

Analiza procesu wysychania zawilgoconych warstw wierzchnich form i rdzeni piaskowych na przykładzie masy ze szkłem wodnym

Analysis of the drying process of moistened surface layers of sand moulds and cores on the example of moulding sand with water glass

Natalia Kaźnica¹, Jerzy Zych¹, Joanna Kolczyk¹

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Odlewnictwa, Katedra Tworzyw Formierskich, Technologii Formy i Odlewnictwa Metali Nieżelaznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

¹ AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, Department of Moulding Materials, Mould Technology and Cast Non Ferrous Metals, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

E-mail: kaznica@agh.edu.pl

Received: 3.10.2016. Accepted in revised form: 31.03.2017.

© 2017 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2017.04

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę procesu wysychania warstw wierzchnich piaskowych form i rdzeni odlewniczych (wykonanych z formierskiej sypkiej masy samoutwardzalnej z uwodnionym krzemianem sodu utwardzanej ciekłym utwardzaczem estrowym) poddanych uprzednio procesowi pochłaniania wilgoci. Po 12-godzinym procesie sorpcji wilgoci z otoczenia w warunkach wysokiej wilgotności względnej powietrza (powyżej 85%) oraz temperatury (28–33°C) analizowano proces wysychania (desorpcji) powierzchniowych warstw form i rdzeni odlewniczych w warunkach odpowiednio niższych wartości temperatury i wilgotności na przykładzie masy ze szkłem wodnym. W badaniach wykorzystano metodę grawimetryczną. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że zawilgocone powierzchniowe warstwy wysychają z różną intensywnością, uzależnioną od warunków otoczenia oraz rozmiarów ziarna osnowy piaskowej (porów międzyziarnowych).

Wiedza na temat przebiegu zarówno procesu sorpcji, jak i desorpcji wilgoci przez wierzchnie warstwy elementów form piaskowych jest niezbędna do zapobiegania powstawaniu powierzchniowych wad odlewów, pojawiających się okresowo w odlewniach.

Słowa kluczowe: formy piaskowe, warstwy wierzchnie, wysychanie, szkło wodne

Abstract

An analysis of the drying process of surface layers of sand moulds and cores (made of loose self-hardening moulding sand with hydrated sodium silicate hardened with a liquid ester hardener) which was previously subjected to the process of moisture sorption is presented in the hereby paper. After a 12-hour process of moisture sorption from the environment under conditions of high relative air humidity (over 85%) as well as temperature (28–33°C), an analysis was performed using the drying (desorption) process on the surface layers of sand moulds and cores under conditions of lower values of temperature and humidity on the example of water glass moulding sand. The investigations involved the use of the gravimetric method. Based on the obtained results, it was demonstrated that the moistened surface layers dry up with different intensities depending on the environmental conditions as well as the size of the sand grains (intergranular pores).

The knowledge of the course of both the sorption and desorption of moisture by surface layers of sand mould components is necessary to prevent the formation of casting surface defects, which periodically appear in foundries.

Keywords: sand moulds, surface layers, drying, water glass

1. Wprowadzenie

Wiele odlewów nie jest poddawanych obróbce mechanicznej. Konieczne jest więc zapewnienie dobrej jakości powierzchni bezpośrednio po procesie odlewania. Niemniej jednak wiele odlewni boryka się z problemem powstawania wad powierzchniowych, szczególnie pochodzenia gazowego. Na ich występowanie w dużej mierze wpływa zbyt wysoka wilgotność form i rdzeni piaskowych, dlatego też warunki ich przechowywania mogą wpływać na ilość otrzymywanych w odlewniach braków. Co więcej, proces wysychania ma istotne znaczenie również w przypadku wysychania tak powłok ochronnych stosowanych na formy i rdzenie piaskowe, jak i form ceramicznych [1,2].

Powierzchniowe warstwy form i rdzeni piaskowych, wykonane z mas ze spoiwami, wykazują zdolność do pochłaniania wilgoci z otoczenia [3-4]. Zmiana warunków przechowywania może jednak prowadzić do częściowej utraty wilgoci w materiale. Przez pojęcie „warstw wierzchnich form i rdzeni odlewniczych” należy rozumieć (wzoruując się na polskiej normie [5]) warstwę materiału (masy formierskiej) ograniczoną powierzchnią rzeczywistą elementu formy, obejmującą tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni rzeczywistej. W rozpatrywanym przypadku jest to głębokość do 2,5 mm. W przypadku formy odlewniczej warstwa wierzchnia dotyczy części roboczej formy, która decyduje o jakości powierzchni otrzymywanych odlewów, a w przypadku rdzeni – właściwie całej ich powierzchni.

Utrata wilgoci w materiale następuje w momencie spełnienia zależności:

$$p_p > p_g \quad (1)$$

gdzie:

p_p – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nad powierzchnią materiału ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}^2$),

p_g – ciśnienie cząstkowe w gazie otaczającym materiał ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}^2$)

i trwa nieprzerwanie do chwili, gdy ciśnienia te będą sobie równe, czyli gdy osiągnięty zostanie stan wilgotności równowagowej. Intensywność zachodzenia procesu zależy zarówno od wilgotności względnej materiału suszącego, jak i jego temperatury [6].

Sam proces, zgodnie z literaturą [7-9], można podzielić zasadniczo na dwie fazy (rys. 1):

- I (odcinek A-K) – w czasie której utrata wilgoci następuje z całkowicie zawilgoconej powierzchni i odbywa się z dużą szybkością,
- II (odcinek K-R) – w czasie której usuwanie wody występuje z coraz głębszych warstw wilgotnego

1. Introduction

Many casts do not undergo mechanical treatment, which makes it necessary to ensure a high quality surface directly after the casting process. Nevertheless, many foundries face the problem of surface defect formation, especially of the gaseous origin. Their occurrence is largely affected by excessive moisture of the sand moulds and cores. And so, the conditions of their storage can affect the amount of the obtained discards. What is more, the drying process is very important also in the case of the drying of both – the protective coatings used on sand moulds and cores, and the ceramic moulds [1,2].

The surface layers of sand moulds and cores made from moulding sand with binders exhibit the ability to absorb the moisture from the environment [3-4]. A change in the storage conditions can, however, lead to a partial loss of moisture in the material. The term “surface layers of casting moulds and cores” should be understood (according to the Polish standard [5]) as a layer of the material (moulding sand) which is limited by the actual surface area of the mould component, including the surface area and a part of the material towards the inside, away from the actual surface area. In the considered case, it is a depth of up to 2.5 mm. In the case of a casting mould, the surface layer refers to the working part of the mould, which determines the surface quality of the obtained casts, and in the case of a core – practically their whole surface.

A loss of moisture in the material takes place at the moment when the following relation is fulfilled:

where:

p_p – partial pressure of water vapour above the material's surface ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}^2$),

p_g – partial pressure in the gas surrounding the material ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}^2$).

The process continues uninterrupted until these pressures are equal, that is the equilibrium moisture content is reached. The intensity of the process depends on both the relative humidity of the drying material and its temperature [6].

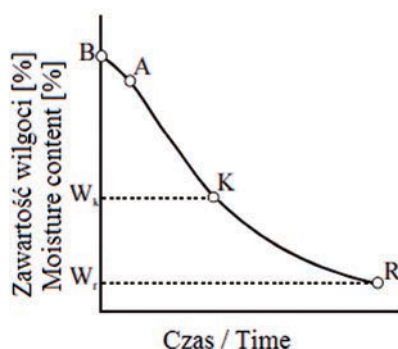
The process, according to the literature sources [7-9], can be divided into two stages (Fig. 1):

- I (section A-K) – the loss of moisture from the totally moistened surface takes place at a high speed,
- II (section K-R) – the water is removed from deeper and deeper layers of the moist material and the drying rate decreases until the process is stopped.

materiału i charakteryzuje się malejącą szybkością suszenia aż do momentu zatrzymania procesu.

Przy czym początkowy etap, przedstawiony na rysunku 1 jako odcinek B–A oznaczający zużycie dostarczonego ciepła na ogrzanie wyrobu, jest często pomijany z uwagi na bardzo nieznaczny spadek wilgotności.

The first stage, presented in Figure 1 as section B–A denoting the use of the provided heat for the heating of the product, is often omitted due to a very slight drop of moisture.



Rys. 1. Krzywa suszenia ciała stałego [8]

Fig. 1. Curve of drying of a solid body [8]

Literatura wyróżnia dwa podstawowe rodzaje suszenia – naturalne oraz sztuczne [10]. Suszenie naturalne jest procesem samoczynnym polegającym na przechodzeniu wody w postaci pary wodnej z materiału suszonego do atmosfery. Suszenie sztuczne wykorzystuje natomiast dodatkową ilość ciepła i odprowadzenie wytworzonej pary wodnej za pomocą czynnika suszącego, dzięki czemu proces parowania zostaje przyspieszony. W większości branż proces suszenia odbywa się jednak z udziałem dodatkowej energii. Wysoce energochłonny proces pociąga za sobą duże koszty. Staje się to jednym z powodów, dla których odlewnie nie mogą pozwolić sobie na suszenie form i rdzeni bezpośrednio przed ich użyciem. Istotne zatem wydaje się analizowanie zjawiska wysychania powierzchniowych, zawilgoconych warstw form i rdzeni odlewniczych w warunkach naturalnych odlewni.

W takim przypadku jednym z dominujących procesów zachodzących w czasie wysychania zawilgoconych warstw wierzchnich form i rdzeni jest dyfuzja wody, którą matematycznie można opisać równaniem [11]:

$$m_d = -k \cdot \rho_0 \cdot \Delta u \quad (2)$$

gdzie:

m_d – masa cieczy przenikającej wewnątrz materiału przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu,

k – współczynnik charakteryzujący przemieszczanie się wilgoci wewnątrz materiału pod wpływem różnicy wilgotności w różnych warstwach tego materiału,

The literature distinguishes between two basic types of drying – natural and artificial [10]. Natural drying is a self-acting process consisting in the transfer of water in the form of vapour from the dried material to the atmosphere. Artificial drying, in turn, uses an additional amount of heat and water vapour removal by means of a drying factor, owing to which the vaporization process is accelerated. In most industry branches, however, the drying process takes place with the participation of additional energy. A high energy-consuming process means high costs. This becomes one of the reasons why foundries cannot afford the process of drying of moulds and cores directly before their use. And so, it seems important to analyze the phenomenon of drying of moistened surface layers of casting moulds and cores under natural conditions present in foundries.

In such a case, one of the dominating processes taking place during the drying of the moist surface layers of sand moulds and cores is water diffusion, which can be mathematically described by the equation [11]:

where:

m_d – mass of the liquid penetrating inside the material in a unit of surface per unit of time,

k – coefficient characterizing the shift of the moisture inside the material under the effect of the difference in moisture in different layers of the material,

ρ_0 – gęstość suchego materiału,

Δu – gradient wilgotności.

Wówczas podczas suszenia, na skutek parowania wody z powierzchni, występuje gradient wilgotności. Należy go rozumieć jako różnicę wilgotności na powierzchni wyrobu i w środku. Jest on przyczyną ruchu wilgoci – z miejsc o wyższej wilgotności do niższej [12].

Współczynnik k występujący we wzorze (2) zależy od trzech wielkości [11]:

- temperatury materiału – współczynnik k wzrasta wraz ze wzrostem temperatury;
- rozmiaru ziaren materiału – im większe pory międzyziarnowe, czyli im większe ziarna, tym większa wartość współczynnika k ;
- sposobu związania wody – wyższa wartość współczynnika k dla wody słabiej związanej (swobodnej).

Należy pamiętać, że wymianie masy w czasie procesu suszenia towarzyszy jednoczesna wymiana ciepła [13]. Jej siłą napędową jest gradient temperatury między materiałem suszonym a otoczeniem [14], dlatego też efekt wysuszenia materiału można uzyskać na dwa sposoby: odpowiednio podnosząc temperaturę otoczenia lub obniżając zawartość wilgoci w otoczeniu [15].

2. Metodyka badawcza

Badaniu desorpcji wilgoci z warstw wierzchnich form i rdzeni piaskowych zostały poddane zawilgocone, prostopadłościennie próbki wykonane z sypkiej masy samoutwardzalnej z uwodnionym krzemianem sodu (szkłem wodnym) w technologii ciekłych estrów, o składzie podanym w tabeli 1. Próbki o wymiarach 30 mm × 50 mm × 5 mm i gęstości pozornej po zaformowaniu wynoszącej 1,46–1,59 g/cm³ poddane w czasie trwania pomiarów obustronnej wymianie wilgoci, odwzorowywały warunki, jakie panują w warstwach wierzchnich form i rdzeni piaskowych do głębokości 2,5 mm.

ρ_0 – density of dry material,

Δu – moisture gradient.

Then, during the drying process, as a result of water vaporization from the surface, a moisture gradient occurs, which should be understood as the difference in moisture on the product surface and inside it. It is the cause of moisture movement from the areas of higher moisture to the ones with lower moisture [12].

Coefficient k presented in equation (2) depends on three parameters [11]:

- material temperature – coefficient k increases with the increase of temperature;
- size of material grains – the greater the intergranular pores, that is, the larger the grains, the greater the value of coefficient k ;
- way of water binding – a higher value of coefficient k for weaker-bonded (free) water.

It should be remembered that the mass exchange during the drying process is accompanied by a simultaneous heat exchange [13]. Its driving force is the temperature gradient between the dried material and the environment [14]. That is why the effect of a dry material can be achieved in two ways: raising the environmental temperature or lowering the moisture content in the environment [15].

2. Investigation methodology

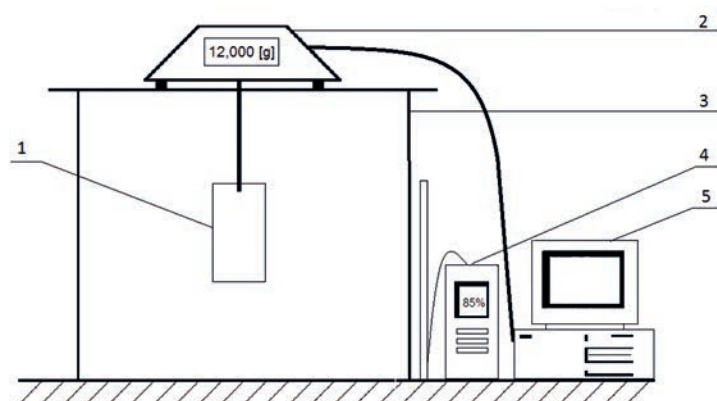
The test of moisture desorption from the surface layers of sand moulds and cores was performed on moistened cuboidal samples made of loose self-hardening mass with hydrated sodium silicate (water glass) in the technology of liquid esters, with the composition given in Table 1. The samples with the dimensions of 30 mm × 50 mm × 5 mm and the apparent density after moulding of 1.46–1.59 g/cm³, underwent mutual moisture exchange during the measurements, represented the conditions which usually occurred in the surface layers of sand moulds and cores down to the depth of 2.5 mm.

Tabela 1. Skład masy formierskiej
Table 1. Moulding sand composition

Składnik/Component	Ilość, cz. mas. / Amount, parts of mass
osnowa ziarnowa – piasek kwarcowy / sand grains – silica sand	100
spoiwo – szkło wodne sodowe / binder – sodium water glass	3,50
utwardzacz – typu Flodur / hardener – Flodur type	0,35

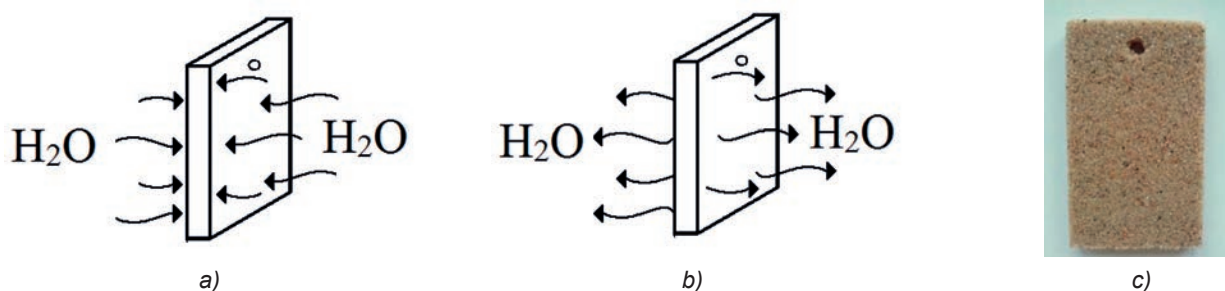
Utwardzone i wysuszone w temperaturze $T = 50^{\circ}\text{C}$ w cyklach 15-minutowych do stałej masy (w celu pozbycia się wody pochłoniętej z otoczenia w czasie utwardzania) próbki umieszczano na okres 12 godzin w komorze o wysokiej wilgotności powietrza powyżej 85% oraz temperaturze mieszczącej się w zakresie $28\text{--}33^{\circ}\text{C}$. Po zakończeniu okresu przechowywania w warunkach wysokiej wilgotności próbki umieszczano na stanowisku do pomiaru procesu wysychania naturalnego warstw wierzchnich form piaskowych metodą grawimetryczną, przedstawionym schematycznie na rysunku 2. Schemat wymiany wilgoci w wyżej wymienionych procesach (pochłaniania wilgoci i wysychania) wraz z rzeczywistą próbką przedstawiono na rysunku 3.

The samples, hardened and dried at temperature $T = 50^{\circ}\text{C}$ in 15-minute cycles to constant mass (in order to remove the water absorbed from the environment during the hardening process), were placed in a chamber with high air humidity (over 85%) and temperature within the range of $28\text{--}33^{\circ}\text{C}$ for a period of 12 hours. After the end of the examination time under high humidity conditions, the samples were placed on a test stand used to measure the process of natural drying of the surface layers of sand moulds and cores by the gravimetric method, schematically presented in Figure 2. The diagram of moisture exchange in the above processes (moisture sorption and desorption) together with the actual sample is presented in Figure 3.



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru procesu wysychania naturalnego powierzchniowych warstw form i rdzeni piaskowych: 1 – próbka, 2 – waga, 3 – statyw, 4 – termohigrometr, 5 – komputer

Fig. 2. Test stand for measurements of the natural drying process of the surface layers of sand moulds and cores: 1 – sample, 2 – weight, 3 – support, 4 – hytherograph, 5 – computer



Rys. 3. Schemat procesu obustronnej wymiany wilgoci na prostokątnych próbkach: a) sorpcja wilgoci, b) desorpcja wilgoci, c) próbka wykorzystywana do badań

Fig. 3. Scheme of the process of mutual moisture exchange on cuboidal samples: a) moisture sorption, b) moisture desorption, c) test sample

W ramach badań sprawdzono zachowanie się zawilgoconych warstw wierzchnich wykonanych z masy formierskiej z osnową z piasku kwarcowego Sibelco o frakcji głównej klasyfikowanej jako „średnia”, w warunkach stałej temperatury mieszczącej się w przedziale $20\text{--}23^{\circ}\text{C}$ oraz różnych wilgotności względnych powietrza około 40% oraz około 50%. Podjęto również próbę analizy procesu wysychania naturalnego dla zawilgo-

The investigations included the verification of the behaviour of the moistened surface layers made of a moulding sand with the silica sand grains from the Sibelco Company, with the main fraction classified as “medium”, under the conditions of constant temperature within the range of $20\text{--}23^{\circ}\text{C}$ and different relative air humidities – about 40% and 50%. It was also an attempt of analyzing the process of natural drying of the mois-

conych warstw wierzchnich form i rdzeni wykonanych z masy o różnych, ściśle rozfrakcjonowanych średnich wielkości ziarna d_L : $0,10 < d_L < 0,16$; $0,20 < d_L < 0,32$; $0,40 < d_L < 0,63$ oraz $0,80 < d_L < 1,60$ w warunkach wilgotności względnej powietrza mieszczącej się w przedziale 27–32% oraz temperatury 20–23°C.

3. Analiza wyników

Przeprowadzone badania dotyczyły analizy procesu wysychania naturalnego zawilgoconych warstw wierzchnich form piaskowych wykonanych z masy formierskiej z uwodnionym krzemianem sodu (szkłem wodnym) w technologii ciekłych estrów.

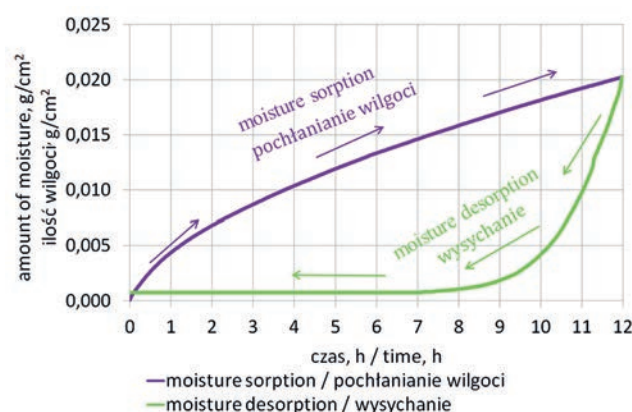
Na [rysunku 4](#) przedstawiono proces pochłaniania (adsorpcji) wilgoci z otoczenia w warunkach wysokiej wilgotności względnej powietrza, a następnie proces oddawania wilgoci do otoczenia (desorpcja) po zmianie (zmniejszeniu) wilgotności powietrza.

tened surface layers of sand moulds and cores made of moulding sands with different, strictly unfractionated, grain sizes d_L : $0.10 < d_L < 0.16$; $0.20 < d_L < 0.32$; $0.40 < d_L < 0.63$ and $0.80 < d_L < 1.60$ under the conditions of relative air humidity of 27–32% and temperature of 20–23°C.

3. Analysis of results

The performed tests concerned analysis of the process of natural drying of the moistened surface layers of sand moulds made from moulding sand with hydrated sodium silicate (water glass) in the technology of liquid esters.

[Figure 4](#) shows the process of moisture sorption from the environment under the conditions of high relative air humidity, and next – the process of moisture desorption into the environment after the change (reduction) of air humidity.



Rys. 4. Przebieg procesu pochłaniania i oddawania wilgoci przez wierzchnie warstwy form piaskowych

Fig. 4. Course of the process of moisture adsorption and desorption by sand mould surface layers

Dostrzega się zjawisko utraty mniejszej ilości wilgoci, niż została uprzednio pochłonięta przez powierzchniowe warstwy form. Tworzy to pętlę histerezy. Jednakże nie jest to klasyczna histereza sorpcji opisana osiami aktywności wody i zawartości wody [11]. Mimo to należy mieć na uwadze, że odparowanie wody z warstw wierzchnich form nie usunie jej całościowo. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia powstawania wad powierzchni odlewów pochodzenia gazowego, spowodowanych zbyt dużą wilgotnością formy, w szczególności gdy powierzchnia jest wysoce rozwinięta.

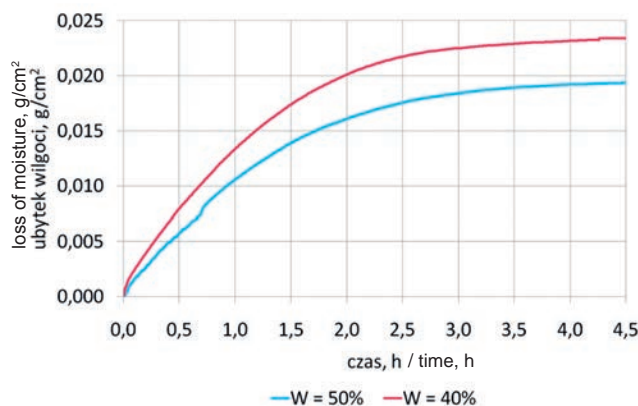
[Rysunek 5](#) przedstawia przebieg procesu wysychania (desorpcji wilgoci) zawilgoconych powierzchniowych warstw form piaskowych wykonanych z masy z uwodnionym krzemianem sodu (szkłem wodnym) w warunkach stałej temperatury równej 23°C oraz dwóch różnych wilgotności względnych powietrza – 40% i 50%. Przebiegi procesów w obu warunkach wykazują podobną charakterystykę. Różnią się między

It can be observed that a smaller amount of moisture is lost than the amount adsorbed previously by the surface layers of sand mould. This creates a hysteresis loop, which is not, however, the classic sorption hysteresis described by the axes of water activity and water content [11]. Despite this fact, it should be noted that the evaporation of the water from the sand mould surface layers will not be removed completely. This is especially important from the point of view of the formation of gas-originating cast surface defects, caused by excessive moisture of the mould, especially when the surface is highly developed.

[Figure 5](#) shows the course of the drying process (moisture desorption) of the moistened surface layers of sand moulds made from moulding sand with hydrated sodium silicate (water glass) under the conditions of constant temperature of 23°C and two different relative air humidities – 40% and 50%. The course of the processes in both cases of measurement conditions

sobą intensywnością zachodzenia procesu, który można podzielić na dwa etapy. Pierwszy – charakteryzujący się liniową utratą wilgoci i drugi zbliżający się asymptotycznie do wartości wilgotności równowagowej, a tym samym zakończenia procesu. Równocześnie obserwuje się, że powierzchniowe warstwy formy i rdzeni wysychające w niższej wilgotności względnej powietrza (40%) są w stanie stracić większą ilość wody na jednostkę powierzchni, niż warstwy znajdujące się w większej wilgotności (50%).

exhibit similar characteristics but significantly differ in the intensity of the process, which can be divided into two stages. Stage one is characterized by a linear loss of moisture, whereas stage two asymptotically approaches the value of equilibrium moisture, and thus the end of the process. At the same time, one can observe that the surface layers of sand moulds and cores drying in lower relative air humidity (40%) are capable of losing a larger amount of water per surface unit than the layers exposed to higher humidity (50%).

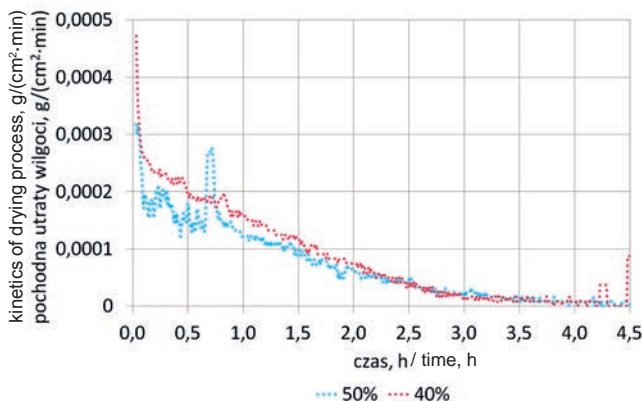


Rys. 5. Przebieg procesu wysychania przy stałej temperaturze otoczenia zawilgoconych warstw wierzchnich form piaskowych wykonanych z masy ze szkłem wodnym

Fig. 5. Course of the drying process at constant environment temperature of the moistened surface layers of sand moulds and cores made from moulding sand with water glass

Na rysunku 6 przedstawiono natomiast szybkość zmian utraty wilgoci w warstwach wierzchnich wyrażoną za pomocą pochodnej. Zauważa się szybszą utratę wilgoci z warstw wierzchnich, które podlegały wysychaniu w warunkach niższej wilgotności względnej powietrza. Przebieg zmian wykazuje natomiast podobną charakterystykę dla obu rozpatrywanych warunków otoczenia.

Figure 6 shows the rate of changes in the moisture decrease in the surface layers expressed by a derivative. A rapid moisture decrease in the surface layers, which were drying under the conditions of lower relative air humidity can be noticed. In turn, the course of the changes exhibits similar characteristics for both considered sets of environment conditions.

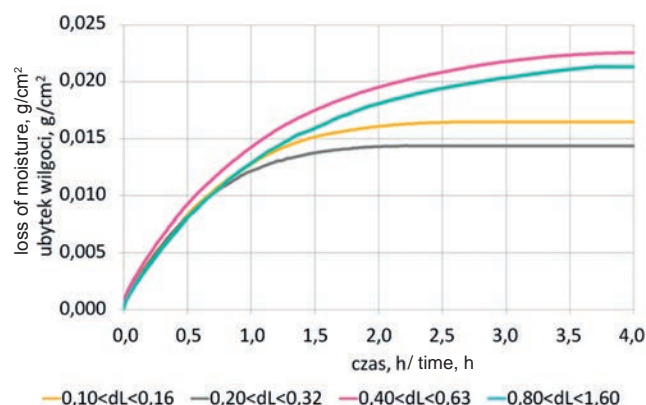


Rys. 6. Pochodna utraty wilgoci w zawilgoconych warstwach wierzchnich form piaskowych wykonanych z masy ze szkłem wodnym

Fig. 6. Derivative of moisture loss in the moistened surface layers of sand moulds and cores made from moulding sand with water glass

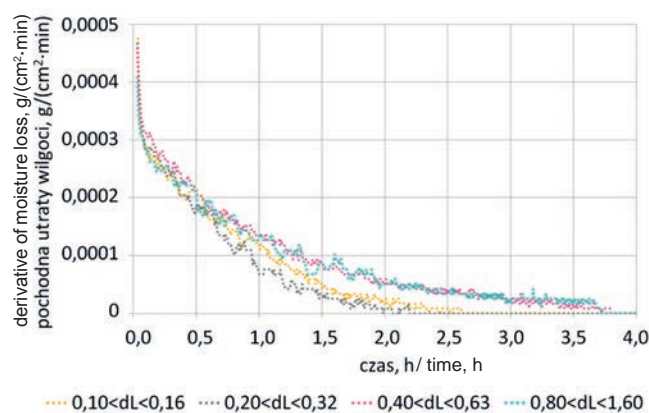
Rysunki 7 i 8 dotyczą masy ze szkłem wodnym z zastosowaniem osnowy kwarcowej o różnej wielkości ziarna (czterech przedziałach średniej wielkości ziarna d_L). W trakcie procesu wysychania można zaobserwować wyraźną różnicę w ilości oddawanej do otoczenia wilgoci z podziałem na masę formierską z użyciem ziaren mniejszych (frakcja $0,10 < d_L < 0,16$ oraz frakcja $0,20 < d_L < 0,32$) oraz większych (frakcja $0,40 < d_L < 0,63$ oraz frakcja $0,80 < d_L < 1,60$). Różnice w przebiegu procesu desorpcji pomiędzy warstwami wierzchnimi o różnej wielkości ziarna (tym samym o różnej wielkości porów międzyziarnowych) zaczynają pojawiać się po około 1 h trwania procesu. Warstwa wierzchnia formy i rdzeni o ziarnach większych oddaje do otoczenia więcej wilgoci w porównaniu do warstwy wierzchniej o ziarnach mniejszych. Co więcej, zgodnie z rysunkiem 8, sam proces wysychania dla masy o ziarnistości w przedziale $0,40 < d_L < 0,63$ oraz $0,80 < d_L < 1,60$ trwa dłużej i zachodzi z większą intensywnością.

Figures 7 and 8 refer to water glass moulding sands with different silica sand grains sizes (four ranges of grain size d_L). During the drying process, there can be observed a clear difference in the amount of moisture released into the environment, with the division into the moulding sand with smaller grains (fraction $0.10 < d_L < 0.16$ and $0.20 < d_L < 0.32$) and larger grains (fraction $0.40 < d_L < 0.63$ and $0.80 < d_L < 1.60$). The differences in the course of the desorption process between surface layers of different grain sizes (and thus different sizes of intergranular pores) begin to appear after about 1 h of the process. The surface layers of the sand moulds and cores with larger grains release more moisture into the environment than the surface layers with smaller grains. Moreover, according to Figure 8, the drying process, as such, in the case of the moulding sand of granularity in the range of $0.40 < d_L < 0.63$ and $0.80 < d_L < 1.60$ lasts longer and proceeds with higher intensity.



Rys. 7. Przebieg procesu wysychania przy stałej temperaturze otoczenia zawilgoconych warstw wierzchnich form piaskowych wykonanych z masy o różnej wielkości ziarna

Fig. 7. Course of the drying process at a constant environment temperature of the moistened surface layers of sand moulds and cores made from moulding sand of different grains sizes



Rys. 8. Pochodna utraty wilgoci w zawilgoconych warstwach wierzchnich form piaskowych wykonanych z masy o różnej wielkości ziarna

Fig. 8. Derivative of moisture loss in the moistened surface layers of sand moulds made from moulding sand of different grains sizes

Na tej podstawie można przypuszczać, że w procesie wysychania większą rolę odgrywa odłączanie cząstek wody znajdujących się w porach (przestrzeniach międzyziarnowych) i przechodzenie ich do powietrza atmosferycznego niż z powierzchni ziaren osnowy. W zawilgoconym materiale, w porach o większej średnicy znajduje się więcej warstw cząsteczek wody, w porównaniu do porów o małych rozmiarach. Im dalej od ścianki porów znajduje się cząsteczka wody, tym mniejsza siła oddziaływań międzycząsteczkowych na nią działa, dlatego w procesie desorpcji łatwiej o jej odczepienie i przejście do atmosfery. Może to być powodem, dla którego proces wysychania zachodzi z większą intensywnością dla warstw wierzchnich rdzeni i form piaskowych zbudowanych z większych ziaren piasku kwarcowego (frakcja $0,40 < d_L < 0,63$ oraz frakcja $0,80 < d_L < 1,60$).

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań na temat wysychania zawilgoconych powierzchniowych warstw form i rdzeni piaskowych na przykładzie masy ze szkłem wodnym w technologii estrowej stwierdza się, że warunki, w jakich zachodzi proces, są kluczowe. Wilgotność względna otaczającego powietrza determinuje zarówno ilość wilgoci, jaką traci każda jednostka powierzchni warstwy wierzchniej formy czy rdzenia, jak i szybkość, z jaką ta utrata zachodzi. Intensywność zachodzenia procesu wysychania (przy stałej temperaturze) jest tym większa, im niższa jest wilgotność względna otoczenia, jak również im większy rozmiar przestrzeni międzyziarnowych w masie formierskiej.

Podziękowania

Badania zostały sfinansowane w ramach grantu dziekańskiego nr 15.11.170.570.

Literatura/References

1. Jamrozowicz Ł., J. Zych, J. Kolczyk, D. Wróblewski. 2014. „Rola kształtu powierzchni formy w procesie wysychania wybranych powłok ochronnych”. *Archives of Foundry Engineering* 14(sp. is. 2) : 39–44.
2. Kolczyk J., J. Zych. 2014. „Kinetyka utwardzania i wysychanie form ceramicznych ze spoiwem nowej generacji – krzemionką koloidalną”. *Przegląd Odlewnictwa* 64(3–4) : 84–92.
3. Kaźnica N., J. Zych. 2015. „Investigations of the sorption process' kinetics of sand moulds' surface layers under conditions of a high air humidity”. *Archives of Foundry Engineering* 15(sp. is. 3) : 29–32.
4. Kaźnica N., J. Zych. 2015. „Procesy pochłaniania wilgoci z otoczenia i wysychania na przykładzie wierzchnich warstw form odlewniczych”. *Archives of Foundry Engineering* 15(sp. is. 4) : 63–66.
5. PN-87M-04250: Warstwa wierzchnia. Terminologia.
6. *Proces suszenia substancji spożywczych. Ćwiczenia laboratoryjne*. Gdańsk: Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny. Pobrane z: <http://mech.pg.edu.pl/documents/4555684/4565480/suszenie.pdf> [dostęp: 19.09.2016].
7. Śliwa T. 2014. *Analiza odkształcania i pęknięcia materiałów ilastych podczas suszenia konwekcyjnego*. Rozprawa doktorska, Poznań: Politechnika Poznańska.

On this basis, it can be assumed that, in the drying process, a more important role is separation and transfer into atmospheric air of the water particles present in the pores (intergranular spaces) than transfer from the surface of the sand grains. In the moistened material, in the pores with a larger diameter, there are more layers of water molecules as compared to the pores of smaller sizes. The further away the water molecule is located from the pore wall, the lower the force of intermolecular interactions exerted onto it. And so, in the desorption process, it is easier for it to detach and transition into the atmosphere. This can be the reason why the drying process proceeds with a higher intensity for the surface layers of sand moulds and cores made from larger silica sand grains (fraction $0.40 < d_L < 0.63$ and $0.80 < d_L < 1.60$).

4. Conclusions

Based on the performed research of the drying process of moistened surface layers of sand moulds and cores on the example of a water glass moulding sand in the ester technology, it was established that the conditions under which the process takes place are the most important. The relative humidity of the surrounding air determines both – the amount of moisture decrease by each surface area unit of the mould or core surface layer, and the rate at which this decrease occurs. The higher the relative environmental humidity and the larger the size of intergranular spaces in the moulding sand, the higher is the intensity of the drying process (at a constant temperature).

Acknowledgements

The research has been financed from the Dean's grant No. 15.11.170.570.

8. Boszko M. 2009. *Kinetyka suszenia*. Warszawa: Politechnika Warszawska, Laboratorium Procesów Wymiany Masy. Pobrane z: <http://www.zap.pw.plock.pl> [dostęp: 19.09.2016].
9. Kucharczyk A. 2013. „Wysychanie materiałów porowatych w układach warstwowych – Badania eksperymentalne”. *Rocznik Inżynierii Budowlanej* 13 : 85–88.
10. Baranowski J., S. Melech, P. Adamski. 2002. *System sterowania temperaturą i wilgotnością w procesach suszenia produktów spożywczych*. VI Sympozjum „Pomiary i sterowanie w procesach przemysłowych”.
11. Gubernat A. 2013. *Suszenie. Transport masy i ciepła. Seminarium*. Materiały dydaktyczne Katedry Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych AGH, Kraków. Pobrane z: <http://kcimo.pl> [dostęp: 19.09.2016].
12. Dłużewski M., A. Dłużewska. 2001. *Technologia żywności. Podręcznik dla technikum. Część 2*. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
13. Kneule F. 1970. *Suszenie*. Warszawa: Arkady.
14. Kowalski S.J. 2003. *Thermomechanics of drying processes*. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Vol. 8. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
15. Flaga-Maryańczyk A. 2012. „Wybrane procesy suszenia technologicznego z zastosowaniem pomp ciepła”. *Czasopismo Techniczne. Środowisko* 109(28) : 183–197.