

**POWŁOKI KONWERSYJNE NA ODLEWACH CIŚNIENIOWYCH  
ZE STOPÓW MAGNEZU****CZĘŚĆ 1: WPŁYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH  
ODLEWANIA CIŚNIENIOWEGO NA JAKOŚĆ ODLEWÓW  
ZE STOPU AZ91****CONVERSION COATINGS ON MAGNESIUM ALLOY DIE CASTINGS  
PART 1: THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF  
THE PRESSURE DIE CASTING PROCESS ON THE QUALITY OF  
CASTINGS MADE FROM THE AZ91 ALLOY**

*Piotr Dudek<sup>1</sup>, Aleksander Fajkiel<sup>1</sup>, Tomasz Reguła<sup>1</sup>, Janusz Mielniczuk<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

<sup>2</sup>*POLMAG, ul. Szkolna 15, 47-225 Kędzierzyn-Koźle*

**Streszczenie**

*W artykule przedstawiono wyniki badań nad doбором optymalnych parametrów technologicznych odlewania gorącomorowej maszyny ciśnieniowej w celu uzyskania odlewów ze stopu magnezu AZ91, przeznaczonych do pokrywania powłokami ochronno-dekoracyjnymi. Odlewy takie wymagają szczególnej staranności wykonania, ponieważ - oprócz odpowiednich właściwości mechanicznych i małej porowatości, muszą charakteryzować się bardzo dobrym stanem powierzchni (odpowiednia faktura i chropowatość oraz brak wad powierzchniowych, takich jak: linie płynięcia, fałdy, smugi itp.). Dla wytypowanego detalu (odlew klamki) opracowano plan eksperymentu, według którego przeprowadzono badania na stanowisku odlewania ciśnieniowego w odlewni POLMAG w celu określenia istotnych parametrów wpływających na jakość powierzchni odlewów.*

*Słowa kluczowe:* *gorącomorowa maszyna ciśnieniowa, powłoki ochronno-dekoracyjne, porowatość, chropowatość*

**Abstract**

*The article presents the results of research on the selection of optimum technological parameters of the hot-chamber die casting machine operation to make castings in AM50 magnesium alloy, coated next with the decorative and protective coatings. Castings of this type require special care during performance, because in addition to the high mechanical properties and low porosity, they should have a very good surface finish (proper texture and roughness, and absence of surface defects such as flow lines, folds, streaks, etc). For the specified detail (cast handle), a plan of the experiment was developed, according to which studies were carried out on a die-casting stand operating in the POLMAG Foundry to determine the important parameters affecting the surface quality of castings.*

*Key words:* *hot-chamber die casting machine, protective-decorative coatings, porosity, roughness*

## Wstęp

Magnez oraz jego stopy należą do najłżejszych materiałów konstrukcyjnych. Dzięki bardzo dobrym właściwościom fizycznym i mechanicznym są coraz powszechniej stosowane w przemyśle lotniczym, samochodowym oraz w elektronice. Magnez i jego stopy są metalami reaktywnymi i bardzo podatnymi na korozję, szczególnie w środowiskach zawierających jony chlorkowe. Ulegają również korozji atmosferycznej ze względu na jej zasadowy charakter. Korozja najczęściej objawia się białymi produktami, które są solami, względnie wodorotlenkami. Wodorotlenek tworzy się pierwszy, wiążąc następnie kwaśne składniki atmosfery, np. dwutlenek węgla lub dwutlenek siarki.

W przypadku stopów magnezu, podobnie jak przy stopach aluminium, ochronne warstwy tlenkowe wytworzone drogą utleniania chemicznego zabezpieczają przed korozją atmosferyczną, jednak ze względu na niższą odporność warstwy tlenków na stopach magnezu, w porównaniu z aluminium, konieczne jest nakładanie na ich powierzchni trwałych powłok ochronnych, np. powłok malarskich, konwersyjnych czy też powłok elektrochemicznych lub stosowanie procesów anodowania oraz osadzania powłok z fazy gazowej.

## Określenie wymagań, co do stanu powierzchni odlewów z uwzględnieniem powierzchniowych wad odlewniczych (np. fałdy, smugi, naloty kwieciste itp.)

Odlewy ciśnieniowe po oczyszczeniu, najczęściej metodami mechanicznymi, traktowane są w zasadzie jako gotowe produkty i nie podlegają dalszej obróbce powierzchniowej. I jest to prawda, ale w odniesieniu do odlewów wykonanych ze stopów aluminium i cynku, bowiem one samoczynnie pokrywają się warstwą tlenków, które zabezpieczają je przed dalszą korozją.

Stopy magnezu, niezależnie od technologii wykonywania odlewów, wskutek silnie zasadowego charakteru i dużej reaktywności z atmosferą otoczenia, w bardzo krótkim czasie pokrywają się produktami korozji, głównie wodorotlenkami. Stąd nawet na czas transportu wymagają krótkotrwałego zabezpieczenia, np. poprzez wytworzenie chemicznej powłoki chromianowej.

O uzyskaniu dobrej powierzchni odlewu pod pokrycie ochronne decydują parametry odlewania oraz obróbka wykańczająca. Wiąże się to nierozdzielnie z wymaganiami dotyczącymi jakości ciekłego metalu, właściwego doboru środków oddzielających i smarujących oraz właściwą obróbką powierzchni gotowego już odlewu.

## Opracowanie planu eksperymentu

Przez eksperyment rozumie się zazwyczaj serię doświadczeń umożliwiających uzyskanie opisu matematycznego w postaci określonych algorytmów oceniających działanie badanego obiektu. Przeprowadzenie eksperymentu jest zazwyczaj bardzo kosztowne i dlatego też dąży się do wykonania możliwie krótkich serii doświadczeń [1]. W przypadku odlewnictwa ciśnieniowego jest to o tyle istotne, że na jakość odlewów ma wpływ około 100 czynników – oczywiście nie wszystkie w jednakowym stopniu [2]. Aby ograniczyć ich ilość, stosuje się plany eksperymentów.

Podstawowymi parametrami (czynnikami) dla otrzymania poprawnych odlewów ze stopów magnezu na maszynie gorącomorowej, którymi można i należy sterować są:

- szybkość tłoka prasującego w poszczególnych fazach procesu odlewania;
- temperatura metalu,
- temperatura ustnika (dyszy),
- temperatura formy.

Każdy z tych parametrów (czynników) może mieć dwa stany (poziomy) – wysoki i niski.

W przypadku odlewania stopów magnezu na maszynach gorącomorowych z tak zwanym „korkiem” (część metalu, która pozostaje w ustniku i krzepnie, zamykając dyszę wlewową w celu wyeliminowania niebezpieczeństwa zapalenia się stopu w piecu), temperatura ustnika musi być ściśle określona i stała, umożliwiając jego wytworzenie się.

Przy odlewaniu z „korkiem” metal praktycznie znajduje się bardzo blisko układu wlewowego, dlatego I faza jest bardzo krótka i nie wpływa praktycznie na jakość odlewu (inaczej niż w przypadku maszyn zimnokomorowych, gdzie I faza ma za zadanie wypchnięcie powietrza z komory zalewowej). Dlatego też jako czynnik o dużym znaczeniu na jakość odlewu przyjęto wartość II fazy odlewania ciśnieniowego. Plan eksperymentu, który przedstawiono w tabeli 1, uproszczono do 3 zmiennych (każdy na poziomie wysokim i niskim) oraz wartość średnią.

Wybrany, uproszczony plan eksperymentu PS/DS-P wymaga przeprowadzenia małej liczby pomiarów – jedynie dla 3 zmiennych (każdy na poziomie wysokim i niskim) (tabela 1). Dla porównania wpływu poszczególnych parametrów odlewania ciśnieniowego na jakość odlewów, dodatkowo przeprowadzono badania uwzględniające wartość średniej (poziom 0).

Tabela 1. Plan eksperymentu

Table 1. Plan of experiment

Nr pomiaru	X			Wielkości wejściowe		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	II Faza odlewania 1–3 m/s	Temp. formy 180–210°C	Temp. metalu 640–690°C
1	-1	-1	-1	1	180	640
2	+1	-1	-1	3	180	640
3	-1	+1	-1	1	210	640
4	+1	+1	-1	3	210	640
5	-1	-1	+1	1	180	690
6	+1	-1	+1	3	180	690
7	-1	+1	+1	1	210	690
8	+1	+1	+1	3	210	690
0	0	0	0	2,5	195	665

## **Przeprowadzenie badań na stanowisku doświadczalnym w odlewni POLMAG**

W procesie odlewania ciśnieniowego główne trudności polegają na doborze właściwych parametrów odlewania uwzględniających całość wymogów stawianych odlewom. Okazuje się bowiem, że parametry odpowiednie dla zaspokojenia jednego wymagania, np. zwartości struktury określonej wartością gęstości, pozostają w całkowitej sprzeczności z wymaganiami jakości powierzchni – niezbędnej przy nakładaniu powłok dekoracyjnych czy antykorozyjnych.

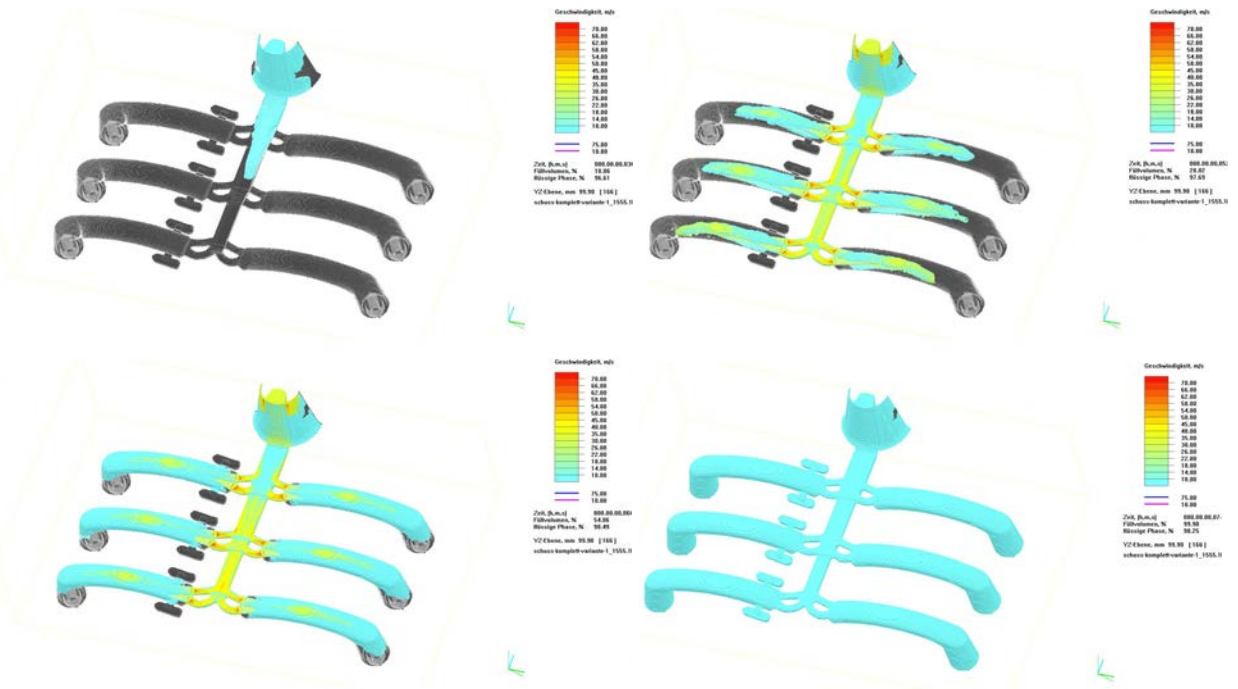
Badania przeprowadzono na poziomej, gorącomorowej maszynie ciśnieniowej QDCM 400 STANDARD, znajdującej się na wyposażeniu firmy POLMAG.

Parametry pracy maszyny ciśnieniowej (prędkość w poszczególnych fazach, czas narostu ciśnienia) oraz warunki cieplne procesu (temperatura metalu w piecu, obu części formy oraz dyszy) nastawiane były i kontrolowane za pomocą panelu sterującego i programu opracowanego przez firmę POLMAG.

System wtryskowy w maszynach gorącomorowych jest kontrolowany poprzez zamknięty układ regulacji, oparty na zaworze proporcjonalnym MOOG. Wszystkie ustawiane parametry (prędkości tłoka wtryskowego, punkty przełączania, wartości ciśnień itd.) są zapisywane w systemie pamięci sterowania maszyny i dodatkowo kontrolowane wizualizacją na ekranie monitora. Parametry wtrysku, po wprowadzeniu ich do pamięci i zatwierdzeniu, są przesyłane do karty mikroprocesorowej MOOG, która przetwarza je na sygnały elektryczne przesyłane już bezpośrednio do zaworu proporcjonalnego. Zawór proporcjonalny przesyła z powrotem do karty wartość swego położenia i na podstawie tego karta oblicza wartości korygujące do wcześniejszych wartości zadanych. W ten sposób odbywa się regulacja w układzie zamkniętym w czasie rzeczywistym. Regulacja prędkości tłoka wtryskowego odbywa się poprzez regulację przepływu medium hydraulicznego przez zawór proporcjonalny [3].

## **Konstrukcja formy**

Precyzyjnie dobrane parametry technologiczne odlewania ciśnieniowego nie pozwolą na uzyskanie satysfakcjonujących odlewów, jeśli forma będzie źle skonstruowana. Wymóg jednoczesnego wypełniania wszystkich fragmentów formy ciśnieniowej, odpowiednia wielkość rozmieszczenia przelewów i odpowietrzeń ma na celu ograniczenie porowatości odlewów, co bezpośrednio wpływa na wytrzymałość odlewów i stan ich powierzchni. W celu weryfikacji poprawności wykonania formy wykonano w odlewni POLMAG symulację numeryczną wypełniania wnętrza formy, która potwierdziła poprawność konstrukcji formy (rys.1).



Rys. 1. Symulacja numeryczna procesu wypełniania wnęki formy (prędkość metalu w szczelinie wlewowej)

Fig. 1. Numerical simulation of the mould cavity filling process (metal flow rate in the pouring slot)

## Badania termowizyjne

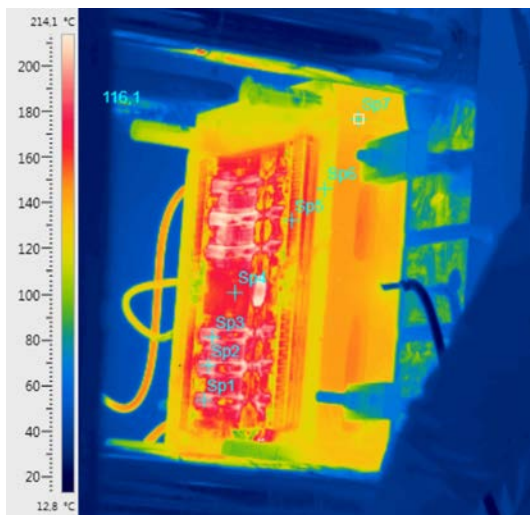
Celem badań termowizyjnych było określenie rozkładu temperatury w formie przed i po zalaniu jej ciekłym stopem magnezu.

Termowizja (termografia) to nowoczesna technika diagnostyczna wykorzystująca zjawisko promieniowania cieplnego, zwanego również promieniowaniem podczerwym. Zjawisko to jest charakterystyczne dla każdego ciała o temperaturze powyżej zera bezwzględnego (absolutnego), czyli powyżej  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

Badania przeprowadzono za pomocą kamery termowizyjnej FLIR SC660, będącej na wyposażeniu Instytutu Odlewnictwa w Krakowie (rys. 2).

Najważniejsze parametry kamery termowizyjnej FLIR SC660:

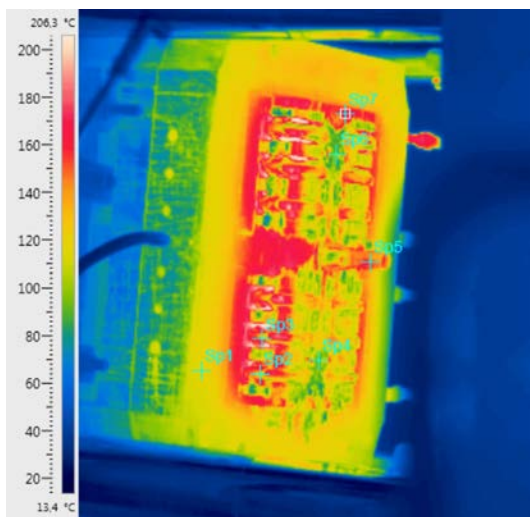
- czułość termiczna – 30 mK przy  $30^{\circ}\text{C}$ ,
- częstotliwość detektora – 30 Hz,
- powiększenie – 1–8,
- rozdzielczość matrycy –  $640 \times 480$  pikseli,
- zakres pomiarowy –  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+1500^{\circ}\text{C}$ .



Stała część formy.

Temperatura w poszczególnych punktach pomiarowych:

Sp1 = 192 °C  
 Sp2 = 195 °C  
 Sp3 = 197 °C  
 Sp4 = 160,5 °C,  
 Sp5 = 157,8 °C,  
 Sp6 = 122,3 °C,  
 Sp7 = 133,7 °C



Ruchoma część formy.

Temperatura w poszczególnych punktach pomiarowych:

Sp1 = 117 °C  
 Sp2 = 117 °C  
 Sp3 = 146 °C  
 Sp4 = 96 °C  
 Sp5 = 156,4 °C  
 Sp6 = 103 °C  
 Sp7 = 154 °C

Rys. 2. Wyniki badań termowizyjnych

Fig. 2. The results of thermovision examinations



Badania termowizyjne wskazują, że rozkład temperatury formy jest w miarę jednorodny, co świadczy o poprawności wykonania kanałów chłodzących i dobrze zaprojektowanych drogach przepływu metalu. Jednakowa temperatura formy zapewnia poprawne wypełnienie wnęki formy. Za pomocą tych badań, bezpośrednio na maszynie ciśnieniowej w warunkach pracy (rzeczywistych), potwierdzono poprawność wykonania formy.

## Pomiar chropowatości odlewów

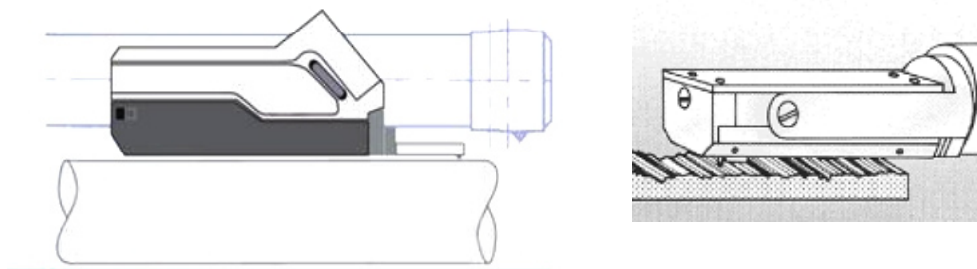
Rzeczywista powierzchnia odlewu często charakteryzuje się bardzo złożoną budową. Do jej podstawowych elementów zaliczamy: chropowatość, falistość, błędy kształtu i wady powierzchniowe.

Warstwa wierzchnia odlewu ciśnieniowego kształtowana jest przede wszystkim przez powierzchnię formy. Właściwie wykonana forma z odpowiednią obróbką wykańczającą (szlifowanie, polerowanie czy dogładzanie) umożliwi uzyskanie wymaganej chropowatości.

Nie zawsze jednak jak największa gładkość powierzchni jest pożądana. Szczególnie jest to istotne w przypadku powłok lakierniczych i galwanicznych, gdzie niezbędnym jest zapewnienie odpowiednio wysokiej chropowatości, aby uzyskać dobrą przyczepność (adhezję) powłoki do podłoża.

### *Pomiar profilu chropowatości odlewów*

Pomiar chropowatości przeprowadzono na aparacie Hommel Tester T500 firmy Hommelwerke GmbH (rys. 3), który pozwala na precyzyjny pomiar chropowatości powierzchni zgodnie z normami DIN/ISO/JIS. Zaletami urządzenia są jego mała waga oraz wymiary; może działać jako niezależne urządzenie lub w połączeniu z komputerem.



*Rys. 3. Pomiar chropowatości aparatem Hommel Tester T500*

*Fig. 3. Roughness measurements taken with a Hommel Tester T500 apparatus*

Aparat Hommel Tester T500 wykorzystuje metodą stykową do pomiaru chropowatości.

Zasadę pomiaru stykowego chropowatości przedstawiono na rysunku 4.

Głowica pomiarowa przyrządu przesuwana się ze stałą prędkością wzdłuż mierzonego

profilu. W skład jej wchodzi:

- ostrze odwzorowujące (penetrator),
- przetwornik pomiarowy.

Ostrze odwzorowujące dzięki naciskowi pomiarowemu styka się z powierzchnią mierzonego przedmiotu. W wyniku przesuwania ostrza po powierzchni zmienia się jego położenie względem pozostałych elementów głowicy. Zmiany położenia zależne są od nierówności powierzchni, jakie spotyka ostrze na drodze swego ruchu. Przetwornik zamienia zmiany wzajemnego położenia ostrza i innych elementów głowicy na sygnał elektryczny. Sygnał ten jest wzmacniany i poddany filtracji celem usunięcia niepożądanych składowych, jak np. falistość, odchyłki kształtu. Sygnał może być zarejestrowany lub poddany obróbce celem wyznaczenia wartości parametrów chropowatości.

### Wyniki badań chropowatości

Badania chropowatości powierzchni odlewów przeprowadzono na wybranych fragmentach odlewu (rys. 4).



Rys. 4. Fragment powierzchni odlewu przeznaczony do badań chropowatości powierzchni:  
1 – powierzchnia formy zniszczona, 2 – powierzchnia gładka

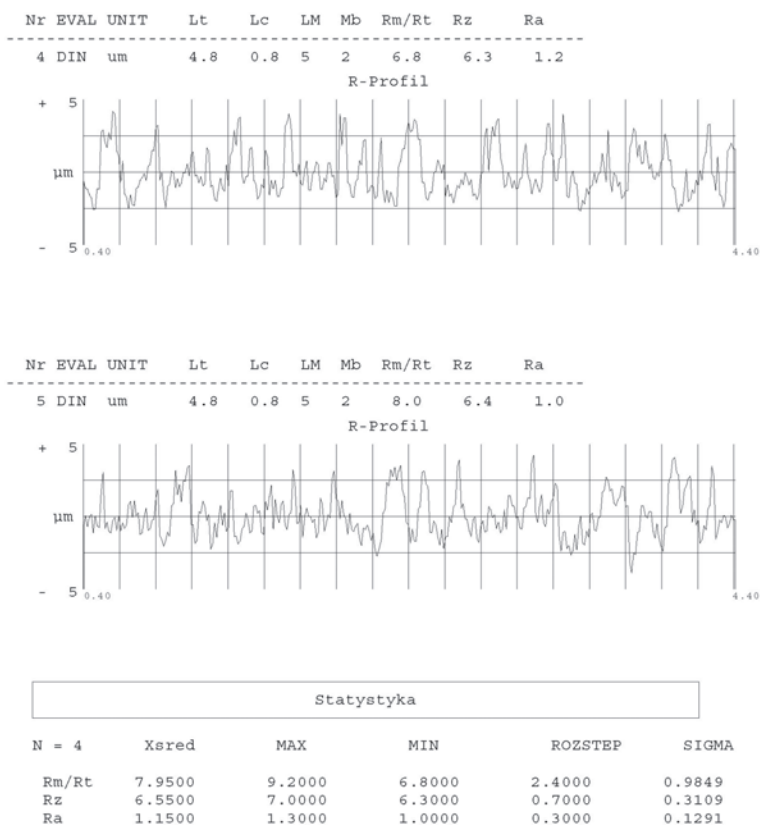
Fig. 4. Fragment of the casting surface for roughness measurements - 1 – mould surface worn out, 2 - smooth surface

Analiza wyników pomiaru chropowatości wskazuje, że w punkcie pomiarowym 2 (gładka powierzchnia odlewu)  $R_a$  – średnia arytmetyczna odchylenia filtrowanego profilu od średniej linii w obrębie odcinka pomiarowego – mieści się w przedziale od 0,325  $\mu\text{m}$  do 1,62  $\mu\text{m}$ , co w przybliżeniu odpowiada powierzchni szlifowania wykańczającego ( $R_a = 0,32$ ) i szlifowania dokładnego ( $R_a = 0,63$ ) oraz szlifowania zgrubnego ( $R_a = 1,6$ ). Na powierzchni odlewu występują również miejsca o chropowatości sięgające od 8,6 do nawet 15,8  $\mu\text{m}$ , co odpowiada chropowatości po piłowaniu mechanicznym i odlewaniu w formach piaskowych. Odlewy takie nie nadają się do nakładania powłok dekoracyjno-ochronnych.

**Generalną zasadą jest, że chropowatość powierzchni powinna być nie większa niż grubość nakładanej powłoki!**



Dlatego powierzchnie o chropowatości powyżej  $0,63 \mu\text{m}$  wymagają odpowiedniego przygotowania poprzez mechaniczne szlifowanie do uzyskania odpowiedniej chropowatości.



Rys. 5. Przykładowy wynik pomiaru profilu chropowatości odlewu w punkcie 2

Fig. 5. Sample result of the roughness profile measurement for casting item 2

## Badania gęstości (porowatości) odlewów doświadczalnych

Pewnym wyznacznikiem poprawnego doboru parametrów odlewania jest gęstość metalu. Jej przybliżenie do gęstości teoretycznej świadczy o dobrym odprowadzeniu gazów z formy oraz optymalnym doborze temperatury metalu i formy. Odlewy, które wizualnie są poprawne, mogą być porowate, co może uniemożliwić dalszą ich obróbkę poprzez nakładanie powłok ochronno-dekoracyjnych. Uwięziony w odlewie pod dużym ciśnieniem gaz, rozpręży się w podwyższonej temperaturze, powodując degradację powierzchni odlewów poprzez tworzenie się kraterków, które niszczą powierzchnię odlewu. Odlewy takie nie nadają się do pokrywania powłokami ochronno-dekoracyjnymi.

Badania gęstości odlewów - i pośrednio na tej podstawie liczby gazowej i porowatości - według założonego planu eksperymentów miały na celu określenie optymalnych parametrów pracy maszyny, przy których uzyskuje się poprawne odlewy ciśnieniowe z minimalną ilością wtrąceń gazowych.

Ocenę stopnia zagazowania przeprowadzono według normy BN-75/4051-10. Norma ta dotyczy stopów aluminium, ale za jej pomocą można wyznaczyć również porowatość w stopach magnezu. Według tej normy porowatość oblicza się pośrednio wyznaczając masę próbki w wodzie i w powietrzu i na tej podstawie gęstość próbki  $\rho_p$ . Odnosząc obliczone gęstości do gęstości teoretycznej stopu (na podstawie składu chemicznego) oblicza się liczbę gazową ( $LG$ ) oraz porowatość ( $P$ ).

$$LG = \frac{\rho_p}{\rho_t} \quad (1)$$

$$\rho_p = \frac{m_p \cdot \rho_w}{m_p - m_w} \quad (2)$$

gdzie:

$\rho_w$  - masa właściwa (gęstość) wody, g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_t$  - masa właściwa (teoretyczna) stopu, g/cm<sup>3</sup>;

$m_p$  - masa próbki (stopu) ważonej w powietrzu, g;

$m_w$  - masa próbki (stopu) ważonej w wodzie, g.

Procentową zawartość gazu w badanych próbkach zwaną porowatością  $P$  oblicza się z zależności:

$$P = \frac{\rho_t - \rho_p}{\rho_p} \cdot 100 \quad (3)$$

Badania gęstości odlewów przeprowadzono metodą hydrostatyczną, poprzez ważenie próbki w wodzie i w powietrzu na specjalnej wadze.

Teoretyczną masę właściwą (gęstość) stopu wyliczono na podstawie wzoru:

$$\rho_t = \sum \%N \cdot \rho_N \cdot \frac{1}{100} \quad (4)$$

gdzie:

$\%N$  – procentowa zawartość pierwiastka w stopie;

$\rho_N$  – masa właściwa danego pierwiastka,  $\text{g/cm}^3$ .

Badanie gęstości próbek oparto na pomiarach masy próbki w wodzie i w powietrzu na wadze laboratoryjnej, a gęstość określono z zależności:

$$\rho = \left[ \frac{m_p}{m_p - m_w} (\rho_w - \rho_p) + \rho_p \right] \quad (5)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość próbki,  $\text{g/cm}^3$ ;

$m_p, m_w$  – masa próbki odpowiednio w powietrzu i w wodzie, g;

$\rho_p, \rho_w$  – gęstość odpowiednio powietrza i wody,  $\text{g/cm}^3$ .

Do obliczeń przyjęto:

$\rho_p = 0,001208 \text{ g/cm}^3$  (gęstość powietrza w temp.  $20^\circ\text{C}$  i  $p = 762 \text{ mm Hg}$ );

$\rho_w = 0,99802 \text{ g/cm}^3$  (gęstość wody w temp.  $20^\circ\text{C}$  i  $p = 762 \text{ mm Hg}$ ).



Rys. 6. Widok stanowiska do pomiaru gęstości próbek wyciętych z odlewu

Fig. 6. View of the stand for density measurement on specimens cut out from the casting

Tabela 2. Skład chemiczny stopu magnezu AZ91, % wag.

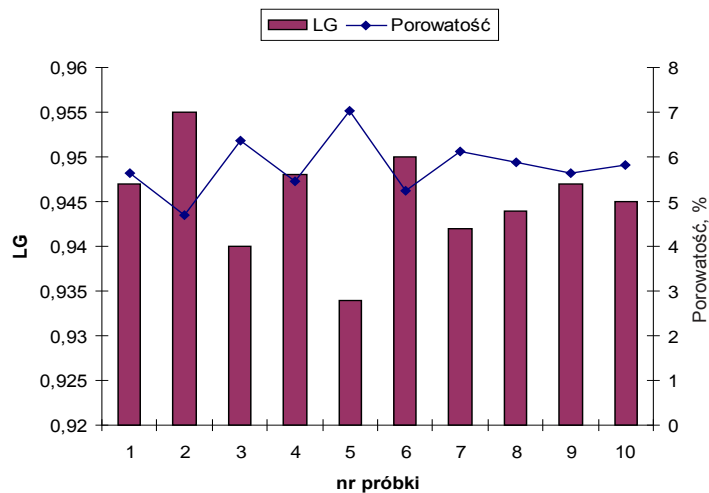
Table 2. Chemical composition of AZ91 magnesium alloy, % wt.

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Be	Mg
9,12	0,61	0,196	0,292	0,001	0,0019	0,0007	0,001	90,04

Wyniki pomiarów gęstości próbek wyciętych z odlewu przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 7.

*Tabela 3. Wyniki badań gęstości, liczby gazowej (LG) i porowatości odlewów*  
*Table 3. The results of measurements of the casting density, gas number and porosity*

Lp.	nr próbki	Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	Gęstość, g/cm <sup>3</sup> (wartość średnia)	LG	Porowatość, %
1.	0	1,764	1,772	0,947	5,64
		1,778			
		1,775			
2.	1	1,784	1,788	0,955	4,70
		1,790			
		1,789			
3.	2	1,737	1,760	0,940	6,36
		1,764			
		1,778			
4.	3	1,780	1,775	0,948	5,46
		1,773			
		1,772			
5.	4	1,793	1,749	0,934	7,03
		1,751			
		1,765			
6.	5	1,779	1,779	0,950	5,23
		1,777			
		1,781			
7.	6	1,758	1,764	0,942	6,12
		1,770			
		1,764			
8.	7	1,773	1,768	0,944	5,88
		1,771			
		1,759			
9.	8	1,767	1,772	0,947	5,64
		1,776			
		1,773			
10.	9	1,757	1,769	0,945	5,82
		1,778			
		1,772			



Rys. 7. Zmiany gęstości i porowatości odlewów w zależności od parametrów odlewania

Fig. 7. Changes in the density and porosity of castings in function of the casting process parameters

Na podstawie wykresu przedstawionego na rysunku 7 należy stwierdzić, że najmniej zagazowane są odlewy wykonane według planu eksperymentu - pomiar 2, tj. prędkość tłoka 2 fazy – ok. 3 m/s, ciśnienie prasowania ciekłego metalu ok. 250 bar i następujących parametrów cieplnych: temperatura metalu – 640°C oraz temperatura formy – 180°C. Parametry te są korzystne z tego względu, że – oprócz najmniejszej porowatości odlewu – nie eksploatują nadmiernie formy ciśnieniowej z uwagi na relatywnie niskie temperatury.

## Badania właściwości mechanicznych

### Pomiar twardości

Pomiary właściwości mechanicznych – twardości i wytrzymałości są badaniami uzupełniającymi, niemniej dają pewien pogląd na charakterystykę właściwości użytkowych odlewów. Jednocześnie są informacją o wadach wewnętrznych, a także dają informację o parametrach technologicznych odlewania.

Badanie twardości przeprowadzono metodą Brinella, przy następujących parametrach: średnica kulki – 5 mm; wielkość obciążenia – 2452,5 N; minimalny czas działania obciążenia – 15 s.

Badanie wytrzymałości przeprowadzono statyczną próbą rozciągania (zakres od 0,0 do 200,00 kN zgodnie z normą PN-EN 10002-1:2004).

## Parametry odlewania oraz uzyskane właściwości odlewów

Parametry odlewania ciśnieniowego dla każdej serii wykonywanych odlewów dobierano zgodnie z planem eksperymentu, który przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry odlewania wg planu eksperymentu i wyniki badań

Table 4. Casting parameters according to the plan of experiment and test results

Nr próbki	Parametry badane				Efekty (odpowiedź układu)				
	Temp. metalu	Temp. formy	II faza		Porowatość, %	Chropowatość, $R_a$	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	Twardość, HB
			nastawa zaworu	wartość rzeczywista					
0	665	195	2,25	1,86	8,08	-	35	115,2	95,3
1	640	180	1,5	1,24	7,59	0,325	43	54,61	88,7
2	640	180	3	2,52	8,27	1,62	86	102,8	91,7
3	640	210	1,5	1,36	8,84	0,36	71,5	134,6	92,2
4	640	210	3	2,8	7,65	1,15	80	116,9	92,1
5	690	180	1,5	1,38	8,34	0,368	76,5	80,5	96,3
6	690	180	3	2,4	8,92	1,23	96,5	100,01	92,3
7	690	210	1,5	1,34	8,87	0,45	74	82,69	98,8
8	690	210	3	2,44	8,99	1,02	106,5	88,81	98,3
9	620	150	1,0	0,88	9,03	0,36	71,5	99,9	88,4

## Analiza statystyczna otrzymanych wyników

Wyniki badań odlewów zostały zamieszczone w tabeli 4. W celu przeprowadzenia analizy statystycznej istotnych parametrów odlewania (parametry badane) i ich wpływ na poszczególne wartości mierzone (efekty) zastosowano obliczenia za pomocą programu *Statistica*. Zamiast rzeczywistych wartości kontrolowanych parametrów użyto zmiennych bezwymiarowych, gdzie „-1” oznacza minimalną wartość określonego parametru, a „+1” maksymalną (tab. 5).

Tabela 5. Dane wyjściowe do analizy statystycznej istotnych parametrów odlewania i ich wpływu na poszczególne właściwości odlewów

Table 5. Output data for statistical analysis of the relevant casting parameters and their impact on casting properties

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	temp met (x1)	temp formy(x2)	nastawa(x3)	x1x2	x1x3	x2x3	porowatosc	Ra	Rp 0,2	Rm	twardosc
1	-1	-1	-1	1	1	1	7,59	0,325	43	54,61	88,7
2	-1	-1	1	1	-1	-1	8,27	1,62	86	102,8	91,7
3	-1	1	-1	-1	1	-1	8,84	0,36	71,5	134,6	92,2
4	-1	1	1	-1	-1	1	7,65	1,15	80	116,9	92,1
5	1	-1	-1	-1	-1	1	8,34	0,368	76,5	80,5	96,3
6	1	-1	1	-1	1	-1	8,92	1,23	96,5	100,01	92,3
7	1	1	-1	1	-1	-1	8,87	0,45	74	82,69	98,8
8	1	1	1	1	1	1	8,99	1,02	106,5	88,81	98,3

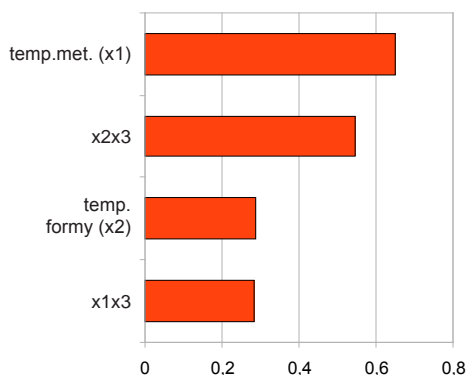


Tabela 6. Wyniki obliczeń w programie Statistica (badania wpływu parametrów technologicznych na porowatość odlewów)

Table 6. The results of calculations in Statistica programme (studying the impact of technological parameters on casting porosity)

Case No.	Predicted & Residual Values (porowatosc4)								
	Observed Value	Predicted Value	Residual	Standard Pred. v.	Standard Residual	Std.Err. Pred.Val	Mahalanobis Distance	Deleted Residual	Cook's Distance
1	7,590000	7,793750	-0,203750	-1,19439	-0,701422	0,229645	3,500000	-0,543332	0,437327
2	8,270000	8,073750	0,196251	-0,67185	0,675607	0,229645	3,500000	0,523336	0,405729
3	8,840000	8,683750	0,156250	0,46656	0,537901	0,229645	3,500000	0,416667	0,257189
4	7,650000	7,798750	-0,148750	-1,18506	-0,512081	0,229645	3,500000	-0,396666	0,233091
5	8,340000	8,183750	0,156250	-0,46656	0,537901	0,229645	3,500000	0,416667	0,257189
6	8,920000	9,068750	-0,148750	1,18506	-0,512083	0,229645	3,500000	-0,396668	0,233092
7	8,870000	9,073750	-0,203750	1,19439	-0,701422	0,229645	3,500000	-0,543332	0,437327
8	8,990000	8,793750	0,196250	0,67185	0,675604	0,229645	3,500000	0,523333	0,405725
Minimum	7,590000	7,793750	-0,203750	-1,19439	-0,701422	0,229645	3,500000	-0,543332	0,233091
Maximum	8,990000	9,073750	0,196251	1,19439	0,675607	0,229645	3,500000	0,523336	0,437327
Mean	8,433750	8,433750	0,000000	0,00000	0,000001	0,229645	3,500000	0,000000	0,333334
Median	8,590000	8,433750	0,003750	0,00000	0,012910	0,229645	3,500000	0,010000	0,331457

Korzystając z danych z tabeli 6, skonstruowano wykres Pareto. Diagram ten wykorzystuje zasadę, że: „20% przyczyn decyduje o 80% błędów”, która radzi aby skupić się na przeprowadzeniu działań korygujących w stosunku do najistotniejszych (20%) przyczyn niezgodności, co umożliwi analizę możliwości uzyskania poprawy jakości przy ograniczonych nakładach i wskazanie grupy najważniejszych przyczyn. Parametrem decydującym w sposób znaczący o porowatości odlewów jest temperatura metalu, co przedstawiono na rysunku 8. Ze wzrostem temperatury rośnie również porowatość.



Rys. 8. Diagram Pareto określający wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na porowatość odlewów

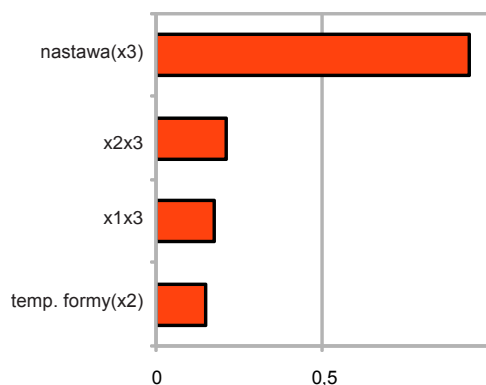
Fig. 8. Pareto diagram indicating the impact of die-casting parameters on casting porosity

Tabela 7. Wyniki obliczeń w programie Statistica (badania wpływu parametrów technologicznych na chropowatość odlewów)

Table 7. The results of calculations in Statistica programme (studying the impact of technological parameters on casting roughness)

Case No.	Observed Value	Predicted Value	Residual	Standard Pred. v.	Standard Residual	Std. Err. Pred. Val	Mah Di
1	0,325000	0,264875	0,060125	-1,11105	0,54755	0,086811	
2	1,620000	1,506625	0,113375	1,39512	1,03248	0,086811	
3	0,360000	0,323375	0,036625	-0,99298	0,33354	0,086811	
4	1,150000	1,166625	-0,016625	0,70891	-0,15140	0,086811	
5	0,368000	0,428125	-0,060125	-0,78157	-0,54755	0,086811	
6	1,230000	1,343375	-0,113375	1,06564	-1,03248	0,086811	
7	0,450000	0,486625	-0,036625	-0,66350	-0,33354	0,086811	
8	1,020000	1,003375	0,016625	0,37943	0,15140	0,086811	
Minimum	0,325000	0,264875	-0,113375	-1,11105	-1,03248	0,086811	
Maximum	1,620000	1,506625	0,113375	1,39512	1,03248	0,086811	
Mean	0,815375	0,815375	-0,000000	-0,00000	-0,00000	0,086811	
Median	0,735000	0,745000	-0,000000	-0,14203	-0,00000	0,086811	

Na podstawie wyników z tabeli 7 skonstruowano wykres Pareto. Parametrem decydującym w sposób znaczący na chropowatość odlewów jest wartość prędkości w II fazie odlewania, a w sposób mniej znaczący temperatura formy, co przedstawiono na rysunku 9. Ze wzrostem wartości prędkości w II fazie rośnie chropowatość odlewów. Ta pewna anomalia w stosunku do stopów aluminium może wynikać z faktu odbijania się strugi metalu już częściowo zakrzepłego od powierzchni formy.



Rys. 9. Diagram Pareto określający wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na chropowatość odlewów

Fig. 9. Pareto diagram indicating the impact of die-casting parameters on casting roughness

Tabela 8. Wyniki obliczeń w programie Statistica (badania wpływu parametrów technologicznych na wytrzymałość mechaniczną odlewów)

Table 8. The results of calculations in Statistica programme (studying the impact of technological parameters on casting mechanical properties)

Case No.	Predicted & Residual Values (tabelka)						
	Observed Value	Predicted Value	Residual	Standard Pred. v.	Standard Residual	Std. Err. Pred. Val	Mahalanobis Distance
1	54,6100	61,7800	-7,17000	-1,42743	-0,543960	11,41518	4,375000
2	102,8000	95,6300	7,17001	0,02205	0,543960	11,41518	4,375000
3	134,6000	128,6450	5,95500	1,43578	0,451783	11,41518	4,375000
4	116,9000	122,8550	-5,95500	1,18785	-0,451783	11,41518	4,375000
5	80,5000	73,3300	7,17000	-0,93285	0,543960	11,41518	4,375000
6	100,0100	107,1800	-7,17000	0,51663	-0,543960	11,41518	4,375000
7	82,6900	88,6450	-5,95499	-0,27705	-0,451782	11,41518	4,375000
8	88,8100	82,8550	5,95499	-0,52498	0,451782	11,41518	4,375000
Minimum	54,6100	61,7800	-7,17000	-1,42743	-0,543960	11,41518	4,375000
Maximum	134,6000	128,6450	7,17001	1,43578	0,543960	11,41518	4,375000
Mean	95,1150	95,1150	0,00000	-0,00000	0,000000	11,41518	4,375000
Median	94,4100	92,1375	0,00000	-0,12750	0,000000	11,41518	4,375000

Na podstawie wyników z tabeli 8 skonstruowano wykres Pareto. Parametrem wpływającym w sposób znaczący na wytrzymałość mechaniczną ( $R_m$ ) odlewów jest temperatura formy, a w sposób mniej znaczący temperatura metalu i wartość prędkości w II fazie odlewania. Należy zaznaczyć, że w tym przypadku zaobserwowano wpływ wszystkich trzech, badanych parametrów technologicznych odlewania ciśnieniowego, co przedstawiono na rysunku 10.

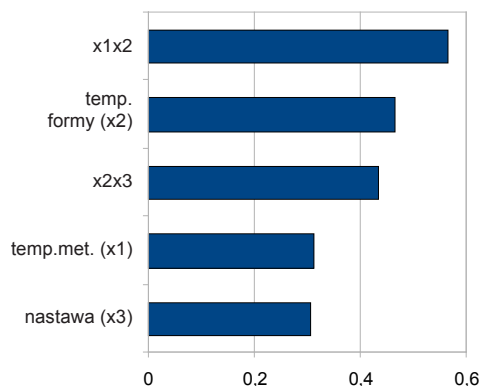
Rys. 10. Diagram Pareto określający wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na wytrzymałość mechaniczną ( $R_m$ ) odlewówFig. 10. Pareto diagram indicating the impact of die-casting parameters on casting tensile strength ( $R_m$ )

Tabela 9. Wyniki obliczeń w programie Statistica (badania wpływu parametrów technologicznych na wytrzymałość mechaniczną odlewów)

Table 9. The results of calculations in Statistica programme (studying the impact of technological parameters on casting mechanical properties)

Case No.	Predicted & Residual Values (tabelka)								
	Observed Value	Predicted Value	Residual	Standard Pred. v.	Standard Residual	Std.Err. Pred.Val	Mahalanobis Distance	Deleted Residual	Cook's Distance
1	43,0000	53,3750	-10,3750	-1,48312	-1,08629	6,753471	2,625000	-20,7500	0,590014
2	86,0000	79,3750	6,6250	0,00716	0,69366	6,753471	2,625000	13,2500	0,240579
3	71,5000	60,8750	10,6250	-1,05323	1,11247	6,753471	2,625000	21,2500	0,618791
4	80,0000	86,8750	-6,8750	0,43705	-0,71983	6,753471	2,625000	-13,7500	0,259078
5	76,5000	71,6250	4,8750	-0,43705	0,51043	6,753471	2,625000	9,7500	0,130267
6	96,5000	97,6250	-1,1250	1,05323	-0,11779	6,753471	2,625000	-2,2500	0,006937
7	74,0000	79,1250	-5,1250	-0,00716	-0,53660	6,753471	2,625000	-10,2500	0,143971
8	106,5000	105,1250	1,3750	1,48312	0,14397	6,753471	2,625000	2,7500	0,010363
Minimum	43,0000	53,3750	-10,3750	-1,48312	-1,08629	6,753471	2,625000	-20,7500	0,006937
Maximum	106,5000	105,1250	10,6250	1,48312	1,11247	6,753471	2,625000	21,2500	0,618791
Mean	79,2500	79,2500	0,0000	0,00000	-0,00000	6,753471	2,625000	0,0000	0,250000
Median	78,2500	79,2500	0,1250	0,00000	0,01309	6,753471	2,625000	0,2500	0,192275

Na podstawie wyników z tabeli 9 skonstruowano wykres Pareto. Parametrem wpływającym w sposób znaczący na wytrzymałość mechaniczną ( $R_{p0,2}$ ) odlewów jest wartość prędkości w II fazie, natomiast w sposób mniej znaczący temperatura metalu i temperatura formy. Należy zaznaczyć, że również w tym przypadku zaobserwowano wpływ wszystkich trzech, badanych parametrów technologicznych odlewania ciśnieniowego, co przedstawiono na rysunku 11.

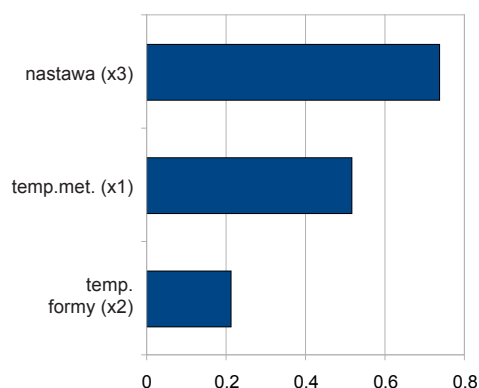
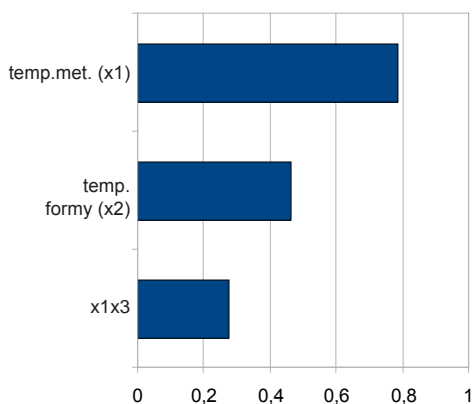
Rys. 11. Diagram Pareto określający wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na wytrzymałość mechaniczną ( $R_{p0,2}$ ) odlewówFig. 11. Pareto diagram indicating the impact of die-casting parameters on casting yield strength ( $R_{p0,2}$ )

Tabela 10. Wyniki obliczeń w programie Statistica (badania wpływu parametrów technologicznych na twardość odlewów)

Table 10. The results of calculations in Statistica programme (studying the impact of technological parameters on casting hardness)

Case No.	Predicted & Residual Values (tabelka)								
	Dependent variable: twardosc								
	Observed Value	Predicted Value	Residual	Standard Pred. v.	Standard Residual	Std.Err. Pred.Val	Mahalanobis Distance	Deleted Residual	Cook's Distance
1	88,70000	88,70000	0,00000	-1,49750	0,00000	1,026523	2,625000	0,00000	0,000000
2	91,70000	90,55000	1,14999	-0,95429	0,79216	1,026523	2,625000	2,29999	0,313757
3	92,20000	91,80000	0,39999	-0,58726	0,27553	1,026523	2,625000	0,79999	0,037959
4	92,10000	93,65000	-1,55000	-0,04404	-1,06770	1,026523	2,625000	-3,10001	0,569990
5	96,30000	95,80000	0,50000	0,58726	0,34442	1,026523	2,625000	1,00000	0,059312
6	92,30000	93,95000	-1,64999	0,04404	-1,13658	1,026523	2,625000	-3,29999	0,645903
7	98,80000	98,90000	-0,10000	1,49750	-0,06888	1,026523	2,625000	-0,20000	0,002372
8	98,30000	97,05000	1,25000	0,95429	0,86105	1,026523	2,625000	2,50000	0,370700
Minimum	88,70000	88,70000	-1,64999	-1,49750	-1,13658	1,026523	2,625000	-3,29999	0,000000
Maximum	98,80000	98,90000	1,25000	1,49750	0,86105	1,026523	2,625000	2,50000	0,645903
Mean	93,80000	93,80000	-0,00000	0,00000	-0,00000	1,026523	2,625000	-0,00000	0,249999
Median	92,25000	93,80000	0,20000	0,00000	0,13777	1,026523	2,625000	0,39999	0,186534

Na podstawie wyników z tabeli 10 skonstruowano wykres Pareto. Parametrem decydującym w sposób znaczący o twardości odlewów jest temperatura metalu, w sposób mniej znaczący – temperatura formy, co przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Diagram Pareto określający wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na twardość odlewów

Fig. 12. Pareto diagram indicating the impact of die-casting parameters on casting hardness

## **Podsumowanie**

Przedstawione wyniki badań eksperymentów podczas wykonywania odlewu doświadczalnego klamki wskazują, że odlewy zostały wykonane poprawnie, to znaczy wnętrza formy bardzo dokładnie odwzorowuje kształt odlewu. Badania termowizyjne potwierdziły poprawność wykonania formy, właściwy dobór przekrojów kanałów wlewowych, wielkości przelewów i odpowietrzeń. Równomierne obciążenie cieplne formy gwarantuje powtarzalność jakościową uzyskiwanych odlewów.

Natomiast pełnego obrazu nie daje równanie określające wpływ poszczególnych parametrów odlewania ciśnieniowego na wybrane właściwości odlewów z uwagi na mały przedział zmienności parametrów (poziom wysoki i niski), co wynika z ograniczeń pracy maszyny ciśnieniowej dla odlewu eksperymentalnego, a także z samej technologii odlewania z korkiem, która w sposób znaczący ogranicza możliwości zmiany parametrów, głównie temperatury stopu, formy i ciśnienia wypełniania wnętrza formy, co stanowi cechę (wadę) maszyn gorąckomorowych.

Przedstawione diagramy Pareto dla poszczególnych funkcji celu – zwartość strukturalną (porowatość) i jakość powierzchni (chropowatość), wskazują, że na porowatość w decydującym stopniu wpływa temperatura metalu, a w mniejszym stopniu temperatura formy, natomiast głównym parametrem technologicznym wpływającym na chropowatość odlewów jest prędkość metalu w II fazie procesu.

Ogólnie można stwierdzić, że odlewy wykonane przy zadanych parametrach spełniają wymagania pod kątem jakości powierzchni, natomiast nie spełniają kryteriów zwartości strukturalnej, wymaganej przy odlewach pracujących w podwyższonej temperaturze (wysokotemperaturowe lakierowanie proszkowe) i pracujących przy podwyższonych obciążeniach statycznych i dynamicznych.

## **Podziękowania**

Artykuł powstał na podstawie zlecenia i umowy Nr 03/08.2010/JM zawartej przez firmę POLMAG z Instytutem Odlewnictwa w Krakowie na wykonanie pracy naukowo-badawczej.

## **Literatura**

1. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa, 1984.
2. Białobrzęski A.: Odlewnictwo ciśnieniowe: maszyny, urządzenia i technologia, WNT, Warszawa, 1992.
3. [www.ntp.com.pl](http://www.ntp.com.pl)
4. Frech – Die casting seminar (materiały szkoleniowe).