanie systemu ICME do wdrożenia nowej generacji silnika firmy Ford, można prześledzić w artykule R.J. Menne [4]. System ICME spełnia jeszcze dodatkowe funkcje, a mianowicie łączy społeczność badaczy ze społecznością inżynierów w ściślejszą więź. Szczególnie jest to ważne dla społeczności inżynierskiej, która ostatecznie podejmuje decyzje o wdrożeniu i uruchomieniu produkcji na podstawie otrzymanych wyników badań. Implementacja wyników badań jest w takim systemie od razu weryfikowalna, gdyż jest połączona z procesem technologicznym, jak i procesem eksploatacji, a nawet z recyklingiem.

Aby w pełni korzystać z takich systemów, dąży się do tworzenia ogólnodostępnych baz, które pozwolą na szybkie wyszukiwanie i porównywanie danych a w konsekwencji na przyspieszenie etapu weryfikacji projektu i rozpoczęcia produkcji. Zwiększa to przejrzystość, jak również wiarygodność wyników badań. Proces wzajemnych powiązań badań i aplikacji przemysłowych nabiera obecnie innego wymiaru, przechodząc z liniowego, który cechuje się kolejnymi sekwencjami zdarzeń (badania, weryfikacja, prototyp, certyfikacja, wdrożenie) do zależności kołowych, w których wszystkie elementy wzajemnie się zająbiają. Status znaczenia takiego podejścia do opracowania nowych rozwiązań, w tym badań nad rozwojem nowych materiałów, został zaprezentowany w dokumencie pt.

with the use of powerful and precise calculation tools, though it should be stressed that an accurate level of precision in such simulations has not yet been reached. However, together with the creation of more detailed models which describe the course of physical-chemical processes, including e.g. the process of transformation from the liquid phase to the solid phase during solidification, as well as models for the analysis of stress and the possibility to transmit information from one model to another, a necessity arose to integrate databases into one sequence of creative engineering design, which utilises in its analyses the results of the latest materials research.

This process was called Integrated Computational Materials Engineering – ICME.

The essence of this process consists in managing all design issues, which up to now have been dispersed in different research centres and design offices. Invalidated research in a specific industry application is more and more often left out. In publications regarding ICME [1–6] it is stressed that previous weak validation of research results in industry applications and their dispersion are the reasons for excessive costs and length of time for their implementation. By definition, ICME is supposed to decrease costs of developing new solutions and reduce the time of implementation. The application of ICME to implement a new generation of engine by Ford may be found in the article by R.J. Menne [4]. ICME has additional functions, that is, it creates a tighter bond between the community of researchers and the community of engineers. It is especially important for the community of engineers, who make final decisions on the implementation and launch of production on the basis of achieved results. The implementation of research results is immediately verifiable in such a system, as it is connected both with the technological and exploitation processes, and even with recycling.

In order to fully make use of such systems, there is a tendency to create open-access databases which would enable quick searching and comparing data and as a consequence an accelerated stage of design verification and launch of production, which increases transparency and reliability of research results. The process which interrelates research and industry applications is taking on a different dimension, coming from a linear process which is characteristic of consecutive sequences of events (research, verification, prototype, certification, and implementation) to circular interrelations, in which all the elements overlap. The significance of such an approach to developing new solutions, including research to develop new materials, was presented in a publication entitled "Materials Genome Initiative for Global Competitiveness" [1].

„Materials Genome Initiative for Global Competitiveness” [1].

Funkcjonowanie Zintegrowanego Systemu Modelowania Materiałów i Procesów Inżynierskich (ICME)

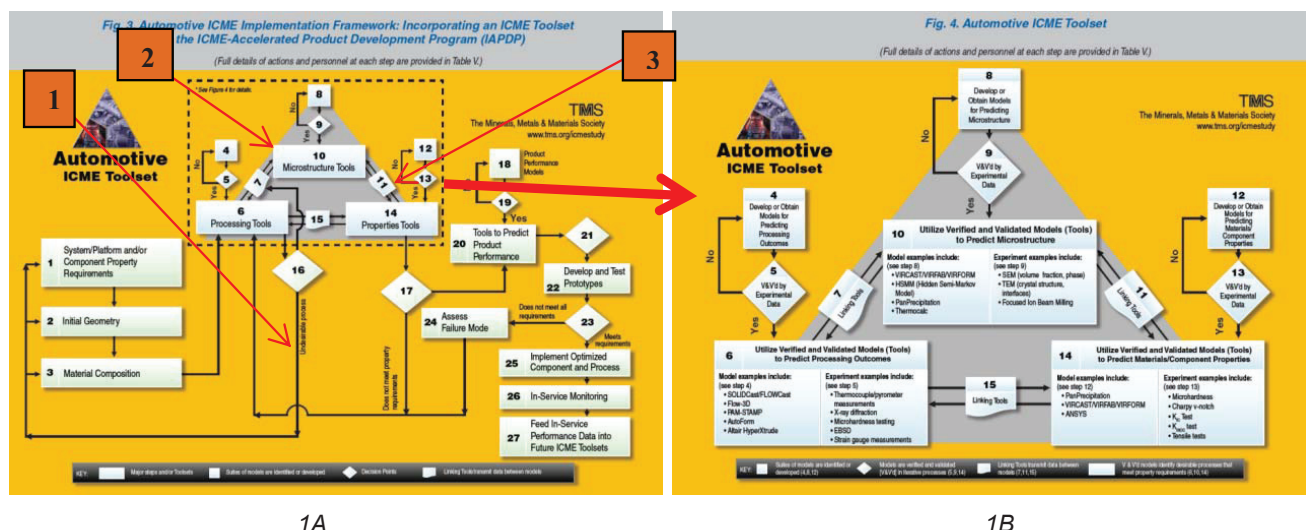
Przedstawiony na rysunku 1 schemat funkcjonowania systemu ICME, wprowadzany w przemyśle motoryzacyjnym USA, jak również w przemyśle lotniczym oraz morskim, uwzględniając specyfikę branży, zakłada sprzężenie zwrotne na każdym etapie projektowania [2]. Schemat składa się z trzech głównych elementów:

1. przepływu informacji i danych, obrazowany przez strzałki, które – jak można zauważyć – wskazują, że jest to system dwukierunkowy,
2. rozwoju konstrukcji z wykorzystaniem narzędzi do analizowanych procesów w skali mikro i makro,
3. decyzyjnego.

The functioning of Integrated Computational Materials Engineering (ICME)

Presented in Figure 1 framework of ICME functioning, implemented in the American automotive, aviation, and maritime industries, taking into account the specification of the industry branch, assumes feedback at each stage of design [2]. The framework consists of three main elements:

1. flow of information and data, marked with arrows, which – as you may notice – indicate that it is a two-way system,
2. development of the construction with the use of tools for the analysed processes in micro and macro scales,
3. decision-making.



Rys. 1. Schemat funkcjonowania systemu ICME wprowadzany w przemyśle motoryzacyjnym w USA przy wdrażaniu nowych rozwiązań (1A) oraz proces rozwoju konstrukcji od badań materiałowych przez analizę konstrukcji i technologii (1B) [2]

Fig. 1. Framework of functioning ICME which was introduced in the automotive industry in the USA with the implementation of new solutions (1A) and the process of construction development from materials research to the analysis of constructions and technologies (1B) [2]

Kluczowe znaczenie przy opracowaniu nowych rozwiązań ma obszar obejmujący analizę materiału, konstrukcji i procesu technologicznego, który w schemacie obejmuje punkty oznaczone od numeru 6 do 14 (rys. 1B). Ważne są stosowane narzędzia do przeprowadzania analiz zarówno komercyjne (JMatPro, Pandat, Abaqus, Ansys, MAGMASoft, ProCAST, Flow3D itp.), jak i własne opracowywane programy. Cechą charakterystyczną jest możliwość przekazywania danych, czyli tworzenie mostów (numery 7, 11 i 14, rys. 1) pomiędzy różnymi programami.

The key significance while developing new solutions is the area which includes the analysis of material, construction, and technological process, which in the framework includes points numbered 6–14 (Fig. 1B). The applied tools for conducting analyses, both commercial (JMatPro, Pandat, Abaqus, Ansys, MAGMASoft, ProCAST, Flow3D etc.), and self-developed software are of importance. A characteristic feature is the possibility to transmit data, that is creating bridges (numbers 7, 11 and 14, Fig. 1) between different software programs. The process

Proces tworzenia mostów pomiędzy kolejnymi fazami analiz numerycznych opracowano i przedstawiono w pracach [5, 6]. Właściwości otrzymane podczas analizy struktury stopu na poziomie mikroskali, w tym np. powstawanie faz międzymetalicznych, mikroporowatości, ujęte ilościowo powinny być implementowane do programów, które wykorzystywane są do analizy zjawisk w skali makro, podczas procesu technologicznego oraz eksploatacji, analizowanej konstrukcji.

Na schemacie 1A widać wyraźnie, że cały system zaczyna funkcjonować od wyznaczenia wymagań i właściwości opracowywanej konstrukcji. Głównym celem jest wprowadzenie wyrobu na rynek, dlatego badania, w tym badania podstawowe, są temu podporządkowane i wkomponowane w obszar rozwoju konstrukcji (rys. 1B).

Schemat (rys. 1) pokazuje również, że proces opracowania nowego produktu wdrażanego do realizacji jest układem dwukierunkowym, albowiem produkt może być ponownie zwrócony do analizy, po przeprowadzeniu symulacji działania w pełnej skali, jeżeli jego negatywna ocena wymaga wprowadzenia zmian. Ponieważ takie testy w przeważającej części są wykonywane z wykorzystaniem obliczeń numerycznych, powrót do analizy dotyczącej np. zmiany materiału czy też podniesienia parametrów technologicznych nie wymaga dużych nakładów finansowych na badania doświadczalne. W przypadku znalezienia słabego ogniwa w nowym prototypie np. w odlewie, powrót do ponownej analizy może obejmować zmiany tworzywa, procesu technologicznego lub ewentualnie samej geometrii odlewu.

Istotną przesłanką do integracji procesów numerycznych jest rozwój baz danych materiałowych i dążenie do ich upowszechnienia, jak również coraz doskonalsze algorytmy stosowane w obliczeniach symulacyjnych. Przekłada się to na zmniejszenie kosztów wprowadzania nowych rozwiązań.

Technologie i procesy odlewnicze w systemie ICME

Decyzja o zastosowaniu elementu odlewane go w opracowywanej konstrukcji jest podejmowana w obszarze, w którym określone są właściwości i parametry użytkowe produktu. W przedstawionym na rysunku 1 schemacie, proces ten jest realizowany w punktach 1, 2 i 3. Dalsza analiza konstrukcji realizowana jest w punktach od 4 do 14, w których rozwijane są badania w zakresie doskonalenia samego materiału, jak i procesu technologicznego z równoczesną kontrolą i sprawdzaniem spełnienia zakładanych parametrów, otrzymanego wirtualnie odlewu podczas eksploatacji analizowanej konstrukcji. W takim systemie wirtualny odlew jest „dynamiczny”, gdyż w czasie prowadzenia prac może się zmieniać jego konstrukcja, tworzywo oraz proces technologiczny.

of creating bridges between consecutive stages of numerical analyses was developed and presented in papers [5, 6]. The properties obtained during the analysis of the alloy's structure at the level of micro scale, including, for example, the creation of intermetallic compounds, microporosity, presented quantitatively should be implemented into programs which are used to analyse phenomena at the macro scale, during the technological and exploitation processes of the analysed construction.

In framework 1A it can be clearly seen that the entire system starts functioning the moment that the requirements and properties of the construction are fed in. The main aim is to launch a product that is why research, including the basic research, is conformed to and composed into the area of construction development (Fig. 1B).

The framework (Fig. 1) also shows that the process of developing a new product which is implemented for execution is a two-way system, since the product may be once again referred to analysis, after conducting a simulation of functioning at the full scale, if its negative assessment requires alternations. Because such tests are mostly made with the use of numerical calculations, a return to analysis regarding, for example, a change of the material, or the improvement of technological parameters does not require much financial outlay on experimental research. In case of finding the weak link in a new prototype, e.g. in a cast, a return to yet another analysis may involve changes of material, technological process or possibly geometry of the cast.

The rationale behind the integration of numerical processes is developing material databases and making them commonly available, as well as more and more perfect algorithms used in simulation calculations. It translates into a reduction in costs of implementing new solutions.

Casting technologies and processes in ICME

The decision to apply a cast element in a developed construction is made in the area, in which the utility properties and parameters of a product are defined. In the framework presented in Figure 1 this process is executed in points 1, 2 and 3. A further analysis of the construction is made in points from 4 to 14, in which research is developed within the scope of refining the material itself, the technological process with simultaneous control and check whether the assumed parameters of a virtually created cast during the exploitation of the analysed construction are met. In such a system a virtual cast is “dynamic” because during works on the cast its construction, material and technological process may be altered. Nevertheless, it has to meet the assumption made for a specific construction, which is verified at each stage of works.

Musi on jednak spełniać przyjęte dla danej konstrukcji założenia, co jest weryfikowane na każdym etapie prac. W obecnie stosowanym modelu prowadzenia prac badawczo-rozwojowych wyniki weryfikowane są na końcu liniowego ciągu analiz konstrukcyjnych.

Opracowanie i analiza konstrukcji

Specyfika elementów odlewanych polega na tym, że zazwyczaj są częściami składowymi konstrukcji, np. głowice, bloki silników. Przykłady takie występują również w innych gałęziach przemysłu: energetyce, przemyśle stoczniowym, lotniczym, maszynowym. Opracowanie konstrukcji odlewu musi być ujęte w procesie analizy całości konstrukcji z uwzględnieniem wszystkich parametrów. Głównymi parametrami wyznaczającymi możliwość wprowadzenia produktu na rynek są: czas realizacji projektu, koszt wykonania, mała masa i długi czas eksploatacji. Na przykład w energetyce dąży się do tego, aby nowe turbiny miały wydłużony cykl eksploatacji i większą wydajność. Wymusza to szukanie nowych materiałów zdolnych do pracy w temperaturze 700°C, a nie jak do tej pory 630°C. Z drugiej strony powinien ulec wydłużeniu, tzw. czas resursu.

Znaczące zmiany dokonały się w sposobie podejścia do projektowania konstrukcji, w którym możemy wyróżnić dwie fazy: wstępną, gdy zbiór rozwiązań dotyczących kształtu jest dowolny a ograniczenia związane są z wymiarami gabarytowymi, warunkami brzegowymi i funkcjonalnością przedmiotu, tzw. optymalizacja topologiczna, oraz drugą, gdy optymalizowane są poszczególne węzły konstrukcyjne. Metody te bazują na matematycznym modelu konstrukcji zapisanym w systemie CAD i wykorzystują metodę elementów skończonych MES w celu poszukiwania ekstremalnych wartości funkcji celu, czyli minimum masy analizowanego obiektu, przy zachowaniu założonych współczynników bezpieczeństwa. Jako znane można tu wymienić: metodę *Soft Kill Option* (SKO) [7, 8] wykorzystywaną we wstępnej fazie projektowania oraz metodę *Computer Aided Optimization* (CAO), optymalizującą istniejące węzły konstrukcyjne. W metodzie SKO decyzja o eliminowaniu lub pozostawieniu analizowanych obszarów konstrukcji powinna przebiegać według określonego kryterium wytrzymałościowego, za które uważa się osiągnięcie przez materiał pewnego stanu wyężenia. Rozważając różnego rodzaju tworzywa, wyznaczenie naprężenia zredukowanego powinno opierać się o różne hipotezy wyężeniowe. Ma to szczególne znaczenie w przypadku analizy stopów odlewniczych o szerokim spektrum właściwości mechanicznych, np.: od kruchego żeliwa szarego z grafitem płatkowym do plastycznych żeliw ferrytycznych z grafitem kulkowym i żeliwa ADI o silnie zróżnicowanych właściwościach sprężysto-plastycznych, zależnych od sposobu prowadzenia obróbki cieplnej. Projektowanie konstrukcji z wyko-

In the currently used model of conducting research and development works, the results are verified at the end of a linear sequence of construction analyses.

The development and analysis of a construction

The specificity of cast elements is that they are usually components of a construction, e.g. a cylinder head, engine block. Such examples can be also found in other branches of the industry: power engineering, shipbuilding, aviation, machine-building. The development of a cast construction must be placed in the process of the analysis of the whole construction, taking into account all parameters. The main parameters which set the possibility to launch a product are: the time of project execution, the cost of execution, light weight, and length of time of exploitation. For instance, in power engineering the trend is for turbines to have extended time of exploitation and higher efficiency, which forces researchers to look for new materials capable of functioning at the temperature of 700°C and not at 630°C as it has been so far. What is more, the overhaul life should be longer.

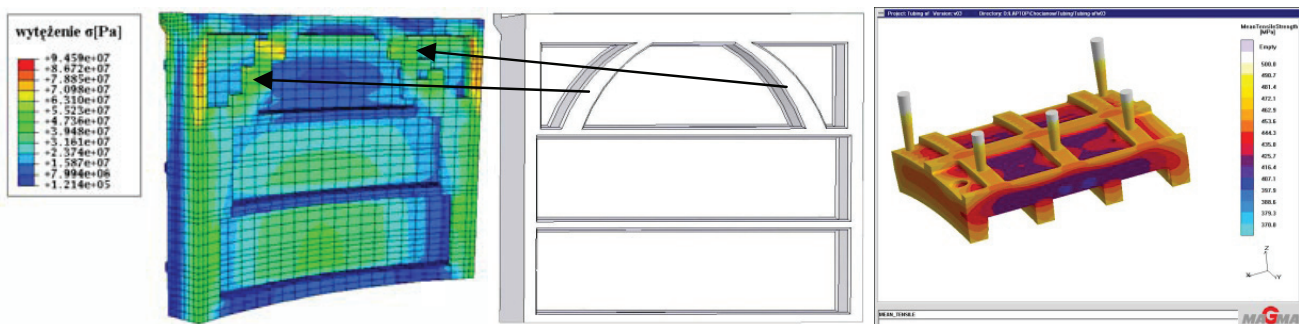
Considerable changes were made in the approach to construction designing, in which we can distinguish two stages: the initial stage, where the set of solutions which regard the shape is unlimited and the limitations connected with outline sizes, boundary conditions and the functionality of the element, the so-called topological optimisation, and the second stage, where specific structural nodes are optimised. These methods are based on a mathematical model of construction used in the CAD system and use the finite element method (FEM) in order to look for extreme values of the goal function that is the minimum mass of the analysed object, which would at the same time meet the assumed safety parameters. One of the well-known methods is: *Soft Kill Option* (SKO) [7, 8] used in the initial stage of designing and *Computer Aided Optimization* (CAO), which optimises the existing structural nodes. In the SKO method the decision to eliminate or leave the analysed areas of the construction should be made according to a defined strength criterion, which is understood as a specific state of strain achieved by the material. While considering different types of material, the definition of equivalent stress should be based on various strain hypotheses. It is especially important in case of the analysis of cast alloys with a wider spectrum of mechanical properties, e.g.: from fragile flake graphite cast iron to flexible ferritic spheroidal graphite cast iron and Austempered Ductile Iron (ADI) with strongly differentiated flexibility-plasticity properties which result from the manner of heat treatment. Designing a construction with the use of numerical methods enables to identify the areas with high stresses and the connection with CAO and SKO methods enables to delete the material excess from the areas where there are not any high values

rzystaniem metod numerycznych pozwala na identyfikację obszarów o wysokich naprężeniach, a połączenie z metodami CAO i SKO umożliwia usuwanie nadmiaru materiału z obszarów, gdzie nie występują duże wartości naprężeń, przy zachowaniu założonych eksploatacyjnych właściwości konstrukcji.

W artykule [9] przedstawiono optymalizację topologiczną konstrukcji odlewu tubingu opartą o analizę linii sił i eliminację zbędnego materiału niebiorącego udziału w procesie ich przenoszenia podczas eksploatacji (rys. 2). Dodatkowe żebra sprawiają, że znacznie zmniejsza się wartość naprężeń rozciągających w górnej części odlewu, będących przyczyną powstawania pęknięć tubingów. Tak opracowana konstrukcja może zostać wykorzystana do zabudowy szybu w kopalni.

of stresses, at the same time keeping the assumed exploitation properties of the construction.

In article [9] is presented a topological optimisation of a cast of a tubing construction based on the analysis of lines of forces and the elimination of material excess which does not take part in the process of carrying the forces during the exploitation (Fig. 2). Additional ribs cause that the value of stresses, which are found in the upper part of the cast and are the reason for cracks in tubing, is significantly reduced. A construction developed in this way may be used in a mine shaft.



Rys. 2. Kształt tubinga po optymalizacji topologicznej z dwoma dodatkowymi żebrami oraz analiza technologii i naprężeń własnych w przekroju odlewu [9]

Fig. 2. The shape of tubing after topological optimisation with two additional ribs and the analysis of the technology and internal stresses in a cross-section of the cast [9]

Opracowanie i analiza kształtu konstrukcji odlewu jest zawsze krokiem najtrudniejszym i szczególnym wyzwaniem przy optymalizacji jego geometrii. Należy wygenerować taki kształt, który z jednej strony da się odlać a z drugiej jest możliwie najbardziej zbliżony do propozycji optymalnej konstrukcji i spełnienia stawianych wymagań w założeniach projektowych.

Analiza właściwości stopu

Badania materiału z wykorzystaniem ICME w procesach odlewniczych obejmują ogromne spektrum zjawisk i procesów, towarzyszących powstawaniu odlewu. Przebiegają one w dużej rozpiętości skali. Są to procesy zachodzące na poziomie od 0,05 do 3 nm, czyli na poziomie skali atomowej, poprzez 100 000 nm (100 μm), określanej zwykle jako skala analizy mikrostruktury, do poziomu makro, czyli rzeczywistego modelu. Obserwowane powszechnie mikrostruktury w skali od 20 do 500 μm obejmują obszar, w których zjawiska fizykochemiczne tak podczas przechodzenia metalu ze stanu ciekłego w stan stały, jak i podczas obróbki cieplnej mogą nie w pełni wyjaśnić przyczynę i mechanizm rozwoju i powstawania

The development and analysis of the shape of a cast construction is always the most difficult step and a special challenge during the optimisation of its geometry. A shape should be generated in a way possible to cast, possibly closest to the optimal construction proposition and should meet the requirements of design assumptions.

The analysis of alloy properties

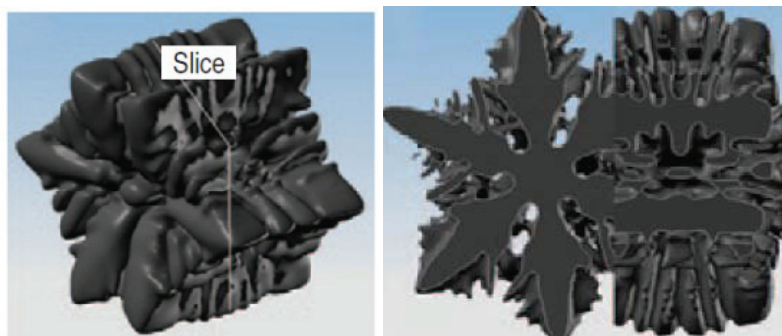
Material research with the use of ICME in casting processes involves a huge spectrum of phenomena and processes, which accompany the creation of a cast. These can be found at different scales. The processes which take place at the level from 0.05 to 3 nm, that is at the atomic scale, through 100 000 nm (100 μm), usually defined as the scale of microstructure analysis, to the macro level, that is the real model. Commonly observed microstructures at the scale from 20 to 500 μm include the area, in which physical-chemical phenomena both during the metal transformation from the liquid to the solid state, and during heat treatment may not fully explain the reason and the mechanism of the development and formation of

struktury wewnętrznej. Dlatego dąży się do tego, aby obliczenia numeryczne obejmowały również procesy zachodzące w skali poniżej 50 μm . Symulacja tych procesów przebiega w przestrzeni trójwymiarowej.

Tak charakterystyczna w stopach aluminium struktura dendrytyczna, w której odległości pomiędzy gałęziami wtórnymi charakteryzują właściwości mechaniczne odlewu, nie może być dokładnie poznana bez analizy mechanizmu jej powstawania w przestrzeni trójwymiarowej. Kierunek wzrostu dendrytu zależy od lokalnego przechłodzenia, które wywołuje to zjawisko. Analizę numeryczną morfologii dendrytów w stopie magnezu oraz rozwoju mikrostruktury w zależności od szybkości chłodzenia przeprowadzono w pracy [10, 11] (rys. 3). W wyniku tych obliczeń można zminimalizować ilość przeprowadzanych badań, czego przykładem może być analiza numeryczna wpływu grubości ścianki na wielkość ziarna w strukturze odlewu przedstawiona w pracy [11] (rys. 4).

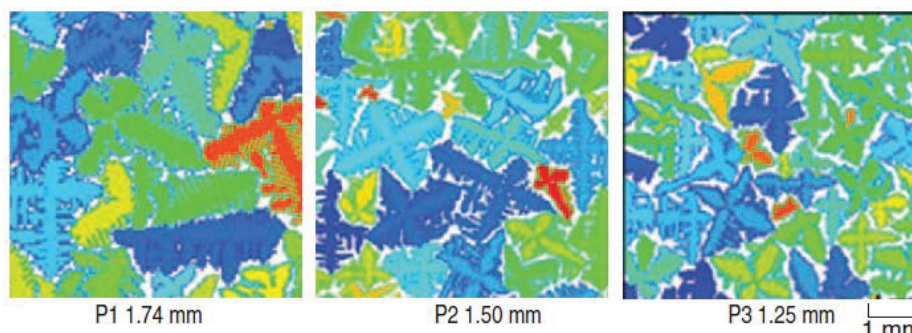
the internal structure. That is why the tendency is for numerical calculations to include also the processes which take place at the scale below 50 μm . A simulation of such processes occurs in a three dimensional space.

Such a characteristic dendritic structure which is found in aluminium alloys, in which the distance between the secondary branches characterise mechanical properties of a cast, cannot be learnt in detail without the analysis of the mechanism of its creation in a three dimensional space. The direction of a dendrite's growth depends on local undercooling which causes this phenomenon. The numerical analysis of dendrites' morphology in magnesium alloy and the development of the microstructure in relation to the speed of cooling were carried out in study [10, 11] (Fig. 3). As a result of these calculations the amount of conducted research can be minimised, an example of which may be the numerical analysis of the impact of wall thickness on the size of grain in the structure of a cast presented in study [11] (Fig. 4).



Rys. 3. Wynik symulacji powstawania dendrytów w układzie 3D stopu magnezu (9% Al) [11]

Fig. 3. The result of simulation of dendrites formation in a 3D system in magnesium alloy (9% Al) [11]



Rys. 4. Mikrostruktura stopu Al-Si (7% Si) otrzymana w wyniku symulacji odlewu o zróżnicowanej grubości ścianki (1,74 mm, 1,5 mm, 1,25 mm) [11]

Fig. 4. The microstructure of Al-Si alloy (7% Si) achieved as a result of a cast simulation with differentiated wall thickness (1.74 mm, 1.5 mm, 1.25 mm) [11]

Ściśle związany z mechanizmem tworzenia się struktury dendrytycznej jest mechanizm tworzenia mikroporowatości tak skurczowej, jak i gazowej. Modelowanie powstawania mikroporowatości gazowej w stopach aluminium podczas krzepnięcia przedsta-

Closely related to the mechanism of the formation of the dendritic structure is the mechanism of microporosity formation both microshrinkage and gas microporosity. Modelling of the formation of gas microporosity in aluminium alloys during solidification is

wiono w pracach [12–14]. Analizowano między innymi szybkość dyfuzji wodoru rozpuszczonego w cieczy oraz wpływ zmiany ciśnienia w pustkach gazowych w wyniku przepływu metalu do obszarów zasilanych. Do przedstawionych obliczeń wykorzystywano własne opracowane programy oraz program Abaqus. Należy mieć na uwadze, że na obecnym etapie większość prowadzonych prac obliczeniowych jest poddawana walidacji. Jednak w coraz większym stopniu ogranicza się ilość badań laboratoryjnych, sprowadzając je do weryfikacji otrzymanych wyników z obliczeniami numerycznymi.

Duże znaczenie ma modelowanie procesów termodynamicznych zachodzących w skali mikro, albowiem pozwala zrozumieć mechanizm powstawania określonych struktur. Pozyskanie danych dotyczących budowy mikrostrukturalnej stopów, niezbędne do dalszej analizy numerycznej procesów technologicznych, umożliwiają programy, takie jak: JmatPro i Pandat. Wyznaczone za pomocą tych programów parametry termofizyczne wieloskładnikowych stopów znajdują zastosowanie w analizie numerycznej procesów odlewania przeprowadzanej za pomocą takich programów, jak np. ProCAST lub MAGMASoft. W wyniku symulacji przemian fazowych za pomocą programów JmatPro i Pandat otrzymujemy ilościowy opis zjawisk, który pozwala na wstępne przewidywanie właściwości stopu w zależności od jego początkowego składu. W ten sposób, za pomocą symulacji, można stwierdzić czy stop, w którym zaszły określone przemiany fazowe, będzie miał wystarczająco wysokie właściwości mechaniczne, aby spełnić założenia konstrukcyjne.

Ciekawym, bo opartym na kompleksowym podejściu do modelowania mikrostruktury, jak i porowatości są badania i wyniki symulacji przedstawione w pracy [15]. Obejmują one zarówno zjawiska zachodzące w skali mikro, przeprowadzane do tej pory głównie w badaniach laboratoryjnych, jak i w skali rzeczywistego odlewu wykonywanego w formie. Podobnie w pracy [16] opisano zintegrowany model mikro- i makrostrukturalny do symulacji powstawania i rozwoju ziarna oraz tworzenia się wad w odlewach łopatek ze stopów niklu (Inconel 718) przeznaczonych do turbin gazowych, oraz zmian struktury i powstawania wad podczas ich eksploatacji.

Analiza technologii

Wykorzystanie obliczeń numerycznych na poziomie procesu projektowania konstrukcji i technologii ma tę zaletę, że możemy mieć wgląd w „gotowy produkt” zanim taki powstanie w odlewni. Analiza dotyczy końcowych właściwości odlewu, które można sprawdzić w tworzonej konstrukcji. Schemat przedstawiony na rysunku 1 pokazuje, iż otrzymane właściwości odlewu należy przekazać do programu analizującego parametry eksploatacyjne.

presented in papers [12–14]. Analysed was, among other things, the speed of diffusion of hydrogen dissolved in liquid and the impact of changing pressure in gas voids as a result of the metal flow to the fed areas. To make the presented calculations self-developed programs were used, as well as Abaqus software program. It should be borne in mind that at the current stage the majority of conducted calculation works is validated. However, more often the amount of laboratory research is reduced, bringing it down to the verification of the achieved results with numerical calculations.

Modelling thermodynamic processes which occur at the micro scale is of high importance, as it enables to understand the mechanism of the formation of particular structures. Acquiring data with regard to the microstructure of alloys, which is necessary for further numerical analysis of technological processes, is possible with programs such as: JmatPro and Pandat. Thermo-physical parameters, defined thanks to these programs, of multi-compound alloys are applied in numerical analysis of casting processes made with the use of programs such as: ProCAST or MAGMASoft. As a result of the simulation of phase transformations with the use of JmatPro and Pandat we can obtain a quantitative description of phenomena, which allows for preliminary forecasting alloy's properties depending on its initial composition. In this way, with the use of a simulation, it is possible to find out whether an alloy, in which particular phase transformations took place, will have sufficient mechanical properties to meet the construction assumptions.

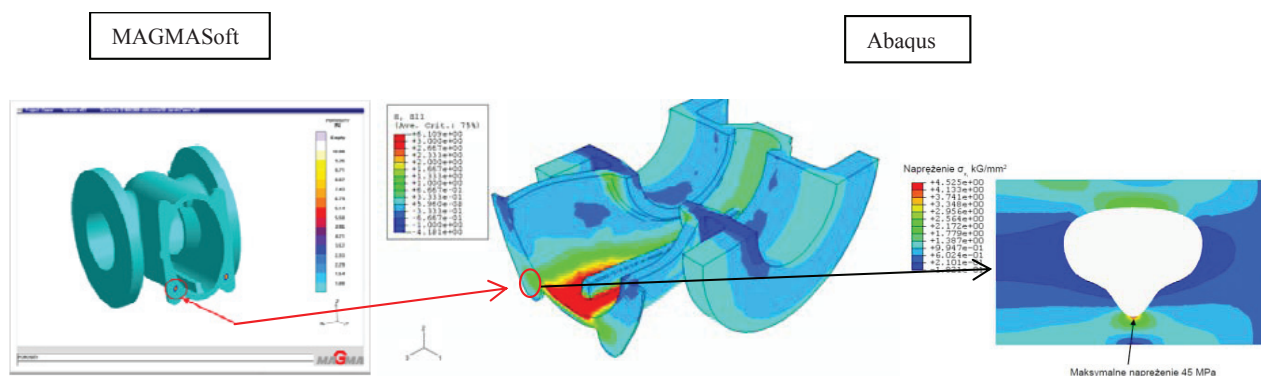
Interesting are also research and simulation results based on a comprehensive approach to microstructure modelling and porosity, which are presented in paper [15]. These include both phenomena which take place at the micro scale, so far conducted mainly during laboratory research, and at the scale of a real cast made in a mould. Similarly in paper [16] described is an integrated micro- and macro-structural model for the simulation of the formation of grain and the formation of defects in casts of blades, made of nickel alloy (Inconel 718), designated for gas turbines, as well as changes of the structure and the formation of defects during their exploitation.

The analysis of the technology

The use of numerical calculations at the level of the designing a construction and technology has an advantage as it is possible to view the “ready-made product” before it is cast in a foundry. The analysis regards final properties of a cast which may be checked in a designed construction. The framework presented in Figure 1 shows that the achieved properties of a cast should be transmitted to a program which would analyse exploitation parameters.

W wyniku obliczeń numerycznych można uzyskać „wgląd” w rozwój i powstawanie wad skurczowych, czyli pustek w strukturze. Obecność wady w obciążonym elemencie podczas eksploatacji powoduje lokalny wzrost naprężenia, które może osiągnąć znacznie większą wartość, niż wynikałoby to z podzielenia siły obciążającej element przez pozostały (poza wadą) przekrój elementu, czyli od tzw. naprężenia nominalnego. W pewnych przypadkach jednak obecność wady może nie być czynnikiem, który w jednoznaczny sposób dyskwalifikuje jakość odlewu. Decydujące jest w takim przypadku określenie modelu matematycznego wady i przyjęcie kryterium, które określałoby czy dany odlew uznać za wadliwy, czy też przyjąć, że spełnia warunki odbioru jakościowego. W pracy [17] przedstawiono analizę zastosowania analitycznych i numerycznych modeli wady odlewniczej typu pustki do określenia lokalnego wzrostu naprężenia w jej otoczeniu (rys. 5).

As a result of numerical calculations, an “insight” into the development and formation of shrinkage defects, that is voids in the structure can be obtained. The presence of a defect in an element subjected to strain during exploitation causes a local increase of stresses which may achieve a significantly higher value than it results from the division of the force causing strain in an element by the remaining cross-section (with the exception of the defect) of the element, that is the so-called nominal stress. However, in some cases the presence of a defect may not be the factor which unequivocally disqualifies the quality of a cast. A deciding factor is, in this case, to define a mathematical model of the defect and assume a criterion which would define whether a particular cast should be deemed as defective, or assume that it meets the requirements of quality control. In paper [17] presented is the analysis of the application of analytical and numerical models of a casting defect – voids – to define the local increase of stress in its area (Fig. 5).



Rys. 5. Analiza wpływu porowatości na stan naprężeń w obszarze jej występowania [17]

Fig. 5. The analysis of the impact of porosity on stresses in its area [17]

Innym parametrem oceny zastosowanej technologii odlewania są naprężenia własne (szczątkowe), powstałe głównie ze zróżnicowania grubości ścianki odlewu. W pracy [18] dotyczącej powstawania mikropęknięć w odlewie krzywki popychacza, stwierdzono występowanie dużych naprężeń własnych na połączeniu cienkiej ścianki z piastą odlewu. Naprężenia te wraz z naprężeniami eksploatacyjnymi miały istotny wpływ na wytrzymałość odlewanej konstrukcji. Zmniejszenie naprężeń własnych uzyskano przez korektę technologii odlewania, inne ułożenie odlewów podczas ich zalewania, jak i samą temperaturę zalewania (rys. 6). Naprężenia własne mogą się dodawać do naprężeń eksploatacyjnych, ale mogą się również odejmować, i wtedy wpłynie to korzystnie na redukcję obciążenia konstrukcji a w efekcie umożliwi zmniejszenie przekroju i obniżenie masy odlewu.

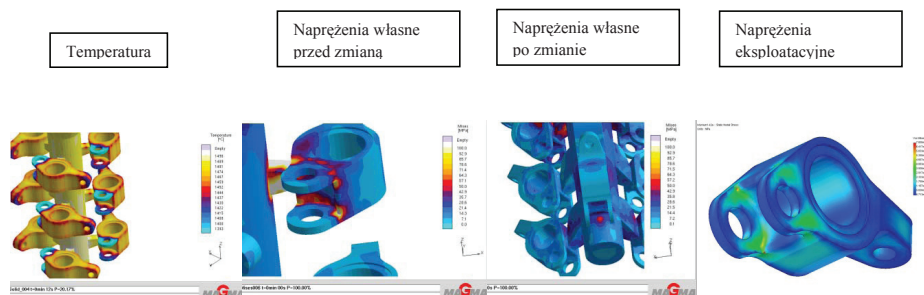
Większość komercyjnych programów przeznaczonych do analizy numerycznej procesów odlewania posiada możliwość mikromodelowania. Stosowane algorytmy umożliwiają przewidywanie właściwości

Another parameter used for the assessment of the applied casting technology are internal stresses (residual stresses), which are created mainly due to differentiated wall thickness. In the publication [18] which is related to the creation of microcracks in a cast of an inverse cam it is stated that there are considerable internal stresses in the connecting point between a thin wall and the hub of the cast. These stresses together with exploitation stresses had a significant impact on the strength of the cast construction. The decrease of internal stresses was obtained thanks to a correction in the casting technology, a different positioning of the casts during their casting, and the pouring temperature (Fig. 6). Internal stresses may add up to exploitation stresses, but may also subtract and then it will positively influence the reduction of the construction strain and consequently it will allow the reduction of the cross-section and the mass of the cast.

The majority of commercial programs designated for the numerical analysis of casting processes have

mechanicznych odlewu, takich jak: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, twardość, moduł sprężystości, można również za ich pomocą ocenić strukturę odlewu w dowolnym przekroju, np. rozkład perlitu (odlewy z żeliwa), wielkość ziarna czy też odległości wtórnych gałęzi dendrytów w stopach aluminium. Wyznaczenie powyższych wartości i właściwości może dotyczyć odlewu przed i po obróbce cieplnej.

the function of micro-modelling. The applied algorithms enable forecasting mechanical properties of a cast, such as: tensile strength, elongation, hardness, tensile modulus. With their use it is also possible to assess the structure of a cast in any cross-section, e.g. the perlite distribution (casts made of cast iron), the size of grain or the distance between secondary branches of dendrites in aluminium alloys. The determination of the above-mentioned values and properties may apply to a cast before and after heat treatment.



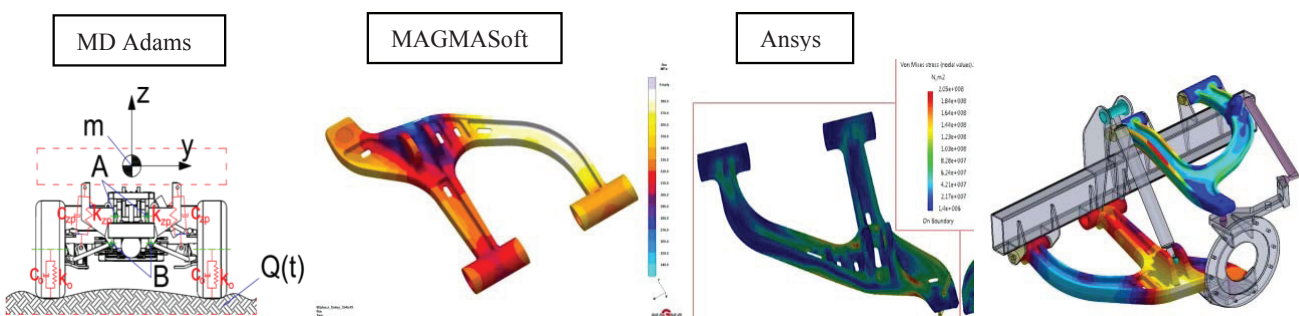
Rys. 6. Analiza naprężeń własnych w odlewie i wpływ na naprężenia eksploatacyjne [18]
 Fig. 6. The analysis of internal stresses in a cast and the impact on exploitation stresses [18]

W pracy [19] przedstawiono zintegrowany system obliczeń numerycznych, który obejmował: wyznaczenie sił reakcji działających podczas pracy zawieszenia, technologię wykonania, wyznaczenie właściwości mechanicznych oraz analizę naprężeń eksploatacyjnych (rys. 7). Wykorzystując informacje uzyskane z analizy procesu odlewania, w tym między innymi mapę rozkładu wytrzymałości odlewu (po obróbce cieplnej), sprawdzono stan naprężeń eksploatacyjnych wahacza jako elementu wchodzącego w skład zawieszenia. Podczas analizy wykorzystano programy:

In publication [19] is presented the integrated system for numerical calculations which included: the determination of reaction forces when the suspension is moving, the technology of execution, the designation of mechanical properties and the analysis of exploitation stresses (Fig. 7). Using information obtained from the analysis of the casting process, including, among other things, the map of a cast's strength distribution (after heat treatment), the state of exploitation stresses of a rocker as an element of the suspension was checked. During the analysis the following programs were used:

- MD Adams – wyznaczenie sił reakcji pracującego zawieszenia w wahaczach,
- MAGMASoft – analiza technologii odlewania,
- Ansys – analiza stanu wytężenia odlanego wahacza.

- MD Adams – the determination of forces of reactions in rockers in moving suspension,
- MAGMASoft – the analysis of the casting technology,
- Ansys – the analysis of the strain state of the cast rocker.



Rys. 7. Analiza elementu odlewane w procesie zintegrowanego modelu obliczeniowego [19]
 Fig. 7. The analysis of a cast element in the process of an integrated calculation model [19]

W przedstawionych przykładach technologia jest weryfikowana od razu. Takie rozwiązanie daje odpowiedź czy wytypowany stop i właściwości odlewu wykonanego w danym procesie technologicznym spełniają zakładane wymagania. Brak spełnienia założonych kryteriów, zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 1) powoduje powrót oraz ponowną analizę kształtu konstrukcji, technologii wykonania a nawet dotychczasowego składu stopu i propozycję nowych rozwiązań.

Rola eksperymentu w Zintegrowanym Systemie Modelowania Materiałów i Procesów Inżynierskich

Na przedstawionym schemacie Zintegrowanego Systemu Modelowania Materiałów i Procesów Inżynierskich na rysunku 1B, w pozycjach 5, 9, 13 umieszczone są bloki, które dotyczą przeprowadzania koniecznych eksperymentów. Prowadzenie eksperymentu ma na celu zweryfikowanie otrzymanych danych z obliczeń numerycznych. Dotyczy to głównie przyjętych parametrów termofizycznych stopu i jego właściwości. Należy jednak pamiętać, że i same obliczenia numeryczne z wykorzystaniem takich programów, jak Abaqus, MAGMASoft, ProCAST, Ansys, Flow3D mogą być obciążone błędami. Wynika to w pierwszej kolejności z wiarygodności danych wprowadzanych do programu, umiejętności wykorzystania proponowanych zmiennych ustawianych w danych programie, prawidłowym przypisaniu odpowiednich elementów w siatce różnicowej adekwatnych do rozwiązywanego problemu a dotyczy to takich programów, jak Abaqus, Ansys czy też doskonałości samego algorytmu. Z problemami dotyczącymi wiarygodności otrzymywanych wyników w obliczeniach numerycznych w procesach odlewniczych zajęto się w pracach [20–23]. W pracach porównywano i analizowano wyniki symulacji z badaniami laboratoryjnymi, a otrzymane wyniki poddano krytycznej analizie.

Należy mieć również na uwadze, że jeszcze nie wszystkie zjawiska fizyczne udaje się w pełni zamodelować. Dodatkowo w przeważającej części są one silnie nieliniowe i uzyskiwanie poprawnej zbieżności obliczeń jest bardzo trudne. Ponadto proces obliczeń najczęściej jest podzielony w zależności od analizowanej skali. Trudno połączyć w modelowaniu numerycznym w jeden ciąg, procesy zachodzące w skali poniżej 50 μm z procesami zachodzącymi powyżej np. 500 μm oraz procesy w skali makro. Na obecnym etapie w sposób sztuczny rozdziela się analizę numeryczną takich zjawisk, by następnie tworzyć pomosty w celu przekazania wyników do dalszej analizy. A przecież w rzeczywistości nawet w odlewach kilkuntonowych zjawiska te przebiegają w pełnej skali. Dlatego tak ważna jest kalibracja modeli matematycznych i wyników uzyskanych z obliczeń z wynikami

In the presented examples the technology is verified at once. Such a solution gives an answer whether the selected alloy and properties of a cast made in a particular technological process meet the assumed requirements. If the assumed requirements are not met according to the presented framework (Fig. 1), there is a return and reanalysis of the shape of a construction, technology of execution and even the previous composition of the alloy and a proposition of new solutions.

The role of experiments in Integrated Computational Materials Engineering

In the presented framework of ICME in Figure 1B, in positions 5, 9, 13 there are blocks which relate to conducted experiments. Carrying out any experiments is aimed at verifying the achieved data from numerical calculations. It mainly regards the assumed thermophysical parameters of an alloy and its properties. Nevertheless, it should be remembered that numerical calculations alone with the use of such software programs as Abaqus, MAGMASoft, ProCAST, Ansys, and Flow3D may be loaded with errors. First of all, it results from reliability of data fed into programs, the ability to use the proposed variables which can be set in a particular program, and finally the correct attribution of appropriate elements in a difference net which would be adequate to the problem. It regards such programs as Abaqus, Ansys or the perfection of the algorithm itself. The problems of reliability of the achieved results from numerical calculations in casting processes are dealt with in publications [20–23]. In these publications the results of simulations were compared and analysed with laboratory research, and the achieved results were critically analysed.

It should be also taken into consideration that not all physical phenomena can be fully modelled. Additionally, in a majority of cases they are strongly non-linear and achieving correct convergence of calculations is very difficult. What is more, the process of calculations is most often divided in relation to the analysed scale. In numerical modelling it is difficult to join into one sequence the processes which take place at the scale below 50 μm with processes which take place above, for instance 500 μm , as well as processes at the macro scale. At the current stage the numerical analysis of such phenomena is artificially divided, so as to create bridges in order to transmit results for further analysis. However, in reality even in a few-tonnes casts these phenomena run at the full scale. That is why it is so important to calibrate mathematical models and results achieved from calculations with the research results both at the laboratory and industry scales. More common access to databases and the description of methodology of the achieved

badania tak w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej. Niezwykle ważnym jest powszechniejsza dostępność do baz danych i opis metodyki uzyskiwanych wyników [1–6]. Pozwala to na uzupełnienie brakujących wyników lub ich lepszą weryfikację bez powtórnego a zarazem kosztownego cyklu badawczego.

Wnioski

1. System ICME (*Integrated Computational Materials Engineering*), nazywany w artykule Zintegrowanym Systemem Modelowania Materiałów i Procesów Inżynierskich, został zaakceptowany w roli wiodącego narzędzia w rozwiązywaniu nowych aplikacji, w tym i opracowywaniu nowych materiałów w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, okrętowym i w energetyce w USA oraz w Unii Europejskiej [1–6].
2. System ten pozwala na lepsze wykorzystanie wyników badań. Praca w jednej „cyberinformatycznej” przestrzeni badawczej umożliwia prowadzenie równoległych badań w kilku skalach projektu nano, mikro, makro. Zwiększa przepustowość przekazywania wyników, szybkość ich weryfikację oraz lepsze zrozumienie potrzeb zespołów prowadzących prace eksperymentalne na poziomie podstawowym z inżynierami i konstruktorami.
3. Uważa się, że praca z wykorzystaniem systemu ICME w zintegrowanym systemie „cyberinformatycznej” pozwala na trzykrotne skrócenie czasu opracowania i wdrożenia nowych materiałów oraz rozwiązań technicznych. Wynika to między innymi z ograniczenia ilości badań na poziomie prototypu oraz niedublowania tych samych badań w różnych ośrodkach badawczych [1].
4. Konieczne jest stworzenie pomostów pomiędzy modelowaniem w różnej skali zjawisk fizycznych, aby możliwe było przekazywanie wyników z jednej aplikacji do następnej. Obecnie takie pomosty są opracowane tylko w jednej skali przebiegu danego procesu [4].
5. Konieczna jest powszechna dostępność do baz danych (z warunkami nienaruszającymi prawa autorskiego i bezpieczeństwa narodowego) z pełnym opisem metodyki otrzymywanych wyników w celu możliwości ich weryfikacji i wprowadzenia ewentualnych poprawek [1, 2, 4, 5].
6. Ważną rolę w rozwoju systemu będzie odgrywała edukacja na poziomie szkół wyższych i upowszechnianie osiągnięć w stosowaniu tych systemów w pracach badawczo-rozwojowych.

results is very significant [1–6]. It allows for completing the missing results or their better verification without secondary and costly research cycles.

Conclusions

1. Integrated Computational Materials Engineering was regarded as a leading tool for finding new applications, including the development of new materials in aerospace, automotive, and maritime industries and power engineering in the USA and the EU [1–6].
2. The system allows for better utilisation of research results. Work in a uniform “cyberinformation” research environment enables conducting parallel research at several scales of the project – nano, micro, and macro. It increases the capacity of transmitting results, quick verification and better understanding of needs of teams which carry out experimental studies at the basic level with engineers and designers.
3. It is thought that work with the use of ICME in an integrated system of “cyberinformation” allows shortening the time of development and implementation of new materials and technological solutions threefold. It results, among others, from the limitation of the amount of research at the prototype level and not doubling the same research in different research centres [1].
4. It is necessary to create bridges between modelling physical phenomena at different scales, to enable transmitting results from one application to another. Currently such bridges are being developed only in one scale in which a particular process takes place [4].
5. It is necessary to create common free access to databases (with conditions not infringing copyright and national security) with a full description of methodology of the achieved results in order to verify them and introduce possible corrections [1, 2, 4, and 5].
6. An important role in the development of the system will be played by education at the level of higher education and dissemination of achievements in the utilisation of these systems in research and development works.

Podziękowania

Artykuł powstał w oparciu o realizowane prace statutowe w roku 2011 i 2012: „Integralne procesy w zakresie projektowania i wykonywania odlewów żeliwnych, z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych” i „Integralne procesy w zakresie projektowania i wykonywania odlewów z wysokowytrzymałych stopów aluminium” oraz w wyniku realizacji projektu O R00009012 „Opracowanie konstrukcji oraz technologii wykonania zawieszenia hydroaktywnego w mobilnych pojazdach bezzałogowych odpornych na zagrożenie typu IED”, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Acknowledgements

This article was written on the basis of statutory activities in the year 2011 and 2012: "Integral processes within the scope of designing and executing cast iron casts with the use of modern computer techniques" and "Integral processes within the scope of designing and executing high-resistant aluminium alloys casts" and as a result of the execution of the project O R00009012 "Developing constructions and technologies to execute hydroactive suspension in mobile unmanned vehicles resistant to the IED threat", financed by the Ministry of Science and Higher Education.

Literatura/References

1. *Materials Genome Initiative for Global Competitiveness*. (2011). Washington, D.C.: Executive Office of the President National Science and Technology Council, June 24, 2011.
2. *Integrated Computational Materials Engineering (ICME): Implementing ICME in the Aerospace, Automotive, and Maritime Industries*. (2013). Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society.
3. Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting, National Research Council. (2012). *Application of Lightweighting Technology to Military Aircraft, Vessels, and Vehicles*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
4. Menne, R.J., Weiss, U., Brohmer, A., Weber, M., Oelling, P., Egner-Walter, A. (2007). Implementation of Casting Simulation for Increased Engine Performance and Reduced Development Time and Costs – Selected Examples from FORD R&D Engine Projects. 28. *Internationales Wiener Motorensymposium 2007*. VDI-Verlag.
5. Andrä, H., Linn, J., Matei, I., Shklyar, I., Steiner, K., Teichmann, E. (2005). OPTCAST – Entwicklung adäquater Strukturoptimierungsverfahren für Gießereien. *Berichte des Fraunhofer ITWM*, 80.
6. Schmitz, G.J., Prah, U. (2012). *Integrative Computational Materials Engineering, Concepts and Applications of a Modular Simulation Platform*. Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-33081-2.
7. Mattheck, C., Tesari, I. (2002). Konstruieren wie die Natur-Bauteile wachsen wie Bäume und Knochen. *Konstruieren und Giessen* 27(2), 4–9.
8. Hartmann R. et al. (2002). Mehrkriteriale Topologieoptimierung von Bauteilen aus Gußwerkstoffen. *Konstruieren und Giessen* 27(3), .
9. Piekło, J., Maj, M., Stachurski, W. (2003). *Badanie naprężeń występujących w obudowie tubingowej szybu*. Fundacja Wydziału Odlewnictwa AGH, KGHM Polska Miedź S.A.
10. Dantzig, J.A. (2000). Solidification Modeling: Status and Outlook. *JOM* 52(12), 18–21.
11. Baicheng, Liu, Qingyan, Xu, Tao, Jing, Houfa, Shen, Zhiqiang, Han. (2011). Advances in Multi-scale Modeling of solidification and Casting processes. *JOM* 63(4), 19–25.
12. Zhu, J.D., Cockcroft, S.L., Majjer, D.M. (2006). Modeling of Microporosity Formation in A356 Aluminum Alloy Casting. *Metallurgical and Materials Transactions* 37A(3), 1075–1085.
13. Carlson, K.D., Zhiping, Lin, Beckermann, Ch., Mazurkevich, G., Schneider, M.C. (2006). Modeling of Porosity Formation in Aluminium Alloys. *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes – XI*. The Minerals, Metals & Materials Society, 627–634.
14. Lee, P.D., Chirazi, A., Atwood, R.C., Wang, W. (2004). Multiscale modelling of solidification microstructures, including microsegregation and microporosity, in an Al-Si-Cu alloy. *Materials Science and Engineering A365*, 57–65.
15. Lee, P.D., Chirazi, A., See, D. (2001). Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: a review. *Journal of Light Metals* 1(1), 15–30.
16. Tin, S., Lee, P.D., Kermanpur, A., Rist, M., McLean, M. (2005). Integrated Modeling for the Manufacture of Ni-Based Superalloy Discs from Solidification to Final Heat Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A* 36A(9), 2493–2504.
17. Piekło, J., Pysz, S. (2009). Modele naprężeniowe do oceny wpływu wad odlewniczych na wytrzymałość mechaniczną odlewu. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 49(4), 39–46.
18. Piekło, J., Pysz, S. (1998). Analysis of Thermal Stresses Effect on Cracks Formation in Investment Cast Valve Arm during Cooling. 9th Symposium on Investment Casting, Precast 98, Praga.

19. Pysz, S., Żuczek, R., Sprawka, P., Czekaj, E., Karwiński, A., Małysza, M. (2012). *Integration of numerical procedures in the design and manufacturing technology on the example of a cast component for the automotive industry*. Monterrey: 70th World Foundry Congress, April 2012.
20. Ignaszak, Z. (2002). *Virtual prototyping w odlewnictwie. Bazy danych i walidacja*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
21. Mikołajczak, P., Ignaszak, Z. (2006). Wpływ zmienności utajonego ciepła krzepnięcia w funkcji temperatury na wyniki symulacji krzepnięcia odlewów. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 25(1), 65–76.
22. Ignaszak, Z., Mikołajczak, P. (2008). Problematyka baz danych w zaawansowanym modelowaniu sprzężonym porowatości w odlewach na przykładzie systemu CALCOSOFT. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 28(3), 81–94.
23. Ignaszak, Z., Popielarski, P. (2006). Identyfikacja podstawowych zastępczych współczynników termofizycznych masy formierskiej w zależności od grubości ścianki odlewu. *Archiwum Odlewnictwa* 6(22), 224–231.