

**Wpływ sposobu modyfikacji uwodnionego krzemianu sodu na efektywność zmian wytrzymałości końcowej masy formierskiej**

**Effect of the way of modification of hydrated sodium silicate on the effectiveness of the changes in the residual strength of a moulding sand**

*Andrzej Baliński<sup>1</sup>*

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

<sup>1</sup> Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

*E-mail: andrzej.balinski@iod.krakow.pl*

Received: 01.02.2017. Accepted in revised form: 30.09.2017.

© 2017 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2017.14

**Streszczenie**

Opisano wykorzystane w badaniach metody modyfikacji uwodnionego krzemianu sodu jako spoiwa krzemianowe masy formierskiej. Określono zmianę wytrzymałości końcowej masy formierskiej z zastosowanymi spoiwami krzemianowymi oraz efektywność zmian wytrzymałości końcowej w funkcji temperatury wygrzewania badanych próbek masy formierskiej. Stwierdzono, że najkorzystniejszym spoiwem w aspekcie zmiany wytrzymałości końcowej masy formierskiej jest spoiwo krzemianowe modyfikowane chemicznie dodatkiem organofunkcyjnym oraz spoiwo geopolimerowe, natomiast najkorzystniejszą efektywność zmian wytrzymałości końcowej masy formierskiej zapewnia spoiwo krzemianowe modyfikowane chemicznie dodatkiem organofunkcyjnym.

**Słowa kluczowe:** uwodniony krzemian sodu, geopolimer, masa formierska, wytrzymałość końcowa

**Abstract**

The article discusses the ways of modification of hydrated sodium silicate as a silicate binder of moulding sands which were applied in the studies. It determines the change in the residual strength of the moulding sand with used silicate binders as well as the effectiveness of the changes in the residual strength as a function of the annealing temperature of the examined moulding sand samples. It was established that the most advantageous binder with regards to changes in the residual strength of the moulding sand is a silicate binder chemically modified with an organofunctional addition as well as a geopolymer binder, whereas the most beneficial effect of the changes in the residual strength of the moulding sand is ensured by a silicate binder chemically modified with an organofunctional addition.

**Keywords:** hydrated sodium silicate, geopolymer, moulding sand, residual strength

**1. Wstęp**

Nieorganiczne spoiwa, stosowane do wytwarzania mas formierskich, posiadają wiele korzystnych cech głównie w aspekcie ekologii ich stosowania. Do tych spoiw należy uwodniony krzemian sodu, stosowany w odlewnictwie od ponad pół wieku. Spoiwo to stosowane jest w wielu technologiach produkcji mas formierskich, w których wykorzystuje się nieodwracalne reakcje jego żelowania, w wyniku oddziaływania dwutlenku węgla

**1. Introduction**

Inorganic binders used in the production of moulding sands have many advantageous properties, mainly in the ecology of their use. Such binders include hydrated sodium silicate, which has been used in the casting industry for over a half of a century. This binder is applied in many technologies in moulding sand production, in which irreversible reactions due to its gelation are applied, as a result of the operations of carbon dioxide

bądź estrów lub też odwracalne reakcje, polegające na dehydratacji uwodnionego krzemianu sodu w procesie *hot-box*, *warm-box* czy też mikrofalowym. Masy sporządzone z zastosowaniem powyższych, ogólnodostępnych układów wiążących cechuje brak emisji toksycznych gazów w całym cyklu produkcji odlewów. Poza wymienionymi względami technologicznymi i ekologicznymi, istotne są również względy ekonomiczne. Masy formierskie z uwodnionym krzemianem sodu są znacznie tańsze od mas ze spoiwami organicznymi. Obok oczywistych zalet, masy z uwodnionym krzemianem sodu posiadają również wiele wad ograniczających zakres ich stosowania i utrudniających proces produkcji odlewów. Należą do nich przede wszystkim duża wytrzymałość końcowa, powodująca znaczny pogorszenie procesu usuwania rdzeni z odlewu oraz odlewu z formy, a także utrudniona regeneracja mechaniczna osnowy ziarnowej, w porównaniu do mas ze spoiwami organicznymi. Mniejsza jest również wytrzymałość kohezyjna powstałych mostków spoiwowych łączących ziarna osnowy mas formierskich. Przedstawione wyniki badań mają na celu wskazanie najefektywniejszej z zastosowanych metod modyfikacji uwodnionego krzemianu sodu, w aspekcie korzystnych technologicznie zmian wytrzymałości końcowej masy formierskiej wykonanej z udziałem tych spoiw.

## 2. Zastosowane metody modyfikacji uwodnionego krzemianu sodu

### 2.1. Modyfikacja fizyczna

W celu porównania właściwości fizycznych (struktura, potencjał  $\zeta$ ) oraz wiążących uwodnionego krzemianu sodu powstałego ze szkliwa krzemianowo-sodowego poddanego kondycjonowaniu w temperaturze 1350°C przez czas 60, 90 i 120 minut, wykonano w procesie autoklawizacji trzy rodzaje próbek uwodnionego krzemianu sodu o module  $M = 2,0$  i gęstości  $1,5 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$  [1]. Zakładając występowanie zjawiska zmian struktury ciekłego szkliwa krzemianowo-sodowego poddanego kondycjonowaniu, czyli przetrzymywaniu przez ustalony czas w temperaturze powyżej temperatury jego topienia, należy się spodziewać uzyskania różnych struktur szkliwa w temperaturze odpowiadającej ochłodzeniu szkliwa do temperatury otoczenia. Transformacja ze stanu ciekłego (ciecz przechłodzona) do stanu stałego (szkliwo) jest stopniowa, z zachowaniem ciągłości zmian charakterystycznych właściwości materiału. Gęstość i struktura szkliwa zależy zatem od szybkości jego chłodzenia. Analiza struktury badanych rodzajów uwodnionego krzemianu sodu, wykonana metodą spektroskopii korelacji fotonowej, wskazuje, że posiadają one najkorzystniejszą strukturę typu  $S_{2-4}$  ( $WB \leq 1,8$ ;  $DWB < 0,8$ ) [2]. Można stwierdzić, że uwodniony krzemian sodu poddany kondycjonowaniu termicznemu przez 60 minut charakteryzuje się największą jedno-

or esters, as well as reversible reactions consisting of dehydration of hydrated sodium silicate in a hot-box, warm-box or microwave process. Sands made with the use of the above commonly available binding systems are characterized by a lack of emission of toxic gases in the whole casting production cycle. Besides the mentioned technological and ecological aspects, there are also economical ones, which are just as important. Moulding sands with hydrated sodium silicate are much cheaper than sands with organic binders. Next to the obvious benefits, sands with hydrated sodium silicate also have many disadvantages, which limit the scope of their application and hinder the process of cast production. The latter include a higher residual strength, which significantly worsens the process of removing cores from the cast and casts from the mould, as well as hinders the mechanical regeneration of the granular matrix, as compared with sands with organic binders. Also, the cohesion strength of the formed binder bridges joining the matrix grains of moulding sands is lower. The presented results of the studies aim at pointing to the most effective method of modification of hydrated sodium silicate in regards to technologically beneficial changes in the residual strength of a moulding sand made with the use of these binders.

## 2. Applied methods of modification of hydrated sodium silicate

### 2.1. Physical method

In order to compare the physical properties (structure, potential  $\zeta$ ) as well as binding properties of hydrated sodium silicate made of silicate-sodium glaze subjected to conditioning at 1350°C for 60, 90 and 120 minutes, three types of hydrated sodium silicate samples, module  $M = 2.0$ , density  $1.5 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ , were prepared in an autoclaving process [1]. Assuming the occurrence of changes in the structure of liquid silicate-sodium glaze subjected to conditioning, which is the process of annealing at a temperature higher than the melting point for a specific amount of time, one should expect to obtain different glaze structures at the temperature corresponding to the glaze being cooled to room temperature. The transformation from the liquid state (overcooled liquid) to the solid state (glaze) is gradual, with the preservation of the continuity of the changes in the characteristic properties of the material. And so, the density and structure of the glaze depends on its cooling rate. The analysis of the structure of the examined types of hydrated sodium silicate, made by means of the method of photon correlation spectroscopy, points to the fact that they are characterized by the most advantageous structure type  $S_{2-4}$  ( $WB \leq 1.8$ ;  $DWB < 0.8$ ) [2]. It can be established that hydrated sodium silicate subjected to thermal conditioning for 60 minutes exhibits the most homogeneous

rodnością struktury ( $WB = 1,2241$ ), a równocześnie największym stopniem niejednorodności struktury ( $DWB = 0,6717$ ). Najmniejszą jednorodność struktury posiada uwodniony krzemian sodu poddany kondycjonowaniu termicznemu przez 90 minut, przy czym najmniejszy jest stopień niejednorodności jego struktury ( $DWB = 0,2769$ ). Uwodniony krzemian sodu poddany termicznemu kondycjonowaniu przez 120 minut charakteryzuje się pośrednimi wartościami zarówno wskaźnika jednorodności struktury ( $WB = 0,4904$ ), jak i wskaźnika stopnia niejednorodności struktury ( $DWB = 0,5552$ ). W aspekcie wytrzymałości resztkowej mas formierskich z badanymi rodzajami uwodnionego krzemianu sodu, najkorzystniejsze właściwości posiadają masy formierskie wykonane z udziałem uwodnionego krzemianu sodu poddanego procesowi termicznego kondycjonowania przez 90 minut (spoiwo *UKS-MF*). Ich wytrzymałość końcowa dla temperatury nagrzewania około 300°C i 900°C ma mniejszą wartość odpowiednio o około 40% i 20%, w porównaniu do wytrzymałości końcowej mas formierskich wykonanych z udziałem uwodnionego krzemianu sodu poddanego kondycjonowaniu termicznemu przez 120 minut. Wytrzymałość końcowa mas z uwodnionym krzemianem sodu poddanego kondycjonowaniu termicznemu przez 60 minut ma wartości pośrednie pomiędzy wartością wytrzymałości końcowej mas z udziałem uwodnionego krzemianu sodu poddanego kondycjonowaniu termicznemu przez 90 i 120 minut [1].

## 2.2. Modyfikacja chemiczna

**2.2.1.** Stwierdzono, że właściwości szkła wodnego jako spoiwa można poprawić przez wprowadzenie do jego struktury środków morfoaktywnych, które regulują morfologię produktu końcowego. Modyfikatorami mogą być rozpuszczalne w wodzie związki wielkocząsteczkowe z aktywnymi grupami funkcyjnymi, takimi jak -OH, -NH<sub>2</sub>, =CONH, -CONH<sub>2</sub>, -COOH i inne. Należą do nich m.in. polimery i kopolimery akrylowe, polialkohol winylowy, pochodne celulozy, polifosforany o budowie liniowej lub rozgałęzionej itp. Wprowadzenie morfoaktywnych modyfikatorów w procesie roztwarzania szklawa krzemianowo-sodowego, kiedy to następuje tworzenie się koloidalnej struktury uwodnionego krzemianu sodu, powoduje powstanie sieci typu *IPN* (*Interpenetrating Polymer Networks*). Modyfikatory przyspieszają proces roztwarzania szklawa, sprzyjają powstawaniu silniejszych wiązań kohezyjnych i zmniejszają kruchość masy formierskiej. Ich wprowadzenie do uwodnionego krzemianu sodu zwiększa skuteczność jego działania jako spoiwa i pozwala zmniejszyć jego udział w masie formierskiej [1,3,4]. Modyfikowane chemicznie spoiwo o module 2,11 i o gęstości 1,501 g/cm<sup>3</sup>, zawierając 1% wag. substancji morfoaktywnej, określono symbolem *UKS-MCH*.

**2.2.2. Geopolimery** (rys. 1) należą do glinokrzemianów alkalicznych, zawierających krzem, glin i pierwia-

structure ( $WB = 1.2241$ ), at the same time characterized by the highest degree of structure segregation ( $DWB = 0.6717$ ). The lowest structure homogeneity is exhibited by hydrated sodium silicate subjected to thermal conditioning for 90 minutes, while its degree of structure segregation is the lowest ( $DWB = 0.2769$ ). Hydrated sodium silicate subjected to thermal conditioning for 120 minutes is characterized by intermediate values of both the structure homogeneity index ( $WB = 0.4904$ ) and the degree of structure segregation ( $DWB = 0.5552$ ). In terms of the residual strength of the moulding sands with the examined types of hydrated sodium silicate, the most beneficial properties are exhibited by the moulding sands made with the use of hydrated sodium silicate subjected to the process of thermal conditioning for 90 minutes (*UKS-MF* binder). Their residual strength for the heating temperature of about 300°C and 900°C is about 40% and 20% lower, respectively, as compared with the residual strength of the moulding sands made with the use of hydrated sodium silicate subjected to thermal conditioning for 120 minutes. The residual strength of the sands with hydrated sodium silicate subjected to thermal conditioning for 60 minutes has intermediate values between the value of the residual strength of the sands made with the use of hydrated sodium silicate subjected to thermal conditioning for 90 minutes and those in the case of conditioning for 120 minutes [1].

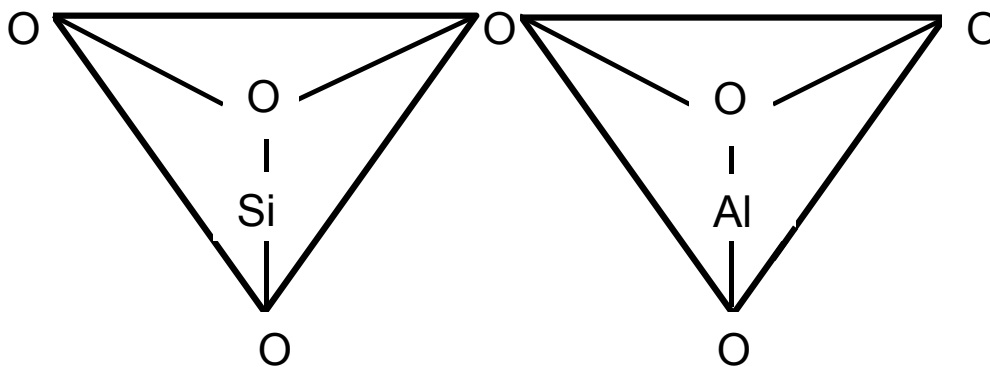
## 2.2. Chemical modification

**2.2.1.** It was established that the properties of water glass as a binder can be improved by way of introducing morphoactive agents into its structure, which regulate the morphology of the final product. The modifiers can be macro-molecular compounds, soluble in water, with active functional groups, such as -OH, -NH<sub>2</sub>, =CONH, -CONH<sub>2</sub>, -COOH and others. They include: acryl polymers and copolymers, polyvinyl alcohol, cellulose derivatives, polyphosphates of a linear or branched construction, etc. The introduction of morphoactive modifiers into the process of sodium-silicate glaze pulping, when we observe the formation of a colloidal structure of hydrated sodium silicate, causes the creation of an *IPN* type network (*Interpenetrating Polymer Networks*). The modifiers accelerate the process of glaze pulping, favour the formation of stronger cohesion bonds and reduce the brittleness of the moulding sand. Their introduction into the hydrate sodium silicate increases the effectiveness of its operation and makes it possible to reduce its content in the moulding sand [1,3,4]. The chemically modified binder with the module 2.11 and density of 1.501 g/cm<sup>3</sup>, containing 1% wt. of the morphoactive substance, was denoted with *UKS-MCH*.

**2.2.2. Geopolymers** (Fig. 1) belong to the group of alkaline aluminosilicates containing silicon, aluminium and an alkaline element, i.e. sodium or potassium. Geo-

stek alkaliczny – sód lub potas. Geopolimery składają się z długich łańcuchów – kopolimerów tlenków krzemu i glinu i stabilizujących je kationów metali, najczęściej sodu, potasu, litu lub wapnia oraz związanej wody. Oprócz łańcuchów polimerycznych, w materiale występują z reguły różne przemieszane fazy: tlenek krzemu, nieprzereagowany substrat glinokrzemianowy oraz niekiedy wykrystalizowane glinokrzemiany typu zeolitu. Empiryczny wzór liniowej cząsteczki (pojedynczego łańcucha) geopolimeru to  $M_n[(SiO_2)_zAlO_2]_n \cdot kH_2O$ , gdzie  $M$  to metal lub kilka metali, natomiast liczby  $n$ ,  $z$  i  $k$  zależą od składu i sposobu przygotowania konkretnej próbki [5–7]. Łańcuch polimerowy zastosowanego geopolimeru składa się z czworościennych struktur  $SiO_4$  i  $AlO_4$  połączonych między sobą przez wspólne atomy tlenu w dwu- lub trójwymiarową, skomplikowaną sieć. Ujemny ładunek glinu jest równoważony przez kationy metali. Po dodaniu utwardzacza, będącego najczęściej mieszaniną estrów organicznych, następuje polimeryzacja, w wyniku której powstaje polimer nieorganiczny wiążący ziarna osnowy piaskowej. W badaniach zastosowano geopolimer o nazwie handlowej *Rudal A* [8].

polymers consist of long chains – copolymers of silicon and aluminium oxides and metal cations which stabilize them, usually sodium, potassium, lithium or calcium as well as bounded water. Beside the copolymer chains, the material usually also contains various mixed phases: silicon oxide, a non-converted aluminosilicate substrate and sometimes, crystallized aluminosilicates of the zeolite type. The empirical formula of a linear molecule (single chain) of the geopolimer is  $M_n[(SiO_2)_zAlO_2]_n \cdot kH_2O$ , where  $M$  is the metal or several metals and  $n$ ,  $z$  and  $k$  depend on the composition and manner of preparation of the given sample [5–7]. The polymer chain of the applied geopolimer consists of four-walled  $SiO_4$  and  $AlO_4$  structures connected by mutual oxygen atoms into a three-dimensional or four-dimensional, complicated network. The negative charge of aluminium is counterbalanced by the metal cations. After a hardener has been added, which is usually a mixture of organic esters, polymerization takes place, as a result of which an inorganic polymer is formed, binding the grains of the sand matrix. In the tests, the geopolimer *Rudal A* was applied [8].



Rys. 1. Tetraedry  $SiO_4$  i  $AlO_4$  w spoiwie geopolimerowym [6]

Fig. 1. Tetrahedrons  $SiO_4$  and  $AlO_4$  in a geopolimer binder [6]

### 3. Wykonanie próbek mas formierskich

Osnowę ziarnową mas formierskich stanowił wzorcowy piasek kwarcowy 1K o frakcji głównej 0,32/0,40/0,20, jednorodności J85 do J87 oraz wskaźniku kształtu  $W_k = 1,05$ . Do mieszania składników masy formierskiej stosowano mieszarkę wstęgową typu *LM-R2* oraz standardową procedurę wprowadzania składników sypkich i ciekłych, a także czasów ich mieszania z osnową ziarnową. Próbki masy formierskiej przeznaczone do badania wytrzymałości na ścislenie w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach podwyższonych zagęszczano za pomocą urządzenia typu *LUZ* (amplituda zagęszczania 2 mm, czas zagęszczania 20 s). Skład mas formierskich z badanymi spoiwami przedstawiono w tabeli 1.

### 3. Preparation of moulding sand samples

The granular matrix of the moulding sands was the model quartz sand 1K with the main fraction of 0.32/0.40/0.20, homogeneity of J85 to J87 and shape coefficient  $W_k = 1.05$ . To mix the moulding sand components, a ribbon mixer type *LM-R2* was used, as well as the standard procedure of introducing loose and liquid components and times of their mixing with the granular matrix. The moulding sand samples assigned for compression strength tests at ambient temperature as well as elevated temperatures were densified by means of a *LUZ* type device (densification amplitude 2 mm, densification time 20 s). The compositions of moulding sands with examined binders are presented in Table 1.



Tabela 1. Skład masy formierskiej

Table 1. Moulding sand composition

Lp./ No.	Spoiwo/Binder		Utwardzacz/Hardener	
	Symbol/Symbol	Zawartość, cz. mas. (w stosunku do 100 cz. mas. osnowy ziarnowej) / Content, parts by weight (in respect of 100 parts by weight of granular matrix)	Symbol/Symbol	Zawartość, cz. mas. (w stosunku do 100 cz. mas. osnowy ziarnowej) / Content, parts by weight (in respect of 100 parts by weight of granular matrix)
1	UKS-NM*	3,5	flodur 3 (dwuocian glikolu etylenowego) / flodur 3 (ethanediol diacetate)	0,40
2	UKS-MF	2,5	flodur 1 (dwuocian glikolu etylenowego) / flodur 1 (ethanediol diacetate)	0,37
3	UKS-MCH	2,0	flodur 1 (dwuocian glikolu etylenowego) / flodur 1 (ethanediol diacetate)	0,30
4	GEOPOLIMER	2,5	SA 63	0,30

\* porównawczy, uwodniony krzemian sodu niemodyfikowany o gęstości 1,45 g/cm<sup>3</sup> i module  $M = 2,5$  / comparative, non-modified hydrated sodium silicate, density 1.45 g/cm<sup>3</sup> and module  $M = 2.5$

#### 4. Badania wytrzymałości końcowej próbek masy formierskiej oraz określenie efektywności zmian tej wytrzymałości w zależności od rodzaju zastosowanego spoiwa krzemianowego

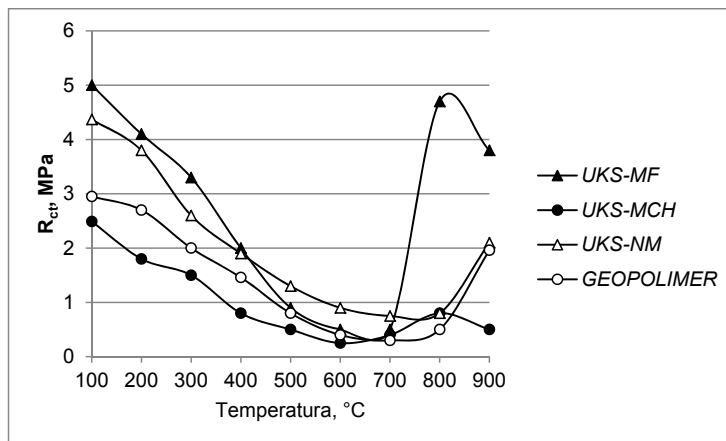
Po 24 godzinach od wykonania próbek masy formierskiej o składzie podanym w tabeli 1, określano ich wytrzymałość w temperaturze 20°C, a następnie poddawano wygrzewaniu przez 0,5 godziny w temperaturze od 100°C do 900°C, co 100°C. Jako urządzenie grzewcze stosowano piec PK-9/1300 wyposażony w mikroprocesorowy regulator temperatury o działaniu ciągłym PRT 911, zapewniający dokładność regulacji temperatury w punkcie  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Z uwagi na to, że nierównomierność rozkładu temperatury w obszarze komory roboczej o wymiarach 150 mm  $\times$  100 mm  $\times$  300 mm wynosi  $\pm 5^\circ\text{C}$ , próbki do badań usytuowane były zawsze w tym samym miejscu komory pieca. Po założonym czasie wygrzewania próbek usuwano je z komory pieca i studzono do momentu osiągnięcia przez nie temperatury otoczenia, a następnie określano ich wytrzymałość na ściskanie za pomocą aparatu typu LRuE-2.

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany wytrzymałości końcowej próbek badanych mas, w funkcji temperatury ich wygrzewania, natomiast rysunek 3 ilustruje zmianę ilorazu wartości wytrzymałości na ściskanie próbek masy formierskiej określonej w temperaturze 20°C ( $R_c$ ) i wartości wytrzymałości na ściskanie próbek masy formierskiej określonej w temperaturze ich wygrzewania ( $R_{ct}$ ), w funkcji temperatury ich wygrzewania. Dynamika zmian wartości  $R_c/R_{ct}$  w funkcji temperatury wygrzewania próbek masy formierskiej stanowi miarę efektywności zmiany wytrzymałości końcowej masy formierskiej w funkcji temperatury jej wygrzewania.

#### 4. Investigations of the residual strength of moulding sand samples and determination of the effectiveness of its changes depending on the type of the applied silicate binder

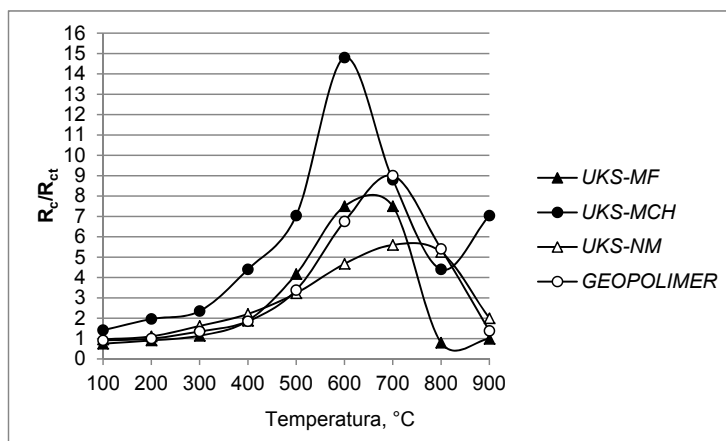
24 hours after the preparation of the moulding sand samples of the composition given in Table 1, their strength was determined at 20°C, and next, the samples underwent heating for 0.5 h at 100°C to 900°C, at intervals of 100°C. As the heating device, the furnace PK-9/1300 was used, equipped with a microprocessor temperature regulator working continuously PRT 911, ensuring temperature control accuracy of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Due to the fact that the non-uniformity of the temperature distribution within the working chamber of the dimensions 150 mm  $\times$  100 mm  $\times$  300 mm equals  $\pm 5^\circ\text{C}$ , the test samples were always situated in the same area of the furnace chamber. After the assumed annealing time, the samples were removed from the furnace chamber and cooled until reaching ambient temperature, and next their compression strength was determined by means of an LRuE-2 type apparatus.

Figure 2 shows the changes in the residual strength of the moulding sand samples as a function of their annealing temperature, whereas Figure 3 illustrates the change in the quotient of the value of compression strength of the moulding sand samples determined at 20°C ( $R_c$ ) and the value of the compression strength of the moulding sand samples determined at their annealing temperature ( $R_{ct}$ ), as a function of their annealing temperature. The dynamics of the changes in the value of  $R_c/R_{ct}$  as a function of the annealing temperature of the moulding sand samples constitutes the measure of the effectiveness of the change in the residual strength of the moulding sand as a function of its annealing temperature.



Rys. 2. Zmiana wartości wytrzymałości końcowej  $R_{ct}$  próbek masy formierskiej wykonanej z różnymi rodzajami spoiw krzemianowych, w funkcji temperatury ich wygrzewania

Fig. 2. Change in the value of the residual strength  $R_{ct}$  of moulding sand samples made with different type of silicate binders, in the function of their annealing temperature



Rys. 3. Zmiana wartości ilorazu wytrzymałości na ściskanie próbek masy formierskiej ( $R_c$ ) i wytrzymałości końcowej ( $R_{ct}$ ) określonych w temperaturze 20°C, w funkcji temperatury ich wygrzewania

Fig. 3. Change in the value of the quotient of compression strength of the moulding sand samples ( $R_c$ ) and their residual strength ( $R_{ct}$ ) determined at 20°C, in the function of their annealing temperature

## 5. Analiza wyników badań oraz wnioski

1. Najkorzystniejsze właściwości w aspekcie zmniejszenia wytrzymałości końcowej  $R_{ct}$  w zakresie temperatury wygrzewania od 100°C do około 500°C posiada masa formierska ze spoiwem krzemianowym UKS-MCH oraz geopolimerowym. W zakresie temperatury od około 600°C do około 700°C wytrzymałość końcowa masy formierskiej ze spoiwem UKS-MF, UKS-MCH oraz geopolimerowym ma wartości zbliżone, korzystniejsze w porównaniu do wytrzymałości końcowej masy formierskiej z niemodyfikowanym spoiwem UKS-NM. W zakresie temperatury od około 700°C do około 800°C nieznacznie korzystniejszą wytrzymałość końcową w porównaniu do wytrzymałości końcowej masy

## 5. Test results analysis and conclusions

1. The most advantageous properties in the aspect of reducing the residual strength  $R_{ct}$  in the annealing temperature scope of 100°C to about 500°C is exhibited by the moulding sand with the UKS-MCH silicate binder as well as the geopolymer binder. In the temperature range of about 600°C to about 700°C, the residual strengths of the moulding sands with the UKS-MF, UKS-MCH as well as geopolymer binder have similar values, more favourable than the residual strength of the moulding sand with the non-modified UKS-NM binder. In the temperature range of about 700°C to about 800°C, a slightly more favourable residual strength than the residual strength of the moulding sand with the UKS-MCH binder is

formierskiej ze spoiwem *UKS-MCH* posiada masa formierska ze spoiwem *geopolimerowym* (wytrzymałość  $R_{ct}$  mniejsza o około 0,3 MPa). W zakresie temperatury od około 800°C do około 900°C znacznie korzystniejszą wytrzymałość końcową w porównaniu do wytrzymałości końcowej masy formierskiej ze spoiwem *geopolimerowym* (wytrzymałość  $R_{ct} \cong 1,96$  MPa) posiada masa formierska ze spoiwem *UKS-MCH* (wytrzymałość  $R_{ct} \cong 0,5$  MPa).

2. Najkorzystniejszą efektywność zmian wytrzymałości końcowej w zakresie temperatury od 100°C do około 600°C posiada masa formierska ze spoiwem krzemianowym *UKS-MCH*.
3. Efektywność zmian wytrzymałości końcowej w zakresie temperatury od 100°C do około 500°C jest zbliżona w przypadku masy formierskiej ze wszystkimi badanymi spoiwami, natomiast w zakresie temperatury od około 500°C do około 700°C jest zbliżona w przypadku masy formierskiej ze spoiwem *UKS-MF* oraz *geopolimerowym*.
4. W zakresie temperatury od około 700°C do około 900°C efektywność zmian wytrzymałości końcowej masy formierskiej ze wszystkimi badanymi spoiwami krzemianowymi posiada charakter niekorzystny. Wyjątek stanowi masa formierska ze spoiwem krzemianowym *UKS-MCH*, w przypadku której efektywność zmian wytrzymałości końcowej cechuje pozytywny wzrost w zakresie temperatury od około 800°C do około 900°C.

## Podziękowania

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego własnego nr 7 T08B 052 20 pt.: „Badania warunków wpływu kondycjonowania szkliwa krzemianowo-sodowego na strukturę, potencjał Zeta i właściwości kohezyjne uwodnionego krzemianu sodu jako spoiwa wielokładnikowego układu mas formierskich utwardzanych chemicznie”, projektu celowego nr 6T092003/C.6157 pt.: „Uruchomienie produkcji ekologicznego spoiwa nowej generacji, dla odlewnictwa stopów żelaza i metali nieżelaznych”, pracy statutowej Instytutu Odlewnictwa „Doskonalenie technologii mas formierskich ze spoiwami nieorganicznymi i ich regeneracji w aspekcie poprawy ekonomiczności i jakości odlewów ze stopów żelaza i metali nieżelaznych” (zlec. 6005/00), finansowanej przez MNiSzW, pracy wykonanej na zlecenie firmy Sand Team pt.: „Przeprowadzenie prób i badań nad zastosowaniem spoiwa „RUDAL” w polskich odlewniach” (zlec. 4326/00) oraz pracy pt.: „Przeprowadzenie prób nad zastosowaniem nowej kompozycji wiążącej szkła wodnego w warunkach POMET SA w Poznaniu” (zlec. 4331/00).

exhibited by the moulding sand with the *geopolymer* binder (strength  $R_{ct}$  lower by about 0.3 MPa). In the temperature range of about 800°C to about 900°C, a much more favourable residual strength, as compared to the residual strength of the moulding sand with the *geopolymer* binder (strength  $R_{ct} \cong 1.96$  MPa), is exhibited by the moulding sand with the *UKS-MCH* binder (strength  $R_{ct} \cong 0.5$  MPa).

2. The most beneficial effect of the changes in the residual strength in the temperature range of 100°C to about 600°C is demonstrated by the moulding sand with the *UKS-MCH* silicate binder.
3. The effectiveness of the changes in the residual strength in the temperature range of 100°C to about 500°C is similar to that of the moulding sands with all the examined binders, whereas, in the temperature range of about 500°C to about 700°C, it is similar in the case of the moulding sand with the *UKS-MF geopolymer* binder.
4. In the temperature range of about 700°C to about 900°C, the effectiveness of the changes in the residual strength of the moulding sands with all the examined silicate binders demonstrates the same disadvantageous character. An exception is the moulding sand with the *UKS-MCH* silicate binder, in which case the effectiveness of the changes in the residual strength is characterized by a positive increase, in the temperature range of about 800°C to about 900°C.

## Acknowledgements

The research has been realized within the implementation of the authors' own scientific project no. 7 T08B 052 20: “Studies of the conditions of the effect of conditioning of sodium-silicate glaze on the structure, Zeta potential and cohesion properties of hydrated sodium silicate as a binder of a multi-component system of chemically hardened moulding sands”, targeted project no. 6T092003/C.6157: “Activation of the production of an ecological new generation binder for iron alloy and non-ferrous metal casting”, the statutory work of Foundry Research Institute: “Optimization of the technology of moulding sands with inorganic binders and their regeneration in the aspect of improving the cost-effectiveness and quality of iron alloy and non-ferrous metal casts” (order no. 6005/00), financed by the Ministry of Science and Higher Education by the order of the Sand Team company: “Performing of tests and studies of the application of the „RUDAL” binder in Polish foundries” (order no. 4326/00) and the study: “Performing of tests on the application of a new binding composition of water glass under the conditions of POMET SA, Poznań” (order no. 4331/00).

## Literatura/References

1. Baliński A. 2009. *O strukturze uwodnionego krzemianu sodu jako spoiwa mas formierskich*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
2. Jelínek P., A. Baliński. 2002. „Are all possibilities of improving the binding proprieties of Na-silicates exhausted?”. *Slévárnství* 50 (5–6) : 188.
3. Baliński A., M. Stechman, D. Rózycka. 2003. „Influence of modification of the sodium silicate with morpohoactive agents on the mechanical proprieties of the moulding sands in temperatures to 900°C”. *Materials Engineering* 10 (3) : 271–273.
4. Stechman M., D. Rózycka, A. Baliński. 2003. „Modification of aqueous sodium silicate solutions with morpohoactive agents”. IV Conference on Chemical Technology, Szczecin. *Polish Journal of Chemical Technology* 5 (3) : 47–50.
5. Lewandowski J.L. 2013. Materiały wiążące i inne materiały formierskie. W *Poradnik odlewnika – Odlewnictwo Współczesne. T. 1*, red. J.J. Sobczak, 995–1004. Kraków: STOP.
6. Zaretsky L. 2016. „Modified silicate binders new developments and applications”. *International Journal of Metalcasting* 10 (1) : 88–99.
7. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Geopolimer> [dostęp: 31.01.2017].
8. Pezarski F., E. Smoluchowska, I. Izdebska-Szanda. 2008. „Zastosowanie spoiwa geopolimerowego do produkcji odlewów ze stopów żelaza”. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 48 (2) : 19–34.