

Wpływ dodatku zwilżającego osnowę kwarcową na parametry suszonych mas formierskich ze szkłem wodnym sodowym

The effect of wetting agent on the parameters of dry moulding silica sands bonded with sodium water glass

Mateusz Stachowicz¹, Kazimierz Granat¹, Łukasz Pałyga¹

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

¹*Wroclaw University of Technology, Department of Foundry Engineering, Plastics and Automation, ul. Smoluchowskiego 25, 50-372 Wrocław, Poland*

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

Received: 20.10.2015. Accepted in revised form: 31.03.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/ioc.2016.05

Streszczenie

W pracy podjęto próbę określenia wpływu dodatku zwilżającego powierzchnię osnowy kwarcowej, wprowadzonego dla zwiększenia efektywności utwardzania, wybraną metodą fizyczną, ekologicznych mas ze szkłem wodnym sodowym. Ocenę wpływu zwilżania wodą osnowy kwarcowej, przed wprowadzeniem w procesie mieszania niemodyfikowanych, nieorganicznych spoiw, przeprowadzono na podstawie porównania parametrów wytrzymałościowych i technologicznych mas świeżo sporządzonych i utwardzonych suszeniem w temperaturze 100°C. W badaniach zastosowano piasek kwarcowy średni oraz trzy gatunki uwodnionego krzemianu sodu: 137, 140 i 145. Stwierdzono, że modyfikacja sposobu przygotowania osnowy kwarcowej poprzez wprowadzenie dodatku wody, przed dodaniem niewielkiej, 1,5 cz. mas. spoiwa, korzystnie wpływa na osiągnięte po utwardzeniu parametry wytrzymałościowe i technologiczne mas. Wyniki pomiarów skonfrontowano z obserwacjami połączeń ziaren osnowy kwarcowej, przeprowadzonymi za pomocą mikroskopu skaningowego. Uzupełniono je również zdjęciami i analizą składu chemicznego powierzchni ziaren kwarcu. Na podstawie kompleksowej oceny, utwardzonych suszeniem klasycznym mas formierskich, stwierdzono pozytywny wpływ obecności dodatku zwilżającego w masach, którego najkorzystniejsza ilość powinna być dobierana w zależności od gatunku użytego spoiwa.

Słowa kluczowe: odlewnictwo, suszenie, masa formierska, szkło wodne, wytrzymałość, zwilżalność

Abstract

An attempt has been made to determine the effect of the addition of an agent wetting the surface of silica sand grains, introduced in order to increase the hardening efficiency of selected physical methods applied to the ecological foundry sands bonded with sodium water glass. The effect of water used as a wetting agent of the silica sand grains, added during the mixing process prior to the introduction of unmodified inorganic binders, was evaluated by comparing the mechanical and technological parameters of green sands and sands hardened by drying at 100°C. Tests and studies were carried out on silica sand of medium grain size and on three grades of hydrated sodium silicate, i.e. 137, 140 and 145. It has been found that modification of the method of the base sand processing by adding water prior to the addition of a small amount (1.5 parts by weight) of binder has a beneficial effect on the technological and mechanical parameters of moulding sands obtained after the hardening process. The results of measurements were confronted with the SEM studies of bonds formed between the grains of silica sand. The studies were completed with photographs and chemical analysis of the surface of silica sand grains. Based on a comprehensive evaluation of moulding sands hardened by the conventional drying process, the beneficial effect of a wetting agent, added to the sand mixture in an amount optimum for a given type of binder, has been confirmed.

Keywords: foundry industry, drying, moulding sand, water glass, strength, wettability

1. Wprowadzenie

W każdej masie formierskiej i rdzeniowej, warunkiem uzyskania dobrych, równomiernych w całej objętości właściwości wytrzymałościowych po procesie utwardzania jest odpowiednie rozprowadzenie spoiwa po powierzchni osnowy w taki sposób, aby umożliwić mu najkorzystniejsze warunki do jego ściekania [1] do stref, w których dochodzi do tworzenia się mostków wiążących. Masy ze szkłem wodnym nie są wyjątkiem i stanowią bardzo dobry materiał do badań nad tym zagadnieniem. Analizy wyników dotychczasowych badań mas z niemodyfikowanym szkłem wodnym o dużym module molowym w zakresie od 3,2 do 3,4 sporządzonych na osnowie piasku kwarcowego [2,3] wykazały, że wpływ na osiągnięte parametry wytrzymałościowe po utwardzeniu metodami fizycznymi ma wprowadzana na etapie mieszania, przed dodaniem spoiwa, zawartość dodatku zwilżającego powierzchnię SiO_2 [4]. W przytoczonych badaniach zastosowano dodatek wody, który przygotowuje powierzchnie ziaren osnowy kwarcowej w taki sposób, że ułatwia spoiwu o małej zawartości tlenków (Na_2O i SiO_2) napływanie w strefy koncentracji i powstawanie wysokiej jakości mostków wiążących, kwalifikujących szkło wodne 137 do pierwszej, najwyższej klasy spoiw [3,5]. Zagadnienie to wymaga jednak dalszych badań, ponieważ dotychczas opisane rezultaty wpływu dodatku zwilżającego na jakość mas dotyczą tylko jednego, wspomnianego powyżej gatunku spoiwa.

Aspekt odpowiedniego przygotowania ziaren osnowy kwarcowej nabiera szczególnego znaczenia w przypadku bardzo małych zawartości szkła wodnego, które ze względu na skuteczność fizycznych metod utwardzania [6] mogą wynosić nie więcej niż 1,5 cz. mas. na 100 cz. mas. masy formierskiej. W przypadku gatunków spoiwa, w których na proces jego ściekania po powierzchni ziarna, oprócz lepkości oraz wielu innych czynników, do których można zaliczyć między innymi: temperaturę spoiwa i osnowy [7], jak również morfologię jej powierzchni [8], ma wpływ sposób mieszania i kolejność wprowadzania ciekłych składników masy oraz związany ze zmianą struktury gatunek szkła wodnego [1,9]. Jak wynika z innych obserwacji, znaczenie dla wytrzymałości mostków wiążących ma także metoda utwardzania spoiwa. Jak zauważono [10], najlepsze efekty zapewnia zastosowanie fizycznych metod: suszenie klasyczne i nagrzewanie mikrofalowe. Obie fizyczne metody utwardzania są obecnie przedmiotami szczegółowych badań ze względu na możliwość ograniczenia zużycia spoiwa, a także na gwarancję lepszej, w przeciwieństwie do sposobów chemicznych, wybijałości. Ponadto obie metody umożliwiają prowadzenie procesów odświeżania mas ze szkłem wodnym [11,12], które dają możliwość ograniczenia zużycia świeżych składników. Jednak, aby te ekologiczne i uzasadnione ekonomicznie technologie utwardzania

1. Introduction

In each foundry sand used for the manufacture of moulds and/or cores, the condition indispensable for obtaining high and uniform strength properties within the entire sand volume after hardening is proper distribution of binder on the surface of the sand grains, i.e. the distribution that will create optimal conditions for an unrestrained access of binder [1] to the areas where bonding bridges are formed. Foundry sands with water glass are no exception, and as such are generally considered a very good example for studies of this issue. Careful examinations of the results of previous research, conducted on foundry mixtures based on silica sand with the unmodified water glass characterized by a high molar modulus comprised in the range of 3.2 to 3.4 [2,3], have shown that the performance strength of a sand mixture after hardening by physical methods depends on the content of an agent wetting the surface of SiO_2 , introduced during the sand mixing process still before the binder is added [4]. In the above mentioned research, it was the addition of water which was used as an agent modifying the surface of silica sand grains in such a way as to create for the binder with a low oxide content (Na_2O and SiO_2) the conditions proper for an unrestrained migration to the concentration areas and formation of high-quality bonding bridges, thus making the water glass of grade 137 an excellent binder with first-class properties [3,5]. Interesting as it is, this issue requires further studies because the results obtained so far, showing the effect of the addition of a wetting agent on the quality of moulding sands, cover only one binder grade.

Proper preparation of silica sand grains is of particular importance in the case of a very low content of water glass which, because of the effectiveness of natural methods of hardening [6], should not exceed 1.5 parts by weight per 100 parts by weight of moulding sand. This is particularly true in the case of these binder grades, in which the easy flow of binder on the sand grain surface depends not only on the viscosity and many other factors, like the temperature of both the binder and the base sand [7], and surface morphology of the base sand grains [8], but also on the technique of mixing the sand, on the sequence of introducing the liquid sand components, and on the water glass grade, which shapes the differences in the type of structure [1,9]. As is apparent from other observations, important for the strength of the bonding bridges is also the method by which the foundry binder is hardened. As shown in [10], the best results are obtained when physical methods, such as ordinary drying and microwave heating, are applied. Both physical methods of hardening are now the subject of detailed studies, mainly as regards the possibility of minimizing the consumption of binder and obtaining better knocking out properties than the properties provided by chemical methods. Moreover, both physical methods

mogły znaleźć szerokie zastosowanie w praktyce, niezbędne jest bardziej szczegółowe poznanie procesu tworzenia się mostków wiążących z rozproszanego po powierzchni kwarcowej spoiwa.

Z danych literaturowych wynika, że woda, obecna na aktywnej powierzchniowo strukturze krystalicznej osnowy kwarcowej [13], może wnikać w mikropory ziaren piasku, a ponadto może powodować tworzenie się powierzchniowych warstw: adsorpcyjnej i absorpcyjnej, w których będzie ona związana z materiałem ziarna za pomocą grup hydroksylowych (-OH). Dobra zwilżalność osnowy i mała lepkość spoiwa zwiększają prawdopodobieństwo powstawania połączeń nieotoczkowych [7] pomiędzy osnową a materiałem wiążącym, nadających masie większą wytrzymałość w porównaniu z połączeniami otoczkowymi. Nieznany natomiast jest wpływ wprowadzania, do układu osnowa-spoivo o małym module molowym, dodatkowej ilości wody przygotowującej osnowę kwarcową na wprowadzenie szkła wodnego sodowego, w aspekcie stosowania fizycznej metody utwardzania – powolnego suszenia klasycznego. Spodziewanym efektem wprowadzenia, na etapie mieszania, dodatkowej ilości wody przed wprowadzeniem spoiwa, może być, dzięki ułatwieniu płynięcia w kierunku miejsc powstawania mostków wiązań, poprawa parametrów wytrzymałościowych mas na skutek zwiększenia powierzchni adhezyjnej spoiw. Konsekwencją ułatwionego napływania może być także większy stopień koncentracji szkła wodnego na styku ziaren osnowy kwarcowej, wpływający na zwiększenie objętości mostków wiążących, a tym samym korzystna poprawa wytrzymałości kohezyjnej spoiw po procesie suszenia.

Pełna znajomość czynników i zjawisk, decydujących o uzyskiwanych na skutek utwardzenia parametrach wytrzymałościowych i technologicznych, ułatwi zrozumienie i wdrożenie ekologicznych sposobów utwardzania mas formierskich ze szkłem wodnym.

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 z kopalni Grudzeń Las oraz niemodyfikowane gatunki szkła wodnego sodowego: 137, 140 i 145, wyprodukowane w Zakładach Chemicznych „Rudniki” SA (tabela 1). We wstępowej mieszarce laboratoryjnej sporządzano po 6 kg masy formierskiej w następujących proporcjach:

- wariant „V0%”: na 100 cz. mas. mieszaniny formierskiej dozowano do osnowy, po uruchomieniu mieszarki, 1,5 cz. mas. spoiwa i mieszano przez 4 minuty;

allow for rebonding of the sand mixture with water glass [11, 12], with some positive consequences, including the reduced level of the consumption of fresh components. However, to make these ecologically and economically viable hardening technologies widely applied in practice, it is necessary to know more details about the process of the formation of bonding bridges in binders flowing on the surface of the silica sand grains.

The literature data suggest that water present in the surface-active crystalline structure of the silica sand [13] can penetrate into the micro-pores of the sand grains and initiate the formation of the adsorption and absorption surface layers, in which this water will be bound by hydroxyl groups (-OH) to the sand grain material. Good wettability of the sand grains and low viscosity of the binder increase the probability of the formation of non-encapsulated bonds [7] between the base sand grains and the binding material, conferring to the sand mixture a greater strength than the strength the encapsulated bonds can provide. What remains unknown is the consequence of incorporating into the sand-binder system with a low molar modulus an additional amount of water to prepare the silica sand grains for the introduction of sodium water glass when the physical method of hardening, like an ordinary slow drying, is applied. The expected result of introducing, at the stage of the moulding sand mixing process, the additional amount of water prior to the introduction of binder might be an easy flow of binder in the direction of bonding bridges, resulting in improved mechanical properties of the sand mixture due to larger adhesive surface of binder. Another consequence of the easier flow of binder would be a higher degree of water glass concentration at the interface between the silica sand grains, increasing the volume of bonding bridges, and thus bringing a beneficial improvement to the cohesive strength of binders after the drying process.

Full knowledge of the factors and phenomena that determine the mechanical and technological parameters obtained as a result of the sand hardening process is expected to facilitate the understanding and implementation of ecological ways of hardening the foundry moulding sands with water glass.

2. Methodology and results

The test moulding sands used in this study were based on dry, cooled, medium-grain size 1K silica sand with the main fraction of 0.20 / 0.315 / 0.16 supplied by the Grudzeń Las mine, mixed with the unmodified sodium water glass of grades 137, 140 and 145 produced by the “Rudniki” Chemical Plant SA (Table 1). In a laboratory ribbon-type mixer, moulding sands were prepared in 6 kg batches in the following ratios:

- variant “V0%”: 1.5 parts by weight of binder were added to 100 parts by weight of sand and, after the

- wariant „V0.5%”: na 100 cz. mas. mieszaniny formierskiej dozowano do osnowy 0,5 cz. mas. wody, następnie po 60 sekundach od rozpoczęcia procesu mieszania wprowadzano 1,5 cz. mas. spoiwa i mieszano przez 4 minuty;
- wariant „V1%”: na 100 cz. mas. mieszaniny formierskiej dozowano do osnowy 1 cz. mas. wody, następnie po 60 sekundach od rozpoczęcia procesu mieszania dodawano 1,5 cz. mas. spoiwa i mieszano przez 4 minuty.

W procesie zagęszczania wibracyjnego próbek do badań na aparacie LUZ-2e stosowano stałą amplitudę drgań wynoszącą 60% z 2 mm, częstotliwość 50 Hz oraz czas trwania procesu 120 sekund. Zaformowane próbki cylindryczne, podłużne i ósemkowe były następnie poddawane procesowi utwardzania klasycznego. Ich suszenie odbywało się w komorze suszarki laboratoryjnej SL 53 TOP+ o pojemności 56 litrów, wyposażonej w wentylator wymuszający obieg nagrzanego do $100 \pm 0,1^\circ\text{C}$ powietrza. W trakcie procesu suszenia trwającego 30 minut zastosowano rozszczelniony komin wentylacyjny w celu ewakuacji wilgoci z komory suszarniczej. Przyjęty czas, w każdym z trzech wariantów suszenia, gwarantował stabilizację masy próbek.

Pomiary wytrzymałości przeprowadzano na laboratoryjnym urządzeniu do badania mas formierskich LRuE-2e, natomiast przepuszczalność oznaczano na aparacie LPiR. Odporność na ścieranie określano za pomocą urządzenia skonstruowanego na podstawie pomysłu E. Janickiego, poddając próbki masy działaniu 1,77 kg śrutu metalowego.

start of the mixing process, the whole was mixed for 4 minutes;

- variant “V0.5%”: 0.5 part by weight of water was added to 100 parts by weight of base sand, and after 60 seconds since the start of the mixing process, 1.5 parts by weight of binder were introduced, and the whole was mixed for 4 minutes;
- variant “V1%”: 1.0 part by weight of water was added to 100 parts by weight of sand, and after 60 seconds since the start of the mixing process, 1.5 parts by weight of binder were introduced, and the whole was mixed for 4 minutes.

The process of vibratory compacting of test samples was carried out in an LUZ-2e apparatus with constant amplitude of vibration (60% of the value 2 mm), frequency at 50 Hz and process time of 120 seconds. Cylindrical, oblong and eight-shaped samples were moulded and then hardened by a conventional process. They were next dried in a 56 litre capacity chamber of the SL 53 TOP+ laboratory drier, equipped with a fan forcing the thermocirculation of air preheated to $100 \pm 0.1^\circ\text{C}$. During the drying process lasting 30 minutes, a depressurized ventilation chimney was used for evacuation of moisture from the drying chamber. The time adopted in each of the three variants of drying ensured stabilization of the sample weight.

Strength measurements were performed in a laboratory apparatus for testing of moulding sands, model LRuE-2e, while permeability was measured in an LPiR apparatus. The abrasion resistance was determined in a test device designed by E. Janicki, subjecting the samples of moulding sand to the effect of metal shot applied in an amount of 1.77 kg.

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne gatunków szkła wodnego stosowanego do sporządzania mas
Table 1. Physical and chemical properties of water glass used in the preparation of moulding sand mixtures

Gatunek szkła wodnego sodowego / Grade of sodium water glass	Wymagany moduł molowy ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) / Expected molar modulus ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)	Zmierzony moduł molowy ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) / Measured molar modulus ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)	Zawartość tlenków ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$) min. % / Expected oxide content ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$), min %	Zmierzona zawartość tlenków ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$), % / Measured oxide content ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$), %	Gęstość (20°C), g/cm^3 / Expected density (20°C), g/cm^3	Zmierzona gęstość (20°C), g/cm^3 / Measured density (20°C), g/cm^3	Lepkość dynamiczna min. (P) / Absolute viscosity min (P)
137	3,2–3,4	3,4	35,0	36,3	1,37–1,40	1,37	1
140	2,9–3,1	3,0	36,0	39,4	1,40–1,43	1,42	1
145	2,4–2,6	2,5	39,0	41,5	1,45–1,48	1,47	1

W trakcie badań stabilizowano temperaturę spoiwa oraz osnowy wynoszącą $20 \pm 1^\circ\text{C}$ w komorze klimatycznej KK115+. W zamkniętym, mechanicznie wentylowanym pomieszczeniu laboratoryjnym na wysokości 1,5 m panowała temperatura równa $23 \pm 1^\circ\text{C}$ oraz wilgotność $55 \pm 5\%$.

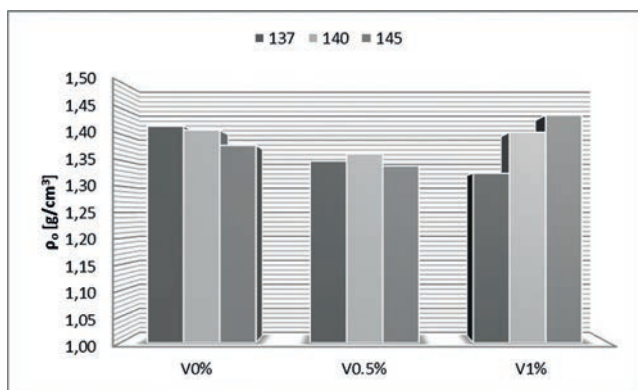
During tests, the temperature of the sand and binder was stabilized at $20 \pm 1^\circ\text{C}$ in a KK115+ climatic chamber. In a closed, mechanically ventilated laboratory room at a height of 1.5 metres, the temperature was equal to $23 \pm 1^\circ\text{C}$ and a relative humidity was $55 \pm 5\%$.

Wyniki badań nad wpływem dodatku wody, wprowadzanego w początkowej fazie procesu mieszania składników, na właściwości mas z różnymi gatunkami szkła wodnego zaprezentowano na rysunkach od 1 do 5. Pierwszą analizowaną wielkością była gęstość pozorną wyrażoną stosunkiem masy próbek cylindrycznych po utwardzeniu do ich objętości (rys. 1) oraz związana z tym parametrem przepuszczalność przedstawiona na rysunku 2.

W dalszych badaniach nad wskaźnikami jakości mostków wiążących mas ze szkłem wodnym gat. 137, 140 i 145 utwardzanych w procesie suszenia klasycznego, określono ich parametry wytrzymałościowe: na rozciąganie R_m^U (rys. 3), zginanie R_g^U (rys. 4) oraz odporność na ścieranie (rys. 5). Dane na wykresach stanowią średnią arytmetyczną z trzech oznaczeń dla próbek podłużnych i cylindrycznych oraz średnią arytmetyczną z sześciu oznaczeń, w przypadku próbek osemkowych.

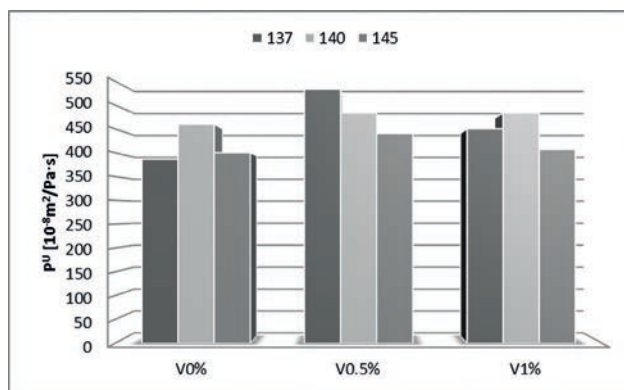
The results of the research on the effect of water addition introduced in the initial stage of the mixing process on the properties of moulding sands with different types of water glass binder are presented in Figures 1 to 5. The first examined parameter was apparent density expressed by the weight-to-volume ratio of the cylindrical test samples after hardening (Fig. 1); the next parameter was permeability shown in Figure 2, closely related to the apparent density.

In further studies of the quality of bonding bridges formed in moulding sands with the water glass of grades 137, 140 and 145, hardened in a conventional drying process, the strength parameters, such as the tensile strength R_m^U (Fig. 3), bending strength R_g^U (Fig. 4) and abrasion resistance (Fig. 5) were determined. The data in the charts represents the arithmetic mean of three measurements taken on the samples oblong and cylindrical, and the arithmetic mean of six measurements taken on the eight-shaped samples.



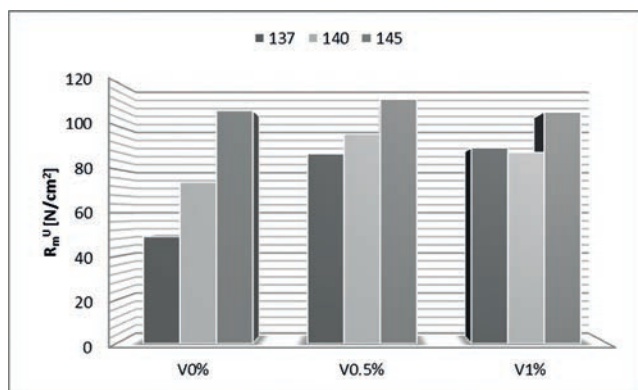
Rys. 1. Wykres średniej gęstości pozornej zmierzonej na utwardzonych próbkach cylindrycznych

Fig. 1. Diagram of average apparent density measured on hardened cylindrical samples



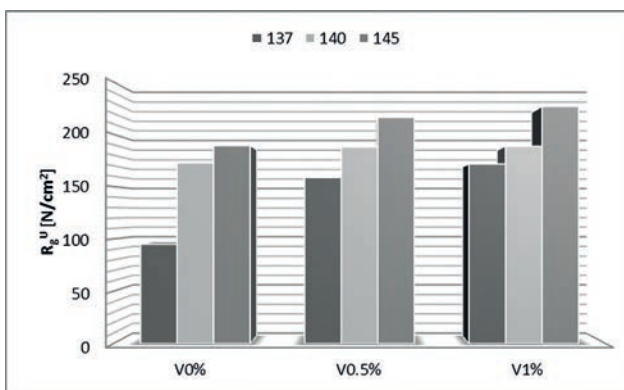
Rys. 2. Wpływ gatunku spoiwa i ilości wody dodanej w procesie mieszania mas na przepuszczalność po procesie suszenia klasycznego

Fig. 2. The effect of binder grade and amount of water added during mixing process on the sand permeability after conventional drying



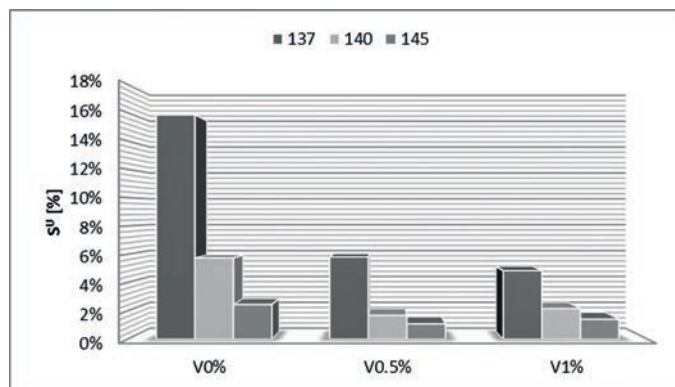
Rys. 3. Wpływ gatunku spoiwa i ilości wody wprowadzanej w procesie mieszania masy na wytrzymałość na rozciąganie po procesie suszenia klasycznego

Fig. 3. The effect of binder grade and amount of water added to the sand during mixing process on the tensile strength after conventional drying



Rys. 4. Wpływ gatunku spoiwa i ilości wody wprowadzanej w procesie mieszania masy na wytrzymałość na zginanie po procesie suszenia klasycznego

Fig. 4. The effect of binder grade and amount of water added to the sand during mixing process on the bending strength after conventional drying



Rys. 5. Wpływ gatunku spoiwa i ilości wody wprowadzanej w procesie mieszania masy na ścieralność po procesie suszenia klasycznego

Fig. 5. The effect of binder grade and amount of water added to the sand during mixing process on the abrasion resistance after conventional drying

3. Dyskusja wyników

Z analizy wyników badań dotyczących wpływu dodatku zwilżającego (rys. 1) można stwierdzić, że wraz z wprowadzeniem w procesie mieszania wody w ilości 0,5 cz. mas. lub 1,0 cz. mas., dodawanej przed spoiwem, zmieniała się również gęstość pozorna mas po procesie ich zagęszczania i suszenia. Dla wariantu „V0.5%” stwierdzono kilkuprocentowe jej zmniejszenie we wszystkich badanych masach, co także znajduje odzwierciedlenie w dostrzegalnej poprawie przepuszczalności badanych mas (rys. 2). Wprowadzenie większego dodatku wody do osnowy w wariantcie „V1%”, za wyjątkiem masy ze spoiwem 137, spowodowało powrót do gęstości obserwowanej dla wariantu „V0%”. Zmiana ta była również widoczna w mniejszej przepuszczalności mas (ze spoiwami: 140 i 145). Analizując wykres przepuszczalności mas (rys. 2), należy zaznaczyć, że we wszystkich trzech wariantach była ona zadowalająca i mieściła się w przedziale $400\text{--}500 \cdot 10^{-8} \cdot \text{m}^2/\text{Pa} \cdot \text{s}$. Podczas analizy parametrów: gęstości pozornej i przepuszczalności należy brać pod uwagę, oprócz wpływu dodatku zwilżającego zmieniającego reologię badanych mas, również zmieniającą się wartość sumy tlenków (SiO_2 i Na_2O) użytych spoiw. Wraz z malejącym modulem molowym (tab. 1) ich ilość zwiększała się w utwardzanych suszeniem masach. Większa ilość tlenków (SiO_2 i Na_2O) przekłada się na zmiany w osiągniętych parametrach wytrzymałościowych, ale może wpływać również, tak jak to ma miejsce w obserwowanych masach, na malejącą przepuszczalność, co najlepiej można zaobserwować na rysunku 2 w wartościach dla wariantu „V0.5%”. Jak zauważono w pracy [8], mała gęstość pozorna w masach ze spoiwami nie ma tak dużego znaczenia dla osiągniętej wytrzymałości, w przeciwieństwie do mas formierskich z lepiszczem bentonitowym. Natomiast obserwowane zmniejszanie się gęstości pozornej masy pod warunkiem zachowa-

3. Discussion of results

Detailed analysis of the test results concerning the effect of the addition of a wetting agent (Fig. 1) leads to the conclusion that water added in an amount of 0.5 part by weight or 1.0 part by weight during mixing before introducing the addition of binder changes the apparent density of moulding sands after the process of their compaction and drying. For variant “V0.5%”, a few percent decrease in the apparent density was observed in all the tested moulding sands, which was further reflected in a visible improvement of the tested sand permeability (Fig. 2). More water added to the base sand in variant “V1%” restored the value of the apparent density to the level observed for variant “V0%”. The only exception was the sand bonded with binder 137. This change was also reflected in a lower permeability of sands with binders 140 and 145. Analyzing the plotted permeability values for moulding sands (Fig. 2), it is interesting to note that in all three variants, satisfactory values comprised in the range of $400\text{--}500 \cdot 10^{-8} \text{m}^2/\text{Pa} \cdot \text{s}$ were obtained. In the analysis of parameters such as the apparent density and permeability, besides the effect of a wetting agent changing the rheology of the tested moulding sands, one should also take into account changes in the sum of oxides (SiO_2 and Na_2O) in the binders currently used. With the decreasing molar modulus (Table 1), the content of oxides is growing in the sands hardened by drying. Larger amount of oxides (SiO_2 and Na_2O) is directly responsible for changes in the obtainable strength parameters but, as it happens in the tested moulding sands, another consequence is the decreasing permeability, best reflected in Figure 2 in the values obtained for variant “V0.5%”. As observed in [8], low apparent density of moulding sands with water glass binders is not as critical for the achievable strength, as it is in the case of moulding sands prepared with the bentonite clay binder. On the other hand, the observed

nia parametrów wytrzymałościowych po utwardzeniu (rys. 3 i 4) będzie powodowało ograniczenie zużycia składników: surowców naturalnych i spoiw. Zatem, biorąc pod uwagę dwa parametry technologiczne jednocześnie: gęstość pozorną i przepuszczalność, można wariant „V0.5%” sporządzania mas uznać za najkorzystniejszy.

Analizując wyniki badań wpływu dodatku zwilżającego wody, wprowadzanego w procesie mieszania przed wybranymi spoiwami nieorganicznymi, stwierdzono wyraźny wpływ zwilżenia piasku kwarcowego we wszystkich badanych masach na uzyskiwane po utwardzeniu parametry wytrzymałościowe (rys. 3 i 4). Wprowadzenie do układu osnowa–spoiwo dodatku wody (warianty: V0.5% i V1%) powodowało w masach ze szkłem wodnym 137 stopniową poprawę wskaźników wytrzymałościowych. W przypadku spoiw: 140 i 145 znaczącą poprawę wytrzymałości na rozciąganie i zginanie obserwuje się tylko dla wariantu „V0.5%”. Zwiększenie zawartości dodatku zwilżającego o kolejne 0,5 cz. mas. nie spowodowało zwiększenia wytrzymałości R_g^U (rys. 4), a w przypadku wytrzymałości R_m^U niewielki jej spadek (rys. 3). Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie po utwardzaniu (rys. 3) mas ze spoiwami: 140 i 145, osiągnięta w wariantcie „V0.5%” znajduje potwierdzenie również w próbie technologicznej odporności na ścieranie (rys. 5). Mieszanki formierskie z tymi spoiwami osiągały w przypadku dozowania 0,5 cz. mas. wody najkorzystniejszą odporność na działanie opadającego ścierniwa wynoszącą nie więcej niż: 2% (spoiwo 140) i 1% (spoiwo 145) ubytku masy. Przy okazji zachowano największą przepuszczalność (rys. 2), mimo małej gęstości pozornej (rys. 1). Należy zatem przypuszczać, że w pobliżu zawartości 0,5 cz. mas. wody wprowadzanej przed spoiwami 140 i 145 występują najkorzystniejsze parametry charakteryzujące wysoką jakość w ten sposób sporządzonych mas. Wyjątek stanowią masy ze spoiwem 137, w których zwiększanie zawartości wody z 0,5 cz. mas. do 1,0 cz. mas. przed dodaniem spoiwa nie przyniosło w przypadku parametru ścieralności znaczącej poprawy. Należy jednak zauważyć, że we wszystkich badanych parametrach [1,2], na tle mas ze spoiwami 140 i 145, stwierdzono, wraz ze zwiększaniem się dodatku zwilżającego, największą dynamikę zmian w osiąganych parametrach wytrzymałości oraz ścieralności. Można zatem przypuszczać, że wraz z malejącym modulem molowym spoiw, dodatek zwilżający wody odgrywa coraz mniejsze znaczenie dla dynamiki zmian w osiąganych parametrach wytrzymałości wysuszonych mas.

Należy również zauważyć, że w przypadku dozowania wody w procesie mieszania, w ilości odpowiadającej wariantowi „V1%”, a następnie szkła wodnego gat. 140 lub 145 może dochodzić, w tych sposobach przygotowania powierzchni osnowy kwarcowej, do nadmiernego rozptywania się spoiwa na skutek jego rozcieńczenia. Taki proces może (mimo większej gęstości pozornej masy) mieć negatywny wpływ na spodziewany wzrost

decrease in the apparent density of the sand mixture, if not deteriorating the mechanical properties after hardening (Figs. 3 and 4), should allow for the reduced consumption of components, such as raw materials and binders. Therefore, in terms of the two technological parameters considered simultaneously, i.e. the apparent density and permeability, variant “V0.5%” of the moulding sand preparation seems to be the optimum one.

Studies of the effect of water addition introduced as a wetting agent during the mixing process before introducing the addition of selected inorganic binders show a pronounced effect that wetting of the silica sand grains has on the strength values obtained after hardening in all the examined moulding sand mixtures (Figs. 3 and 4). Introducing to the sand-binder system the addition of water (variants: V0.5% and V1%) has resulted in a gradual improvement of strength parameters in the sand mixtures with water glass 137. In the case of binders 140 and 145, a significant improvement in the tensile strength and bending strength was observed only in variant “V0.5%”. Increasing the content of the wetting agent by further 0.5 part by weight did not increase the bending strength R_g^U (Fig. 4), and resulted in a slight decrease of the tensile strength R_m^U (Fig. 3). The maximum tensile strength of the hardened (Fig. 3) sand mixtures with binders 140 and 145 achieved in variant “V0.5%” was confirmed by the results of the technological test of abrasion resistance (Fig. 5). Moulding sands with those binders, additionally wetted with 0.5 part by weight of water, have reached the highest resistance to the impact of the abrasive agent reflected in a weight loss of no more than 2% (binder 140) and 1% (binder 145). At the same time, despite low apparent density (Fig. 1), the highest permeability was preserved (Fig. 2). Hence it follows that the best parameters giving high quality moulding sands were achieved with the water content of approximately 0.5 part by weight, introduced before introducing binders 140 and 145. The only exception was the moulding sand with binder 137, where the increase in water content from 0.5 part by weight to 1.0 part by weight, introduced before introducing the addition of binder, did not result in a significant improvement of the abrasion resistance. However, it is worth noting that, in the case of moulding sands with binders 140 and 145, among all the parameters studied [1,2], it was the strength and abrasion resistance which have been found to undergo the most dynamic changes with the increasing addition of the wetting agent. It can therefore be assumed that with the decreasing molar modulus of binders, the role of the wetting agent, i.e. water, is gradually becoming less important in the dynamics of changes in the obtained strength of dry sand mixtures.

Another fact also deserves some attention, namely that when water is added during mixing in an amount equivalent to variant “V1%”, and the next addition is water glass of grade 140 or 145, on the surface of the silica sand grains prepared by this method, a very rapid spreading of binder may take place due to its excessive dilution. Then,

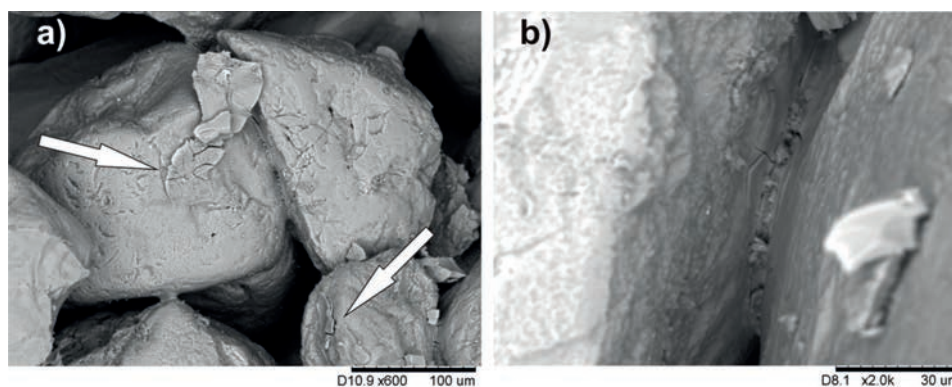
wytrzymałości, zależnej w wariantach: „V0%” i „V0.5%” od coraz większej zawartości tlenków SiO_2 i Na_2O .

W takiej sytuacji rozcieńczanie spoiwa wodą, ponad zawartość, dla której występuje opisane w [13] zjawisko powstawania powierzchniowych warstw: adsorpcyjnej i absorpcyjnej (w których będzie ona związana z materiałem ziarna za pomocą grup hydroksylowych (-OH)), może skutkować zmianami w sposobie ich koncentracji, tworząc bardziej równomiernie rozproszoną błonkę na całej powierzchni osnowy kwarcowej. Dzięki temu w procesie zagęszczania masy możliwe jest osiągnięcie większej gęstości pozornej (wzrost stopnia zagęszczenia), ale zjawisko to powoduje powstawanie rozległych obszarów z bardzo równomiernym zaleganiem spoiwa jednocześnie „odchudzających” z budulca mostki wiązań, co może tłumaczyć spadek wytrzymałości i odporności na ścieranie mas sporządzonych w wariantach „V1%”.

W celu wyjaśnienia obserwowanych zmian parametrów jakościowych mas, w zależności od ilości dodatku zwilżającego, badania uzupełniono o obserwacje na mikroskopie skaningowym HITACHI TM-3000 mostków wiążących oraz o pomiary zawartości sodu będącego składnikiem spoiwa. Określenie miejsc występowania związków sodu, np.: Na_2O , może być cennym wskaźnikiem jakości informującym o sposobie napływania spoiwa do mostków wiążących oraz o skuteczności równomiernego jego rozproszania po powierzchni osnowy kwarcowej. Poniżej, na [rysunku 6](#) przedstawiono widok masy po procesie suszenia klasycznego.

despite the high apparent density of the sand mixture, the aforementioned effect may have a negative impact on the expected increase in the sand strength, dependent in variants “V0%” and “V0.5%” on the increasing content of SiO_2 and Na_2O . If this is the case, then diluting the binders with water to the degree that may provoke the occurrence of the effect described in [13], i.e. the formation of adsorption and absorption surface layers in which water is bound by hydroxyl groups (-OH) to the silica sand grains, can change the concentration of these layers, resulting in the formation of a film distributed in an even more uniform manner on the entire surface of the silica sand grains. Owing to this, the sand compaction will produce a high apparent density (an increase in the degree of compaction), but the consequence will be the formation of vast areas with a uniform distribution of the accumulated binder, and at the same time the cut off access of building material to the bonding bridges, which can explain the decline in strength and abrasion resistance observed in the sand mixtures made according to variant “V1%”.

To better explain the observed changes in the quality parameters of moulding sands, depending on the amount of the wetting agent, the performed tests were supplemented with the examinations of bonding bridges carried out under a HITACHI TM-3000 scanning electron microscope and measurements of sodium content in the binder. The location of places where sodium compounds occur (e.g. Na_2O) can serve as a valuable quality indicator, showing how the binder spreads and gets access to the bonding bridges and how effective is its uniform distribution on the surface of the silica sand grains. [Figure 6](#) below shows moulding sand after the conventional drying process.



Rys. 6. Stan utwardzonej masy formierskiej ze spoiwem gatunku 140 o budowie typowej dla procesu suszenia klasycznego: a) z widocznymi miejscami koncentracji spoiwa; b) mostkiem wiążącym

Fig. 6. View of the hardened moulding sand with binder 140 characterized by the structure typical of conventional drying process; visible are: a) places of binder concentration, and b) bonding bridge

Jak można zauważyć na zdjęciach SEM, mostki wiążące ziarna osnowy kwarcowej mają rozległą budowę u podstaw, co przekłada się na bardzo korzystne parametry wytrzymałościowe w stosunku do ilości

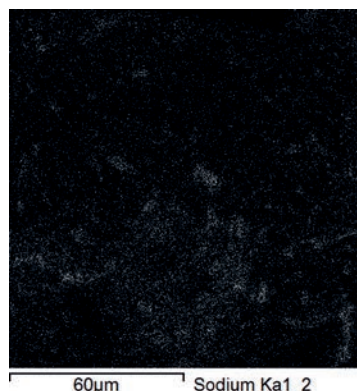
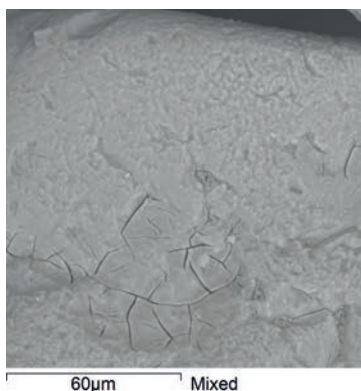
As can be seen from the SEM photographs, bridges bonding the silica sand grains are characterized by a well developed structure at the base, resulting in very favourable strength properties in relation to the amount

spoiwa (1,5 cz. mas.). Można jednak zaobserwować, że po procesie suszenia klasycznego powierzchnia zewnętrzna utwardzonego spoiwa często jest popękana. Pęknięcia widoczne są również w całej objętości mostków. Obserwacje te są potwierdzeniem dla zjawisk opisanych w publikacji [10].

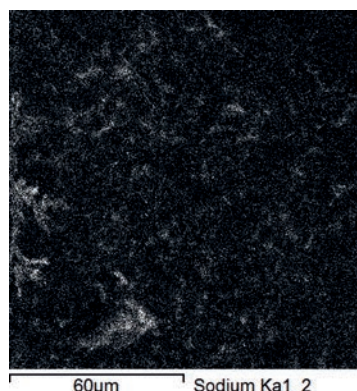
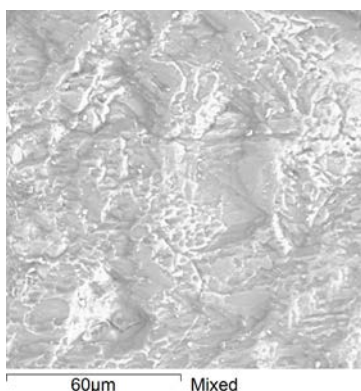
Za pomocą mikroskopu skaningowego i analizy EDS przeprowadzono badania miejsc koncentracji sodu. Wyniki tych analiz przedstawiono na [rysunkach 7 i 8](#).

of binder added (1.5 parts by weight). However, the photographs also show that after the conventional drying process, the outer surface of the hardened binder is often cracked. Cracks are also visible in the entire volume of bridges. These observations confirm the phenomena described in [10].

By scanning electron microscopy and EDS analysis, the places of sodium concentration were also examined. The results of these examinations are shown in [Figures 7 and 8](#).



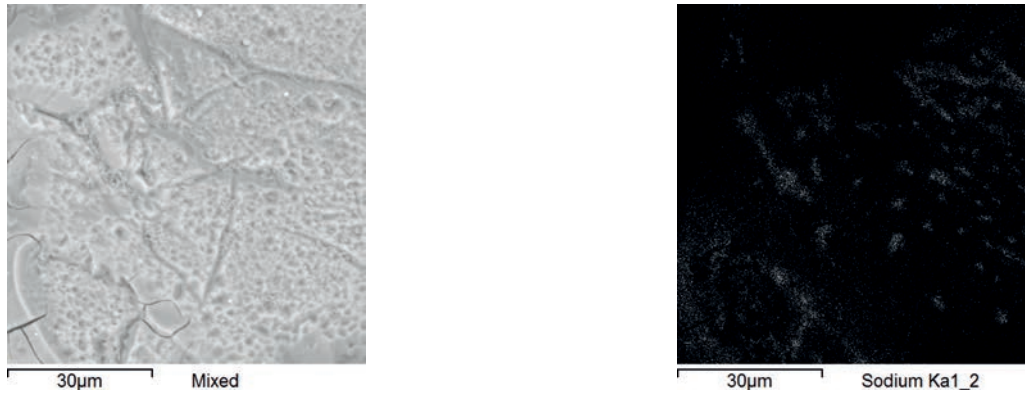
Rys. 7. Wyniki analizy EDS wykonanej na powierzchni ziaren osnowy kwarcowej na obecność sodu w masie ze spoiwem 140, po procesie suszenia klasycznego, sporządzonej w wariacie „V0%” bez dodatku zwilżającego
Fig. 7. The results of EDS analysis carried out on the surface of silica sand grains to detect the presence of sodium in the sand with binder 140 prepared according to variant “V0%” (without the addition of a wetting agent) after the conventional drying process



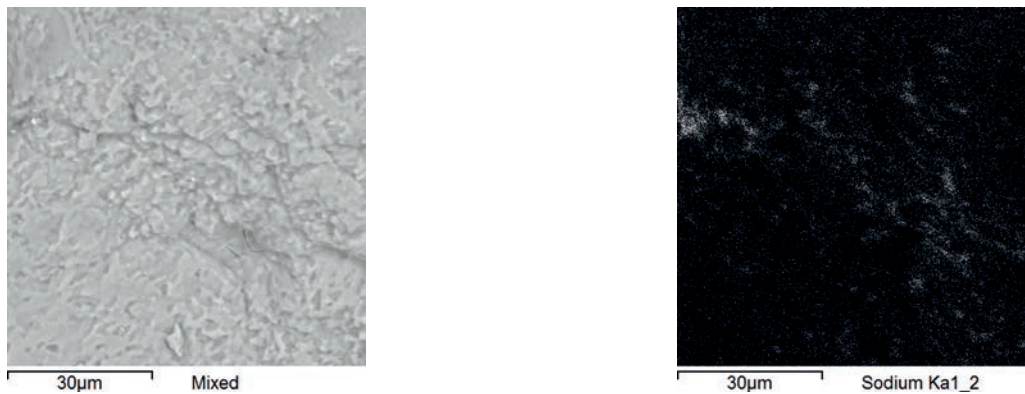
Rys. 8. Wyniki analizy EDS wykonanej na powierzchni ziaren osnowy kwarcowej na obecność sodu w masie ze spoiwem 140, po procesie suszenia klasycznego, sporządzonej w wariacie „V1%”
Fig. 8. The results of EDS analysis carried out on the surface of silica sand grains to detect the presence of sodium in the sand with binder 140 prepared according to variant “V1%” after the conventional drying process

Fragmenty porowatej powierzchni ziaren piasku kwarcowego, w przypadku stosowania spoiw sodowych: 140 ([rys. 7 i 8](#)) i 145 ([rys. 9 i 10](#)), są bardzo nieregularne i charakterystyczne dla tego rodzaju osnowy. Duża ilość zagłębień stwarza warunki do gromadzenia się w nich spoiwa, utrudniając przy tym jego napływanie do miejsc powstawiania mostków wiążących, co jest szczególnie istotne w przypadku tak niewielkiego dodatku materiału wiążącego. Potwierdzeniem tego

When sodium binders 140 ([Figs. 7 and 8](#)) and 145 ([Figs. 9 and 10](#)) are used, fragments of the porous surface of the silica sand grains are irregular and assume the appearance characteristic of this type of the base sand. Numerous cavities create conditions favourable for the accumulation of binder, arresting at the same time its flow to the places where bonding bridges are formed, which is of particular importance when the content of binding material is low. A confirmation of this effect



Rys. 9. Wyniki analizy EDS wykonanej na powierzchni ziaren osnowy kwarcowej na obecność sodu w masie ze spoiwem 145, po procesie suszenia klasycznego, sporządzonej w wariacie „V0%” bez dodatku zwilżającego
Fig. 9. The results of EDS analysis carried out on the surface of silica sand grains to detect the presence of sodium in the sand with binder 145 prepared according to variant “V0%” (without the addition of a wetting agent) after the conventional drying process



Rys. 10. Wyniki analizy EDS wykonanej na powierzchni ziaren osnowy kwarcowej na obecność sodu w masie ze spoiwem 145, po procesie suszenia klasycznego, sporządzonej w wariacie „V1%”
Fig. 10. The results of EDS analysis carried out on the surface of silica sand grains to detect the presence of sodium in the sand with binder 145 prepared according to variant “V1%” after the conventional drying process

zjawiska może być obserwacja obszarów z charakterystycznymi zagłębieniami (rys. 7 i 9), w których w dużej ilości zebrało się spoiwo, nie biorąc udziału w procesie tworzenia mostków wiążących. Dla porównania wpływu dodatku zwilżającego, na rysunkach: 8 i 10 uwidoczniono sposób gromadzenia się spoiwa w masach sporządzonych w wariacie „V1%”, które występuje głównie na zboczach wierzchołków nierówności tworzących zróżnicowaną powierzchnię ziaren kwarcu. Przypuszczalnie, widoczne na rysunkach zagłębienia (pory, kapilary) znajdujące się na powierzchni ziarna, po wprowadzeniu w procesie mieszania dodatku zwilżającego, zostały skutecznie zapełnione wodą, utrudniając wypełnianie tych miejsc przez zadozowane następnie spoiwo. Analiza zdjęć składu chemicznego powierzchni ziaren osnowy (rys. 8 i 10) uwidaczniających sposób koncentracji spoiwa wskazuje na bardziej równomierne jego rozproszczenie po powierzchni tworząc warstwę, w której jest obecny sód. Obserwacje charakteru koncentracji związków Na w dwóch skraj-

is the presence of areas with characteristic recesses (Figs. 7 and 9), in which large amounts of the binder are accumulated and remain inactive in the bonding bridges formation. To compare the effect of the addition of a wetting agent, Figures 8 and 10 show how the binder is accumulating in moulding sands prepared according to variant “V1%”, where its clusters are mainly found on the slopes near the vertices of the irregularities, forming an uneven surface on the silica sand grains. Presumably, the recesses (pores, capillaries) visible in the photographs on the surface of grains have been effectively filled with water after the introduction of a wetting agent during the mixing process, making it difficult to fill these locations then dosed by the binder. Chemical analysis of the surface of sand grains (Figs. 8 and 10), showing the distribution of binder concentration, indicates a more uniform spread of this binder forming a coating in which sodium is present. Careful studies of the distribution of the Na compounds concentration in the two extreme variants of “V0%” and “V1%” confirm the expected phe-

nych wariantach „V0%” i „V1%” stanowią potwierdzenie dla przypuszczalnych zjawisk mających miejsce po wprowadzeniu do zwilżonej osnowy kwarcowej spoiw. Dzięki dodatkowi zwilżającemu („V0.5%” i „V1%”) wprowadzane do masy spoiwa miały korzystniejsze warunki płynięcia po powierzchni osnowy do miejsc powstawania mostków wiążących. Zbyt duża ilość dodatku zwilżającego może powodować jednak daleko idące zmiany w sposobie rozprowadzenia spoiw po powierzchni osnowy kwarcowej. Wyniki tych obserwacji przybliżają wyjaśnienie korzystnych zmian parametrów jakościowych, w tym wytrzymałości kohezyjnej spoiw, w badanych masach zależnych od wzrostu ilości wody na powierzchni osnowy kwarcowej.

4. Wnioski

Analizując wyniki badań nad wpływem zwilżenia wodą ziaren osnowy kwarcowej, dozowanej do mas w trakcie ich mieszania, przed wprowadzeniem spoiwa i po ich fizycznym utwardzaniu, można stwierdzić, że:

1. Zastosowanie niemodyfikowanych spoiw gat. 137, 140 i 145 w ilości 1,5 cz. mas., w połączeniu z wprowadzeniem w procesie mieszania wody jako dodatku zwilżającego, zapewnia takim masom korzystniejsze parametry wytrzymałościowe i technologiczne niż sporządzonym w tradycyjny sposób z tymi samymi materiałami wiążącymi.
2. Na parametry wytrzymałościowe badanych mas wpływ ma ilość dodatku zwilżającego powierzchnie ziaren osnowy kwarcowej przed wprowadzeniem spoiwa, a jego najkorzystniejsza zawartość związana jest z cechami osnowy oraz indywidualnymi parametrami spoiwa, w szczególności modulem molowym i zawartością tlenków.
3. Ilość dodatku zwilżającego powinna być dobierana według dających się przewidzieć kryteriów wytrzymałościowych i technologicznych, a także ekonomicznych, potwierdzonych przez badania gęstości pozornej mas po utwardzeniu.
4. W badaniach przedstawiono opis zjawisk powierzchniowych towarzyszących wprowadzeniu do układu osnowa–spoiwo dodatku zwilżającego, który miał ułatwić, prawdopodobnie przez zmianę lepkości – napięcia powierzchniowego, ściekanie spoiwom do miejsc tworzenia się wysokiej jakości mostków wiążących, co potwierdzono obserwacjami i analizą chemiczną miejsc występowania związków sodu.

nomena occurring after the introduction of binders to the moistened silica sand grains. Owing to the addition of a wetting agent (variants “V0.5%” and “V1%”), for binders introduced to the moulding sands, much more favourable conditions have been created to promote their unrestrained flow on the sand grains surface and reaching the places where the bonding bridges were formed. However, too high content of the wetting agent added to the sand can cause far-reaching changes in the distribution of binder on the surface of the silica sand grains. The results of these observations should help in the explanation of some beneficial changes in the quality parameters, including the cohesive strength of binders in the investigated sands, depending on the increasing amount of water on the surface of the silica sand grains.

4. Conclusions

Studies of the wetting behaviour of water on the grains of silica sand, when this water is added to the moulding sand during the mixing process before the introduction of binder and after physical hardening, lead to the following conclusions:

1. The use of unmodified binder grades 137, 140 and 145 in an amount of 1.5 parts by weight jointly with water added during the mixing process as a wetting agent enables the production of moulding sands with mechanical and technological properties superior to the properties of moulding sands prepared with the same binders in a conventional manner.
2. The strength properties of the examined sands depend on the amount of the wetting agent added prior to the introduction of binder to wet the surface of the silica sand grains. The optimum content of this agent is strictly related with the characteristics of the silica sand grains and individual parameters of the binder, its molar modulus and the amount of oxides, in particular.
3. The selected content of the wetting agent should be based on the required and foreseeable mechanical, technological and economic criteria, confirmed by the measurement of apparent density in moulding sands after hardening.
4. The study describes the surface phenomena which accompany the introduction of a wetting agent to the sand – binder system to facilitate, probably through the change in viscosity and surface tension, the flow of binder and its easier access to the places where high-quality bonding bridges are formed, as confirmed by SEM observations and chemical analysis of places where sodium compounds occur.

5. Masy o małej zawartości spoiwa, charakteryzujące się dużym i średnim modułem molowym, przeznaczone do fizycznego utwardzania, powinny być zawsze sporządzane z dodatkiem wody zwilżającej ziarna piasku kwarcowego, a kierując się kryterium przepuszczalności, ścieralności, gęstości pozornej i wytrzymałości na rozciąganie i zginanie, zaleca się, aby wprowadzano do nich około 0,5 cz. mas. dodatku zwilżającego.
6. Dla określenia korzystnego wpływu zwilżania osnowy, w trakcie mieszania masy przed dodaniem spoiwa, badania powinny zostać rozszerzone o kolejne gatunki szkła wodnego sodowego, w tym poddane modyfikacjom, oraz o inne rodzaje osnowy.
7. Dla pełnego wyjaśnienia zjawisk występujących w układzie zwilżona osnowa kwarcowa – szkło wodne powinny zostać przeprowadzone dodatkowe badania nad wpływem wody, biorącej udział w tworzeniu się warstw: adsorpcyjnej i absorpcyjnej, na rozcieńczenie użytych spoiw i związane z tym zmiany ich właściwości, a także wpływ tego zjawiska na budowę mostków wiązań i ich parametry wytrzymałościowe.
5. Moulding sands with low binder content characterized by high and medium values of the molar modulus, designed for physical hardening, should always be prepared with the addition of water acting as an agent wetting the grains of silica sand. Applying the moulding sand performance criteria based on permeability, abrasion resistance, apparent density, tensile strength and bending strength, it is recommended to introduce the wetting agent in an amount of approx. 0.5 part by weight.
6. To determine the beneficial effect on the silica sand grains of a wetting agent introduced during mixing of the sand before adding binder, tests and studies should be extended to include other grades of sodium water glass, preferably also those undergoing various modifications, and other types of foundry sand.
7. For a full explanation of the phenomena occurring in a system of wet silica sand grains–water glass, additional research should be conducted to highlight the effect of water involved in the formation of adsorption and absorption layers on the dilution of binders added to the moulding sand and related changes in their properties, including an impact of this phenomenon on the formation of bonding bridges and their strength parameters.

Podziękowania

Badania zostały wsparte finansowo z dotacji na działalność statutową nr B50120/K1012.

Acknowledgements

The research was financially supported with a grant for statutory activity No. B50120/K1012.

Literatura/References

1. Hutera B., P. Nowicki. 2009. „Wpływ chemicznej struktury spoiwa na procesy powierzchniowe”. *Archives of Mechanical Technology and Automation* 29 (3) : 41–49.
2. Stachowicz M., K. Granat, Ł. Pałyga. 2016. “Effect of sand wetting on physically hardened moulding sands containing a selected inorganic binder. Part 1”. *Archives of Foundry Engineering* 16 (1) : 73–78.
3. Stachowicz M., K. Granat, Ł. Pałyga. 2016. “Effect of sand wetting on physically hardened moulding sands containing a selected inorganic binder. Part 2”. *Archives of Foundry Engineering* 16 (1) : 79–84.
4. Williams R., A.M. Goodman. 1974. “Wetting of thin layers of SiO₂ by water”. *Applied Physics Letters* 25 (10) : 531–532.
5. 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(special issue 1), 175–178.
6. Stachowicz M., K. Granat, D. Nowak. 2010. “Studies on the possibility of more effective use of water glass thanks to application of selected methods of hardening”. *Archives of Foundry Engineering* 10 (special issue 2) : 135–140.
7. Hutera B., K. Smyksy, D. Drożyński. 2007. “Influence of lowered temperature on wettability of quartz grains by binders used in moulding sands”. *Archives of Mechanical Technology and Automation* 27 (1) : 47–55.
8. Lewandowski J.L. 1997. *Tworzywa na formy odlewnicze*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT.
9. Bobrowski A., A. Kmita, M. Starowicz, B. Stypuła, B. Hutera. 2012. “Effect of Magnesium Oxide Nanoparticles on Water Glass Structure”. *Archives of Foundry Engineering* 12 (3) : 9–12.
10. Stachowicz M., K. Granat, D. Nowak, K. Haimann. 2013. “Effect of hardening methods of moulding sands with water glass on structure of bonding bridges”. *Archives of Foundry Engineering* 10 (3) : 123–128.

11. Stachowicz M., K. Granat. 2015. "Influence of melt temperature on strength parameters of cyclically activated used-up sandmixes containing water-glass, hardened with microwaves". *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15 (4) : 831–835.
12. 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.
13. Dobosz S.M. 2006. *Water in moulding and core sands*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT.

