

**Wpływ sposobu nagrzewania i grubości rdzeni pomiarowych wykonanych z oliwinowych mas formierskich z krzemianem sodu na odkształcalność badaną na urządzeniu *DMA Hot-Distortion***

The influence of heating method and the thickness of measuring cores made of olivine moulding sands with sodium silicate on the deformation tested with a *DMA Hot-Distortion* device

Mateusz Stachowicz<sup>1\*</sup>, Patrycja Paduchowicz<sup>1</sup>

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

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

\*Corresponding author: [mateusz.stachowicz@pwr.edu.pl](mailto:mateusz.stachowicz@pwr.edu.pl)

Received: 12.12.2018. Accepted in revised form: 28.02.2019.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.22

### Streszczenie

W artykule podjęto tematykę wpływu podwyższonej temperatury na oliwinowe masy formierskie i rdzeniowe ze spoiwem nieorganicznym z grupy niemodyfikowanych gatunków uwodnionego krzemianu sodu. Sporządzone w warunkach laboratoryjnych masy na osnowie piasku oliwinowego formowano w kształtki prostopadłościennie do badania przemieszczenia wolnego końca rdzenia pomiarowego w warunkach otoczenia o podwyższonej temperaturze. W celu utwardzenia, wykonane z mas oliwinowych, kształtki poddawano szybkiemu nagrzewaniu mikrofalowemu w piecu z generatorem częstotliwości fali elektromagnetycznej  $f = 2,45$  GHz i mocy wyjściowej 1000 W, w czasie 180 s. Badania przeprowadzono na kształtkach prostopadłościennych formowanych we wnęce o wymiarach:  $25,9 \times G \times 120,4$  mm, gdzie  $G = 6$  lub 8, lub 10 mm. Pomiar przemieszczeń wolnego końca kształtek rdzeni pomiarowych przeprowadzono na zautomatyzowanym urządzeniu laboratoryjnym *DMA Hot-Distortion*. W trakcie pomiarów zastosowano trzy sposoby ogrzewania powierzchni prostopadłościennych kształtek spotykanych w technice pomiarowej odkształceń *H-D* (*Hot Distortion Test*): grzanie od dołu, grzanie od dołu i od góry (*Modified Hot Distortion Test*) oraz ogrzewanie tylko od góry. Przemieszczenie wolnego końca kształtek prostopadłościennych, w zależności od grubości oraz sposobów ogrzewania ich powierzchni, posłużyło do wstępnej oceny zachowania utwardzonych mikrofalowo mas oliwinowych z krzemianem sodu w warunkach otoczenia o podwyższonej temperaturze.

### Abstract

The article raises the issue of the influence of increased temperature on olivine moulding and core sands with an inorganic binder from the group of unmodified kinds of hydrated sodium silicates. Produced at laboratory conditions, moulding sands with an olivine sand matrix were formed into cuboidal specimens to test the deformation of the free measuring core end at conditions of increased temperature. In order to harden, the measuring cores made of olivine moulding sands fast microwave heating was applied to which used was a furnace with an electromagnetic wave frequency generator  $f = 2.45$  GHz and output power of 1000 W, in the time period of 180 s. Tests were carried out on cuboidal specimens moulded in a cavity with the dimensions  $25.9 \times G \times 120.4$  mm, where  $G = 6$  or 8, or 10 mm. Measurements of deformation of the free specimen end of the measuring cores were conducted on an automated laboratory *DMA Hot-Distortion* apparatus. During the measurements three techniques were used to heat the surfaces of cuboidal specimens which are applied in the *Hot Distortion Test*: heating from the bottom, heating from the bottom and the top (*Modified Hot Distortion Test*), and heating only from the top. The deformation of the free end of cuboidal specimens, depending on the thickness and heating techniques of their surfaces, served for the initial assessment of the behaviour of microwave hardened olivine moulding sands with sodium silicate at conditions of increased temperature.

**Słowa kluczowe:** odlewnictwo, oliwinowa masa formierska, uwodniony krzemian sodu, odkształcenie plastyczne, nagrzewanie mikrofalowe

## 1. Wprowadzenie

Istotne znaczenie z punktu praktyki odlewniczej ma stabilność wymiarowa form i rdzeni odlewniczych, ponieważ przekłada się ona na utrzymanie założonych wymiarów dla odlewów. O ile masy formierskie i rdzeniowe ze spoiwami są stabilne wymiarowo w temperaturze otoczenia, to w przypadku podwyższonej temperatury elementy form jednorazowych wykazują różną odkształcalność. Odkształcalność określana jest jako zdolność masy formierskiej lub rdzeniowej do zmiany kształtu lub wymiarów [1]. Jest to cecha materiału formy związana z plastycznością (odkształceniem plastycznym) składników masy. Reasumując, odkształcalność wskazuje zdolność masy do zmiany kształtu przy zachowaniu ciągłości materiału formy lub rdzenia.

Porównawcze badania odkształcalności mas sprzyjają eliminacji części wad odlewniczych, np. niedotrzymania wymiarów i kształtu wytwarzanych części maszyn i urządzeń. Poruszana na przestrzeni lat dyskusja nad problematyką plastyczności mas w podwyższonej temperaturze, w szczególności mas ze spoiwami organicznymi i nieorganicznymi, nie doprowadziła do stworzenia jednolitej metodologii badań nad odkształcalnością. Brak jednolitych wytycznych sprzyja jednak rozwijaniu technik pomiarowych wpisujących się w dziedzinę badań nad odkształcalnością form i rdzeni pod ogólną nazwą *Hot Distortion Tests*, w skrócie HDT lub H-D [2–5]. Badania te, a w zasadzie kilka typów stosowanych w nich aparatów do wyznaczania odkształcenia pod wpływem podwyższonej temperatury [2,6–10], pozwalają na wstępną analizę porównawczą zachowania mas formierskich i rdzeniowych za pomocą krzywych obrazujących ich skłonność do odkształcania się.

Jak podaje literatura [2,3], standardowe kształtki przeznaczone do pomiarów H-D wykonywane z mas ze spoiwem organicznym do formowania skorupowego powinny mieć grubość wynoszącą około 6 mm. Do wytwarzania kształtek stosuje się foremkę o wymiarach: 25,4 × 6,35 × 101,6 mm (oryginalnie podane wymiary to: 1 × ¼ × 4 in). Ze względu na wspomniany brak jednolitych wytycznych w kwestii stosowania w badaniach H-D normowanych kształtek można uznać przytoczone wymiary jako wyjściowe. Na rysunku 1 pokazano krzywą termicznego odkształcenia masy formierskiej, której kształt uzyskano na skutek ogrzewania kształtki prostopadłościennej od dołu (HDT) za pomocą płomienia gazowego. Kształt otrzymanej w trakcie pomiaru krzywej umożliwia, zgodnie z metodą opracowaną przez BCIRA (*British Cast Iron Research Association*) [2,3], wstępną interpretację zachowania się masy w warunkach miejscowego występowania podwyższonej temperatury.

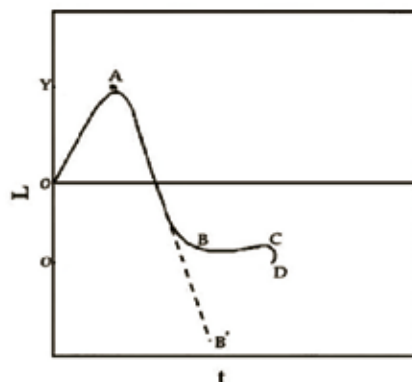
**Keywords:** foundry engineering, olivine moulding sand, hydrated sodium silicate, thermal deformation, microwave heating

## 1. Introduction

From the point of view of foundry practice, dimensional stability of casting moulds and cores is significant as it translates into maintaining the assumed dimensions of castings. Insofar as moulding and core sands with binders are dimensionally stable at ambient temperature, in case of increased temperature, elements of single-use moulds show varied formability. Formability is defined as the ability of moulding or core sand to change the shape and dimensions [1]. It is a feature of the mould material related to distortion (thermal deformation) of ingredients of the moulding sand. To sum up, deformation indicates the ability of the moulding sand to change the shape while maintaining the consistency of the mould or core material.

Comparative tests of deformation of moulding sands are inductive to the elimination of some casting defects, e.g. failure to maintain dimensions and shape of manufactured parts of machines and apparatus. The discussion of plasticity of moulding sands at increased temperatures which has been going over the years, especially on moulding sands with organic and inorganic binders, has not led to the creation of unified research methodology of deformation. However, the lack of uniform guidelines leads to the development of measurement techniques falling into the field of distortion tests of moulds and cores under the general term of Hot Distortion Tests, in short HDT or H-D [2–5]. These tests, and in particular, a few types of devices applied in them used to indicate deformation under the influence of increased temperature [2,6–10] allow for an initial comparative analysis of the behaviour of moulding and core sands with the use of curves illustrating their tendency to deform.

According to the field literature [2,3] standard specimens designated for H-D tests made of moulding sands with an organic binder for shell moulds should have thickness of 6 mm. To produce specimens a mould is used with the following dimensions of cavity: 25.4 × 6.35 × 101.6 mm (the original dimensions are: 1 × ¼ × 4 in). Due to the aforementioned lack of uniform guidelines in the aspect of using standardised specimens in H-D tests the above-mentioned dimensions can be assumed as initial ones. In Figure 1 a hot distortion curve is presented for moulding sand, whose shape was achieved as a result of heating the cuboidal specimen from the bottom (HDT) with the use of a gas flame. The shape of the curve obtained during the test allows, according to the method developed by BCIRA (*British Cast Iron Research Association*) [2,3], the initial interpretation of the behaviour of the moulding sand under conditions of locally increased temperature.



Rys. 1. Wykres krzywej odkształcenia  $L(t)$  na podstawie przemieszczeń wolnego końca kształtki masy formierskiej podczas badania HDT, z możliwymi do interpretacji odcinkami oznaczonymi charakterystycznymi punktami, opracowane na podstawie [2,3] i wyników własnych obserwacji (odcinek A-B') poczynionych podczas badań mas wiązanych uwodnionym krzemianem sodu [11,12] utwardzanych metodami fizycznymi (suszeniem klasycznym i nagrzewaniem mikrofalowym)

Fig. 1. Graph of the hot distortion curve  $L(t)$  on the basis of the dislocation of the free specimen end of the moulding sand during the HDT with sections possible to interpret marked with a characteristic point, developed on the basis [2,3] and results of own observations (section A-B') made during tests of moulding sands bonded with hydrated sodium silicate [11,12], hardened with physical methods (classical drying and microwave heating)

Aby uporządkować interpretacyjnie analizy planowanych badań, pokazany na [rysunku 1](#) przebieg przemieszczenia (mm) wolnego końca kształtki w trakcie pomiarów H-D będzie nazywany odkształceniem ( $L$ ) rdzenia pomiarowego w czasie ( $t$ ). Pomiar rozpoczyna się w punkcie 0. Na skutek ogrzewania kształtki od dołu (HDT), w początkowej fazie masa formierska/rdzeniowa odkształca się od źródła ciepła (odcinek 0-A) na skutek rozszerzalności cieplnej dolnej warstwy osnowy i dodatków materiału formierskiego. Kontynuacja próby HDT, z upływem czasu, na skutek poszerzania strefy nagrzewania kształtki wywołanej transportem ciepła (co zależy od przewodności i pojemności cieplnej składników porowatej masy formierskiej) stopniowo wyrównuje rozkład temperatury. Efektem poszerzania się strefy nagrzewanej masy jest m.in. uplastycznienie się mostów spoiwa (odcinek A-B). W tych warunkach, odkształcenie na odcinku A-B wynika z opadania wolnego końca kształtki i następuje pod wpływem ciężaru własnego, aż do zakończenia pomiaru (odcinek A-B'). Pomiar kończy się na skutek osiągnięcia przez wolny koniec próbki rdzenia pomiarowego założonego przemieszczenia lub zniszczenia kształtki.

W przypadku zahamowania dynamiki zjawisk wynikających z plastyczności masy i wystąpienia zjawiska umacniania się mostów spoiwa obserwuje się przebieg krzywej zbliżony charakterem do odcinka B-C. W miarę upływu czasu, na skutek kontynuacji ogrzewania, postępuje degradacja termiczna składników mieszaniny formierskiej, która może prowadzić do utraty spójności spoiwa, a w konsekwencji do uszkodzenia kształtki (punkt D) [13,14,15].

W literaturze [1] dotyczącej badań plastyczności mas formierskich i rdzeniowych w podwyższonej temperaturze można spotkać również inne zalecenia dotyczące

In order to organise the interpretation of planned tests analyses, the course of dislocation (mm), indicated in [Figure 1](#), of the free specimen end during H-D measurements will be further referred to as deformation ( $L$ ) of measuring core in time ( $t$ ). The measurement starts in point 0. As a result of heating the specimen from the bottom (HDT), in the initial phase the moulding/core sand deforms from the source of heat (section 0-A), as a result of thermal expansion of the lower layer of the matrix and additions of moulding materials. The continuation of the HDT test, with time, as a result of expanding the heated area of specimen caused by heat transfer (which depends on thermal conductivity and capacity of ingredients of the porous moulding sand), gradually levels the temperature distribution. The effect of expanding the heated area of the moulding sand, among others, is the plasticity of binder bridges (section A-B). Under these conditions, deformation at the section A-B results from the deflection of the free specimen end and occurs under the influence of own weight, until the end of the measurement (section A-B'). The measurement finishes as a result of achieving, by the free specimen (measuring core) end, the assumed dislocation or specimen damage.

In case of the inhibition of the dynamics of phenomena resulting from plasticity of the moulding sand and the occurrence of phenomena of strengthening the binder bridges it can be observed that the course of the curve is similar to the section B-C. With time, as a consequence of continued heating, the thermal degradation of the ingredients of moulding sands proceeds, which can lead to the loss of consistency of the binder, and as a result to the damage of the specimen (point D) [13,14,15].

In the literature [1] related to plasticity studies of moulding and core sands at increased temperature we

stosowania foremek o innych wymiarach, tj.:  $25,4 \times 7,9 \times 101,6$  mm do wytwarzania kształtek testowych. Kształtki prostokątne o zwiększonej grubości do około 8 mm mogą być stosowane, na przykład w innych niż masy na formy skorupowe technologiach spoiw organicznych i nieorganicznych. W niniejszym artykule, ze względu na nieunormowaną metodykę badań nad odkształcalnością elementów form odlewniczych, podjęto próbę dyskusji nad wpływem sposobu ogrzewania i grubości rdzeni pomiarowych przeznaczonych do badań H-D.

## 2. Metoda i materiały do badań

Mając na uwadze złożoność problemu deformacji formy i rdzenia pod wpływem podwyższonej temperatury, zaproponowano trzy konfiguracje oddziaływania termicznego na powierzchnię kształtek prostokątnych:

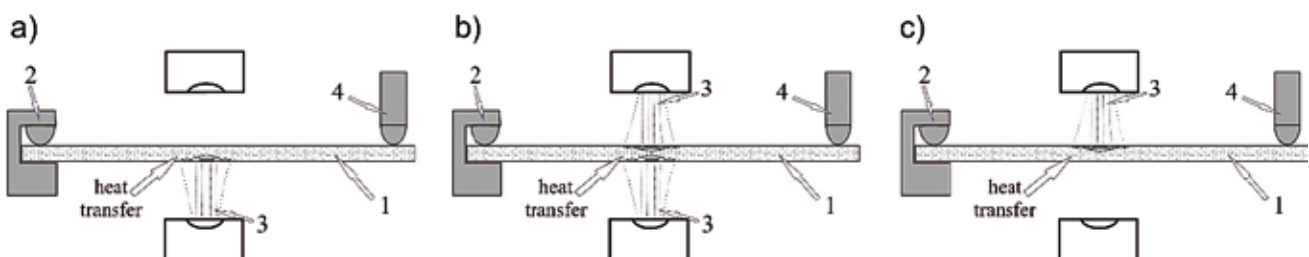
- typową, stosowaną w badaniach HDT (H-D), w której stosuje się grzanie od dołu kształtki dla symulacji promieniowania od lustra podnoszącego się ciekłego metalu (rys. 2a),
- zmodyfikowaną (mHDT), w której grzanie realizowane jest od dołu i od góry, tworząc dla górnej powierzchni kształtki warunki równoległego oddziaływania cieplnego przez mieszaninę: powietrza i gazów (rys. 2b),
- grzanie tylko od góry, kiedy powierzchnie elementów wnętrza formy nie są bezpośrednio ogrzewane promieniowaniem cieplnym pochodzącym od lustra stopu (rys. 2c), a tylko obecnością mieszaniny rozgrzanych: powietrza i gazów.

can also find other recommendations regarding the use of moulds with different dimensions of mould cavity, i.e.  $25.4 \times 7.9 \times 101.6$  mm to produce test specimens. Cuboidal specimens with extended thickness to approx. 8 mm can be applied, for example, in technologies of organic and inorganic binders other than moulding sands for shell moulds. In the present article, due to non-standardised test methodology of deformation of casting moulds' elements, an attempt was made to discuss the influence of the heating technique and the thickness of measuring cores designated for H-D tests.

## 2. Method and test materials

Taking into account the complexity of the problem of mould and core deformation under the influence of increased temperature three configurations of thermal impact on the surface of cuboidal specimens were used:

- typical, applied in HDT (H-D) tests, in which heating the specimen from the bottom is conducted to simulate radiation from the surface of rising liquid metal (Fig. 2a),
- modified (mHDT), in which heating is realized from the bottom and the top, creating for the upper surface of the specimen conditions of parallel thermal impact from the mixture: air and gases (Fig. 2b),
- heating only from the top, when the surfaces of the mould cavity are not directly heated by the radiation coming from the surface of the molten metal (Fig. 2c), and only by the presence of the mixture of heated: air and gases.



Rys. 2. Konfiguracje źródeł ciepła automatu pomiarowego DMA Hot-Distortion wykonanego dla Politechniki Wrocławskiej do ogrzewania kształtek: a) od dołu (HDT), b) od dołu i od góry (mHDT), c) od góry. Oznaczenia na rysunku: 1) kształtka prostokątna z utwardzonej masy stanowiąca tzw. rdzeń pomiarowy, 2) uchwyt kształtki, 3) emisja ciepła z grzałek ceramicznych, 4) czujnik przemieszczenia wolnego końca kształtki

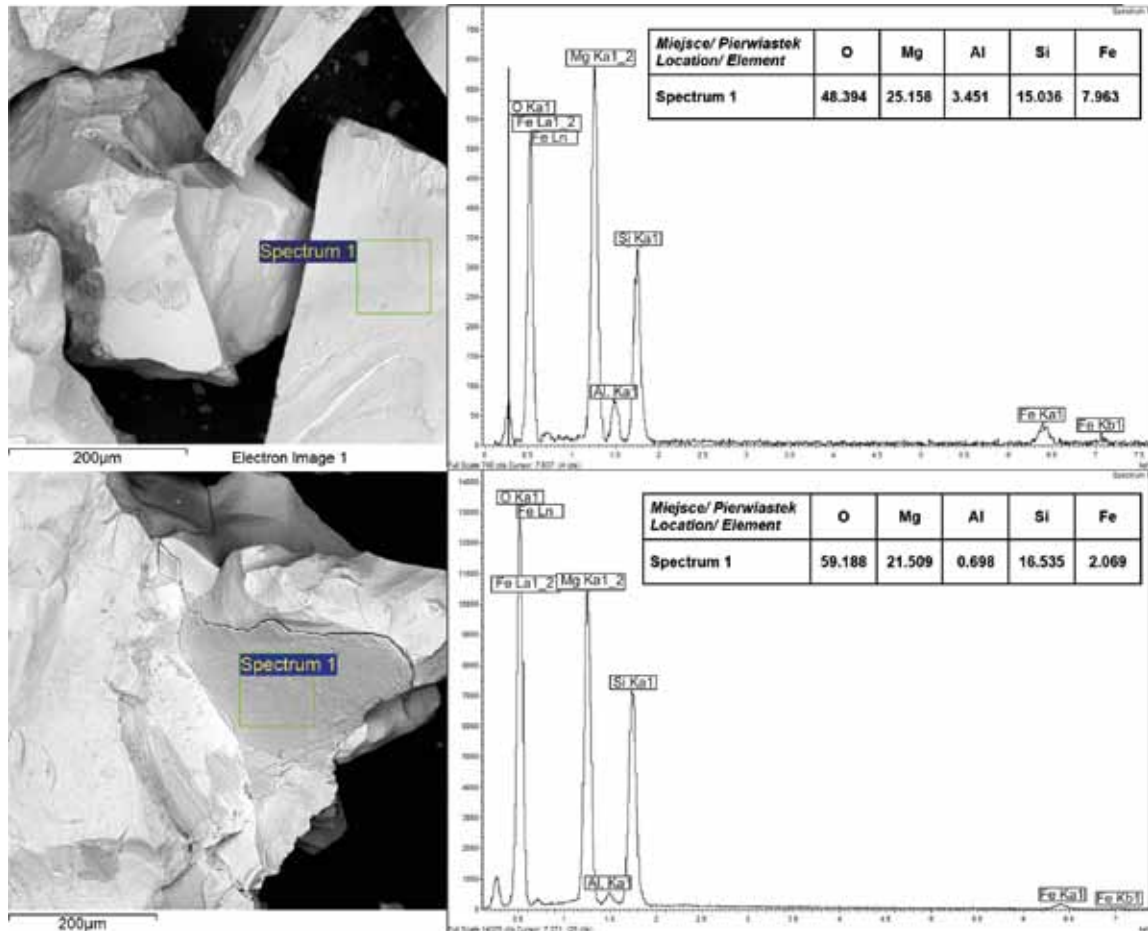
Fig. 2. Configurations of heat sources of the DMA Hot-Distortion measuring device manufactured for Politechnika Wroclawska to heat specimens: a) from the bottom (HDT), b) from the bottom and the top (mHDT), c) from the top. Legend: 1) cuboidal specimen made of hardened moulding sand constituting the so-called measuring core, 2) specimen's grip, 3) heat emission from ceramic heaters, 4) sensor of the dislocation of the free specimen end

Badania wpływu sposobu nagrzewania i grubości rdzeni pomiarowych przeprowadzono na urządzeniu pomiarowym polskiej produkcji *DMA Hot-Distortion* firmy Multiserw-Morek [9] wykonanym dla Katedry Odlewnictwa, Tworzyw Sztucznych i Automatyki Politechniki Wrocławskiej. Ceramiczne grzałki urządzenia, w zależności od przyjętej w trakcie pomiaru konfiguracji uruchomionych źródeł promieniowania cieplnego (rys. 2), zostały wstępnie nagrzane do temperatury  $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . W momencie rozpoczęcia pomiaru grzałki były nasuwane w bezpośrednią przestrzeń wokół kształtki. Na wolnym końcu kształtki prostopadłościenną, tzw. rdzeniu pomiarowym umieszczony jest czujnik przetwarzający przemieszczenie jako miarę odkształcenia ( $L$ ) mierzone z dokładnością do 0,001 mm. Jednocześnie urządzenie rozpoczyna rejestrację przemieszczenia wolnego końca kształtki w funkcji czasu  $t$  [s], tworząc krzywe odkształcenia. W trakcie prób rejestrowano również temperaturę w pobliżu kształtki nieruchomą termoparą płaszczoową typu K o średnicy 3 mm ulokowaną, w zależności od położenia próbki w uchwycie, od 1 do 3 milimetrów od jej powierzchni bocznej. Pomiar przeprowadzano do momentu osiągnięcia przez rdzeń pomiarowy odkształcenia ( $L$ ) ustawionego na 7 mm lub gdy czas pomiaru przekroczył 15 min. Odsuwano wtedy grzałki od zestawu pomiarowego (rys. 2) i usuwano kształtkę z uchwytu. Gdy temperatura mierzona termoparą w otoczeniu kształtki spadała poniżej  $50^{\circ}\text{C}$ , w uchwycie montowano kolejny rdzeń pomiarowy z badanej masy. Badania powtarzano trzykrotnie.

Wśród alternatywnych dla kwarcowej osnowy formierskich, o niewygórowanej cenie i zbliżonej gęstości nasypowej można wymienić piasek oliwinowy. Oliwin, minerał izomorficzny [16] tworzony jest przez forsteryt ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) i fajalit ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). W formierskim piasku oliwinowym, ze względu na ograniczenie obecność związków Fe powodujących obniżenie temperatury spiekania, stosunek forsterytu do fajalitu powinien wynosić 9:1. Piasek formierski uzyskuje się po skruszeniu skał dunitowych, dlatego ziarna mają kształt nieregularny (rys. 3). Zwykle w składzie mineralogicznym występują pierwiastki, takie jak: Al i Ca, rzadziej Ti. Formierski piasek oliwinowy jest osnową o równomiernej i mniejszej od piasku kwarcowego rozszerzalności cieplnej. Dobra ogniotrwałość piasku oliwinowego wpływa na zakres stosowania tej osnowy głównie w odlewnictwie staliwa. Ogniotrwałość zależy od składu chemicznego, w tym od zawartości związków Fe. Ze względu na mniejszą zwilżalność powierzchni od piasku kwarcowego osnowa oliwinowa nadaje się do wytwarzania między innymi rdzeni odlewniczych silnie obciążonych cieplnie. W badaniach dylatometrycznych [16] prowadzonych w temperaturze  $900^{\circ}\text{C}$  wykazano, że piasek oliwinowy cechuje rozszerzalność liniowa wynosząca 1,02%. W przypadku piasku kwarcowego, dla tej samej temperatury, rozszerzalność liniowa jest większa i wynosi od 1,40% do 1,56%.

The investigation of the influence of the heating method and the thickness of measuring cores was conducted with the use of a Polish DMA Hot-Distortion measuring device by Multiserw-Morek [9] manufactured for the Department of Foundry Engineering, Plastics and Automation of Politechnika Wroclawska. Ceramic heaters of the device, depending on the configuration of operating sources of heat radiation assumed during the measurement (Fig. 2), were initially heated to a temperature of  $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . At the moment of the measurement start the heaters were slid into the spaces directly around the specimen. A sensor was placed at the free end of the cuboidal specimen, the so-called measuring core, which processed the dislocation as the measurement of deformation ( $L$ ), calculated with the accuracy of 0.001 mm. Simultaneously, the device started registering the dislocation of the free specimen end in time function  $t$  [s], creating a curved deformation. During the test the temperature in the proximity of the specimen was also registered with an immobile sheathed thermocouple type K with the diameter of 3 mm placed, depending on the position of the sample in the specimen's grip, 1–3 millimetres next to its side surface. The measurement was conducted to the moment when the measuring core reached deformation ( $L$ ) set at 7 mm or when the measurement time exceeded 15 min. Then, the heaters were removed from the measuring set (Fig. 2) and the specimen was removed from the grip. When the temperature measured with the thermocouple in the proximity of the specimen decreased below  $50^{\circ}\text{C}$ , another measuring core from the tested moulding sand was fixed in the grip. The tests were repeated three times.

Olivine sand can be enumerated among alternatives for the quartz moulding matrices as having a reasonable price and similar bulk density. Olivine, an isomorphic mineral [16], is created by forsterite ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) and fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). In the olivine moulding sand, due to the limitation of the presence of Fe compounds causing lowering the sintering temperature, the ratio of forsterite to fayalite should be 9:1. Moulding sand is achieved by crumbling dunite rocks, that is why the grains have irregular shapes (Fig. 3). Normally, in the mineralogical composition there are elements, such as: Al and Ca, less often Ti. Olivine moulding sand is a matrix with uniform and lower than quartz sand thermal expansion. Good refractoriness depends on the chemical composition, including the content of Fe compounds. Due to lower wettability of the surface, than in case of quartz sand, the olivine matrix is used, among others, for producing thermally loaded moulding cores. In dilatometric tests [16] carried out at the temperature of  $900^{\circ}\text{C}$  it was proven that olivine sand is characteristic of linear thermal expansion of 1.02%. In case of quartz sand, for the same temperature, linear thermal expansion is higher and reaches from 1.40% to 1.56%.



Rys. 3. Powierzchnia piasku oliwinowego z zaznaczonymi powierzchniami, na których wykonywano analizę składu chemicznego, dane w % mas. Widma pomiarów intensywności występowania pierwiastków uzyskano z sondy EDS/EDX  
 Fig. 3. The surface of olivine with marked areas on which the analysis of the chemical composition was conducted, data in weight %. Spectra of intensity measurements of elements incidence were achieved from the EDS/EDX probe

Jako spoiwo mas oliwinowych można stosować uwodniony krzemian sodu, które podnosi przewodnictwo cieplne masy w stosunku do wiązań bentonitowych [17]. Dodatek spoiwa do osnowy oliwinowej nie powinien odbiegać od zawartości stosowanej dla mas na osnowie kwarcowej [16].

Osnowę badanych mas stanowił formierski piasek oliwinowy LE50 z norweskiego złoża o składzie chemicznym podanym na rysunku 3 i liczbie ziarnistości  $L = 49,8$  i średniej wielkości ziaren  $dL = 0,255$ . Frakcja główna (94,62%) zebrana się na sitach o numerach: 0,20/0,315/0,16.

Sporządzona masa oliwinowa miała następujący skład:

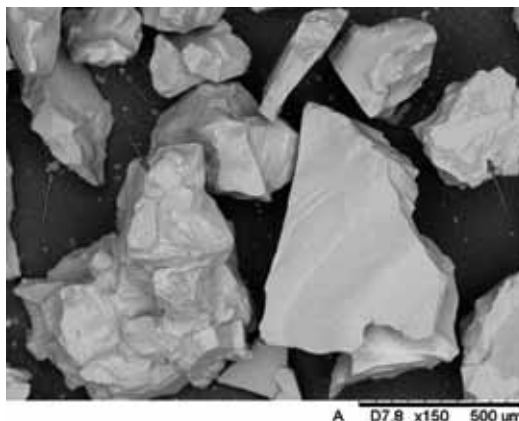
- 100 cz. wag. piasku oliwinowego (6000 g),
- 1,0 cz. wag. wody, dodatek zwilżający osnowę stosowano ze względu na stosunkowo dużą zawartość drobnych frakcji (0,34%) zebranych na sitach o numerach: 0,071, 0,051 i denku, których obecność również potwierdziły obserwacje SEM (rys. 4),

Hydrated sodium silicate can be used as a binder for olivine moulding sands, which increases thermal conductivity of the moulding sand in relation to bentonite bonding [17]. An addition of the binder to the olivine matrix should not diverge from the content applied for moulding sands with a quartz matrix [16].

The matrix of tested moulding sands constituted olivine moulding sand LE50 from a Norwegian deposit with the chemical composition presented in Figure 3 and grain number  $L = 49.8$  and the average grain size  $dL = 0.255$ . The main fraction (94.62%) was gathered on sieves with numbers: 0.20/0.315/0.16.

Prepared olivine moulding sand had the following composition:

- 100 parts by weight of olivine sand (6000 g),
- 1.0 part by weight of water, an addition wetting the matrix was used due to relatively high content of fine fractions (0.34%) collected on the sieves with the numbers: 0.071, 0.051 and at the bottom, whose presence was also proven by SEM observations (Fig. 4),



Rys. 4. Widok powierzchni ziaren osnowy oliwinowej wraz z obecnymi na jej powierzchni drobnymi frakcjami, miejsca koncentracji zaznaczono strzałkami. Mikroskopia SEM

Fig. 4. The view of the olivine matrix grain surface together with fine fractions, areas of concentration marked with arrows. SEM microscopy

- 1,5 cz. wag. uwodnionego krzemianu sodu gatunku 145, pochodzącego z Zakładów Chemicznych Rudniki SA (tabela 1).
- 1.5 parts by weight of hydrated sodium silicate type 145, from Zakłady Chemiczne Rudniki SA (Table 1).

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne spoiwa stosowanego do sporządzania oliwinowych mas z krzemianem sodu  
Table 1. Physical-chemical properties of the binder applied for preparing olivine moulding sands with sodium silicate

Gatunek spoiwa / Binder type	Wymagany moduł molowy (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O) / Required mole module (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)	Zmierzony moduł molowy (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O) / Measured mole module (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)	Zawartość tlenków (SiO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> O), min. % / Oxides content (SiO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> O), min. %	Zmierzona zawartość tlenków (SiO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> O), % / Measured oxides content (SiO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> O), %	Gęstość (20°C), g/cm <sup>3</sup> / Density (20°C), g/cm <sup>3</sup>	Zmierzona gęstość (20°C), g/cm <sup>3</sup> / Measured density (20°C), g/cm <sup>3</sup>	Lepkość dynamiczna, min., (P · s) / Dynamic viscosity, min., (P · s)
145	2,4–2,6	2,5	39,0	41,5	1,45–1,48	1,47	0,1

Formierski piasek oliwinowy wsypywano do komory mieszarki wstępowej, po uruchomieniu mieszania dodawano wodę. Proces zwilżania osnowy kontynuowano przez 60 s. Dodatek wody skutecznie ograniczał niekorzystne zjawisko pylenia w trakcie wstępnego mieszania. Po dodaniu spoiwa masę mieszano przez kolejne 180 s.

Sporządzoną masę przechowywano w szczelnym pojemniku przez 10 minut, następnie wykonano z niej próbki rdzeni pomiarowych za pomocą foremek o wymiarach wnek: 25,9 × 6,0 × 120,4 mm lub 25,9 × 8,0 × 120,4 mm, lub 25,9 × 10,0 × 120,4 mm. Masę wsypywano do foremek i zagęszczano pięciokrotnie ubijakiem laboratoryjnym LU-1 [11]. Zaformowane próbki nagrzewano mikrofalowo ( $f = 2,45$  GHz) przez 180 s w komorze pieca mikrofalowego. W trakcie procesu nagrzewania stosowano stałą moc wyjściową mikrofal równą 1000 W oraz obrót wsadu. Po ostygnięciu rdzeni pomiarowych ważono je na wadze laboratoryjnej Ohaus PA4102CM/1 z dokładnością do 0,01 g. Pomiar

Olivine moulding sand was tipped into a ribbon mixer chamber; water was added after the start of mixing. The process of wetting the matrix was continued for 60 s. The addition of water effectively limited the unfavourable phenomenon of dusting during the initial mixing. After adding the binder the moulding sand was mixed for next 180 s.

The prepared moulding sand was kept in a sealed container for 10 minutes, and then specimens of measuring cores were made with the use of a moulds with the following dimensions of cavities: 25.9 × 6.0 × 120.4 mm or 25.9 × 8.0 × 120.4 mm, or 25.9 × 10.0 × 120.4 mm. The moulding sand was tipped into the moulds and compacted five times with a laboratory rammer LU-1 [11]. Moulded specimens were microwave heated ( $f = 2.45$  GHz) for 180 s in the chamber of the microwave furnace. During the process of heating constant microwave output power of 1000 was applied and the charge was rotated. After the measuring cores cooled down they were weighted on a laboratory weight

wagi rdzeni pomiarowych dokonywano w celu potwierdzenia powtarzalności dla procesu formowania z zagęszczaniem próbek o przyjętych trzech grubościach. Średnia gęstość pozorna próbek, której wpływ na uzyskiwaną po procesie utwardzania masy wytrzymałość stwierdzono w [18,19] wynosiła:  $1,545 \pm 0,075 \text{ g/cm}^3$ , co można uznać za wynik powtarzalny.

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań odkształcalności rdzeni pomiarowych o różnych grubościach i sposobach nagrzewania ich powierzchni przedstawiono na rysunkach 5–7. Na potrzeby wykonania analiz porównawczych odkształcalności mas na podstawie uzyskanych krzywych odkształceń ( $L$ ) w czasie ( $t$ ) zastosowano poniżej opisaną procedurę postępowania z surowymi danymi [20] zawartymi w plikach z rozszerzeniem .txt wygenerowanymi przez oprogramowanie urządzenia DMA Hot-Distortion [9]:

- etap pierwszy polegał na ujednoczeniu w dziedzinie czasu odkształceń ( $L$ ) trzech próbek rdzeni pomiarowych za pomocą zabiegu skrócenia dwóch ( $t_{norm}$ ) najdłuższych pomiarów. Zabieg ten był możliwy, ponieważ kształt krzywych przemieszczeń wolnego końca kształtek prostopadłościennych był powtarzalny i żaden z rdzeni pomiarowych nie utracił spójności na skutek ogrzewania;
- etap drugi polegał na obliczeniu w każdym z przedziałów próbkowania wartości średniej arytmetycznej z trzech pomiarów przemieszczenia (mm) dla sporządzenia krzywych odkształcenia uśrednionego ( $L_{avg}$ ).

Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono krzywe termicznego odkształcenia uzyskane z połączenia punktów pomiarowych dla uśrednionych arytmetycznie wartości odkształcenia. Rysunek 5 przedstawia odkształcenie średnie ( $L_{avg}$ ) próbek prostopadłościennych o grubości 6 mm dla trzech zastosowanych metod ogrzewania ich powierzchni.

Dla kształtek z masy oliwinowej o grubości 6 mm (rys. 5) uzyskano po uśrednieniu następujące wartości: dla podgrzewanych od dołu (HDT) pomiar trwał najdłużej, bo  $t_{norm} = 85 \text{ s}$  (po ujednoczeniu w dziedzinie czasu) i pozwolił uzyskać odkształcenie  $L_{avg} = 5,74 \text{ mm}$ . Kształtki ogrzewane tylko od góry odkształciły się o 5,24 mm ( $L_{avg}$ ) po upływie  $t_{norm} = 58 \text{ s}$ . Kształtki grzane z obu stron (mHDT) zdeformowały się najszybciej, bo w  $t_{norm} = 32 \text{ s}$ , osiągając odkształcenie  $L_{avg} = 6,85 \text{ mm}$ .

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów odkształcenia średniego ( $L_{avg}$ ) kształtek o grubości 8 mm.

Ohaus PA4102CM/1 with the accuracy of 0.01 g. The weighing of measuring cores was conducted in order to confirm the repeatability of the process of moulding with compacted specimens of the three assumed thicknesses. The average apparent density of a specimen, which influenced the strength of moulding sand after the process of hardening and was confirmed in [18,19], amounted to:  $1.545 \pm 0.075 \text{ g/cm}^3$ , which can be recognised as a repeatable result.

### 3. Test results

Test results of deformation of measuring cores with various thicknesses and methods of heating of their surfaces are presented in Figures 5–7. For the purposes of making comparative analyses of deformation of moulding sands on the basis of the achieved deformation curves ( $L$ ) in time ( $t$ ) the following procedure was used of processing raw data [20] included in files with the extension .txt generated by the software of the DMA Hot-Distortion device [9]:

- in the first stage deformations ( $L$ ) of three specimens of measuring cores were normalised in the domain of time by omitting two longest measurements ( $t_{norm}$ ). It was possible because the shape of deformation curves of the free cuboidal specimen end was repeatable and none of the measuring cores lost its consistency as a result of heating;
- in the second stage the arithmetical average from three measurements of dislocation (mm) was calculated in each sampling interval in order to draw average deformation curves ( $L_{avg}$ ).

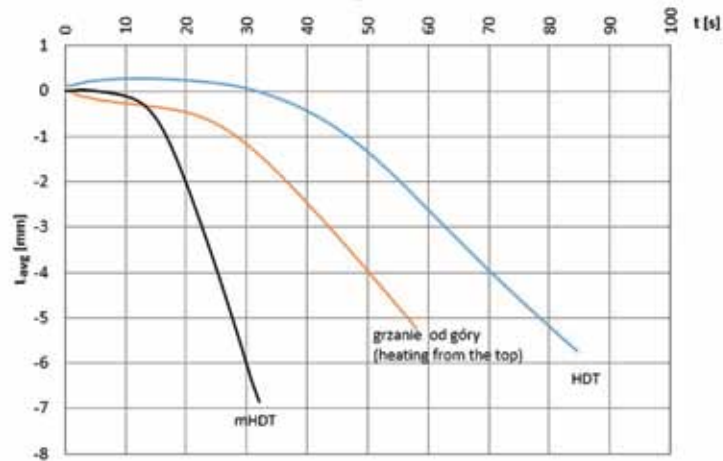
Figures 5, 6 and 7 present thermal deformation curves achieved from the connection of measuring points for arithmetically averaged values of the deformation. Figure 5 presents average deformation ( $L_{avg}$ ) of cuboidal specimens with thickness of 6 mm as well as three methods of heating their surfaces.

For specimens made of olive moulding sand with 6 mm thickness (Fig. 5) after averaging the following values were achieved: heated from the bottom (HDT) the measurement was the longest, as it lasted  $t_{norm} = 85 \text{ s}$  (after standardising in the time domain), and achieved deformation  $L_{avg} = 5.74 \text{ mm}$ .

Specimens heated only from the top deformed by 5.24 mm ( $L_{avg}$ ) after  $t_{norm} = 58 \text{ s}$ . Specimens heated from both sides (mHDT) deformed the fastest, i.e. in  $t_{norm} = 32 \text{ s}$ , reaching the deformation  $L_{avg} = 6.85 \text{ mm}$ .

Figure 6 presents the measurement results of specimens' deformation ( $L_{avg}$ ) with 8 mm thickness.



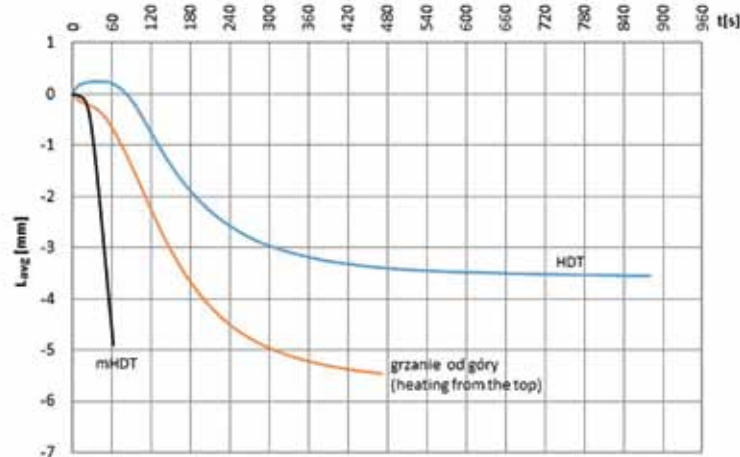


Rys. 5. Krzywe termicznego odkształcenia rdzeni pomiarowych o grubości 6 mm z utwardzonej nagrzewaniem mikrofalowym masy oliwinowej z krzemianem sodu w zależności od sposobu ich ogrzewania: HDT, mHDT, grzanie tylko od góry

Fig. 5. Thermal deformation curves of measuring cores with 6 mm thickness made of moulding sand with sodium silicate hardened by microwave heating in relation to the method of their heating: HDT, mHDT, heating only from the top

Dla kształtek z masy oliwinowej o grubości 8 mm (rys. 6) uzyskano po uśrednieniu następujące wartości: dla podgrzewanych od dołu (HDT)  $L_{avg} = 3,55$  mm i zostało osiągnięte w czasie  $t_{norm} = 885$  s. Ogrzewane tylko od góry kształtki odkształciły się o  $L_{avg} = 5,46$  mm po upływie  $t_{norm} = 471$  s. Grzanie obustronne (mHDT) rdzeni pomiarowych, podobnie jak w przypadku kształtek 6 mm, spowodowało deformację o  $L_{avg} = 4,90$  mm w najkrótszym czasie  $t_{norm} = 63$  s.

For specimens made of olive moulding sand with 8 mm thickness (Fig. 6) after averaging the following values were achieved: heated from the bottom (HDT)  $L_{avg} = 3.55$  mm in time  $t_{norm} = 885$  s. Specimens heated only from the top deformed by  $L_{avg} = 4.90$  mm in the shortest time  $t_{norm} = 63$  s.

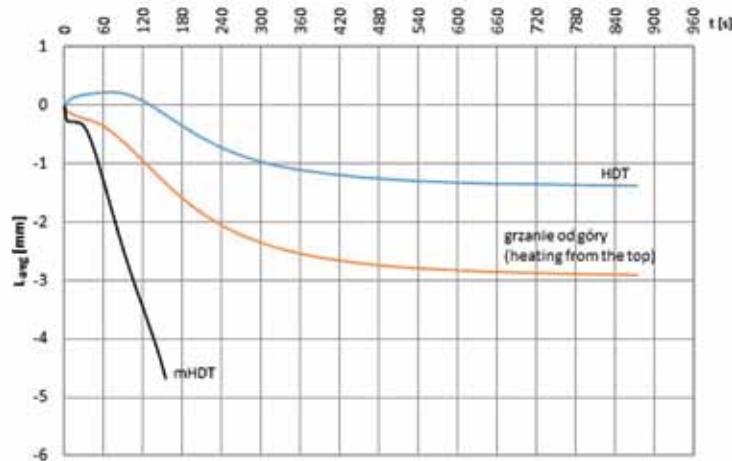


Rys. 6. Krzywe termicznego odkształcenia rdzeni pomiarowych o grubości 8 mm z utwardzonej nagrzewaniem mikrofalowym masy oliwinowej z krzemianem sodu w zależności od sposobu ich ogrzewania: HDT, mHDT, grzanie tylko od góry

Fig. 6. Thermal deformation curves of measuring cores with 8 mm thickness made of moulding sand with sodium silicate hardened by microwave heating in relation to the method of their heating: HDT, mHDT, heating only from the top

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów odkształcenia ( $L_{avg}$ ) kształtek prostopadłościennych o grubości 10 mm.

Figure 7 presents the measurement results of cuboidal specimens' deformation ( $L_{avg}$ ) with 10 mm thickness.



Rys. 7. Krzywe termicznego odkształcenia rdzeni pomiarowych o grubości 10 mm z utwardzonej nagrzewaniem mikrofalowym masy oliwinowej z krzemianem sodu w zależności od sposobu ich ogrzewania: HDT, mHDT, grzanie tylko od góry

Fig. 7. Thermal deformation curves of measuring cores with 10 mm thickness made of moulding sand with sodium silicate hardened by microwave heating in relation to the method of their heating: HDT, mHDT, heating only from the top

Dla rdzeni pomiarowych z masy oliwinowej z krzemianem sodu o grubości 10 mm (rys. 7) uzyskano po uśrednieniu następujące wartości: dla HDT (grzanie od dołu)  $L_{avg} = 1,38$  mm osiągnięto w czasie  $t_{norm} = 888$  s. Wolny koniec kształtek prostopadłościennych ogrzewanych tylko od góry przemieścił się średnio o  $L_{avg} = 2,92$  mm w czasie 889 s. Przy jednoczesnym ogrzewaniu od góry i od dołu (mHDT) kształtki stanowiące rdzenie pomiarowe osiągnęły odkształcenie  $L_{avg} = 4,67$  mm w czasie  $t_{norm} = 155$  s.

#### 4. Dyskusja wyników

Jak widać z rysunków 5–7, wpływ na odkształcalność utwardzanych mikrofalowo mas oliwinowych z krzemianem sodu ma przyjęty sposób ogrzewania kształtek prostopadłościennych. Zastosowanie tylko jednej grzałki w urządzeniu pomiarowym DMA Hot-Distortion w konfiguracji grzania od dołu (HDT) lub ogrzewania powierzchni próbki tylko od góry powoduje powstanie charakterystycznego odkształcenia od źródła ciepła [3]. Bazując na kształcie krzywej termicznego odkształcenia pokazanym na rysunku 2 i odnosząc go do dwóch metod ogrzewania jednostronnego (HDT i grzanie tylko od góry), zawsze możliwe było wyodrębnienie odcinka 0-A. Analiza kształtu krzywych daje możliwość wskazania punktu przełamania krzywej oznaczonego przez literę A wraz z podaniem dla niego bezwzględnej wartości średniego odkształcenia.

Dla rdzeni pomiarowych o  $G = 6$  mm (rys. 5) punkt A (w sposobie HDT) zidentyfikowano w 12. sekundzie pomiaru, w którym odkształcenie  $|L_{avg}| = 0,266$  mm. Dla rdzeni o  $G = 8$  mm ogrzewanych jednostronnie w sposobie HDT punkt A zidentyfikowano w 45. sekun-

For specimens made of olive moulding sand with 10 mm thickness (Fig. 7) after averaging the following values were achieved: HDT (heated from the bottom)  $L_{avg} = 1.38$  mm in time  $t_{norm} = 888$  s. The free end of cuboidal specimens heated only from the top dislocated on average by  $L_{avg} = 2.92$  mm in 889 s. Specimens simultaneously heated from the top and the bottom (mHDT), which constituted the measuring cores, achieved deformation of  $L_{avg} = 4.67$  mm in  $t_{norm} = 155$  s.

#### 4. Discussion of results

As it can be seen from Figures 5–7, deformation of microwave hardened olivine moulding sand with sodium silicate is influenced by the assumed method of heating the cuboidal specimens. The application of only one heater in the DMA Hot-Distortion measurement device in the heating configuration from the bottom (HDT) or heating the surface of a specimen only from the top causes the creation of a characteristic deformation from the source of heating [3]. On the basis of the shape of the thermal deformation curve presented in Figure 2 and in reference to two methods of one-sided heating (HDT and heating only from the top), it was always possible to distinct section 0-A. The analysis of the shape of curves gives the opportunity to indicate the curve breakpoint marked with the letter A together with the absolute value of average deformation.

For measuring cores with  $G = 6$  mm (Fig. 5) point A (in the configuration HDT) was indicated in the 12<sup>th</sup> second of the measurement, when the deformation was  $|L_{avg}| = 0.266$  mm. For measuring cores with  $G = 8$  mm heated from one side in the configuration HD, point A was iden-

dzie, którego  $|L_{avg}| = 0,244$  mm (rys. 6). Natomiast dla  $G = 10$  mm punkt A wskazano w około 75. sekundzie, w którym odkształcenie  $|L_{avg}| = 0,213$  mm (rys. 7).

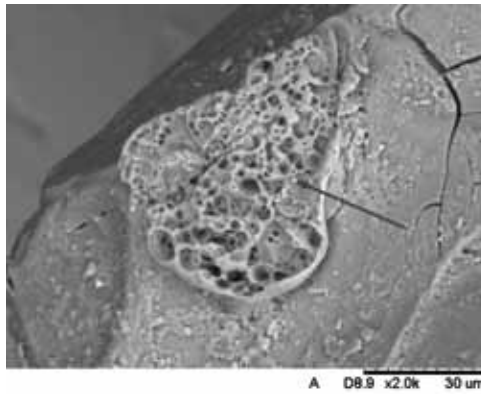
Dla metody ogrzewania próbki tylko od góry rdzenie pomiarowe o  $G = 6$  mm punkt A (przełamania krzywej) zidentyfikowano w 11. sekundzie pomiaru, w którym odkształcenie  $|L_{avg}| = 0,284$  mm (rys. 5). Dla rdzeni ogrzewanych od góry o  $G = 8$  mm punkt A zidentyfikowano w 28. sekundzie  $|L_{avg}| = 0,236$  mm (rys. 6), a dla  $G = 10$  mm w 45. sekundzie, w którym odkształcenie  $|L_{avg}| = 0,285$  mm (rys. 7).

Na podstawie analizy krzywych odkształcenia z wyodrębnionymi punktami przełamania „A” oraz powtarzalnymi wartościami  $|L_{avg}|$  można interpretować przebiegi początkowe odkształcenia jako skłonność badanych mas oliwinowych do miejscowej rozszerzalności cieplnej w obszarze kształtki, która w pierwszej kolejności nagrzewa się od źródła promieniowania cieplnego.

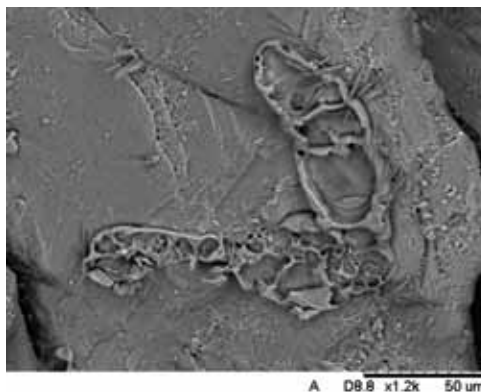
tified in the 45<sup>th</sup> second, where  $|L_{avg}| = 0.244$  mm (Fig 6). Whereas, for  $G = 10$  mm point A was indicated in approx. the 75<sup>th</sup> second, when the deformation  $|L_{avg}| = 0.213$  mm (Fig. 7).

In the method of heating the specimen only from the top for measuring cores with  $G = 6$  mm point A (curve breakpoint) was indicated in the 11<sup>th</sup> second of the measurement, when the deformation was  $|L_{avg}| = 0.284$  mm (Fig. 5). For cores heated from the top with  $G = 8$  mm point A was identified in the 28<sup>th</sup> second  $|L_{avg}| = 0.236$  mm (Fig. 6), and for  $G = 10$  mm in the 45<sup>th</sup> second, when the deformation was  $|L_{avg}| = 0.285$  mm (Fig. 7).

On the basis of the analysis of deformation curves with distinct breakpoints “A” and repeatable  $|L_{avg}|$  values, the initial courses of deformation can be interpreted as a tendency of investigated olivine moulding sands to local thermal expansion in the area of a specimen which is initially heated from the source of thermal radiation.



Rys. 8. Fragment powierzchni ziarna oliwinu z mostkiem wiążącym z widoczną wewnętrzną strukturą krzemianu sodu przypominającą pianę krzemianową. Kształtka o grubości 10 mm ogrzewana jednostronnie (HDT). Mikroskopia SEM  
Fig. 8. A fragment of olive sand surface with a bonding bridge with a visible internal structure of sodium silicate which resembles silica foam. A specimen with 10 mm thickness from the heated side (HDT). SEM microscopy



Rys. 9. Fragment powierzchni ziarna oliwinu z mostkiem wiążącym z typową błonkowo-komorową strukturą krzemianu sodu. Kształtka 10 mm powierzchnia nieogrzewana. Mikroskopia SEM

Fig. 9. A fragment of olive sand surface with a bonding bridge with a typical pellicle-cellular structure of sodium silica. A specimen with 10 mm thickness from the unheated side. SEM microscopy

Po ostudzeniu rdzeni pomiarowych, pobrano z ich powierzchni: ogrzewanej i nieogrzewanej grudki masy w celu obserwacji powierzchni ziaren oliwinu na mikroskopie skaningowym Hitachi TM-3000. Pokazany na [rysunkach 8 i 9](#) wygląd mostków wskazuje na różnice wynikające z zastosowanych sposobów ogrzewania powierzchni kształtek: jednostronnego i dwustronnego.

Jak widać na [rysunku 8](#) z mostkiem wiążącym, pod wpływem podwyższonej temperatury utwardzony mikrofalowo krzemian sodu ma skłonność do tworzenia w błonce ścianek struktur przypominających pianę [21], które nie są widoczne w mostku pokazanym na [rysunku 9](#). W przypadku grzania dwustronnego (mHDT), na grudkach masy oliwinowej pobranych z obu ogrzewanych powierzchni kształtek, zaobserwowano podobną do pokazanej na [rysunku 8](#) spienioną strukturę mostków spoiwa krzemianowego.

W przypadku kształtek ogrzewanych w metodzie mHDT ([rys. 5–7](#)) trudno jednoznacznie wyodrębnić odcinek 0-A. Lepiej widoczny jest za to efekt uplastycznienia masy oliwinowej z krzemianem sodu, z pominięciem punktu przełamania krzywej „A”. W rdzeniach pomiarowych ogrzewanych sposobem mHDT odkształcenie zachodzi prawie prostoliniowo, aż do osiągnięcia punktu B', w którym przerywano pomiar.

Analizując przebieg krzywych odkształceń ([rys. 5–7](#)), kontynuacja ogrzewania jednostronnego oliwinowej masy z krzemianem sodu, skutkuje uplastycznieniem się spoiwa. Na podstawie odkształceń ( $L_{avg}$ ) kształtek ogrzewanych jednostronnie można wyodrębnić na krzywych odcinek A-B, co pokrywa się również z przebiegiem pokazanym na [rysunku 2](#). W przypadku ogrzewania jednostronnego, w kształtkach o grubości 8 mm ([rys. 6](#)) i 10 mm ([rys. 7](#)), nastąpiło wyhamowanie zjawiska nadmiernej plastyczności spoiwa w masie. Analizy przemieszczeń wolnych końców rdzeni pomiarowych o zwiększonej grubości (odcinki A-B) nie dają jednak podstaw do interpretacji zjawiska wyhamowania odkształcenia jako skłonności do umacniania się krzemianu sodu (spoiwa).

Kształtki w dalszym ciągu opadają pod wpływem własnego ciężaru, przeciwnie niż ma to miejsce na odcinku B-C z [rysunku 2](#). Wyhamowanie zjawiska uplastycznienia spoiwa związane jest z pojemnością i przewodnością cieplną masy oliwinowej i spowolnieniem transportu energii cieplnej do nieogrzewanych warstw kształtek. Transfer ciepła do nieogrzewanych warstw był tym wolniejszy, im przyjęta grubość rdzeni pomiarowych była większa.

Na [rysunkach 10–12](#) zestawiono przebiegi odkształceń ( $L_{avg}$ ) uszeregowane według grubości rdzeni pomiarowych dla wybranej metody ogrzewania. [Rysunek 10](#) przedstawia wpływ zastosowanych grubości kształtek ogrzewanych od dołu (HDT) na uśrednione odkształcenie. [Rysunek 11](#) ten sam wpływ grubości na odkształcenie ( $L_{avg}$ ) kształtek ogrzewanych od góry, natomiast [rysunek 12](#) grzanych jednocześnie od dołu i od góry (mHDT).

After cooling down the measuring cores, from their heated and unheated surfaces, lumps of the moulding sand were collected in order to observe the surfaces of olivine grains on a scanning microscope Hitachi TM-3000. The appearance of bonding bridges presented in [Figures 8 and 9](#) indicates the differences resulting from the applied methods of heating the surfaces of specimens: one-sided, two-sided.

As it can be seen from [Figure 8](#) with a bonding bridge, under the influence of increased temperature, sodium silicate, which was hardened with microwaves, has a tendency to create structures resembling foam [21] in the pellicle of walls which are not visible in the bridge presented in [Figure 9](#). In case of two-sided heating (mHDT), on the lumps of the olive moulding sand collected from both heated surfaces, a foamy structure in silica binder bridges was observed, similar to the one showed in [Figure 8](#).

In case of specimens heated with the mHDT method ([Figs. 5–7](#)), it is difficult to unambiguously distinct section 0-A. Instead, the effect of plastification of the olivine moulding sand with sodium silicate is better visible, with the omission of the curve breakpoint “A”. In the measuring cores heated according to the mHDT method deformation occurs almost rectilinearly, until reaching point B', at which the measurement was stopped.

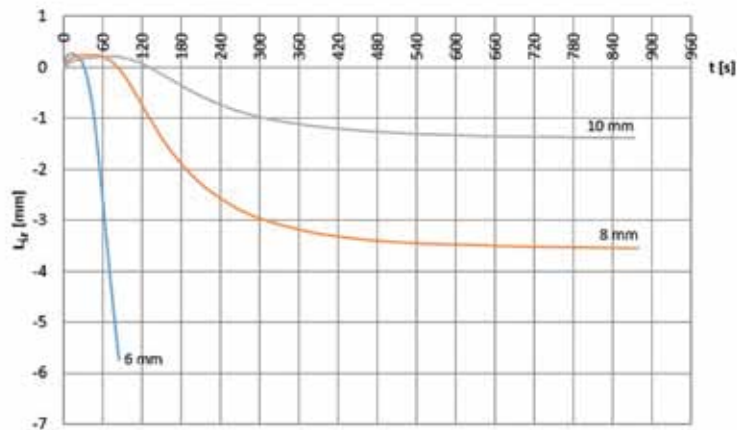
In the analysis of the course of deformation curves ([Figs. 5–7](#)), the continuation of one-sided heating of the olivine moulding sand with sodium silicate results in plastification of the binder. On the basis of deformations ( $L_{avg}$ ) of specimens which were heated from one side, section A-B can be isolated, which also corresponds to the course illustrated in [Figure 2](#). In case of one-sided heating, in specimens with 8 mm ([Fig. 6](#)) and 10 mm ([Fig. 7](#)) thickness, there was a slowdown of the phenomenon of excessive plasticity of the binder in the moulding sand. The analyses of dislocations of free ends of measuring cores with higher thickness (sections A-B), however, do not constitute bases to interpret the phenomenon of slowing down the deformation as a tendency to strengthen sodium silicate (binder).

The specimens still deflect under their own weight, unlike it is in section B-C in [Figure 2](#). A slowdown of the binder plastification phenomenon is related to thermal capacity and conductivity of the olive moulding sand and slower transport of thermal energy to unheated layers of specimens. The slower thermal transfer to unheated layers, the higher the thickness of assumed measuring cores.

In [Figures 10–12](#) collated are the courses of deformations ( $L_{avg}$ ), ordered by the thickness of measuring cores for a selected heating methods. [Figure 10](#) presents the influence of the applied thicknesses of specimens heated from the bottom (HDT) on the averaged deformation. [Figure 11](#) the same influence of thickness on deformation ( $L_{avg}$ ) of blocks heated from the top, whereas [Figure 12](#) presents blocks simultaneously heated from the bottom and the top (mHDT).

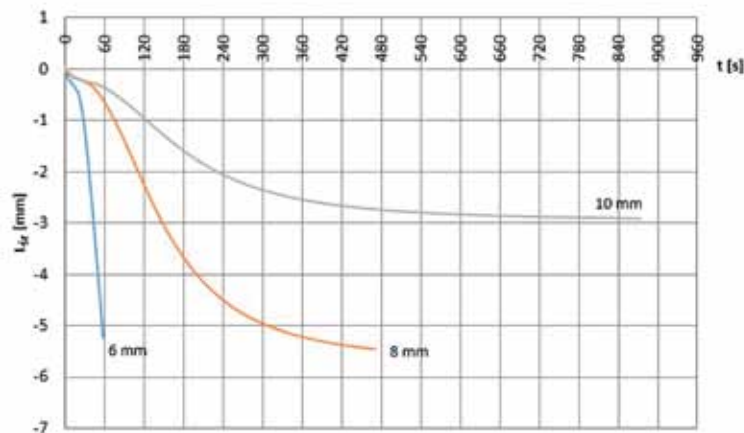
Na podstawie przebiegów odkształceń  $L_{avg}$  (rys. 10–12) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem grubości badanej kształtki rośnie czas (odcinek A-B), w którym obserwuje się zjawisko uplastycznienia się spoiwa. Im grubsza kształtka, tym zmiany rejestrowane w postaci przemieszczenia wolnego końca rdzenia pomiarowego są mniejsze. W kształtkach z masy oliwinowej o grubości 10 mm pomiar był przerywany na skutek przekroczenia czasu pomiaru powyżej 15 minut. W przypadku kształtek o grubości 8 mm pomiar był przerywany na skutek przekroczenia czasu pomiaru (rys. 10 i 11) i/lub na skutek nadmiernego odkształcenia (rys. 12). W przypadku kształtek o grubości 6 mm wskazywał na skłonność spoiwa do nadmiernego uplastycznienia się na skutek nagrzewania się masy oliwinowej.

On the basis of the courses of deformations  $L_{avg}$  (Figs. 10–12) it can be claimed that the thicker the investigated specimen, the longer the time (section A-B), in which the phenomenon of plastification of binder can be observed. The thicker the specimen, the smaller the registered changes in the form of dislocations of the free measuring core end. In specimens made of olivine moulding sand with 10 mm thickness the measurement was stopped as a result of exceeding the measurement time over 15 minutes. In case of specimens with 8 mm thickness the measurement was stopped as a result of exceeding the measurement time (Figs. 10 and 11), and/or excessive deformation (Fig. 12). In case of specimens with 6 mm thickness the measurement indicated a tendency of the binder to excessive plastification as a result of



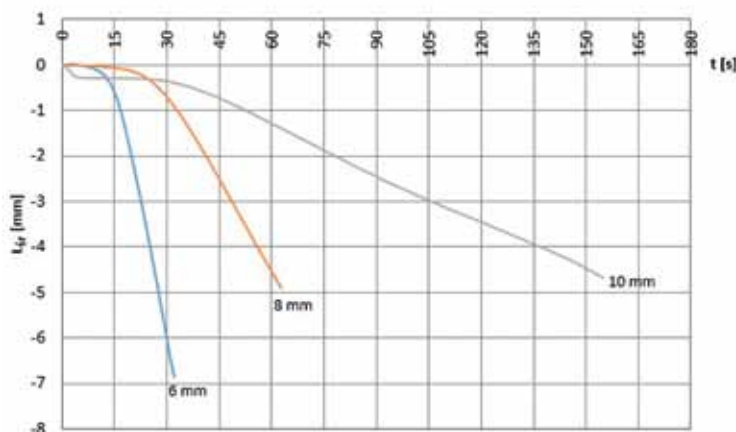
Rys. 10. Przebieg krzywych termicznych odkształceń rdzeni pomiarowych o grubości: 6 mm, 8 mm i 10 mm grzanych od dołu (HDT)

Fig. 10. The course of thermal deformation curves for specimens of measuring cores with the thickness of: 6 mm, 8 mm, 10 mm heated from the bottom (HDT)



Rys. 11. Przebieg krzywych termicznych odkształceń rdzeni pomiarowych o grubości: 6 mm, 8 mm i 10 mm grzanych od góry

Fig. 11. The course of thermal deformation curves for specimens of measuring cores with the thickness of: 6 mm, 8 mm, 10 mm heated from the top



Rys. 12. Przebieg krzywych termicznych odkształceń rdzeni pomiarowych o grubości: 6 mm, 8 mm i 10 mm grzanych od dołu i od góry (mHDT)

Fig. 12. The course of thermal deformation curves for specimens of measuring cores with the thickness of: 6 mm, 8 mm, 10 mm heated from the bottom and the top (mHDT)

Koniec pomiarów odkształcalności rdzeni pomiarowych o grubości 6 mm zachodził zawsze na skutek uzyskania maksymalnego odkształcenia (>7 mm), zarazem w najkrótszym czasie.

Wykonane badania porównawcze na urządzeniu *DMA Hot-Distortion* wpływu sposobu nagrzewania i grubości rdzeni pomiarowych umożliwiają wstępną ocenę: możliwości samego aparatu do badania odkształcalności mas, jak również masy oliwinowej z krzemianem sodu po procesie utwardzania nagrzewaniem mikrofalowym na tle pomiarów H-D wykonanych z użyciem innych typów aparatów i znacznie bardziej rozpowszechnionych mas na osnowie kwarcowej.

## 5. Podsumowanie

Analizując wyniki badań odkształceń zrealizowanych na urządzeniu *DMA Hot-Distortion* rdzeni pomiarowych z oliwinowych mas formierskich o grubościach: 6 mm, 8 mm i 10 mm z krzemianem sodu utwardzonym nagrzewaniem mikrofalowym, można stwierdzić, że:

1. Żadna z próbek rdzeni pomiarowych z utwardzonych nagrzewaniem mikrofalowym mas oliwinowych z krzemianem sodu o grubościach: 6, 8 i 10 mm nie uległa przerwaniu w trakcie pomiarów H-D. Po ostudzeniu do temperatury otoczenia, wszystkie kształtki pękały w przekroju, w którym dochodziło do ogrzania masy oliwinowej z krzemianem sodu, bez względu na zastosowaną metodę (HDT, mHDT, grzanie od góry), co jest zjawiskiem ocenianym jako pozytywne i ułatwiającym przyszłościowe usuwanie przegrzanych rdzeni w procesie wybijania odlewu z masy.

heating olivine moulding sand. The end of measuring deformations of measuring cores with 6 mm thickness was always in the consequence of achieving maximum deformation (>7 mm), also in the shortest period of time.

The conducted comparative tests on the *DMA Hot-Distortion* device of the influence of the method of heating and the thickness of measuring cores allow the initial assessment: the possibilities of the device itself to test deformation of moulding sands, as well as olivine moulding sand with sodium silicate after the process of hardening with microwave heating as compared to H-D measurements conducted with the use of other types of devices and with considerably more wide-spread moulding sands with the quartz matrix.

## 5. Summary

During the analysis of the test results of deformations conducted on a *DMA Hot-Distortion* device with specimens of measuring cores made of olivine moulding sands with the thickness of 6 mm, 8 mm and 10 mm with sodium silicate hardened with microwave heating, it can be stated that:

1. None of the specimens of the measuring cores made of olivine moulding sands with the thickness of 6 mm, 8 mm and 10 mm which were hardened with microwave heating broke during the H-D measurements. After cooling down to ambient temperature, all specimens broke in the cross section where heating of the olivine moulding sand with sodium silicate took place, regardless of the applied method (HDT, mHDT, heating from the top), which is a positively assessed phenomenon which facilitates prospec-

2. Dzięki zestawieniu przebiegów odkształceń ( $L_{avg}$ ) kształtek o różnych grubościach według sposobu ich ogrzewania (rys. 10–12), w przypadku skoncetrowania się w badaniach nad zachowaniem spoiwa w utwardzonej masie można zauważyć zalety metody mHDT (rys. 12). Stosowana w badaniach nad odkształcalnością masy oliwinowej metoda dwustronnego ogrzewania prostopadłościennych kształtek (mHDT), w przeciwieństwie do metod jednostronnego ogrzewania, daje możliwość szerszej analizy zjawisk związanych z rozszerzalnością cieplną osnowy. Wyniki uzyskane za pomocą metody mHDT pozwalają zauważyć zanikanie przebiegów odkształceń ( $L_{avg}$ ) odpowiadających kształtem odcinkowi 0-A (rys. 2), wypuklając przy tym skłonność do nadmiernej plastyczności masy ze spoiwem krzemianowym utwardzanym za pomocą nagrzewania mikrofalowego. Badania tego typu są możliwe dzięki zastosowaniu w urządzeniu DMA Hot-Distortion zaawansowanym rozwiązaniu konstrukcyjnym i oprogramowaniu precyzyjnie rejestrującym zmiany położenia wolnego końca kształtki pomiarowego.

tive removal of overheated cores in the process of knocking out the casting from the moulding sand.
2. Thanks to the collation of specimens' deformation courses ( $L_{avg}$ ) with different thicknesses according to the method of their heating (Figs. 10–12), in the investigation, in case of concentrating on the behaviour of the binder in the hardened moulding sand it can be noticed that there are advantages of the mHDT method (Fig. 12). The applied method of two-sided heating of measuring cores (mHDT) used in the distortion tests of olivine moulding sand; unlike the one-sided method of heating, gives a possibility to a wider analysis of phenomena related to thermal expansion of the matrix. The results achieved with the mHDT method allow noticing the disappearance of deformation courses ( $L_{avg}$ ) which correspond in the shape to section 0-A (Fig. 2), at the same time stressing the tendency to excessive plasticity of the moulding sand with a silica binder which was hardened with microwave heating. This type of investigation is possible because of the DMA Hot-Distortion device boasts advanced design solutions and software which precisely registers changes in the location of the free specimen end of the measuring core.
3. Zmiana grubości prostopadłościennych kształtek z zalecanych 6 mm do nawet 10 mm, przy zachowaniu zbliżonej gęstości pozornej masy, analizując maksymalne przemieszczenie wolnego końca kształtek uwypukla wpływ zjawisk transportu ciepła na rejestrowane krzywe odkształcenia, oznaczonych na przebiegach za pomocą hipotetycznego odcinka A-B lub dla mas z krzemianem sodu: odcinka A-B'.
3. The change of thickness of cuboidal specimens from the recommended 6 mm to even 10 mm, while maintaining similar apparent density of the moulding sand in the analysis of the maximum dislocation of the free specimen end stresses the influence of the phenomenon of heat transfer on the registered deformation curves, marked on the courses with the help of a hypothetical section A-B or for moulding sands with sodium silicate: section A-B'.
4. Zastosowanie jednoczesnego ogrzewania grzałką dolną i grzałką górną w metodzie mHDT, w większości prób, dało możliwość uzyskania rozkładu temperatury odmiennego niż w przypadku metod z ogrzewaniem jednostronnym, tj.: HDT lub za pomocą tylko górnej grzałki, co potwierdzono obserwacjami struktur mostków wiążących.
4. The application of simultaneous heating from the bottom and the top in the mHDT method, in the majority of tests gave a possibility to achieve a different temperature distribution than in case of methods using one-sided heating, i.e. HDT or with the help of only the top heater, which was proven by observations of the structures of binder bridges.
5. Wszystkie zastosowane w badaniach metody ogrzewania próbek: HDT, mHDT, nagrzewanie od góry dają możliwość porównawczej oceny zachowania się mas w warunkach nagrzewania ukierunkowanego i warunkach quasi-symetrycznych, co pozwala uwypuklić wpływ na badane masy zróżnicowanej intensywności zjawisk wywołanych dynamicznym wzrostem temperatury.
5. All methods of heating specimens applied in the investigation: HDT, mHDT, heating from the top, give a possibility for a comparative assessment of the behaviour of moulding sands under conditions of directional heating and under quasi-symmetrical conditions, which emphasises the influence of varied intensity of phenomena caused by a dynamic increase in temperature on the investigated moulding sands.

## Podziękowania

Badania zostały wsparte finansowo z dotacji na działalność statutową nr 0401/0015/18 Politechniki Wrocławskiej.

## Acknowledgements

The research was financially supported from the subsidy on the statutory activity no. 0401/0015/18 of Politechnika Wroclawska.

## Literatura/References

1. Lewandowski L. 1992. *Materiały formierskie – badania. Cz. II*. Skrypty uczelniane 1233, s. 107–115. Kraków: Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej.
2. Morgan D., E.W. Fashman. 1975. „The BCIRA Hot Distortion Tester for quality in production of chemically bonded sands”. *AFS Transactions* 75 (91) : 73–80.
3. BICRA Hot-Distortion Tester for bonded sands – Instruction manual.
4. Jakubski J., St.M. Dobosz. 2007. „The thermal deformation of core and moulding sands according to the hot distortion parameter investigations”. *Archives of Metallurgy and Materials* 7 (52) : 421–427.
5. Major-Gabryś K., St.M. Dobosz, J. Jakubski. 2010. „Thermal deformation of moulding sands with biopolymer binders”. *Archives of Foundry Engineering* 10 (4) : 129–132.
6. Ramrattan S.N., J. Rodriguez, M. Keil, A. Choudhury. 2004. „An apparatus for investigating thermal distortion in bonded sands”. *Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, Session 3247.
7. Ignaszak Z., P. Popielarski, T. Strek. 2011. „Estimation of coupled thermo-physical and thermo mechanical properties of porous ceramic material thermolabile using Hot Distortion Plus© test”. *Defect and Diffusion Forum* 312–315 : 764–769.
8. Versatile Equipments Pvt. Ltd., Hot Distortion Tester, <http://sandtesting.com/product/hot-distortion-tester/http://sandtesting.com/product/hot-distortion-tester/> (visit date 05.12.2018).
9. Multiserw-Morek DMA Hot-Distortion bonded sands tester for Wroclaw University of Technology – Instruction manual 2016/2017.
10. Rodriguez J., S.N. Ramrattan, A. Choudhury, P. Ikonov. 2007. Development of apparatus and protocol for testing of sand at high temperatures in the foundry. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*.
11. Stachowicz M., P. Paduchowicz, K. Granat. 2017. „Impact of density degree and grade of inorganic binder on behaviour of moulding sand at high temperature”. *Journal of Casting and Materials Engineering* 1 (3) : 64–69.
12. Stachowicz M. 2018. „Modified hot distortion test to investigate the effect of the inorganic binder on the high-temperature behaviour of physically hardened moulding sands”. *Archives of Foundry Engineering* 18 (2) : 45–50. DOI: 10.24425/122501.
13. Dobosz St.M., A. Grabarczyk, K. Major-Gabryś, J. Jakubski. 2015. „Influence of quartz sand quality on bending strength and thermal deformation of moulding sands with synthetic binders”. *Archives of Foundry Engineering* 15 (2) : 9–12. DOI: 10.1515/afe-2015-0028.
14. Ignaszak Z. 2008. „Chosen aspects of thermo-mechanical phenomena in resin bonded sands by use of Hot Distortion tests”. *Archives of Foundry Engineering* 8 (1) : 137–142.
15. Ignaszak Z. 2018. „Discussion on the methodology and apparatus for Hot Distortion studies”. *Archives of Foundry Engineering* 18 (2) : 141–145. DOI: 10.24425/122517.
16. Lewandowski J.L. 1991. *Masy formierskie i rdzeniowe*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.



17. Hess K., Z. Ignaszak. 1980. Przewodnictwo cieplne mas formierskich w funkcji temperatury. *Międzynarodowe Sympozjum – Krzepnięcie metali i stopów*, Gliwice 6–9 XI 1980 r., 264–278.
18. Zych J. 2005. „Rola zagęszczania w technologii formy opartej na masach ze szkłem wodnym i spoiwami organicznymi”. *Przegląd Odlewnictwa* 55 (2) : 88–97.
19. Stachowicz M. 2017. „Rola zagęszczenia mas formierskich ze spoiwami nieorganicznymi w kształtowaniu ich wytrzymałości osiągniętych po utwardzaniu mikrofalowym / The role of the densification of moulding sands with inorganic binders in the modeling of their strength obtained after microwave hardening”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 57 (2) : 103–113. DOI: 10.7356/iod.2017.10.
20. Syryjski-Giro J. 2018. *Evaluation of the influence of heating rate on core deformation measured on automated DMA Hot-Distortion device*. Praca magisterska. Wrocław: Politechnika Wroclawska.
21. Vargas G., F. Vazquez, J. Lopez, J. Mendez, M. Mendez, P. Pena. 2004. „Foaming of sodium silicate-wollastonite mixtures by microwaves”. *Buletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio* 43 (1) : 71–74.

