

Badania wytrzymałościowe oraz symulacje komputerowe procesu wytwarzania odlewów otrzymywanych w formach gipsowych z wysokowytrzymałych stopów aluminium AlZnMgCu

Testing of mechanical properties and computer simulations of the manufacturing process of castings obtained in gypsum moulds from high-strength AlZnMgCu aluminum alloys

Krzysztof Wańczyk^{1*} , Marcin Małyśza¹ , Marek Wawrylak¹ 

¹ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

¹ŁUKASIEWICZ Research Network – Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

*Corresponding author: krzysztof.wanczyk@iod.krakow.pl

Received: 08.11.2019. Accepted in revised form: 31.03.2020.

DOI: 10.7356/iod.2019.13

Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę oceny właściwości mechanicznych próbek z wysokowytrzymałych stopów aluminium AlZnMgCu odlewanych do form gipsowych. Pierwszy etap realizacji prac obejmował wykorzystanie symulacji komputerowej w celu wybrania optymalnej konstrukcji złożenia próbek. W tym celu wykorzystano oprogramowanie do modelowania CAD – SolidWorks (opracowanie geometrii złożenia) oraz środowisko do symulacji procesu odlewania oraz krzepnięcia – Flow3D. Wyniki zostały przedstawione w postaci wizualizacji wypełniania wnęki formy oraz krzepnięcia odlewów. W celu weryfikacji właściwości wytrzymałościowych stopu wykonane zostały odlewy próbek wytrzymałościowych. Procedura wykonywania odlewów była powtarzana dla form gipsowych, które po wypaleniu były schłodzone do różnych temperatur przed ich zalewaniem.

Słowa kluczowe: właściwości mechaniczne, stopy aluminium, formy gipsowe, symulacja procesu

Abstract

The paper presents an attempt to assess the mechanical properties of high-strength AlZnMgCu aluminium alloy samples cast in gypsum moulds. The first stage of the study involved the use of computer simulations to select the optimum sample assembly structure. To this end, the SolidWorks CAD software (assembly geometry design) and Flow3D casting and solidification simulation environment were used. The results are presented as mould cavity filling and cast solidification visualisations. To verify the strength properties of the alloy, strength test samples were prepared. The cast production procedure was repeated for gypsum moulds, which were cooled down to different temperatures after their firing and before filling.

Keywords: mechanical properties, aluminium alloys, gypsum moulds, process simulation

1. Wstęp

Stopy gatunku AlZnMgCu są szeroko stosowane w przemyśle samochodowym oraz lotniczym ze względu na wysokie właściwości użytkowe w stosunku do gęstości [1,2]. Głównie wykorzystywane są w procesach przeróbki plastycznej [3]. Wiele konstrukcji wykonywanych z materiałów o większej gęstości po przepro-

1. Introduction

AlZnMgCu-type alloys are widely used in the automotive and aerospace industries due to their good functional properties relative to their density [1,2]. They are mainly used in plastic working [3]. After a material and structural conversion, many structures otherwise made of higher-density materials can be produced

wadzeniu konwersji materiałowo-konstrukcyjnej może być wytwarzane przy zastosowaniu technologii odlewania z wysokowytrzymałych stopów AlZnMgCu [4,5,6]. W przypadku pojazdów, dzięki obniżonej masie, możliwe jest zmniejszenie zużycia paliwa. Możliwość uzyskania odlewów z lekkich stopów o cienkościennych konstrukcji jest niewątpliwie pożądanym kierunkiem rozwoju ze względu na ekologiczność i zmieniające się dyrektywy Unii Europejskiej w zakresie dopuszczalnych emisji spalin przez pojazdy silnikowe [7].

Celem pracy była analiza właściwości mechanicznych odlewów wykonanych ze stopu AlZnMgCu odlewanych w formach gipsowych. Badania miały na celu weryfikację czy wytypowany stop, charakteryzujący się szerokim zakresem krzepnięcia, może znaleźć zastosowanie do wytwarzania wysokojakościowych odlewów prototypowych przy wykorzystaniu powyższej technologii. Wymagało to opracowania parametrów technologicznych dotyczących samego procesu przygotowania formy gipsowej do zalewania, jak i procesu topienia oraz zalewania metalu.

2. Analiza koncepcji technologicznych

Osobnym zagadnieniem technologicznym jest konstrukcja układu wlewowego. Ze względu na specyfikę wypełniania wnęki formy ciekłym metalem, gdzie czas procesu jest bardzo krótki, należy zapewnić taki układ zalewania, aby metal swobodnie wypełniał wnękę formy bez możliwości powstawania nadmiernych turbulencji przepływu. W przypadku cienkościennych odlewów nie można dopuścić, aby nastąpiło zakrzepnięcie metalu przed wypełnieniem całej wnęki formy. Ze względu na zastosowany materiał formy należy spodziewać się wydłużonego czasu krzepnięcia. Jednocześnie podniesienie temperatury formy ułatwia poprawne wypełnienie wnęki formy w przypadku skomplikowanych cienkościennych odlewów. Parametry te mają wpływ na powstawanie różnych wad odlewniczych oraz na mikrostrukturę odlewów i ich właściwości mechaniczne [8]. W celu ograniczenia liczby rzeczywistych prób laboratoryjnych zaplanowany został plan wirtualnych eksperymentów z wykorzystaniem programu do symulacji komputerowej. Takie podejście jest szeroko stosowane w procesach projektowania oraz wdrażania nowych produktów [9].

W celu uzyskania optymalnej jakości próbek do badań mechanicznych oraz mikrostruktury zaproponowano kilka koncepcji układów wlewowych przedstawionych na [rysunku 1](#).

Poddane analizie układy zawierają w zależności od koncepcji możliwe do wykonania próbki „na gotowo”, próbki walcowe do wytoczenia próbek standardowych do badań wytrzymałościowych oraz próbki określające zdolność do wypełniania wnęki formy. W symulacji założone zostały dla każdej koncepcji punkty pomiarowe

using the high-strength AlZnMgCu alloy casting technology [4,5,6]. For vehicles, the lower weight enables fuel consumption to be reduced. The ability to produce thin-walled casts of lightweight alloys is doubtlessly a desirable area for development due to environmental concerns and the changing European Union directives concerning exhaust gas emission limits for motor vehicles [7].

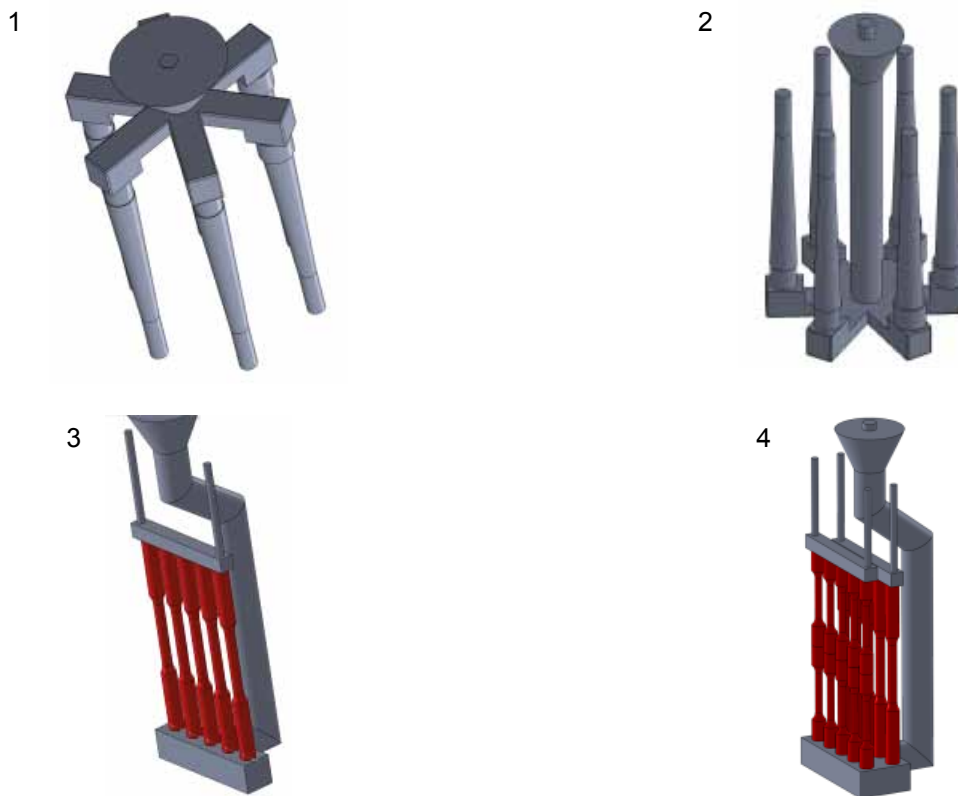
The aim of the study was to analyse the mechanical properties of casts made of an AlZnMgCu alloy, produced in gypsum moulds. The tests were to verify whether the selected alloy, characterised by a wide solidification temperature range, can be used to make high-quality prototype casts using the technology discussed above. This required determining the process parameters for gypsum mould preparation itself, as well as the metal melting and pouring process.

2. Analysis of process concepts

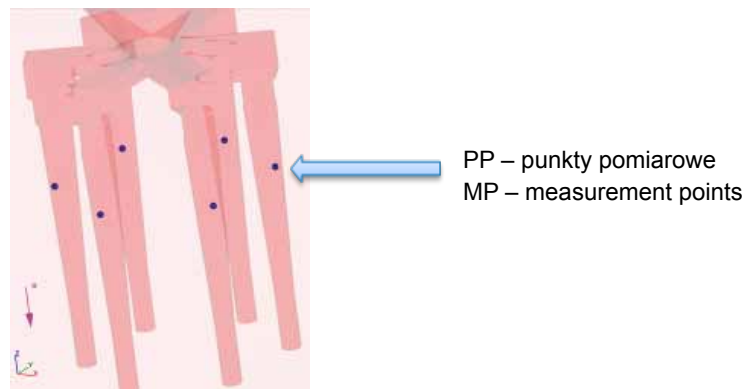
A separate technology issue is the inlet design. Due to the particular way in which mould cavities are filled with liquid metal, where the process duration is extremely short, an inlet design is required that enables the metal to freely fill the mould cavity without the risk of excessive flow turbulences. For thin-walled casts, metal solidification before filling the entire mould cavity must be prevented. Due to the mould material used, extended solidification time is to be expected. At the same time, increasing the mould temperature makes it easier to properly fill the mould cavity in the case of complex thin-walled casts. These parameters affect the formation of various casting defects, and on the microstructure and mechanical properties of the casts [8]. To limit the number of actual laboratory tests, a schedule of virtual experiments with the use of computer simulation software was prepared. This approach is widely used in new product design and deployment processes [9].

In order to achieve optimum quality of the samples for mechanical and microstructure testing, several inlet design concepts were proposed, as shown in [Figure 1](#).

Depending on the concept, the analysed designs contained ready-made samples, cylindrical samples for machining of standard strength testing samples, or samples that determine the mould cavity filling ability. In the simulation, measurement points were established for each concept in the samples' work areas, intended to show the course of the solidification curve in each design. A sample location for concept 1 is shown in [Figure 2](#).



Rys. 1. Analizowane układy, kolejno koncepcja 1, 2, 3, 4
Fig. 1. Considered designs, arranged as follows: concept 1, 2, 3, 4



Rys. 2. Punkty pomiarowe w układzie wnętrza formy
Fig. 2. Measurement points in a mould cavity design

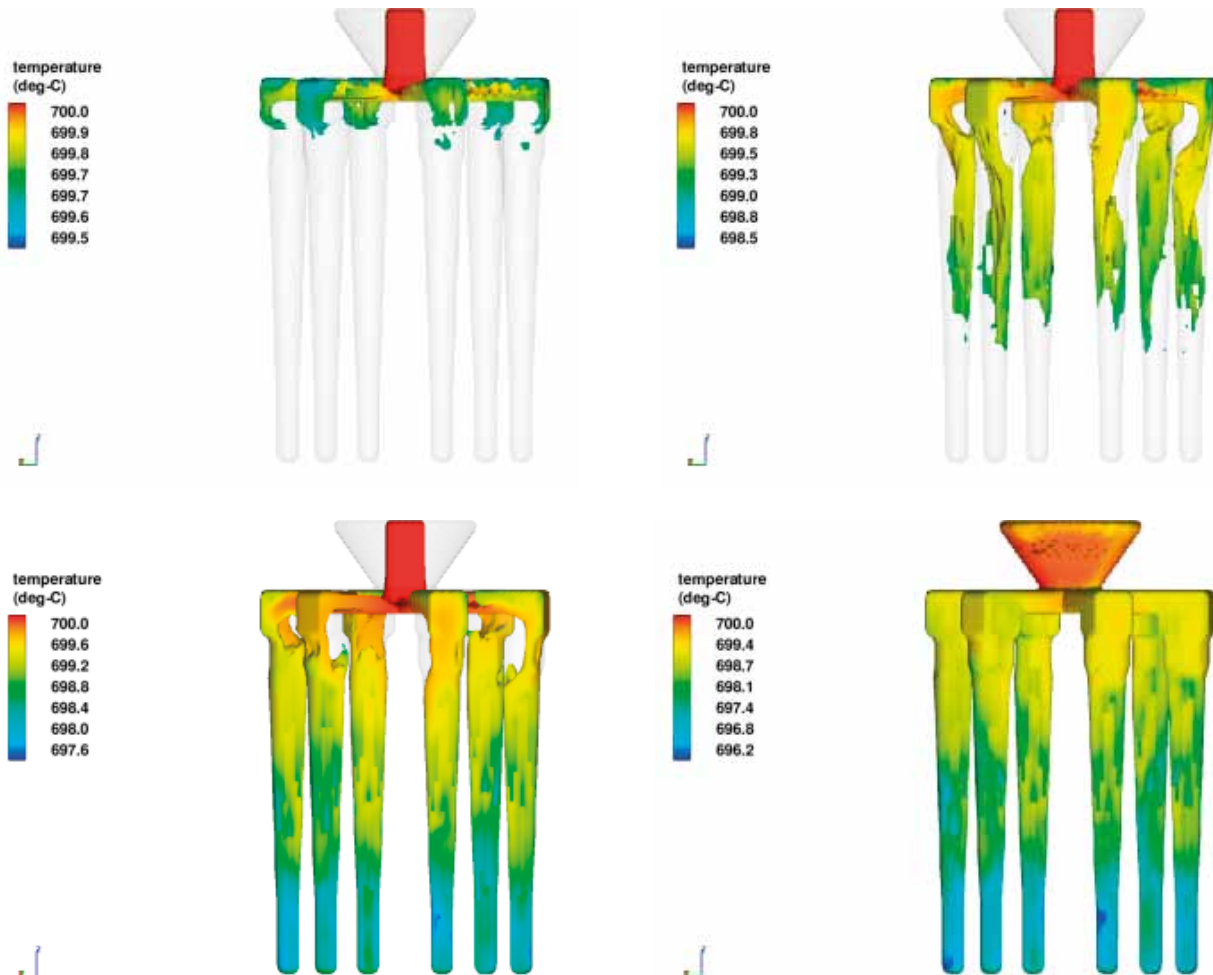
w obszarze roboczym próbki, które mają przedstawić, jak przebiega krzywa krzepnięcia w zależności od układu. Przykładowa lokalizacja dla koncepcji 1 przedstawiona została na [rysunku 2](#).

W założonym układzie masa wsadu dla koncepcji 1 wynosi około 1 kg. Skład chemiczny stopu AlZnMgCu podano w [tabeli 1](#). Temperatura początkowa ciekłego metalu $T_{in} = 700^{\circ}\text{C}$. Wizualizacja przepływu metalu w układzie wnętrza formy została przedstawiona na [rysunku 3](#).

In this design, the charge weight for concept 1 is approximately 1 kg. The chemical composition of the AlZnMgCu alloy is shown in [Table 1](#). Liquid metal initial temperature $T_{in} = 700^{\circ}\text{C}$. A visualisation of metal flow in the mould cavity is shown in [Figure 3](#).

Tabela 1. Skład chemiczny analizowanego stopu
Table 1. Chemical composition of the analysed alloy

Zn [%]	Mg [%]	Cu [%]	Mn [%]	Zr [%]	Be [%]	Ti [%]	Fe [%]	Si [%]	Al
5,8	1,98	1,53	0,17	0,12	0,14	0,1	0,08	0,06	bal



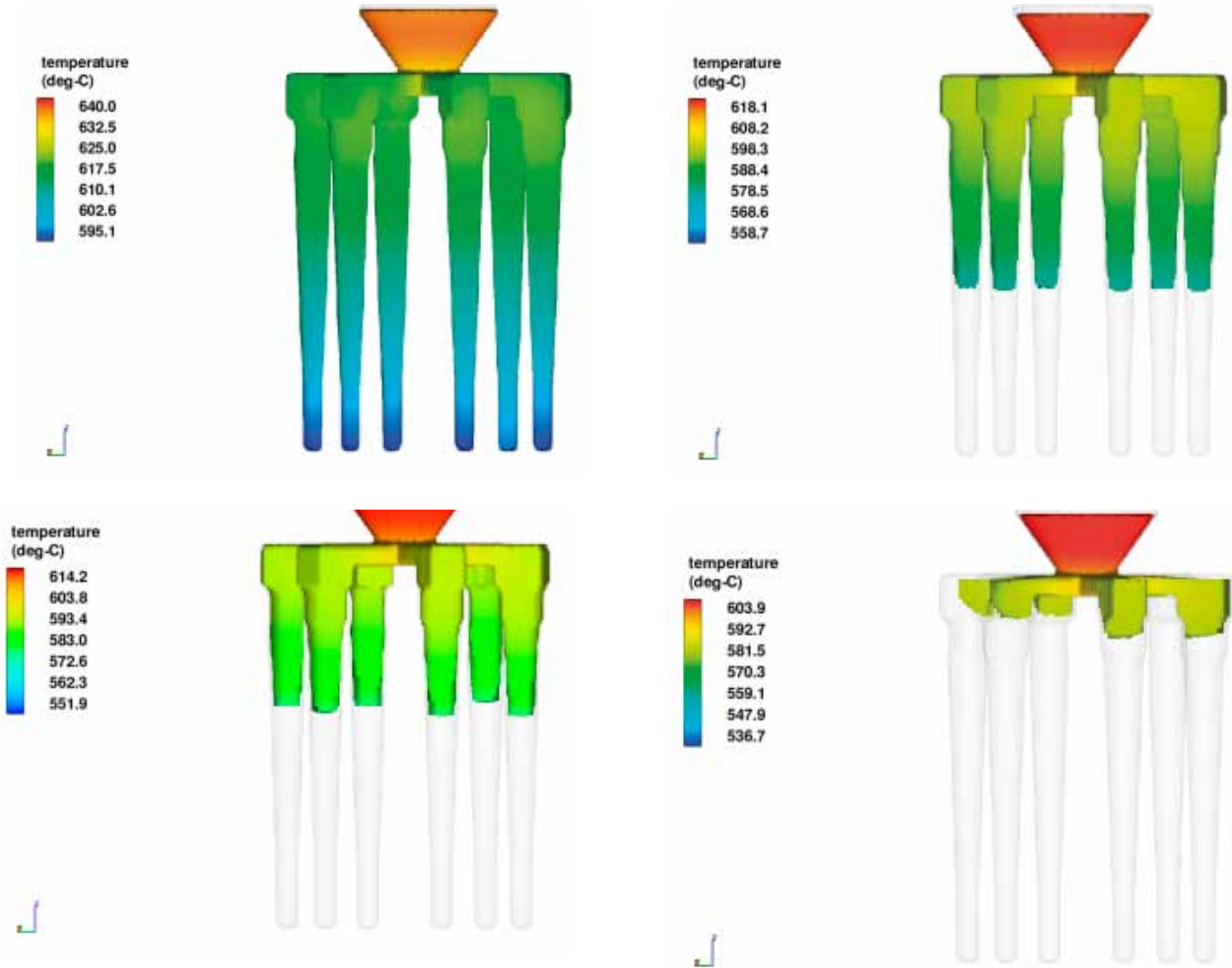
Rys. 3. Wizualizacja przepływu ciekłego metalu we wnęce formy, koncepcja 1, temperatura formy $T_f = 400^\circ\text{C}$
Fig. 3. Visualisation of liquid metal flow in mould cavity, concept 1, mould temperature $T_f = 400^\circ\text{C}$

Na podstawie wyników symulacji procesu odlewania oraz uzyskanego rozkładu temperatury w ciekłym stopie przeprowadzona została symulacja procesu krzepnięcia. Analizowana była wartość temperatury oraz ścieżka przebiegu krzepnięcia w objętości wnęki formy (rys. 4).

W przypadku pierwszej koncepcji zauważalna jest kierunkowość krzepnięcia do wlewów doprowadzających. Wykres prognozowanej krzywej stygnięcia ciekłego stopu został przedstawiony na rysunku 5. Prognozowana porowatość została przedstawiona na rysunku 6.

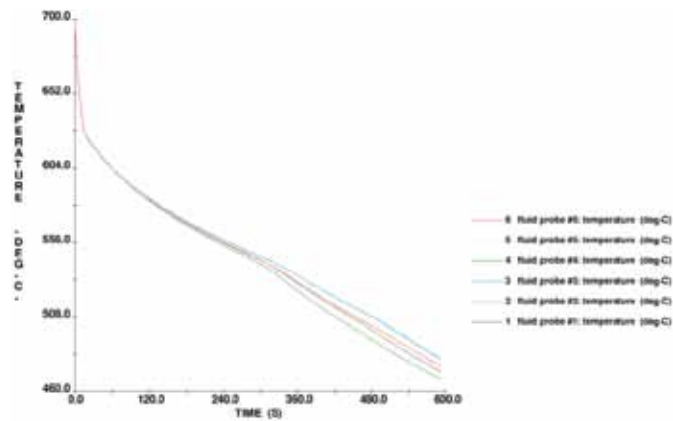
Based on the casting process simulation results and the temperature distribution of the liquid alloy, a simulation of the solidification process was performed. The temperature values and course of solidification across the mould cavity volume were analysed (Fig. 4).

In the case of concept 1, it is noteworthy that solidification occurs in the direction of the inlets. A chart of the predicted cooling curve for the liquid alloy is shown in Figure 5. The predicted porosity is shown in Figure 6.



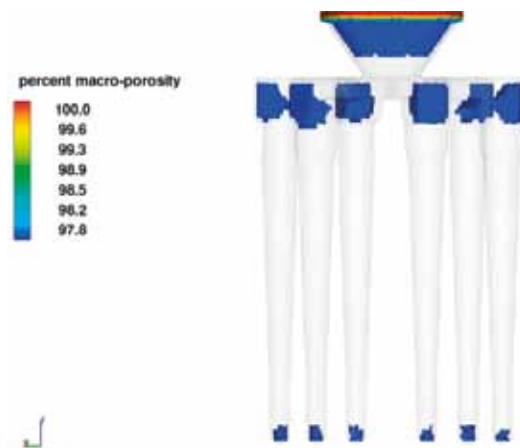
Rys. 4. Wizualizacja fazy ciekłej w trakcie krzepnięcia ciekłego metalu w objętości wnęki formy, koncepcja 1, temperatura formy $T_f = 400^\circ\text{C}$

Fig. 4. Visualisation of liquid fraction in mould cavity, concept 1, mould temperature $T_f = 400^\circ\text{C}$



Rys. 5. Prognozowana krzywa stygnięcia dla koncepcji 1, temperatura formy $T_f = 400^\circ\text{C}$

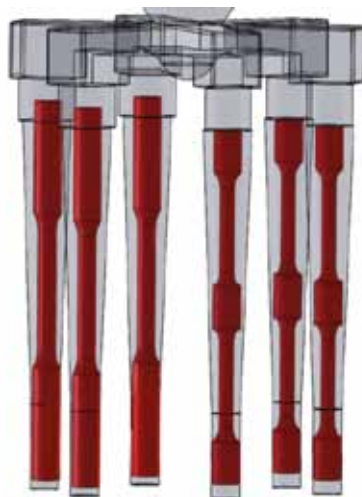
Fig. 5. Predicted cooling curve for concept 1, in MP – Fig. 2, mould temperature $T_f = 400^\circ\text{C}$



Rys. 6. Prognozowana porowatość w objętości wnętrza formy dla koncepcji 1, temperatura formy $T_f = 400^\circ\text{C}$
 Fig. 6. Predicted porosity across mould cavity volume for concept 1, mould temperature $T_f = 400^\circ\text{C}$

W proponowanym układzie porowatości mogą wystąpić w obszarze wlewu głównego oraz w dolnej części próbek. W założeniach konstrukcji takiego układu jest odlanie w dolnej części jedynie naddatku w celu zamontowania próbki w maszynie do wytoczenia próbek wytrzymałościowych, natomiast w samej górnej części znajduje się świadome stworzenie węzła cieplnego w celu ukierunkowania krzepnięcia (rys. 7). Założony obszar do wytoczenia próbki wytrzymałościowej jest wolny od porowatości.

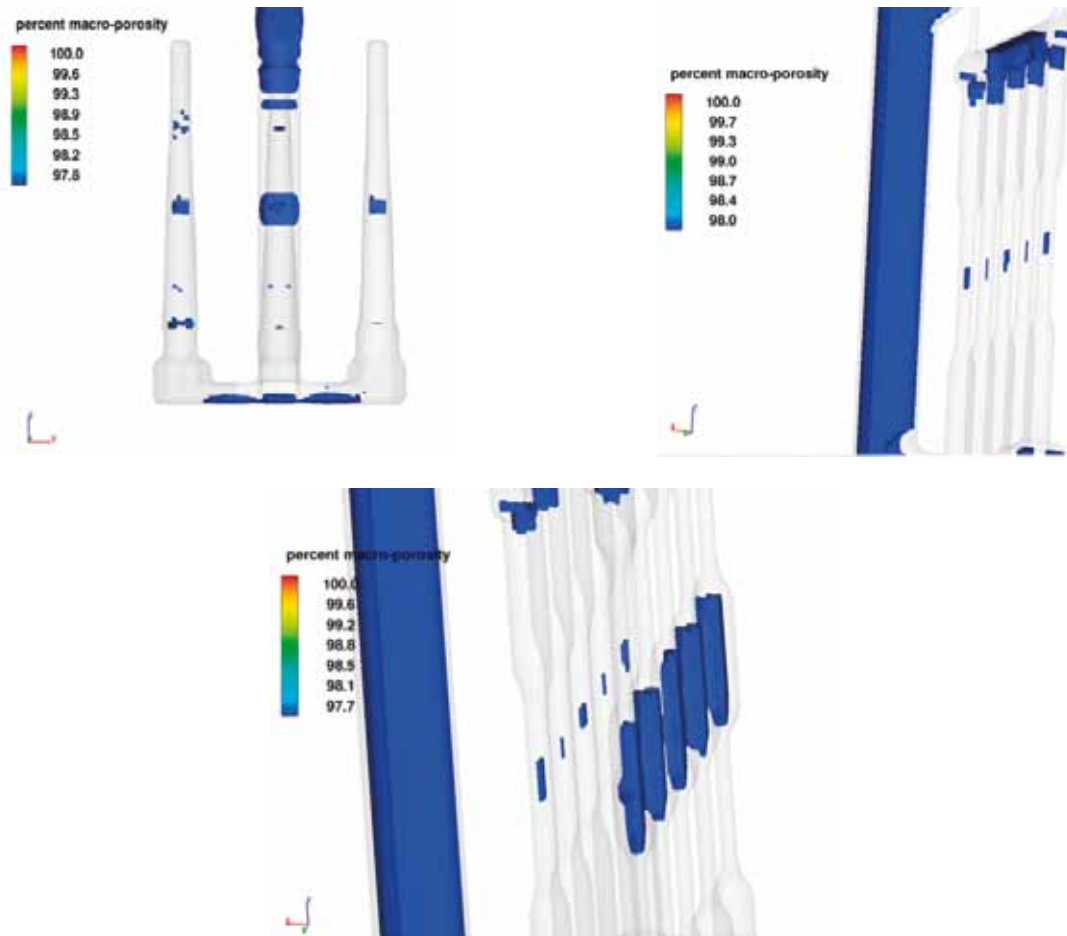
In the proposed design, porosity may occur in the main inlet area and in the bottom parts of the samples. This design assumes that the bottom part of the cast is only an allowance for mounting the sample in a machine for turning strength testing samples, while the very top is intentionally made into a heat node to direct the cooling (Fig. 7). The intended area for strength test sample turning is free of porosity.



Rys. 7. Proponowana koncepcja pozyskania próbek wytrzymałościowych ze złozenia
 Fig. 7. Proposed concept of acquiring strength samples from the assembly

Analogiczne symulacje zostały przeprowadzone dla pozostałych koncepcji przedstawionych na rysunku 1. Na rysunku 8 zostały zestawione wyniki prognozowanej porowatości oraz przebiegi temperatury dla poszczególnych układów.

Similar simulations were performed for the other concepts shown in Figure 1. Figure 8 shows the predicted porosity results and temperature curves for the individual designs.



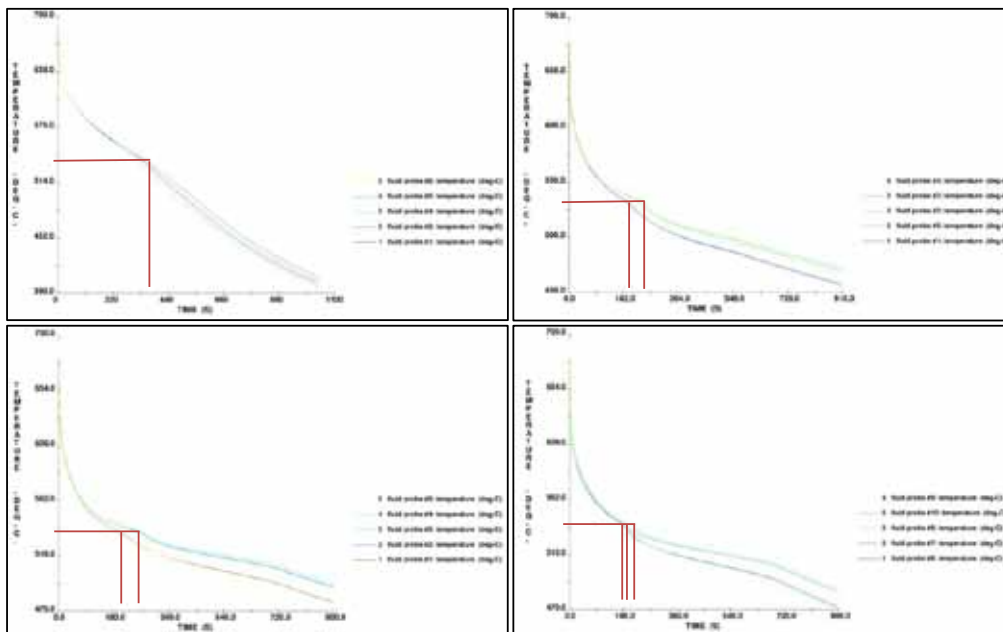
Rys. 8. Porównanie prognozowanych porowatości dla analizowanych koncepcji odlewania, kolejno 2, 3, 4
 Fig. 8. Comparison of predicted porosity values for the analysed casting concepts, in the following order: 2, 3, 4

Wstępna analiza koncepcji 2, 3 i 4, przy założonych warunkach brzegowych, pozwalała przypuszczać, że otrzymanie próbek do badań wytrzymałościowych bez wad nie będzie możliwe. Prognozowane porowatości występowały w obszarze roboczym próbki. Na rysunkach 9 i 10 zostało przedstawione zestawienie krzywych przebiegu temperatury w trakcie stygnięcia w formach przy założeniu początkowej temperatury formy $T_f = 400^\circ\text{C}$ i 500°C .

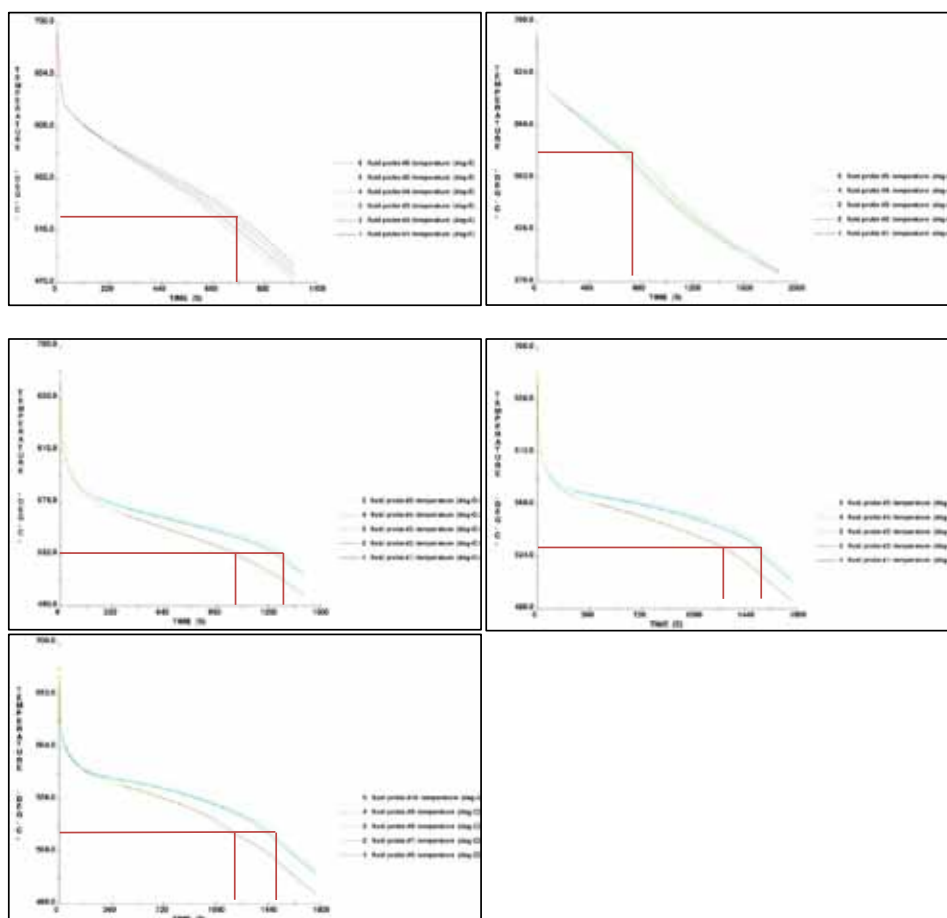
Analiza wykresu pozwala na określenie, jaki jest czas stygnięcia odlewu do temperatury solidus, który dla analizowanego stopu zdefiniowanego w bazie danych wynosi $T_{sol} = 532^\circ\text{C}$. Pierwsza zaproponowana koncepcja pozwala na otrzymanie odlewu, który krzepnie w podobnym przedziale czasu. Oznacza to uzyskanie zbliżonych właściwości wynikających z procesu krystalizacji. Kolejne koncepcje ze względu na usytuowanie odlewów powoduje występowanie różnych warunków krzepnięcia. Analizując prognozowane krzywe stygnięcia dla koncepcji 2, można zauważyć, że czas osiągnięcia temperatury solidus dla wybranych punktów pomiarowych przesunięty jest o ok. 80 s. Podobne warunki zostały osiągnięte w koncepcji 3. Koncepcja 4 różni się

A preliminary analysis of concepts 2, 3 and 4 under the assumed edge conditions suggests that acquiring strength test samples without defects would not be possible. Porosity was predicted to appear in the working sections of the samples. Figures 9 and 10 show a summary of the temperature curves during the cooling in the moulds, assuming an initial mould temperature of $T_f = 400^\circ\text{C}$ and 500°C .

Analysing the chart enables the time to cool down to the solidus temperature to be determined, which for the alloy in question, defined in the database, is $T_{sol} = 532^\circ\text{C}$. The first proposed concept enables casts that solidify within similar time ranges to be obtained. This means obtaining similar properties that result from the crystallisation process. Due to the positioning of the casts, the other concepts lead to different solidification conditions. An analysis of the predicted cooling curves for concept 2 reveals that the times to reach the solidus temperature for selected measurement points are separated by approximately 80 s. Similar conditions were achieved for concept 3. Concept 4 differs significantly in that there are two rows of samples. The heat accumulated in the gypsum mould is greater than in the other designs, so



Rys. 9. Prognozowane krzywe stygnięcia dla koncepcji 2, 3, 4 (pierwszy i drugi rząd), temperatura formy $T_f = 400^\circ\text{C}$
 Fig. 9. Predicted cooling curves for concepts 2, 3 and 4 (rows one and two) $T_f = 400^\circ\text{C}$



Rys. 10. Prognozowana krzywa stygnięcia dla koncepcji 1-4, temperatura formy $T_f = 500^\circ\text{C}$
 Fig. 10. Predicted cooling curve for concepts 1-4, in MP (Fig. 2), mould temperature $T_f = 500^\circ\text{C}$

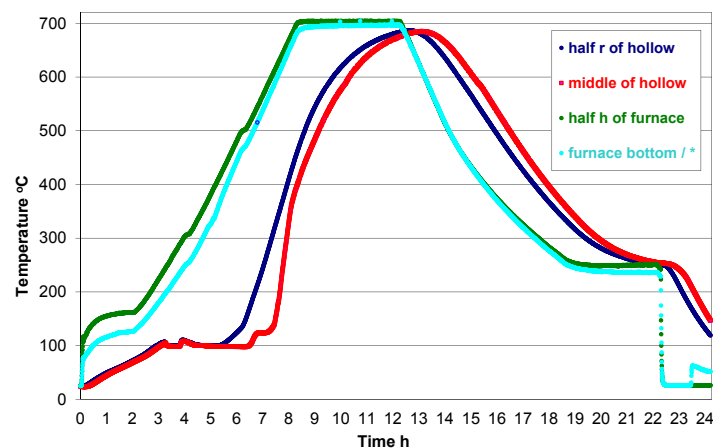
znacząco tym, że w układzie znajdują się dwa rzędy próbek. Ciepło akumulowane w formie gipsowej jest wyższe niż w pozostałych układach, dlatego też wyróżnić można trzy punkty, w których metal osiągnie temperaturę solidus. Kolejna seria symulacji została wykonana dla podwyższonej temperatury początkowej formy gipsowej $T_f = 500^\circ\text{C}$ i została przedstawiona na rysunku 12. Analiza wyników symulacji procesu wypełniania objętości formy ciekłym stopem nie ulega znaczącym zmianom w porównaniu do przeprowadzonych wcześniej analiz dla $T_f = 400^\circ\text{C}$, natomiast będzie miała znaczny wpływ na krzepnięcie ze względu na zmianę początkowego pola temperatury w symulacji procesu krzepnięcia.

Przeprowadzone badania symulacyjne wykonane zostały do wytypowania optymalnej technologii otrzymywania próbek do badań wytrzymałościowych i mikrostruktury przy różnych warunkach początkowej temperatury formy. Najkorzystniejszą technologią otrzymywania próbek jest koncepcja 1, gdzie proces odlewania odbywa się deszczowo. Charakterystyka studzenia jest zbliżona dla wszystkich próbek. W przypadku tej koncepcji konieczne jest wykonanie obróbki mechanicznej w celu wytoczenia próbek do zrywania. W tym przypadku podniesienie temperatury formy z 400 do 500°C może spowodować pogorszenie właściwości początkowych przez wydłużenie czasu krzepnięcia. W przypadku odlewania próbek „na gotowo” dla pojedynczego układu (koncepcja 3) istnieje niebezpieczeństwo powstania porowatości w obszarze roboczym próbki. W przypadku próbek gwintowanych, które „na gotowo” można wytworzyć w koncepcji 3, również istnieje niebezpieczeństwo odlania próbek standardowych z wadami.

three points where the metal reaches the solidus temperature can be identified. Another series of simulations was performed for an elevated initial temperature of the gypsum mould of $T_f = 500^\circ\text{C}$, as shown in Figure 12. The analysis of the simulated process of filling the mould volume with liquid alloy did not significantly change, compared to previous analyses for $T_f = 400^\circ\text{C}$, but it would significantly impact solidification due to the initial temperature field being changed in the solidification process simulation.

The simulated tests were performed to determine the optimum technology for obtaining strength test and microstructure test samples at different initial mould temperatures. The most advantageous technology for producing the samples is concept 1, where the metal is poured in through spray gates. The cooling curves are similar for all samples. In the case of this concept, it is necessary to perform machining processing of the sample to turn the tensile test samples. In this case, increasing the mould temperature from 400 to 500°C may degrade the initial properties due to the longer solidification times.

When casting “ready made” samples, one design (concept 3) creates a risk of porosity forming in the sample’s working section. For threaded samples, which can be “ready made” in concept 4, there also exists a risk of casting standard samples with defects.



Rys. 11. Krzywa wygrzewania badanej mieszanki gipsowej w tulei $\varnothing 150\text{ mm}$

Fig. 11. Test gypsum mix heat soaking in a $\varnothing 150\text{ mm}$ hollow

Masę gipsową przygotowano zgodnie z instrukcją producenta, zachowując odpowiednie proporcje mieszanki wodno-gipsowej. Proces obróbki cieplnej (rys. 11) musi pozwalać na odparowanie wody z formy,

The gypsum was prepared by following the manufacturer’s instructions, maintaining the right ratio in the water-gypsum mix. The heat treatment process (Fig. 11) must enable water to evaporate from the mould,

po czym następują kolejno przemiany gipsu dwuwodnego w półhydrat, następnie anhydryt III i anhydryt II. Ostatnim etapem jest wyrównanie temperatury formy do założonej temperatury odlewania.

3. Przeprowadzenie eksperymentu

W kolejnej części prowadzonych badań wykonane zostały modele woskowe próbek, które wraz z układem wlewowym połączone w zestawy modelowe, które zostały wykorzystane do wykonania form gipsowych (rys. 12).



Rys. 12. Model woskowy oraz tuleja perforowana do wypełnienia gipsem
Fig. 12. Wax model and perforated hollow to be filled with gypsum

We wnętrzu każdej tulei umieszczono po dwa termoelementy w taki sposób, aby jeden mierzył temperaturę w środku tulei (w osi), natomiast drugi punkt pomiarowy znajdował się około 3 cm od brzegu formy, co odpowiadało odległości, do której dochodziły modele woskowe. Model woskowy odwzorowywał również w formie kanał, przez który można było wprowadzić trzeci termoelement, w osłonie z rurki kwarcowej, do wnętrza formy w celu rejestracji temperatury metalu.

Forma gipsowa została poddana obróbce cieplnej w pierwszej fazie wytopił się wosk z wnętrza formy, następnie wypalono formy w temperaturze 720°C i schłodzono do wyznaczonych temperatur zalewania.

Do wytopu użyto stopu o składzie chemicznym zamieszczonym w tabeli 1. Temperatura odlewania metalu została ustawiona na 720°C. Ciekły metal został odlany kolejno do form o temperaturze 100°C, 200°C, 400°C, 500°C oraz do kokili stalowej podgrzanej palnikiem do około 200°C. Na rysunkach 13–15 przedstawione zostały zarejestrowane temperatury w trakcie zalewania i stygnięcia form gipsowych.

which is followed by dihydrate gypsum transformation into hemihydrate, then anhydrite III, then anhydrite II. The final stage is mould temperature equalisation with the assumed casting temperature.

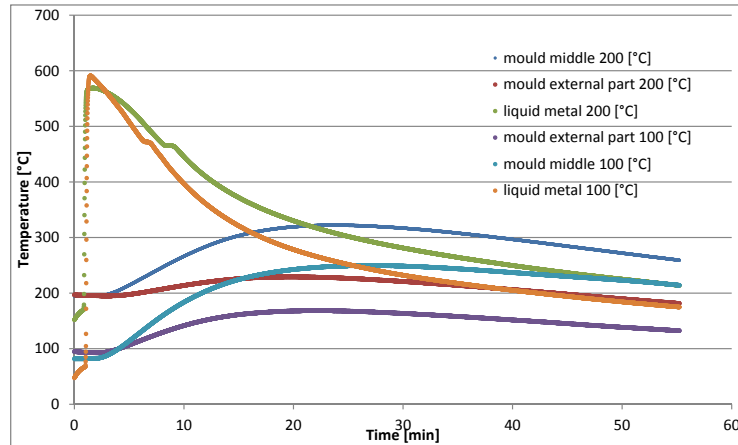
3. Performing the experiment

During the next stage of the study, wax models of the samples were made and combined with the inlet systems into model sets to be used for making the gypsum moulds (Fig. 12).

Two thermocouples were placed inside each hollow so that one measured the temperature in the centre of the hollow (at the axis), while the other measurement point was located approximately 3 cm from the edge of the mould, which corresponded to the distance where the wax models reached. The wax models in the moulds also represented ducts which could be used to insert a third thermocouple in a quartz tube shield into the mould cavity to measure the temperature of the metal.

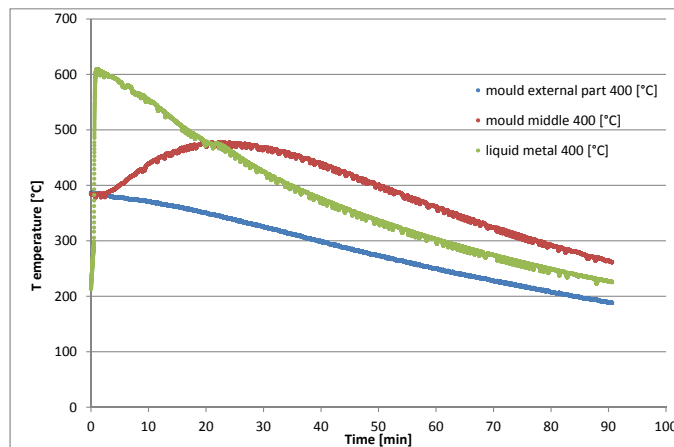
The gypsum moulds were subjected to heat treatment; in the first stage, the wax was melted out of the mould cavity, then the moulds were fired at 720°C and cooled to the assigned filling temperatures.

An alloy with the chemical composition specified in Table 1 was used for casting. The metal casting temperature was set at 720°C. The liquid metal was poured in succession into the moulds at temperatures of 100°C, 200°C, 400°C, and 500°C, and into a steel coquille heated with a burner to approx. 200°C. Figures 13–15 show the temperature values recorded during gypsum mould filling and cooling.



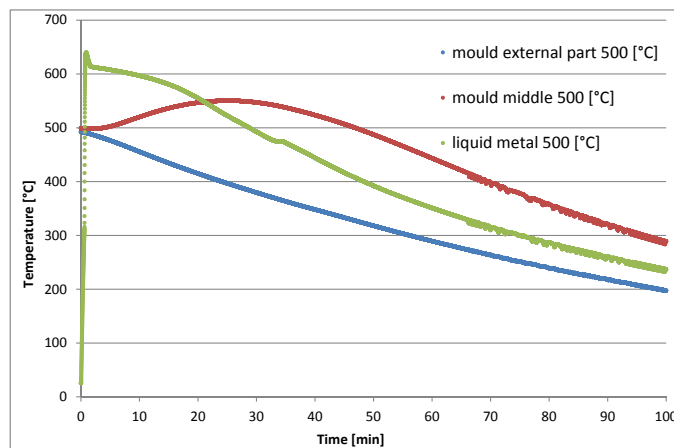
Rys. 13. Przebieg temperatur dla form o $T = 100^{\circ}\text{C}$ i 200°C

Fig. 13. Temperature in mould and liquid metal moulds at temperature, $T = 100^{\circ}\text{C}$ and 200°C



Rys. 14. Przebieg temperatur dla formy $T = 400^{\circ}\text{C}$

Fig. 14. Mould temperature for initial mould temperature, $T = 400^{\circ}\text{C}$



Rys. 15. Przebieg temperatur dla formy o $T = 500^{\circ}\text{C}$

Fig. 15. Mould temperature for initial mould temperature, $T = 500^{\circ}\text{C}$

Na [rysunku 16](#) przedstawiono odlewy, które ułożone są w kolejności od najwyższej temperatury formy do najniższej. Odlewy zostały wypłukane w wodzie, dzięki czemu ich powierzchnia nie uległa uszkodzeniu mechanicznemu w trakcie ich wybijania.

Następnie wykonane zostały zdjęcia z powierzchni zewnętrznych oraz z przełomów odlanych próbek, co zostało przedstawione na [rysunkach 17 i 18](#).

Dla próbek odlewanych do form gipsowych o temperaturach 100°C, 200°C i 400°C wykonano badania mikrostruktury. Uzyskane wyniki przedstawiono poniżej ([rys. 19–21](#)).

W celu lepszego zrozumienia i oceny wpływu czasu krzepnięcia odlewów wykonywanych z badanego stopu na tworzącą się w materiale mikrostrukturę i wielkość ziarna poniżej przedstawiono wyniki badań metalograficznych odlewów wykonanych w innych technologiach odlewniczych ([rys. 22](#)). Rysunek mikrostruktury pokazuje równe powiększenie dla różnych technik odlewania. Widzimy, że szybkie krzepnięcie (ciśnieniowe, kokilowe) powoduje powstanie drobnych ziaren w porównaniu z odlewem piaskowym. Nie przeprowadzono analizy EDS składu fazowego mikrostruktury. Analiza optyczna pokazuje różne wytrącenia dla różnych temperatur formy.

Można zauważyć, iż wraz ze wzrostem temperatury form gipsowych ilość wtrąceń oraz porowatości rośnie. Począwszy od najniższej temperatury na krawędziach walców pojawiają się czarne obszary, które świadczą właśnie o niepożądanych wydzieleniach. Już przy 400°C duże wydzielenia występują na całym obszarze przełomu. Następnie przygotowane zostały próbki wytrzymałościowe i zerwane w statycznej próbie rozciągania. Wyniki zostały zestawione w [tabeli 2](#).

Wytwarzanie odlewów precyzyjnych w formach gipsowych jest procesem skomplikowanym ze względu na potrzebę stałej kontroli wielu parametrów. Przedstawiony nieskomplikowany proces wytwarzania próbek do testów wytrzymałościowych pokazuje znaczenie np. parametru temperatury formy gipsowej. W przypadku wyników przedstawionych na wykresie ([rys. 13](#)) różnice na początku krystalizacji między formą o temperaturze 100 i 200°C wynosi blisko 70 s. Rozpoczęcie krystalizacji, tj. osiągnięcie wartości w linii liquidus, trwa 6 minut od początku rejestracji. W przypadku formy o temperaturze 400°C krystalizacja ciekłego metalu rozpoczyna się po 18 minutach. W przypadku formy o temperaturze 500°C początek krystalizacji rozpoczyna się po 28 minutach. Wydłużony czas rozpoczęcia krystalizacji może powodować wykwit w postaci niepożądanych wtrąceń, co w przypadku badań powodowało spadek właściwości wytrzymałościowych ([Tabela 2](#)).

[Figure 16](#) shows the casts, arranged in order from highest to lowest mould temperature. The casts were washed in water, which protected their surfaces from mechanical damage during removal from the moulds.

Images of external surfaces and fracture surfaces in the cast samples were taken next, as shown in [Figures 17 and 18](#).

Microstructure tests were performed on the samples cast in the gypsum moulds at temperatures of 100°C, 200°C and 400°C. The results are shown below ([Figs. 19–21](#)).

To enable a better understanding and assessment of the impact of solidification time of casts made from the test alloy on the microstructure forming in the material and on grain size, the results of metallographic tests for casts made using other casting processes are shown below ([Fig. 22](#)). The microstructure figure shows equal magnification for different casting techniques. We can see that rapid solidification (HPDC, Die) creates fine grain size compared to sand casting. There was no EDS analysis of the phase composition of microstructure. Optical analysis shows different precipitations for different mould temperature.

It can be observed that with increasing gypsum mould temperature, the amount of inclusions and porosity increases. Starting with the lowest temperatures, black areas appear at the cylinder edges, which are signs of the undesired precipitates. At as low as 400°C, large precipitates are present on the entire fracture surface. Next, strength test samples were prepared and subsequently broken in a static tensile test. The results are shown in [Table 2](#).

Manufacturing of precision castings in gypsum moulds is a complicated process due to needs of constant control of many parameters. The presented uncomplicated process of producing samples for strength tests shows the importance of e.g. the initial temperature parameter of the gypsum mold. For the results presented in the graph ([Fig. 13](#)), the differences in the beginning of crystallization between the mould at 100 and 200°C is near 70 s. The start of crystallization, i.e. the alignment of the liquidus line, takes 6 minutes since the start of registration. For a mould at 400°C, the crystallization of liquid metal begins after 18 min. For a mould with a temperature of 500°C, the beginning of crystallization begins after 28 min. Prolonged time to start crystallization may cause efflorescence in the form of inclusions, which in the case of tests caused a decrease in strength properties ([Table 2](#)).



Rys. 16. Odlewy próbek

Fig. 16. Sample casts arranged from highest to lowest mould temperature



a)



b)



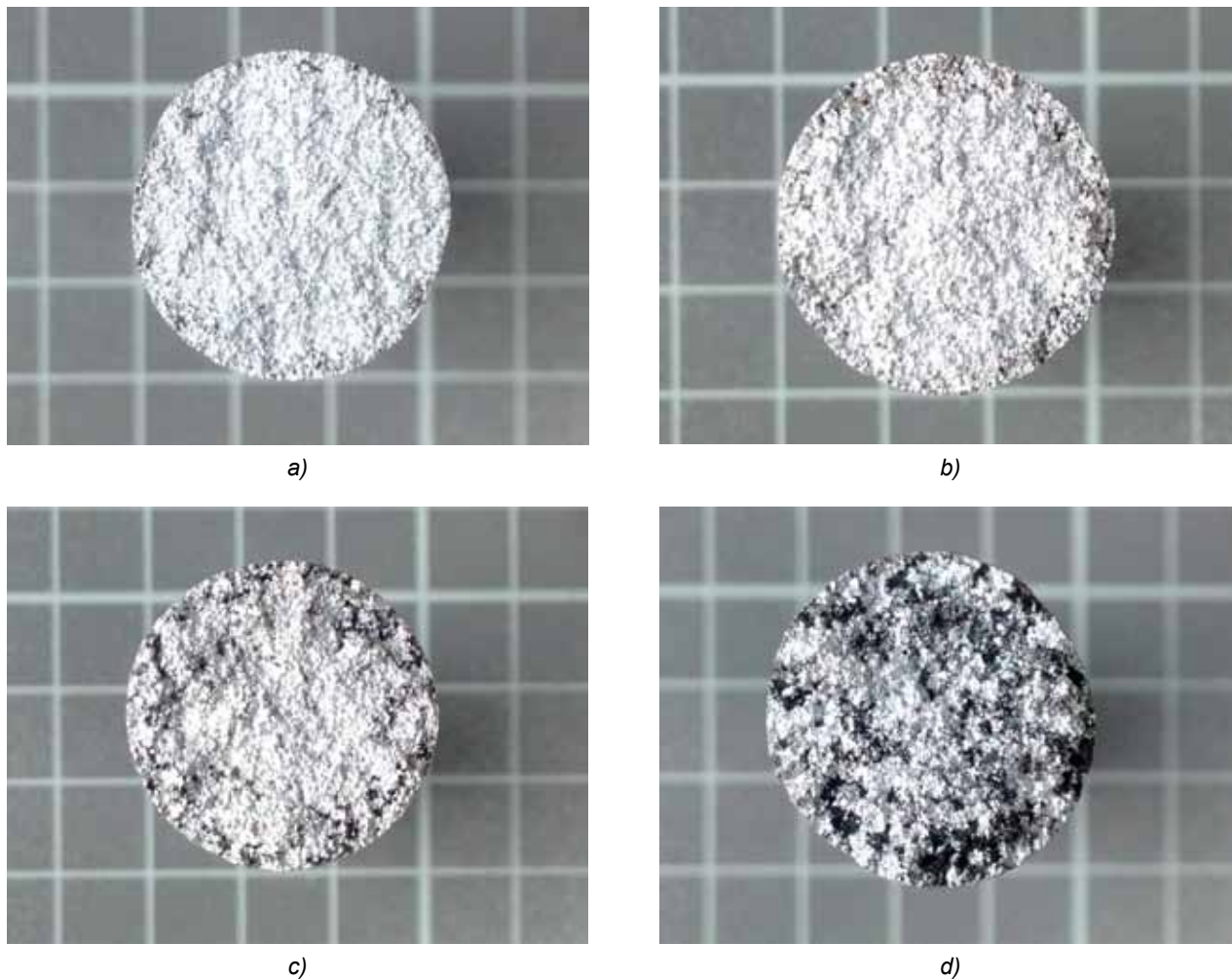
c)



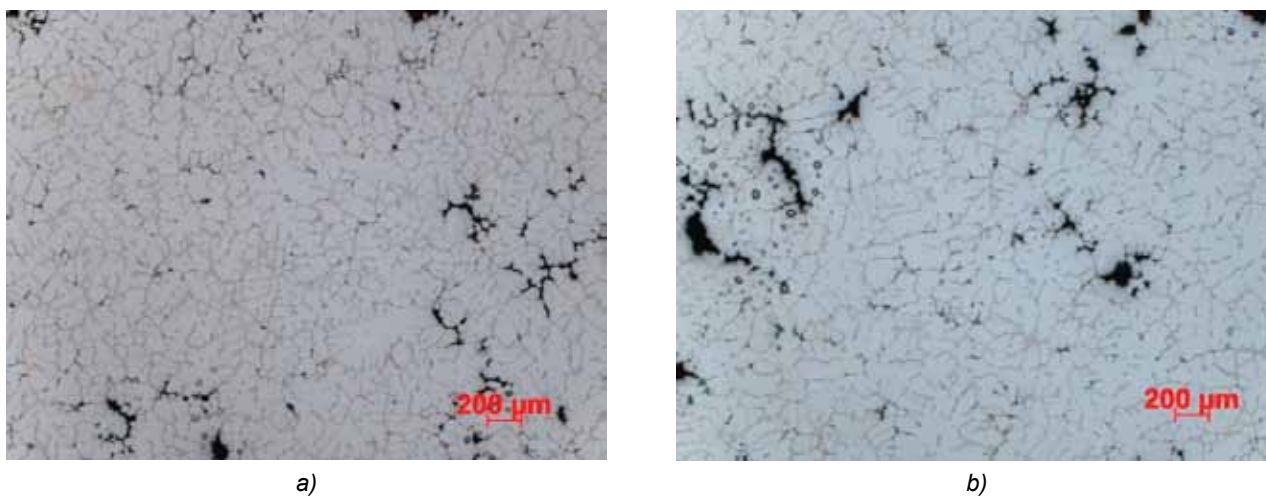
d)

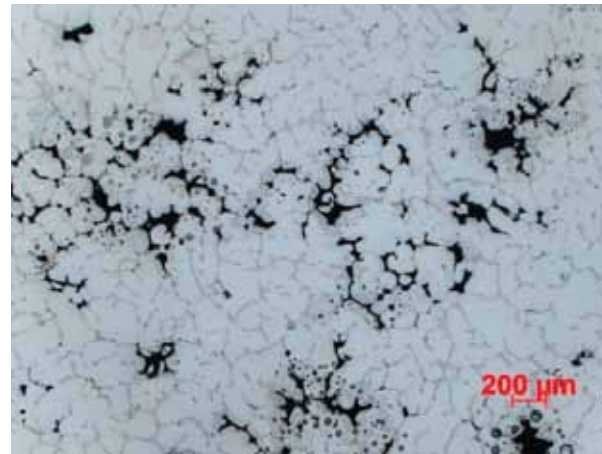
Rys. 17. Powierzchnia odlanych próbek: a) 100°C, b) 200°C, c) 400°C, d) 500°C

Fig. 17. Cast sample surfaces: a) 100°C, b) 200°C, c) 400°C, d) 500°C



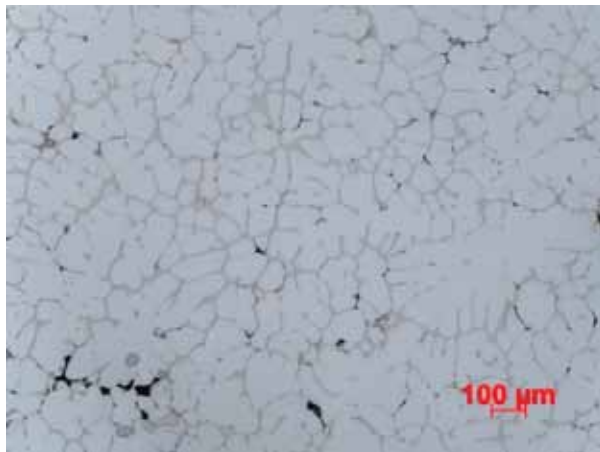
Rys. 18. Przełomy próbek: a) 100°C, b) 200°C, c) 400°C, d) 500°C
Fig. 18. Sample fracture surfaces: a) 100°C, b) 200°C, c) 400°C, d) 500°C



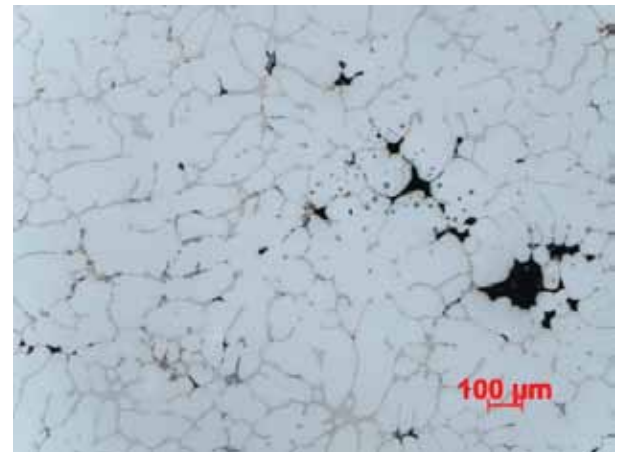


c)

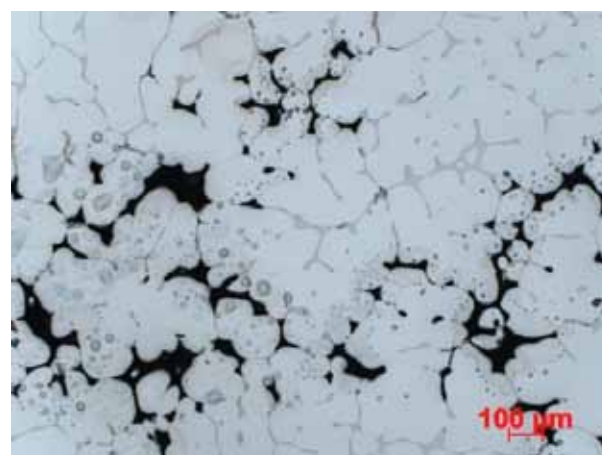
Rys. 19. Mikrostruktury próbek odlanych do form o temperaturze 100°C, 200°C i 400°C, pow. 50×
Fig. 19. Microstructures of samples cast in moulds at temperatures of 100°C, 200°C and 400°C, zoom 50×



a)

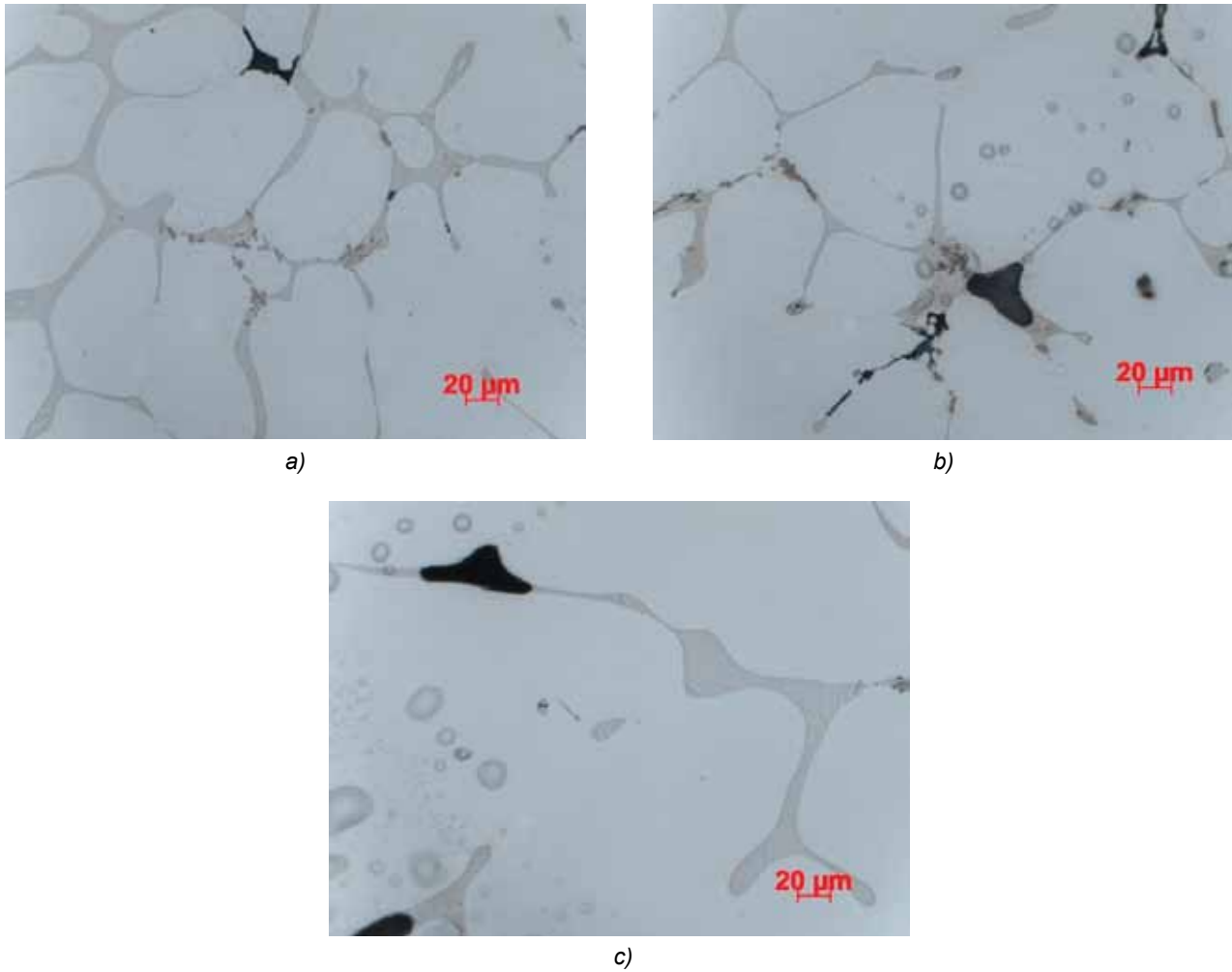


b)

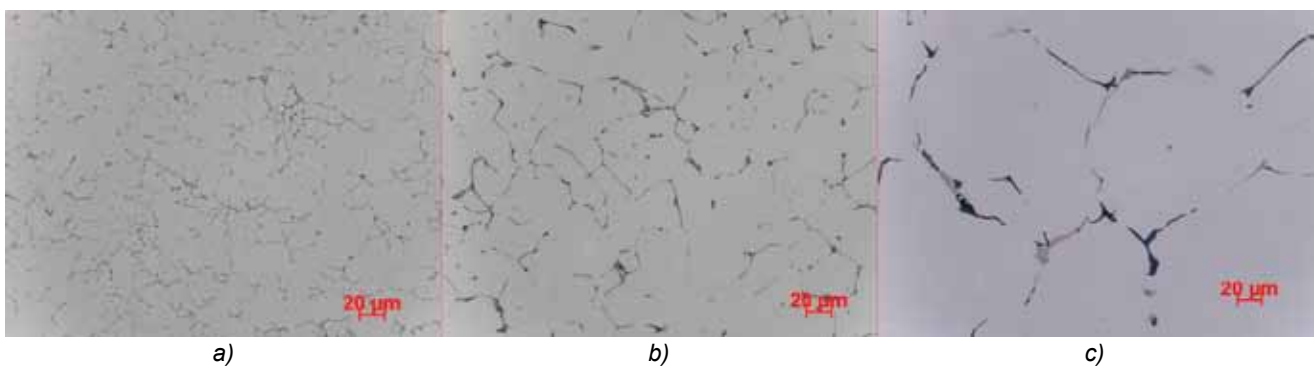


c)

Rys. 20. Mikrostruktury próbek odlanych do form o temperaturze 100°C, 200°C i 400°C, pow. 100×
Fig. 20. Microstructures of samples cast in moulds at temperatures of 100°C, 200°C and 400°C, zoom 100×



Rys. 21. Mikrostruktury próbek odlanych do form o temperaturze 100°C, 200°C i 400°C, pow. 500×
Fig. 21. Microstructures of samples cast in moulds at temperatures of 100°C, 200°C and 400°C, zoom 500×



Rys. 22. Porównanie wielkości ziarna badanego stopu dla odlewów: a) ciśnieniowego, b) kokilowego, c) piaskowego
Fig. 22. Comparison of test alloy grain size for casts made by: a) HPDC, b) die, c) sand casting

Tabela 2. Wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie stopu AlZnMgCu odlanego do kokili i form gipsowych o temperaturach 100, 200, 400 i 500°C

Table 2. Tensile strength test results for AlZnMgCu alloy cast in die and gypsum moulds at temperatures of 100, 200, 400 and 500°C

Rodzaj formy Mould type	Rm, MPa	Temperatura formy, °C Mould temperature, °C
Kokila Die	167	200
Gipsowa Gypsum	97	100
Gipsowa Gypsum	81	200
Gipsowa Gypsum	58	400
Gipsowa Gypsum	38	500

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że odlewy wykonane w formach gipsowych stygną bardzo długo, a sama forma bardzo wolno odprowadza ciepło. W efekcie wydłuża się czas krzepnięcia i stygnięcia odlewów, który jest zależny od początkowej temperatury formy. Jest to zjawisko niekorzystne.

Wraz ze wzrostem temperatury formy wzrasta ilość wad wewnętrznych materiału, co powoduje znaczne obniżenie jego wytrzymałości mechanicznej.

Próbki wykonane w kokili miały znacznie wyższą wytrzymałość mechaniczną niż próbki wykonane w formach gipsowych, mimo iż temperatura kokili również była podniesiona. Wynika to z faktu, że forma metalowa w przeciwieństwie do form gipsowych szybko odbiera ciepło od ciekłego metalu.

Analiza mikrostruktury próbek wykonanych różnymi metodami pozwala zauważyć końcowy efekt kształtowania się ziarn oraz wzrost wad mikrostruktury wraz z temperatury form gipsowych.

Podziękowania

Badania finansowane ze środków funduszu działalności statutowej Instytutu Odlewnictwa w 2018 roku.

Literatura/References

1. Dymek S. 2012. *Modern aluminum alloys for plastic working*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
2. Guoa Z., N. Saunders, A.P. Miodownik, J.P. Schillé. 2005. „Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation”. *Materials Science and Engineering A* 413–414 : 465–469.

4. Summary

The tests performed indicate that casts made in gypsum moulds require long times to cool down, and the moulds themselves remove heat very slowly. As a result, cast solidification and cooling times are longer, depending on the initial temperature of the mould. Which in this case is an adverse phenomenon.

With increasing mould temperature, the number of internal defects in the material increases, which significantly reduces its mechanical strength.

The samples made in the coquille exhibited a much higher mechanical strength than the samples cast in gypsum moulds, even though the coquille temperature was elevated as well. This stems from the fact that, unlike gypsum, a metal mould quickly absorbs heat from the metal.

A microstructure analysis of the samples made using different methods shows the end effect of grain forming, and an increase in microstructure defects with increasing gypsum mould temperature.

Acknowledgements

Study financed from the statutory activity fund of the Foundry Research Institute in 2018.

3. Li X., J.J. Yu. 2013. „Modeling the effects of Cu variations on the precipitated phases and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys”. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22 : 2970–2981,
4. Chinella J.F., Z. Guo. 2011. „Computational thermodynamics characterization of 7075, 7039, and 7020 aluminum alloys using JMatPro”. U.S. Army Research Laboratory, September 2011.
5. Druschitz A.P., J. Griffin. 2009. *Advanced cast aluminum alloys*. Presented at: Shape Casting: The 3rd International Symposium TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2009.
6. Pysz S., R. Żuczek, P. Sprawka. 2015. „The innovative design of suspension cast components of vehicles made from high-strength AlZnMgCu alloy resistant to an IED type threat”. *Solid State Phenomena* 223 : 181–190.
7. Development of the construction and technology of the hydroactive suspension in unmanned mobile vehicles resistant to the threat of IED type. Projekt badawczo-rozwojowy z zakresu bezpieczeństwa i obronności: Nr O R00 0090 12.
8. Development of innovative manufacturing technologies of structurally complex, high-precision light alloy castings. Program Badań Stosowanych, nr PBS 1/A5/9/2012, 2012-2015.
9. Schmitz G.J., U. Prah (Eds.). 2012. *Integrative Computational Materials Engineering: Concepts and Applications of a Modular Simulation Platform*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.



Open Access. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 (CC BY-SA 3.0).