

**Kształtowanie mikrostruktury i właściwości odlewów siluminowych w formach chłodzonych mgłą wodną**

**Shaping the microstructure and properties of silumin castings in molds cooled with water mist**

*Ryszard Władysiak<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji,  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź*

<sup>1</sup>*Lodz University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Materials Engineering and Production Systems, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź*

*E-mail: ryszard.wladysiak@p.lodz.pl*

**Streszczenie**

*W pracy przedstawiono możliwości otrzymywania wysokojakościowych odlewów siluminowych o podwyższonych właściwościach mechanicznych. Zapewnia je zastosowany system wielopunktowego chłodzenia formy mgłą wodną, zarządzany za pomocą dedykowanego komputerowego programu sterującego.*

*Słowa kluczowe: odlewanie kokilowe, silumin AISi11, chłodzenie mgłą wodną, sterowanie komputerowe, mikrostruktura, właściwości mechaniczne*

**Abstract**

*The paper presents the possibility of obtaining high-quality silumin castings with enhanced mechanical properties. It ensures the effective use of the multipoint water mist cooling system which is managed by a dedicated computer program.*

*Keywords: die casting, AISi11 silumin, water mist cooling, computer control, microstructure, mechanical properties*

**1. Wprowadzenie**

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań dotyczą zastosowania otwartego punktowego systemu chłodzenia kokili mgłą wodną do kształtowania struktury i właściwości odlewów siluminowych wytwarzanych w kokilach [1–8].

Celem przeprowadzonych badań była analiza wpływu sekwencyjnego chłodzenia wybranych stref kokili na mikrostrukturę i właściwości odlewu siluminowego. Badania wymagały analizy procesu wymiany ciepła podczas chłodzenia kokili w zakresie temperatury krystalizacji i stygnięcia odlewu w stanie stałym oraz zbadania możliwości sterowania frontem krystalizacji odlewu i otrzymywaną mikrostrukturą za pomocą komputerowego programu sterującego chłodzeniem mgłą wodną w wybranych punktach kokili.

**1. Introduction**

The research results presented in this paper refer to the use of an open point water mist cooling system for dies to shape the structure and properties of silumin castings produced in dies [1–8].

The purpose of the study was the analysis of the impact of sequential cooling of individual die zones on the microstructure and properties of the silumin casting. The study required an analysis of the process of exchanging heat during die cooling for the temperature of crystallization and casting cooling in the solid state as well as researching the possibilities of computer management of the casting crystallization front and the resulting microstructure by software controlling water mist cooling in selected die zones.

Z analizy literatury wynika, że wraz ze wzrostem szybkości chłodzenia siluminu rośnie stopień rozdrobnienia mikrostruktury oraz maleje odległość między płyt-kowa eutektyki [9, 10].

Istotą zastosowania mgły wodnej do chłodzenia kokili jest odparowywanie kropeł wody na chłodzonej powierzchni. Sposób ten zwiększa wielokrotnie efektywność wymiany ciepła w porównaniu do strumienia powietrza.

## 2. Metodyka

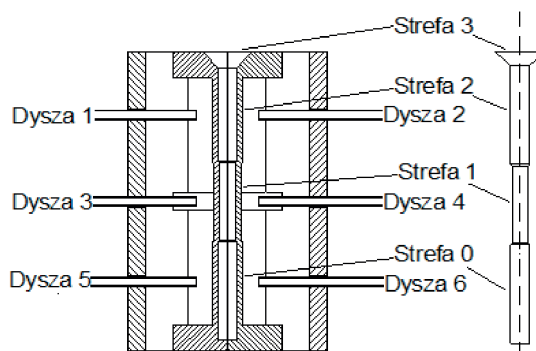
Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym z zastosowaniem kokili przedstawionej na rysunku 1, w której odlewano silumin AC-AISi11. Mgłą wodną, której zdjęcia pokazano na rysunku 2, wytwarzano w wyniku dozowania 0,1 l/min wody i 150 l/min sprężonego powietrza.

The analysis of literature shows that the speed of the silumin cooling process increases and is positively correlated with microstructure refinement and negatively correlated with the spacing between eutectic lamellae [9, 10].

Water evaporation on the cooled surface is essential for using water mist for die cooling. This method significantly increases the heat exchange effectiveness compared to air jets.

## 2. Methodology

The tests were performed on a testing station using the die presented in Figure 1, in which AC-AISi11 silumin was cast. Water mist presented in Figure 2 was created by dosing 0.1 l/min of water and 150 l/min of compressed air.



Rys. 1. Przekrój kokili i odlew z podziałem na strefy chłodzenia

Fig. 1. Cross-sectional drawing of the die and casting divided into cooling zones



Rys. 2. Generowanie mgły wodnej: a) struga wody rozpylona rozpylaczem wirowym, b) strumień mgły wodnej kierowany na chłodzoną powierzchnię kokili; pow. 2×

Fig. 2. Water mist generation: a) water stream atomized by a centrifugal atomizer, b) water mist stream directed to the cooled die surface; 2× mag.

Odpowiedni stopień rozpylenia wody uzyskiwano dzięki zastosowaniu rozpylacza wirowego w przewodzie ze sprężonym powietrzem, które transportowało kropelki wody do strefy chłodzonej kokili. Kokilę chłodzono za pomocą dysz walcowych umieszczonych prostopadle do powierzchni kokili. Do analizy zmian temperatury w strefach wymiany ciepła zastosowano kamerę termowizyjną PI firmy Optris oraz termoelementy typu K.

Kokilę badawczą wykonano ze stali X38Cr-MoV5-1. W korpusie kokili zainstalowano symetrycznie trzy sekcje dysz chłodzących. Dysze umieszczono w taki sposób, aby każda z sekcji dysz chłodziła jedną strefę kokili i odlewu. Sterowanie dyszami chłodzącymi realizowano za pomocą komputerowego systemu sterowania chłodzeniem opracowanego przez firmę Z-Tech. Oprogramowanie systemu zawiera zbiór funkcji i procedur umożliwiających monitorowanie i sterowanie przebiegiem generowania mgły wodnej w wieloobwodowej instalacji chłodzenia za pomocą wcześniej zredagowanego programu sterującego.

Badania wpływu sekwencyjnego chłodzenia na właściwości mechaniczne odlewów siluminowych wykonano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4485.

W kokili odlewano próbki do badania wytrzymałości  $R_m$  z technicznego siluminu niemodyfikowanego AISi11 z zastosowaniem metod (M1–M5) chłodzenia przedstawionych w tabeli 1. Metody M2–M4 różnią się zastosowanym priorytetem chłodzonej strefy, odpowiednio M2 – 1, M3 – 0 i M4 – 2.

The correct degree of water atomization was achieved by using a centrifugal atomizer in the compressed air line, transporting water droplets to the cooled die zone. The die was cooled using cylindrical nozzles located perpendicularly to the surface of the die. The analysis of the changes of temperature in heat exchange areas used an Optris PI thermal vision camera and type K thermocouples.

The die used in the study was made of X38Cr-MoV5-1 steel. Three sections of cooling nozzles were installed symmetrically in the body of the die. The nozzles were located in such a way that each of the nozzles cooled a single die and casting zone. The control of the cooling nozzles was implemented by cooling management computer software made by Z-Tech. The system software includes a set of functions and procedures for the monitoring and control of water mist generation in a multi-circuit cooling system by using a pre-programmed control program.

The impact of sequential cooling on the mechanical properties of silumin castings was tested on an INSTRON 4485 testing machine.

Casting samples of technical unmodified AISi11 silumin for  $R_m$  strength testing were made in the die by using cooling methods (M1–M5) presented in Table 1. Methods M2–M4 differ by the cooled zone priority: M2 – 1, M3 – 0 and M4 – 2.

Tabela 1. Metody chłodzenia kokili

Table 1. Die cooling methods

Kolejność/ Sequence	M1	M2	M3	M4	M5
	Strefa kokili / Die zone				
1	bez chłodzenia / no cooling	1	0	2	0, 1, 2
2		0, 2	1, 2	0, 1	
3		0, 1, 2	0, 1, 2	0, 1, 2	

### 3. Wyniki badań

Opracowanie programu sterującego chłodzeniem wymagało zbadania procesu odlewania siluminu w kokili bez chłodzenia i zbadanie wzajemnych relacji zmian temperatury w poszczególnych częściach kokili i odlewu. Na rysunku 3 przedstawiono zarejestrowane obrazy termograficzne zmian temperatury w czasie zalewania i stygnięcia kokili.

Z analizy zarejestrowanych obrazów wynika, że zalewanie kokili powoduje rozpoczęcie nagrzewania się górnej części kokili, środkowej i dolnej. Po 1,5 sekundy temperatura w kokili wyrównuje się i pojawia się strumień ciepły odbierany przez podstawę kokili.

### 3. Test results

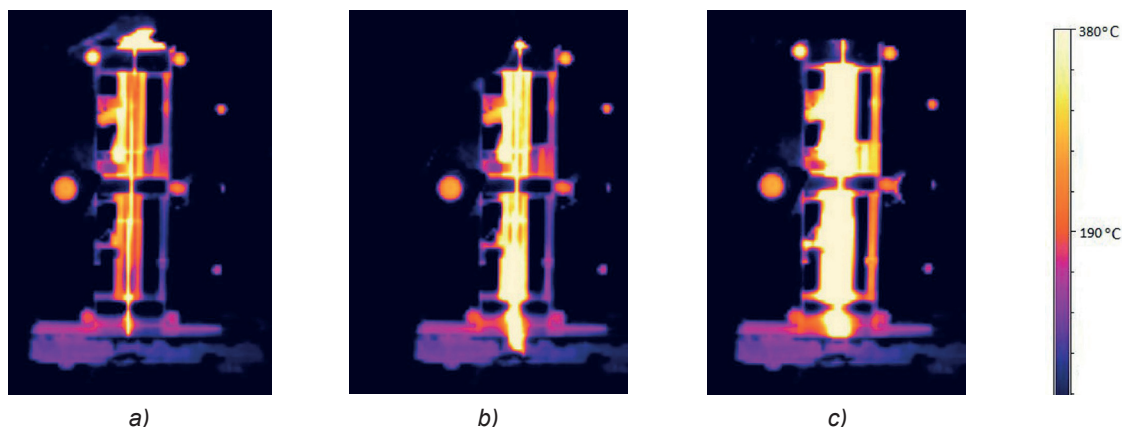
Developing a program for cooling control required researching the silumin die casting process without cooling and the mutual relations of temperature changes in individual areas of the die and casting. Figure 3 presents the captured thermographic images of temperature changes during the pouring and cooling of the dies.

The analysis of registered images shows that the pouring starts die heating in its top, middle and bottom areas. After 1.5 seconds, the temperature in the die evens and a heat flux appears, received by the base of the die. The die heats up, achieving the highest temperature in the fourth second.

Kokila nagrzewa się, osiągając najwyższą temperaturę w 4 sekundzie.

Z badań wynika, że kokila nagrzewała się do temperatury od 332°C do 403°C. Na podstawie wykonanej analizy derywacyjnej  $dT/dt$  temperatury odlewu określono zakres temperatury krzepnięcia odlewu oraz odpowiadające jemu wartości temperatury badanych stref kokili. Wartości te przedstawiono w tabeli 2.

The research shows that the die heats to the temperature from 332°C to 403°C. Based on the  $dT/dt$  derivative analysis of the casting temperature, the temperature range of casting solidification was established as well as the corresponding temperatures of die zones. These findings are presented in Table 2.



Rys. 3. Zmiana temperatury kokili wstępnie podgrzanej do 200°C podczas zalewania siluminem: a) 1 s; b) 2,5 s; c) 4 s  
Fig. 3. Temperature change in the die preheated to 200°C during pouring the silumin: a) 1 s; b) 2.5 s; c) 4 s

Tabela 2. Temperatura w strefach kokili w czasie krystalizacji odlewu  
Table 2. Die zones temperature during casting crystallization

Kolejność/Sequence	Strefa 0 / Zone 0	Strefa 1 / Zone 1	Strefa 2 / Zone 2	Strefa 3 / Zone 3
	Temperatura, °C / Temperature, °C			
Początek krystalizacji / Start of crystallization	380,00	332,00	397,00	585,68
Koniec krystalizacji / End of crystallization	364,00	325,00	403,00	511,00

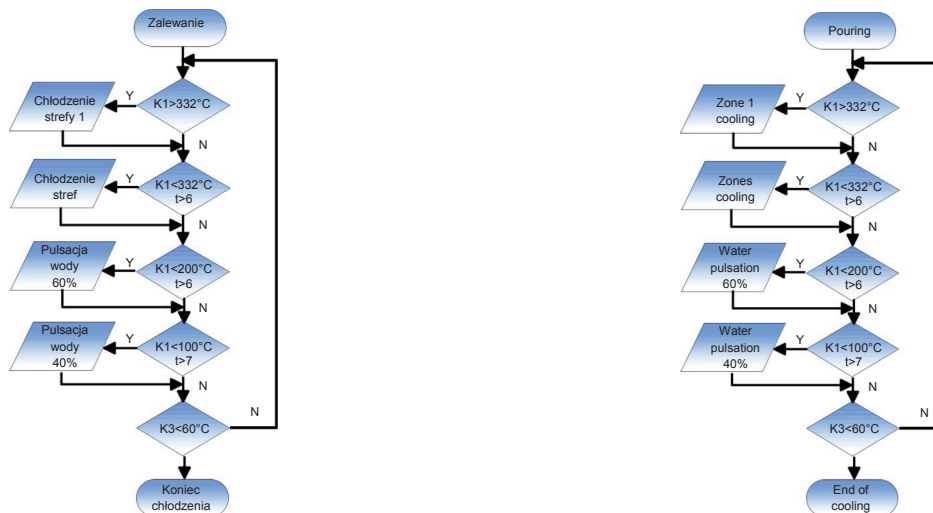
Kokila osiągała najwyższą temperaturę w strefie 2, co spowodowane jest jej położeniem w górnej części kokili – pod nadlewem. W strefie 1 kokila nagrzewała się do temperatury około 332°C. Temperatura tej strefy jest najniższa wśród badanych, ponieważ pole przekroju odlewu w tej strefie jest najmniejsze. Zarejestrowane wartości temperatury kokili zastosowano do opracowywania programu sterującego, tak aby chłodzenie rozpoczęło się najpóźniej w zakresie temperatury procesu krystalizacji. Na rysunku 4 przedstawiono algorytm opracowanego programu sterującego chłodzeniem kokili.

W celu zapewnienia priorytetu krzepnięcia najbardziej odpowiedzialnej części odlewu, tj. w strefie 1, program sterujący (M2) włącza chłodzenie strefy 1 możliwie najwcześniej po wypełnieniu ciekłym metalem wnętrza formy oraz najpóźniej w temperaturze początku krystalizacji siluminu. Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 2 odpowiednia temperatura kokili wynosi 332°C. Następnie po zakończeniu krystalizacji siluminu

The die achieves the highest temperature in zone 2, which is caused by its location in the upper part of the die – under the riser. In zone 1, the die heats to the temperature of ca. 332°C. The temperature of this zone was the lowest in the test due to the fact that the cross-sectional area of the casting in this zone is the smallest. The registered die temperatures were used to create a control program so that the cooling is started no later than in the crystallization temperature range. Figure 4 presents the algorithm of the die cooling control program.

In order to the solidification priority to the most responsible part of the casting, e.g. zone 1, the control program (M2) turns on the cooling of zone 1 as soon as possible after the mold cavity is filled with liquid metal and no later than in the initial phase of silumin crystallization. According to the data presented in Table 2, the correct die temperature is 332°C. Then, after silumin crystallization is complete, the program can turn on the

program może włączyć chłodzenie pozostałych stref, które już nie będą zasilać strefy 1, a przyspieszą proces stygnięcia całego odlewu. Program wyłączy chłodzenie po osiągnięciu przez odlew temperatury 60°C.



Rys. 4. Algorytm opracowanego warunkowego programu sterowania chłodzeniem kokili

Fig. 4. Algorithm of the created conditional program for die cooling control

W końcowym etapie chłodzenia program umożliwił zmniejszenie ilości wody poprzez pulsacyjne dozowanie mgły wodnej oraz osuszanie kokili za pomocą strumienia powietrza.

W efekcie program skrócił czas odlewania do 61 sekund, zapewnił zmniejszenie wad odlewów oraz poprawę bezpieczeństwa pracy na stanowisku zalewania.

### 3. Mikrostruktura i jakość odlewów

Z przedstawionych na [rysunku 5](#) badań mikrostruktury wykonanych odlewów wynika, że mikrostruktura odlewu wytworzonego z chłodzeniem kokili według metody 2 jest bardziej rozdrobniona w porównaniu z mikrostrukturą odlewu wytworzonego bez chłodzenia.

Mikrostruktura siluminu składa się z wykrystalizowanych dendrytów fazy  $\alpha$  oraz ziaren eutektyki płytkowej  $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ . Z badań wynika, że wielkość wydzieleni eutektycznych na grubości odlewu jest bardzo zróżnicowana. Występują zarówno krótkie niemal kuliste wydzielenia krzemu w eutektyce, jak i kilkukrotnie większe wydzielenia płytkowe. Z porównania mikrostruktury wynika, że wydzielenia eutektyczne fazy  $\beta(\text{Si})$  w próbkach chłodzonych mgłą wodną są drobniejsze i jest ich znacznie więcej, ponadto w mikrostrukturze odlewu chłodzonego stwierdzono mniejszą porowatość niż w odlewie niechłodzonym.

W mikrostrukturze otrzymanych odlewów stwierdzono występowanie zjawiska segregacji, które powoduje podział mikrostruktury przekroju odlewu na warstwę przyścienną i rdzeń. Z badań wynika, że zastosowanie

cooling for the remaining zones, which will not supply zone 1, but will accelerate the cooling process for the whole casting. The program will turn off cooling after the casting reaches the temperature of 60°C.

In the final phase of the cooling process, the program decreased the amount of used water by dosing the water mist in pulses and drying the dies with air jets.

This allowed the program to reduce the casting time to 61 seconds, improved the quality of castings and work safety during casting.

### 3. Microstructure and castings quality

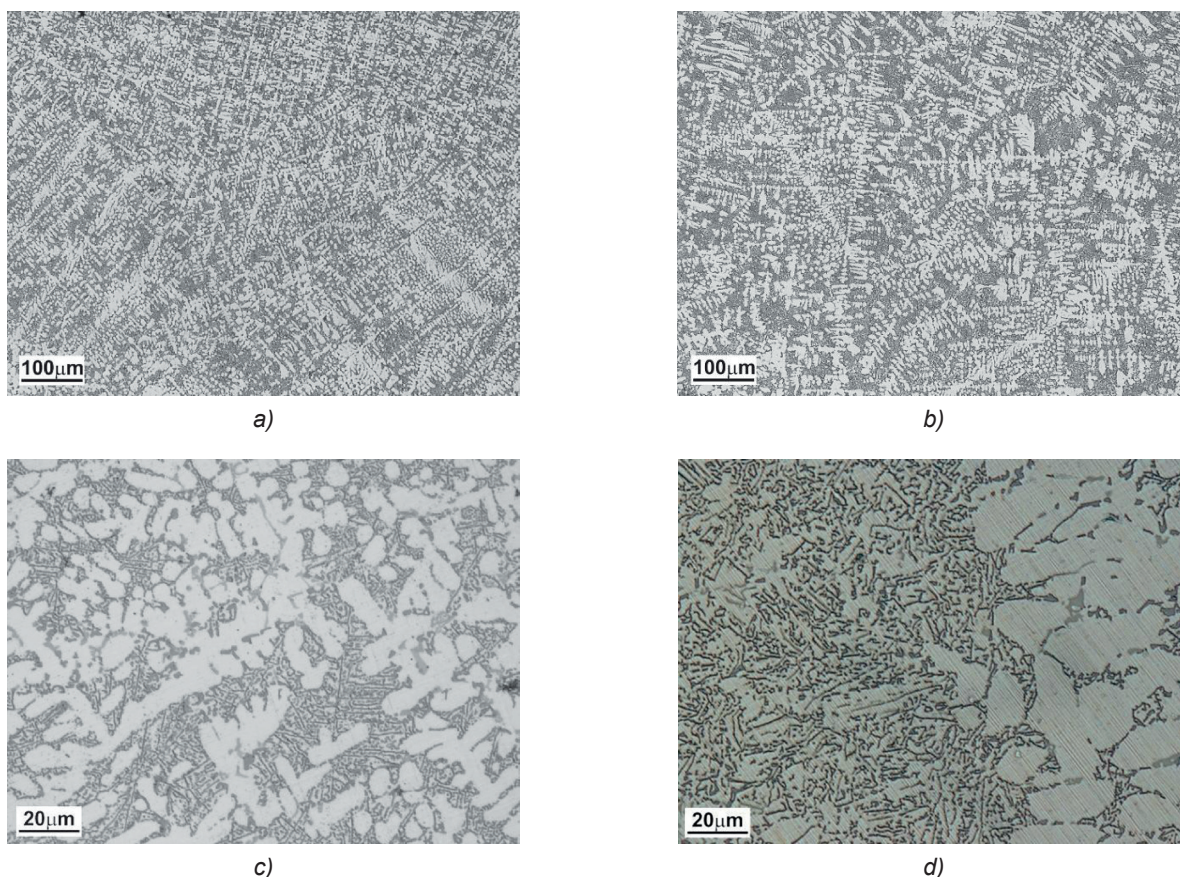
The comparison of microstructures of castings presented in [Figure 5](#) shows that the microstructure of the casting made while using die cooling method 2 is more refined than the microstructure of the casting made without cooling.

The microstructure of silumin is composed of crystallized  $\alpha$  phase dendrites and  $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$  lamellar eutectic grains. Research shows that the size of eutectic precipitates on the thickness of the casting varies significantly. There are both short, almost round silicon precipitates in the eutectic as well as far larger lamellar precipitates. The comparison of microstructures shows that the  $\beta(\text{Si})$  phase eutectic precipitates in samples cooled with water mist are smaller and more numerous. Furthermore, the microstructure of the cooled casting was found to be less porous than in the case of a non-cooled casting.

The microstructure of the castings was found to be segregated – the cross-section of the castings was divided into the external layer and core. The research shows that the use of sequential cooling of the test die

sekwencyjnego chłodzenia kokili badawczej podczas krystalizacji oraz stygnięcia powoduje trzykrotne zwiększenie grubości obszaru warstwy przyściennej, jednocześnie zmniejszając rdzeń. Z obserwacji mikrostruktury odlewu wykonanego według metody 2 wynika, że wydzielenia faz eutektycznych są bardziej rozdrobione w warstwie przyściennej (rys. 5c) niż w rdzeniu (rys. 5d), pomimo występowania w niej nielicznych i dużych (7–8  $\mu\text{m}$ ) płytek fazy  $\beta(\text{Si})$ . Z komputerowej analizy obrazu wydzieleni fazy  $\beta(\text{Si})$  w ziarnach eutektycznych wynika, że średnia ich wielkość dla warstwy przyściennej wynosi 2,8  $\mu\text{m}$ . Ponadto w mikrostrukturze tych obszarów występują duże dendryty fazy  $\alpha(\text{Al})$ .

during crystallization and cooling increases the thickness of the external layers by a factor of 3, reducing the core. Observation of the microstructure of method 2 casting shows that the precipitates of eutectic phases are more refined in the external layer (Fig. 5c) than in the core (Fig. 5d) despite containing few and large (7–8  $\mu\text{m}$ )  $\beta(\text{Si})$  phase lamellae. Computer analysis of the image of  $\beta(\text{Si})$  phase precipitates in eutectic grains shows that their average size in the external layer is 2.8  $\mu\text{m}$ . Furthermore, the microstructure of these areas contains large  $\alpha(\text{Al})$  phase dendrites.



Rys. 5. Mikrostruktura odlewu wykonanego: a) bez chłodzenia, b), c), d) z chłodzeniem sekwencyjnym kokili metodą 2; dendryty fazy  $\alpha$ , eutektyka  $\alpha+\beta$

Fig. 5. Microstructure of the casting made: a) without cooling, b), c), d) with sequential die cooling method 2;  $\alpha$  phase dendrites,  $\alpha+\beta$  eutectic

Przeprowadzone badania właściwości mechanicznych, których wyniki przedstawiono na rysunku 6 wykazały, że zastosowanie chłodzenia kokili mgłą wodną zdecydowanie podwyższa wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  w porównaniu do odlewów niechłodzonych.

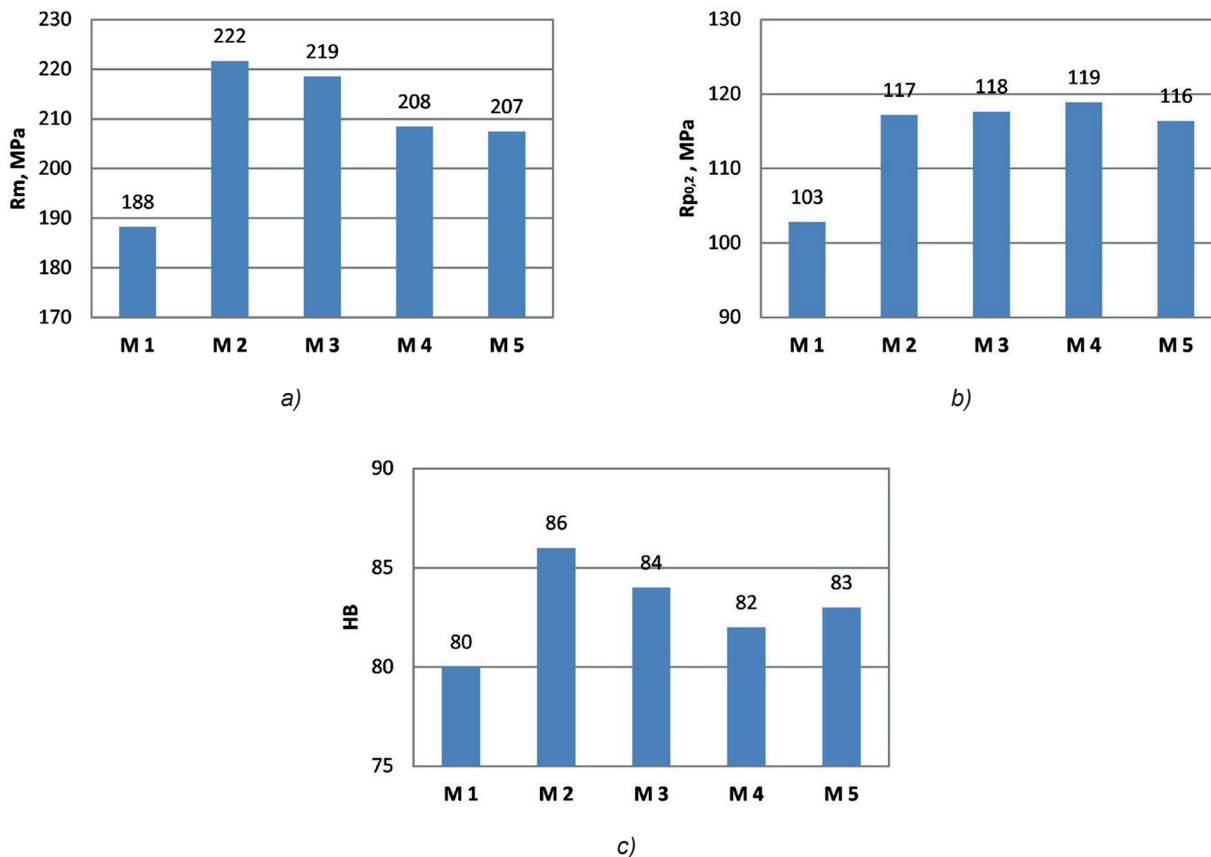
Najwyższe średnie wartości  $R_m = 222$  MPa osiągnięto dla odlewów chłodzonych według metody M2, tj. z priorytetem dolnej części kokili i odlewu. Ponadto wartości pozostałych zbadanych właściwości były następujące:  $R_{p0.2} = 117$  MPa,  $A_5 = 2,7\%$  i HB = 86. Jest to

The conducted test results of mechanical properties presented in Figure 6 proved that cooling the dies with water mist significantly increases their tensile strength  $R_m$ , compared to non-cooled castings.

The largest average values of  $R_m = 222$  MPa were obtained for castings cooled using method 2, i.e. with the priority to the bottom part of the die and casting. The values of the other tested properties were as follows:  $R_{p0.2} = 117$  MPa,  $A_5 = 2.7\%$  and HB = 86. It is a result of decreased shrinkage defects and poros-

spowodowane zmniejszeniem wad skurczowych i porowatości w odlewie oraz drobnoziarnistą mikrostrukturą wynikającą z większego przechłodzenia ciekłego stopu podczas krzepnięcia odlewu.

ity in the casting and a refined microstructure due to the increased cooling of the liquid alloy during casting solidification.



Rys. 6. Wpływ metody chłodzenia (tabela 1) na: a) wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , b)  $R_{p0.2}$  i c) twardość HB siluminu AISi11

Fig. 6. Influence of the cooling method (Table 1) on the: a) tensile strength  $R_m$ , b)  $R_{p0.2}$  and c) hardness HB of the AISi11 silumin

Z przeprowadzonych badań wynika, że sekwencyjnym chłodzeniem kokili mgłą wodną, realizowanym za pomocą komputerowego systemu sterowania programem warunkowym sprzężonym z ciągłym pomiarem temperatury, można efektywnie oddziaływać na strukturę odlewu, zmniejszać ilość wad oraz podwyższać właściwości mechaniczne odlewu.

#### 4. Wnioski

Z przedstawionych w pracy badań wynikają następujące wnioski:

1. Sekwencyjne chłodzenie kokili mgłą wodną zwiększa rozdrobnienie i jednorodność mikrostruktury oraz podwyższa o około 25% właściwości mechaniczne odlewów siluminowych.

The tests show that the sequential cooling of dies with water mist implemented with a computer system controlling a conditional program and ongoing temperature measurement may effectively impact the structure of the casting, reduce the number of defects and improve the mechanical properties of the casting.

#### 4. Conclusions

The tests presented herein yield the following conclusions:

1. Sequential cooling of dies with water mist increases the refinement and homogeneity of the microstructure and increases the mechanical properties of silumin castings by ca. 25%.

2. Program warunkowy sprzężony z pomiarem temperatury kokili daje możliwość efektywnego sterowania procesem odlewania siluminów w kokili chłodzonej za pomocą otwartego wielopunktowego systemu chłodzenia mgłą wodną.
2. The conditional program coupled with die temperature monitoring provides a method of effective management of silumin casting process in dies cooled with an open multi-point water mist cooling system.
3. Komputerowe sterowanie systemem chłodzenia mgłą wodną zapewnia ograniczenie ilości wody w procesie chłodzenia do aktualnych zdolności odparowania przez chłodzoną kokilę.
3. Computer management of the water mist cooling system provides a limitation on the amount of water during the cooling process to correspond to the current evaporation capabilities of the cooled die.

## Podziękowania

W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w ramach projektu badawczego nr N N508 399237 finansowanego ze środków na naukę przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autor wyraża podziękowania zespołowi Katedry Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji Politechniki Łódzkiej za pomoc w wykonaniu oprzyrządowania i realizacji badań.

## Acknowledgments

The article presents the findings of research included in the research project no. N N508 399237 financed by the science funding programme of the Ministry of Science and Higher Education. The author thanks the team of the Department of Materials Engineering and Production Systems of the Lodz University of Technology for their help in making the tools and conducting tests.

## Literatura/References

1. Władysławski R. (2007). Effective Intensification Method of Die Casting Process of Silumins. *Archives of Metallurgy*, 52(3), 529–534.
2. Władysławski R. (2007). Assessment of Effectiveness of Water Mist Cooling of Casting Die. *Archives of Foundry Engineering*, 7(4), 175–182.
3. Władysławski R. (2008). Water mist effect on heat transfer coefficient in cooling of casting die. *Archives of Foundry Engineering*, 8(3), 227–236.
4. Władysławski R. (2008). Water mist effect on cooling range and efficiency of casting die. *Archives of Foundry Engineering*, 8(4), 213–218.
5. Władysławski R. (2010). Effect of water mist on cooling process of casting die and microstructure of AlSi11 alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 55(3), 939–946.
6. Władysławski R. (2010). Water mist effect on cooling process of casting die and microstructure of AlSi9 alloy. *Archives of Foundry Engineering*, 10(2), 185–194.
7. Władysławski R. (2011). Heat transfer analysis during cooling of die with use of water mist. *Archives of Foundry Engineering*, 11(2), 167–174.
8. Władysławski R., Budzyński P. (2012). Structure of water mist and its impact on cooling efficiency of casting die. *Archives of Foundry Engineering*, 12(2), 251–260.
9. Hach J.E. et al. (1984). *Aluminium: properties and physical metallurgy*. Ohio: ASM Metals Park, p. 37.
10. Panahi D., Malakhov D.V., Gallerneault M., Marois P. (2011). Influence of cooling rate and composition on formation of intermetallic phases in solidifying Al–Fe–Si melts. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 50(2), 173–180.