

Badanie wpływu podciśnienia w formie na chropowatość powierzchni odlewów

Studies of the effect of negative pressure in the mould on the cast surface roughness

Małgorzata Łągiewka¹, Zbigniew Konopka^{1*}, Andrzej Zyska¹

¹Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Katedra Odlewnictwa,
Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

¹Czestochowa University of Technology, Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Department of
Foundry Engineering, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

*Corresponding author: konopka@wip.pcz.pl

Received: 03.07.2017. Accepted in revised form: 31.03.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/ioid.2018.01

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu podciśnienia w formie i układzie zalewania na chropowatość powierzchni odlewów. Badania chropowatości powierzchni wykonano na odlewach ze stopu EN AB 46000 wykonanych metodą odlewania ciśnieniowego na maszynie Vertacast z zastosowaniem zmiennego podciśnienia w formie. Stwierdzono zmniejszenie chropowatości powierzchni odlewów ze zmniejszeniem ciśnienia w formie na podstawie wartości różnych charakterystycznych parametrów chropowatości. Badania chropowatości odlewów wykonano na urządzeniu Hommel Tester T1000.

Słowa kluczowe: odlewanie ciśnieniowe, stopy aluminium, chropowatość powierzchni

Abstract

The article discusses the results of the studies of the effect of negative pressure in the mould and the casting system on the roughness of the casts' surfaces. Roughness tests were performed on casts made of alloy EN AB 46000, by means of the pressure casting method in the Vertacast machine, and with the use of varying negative pressure in the mould. The surface roughness of the casts decreasing with a decrease in the pressure in the mould was determined based on the values of different characteristic surface roughness parameters. The cast roughness examinations were conducted on the Hommel Tester T1000 device.

Keywords: pressure casting, aluminium alloys, surface roughness

1. Wprowadzenie

Chropowatość powierzchni odlewów ciśnieniowych ma istotny wpływ na dalszą ich obróbkę, ponieważ odlewy te często poddawane są malowaniu, nakładaniu powłok ochronnych i dekoracyjnych. Obowiązuje zasada, że chropowatość powierzchni odlewów przeznaczonych do nakładania na nie powłok nie może być większa od grubości powłoki [1–3]. Chropowatość powierzchni odlewów ciśnieniowych jest funkcją wielu czynników, a do najważniejszych należą: jakość metalurgiczna metalu, konstrukcja i chropowatość powierzchni formy,

1. Introduction

The surface roughness of pressure casts has a significant effect on their further processing, as the casts are often painted, as well as being covered with protective and decorative coatings. There is a principle stating that the surface roughness of the casts assigned to be coated cannot be higher than the thickness of the coating [1–3]. The surface roughness of pressure casts is a function of many factors, of which the most important are the metallurgical quality of the metal, the construction and roughness of the mould surface, the casting param-

parametry odlewania oraz innowacyjne rozwiązania w konstrukcjach form i maszyn, jak zastosowanie podciśnienia w układzie zalewania i w formie [4,5]. Wzrost zanieczyszczeń metalu wtrąceniami niemetalowymi, a także zwiększona porowatość odlewów powodują pogorszenie jakości powierzchni odlewów. Prawidłowa konstrukcja formy zapewniająca dobrą ewakuację powietrza z formy, przepływ metalu we wnęce bez zawirowań, duża chropowatość powierzchni i prawidłowe smarowanie sprzyjają zwiększeniu chropowatości powierzchni odlewu. Najważniejszym parametrem odlewania wpływającym na chropowatość powierzchni odlewu jest prędkość metalu w fazie zapełniania. Wzrost prędkości zalewania (wzrost prędkości tłoka) zwiększa chropowatość powierzchni odlewu. Taki sam kierunek oddziaływania wykazuje faza doprasowania odlewu [6–8]. Chropowatość odlewów oceniana jest wartością wielu różnych charakterystycznych parametrów mierzonych ilościowo różnymi metodami, a także może być oceniana według wzorów [9,10].

2. Warunki eksperymentu i wyniki

Zastosowano zimnokomorową maszynę do odlewania ciśnieniowego Vertacast. Konstrukcję formy przystosowano do systemu próżniowego. Na płaszczynie podziału ruchomej części formy wykonany był półokrągły, zbiorczy kanał odpowietrzający otaczający pojedynczą wnękę lub kilka gniazd roboczych formy. Połączenie kanału zbiorczego z wnękami, a następnie ze zbiornikiem i pompą próżniową odbywa się przez płaskie kanały odpowietrzające, kołki odcinające i filtr powietrza. Dodatkowe uszczelnienie styku form uzyskuje się za pomocą uszczelki silikonowej umieszczonej w rowku o przekroju kwadratowym, wykonanym w nieruchomej części formy. Zadaniem kołków odcinających, uruchamianych przed końcem suwu roboczego tłoka prasującego, jest przerwanie połączenia pomiędzy systemem odsysania powietrza i gazów a wnękami formy, co chroni kanały próżniowe od zapełnienia ich ciekłym metalem. Schemat maszyny do odlewania z podciśnieniem przedstawiono na [rysunku 1](#).

Odlewy wytworzono przy następujących stałych parametrach pracy maszyny ciśnieniowej: prędkość tłoka w II fazie 4 m/s, temperatura zalewania 640°C, temperatura formy 150°C, siła zwierania maszyny wynosiła 2000 kN. Wykonano partię odlewów przy trzech wartościach podciśnień: 700 hPa, 500 hPa oraz 300 hPa. Odlewy wytworzone przy zadanych podciśnieniach poddawano ocenie wzrokowej i oceniano proces pod względem dokładności wypełniania wnęki formy, dokładności wymiarowej odlewów oraz jakości powierzchni.

W celu określenia parametrów chropowatości powierzchni wykonano pomiary na 5 wybranych losowo odlewach ciśnieniowych wytworzonych z zastosowa-

eters and the innovative solutions in the constructions of moulds and machines, such as the application of negative pressure in the casting system and the mould [4,5]. Increasing levels of impurities in the metal in the form of non-metallic inclusions, as well as the increased porosity of the casts cause the casts' surface quality to worsen. Factors which favour an increase in the cast's surface roughness are the proper construction of the mould, ensuring a good evacuation of the air from the mould, the flow of the metal in the cavity without swirls, and also high surface roughness and proper lubrication. The most important casting parameter affecting the cast surface roughness is the metal velocity in the filling phase. An increase in the casting velocity (increase in the piston velocity) increases the roughness of the cast surface. A similar reaction is exhibited by the cast compression phase [6–8]. The porosity of the casts is evaluated by means of the values of many different parameters measured quantitatively by various methods, and it can also be assessed according to formulas [9,10].

2. Experiment conditions and results

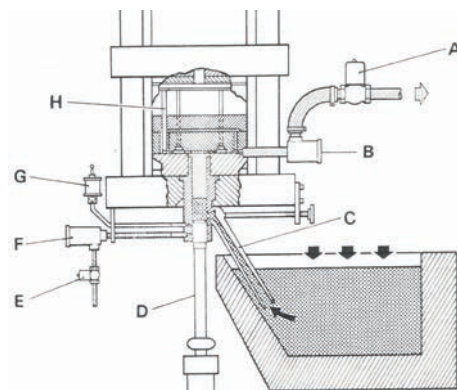
A Vertacast cold-chamber pressure casting machine was used. The construction of the mould was adjusted to the vacuum system. On the parting plane of the mobile part of the mould, a semi-oval collective venting channel is constructed, which surrounds a single cavity or a few working mould cavities. Connecting the collective channel with the cavities and next with the container and vacuum pump takes place through flat venting channels, cut-off pegs and an air filter. Additional sealing of the moulds' contact is obtained by means of a silicon seal placed in a groove in a square cross-section made in the immobile part of the mould. The task of the cut-off pegs, activated before the end of the power stroke of the injector plunger, is to interrupt the connection between the air and gas extraction system and the mould cavities, which protects the vacuum channels from being filled with the liquid metal. A diagram of the pressure casting machine is presented in [Figure 1](#).

The casts were made with the following constant parameters of the pressure machine: piston velocity in phase II 4 m/s, casting temperature 640°C, mould temperature 150°C, machine clamping force 2000 kN. A series of casts were made with three values of negative pressure: 700 hPa, 500 hPa and 300 hPa. The casts made with the preset negative pressures underwent a visual assessment and the process was evaluated in respect of the precision in filling the mould cavity, the dimensional accuracy of the casts and the surface quality.

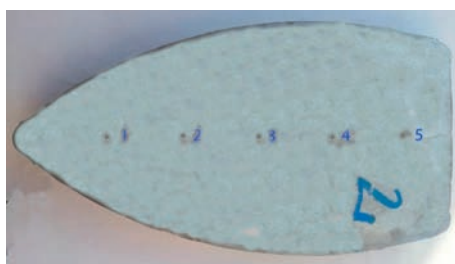
In order to determine the surface roughness parameters, measurements were performed on 5 randomly selected pressure casts made with the use of a given

niem danej wartości podciśnienia w formie. Na każdym odlewie wykonano 5 pomiarów w różnych, ale zawsze tych samych miejscach odlewu. Uzyskane wyniki uśredniono dla danego punktu pomiarowego. Badany odlew pokazano na [rysunku 2](#).

value of negative pressure in the mould. On each cast, 5 measurements were made in different, yet always constant locations. The results were averaged for each measurement point. The examined cast is shown in [Figure 2](#).



Rys. 1. Schemat maszyny Vertacast: A – zawór próżniowy, B – osadnik metalu, C – rura przenosząca, D – tłok prasujący, E – zawór próżniowy, F – osadnik metalu tulei wlewowej, G – smarownica końca tłoka prasującego, H – kołek odcinający
 Fig. 1. Diagram of the Vertacast machine: A – vacuum valve, B – metal settler, C – line pipe, D – injector plunger, E – vacuum valve, F – metal settler of gate sleeve, G – lubricator of injector plunger tip, H – cut-off peg



Rys. 2. Miejsca pomiaru chropowości na odlewie
 Fig. 2. Areas of porosity measurements performed on the cast

Badania wykonano na przyrządzie pomiarowym Hommel Tester T1000. W [tabeli 1](#) scharakteryzowano mierzone parametry chropowości powierzchni odlewów.

Na [rysunkach 3–5](#) przedstawiono przykładowe profilogramy powierzchni odlewów ciśnieniowych wykonanych przy różnych podciśnieniach w formie i układzie zalewania. Uśrednione wyniki pomiarów parametrów chropowości powierzchni odlewów przedstawiono w [tabeli 2](#) i na [rysunkach 6–11](#).

Średnia wartość parametru Ra wynosi $0,64 \mu\text{m}$ i ma mały rozrzut wyników pobranych z różnych miejsc odlewu dla odlewów wykonanych przy podciśnieniu 300 hPa , co odpowiada chropowości po obróbce tzw. szlifowaniu zgrubnemu, dla podciśnienia 500 hPa na poziomie ok. $1,3 \mu\text{m}$, a dla podciśnienia 700 hPa na poziomie $1,8 \mu\text{m}$, co świadczy o tym, że chropowość powierzchni zbliża się do chropowości charakterystycznej dla obróbki skrawaniem i jednocześnie zwiększa się rozrzut wyników z różnych miejsc na odlewie, osiągając wynik nawet $Ra = 3,43 \mu\text{m}$.

The tests were conducted on the Hommel Tester T1000 measuring device. [Table 1](#) presents the characteristics of the measured parameters of the cast surface roughness.

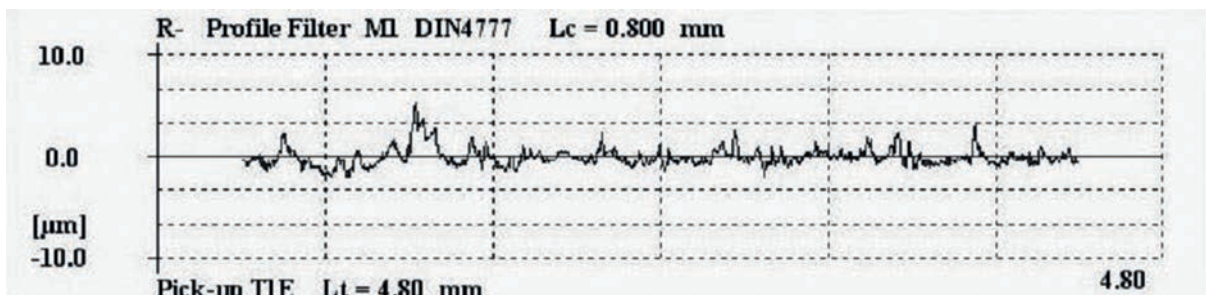
[Figures 3–5](#) show exemplary profilograms of pressure cast surfaces made with different negative pressures in the mould and the casting system. The averaged result of the measurements of the cast surface roughness parameters are presented in [Table 2](#) and [Figures 6–11](#).

The mean value of parameter Ra is $0.64 \mu\text{m}$ and has a low scatter of results collected from different locations on the cast in the case of the casts made with a negative pressure of 300 hPa . This corresponds to the roughness after treatment (so-called rough grinding) for a negative pressure of 500 hPa , at the level of about $1.3 \mu\text{m}$, and for a negative pressure of 700 hPa at the level of $1.8 \mu\text{m}$, which proves that the surface roughness is close to the roughness characteristic to machining and, at the same time, the scatter of results from different locations on the cast increases, reaching even $Ra = 3.43 \mu\text{m}$.

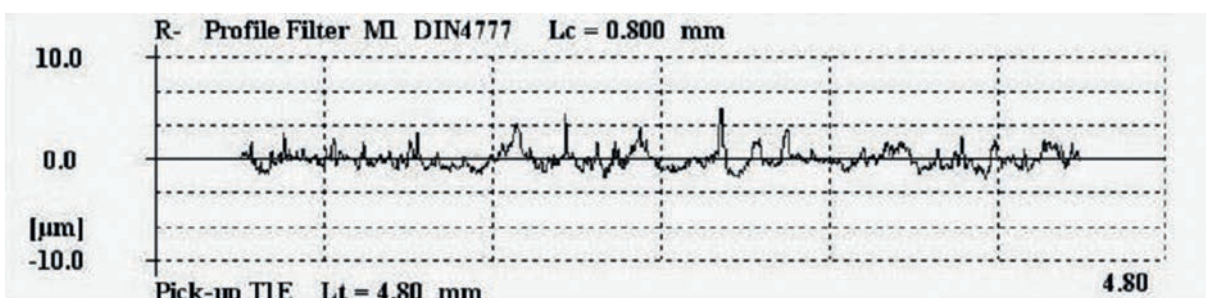
Tabela 1. Parametry chropowatości odlewów

Table 1. Cast roughness parameters

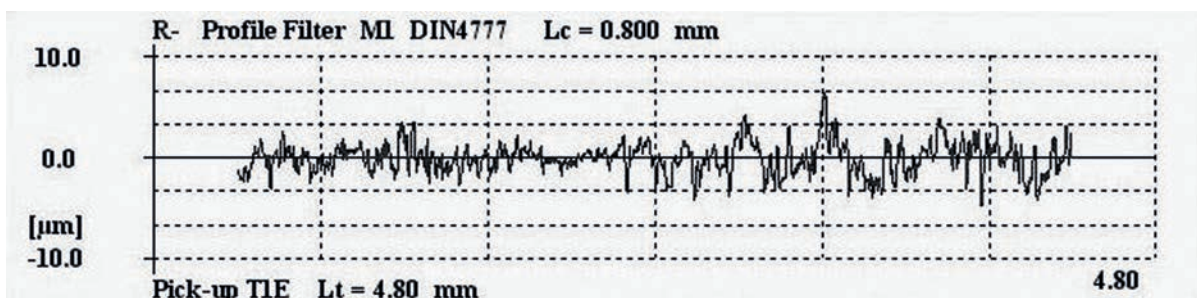
Nazwa parametru / Name of parameter	Oznaczenie/ Denotation	Definicja/Definition
Średnia wysokość wzniesienia / Mean elevation height	R_{pm}	Średnia z pojedynczych maksymalnych wysokości wzniesień / Mean value from single maximal elevation heights
Maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości / Maximal roughness profile elevation height	R_p	Maksymalna pojedyncza wysokość wzniesienia przy określaniu R_{pm} / Maximal single elevation height during R_{pm} determination
Średnia wysokość profilu chropowatości / Mean roughness profile height	R_z	Odległość od najwyższego do najniższego punktu profilu w przedziale pięciu kolejnych odcinków elementarnych l_r / Distance from the highest to the lowest profile point in the range of five consecutive roughness sampling lengths l_r
Maksymalna wysokość chropowatości / Maximal roughness height	R_{max}	Maksymalna pojedyncza wysokość od wzniesienia do wgłębienia na odcinku pomiarowym podczas określania R_z / Maximal single height from the elevation to the pit on the measurement length during R_z determination
Całkowita wysokość profilu chropowatości / Total roughness profile height	R_t	Suma wysokości najwyższego wzniesienia profilu i najwyższej głębokości wgłębienia profilu wewnątrz odcinka pomiarowego / Sum of the highest profile elevation and the deepest profile pit inside the measurement length
Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości / Mean arithmetic roughness profile deviation	R_a	Średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości odchyżeń profilu od linii średniej w przedziale odcinka elementarnego / Mean arithmetic value of the relative values of the profile deviations from the average line within the roughness sampling length
Średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości / Mean square roughness profile deviation	R_q	Średnia kwadratowa wartości wszystkich odchyżeń profilu od linii średniej w przedziale odcinka elementarnego / Mean square values of all the profile deviations from the average line within the roughness sampling length
Średnia szerokość rowków profilu chropowatości / Mean width of roughness profile grooves	R_{sm}	Średnia wartość szerokości elementów profilu X_s wewnątrz odcinka elementarnego / Mean value of the width of the profile elements X_s inside the roughness sampling length
Całkowita głębokość falistości / Total waviness depth	W_t	Odległość pomiędzy najwyższym, a najniższym punktem wypoziomowanego profilu falistości w przedziale odcinka elementarnego / Distance between the highest and lowest point of the levelled waviness profile within the roughness sampling length
Liczba wzniesień profilu / Number of profile elevations	D	Liczba wzniesień i wgłębień w przedziale odcinka pomiarowego / Number of elevations and pits within the measuring length
Udział nośny wgłębień / Bearing surface of grooves	Mr_2	Określany przez linię odcięcia ograniczającą profil rdzenia chropowatości od strony materiału / Determined by the cut-off line limiting the roughness core profile on the side of the material



Rys. 3. Profilogram powierzchni odlewu wykonanego przy podciśnieniu w formie 300 hPa
 Fig. 3. Surface profilogram of a cast made with the negative pressure in the mould of 300 hPa



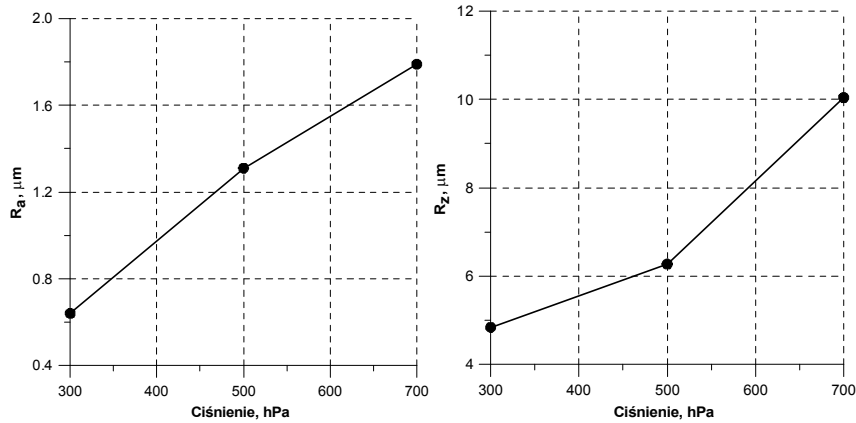
Rys. 4. Profilogram powierzchni odlewu wykonanego przy podciśnieniu w formie 500 hPa
 Fig. 4. Surface profilogram of a cast made with the negative pressure in the mould of 500 hPa



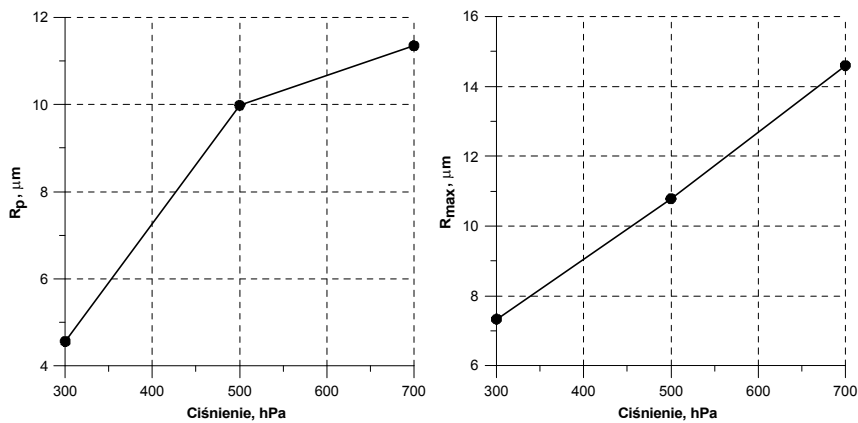
Rys. 5. Profilogram powierzchni odlewu wykonanego przy podciśnieniu w formie 700 hPa
 Fig. 5. Surface profilogram of a cast made with the negative pressure in the mould of 700 hPa

Tabela 2. Uśrednione wyniki pomiaru parametrów chropowatości powierzchni odlewów
 Table 2. Averaged measurement results of cast surface roughness parameters

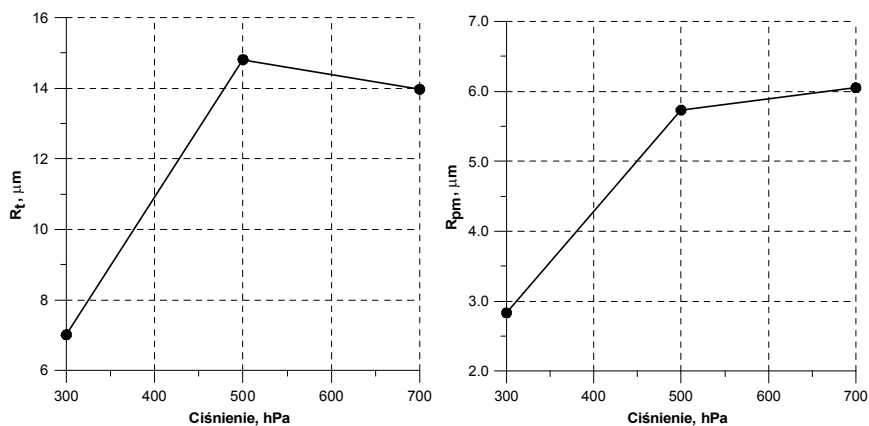
Lp./No.	Parametr/Parameter	Wartość parametru przy podciśnieniu / Parameter value with negative pressure		
		300 hPa	500 hPa	700 hPa
1	R_a , μm	0,64	1,31	1,79
2	R_z , μm	4,84	6,27	10,04
3	R_p , μm	4,56	9,98	11,35
4	R_{max} , μm	7,33	11,78	14,60
5	R_t , μm	7,01	14,81	13,97
6	R_{pm} , μm	2,83	5,73	6,05
7	R_{pm}/R_z	0,58	0,91	0,60
8	R_q , μm	0,87	1,57	2,60
9	W_t , μm	4,28	9,28	12,24
10	D	54	65	70
11	R_{sm}	0,053	0,057	0,065
12	Mr_2	90,6	91,2	85,8



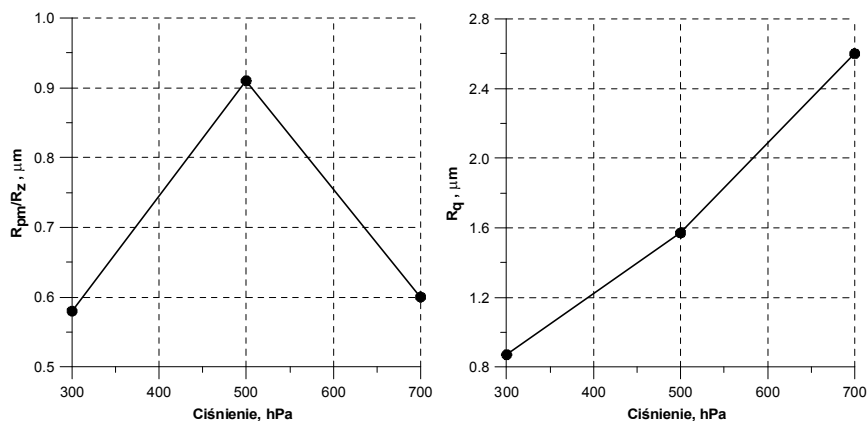
Rys. 6. Wpływ podciśnienia w formie i układzie zalewania na parametry Ra (po lewej) i Rz (po prawej)
 Fig. 6. Effect of negative pressure in the mould and the casting system on the parameters Ra (left) and Rz (right)



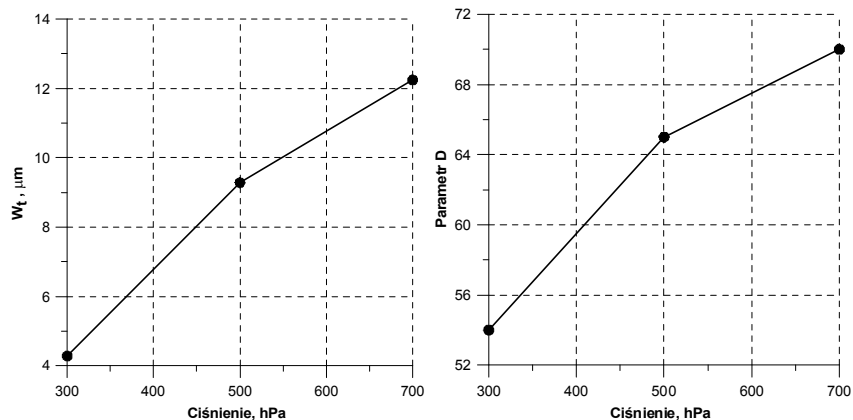
Rys. 7. Wpływ podciśnienia w formie i układzie zalewania na parametry Rp (po lewej) i Rmax (po prawej)
 Fig. 7. Effect of negative pressure in the mould and the casting system on the parameters Rp (left) and Rmax (right)



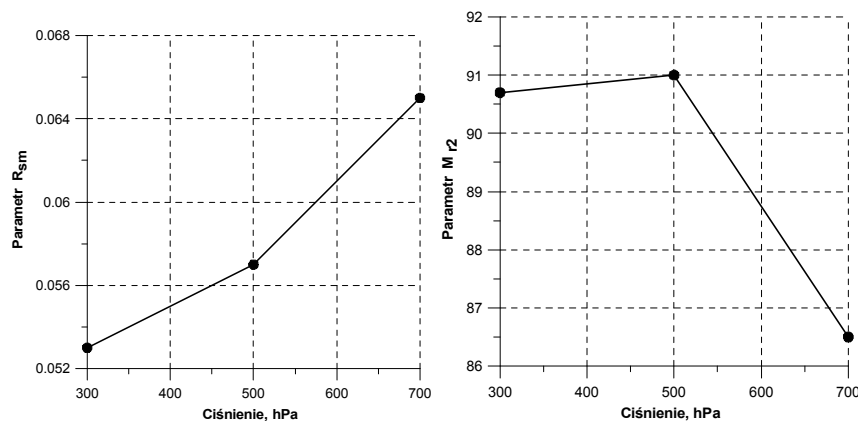
Rys. 8. Wpływ podciśnienia w formie i układzie zalewania na parametry Rt (po lewej) i Rpm (po prawej)
 Fig. 8. Effect of negative pressure in the mould and the casting system on the parameters Rt (left) and Rpm (right)



Rys. 9. Wpływ podciśnienia w formie i układzie zalewania na parametry R_{pm}/R_z (po lewej) i R_q (po prawej)
 Fig. 9. Effect of negative pressure in the mould and the casting system on the parameters R_{pm}/R_z (left) and R_q (right)



Rys. 10. Wpływ podciśnienia w formie i układzie zalewania na parametry W_t (po lewej) i D (po prawej)
 Fig. 10. Effect of negative pressure in the mould and the casting system on the parameters W_t (left) and D (right)



Rys. 11. Wpływ podciśnienia w formie i układzie zalewania na parametry R_{sm} (po lewej) i M_{r2} (po prawej)
 Fig. 11. Effect of negative pressure in the mould and the casting system on the parameters R_{sm} (left) and M_{r2} (right)

Ze wzrostem podciśnienia średnia wartość parametru R_z (średnia wysokość chropowatości maleje i dla podciśnienia 300 hPa przyjmuje średnią wartość ok. 4,8 μm , a dla podciśnienia 700 hPa ta wartość średnia wynosi ok. 10 μm . Wartości parametru R_z dla odlewów wykonanych przy podciśnieniu 300 hPa są zbliżone w każdym z badanych miejsc odlewu, natomiast dla odlewów wykonanych przy podciśnieniu 700 hPa wartości R_z wykazują duży rozrzut. R_{max} (maksymalna wysokość chropowatości) w odlewach z podciśnieniem 300 hPa jest na stałym poziomie i waha się w granicach od 4 do 10 μm , podczas gdy dla odlewów wykonanych przy podciśnieniu 700 hPa parametr ten ma wartość nawet 45 μm . Dla porównania w technologii odlewania precyzyjnego odlewów metodą wytapianych modeli uzyskuje się wartości średnie na poziomie $R_a = 2,5 \mu\text{m}$, a $R_z = 15 \mu\text{m}$.

Parametry takie jak: średnia wysokość wzniesienia (R_{pm}) czy maksymalna wysokość wzniesienia (R_p) pokazują taki sam rezultat. Parametr R_{pm} jest przydatny przy przewidywaniu właściwości nośnych powierzchni, ponieważ aby powierzchnia charakteryzowała się dobrymi właściwościami nośnymi, musi mieć więcej wgłębień niż wierzchołków. Analizując R_{pm}/R_z , stwierdzono, że wartość podciśnienia nie wpływa zasadniczo na to, czy profil wgłębienia jest zaokrąglony czy zaostrowy ($R_{pm}/R_z < 0,5$ – profil zaokrąglony, $R_{pm}/R_z > 0,5$ – profil zaostrowy). Wszystkie odlewy charakteryzowały się większym udziałem nośnym wgłębień (parametr Mr_2) niż udziałem nośnym wierzchołków (parametr Mr_1), przy czym dla odlewów wykonanych przy podciśnieniu równym 300 hPa udział nośny wgłębień występował na poziomie średnio 90–95%, podczas gdy dla odlewów wykonanych z podciśnieniem 700 hPa wynosił średnio 80–85%. Całkowita głębokość falistości (W_t) dla odlewów wykonanych przy 300 hPa wynosiła średnio 3–5 μm i była na podobnym poziomie w każdym miejscu odlewu, podczas gdy dla odlewów wykonanych przy 700 hPa W_t zmieniała się od 8 μm do nawet 37 μm .

3. Wnioski

1. Zastosowanie podciśnienia w formie i układzie zalewania zmniejsza chropowatość odlewów.
2. Chropowatość powierzchni odlewów ciśnieniowych zmniejsza się ze zmniejszeniem wartości podciśnienia w formie.
3. Ze wzrostem podciśnienia w formie zwiększa się nośność powierzchni odlewu.

With an increase in negative pressure, the mean value of parameter R_z (mean roughness height) decreases and for a negative pressure of 300 hPa, it assumes a mean value of about 4.8 μm , whereas for a negative pressure of 700 hPa, this mean value is approximately 10 μm . The values of parameter R_z for the casts made with a negative pressure of 300 hPa are similar in each examined location on the cast, whereas for the casts made with a negative pressure of 700 hPa, the values of R_z exhibit a high scatter of results. R_{max} (maximal roughness height) in the casts with a negative pressure of 300 hPa is at a constant level and varies within the range from 4 to 10 μm , while for the casts made with a negative pressure of 700 hPa, this parameter even reaches 45 μm . In comparison, in the technology of precision casting by means of the lost mould casting method, the mean values stand at the level of $R_a = 2.5 \mu\text{m}$ and $R_z = 15 \mu\text{m}$.

Parameters such as the mean elevation height (R_{pm}) or the maximal elevation height (R_p) show the same result. Parameter R_{pm} is useful in predicting the bearing surface properties, as for a surface to have good bearing properties, it must have more pits than peaks. In the analysis of R_{pm}/R_z , it was established that the value of negative pressure fundamentally determines whether the pit profile is rounded or pointed ($R_{pm}/R_z < 0.5$ – rounded profile, $R_{pm}/R_z > 0.5$ – pointed profile). For all the casts characterized by a higher bearing surface of the pits (parameter Mr_2) than their bearing surface of the peaks (parameter Mr_1), where for the casts made with a negative pressure of 300 hPa, the bearing surface of the pits was at the average level of 90–95%, and for the casts made with a negative pressure of 700 hPa, the average level was 80–85%. The total depth of waviness (W_t) for the casts made with 300 hPa equalled the average of 3–5 μm and was at a similar level in each location of the cast, whereas for the casts made with 700 hPa W_t , it varied from 8 μm to even 37 μm .

3. Conclusions

1. The application of negative pressure in the mould and the casting system reduces the roughness of the casts.
2. The surface roughness of pressure casts decreases with a decrease in the negative pressure value in the mould.
3. With an increase in the negative pressure in the mould, the surface bearing capacity of the cast also increases.

Podziękowania

Badania wykonano w ramach prac statutowych Katedry Odlewnictwa Politechniki Częstochowskiej.

Acknowledgements

This research was conducted within the statutory work of the Foundry Department of Czestochowa University of Technology.

Literatura/References

1. Sikora M. 2005. „Tolerancje ogólne odlewów”. *Archiwum Odlewnictwa* 5 (17) : 263–272.
2. Dudek P., A. Fajkiel, T. Reguła, J. Mielniczuk. 2011. „Powłoki konwersyjne na odlewach ciśnieniowych ze stopów magnezu. Część 1: Wpływ parametrów technologicznych odlewania ciśnieniowego na jakość odlewów ze stopu AZ91”. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 51 (4) : 31–50.
3. Nwaogu U.C., N.S. Tiedje, Hansen H.N. 2013. „A non-contact 3D method to characterize the surface roughness of castings”. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (1) : 59–68.
4. Zuffert A. 2015. Using vacuum technology to meet the industry's challenges for high integrity castings. W *Innowacje w odlewnictwie ciśnieniowym. Materiały konferencyjne*, 79–80. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
5. Fusayama T., M. Yamane. 1973. „Surface roughness of castings made by various casting techniques”. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 29 (5) : 529–535.
6. Dańko J. 2000. *Maszyny i urządzenia do odlewania pod ciśnieniem*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne: Kraków.
7. Białobrzeski A. 1992. *Odlewnictwo ciśnieniowe: maszyny, urządzenia i technologia*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa.
8. Konstantoulakis E., H. Nakajima, R.D. Woody, A.W. Miller. 1998. „Marginal fit and surface roughness of crowns made with an accelerated casting technique”. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 80 (3) : 337–345.
9. Swing E. 1964. „Methods of surface roughness measurement”. *Transactions of the American Foundrymen's Society, Proceedings of the Sixty-Seventh Annual Meeting* 71, 1964, IL (1963), pp. 452–459.
10. Tsai D.M., C.F. Tseng. 1999. „Surface roughness classification for castings”. *Pattern Recognition* 32 (3) : 389–405.

