

Rola zagęszczenia mas formierskich ze spoiwami nieorganicznymi w kształtowaniu ich wytrzymałości osiąganych po utwardzaniu mikrofalowym

The role of the densification of moulding sands with inorganic binders in the modeling of their strength obtained after microwave hardening

Mateusz Stachowicz¹

¹ Politechnika Wrocławska, Katedra Odlewnictwa, Tworzyw Sztucznych i Automatyki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 25, 50-370 Wrocław, Polska

¹ Wrocław University of Technology, Department of Foundry Engineering, Plastics and Automation, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 25, 50-372 Wrocław, Poland

E-mail: mateusz.stachowicz@pwr.edu.pl

Received: 25.11.2016. Accepted in revised form: 30.06.2017.

© 2017 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2017.10

Streszczenie

W pracy podjęto próbę uzupełnienia informacji na temat wpływu zagęszczenia masy formierskiej ze spoiwami nieorganicznymi na podstawowe parametry wytrzymałościowe, tj.: wytrzymałość na rozciąganie i zginanie mas formierskich z uwodnionym krzemianem sodu po procesie szybkiego nagrzewania mikrofalowego. W badaniach zastosowano świeży piasek kwarcowy średni oraz trzy gatunki handlowego niemodyfikowanego uwodnionego krzemianu sodu o module molowym ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) w przedziale od 1,9 do 3,4. Masy sporządzone z 0,5% cz. mas. wody i 1,5% cz. mas. spoiwa zagęszczano wibracyjnie tak, aby osiągnąć różną gęstość pozorną (ρ_v) masy formierskiej. Badane parametry wytrzymałościowe po utwardzeniu i ostudzeniu próbek mas odnoszono do gęstości pozornej. Wyniki badań nad wpływem zróżnicowanego zagęszczenia odnoszono do dostępnych danych literaturowych. Występowanie zależności między gęstością pozorną a wytrzymałością na rozciąganie i zginanie utwardzonych mas potwierdzono za pomocą modeli liniowych dla korzystnego nagrzewania mikrofalowego, podobnie jak to ma miejsce w dotychczas opisanych przypadkach stosowania chemicznych metod sieciowania spoiw nieorganicznych. Ponadto na podstawie wykonanych badań stwierdzono występowanie podobnych przyrostów wytrzymałości na skutek zmian gęstości pozornej mas nagrzewanych mikrofalowo do tych, które zaobserwowano w masach utwardzanych chemicznie. Wyniki badań posłużyły do oceny jakości spoiw chemicznych stosowanych w odlewnictwie według kryteriów wytrzymałości przypadających na 1% wag.

Abstract

The study attempts to complement the information on the effect of the density of moulding sands with inorganic binders on basic strength parameters, i.e. the tensile and bending strength of moulding sands with hydrated sodium silicate, after the process of fast microwave heating. The tests applied fresh medium quartz sand and three types of commercial non-modified hydrated sodium silicate with a molar module ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) ranging from 1.9 to 3.4. The masses made of 0.5 wt. % of water and 1.5 wt. % of binder underwent vibrational densification so as, to obtain different apparent densities (ρ_v) of the moulding sand. The examined strength parameters, after hardening and cooling of the mass samples, were compared to apparent density. The results of the studies of the effect of a diversified density were referred to in the literature data. The occurrence of relations between the apparent density and the tensile and bending strength of the hardened masses was confirmed by means of linear models for advantageous microwave heating, similarly to the previously discussed cases of the use of chemical methods of curing inorganic binders. Also, based on the performed tests, similar strength increases were established, as a result of the changes in the apparent density of the microwave heated masses to those which were observed in the chemically hardened masses. The tests results were used to evaluate the quality of the chemical binders applied in casting according to the strength criteria per 1 wt. % of binder in the mass. In the case of

spoiwa w masie. W przypadku wszystkich badanych spoiw nieorganicznych stwierdzono korzystny stosunek wytrzymałości przeliczonej na udział 1% wag. spoiwa powyżej wartości $1,20 \text{ g/cm}^3$ gęstości pozornej mas na osnowie piasku kwarcowego średniego.

Słowa kluczowe: odlewnictwo, masa formierska, uwodniony krzemian sodu, gęstość, mikrofała

1. Wprowadzenie

Od prawidłowo wykonanej formy odlewniczej czy rdzeni wymaga się spełnienia wszystkich zaleceń jakościowych dotyczących produkowanych z ich udziałem odlewów. Na pierwszym miejscu powinno kłaść się nacisk na możliwość do uzyskania minimalną liczbę wad odlewniczych, przy zachowaniu ekonomiki produkcji oraz minimalnego negatywnego wpływu na środowisko mieszaniny formierskiej. Wpływ na liczbę wad odlewniczych ma przede wszystkim stosowana w warunkach produkcyjnych technologia mas formierskich i rdzeniowych. W tym obszarze badań, silnie związanych z praktyką odlewniczą, szczególną uwagę poświęca się odpowiedniemu doborowi materiałów, tak aby sprostać wymogom jakościowym wytwarzanej formy lub rdzenia. Mimo dostępności wysokiej jakości materiałów stosowanych na masy formierskie, praktyka ich technologii nie zawsze gwarantuje uzyskanie minimalnej liczby wad odlewniczych. Niejednokrotnie przyczyną powstawania nieprawidłowości jest nieodpowiednie, niedostosowane do procesu zalewania i krzepnięcia stopu odlewniczego zagęszczenie masy formierskiej. Jak wiadomo, bezpośredni związek z nieprawidłowym zagęszczeniem masy formierskiej ma zjawisko erozji warstw wierzchnich formy na skutek działania ciekłego stopu odlewniczego. Typowymi wadami wynikającymi z poddawania się materiału formy odlewniczej działaniu strugi ciekłego metalu są [1,2]: zapiaszczenia, niska jakość powierzchni na skutek penetracji por masy formierskiej, przypalenia i wady kształtu pojawiające się na skutek nadmiernego odkształcania się ścianek wnętrza. Na podstawie badań [3,4] miejsc uderzeń strugi ciekłego stopu odlewniczego w ściankę formy stwierdzono, przy jednakowym stopniu zagęszczenia, wyraźne różnice wynikające ze stosowanych spoiw chemicznych: organicznych i nieorganicznych, na korzyść tych drugich [4]. Wśród najpowszechniej spotykanych wad powstałych na skutek erozji formy wymienia się zapiaszczenie, które ma miejsce w przypadku niedostatecznego upakowania osnowy. Penetrujący pory między ziarnami osnowy stop zwiększa skłonność formy do erozji tym bardziej, im stopień zagęszczenia jest mniejszy. Zwykle występowanie tego typu wad można eliminować przez stosowanie powłok ochronnych [5,6], jednakże wiąże się to z podrażaniem procesu produkcji, wydłużaniem czasu przygotowania formy i utrudnionym procesem regeneracji osnowy. Po-

all the tested inorganic binders, an advantageous ratio of strength recalculated to 1 wt. % of binder above the value of 1.20 g/cm^3 of the apparent density of the masses based on medium quartz sand, was established.

Keywords: casting, moulding sand, hydrated sodium silicate, density, microwave

1. Introduction

A properly prepared casting mould or core is required to fulfill all the quality recommendations concerning the casts produced with their use. First of all, focus should be made on the possibility to obtain minimal number of casting defects, with the preservation of the production economy and the minimal negative effect on the environment of the moulding mixture. The number of casting defects is mainly affected by the technology of moulding and core sands used under production conditions. In this scope of research, strictly connected with the casting practice, special attention is paid to the proper selection of materials, so that the quality requirements of the produced mould or core can be fulfilled. Despite the availability of high quality materials used for moulding sands, the application of their technology does not always guarantee the minimal number of casting defects. Often, the cause of the occurrence of irregularities is the inappropriate density of the moulding sand, unsuitable for the process of casting and solidification of the casting alloy. As we know, inappropriate densification of the moulding sand is directly related with the erosion of the mould's surface layers caused by the operation of the liquid casting alloy. Typical defects resulting from the exposure of the casting mould material to the operation of the liquid metal stream include [1,2]: sand holes, low surface quality as a result of the penetration of the moulding sand's pores, burn-marks and shape flaws caused by excessive deformation of the cavity walls, etc. Based on the studies [3,4] of the areas where the stream of the liquid casting alloy hits the mould's wall, with the same densification degree, clear differences were established resulting from the applied chemical binders: organic and inorganic, in favour of the latter [4]. The most commonly encountered defects caused by the erosion of the mould include sand holes, which occur due to insufficient packing of the matrix. The lower the degree of densification, the more the alloy penetrates the pores between the matrix grains, increases the mould's tendency for erosion. Usually, these types of defects are easier to eliminate by way of applying protective coatings [5,6]; however, this is connected with making the production process more expensive, prolonging the time of mould preparation and making the matrix regeneration more difficult. Also, in the case of the most frequently used alcohol protective coatings,

nadto w przypadku najczęściej stosowanych powłok ochronnych alkoholowych można mówić o ich negatywnym oddziaływaniu na otoczenie ze względu na parę uwalnianie podczas dosuszania formy przed zalaniem.

Informacje zawarte w publikacji [7] na temat roli zagęszczenia w technologii form wytwarzanych z mas ze spoiwami chemicznymi, do których należy również uwodniony krzemian sodu, były podstawą do przygotowania prób z tego typu masami formierskimi przeznaczonymi do utwardzania mikrofalowego. W badaniach przedstawionych w [7] wskazano założenia teoretyczne dotyczące roli zagęszczenia w przypadku stosowania osnowy kwarcowej i spoiw chemicznych, w tym spoiwa nieorganicznego – uwodnionego krzemianu sodu (szkła wodnego). Wyniki badań wpływu stopnia zagęszczenia mas ze szkłem wodnym, utwardzanych ciekłymi estrami (proces Floster-S) pokazano na przykładzie analizy wpływu gęstości pozornej na wytrzymałość na rozciąganie oraz wybrane parametry technologiczne. W przedstawionych badaniach przytoczono próby przeprowadzone z masami utwardzanymi ciekłymi estrami (znane pod handlową nazwą Flodur), które dodatkowo po 24 h od połączenia składników dosuszano z zastosowaniem szybkiego nagrzewania mikrofalowego. W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono empiryczne zależności liniowe wskazujące na korelację gęstości pozornej mas (ρ_o) z wytrzymałością na rozciąganie (rozszczepienie) R_m^U oraz na ściskanie R_c^U .

W badaniach [7] wskazano, że istnieje możliwość wykorzystania uzyskanych w warunkach laboratoryjnych zależności w praktyce odlewniczej, m.in.: do zwiększenia jakości form w kontekście ograniczenia np. zjawiska erozji materiału formy. Na podstawie uzyskanych wyników w publikacji [7] przedstawiono empiryczną zależność, z której wynika, że zmiana gęstości pozornej o $0,10 \text{ g/cm}^3$ będzie powodowała również zmianę wytrzymałości mas z krzemianem sodu o około 40%, tak w przypadku mieszanin utwardzanych chemicznie (Floster-S), jak i z zastosowaniem dodatkowego dosuszania (Floster-S, następnie suszenie mikrofalowe). Zasadność stosowania po procesie Floster-S dosuszania próbek za pomocą nagrzewania mikrofalowego potwierdzono już badaniami własnymi autora [8,9]. Wyniki opisanych badań stanowiły podstawę do ich kontynuacji w zakresie stosowania dla utwardzenia mas ze szkłem wodnym wyłącznie nagrzewania mikrofalowego, co ma związek z ujawnionymi w wielu badaniach zaletami tego procesu [10,11]. W celu uzupełnienia informacji o wpływie zagęszczenia na osiągnięte po utwardzeniu mikrofalowym parametry wytrzymałościowe zaplanowano przeprowadzenie prób mas z popularną osnową kwarcową oraz trzema niemodyfikowanymi, handlowymi spoiwami. Wyniki badań uzupełnią informacje w zakresie roli zagęszczenia mas przeznaczonych do utwardzania mikrofalowego, co ułatwi wdrożenie ekologicznych sposobów fizycznego utwardzania mas formierskich z uwodnionym krzemianem sodu.

we must not forget about their negative effect on the environment due to the vapours released during the process of drying the mould before casting.

The information included in the publication [7] on the role of the density in the technology of moulds produced from masses with chemical binders, one of which is hydrated sodium silicate, were the basis for the tests performed with these types of moulding sands assigned for microwave hardening. The studies presented in [7] pointed to the theoretical assumptions concerning the role of the density in the case of applying a quartz matrix and chemical binders, including an inorganic binder, i.e. hydrated sodium silicate (water glass). The results of the studies on the effect of the degree of densification of masses with sodium silicate hardened with liquid esters (the Floster-S process) were demonstrated on the example of an analysis of the effect of the density on the tensile strength as well as selected technological parameters. The presented study discussed the tests performed with masses hardened with liquid esters (commercially available, as Flodur), which were additionally dried with the use of fast microwave heating 24 h after the components had been joined. A result of the conducted tests was empirical determination of the linear relations pointing to a correlation of the apparent density of the masses (ρ_o) with the tensile (fission) strength R_m^U and compressive strength R_c^U .

The study [7] demonstrated that there is a possibility of applying the relations obtained under laboratory conditions in casting e.g. to raise the quality of the moulds in the context of limiting the erosion of the mould's material. Based on the results obtained in the publication [7], an empirical relation was deduced, from which it can be inferred that a change in the apparent density by 0.10 g/cm^3 will cause a change in the strength of the masses with sodium silicate by about 40%, in the case of mixtures hardened both chemically (Floster-S) and with the application of additional drying (Floster-S, followed by microwave heating). The validity of the use of Floster-S and the next drying of the samples by means of microwave heating was already confirmed by the author's own research [8,9]. The results of the presented studies constituted the basis for their continuation in the scope of application of only microwave heating to harden masses with water glass, which is connected with the advantages of this process revealed in numerous studies [10,11]. In order to complement the information on the effect of the density on the strength parameters obtained after microwave hardening, tests were performed on masses with the popular quartz matrix as well as three non-modified commercial binders. The results of these studies complement the information on the role of the densification of masses assigned for microwave hardening, which will facilitate the implementation of ecological ways of physical hardening of masses with hydrated sodium silicate.

2. Metoda badań i wyniki

Do sporządzania użytych w badaniach mas formierskich zastosowano suszony, ostudzony, piasek kwarcowy średni 1K o frakcji głównej 0,20/0,315/0,16 (według normy PN-H-11001:1985) z polskiej kopalni Grudzeń Las oraz niemodyfikowane gatunki szkła wodnego sodowego: 137, 145 i 150, wyprodukowane w Zakładach Chemicznych „Rudniki” SA (tabela 1). We wstępowej mieszarce laboratoryjnej sporządzano 6 kg masy formierskiej w następujących proporcjach: na 100 cz. mas. osnowy dozowano 0,5 cz. mas. wody [12], następnie po 60 sekundach od rozpoczęcia procesu mieszania wprowadzono 1,5 cz. mas. wybranego gatunku spoiwa i mieszano przez 240 sekund.

W procesie zagęszczania wibracyjnego na polskim aparacie LUZ-2e produkcji Multiserw-Morek stosowano zmienną amplitudę drgań, przy stałym czasie trwania procesu równym 120 sekund. Zaformowane w ten sposób próbki (PN-H-11073:1983) podłużne i ósemkowe były następnie poddawane procesowi utwardzania w komorze pieca mikrofalowego o pojemności 32 l wyposażonego w jeden magnetron i obrót wsadu produkcji polskiej Plazmatronika. W trakcie utwardzania stosowano mikrofałe o częstotliwości 2,45 GHz i mocy 1000 W. Przyjęty czas nagrzewania wynoszący 240 sekund, bez względu na zróżnicowany stopień zagęszczenia próbek, mieszczący się w zakresie od 1,05 g/cm³ do 1,40 g/cm³ gwarantował skuteczną dehydratację [13] masy w całej objętości próbek. Badania rozpoczęto od sprawdzenia stabilizacji masowej próbek z masy ze spoiwem 137, o najmniejszej zawartości suchych składników (tabela 1).

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne trzech gatunków szkła wodnego stosowanego do sporządzania mas

Table 1. Physico-chemical properties of three types of water glass used for mass preparation

Gatunek szkła wodnego sodowego / Type of sodium water glass	Wymagany moduł molowy (SiO ₂ /Na ₂ O) / Required molar module (SiO ₂ /Na ₂ O)	Zmierzony moduł molowy (SiO ₂ /Na ₂ O) / Measured molar module (SiO ₂ /Na ₂ O)	Zawartość tlenków (SiO ₂ + Na ₂ O), min. % / Oxide content (SiO ₂ + Na ₂ O), min. %	Zmierzona zawartość tlenków (SiO ₂ + Na ₂ O), % / Measured oxide content (SiO ₂ + Na ₂ O), %	Gęstość (20°C), g/cm ³ / Density (20°C), g/cm ³	Zmierzona gęstość (20°C), g/cm ³ / Measured density (20°C), g/cm ³	Lepkość dynamiczna, min. (P) / Dynamic viscosity, min. (P)
137	3,2–3,4	3,4	35,0	36,3	1,37–1,40	1,37	1
145	2,4–2,6	2,5	39,0	41,5	1,45–1,48	1,47	1
150	1,9–2,1	2,0	40,0	43,5	1,50–1,53	1,52	1

Mieszanki formierskie były przygotowywane do badań wytrzymałościowych w zamkniętym, mechanicznie wentylowanym pomieszczeniu laboratoryjnym, w którym na wysokości 1,5 m panowała temperatura 23 ± 1°C oraz wilgotność 50 ± 5%.

Pomiary wytrzymałości na rozciąganie R_m^U i zginanie R_g^U przeprowadzono na laboratoryjnym urządzeniu do badania mas formierskich LRuE-2e polskiej produkcji

2. Test methodology and results

For the preparation of the moulding sand used in the tests, dried, cooled medium quartz sand 1K, main fraction 0.20/0.315/0.16, was used (according to the standard PN-H-11001:1985) from the Grudzeń Las Polish mine, as well as non-modified types of sodium water glass: 137, 145 and 150, produced at the Polish Chemical Plant “Rudniki” (Table 1). In a laboratory ribbon mixer, 6 kg of moulding sand were prepared in the following proportions: on 100 parts by weight of matrix, 0.5 parts by weight of water were dosed [12]. Next, 60 seconds after the mixing process began, 1.5 parts by weight of the selected type of binder were introduced, followed by mixing for 240 seconds.

In the process of vibrational densification in the apparatus LUZ-2e produced by the Polish company Multiserw-Morek, a varying vibration amplitude was applied, with a constant process duration of 120 seconds. The samples moulded in this way (PN-H-11073:1983), longitudinal and octal, were then hardened in the 32 l chamber of a microwave furnace equipped with one magnetron and the charge rotation system, made by Polish Plazmatronika. During the hardening process, microwaves of the frequency of 2.45 GHz and the power of 1000 W were applied. The assumed heating time, equaling 240 seconds, regardless of the diversified degree of sample densification, placed within the range from 1.05 g/cm³ to 1.40 g/cm³, guaranteed effective dehydration [13] of the mass in the whole sample volume. The tests began with the verification of the mass stabilization of the samples made of a moulding sand with the binder 137, with the lowest quota of dry components (Table 1).

The moulding mixtures for the strength tests were prepared in a closed, mechanically ventilated laboratory room, in which, at the height of 1.5 m, the temperature was 23 ± 1°C and the humidity was 50 ± 5%.

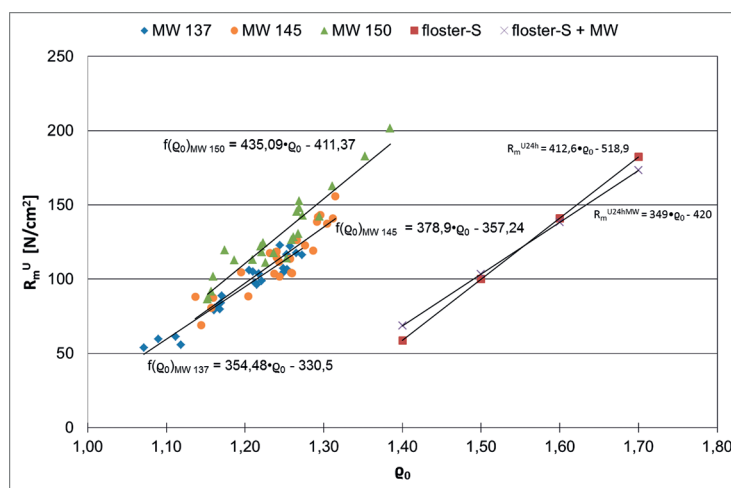
The tensile R_m^U and bending R_g^U strength measurements were performed on a laboratory device for moulding sand tests, LRuE-2e, produced by the Polish Multiserw-Morek company. The mass of each sample

Multiserw-Morek. Masę każdej próbki przed pomiarem wytrzymałości określano na wadze Ohaus PA4102CM/1 z dokładnością do 0,01 g. Zagęszczenie wyrażano gęstością pozorną jako stosunek masy każdej próbki po utwardzeniu, a następnie ostudzeniu do jej objętości wyznaczonej na podstawie założonych wymiarów.

Wyniki badań nad wpływem zagęszczenia kwarcowych mas sporządzonych z trzema niemodyfikowanymi spoiwami na ich wytrzymałość po utwardzeniu mikrofalowym zaprezentowano na rysunkach 1 i 2, które oznaczono „MW”. Wpływ gęstości pozornej ρ_0 na wytrzymałość na rozciąganie R_m^U zmierzoną na próbkach ósemkowych (typu *dog bone*) pokazano na rysunku 1. Na rysunku 2 przedstawiono zależność między gęstością pozorną a wytrzymałością na zginanie R_g^U wyznaczoną za pomocą badań z użyciem próbek podłużnych.

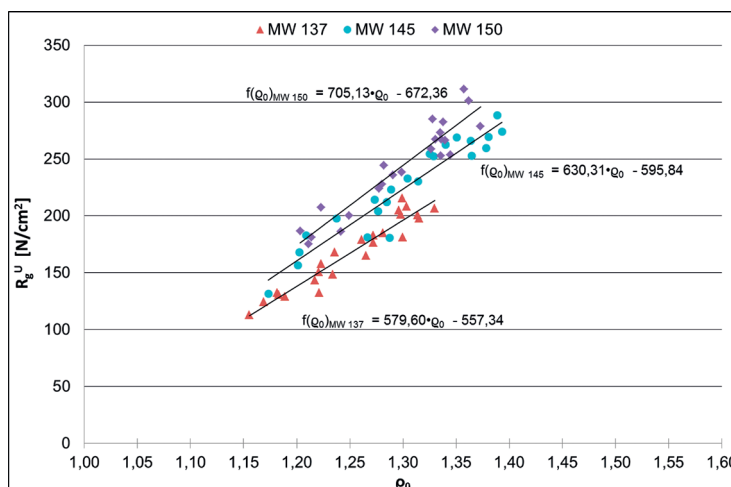
before the measurement was established on the scales Ohaus PA4102CM/1 with the accuracy of 0.01 g. The densification was expressed by the apparent density as a ratio of each sample's mass after hardening, and next after cooling, to its volume determined based on the assumed dimensions.

The results of the tests on the effect of the densification of quartz masses prepared with three modified binders on their strength after microwave hardening are presented in Figure 1 and 2, which were marked as “MW”. The effect of the apparent density ρ_0 on the tensile strength R_m^U measured on the octal samples (dog bone type) are shown in Figure 1, whereas Figure 2 presents the relation between the apparent density and the bending strength R_g^U determined by means of tests with the use of the longitudinal samples.



Rys. 1. Wpływ gęstości pozornej i gatunku szkła wodnego na wytrzymałość na rozciąganie R_m^U po procesie nagrzewania mikrofalowego (MW) oraz po utwardzaniu w technologii Floster-S [7]

Fig. 1. Effect of the apparent density and the water glass type on the tensile strength R_m^U after microwave heating (MW) and hardening in the Floster-S technology [7]



Rys. 2. Wpływ gęstości pozornej i gatunku szkła wodnego na wytrzymałość na zginanie R_g^U po procesie nagrzewania mikrofalowego (MW)

Fig. 2. Effect of the apparent density and the water glass type on the bending strength R_g^U after microwave heating (MW)

3. Dyskusja wyników

Na potrzeby prowadzonych analiz wpływu zagęszczenia na parametry kwarcowych mas założono pierwotnie hipotezę zerową, która mówi, że dla różnych gatunków spoiw: 137, 145, 150 wyniki analiz wytrzymałości R_m^U i R_g^U nie będą związane z gęstością pozorną po procesie zagęszczania wibracyjnego. W tym celu przeprowadzono niezbędne obliczenia za pomocą programu Statistica 12.0 dostarczonego przez StatSoft®Polska. Przyjęto dla wszystkich sześciu badanych przypadków poziom istotności wynoszący 0,05. W tabeli 2 zebrano wyniki aproksymacji liniowej, które posłużyły do analizy przyjętej hipotezy zerowej. Ze względu na spełnienie warunku, w którym wszystkie $p < 0,05$ oraz dla zadowalającej dokładności dopasowania regresji liniowej wyrażonej współczynnikiem r można przyjąć, że zastosowana metoda aproksymacji liniowej jest właściwa i wystarczająca. Zastosowanie regresji liniowej z 95% przedziałem ufności umożliwiło odrzucenie hipotezy zerowej we wszystkich sześciu rozważanych przypadkach. Tym samym można przyjąć za prawdziwą hipotezę alternatywną, która głosi, że wytrzymałości: R_m^U oraz R_g^U , uzyskane po utwardzaniu mikrofalowym, zależą od gęstości pozornej ρ_0 mas, a obserwowane zmiany mają w badanym przedziale gęstości pozornej charakter liniowy.

3. Discussion of results

For the purposes of the performed analyses on the effect of densification on the parameters of quartz masses, initially, a zero hypothesis was assumed, saying that, for different types of binders, i.e. 137, 145 and 150, the results of the strength analyses R_m^U and R_g^U will not be connected with the apparent density after the process of vibrational densification. To that end, the necessary calculations were performed by means of the StatSoft®Polands' Statistica 12.0 program. In all six examined cases, the assumed significance level was 0.05. Table 2 compiles the results of the linear approximation, which were used to analyze the assumed zero hypothesis. Because of the fulfillment of the conditions in which all $p < 0.05$ as well as the satisfactory accuracy of approximation of the linear regression expressed with the coefficient r , we can assume that the applied method of linear approximation is appropriate and sufficient. The use of linear regression with a 95% confidence interval made it possible to reject the zero hypothesis in all six considered cases. Thus, it was possible to assume an alternative hypothesis as true, which says that the strengths R_m^U and R_g^U , obtained after the microwave hardening, depend on the apparent density ρ_0 of the masses, and the observed changes are linear in character, in the examined range of apparent densities.

Tabela 2. Wyniki analizy statystycznej parametrów wytrzymałościowych dla różnej gęstości pozornej mas formierskich ze szkłem wodnym utwardzanych różnymi metodami

Table 2. Results of the statistical analysis of the strength parameters for different apparent densities of moulding sands with water glass hardened with different methods

Wytrzymałość mas ze spoiwami / Strength of masses with binders	Oznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < 0,05$ / Marked correlation coefficients are important for $p < 0.05$						Wytrzymałość: $f(\rho_0) = (\text{nachylenie } y) \cdot \rho_0 + (\text{stała zależna } y)$ / Strength: $f(\rho_0) = (\text{slope } y) \cdot \rho_0 + (\text{constant dependent } y)$	
	średnia / average	odchylenie standardowe / standard deviation	$r(\rho_0, R_{m/g}^U)$	r^2	p	N	stała zależna y / constant dependent y	nachylenie y / slope y
$R_m^{U/137}$	93,58333	21,1486	0,9642	0,9297	0,00	24	-330,50	354,48
$R_m^{U/145}$	113,9500	22,0974	0,9105	0,8291	0,00	24	-357,24	378,90
$R_m^{U/150}$	128,5083	27,9420	0,9440	0,8912	0,00	24	-411,37	435,09
$R_g^{U/137}$	168,0208	31,2284	0,9599	0,9213	0,00	24	-557,34	579,60
$R_g^{U/145}$	224,4652	43,1325	0,9536	0,9093	0,00	23	-595,84	630,31
$R_g^{U/150}$	243,6130	39,4784	0,9453	0,8936	0,00	23	-672,36	705,13
Floster-S; względne R_m^{U24h} [7] / Floster-S; relative R_m^{U24h} [7]	–	–	–	0,9810	–	–	-518,9	412,6
Floster-S + MW; względne R_m^{U24hMW} [7] / Floster-S + MW; relative R_m^{U24hMW} [7]	–	–	–	0,9360	–	–	-420,0	349,0

Uzyskane wyniki badań własnych tym samym potwierdziły zaobserwowane wcześniej w pracy [7], liniowo opisane za pomocą formuły (1): $f(\rho_0) = (\text{nachylenie } y) \cdot \rho_0 + (\text{stała zależna } y)$, zależności między: gęstością pozorną a badanymi wytrzymałościami (ujętymi parametrem względnej wytrzymałości na rozciąganie). Ponadto wyniki badań mas utwardzanych mikrofalowo potwierdzają zasadność stosowania różnych gatunków spoiw, w tym o małej sile wiązania dla osiągnięcia zróżnicowanej gęstości pozornej mas, a więc i wytrzymałości przy porównywalnym nakładzie pracy. Podczas formowania nakład pracy odpowiadał czterem stosowanym w badaniach nastawom amplitudy drgań aparatu LUZ-2e do zagęszczania wibracyjnego mas. Wyniki tych obserwacji potwierdzają możliwość sterowania zagęszczaniem, również przez dobór spoiwa, co może być wykorzystane do celowego zwiększania lub zmniejszania wytrzymałości formy lub wybranych jej przestrzeni, np. przypadającą na masę wypełniającą. Jak podano w pracy [7], zmniejszanie gęstości pozornej w określonych partiach formy będzie miało odzwierciedlenie w mniejszym nakładzie pracy potrzebnej na wybicie odlewu z formy wykonanej z masy ze szkłem wodnym.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wytrzymałości mas ze spoiwami chemicznymi utwardzanymi mikrofalowo zauważono, że zmiana gęstości pozornej o 0,10 g/cm³ skutkuje zbliżoną do opisanej w [7] zmianą wytrzymałości na rozciąganie wynoszącą około 40%. Na podstawie przedstawionych w tabeli 2 współczynników funkcji $f(\rho_0)$ opisanej równaniem (1), zmiany wytrzymałości ujęto procentowo za pomocą formuły (2): $((R_x^{U_{\rho 0.1}} - R_x^{U_{\rho 0.0}}) / R_x^{U_{\rho 0.1}}) \cdot 100\%$. Wyniki analiz dla zmieniających się R_m^U i R_g^U na skutek zwiększania/zmniejszania ρ_0 o 0,10 g/cm³ pokazano w tabeli 3.

Tabela 3. Zmiany wytrzymałości R_m^U i R_g^U dla przyrostu gęstości pozornej mas

Table 3. Changes in strength for R_m^U and R_g^U at the increase of the apparent density of masses

Zmiany wytrzymałości dla $\Delta\rho_0 = 0,10 \text{ g/cm}^3$ / Changes in strength for $\Delta\rho_0 = 0.10 \text{ g/cm}^3$	$R_m^{U/137}$	$R_m^{U/137}$	$R_m^{U/137}$	$R_g^{U/137}$	$R_g^{U/137}$	$R_g^{U/137}$
%	37	39	39	42	39	41

Podsumowując wyniki analiz zawartych w tabeli 3 oraz odpowiadające im wyniki w publikacji [7], można jednoznacznie stwierdzić, że zmiana wytrzymałości: R_m^U i R_g^U przy $\Delta\rho_0 = 0,10 \text{ g/cm}^3$ dla metod: chemicznej z ciekłymi estrami (R_m^{U24h}), chemicznej wspomaganiej mikrofalowo (R_m^{U24hMW}) oraz mikrofalowej (R_m^U) jest porównywalna i wynosi około 40%. Prawdopodobnie zmiany R_g^U wyrażone w pobliżu wartości 40% będą również obowiązywały dla wszystkich rozpatrywanych w artykule [7] metod utwardzania mas ze szkłem wodnym. Można zatem przyjąć, że istotny czynnik z punktu widzenia analiz statystycznych, którym jest osiągniata

The obtained results of the author's own research thus confirmed the relations observed in the earlier study [7], linearly described by means of the formula (1): $f(\rho_0) = (\text{slope } y) \cdot \rho_0 + (\text{constant dependent } y)$, between the apparent density and the examined strengths (expressed by the parameter of relative tensile strength). Also, the test results for the microwave-hardened masses confirm the validity of the use of different types of binders, including a low binding force, in order to obtain a diversified apparent density of the masses and thus also strength, with a comparable amount of labour. During the moulding, the amount of labour corresponded to the four applied setpoints of vibration amplitude of the apparatus LUZ-2e for vibrational densification of the masses. The results of these observations confirm the possibility to control the densification, also by the selection of the binder, which can be used to deliberately increase or decrease of the strength of the mould or its selected spaces, e.g. corresponding to the backing sand. According to the study [7], decreasing the apparent density in the particular section of the mould will be reflected in a smaller amount of labour needed to knock the cast out of a mould made of a mass with water glass.

Based on the performed analyses of the strength of masses with chemical binders hardened with microwaves, it was established that a change in the apparent density by 0.10 g/cm³ results in a change in the tensile strength of about 40%, similar to that discussed in [7]. Based on the coefficient of the function $f(\rho_0)$ described by equation (1), presented in Table 2, the changes were given in percent by means of formula (2): $((R_x^{U_{\rho 0.1}} - R_x^{U_{\rho 0.0}}) / R_x^{U_{\rho 0.1}}) \cdot 100\%$. The analysis results for the R_m^U and R_g^U changes as a result of an increase/decrease of ρ_0 by 0.10 g/cm³ are shown in Table 3.

Summarizing the analysis results given in Table 3 and the corresponding results presented in the publication [7], we can explicitly state that a change in the strengths: R_m^U and R_g^U with $\Delta\rho_0 = 0.10 \text{ g/cm}^3$ for the methods: chemical with liquid esters (R_m^{U24h}), chemical, microwave supported (R_m^{U24hMW}) and microwave (R_m^U) is comparable and equals about 40%. Probably, the changes in R_g^U expressed around the value of 40% will also apply to all the methods of hardening masses with sodium silicate considered in the article [7]. And so, it can be assumed that the factor which is significant for the statistical analyses, that is the apparent density

po procesie formowania i utwardzenia gęstość pozorną pełni bardzo podobną rolę we wszystkich branżach pod uwagę technologiach mas ze szkłem wodnym.

Niemniej jednak, jak wiadomo z [8,9,14,15,16] metody chemiczne, a nawet chemiczno-fizyczne utwardzania uwodnionego krzemianu sodu są mniej skuteczne od fizycznych, do których należy nagrzewanie mikrofalowe. Stosując się do kryteriów doboru odpowiedniego składu masy dla osiągnięcia wymaganej dla danego odlewu wytrzymałości masy formierskiej i rdzeniowej, można podzielić spoiwa organiczne i nieorganiczne na trzy klasy [17]:

- I, najwyższą, do której zalicza się masy o $R_m^U > 50 \text{ N/cm}^2$ przeliczone na 1% spoiwa,
- II, do której zalicza się masy o R_m^U w przedziale 30–50 N/cm² przeliczone na 1% spoiwa,
- III, do której zalicza się masy o wartościach $R_m^U < 30 \text{ N/cm}^2$ przeliczone na 1% spoiwa.

Można również kierować się wytrzymałością na zginanie jako kryterium jakości spoiw zgodnie z zaproponowanym w publikacji [18] podziałem na:

- klasa I, w przypadku spoiw nadających masie największą wytrzymałość $R_g^U > 100 \text{ N/cm}^2$,
- klasa II, dla spoiw nadających masie wytrzymałość $R_g^U = 50\text{--}100 \text{ N/cm}^2$,
- klasa III, jeżeli spoiwo nadaje masie wytrzymałość $R_g^U < 50 \text{ N/cm}^2$.

Po przeliczeniu wytrzymałości według zawartości spoiwa w masie (1,5% cz. mas.) i uwzględnieniu gęstości pozornej wyniki zastosowania wskaźników $R_m^U/1\%$ i $R_g^U/1\%$ zaprezentowano na rysunkach 3 i 4.

Jak wynika z analiz rysunków 3 i 4 masy na osnowie piasku kwarcowego średniego z trzema gatunkami uwodnionego krzemianu sodu, jednocześnie dla obu kryteriów $R_m^U/1\%$ i $R_g^U/1\%$, można zaliczyć do I, najwyższej klasy jakości spoiw chemicznych. Warunkiem jest osiągnięcie na skutek procesu zagęszczenia gęstości pozornej powyżej 1,25 g/cm³. Stosując popularne kryterium $R_m^U/1\%$ spoiwa w masie, I klasa jakości możliwa jest do osiągnięcia powyżej 1,15 g/cm³ dla przypadku spoiwa o najmniejszej sile wiązania (gatunek 137). Dla porównania, wyniki przedstawione w pracy [7] dla masy na osnowie piasku grubego (0,315/0,40) zawierającej 3,5% spoiwa utwardzanego w technologii Floster-S umożliwiają zakwalifikowanie szkła wodnego do grupy najlepszych dopiero po osiągnięciu ρ_0 w przybliżeniu 1,70 g/cm³.

obtained after the process of moulding and hardening, plays a very important role in all the considered technologies of masses with water glass.

Nevertheless, as we know from [8,9,14,15,16], chemical, or even physico-chemical methods of hardening hydrated sodium silicate are less efficient than physical methods, which include microwave heating. Applying the criteria for the selection of an appropriate mass content to obtain the strength of the moulding and core sand required for the given cast, the organic and inorganic binders can be divided into three classes [17]:

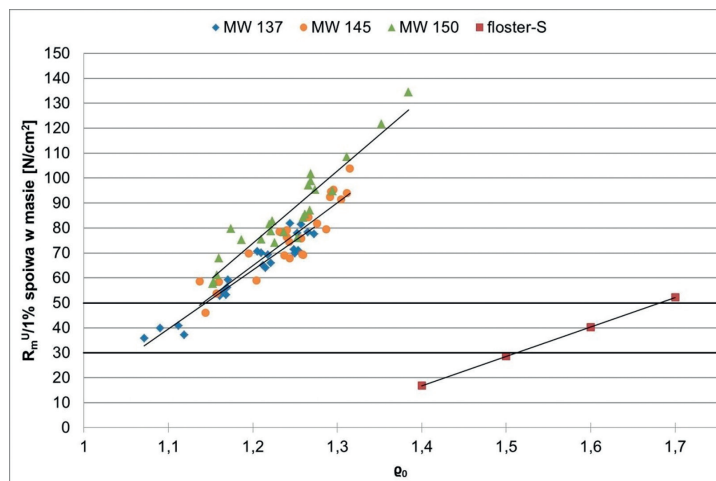
- I, the highest, including masses with $R_m^U > 50 \text{ N/cm}^2$ recalculated into 1% of binder,
- II, including masses with R_m^U in the range 30–50 N/cm² recalculated into 1% of binder,
- III, including masses with $R_m^U < 30 \text{ N/cm}^2$ recalculated into 1% of binder.

We can also consider the bending strength as a criterion of binder quality according to the division proposed in the publication [18]:

- class I, in the case of binders giving the mass the highest strength $R_g^U > 100 \text{ N/cm}^2$,
- class II, for binders giving the mass the strength $R_g^U = 50\text{--}100 \text{ N/cm}^2$,
- class III, if the binder gives the mass the strength $R_g^U < 50 \text{ N/cm}^2$.

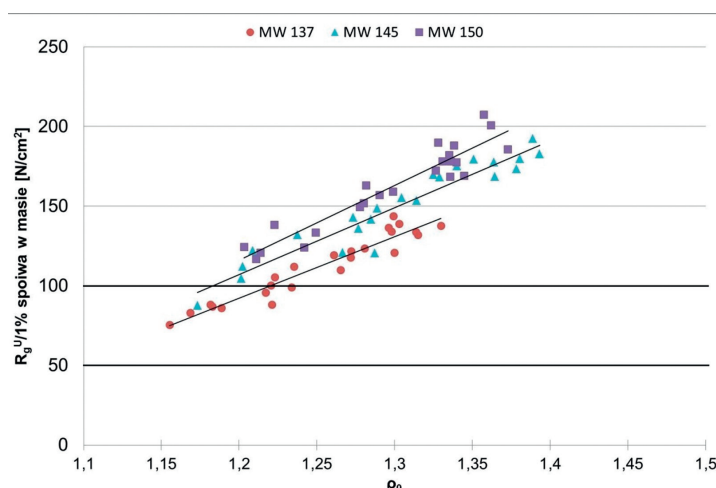
After the recalculation of the strengths according to the binder content in the mass (1.5% parts by weight) and the consideration of the apparent density, the results of applying the indexes $R_m^U/1\%$ and $R_g^U/1\%$ were included in Figures 3 and 4.

As can be inferred from the analyses of Figures 3 and 4, masses with a medium quartz sand matrix with three types of hydrated sodium silicate, simultaneously for both criteria, $R_m^U/1\%$ and $R_g^U/1\%$, can be included in class I, which includes chemical binders of the highest quality. The condition is to obtain the apparent density above 1.25 g/cm³ as a result of the densification process. When the popular criterion of $R_m^U/1\%$ binder in the mass is applied, it is possible to obtain the quality class I above 1.15 g/cm³ in the case of a binder with the lowest binding force (grade 137). In comparison, the results presented in the study [7] for the mass based on coarse sand (0.315/0.40) containing 3.5% of binder hardened in the Floster-S technology make it possible to classify water glass in the best group, only after reaching ρ_0 of approximately 1.70 g/cm³.



Rys. 3. Wykres z przedziałami wskaźników jakości mas według kryterium wytrzymałościowych R_m^U na 1% spoiwa w masach utwardzanych mikrofalami (MW) i w technologii Floster-S dla wyznaczonej w [7] względnej wytrzymałości na rozciąganie

Fig. 3. Diagram with scopes of mass quality indexes according to the strength criterion R_m^U per 1% of binder in masses hardened with microwaves (MW) and in the Floster-S technology, for the relative tensile strength determined in [7]



Rys. 4. Wykres z przedziałami wskaźników jakości mas według kryterium wytrzymałościowych R_g^U na 1% spoiwa w masach utwardzanych mikrofalami (MW)

Fig. 4. Diagram with scopes of mass quality indexes according to the strength criterion R_g^U per 1% of binder in masses hardened with microwaves (MW)

4. Wnioski

Analizując wyniki badań nad wpływem zagęszczenia mas formierskich ze spoiwami nieorganicznymi na osiągnięte po utwardzeniu mikrofalowym wytrzymałości, można stwierdzić, że:

1. Istnieją dobrze skorelowane zależności między uzyskiwaną po zaformowaniu i utwardzeniu gęstością pozorną mas a ich wytrzymałością na rozciąganie i zginanie.

4. Conclusions

After the analysis of the test results on the effect of the densification of moulding sands with inorganic binders on the strengths obtained after microwave hardening, we can conclude that:

1. There are well-correlated dependences between the apparent density of the masses obtained after moulding and hardening and their tensile and bending strength.

2. Wyniki badań wytrzymałości kwarcowych mas formierskich ze szkłem wodnym powinny być zawsze odnoszone do uzyskanego po procesie formowania zagęszczenia (gęstości pozornej), na co zwracają uwagę autorzy publikacji [1,2,4,5,7,13].
3. Zastosowanie aproksymacji liniowej we wszystkich analizowanych przypadkach w sposób wystarczający wyjaśnia zależność wytrzymałości od gęstości pozornej, bez względu na gatunek stosowanego spoiwa czy zastosowaną metodę jego utwardzania.
4. Bez względu na stosowany gatunek szkła wodnego i metodę utwardzania mas formierskich na osnowie kwarcowej obserwuje się jednakowy, bo 40% przyrost/spadek wytrzymałości na skutek zwiększania/zmniejszania gęstości pozornej mas o 0,10 g/cm³.
5. Zastosowanie nagrzewania mikrofalowego niemodyfikowanych spoiw gat. 137, 145 i 150 w ilości 1,5 cz. mas. w mieszaninie formierskiej umożliwiło wykonanie przekrojowych analiz, na podstawie których wskazano możliwości dla procesu optymalizacji wytwarzania form odlewniczych pod kątem właściwego doboru składników mieszanin formierskich, ograniczenia ryzyka występowania zjawisk towarzyszących erozji, jak również pracy niezbędnej do prawidłowego zaformowania i skutecznego wybicia.
6. Przeprowadzenie wyżej wymienionych analiz uwypukliło zalety mikrofalowej metody utwardzania spoiw nieorganicznych w ekologicznych masach formierskich i przybliżyło zastosowanie tego sposobu wytwarzania form i rdzeni odlewniczych w codziennej praktyce przemysłowej.
2. The test results of the strength of quartz moulding sands with water glass should be referred to the densification obtained after the moulding process (apparent density), which it pointed out by the authors [1,2,4,5,7,13].
3. The application of linear approximation in all the analyzed cases sufficiently explains the dependence of strength on apparent density, regardless of the type of the used binder or the method of its hardening.
4. Independently of the applied type of water glass and the hardening method of moulding sands with a quartz matrix, one can observe a similar, i.e. 40%, increase/decrease of the strength as a result of an increase/decrease of the apparent density of the masses by 0.10 g/cm³.
5. The use of microwave heating of non-modified binders grade 137, 145 and 150 in the amount of 1.5 parts by weight in the moulding mixture made it possible to perform comprehensive analyses which pointed to the possibilities of optimizing the production of casting moulds in respect of the proper selection of the moulding mixture components, the reduction of the risk of the occurrence of phenomena accompanying erosion as well as the labour necessary for the proper moulding and knocking out of the cast.
6. The above performed analyses emphasized the advantages of the microwave method of hardening inorganic binders in ecological moulding sands and demonstrated the use of this way of producing casting moulds and cores in every day industrial practice.

Podziękowania

Badania zostały wsparte finansowo przez Politechnikę Wrocławską z dotacji na działalność statutową nr 0402/0165/16.

Acknowledgements

The research has been financially supported by Wrocław University of Technology with grants for statutory activity No. 0402/0165/16.

Literatura/References

1. Zych J., J. Mocek. 2015. „Destruction of moulding sands with chemical binders caused by the thermal radiation of liquid metal”. *Archives of Foundry Engineering* 15 (4) : 95–100.
2. Mocek J., J. Zych, A. Chojecki. 2004. „Study of erosion phenomena in sand moulds poured with cast iron”. *International Journal of Cast Metals Research* 17 (1) : 47–50.
3. Mocek J. 2003. „Proces erozji form piaskowych ze spoiwem-szkłem wodnym”. *Archives of Foundry* 3 (10) : 23–30.
4. Zych J., J. Mocek. 2002. „Zjawisko erozji w formach wykonywanych z mas ze spoiwami chemicznymi”. *Archives of Foundry* 2 (3) : 155–162.
5. Jamrozowicz Ł., J. Zych, J. Kolczyk, D. Wróblewski. 2014. „Rola kształtu powierzchni formy w procesie wysychania wybranych powłok ochronnych”. *Archives of Foundry Engineering* 14 (spec. is. 2) : 39–44.

6. Liu F.C., Z.T. Fan, X. Liu, Y. Huang, P. Jiang. 2016. „Effect of surface coating strengthening on humidity resistance of sodium silicate bonded sand cured by microwave heating”. *Materials and Manufacturing Processes* 31 (12) : 1639–1642.
7. Zych J. 2005. „Rola zagęszczania w technologii formy opartej na masach ze szkłem wodnym i spoiwami organicznymi”. *Przegląd Odlewnictwa* 55 (2) : 88–97.
8. Granat K., D. Nowak, M. Pigiel, M. Stachowicz, R. Wikiera. 2009. „Determination of application possibilities of microwave heating in the curing process of water glass molding sands with fluid esters. Part 1”. *Archives of Foundry Engineering* 9 (1) : 45–50.
9. Granat K., D. Nowak, M. Pigiel, M. Stachowicz, R. Wikiera. 2009. „Determination of application possibilities of microwave heating in the curing process of water glass molding sands with fluid esters. Part 2”. *Archives of Foundry Engineering* 9 (1) : 51–56.
10. Wang H.F., J.J. Lu, K.F. Chen, H.L. Duan. 2015. „Harmless treatment of used foundry sands and dewatered municipal sludge by microwave”. *Metalurgija* 54 (3) : 459–461.
11. Stachowicz M. 2015. „Possibilities of waste binder reclamation using the example of moulding sands with water glass hardened by the conventional drying process”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 55 (2) : 29–41.
12. Stachowicz M., K. Granat, Ł. Pałyga. 2016. „The effect of wetting agent on the parameters of dry moulding silica sands bonded with sodium water glass”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 56 (1) : 43–55.
13. Stachowicz M. 2016. „Effect of sand base grade and density of moulding sands with sodium silicate on effectiveness of absorbing microwaves”. *Archives of Foundry Engineering* 16 (3) : 103–108.
14. Jelínek P. 2005. Rozwój spoiw nieorganicznych do dehydracyjnego utwardzania mikrofalowego. *VIII Konferencja Odlewnicza Technical 2005*.
15. Parappagoudar M.B., D.K. Pratihari, G.L. Datta. 2008. „Neural network-based approaches for forward and reverse mappings of sodium silicate-bonded, carbon dioxide gas hardened moulding sand system”. *Materials and Manufacturing Processes* 24 (1) : 59–67.
16. Huafang W., G. Wenbang, I. Jijun. 2014. „Improve the humidity resistance of sodium silicate sands by ester-microwave composite hardening”. *Metalurgija* 53 (4) : 455–458.
17. Lewandowski J.L. 1997. *Tworzywa na formy odlewnicze*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT.
18. Stachowicz M., K. Granat, D. Nowak. 2012. „Pomiar wytrzymałości na zginanie jako metoda oceny jakości spoiwa na przykładzie mas ze szkłem wodnym”. *Archives of Foundry Engineering* 12 (spec. is. 1) : 175–178.

