

# Procesy pochłaniania wilgoci z otoczenia i wysychania na przykładzie wierzchnich warstw form odlewniczych

N. Kaźnica<sup>a\*</sup>, J. Zych<sup>b</sup>

<sup>a</sup> AGH - Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Odlewnictwa,  
Katedra Tworzyw Formierskich, Technologii Formy i Odlewnictwa Metali Nieżelaznych,  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: [kaznica@agh.edu.pl](mailto:kaznica@agh.edu.pl)

Otrzymano 20.11.2015; zaakceptowano do druku 29.12.2015

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badania procesów: pochłaniania wilgoci z otoczenia oraz wysychania wierzchnich warstw form piaskowych. Badania obejmowały trzy rodzaje mas formierskich – jedną ze spoiwem nieorganicznym (uwodniony krzemian sodu) i dwie ze spoiwami organicznymi (żywica furfurylowa oraz żywica alkidowa). Badania sorpcji prowadzono na prototypowym stanowisku badawczym pozwalającym na utrzymanie stałej, wysokiej temperatury otoczenia (28 – 33 °C) oraz wilgotności względnej powietrza powyżej 95%. Badania desorpcji prowadzono na analogicznym stanowisku badawczym zapewniającym odpowiednio niższe wartości wilgotności względnej powietrza oraz temperatury. W obu przypadkach wykorzystano metodę grawimetryczną. Na podstawie analizy otrzymanych wyników wykazano, że wierzchnie warstwy form odlewniczych pochłaniają wilgoć z otoczenia z różną intensywnością, uzależnioną między innymi od ich składu. Jednocześnie, wszystkie zawilgocone badane masy poddane procesowi wysychania oddawały wilgoć do otoczenia. Krzywe sorpcji i desorpcji nie pokrywają się. W przypadku desorpcji zawartość końcowa wilgoci w wierzchnich warstwach form odlewniczych jest większa dla wszystkich badanych mas, niezależnie od rodzaju masy formierskiej.

**Słowa kluczowe:** Formy piaskowe, Warstwa wierzchnia, Masy formierskie, Pochłanianie wilgoci, Wysychanie.

## 1. Wprowadzenie

Przemysł odlewniczy boryka się z problemem pojawiania się wad w odlewach. Wzmożone ich występowanie obserwuje się okresowo, zgodnie ze zmianą warunków atmosferycznych w ciągu roku. Takie zmiany, w szczególności wilgotności powietrza atmosferycznego i temperatury, mogą negatywnie wpływać na jakość powierzchni otrzymywanych odlewów.

W przypadku mas formierskich ze spoiwem hydrofilnym zbyt duża wilgotność prowadzi do wtórnej hydratacji spoiwa, co skutkuje utratą wytrzymałości masy. Natomiast zbyt suche powietrze powoduje wzrost szybkości procesu dehydratacji spoiwa, co przy jego dużym skurczu i małej plastyczności

prowadzi do występowania naprężeń skurczowych, a w efekcie do pęknięcia mostków spoiwa i utraty wytrzymałości masy [1, 2].

Ważne staje się więc poznanie zachowania się różnego rodzaju mas formierskich w zmiennych warunkach atmosferycznych oraz procesów w nich zachodzących, aby móc zapobiegać potencjalnym wadom powierzchni odlewów.

## 2. Wilgoć w masie formierskiej

Masa formierska, która ze swej natury zaliczana jest do materiałów porowatych, gromadzi wodę wewnątrz porów i kapilar. Wilgoć może znajdować się ponadto w różnych innych miejscach, dlatego, jak podaje F. Kneule [3] rozróżnia się wilgoć powierzchniową, kapilarną i komórkową:

- wilgoć powierzchniową stanowi warstwa cieczy na powierzchni danego materiału, która pozostaje w kontakcie z czynnikiem suszącym. Jednakże prężność pary nad jej powierzchnią jest równa prężności pary nasyconej w danej temperaturze;
- wilgoć kapilarną stanowi ciecz zgromadzona wewnątrz danego materiału, a jej zachowanie determinowane jest przez średnicę porów. Ciśnienie pary nad zwierciadłem cieczy w mikroporach jest zdecydowanie mniejsze od prężności pary nasyconej;
- wilgoć komórkową stanowi woda wchodząca w skład struktury materiału, tworząc z nim układ koloidalny i powodując jego pęcznienie [4].

Wilgoć znajdująca się w materiale może być z nim związana na kilka sposobów różniących się od siebie wartością energii wiązania. Na tej podstawie rozróżnia się wilgoć związaną chemicznie, fizyko – chemicznie oraz fizyko – mechanicznie [5].

### 3. Pochłanianie wilgoci z otoczenia

Pochłanianie pary wodnej zawartej w powietrzu nazywa się sorpcją wilgoci i może odbywać się na dwa sposoby:

- przez przyleganie cząsteczek pary wodnej do powierzchni porów materiału (adsorpcja),
- przez wnikanie pary wodnej w objętość całego ciała (absorpcja) [6].

Charakter i przebieg zjawiska zależy przede wszystkim od struktury wewnętrznej materiału oraz od ilości wilgoci w niej zawartej. Dodatkowo, można go podzielić na pewne okresy, w których zasadniczą rolę odgrywają różne mechanizmy ruchu wilgoci w zależności od stanu zawilgocenia materiału [7].

Jak podają W. Płoński i J. A. Pogorzelski [6] w procesie sorpcji pary wodnej można wyróżnić trzy okresy:

- pierwszy – kiedy na powierzchni porów wytwarza się mononuklearna warstwa adsorpcyjna;
- drugi – kiedy warstwa monoadsorpcyjna ulega przekształceniu w warstwę polimolekularną;
- trzeci – kiedy oprócz zjawiska adsorpcji występuje również kondensacja kapilarna.

Wraz ze wzrostem ilości wody w materiale wzrasta wypełnienie nią porów i kapilar ośrodka. Powoduje to tworzenie odizolowanych skupisk wody, określanych jako „wyspy cieczy”, które są praktycznie nieruchome i nie biorą udziału w globalnym ruchu cieczy. Skutkuje to zmniejszeniem przekroju czynnego dla przepływu par oraz pojawieniem się nowego mechanizmu transportu – kondensacja i odparowywanie wody po przeciwnych stronach „wysp cieczy”.

W miarę dalszego wzrostu wilgotności materiału następuje wzrost liczby i wielkości „wysp cieczy”, co skutkuje względnym spadkiem strumienia masy przenoszonego przez dyfuzję pary i konwekcję wilgotnego powietrza, a tym samym zwiększeniem znaczenia mechanizmu kondensacja – parowanie.

Kolejno dochodzi do stopniowego połączenia się „wysp cieczy” w tak zwane „nitki cieczy”. Ma to miejsce przy wilgotności krytycznej materiału. Wówczas pojawia się nowy mechanizm, czyli przenoszenie kapilarne. Jest to równoznaczne z tym, że nieruchoma dotąd faza ciekła zaczyna przemieszczać się

pod wpływem sił kapilarnych, co skutkuje wyrównaniem wilgotności w mikroobszarach materiału.

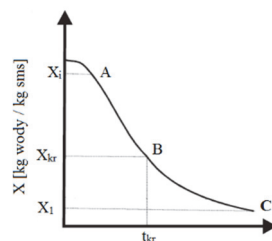
Dalszy wzrost wilgotności materiału ponad wartość krytyczną powoduje zwiększenie ilości nieprzerwanych „nitek cieczy” aż do niemal całkowitego wypełnienia objętości porów i kapilar. Pełne nasylenie wodą powoduje ustanie ruchu kapilarnego i przepływu konwekcyjnego wody w materiale [7].

### 4. Oddawanie wilgoci do otoczenia

Proces suszenia polega na eliminacji wody z materiału do otoczenia poprzez dyfuzję z wnętrza ku jego powierzchni, a następnie poprzez parowanie właśnie z tej powierzchni [5]. Jest to zjawisko trudne do opisu ze względu na swoją złożoność wynikającą z faktu zmieniających się w czasie trwania procesu mechanizmów transportu zarówno ciepła, jaki i masy, zależnie od zawartości wilgoci i rodzaju jej wiązania z materiałem suszonym [8].

Siłą napędową omawianego procesu w otoczeniu powietrza jest różnica ciśnień cząstkowych pary wodnej między powierzchnią materiału poddanego wysychaniu a powietrzem suszącym. Aby mogło dojść do procesu wysychania musi zostać spełniona zależność  $p_p > p_g$ , czyli ciśnienie cząstkowe pary wodnej nad powierzchnią materiału ( $p_p$ ) musi być wyższe od ciśnienia cząstkowego w gazie otaczającym materiał ( $p_g$ ). W przeciwnym razie to dany materiał będzie pobierał wilgoć z otoczenia. Natomiast sama intensywność procesu jest tym większa, im mniejsza jest wilgotność względna czynnika suszącego oraz wyższa jego temperatura. W momencie, w którym ciśnienia cząstkowe par nad powierzchnią materiału oraz w otaczającym gazie będą sobie równe, wówczas proces suszenia zostanie zahamowany. Taki stan określa się mianem wilgotności równowagowej [9].

Sam proces suszenia odzwierciedlony na krzywej suszenia przedstawionej na rys. 1 można podzielić, zgodnie z literaturą [5, 9, 10], na dwa zasadnicze okresy: pierwszy o stałej szybkości suszenia i drugi o malejącej szybkości suszenia.

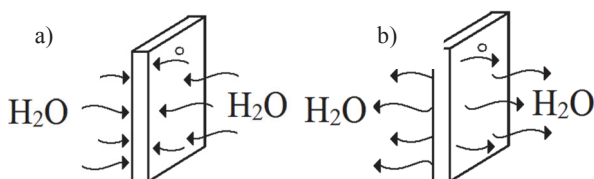


Rys. 1. Krzywa suszenia ciała kapilarno-porowatego [10]

Pierwszy okres (odcinek AB) charakteryzuje się stałą szybkością suszenia, o której wielkości decydują parametry suszącego medium. Następuje odparowanie wilgoci z powierzchni materiału na skutek kontaktu wilgotnego materiału z suchym powietrzem. Powstająca para wodna przedostaje się do przepływającego powietrza w skutek gradientu odpowiedzialnego za dyfuzję cząstek pary wodnej z materiału. Pierwszy okres suszenia trwa do momentu odparowania całości wilgoci z powierzchni materiału.

Drugi okres (odcinek BC) charakteryzujący się malejącą szybkością suszenia trwa od momentu osiągnięcia przez materiał wilgotności krytycznej (punkt B) do osiągnięcia wilgotności równowagowej (punkt C), czyli stanu równowagi między wilgotnością powietrza suszącego a wilgotnego materiału w danych warunkach temperatury oraz ciśnienia. Występuje wówczas odparowywanie wilgoci z coraz głębszych warstw wilgotnego materiału, przemieszczanie się pary wodnej do jego powierzchni na skutek dyfuzji wewnętrznej oraz dyfuzji w warstwie przepływającego powietrza.

## 5. Metodyka badawcza



Rys. 2. Proces sorpcji (a) i desorpcji (b) przez wierzchnie warstwy form odlewniczych

Masa formierska zaliczana jest do materiałów porowatych. W związku z tym wykazuje zdolność pochłaniania wilgoci z otoczenia, co autorzy udowodnili w poprzednich publikacjach [11, 12]. Proces ten zachodzi najszybciej w powierzchniowych warstwach formy odlewniczej do głębokości kilku milimetrów. Jednakże wraz ze zmianą warunków otoczenia w jakich znajduje się forma odlewnicza (zmniejszenie ciśnienia cząstkowego pary wodnej w gazie otaczającym materiał w stosunku do ciśnienia cząstkowego pary wodnej nad powierzchnią materiału), jej powierzchniowa, nadmiernie zawilgocona warstwa oddaje wilgoć do otoczenia aż do momentu osiągnięcia równowagi sorpcyjnej.

W celu analizy zaobserwowanych zjawisk skonstruowano dwa stanowiska badawcze. Pierwsze, prototypowe stanowisko pozwalające monitorować proces pochłaniania pary wodnej z atmosfery przez wierzchnie warstwy form piaskowych w warunkach wysokiej wilgotności powietrza zostało opisane w [11]. Drugie, analogiczne stanowisko badawcze pozwala monitorować w czasie rzeczywistym proces desorpcji zawilgoconej wierzchniej warstwy formy odlewniczej poddanej uprzednio procesowi sorpcji.

Badaniu poddane zostały masy formierskie z trzema spoiwami, różniącymi się powinowactwem do wody – żywicą alkidową, żywicą furfurylową oraz uwodnionym krzemianem sodu, zwanym zwyczajowo szkłem wodnym. Ziarnistość osnowy piaskowej – piasku kwarcowego wynosiła  $0,20 < d_L < 0,32$  mm. Specjalnie przygotowane cienkościennie próbki odwzorujące warunki panujące w powierzchniowych warstwach form odlewniczych opisano w [11].

### 5.1. Przebieg badania

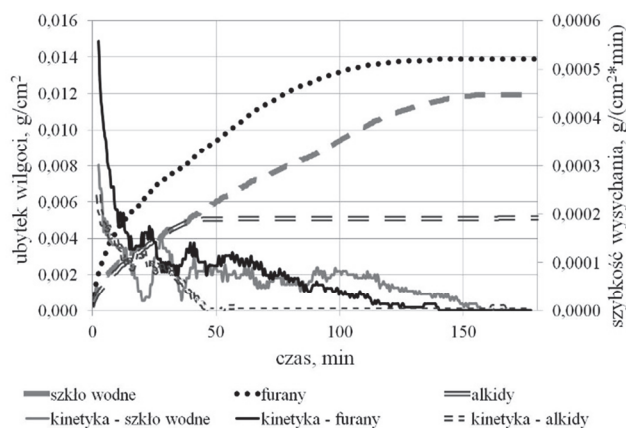
Badanie procesów sorpcji i desorpcji wilgoci przez wierzchnie warstwy form piaskowych przebiegało dwuetapowo. W pierwszej kolejności monitorowano proces pochłaniania wody z otoczenia w warunkach wysokiej wilgotności powietrza, co

zostało szczegółowo opisane w [11]. Następnie, po 12 godzinach trwania badania próbkę przekładano na stanowisko do pomiaru procesu desorpcji metodą grawimetryczną. Zmiany masy z dokładnością do  $10^{-3}$  g mierzono w sposób ciągły przez cały czas trwania badania, tj. 12 h i rejestrowano za pomocą komputera co 30 sekund. Warunki, w jakich analizowano proces wysychania wynosiły odpowiednio:

- temperatura 22 – 26 °C,
- wilgotność 26 – 37%.

## 6. Analiza wyników

Przeprowadzone badania dotyczyły procesu pochłaniania wilgoci z otoczenia przez wierzchnie warstwy form piaskowych w warunkach dużej wilgotności względnej powietrza – powyżej 95% i stałej temperatury mieszczącej się w przedziale 28 – 33 °C, a następnie wysychania tej warstwy w warunkach wilgotnościowych w zakresie 26 – 37% oraz temperaturowych w zakresie 22–26°C.



Rys. 3. Przebieg procesu wysychania wierzchnich warstw masy formierskiej

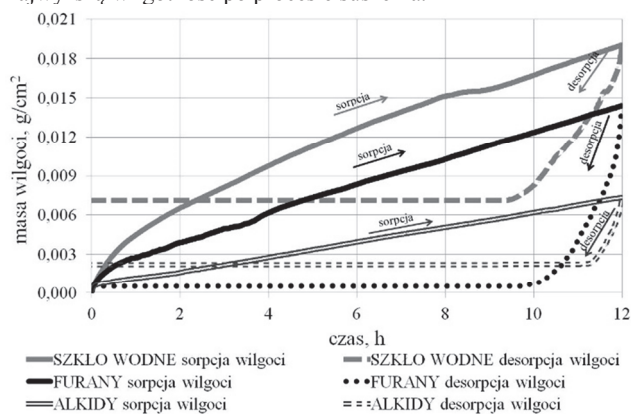
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania oddawania wilgoci do otoczenia przez zawilgocone próbki dla trzech rodzajów mas formierskich ze spoiwami. Stwierdza się, że charakterystyki mają podobny przebieg, jednak różnią się znacząco intensywnością narastania. Sam proces można natomiast podzielić na dwa etapy – kiedy proces przebiega z dużą intensywnością oraz kiedy zwalnia, co potwierdzają krzywe kinetyki pozwalające określić zmianę szybkości ubywania wilgoci z próbki.

Rysunek 4 przedstawia z kolei przebieg dwóch procesów: pochłaniania wilgoci z otoczenia przez wierzchnie warstwy form piaskowych o ziarnistości  $0,20 < d_L < 0,32$  w warunkach wysokiej wilgotności, a następnie proces oddawania jej z powrotem, po ustaniu ekstremalnie wysokich wilgotności powietrza atmosferycznego.

Dla każdej z badanych mas formierskich obserwuje się zjawisko oddawania do otoczenia mniejszej ilości wilgoci niż została uprzednio pochłonięta. Tworzy to klasyczną pętlę histerezy.

Co więcej, masa ze szkłem wodnym pobiera najwięcej wilgoci z otoczenia, co zostało już udowodnione w [11], ale

jednocześnie oddaje jej najmniej, zachowując tym samym najwyższą wilgotność po procesie suszenia.



Rys. 4. Przebieg procesu sorpcji i desorpcji wilgoci przez wierzchnie warstwy form odlewniczych

Potwierdza to jej zdecydowany hydrofilowy charakter. Masy z żywicami pobierają odpowiednio mniej wilgoci w porównaniu z masą na bazie szkła wodnego, przy czym w masie z żywicą furfurylową pozostaje jej najmniej po ustaniu wysokiej wilgotności względnej powietrza atmosferycznego.

## 7. Podsumowanie

W ramach zaprezentowanej pracy przedstawiono przebiegi procesów: pochłaniania wilgoci z otoczenia (sorpcji wilgoci) przez wierzchnie warstwy form odlewniczych w warunkach wysokiej wilgotności powietrza atmosferycznego oraz wysychania (desorpcji wilgoci) takich zawilgoconych warstw masy formierskiej. Znajomość zachowania się mas w zmiennych warunkach atmosferycznych może być istotne z punktu widzenia ograniczania występowania wad powierzchni odlewów pojawiających się okresowo w odlewniach.

W świetle przeprowadzonych badań można potwierdzić, że krzywe sorpcji i desorpcji nie pokrywają się. Tym samym, w przypadku desorpcji końcowa zawartość wilgoci w wierzchnich warstwach form odlewniczych jest większa, niezależnie od rodzaju masy formierskiej.

Należy podkreślić, że przeprowadzone badania mają charakter badań wstępnych i wykazują potrzebę ich kontynuacji, w tym o badania w innych warunkach, mniejszej wilgotności powietrza, typowej dla klimatu europejskiej strefy klimatycznej.

## Literatura

- [1] Zych, J. (2006). Oddziaływanie warunków atmosferycznych na stan wierzchniej warstwy form piaskowych wykonywanych z mas ze spoiwami chemicznymi. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 6, no 22: 576 – 581.
- [2] Zych, J. (2006). Wierzchnia warstwa form piaskowych – kinetyka zmian jej właściwości. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 6, no 20: 77 – 84.
- [3] Kneule, F. (1970). *Suszenie*. Warszawa: Arkady.
- [4] Ludwig, W. (2015). *Postawy procesów suszarniczych*. Pobrano: październik 24, 2015 z <http://www.wludwig.pl/podstawy.pdf>
- [5] Śliwa, T. (2014). *Analiza odkształcania i pęknięcia materiałów ilastych podczas suszenia konwekcyjnego*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań.
- [6] Płoński, W., Pogorzelski J., A. (1979). *Fizyka budowli. Zasady projektowania przegród budowlanych w zakresie ciepłno – wilgotnościowym*. Warszawa: Arkady.
- [7] Świrska-Perkowska, J. (2012). *Adsorpcja i ruch wilgoci w porowatych materiałach budowlanych w warunkach izotermicznych*. Warszawa: Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej.
- [8] Kowalski, S. J. (2010). Uogólniony opis transportu masy i ciepła w procesach suszenia. *Inż. Ap. Chem.* 49, 4, 38-39.
- [9] *Proces suszenia substancji spożywczych*. Ćwiczenia laboratoryjne. Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska.
- [10] Boszko, M. (2009). *Kinetyka suszenia*. Laboratorium Procesów Wymiany Masy, Politechnika Warszawska.
- [11] Kaźnica, N., Zych, J. (2015). Investigations of the Sorption Process' Kinetics of Sand Moulds' Surface Layers Under Conditions of a High Air Humidity. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 15 spec. iss. 3: 29 – 32;
- [12] Kaźnica, N., Grabarczyk, A., Zych, J. (2015). Sorpcja wody przez wierzchnie warstwy form piaskowych w warunkach wysokiej wilgotności powietrza. *Zeszyt Studenckich Prac Naukowych „SFEROID”*, z. 17: 75 – 80.

# Moisture Sorption and Desorption Processes on the Example of Moulding Sands' Surface Layers

The results of investigations of the sorption and desorption process of surface layers of sand moulds are presented in the paper. Investigations comprised three kinds of moulding sands with one inorganic binder (hydrated sodium silicate) and two organic binders: (furfuryl resin and alkyd resin). Tests of sorption process were performed on the prototype research stand allowing to maintain a constant, high temperature of surroundings (28 – 33 °C) and the relative air humidity above 95%. Tests of desorption process were performed on the analogical research stand ensuring lower value of temperature and the air humidity. The gravimetric method was applied in both measurements. On the bases of achieved results it was shown that surface layers of sand moulds absorb water vapour from surroundings with various intensity which is determined of the chemical composition. Simultaneously, all of the moistened moulding sands which were subjected to the drying process were given moisture to the surroundings back. Sorption and desorption processes curves do not coincide. In case of desorption process the moisture content in the surface layers of all the tested moulding sands is higher irrespective of the kind of moulding sand.