

# Ograniczenia technologii form ceramicznych stosowanych przy odlewaniu lotniczych łopatek turbinowych o dużych rozmiarach

## Limitations to investment casting process in production of big aircraft turbine blades

JACEK NAWROCKI  
RAFAŁ CYGAN  
KRZYSZTOF KUBIAK\*

Przedstawiono ograniczenia procesu wytwarzania ceramicznej formy odlewniczej stosowanej przy odlewaniu precyzyjnym łopatek turbiny silników lotniczych o dużym ciągu >200 kN. Komponenty projektowane dla takich silników charakteryzuje obecność głębokich „kieszoni” (*pockets*) w zamku łopatki w celu zmniejszenia jej masy. Kieszon jest odtwarzana w ceramicznej formie odlewniczej poprzez nakładanie i suszenie kolejnych warstw ceramicznych. Oceniono przebieg wysychania formy ceramicznej w kieszeniach o różnej głębokości. Analiza danych literaturowych oraz wyników badań własnych pozwoliła ustalić wartości temperatury i wilgotności oraz szybkość przepływu powietrza podczas suszenia. Stwierdzono, że prawidłowo prowadzony proces umożliwia dobre wysuszenie kieszeni formy o głębokości 5, 10 i 15 mm. **SŁOWA KLUCZOWE:** technologia wytapianych modeli, odlew precyzyjny, łopaska turbiny, suszenie formy odlewniczej

*Acknowledged in the paper are limitations to the investment casting mold manufacturing process used in production of cast airfoil blades installed in the 200 kN plus aircraft engines. Noted for these blades are deep, weight reducing pockets in the blade roots. Root pockets are replicated in ceramic mold by applying and drying consequent ceramic coats. Ceramic molds with the pockets of different depth were examined for drying up progress. Results of the tests carried out on drying process were compared with the relevant data supplied in literature for estimation of the optimum drying process parameters: temperature, humidity and air flow. It was found that mold drying process if performed to properly set process parameters would provide for good drying results of pockets at 5, 10 and 15 mm depth.*

**KEYWORDS:** lost wax casting process, investment casting mold, turbine blade, mold drying process

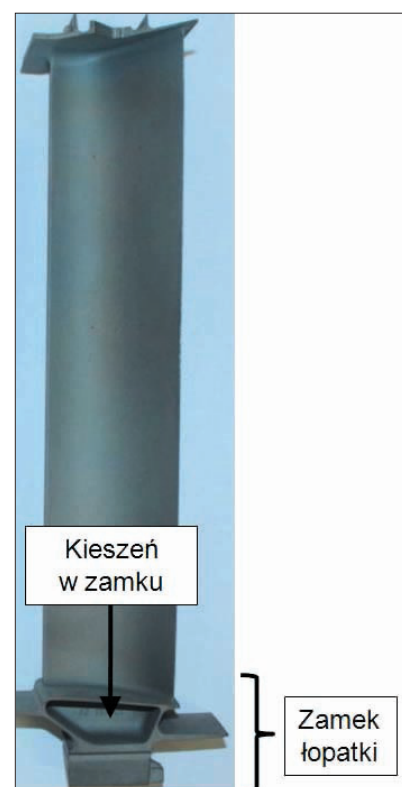
W Airbusach A380 – największych obecnie samolotach pasażerskich na świecie – stosuje się silniki turbinowe o największym ciągu (do 340 kN). Amerykańsko-europejskie konsorcjum Engine Alliance wdrożyło serię silników GP7000 [1]. Rozmiary i kształt ich elementów stanowią ograniczenie dla stosowanych obecnie technologii polikrystalicznych, cienkościennych odlewów precyzyjnych łopatek turbiny.

Łopaski turbiny wytwarza się najczęściej z nadstopów niklu. Jakość eksploatacyjna łopatek jest determinowana przez ich makro- i mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne [2-4]. Istotną rolę odgrywają: przygotowanie formy odlewniczej [5], przyjęte rozmiary odlewu i wady odlewnicze.

Do wytwarzania odlewów łopatek turbiny wykorzystuje się wielowarstwowe formy ceramiczne. Ich przygotowanie jest podstawową operacją w procesie technologicznym. Wprowadzenie kieszeni w konstrukcji łopatek o dużych rozmiarach (rys. 1) ma na celu obniżenie masy łopatki i zmniejszenie sił odśrodkowych oddziałujących na wał turbiny, jednocześnie kieszeń stanowi utrudnienie w procesie suszenia wielowarstwowej formy ceramicznej – wprowadza bowiem fragmenty formy o większej objętości i grubości.

\* Mgr inż. Jacek Nawrocki (jaceknaw@prz.edu.pl) – Uczelniane Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej, dr inż. Rafał Cygan (rafal.cygan@wskrz.com) – WSK „PZL-Rzeszów” S.A., dr hab. inż. Krzysztof Kubiak, prof. PRZ (krkub@prz.edu.pl) – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

Dotychczasowe badania wpływu wielowarstwowej formy ceramicznej na jakość odlewów [6, 7] nie obejmowały procesu suszenia. Przeprowadzono badania szybkości procesu suszenia warstwy ceramicznej formy odlewniczej w obrębie kieszeni w celu określenia wpływu ich głębokości na ogólną jakość oraz na przebieg i stopień wysuszenia formy.



Rys. 1. Łopaska turbiny z kieszenią w zamku

### Materiał i metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbce modelowej odwzorowującej kształt i rozmiary kieszeni zamka łopatki turbiny o głębokości: 5, 10 i 15 mm (rys. 2). Modele wykonano z mieszaneki woskowej B405, używanej do wytwarzania odlewów precyzyjnych.



Rys. 2. Próbkę modelową: a) przed nałożeniem warstw, b) po nałożeniu czwartej warstwy masy ceramicznej

**TABLICA I. Skład mieszanek ceramicznych na poszczególne warstwy formy odlewniczej**

Warstwa nr	Wypełniacz – średni rozmiar cząstek $\mu\text{m}$	Spoivo – zawartość $\text{SiO}_2$ %	Obsypka – średni rozmiar cząstek mm
1	$\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,044$ $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,074$	Krzemionka koloidalna – 25	$\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,177$
2	Glinokrzemian – 0,07 Glinokrzemian – 0,12	Krzemionka koloidalna – 25	Glinokrzemian – 0,25+0,50
3	Glinokrzemian – 0,07 Glinokrzemian – 0,12	Krzemionka koloidalna – 25	Glinokrzemian – 0,50+1,00
4	Glinokrzemian – 0,07 Glinokrzemian – 0,12	Krzemionka koloidalna – 25	Glinokrzemian – 0,05+1,00

**TABLICA II. Warunki procesu suszenia próbek – form**

Suszenie nr	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Wilgotność względna %	Natężenie przepływu powietrza $\text{m}^3/\text{s}$
1	23+24	40+50	0,1+0,6
2	20+21	55+65	2,6+3,2

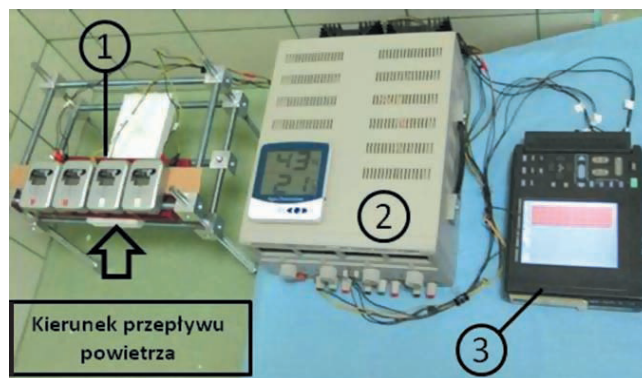
Formę ceramiczną przygotowano z zastosowaniem materiałów i metod opracowanych w Katedrze Materiałoznawstwa i Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej [8].

Na model woskowy nałożono cztery kolejne warstwy ceramiczne. Zastosowano zawiesiny koloidalne proszku ceramicznego (wypełniacz) w krzemionce (spoiwo) oraz proszki tlenku aluminium i glinokrzemianu o różnych rozmiarach cząstek (tabl. I).

Proces suszenia kolejnych warstw prowadzono w komorze suszarniczej, z ciągłą kontrolą warunków suszenia: wilgotności, temperatury i natężenia przepływu powietrza (tabl. II).

Do opisu przebiegu procesu suszenia warstwy wykorzystano metodę prądową. Wyznaczono wartości napięcia w układzie, w którym jednym z elementów była suszona forma [9]. Pomiar prowadzono na przygotowanym stanowisku pomiarowym (rys. 3) z użyciem zasilacza laboratoryjnego AX-3005D-3 i rejestratora napięcia HIOKI 8421-51. Zmierzono przewodnictwo elektryczne materiału suszonej formy w funkcji czasu. Zastosowano prąd o napięciu 30 V.

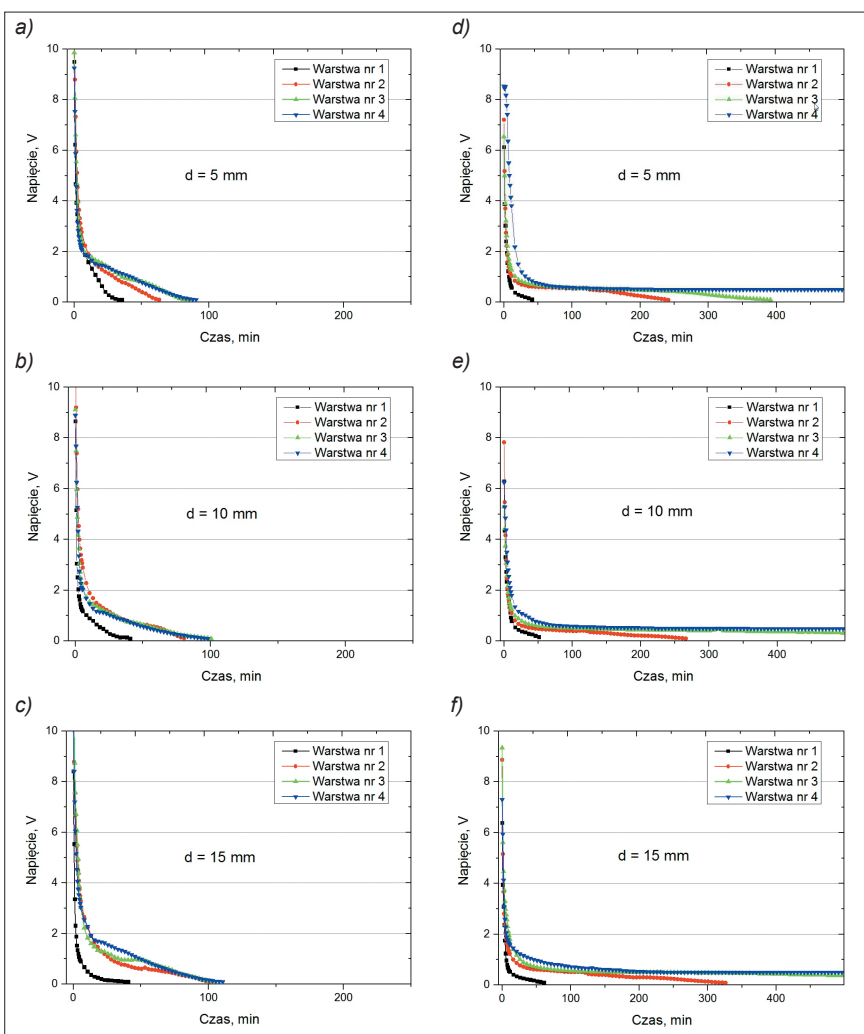
Pomiary rozpoczynano po nałożeniu warstwy ceramicznej i kontynuowano do osiągnięcia stanu uznawanego za pełne jej wysuszenie. Jako kryterium oceny pełnego wysuszenia przyjęto wartość napięcia 0,1 V. Analiza krzywych zmian napięcia podczas suszenia była podstawą do określenia czasu suszenia kieszeni formy ceramicznej. Badania prowadzono przy różnej wartości wilgotności, temperatury i natężenia przepływu powietrza.

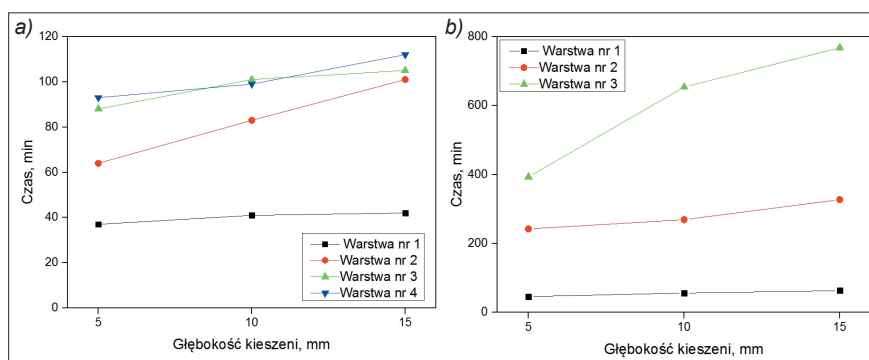


Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: 1 – próbka testowa, 2 – zasilacz, 3 – rejestrator

### Wyniki badań i ich analiza

Uzyskane podczas badań krzywe suszenia (rys. 4) umożliwiły określenie zależności czasu suszenia od głębokości formy dla różnych warunków procesu (rys. 5). Ustalono, że proces suszenia prowadzony w temperaturze  $T = 23 \pm 24^{\circ}\text{C}$ , przy wilgotności względnej  $W_R = 40 \pm 50\%$  i natężeniu przepływu powietrza  $2,6 \pm 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$  zapewnia wysuszenie kolejnych warstw w czasie 112 min dla kieszeni o głębokości 15 mm. Warunki procesu:  $T = 20 \pm 21^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 55 \pm 65\%$  i natężenie przepływu powietrza  $0,1 \pm 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$  czterokrotnie wydłużają czas suszenia warstwy nr 2 i siedmiokrotnie – warstwy nr 3.


 Rys. 4. Zależność napięcia prądu przepływającego przez warstwę ceramiczną w funkcji czasu suszenia i głębokości kieszeni  $d$ : a+c)  $T = 23 \pm 24^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 40 \pm 50\%$ , natężenie przepływu powietrza  $2,6 \pm 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ; d+f)  $T = 20 \pm 21^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 55 \pm 65\%$ , natężenie przepływu powietrza  $0,1 \pm 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$



Rys. 5. Zależność czasu suszenia od głębokości kieszeni formy w warunkach: a)  $T = 23\div 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 40\div 50\%$ , natężenie przepływu powietrza  $2,6\div 3,2\text{ m}^3/\text{s}$ ; b)  $T = 20\div 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 55\div 65\%$ , natężenie przepływu powietrza  $0,1\div 0,6\text{ m}^3/\text{s}$

Czas suszenia nie został określony dla warstwy nr 4. Pomiar wilgotności tej warstwy prowadzono w czasie 12 h i przerwano ze względu na powolność procesu suszenia – zmiana napięcia  $< 1\text{ mV/h}$ .

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że niezależnie od warunków procesu masa w obrębie głębokich wnęk (kieszeni) wymaga dużo dłuższego suszenia. Różnica czasu suszenia formy z kieszenią o głębokości  $d = 5\text{ mm}$  i  $d = 15\text{ mm}$  dla kolejnych warstw ceramicznych w warunkach procesu:  $T = 23\div 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 40\div 50\%$ , natężenie przepływu powietrza  $2,6\div 3,2\text{ m}^3/\text{s}$  wynosi maks. 37 min. Natomiast dla niższej temperatury  $T = 20\div 21\text{ }^{\circ}\text{C}$  oraz wyższej  $W_R = 55\div 65\%$  i natężenia przepływu powietrza  $0,1\div 0,6\text{ m}^3/\text{s}$  czas suszenia zwiększa się dziesięciokrotnie i wynosi 375 min.

Dodatkowo ustalono, że proces suszenia warstwy nr 1 w każdym warunkach i przy głębokości kieszeni  $5\div 15\text{ mm}$  jest najkrótszy i wynosi  $37\div 63\text{ min}$ . Warstwa nr 1 jest nakładana bezpośrednio na model woskowy o małej nasiąkliwości. Stąd objętość wody w tej warstwie jest mała i łatwa do usunięcia także w procesie suszenia prowadzonym w nieprawidłowych warunkach. Kolejne warstwy formy są nakładane na wysuszoną warstwę ceramiczną o większej nasiąkliwości w porównaniu z modelem woskowym. Prowadzi to do wydłużenia czasu suszenia.

**TABLICA III. Czas suszenia formy ceramicznej w obrębie kieszeni; warunki suszenia:  $T = 23\div 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 40\div 50\%$ , natężenie przepływu powietrza  $2,6\div 3,2\text{ m}^3/\text{s}$**

Warstwa nr	Głębokość kieszeni, mm		
	5	10	15
	Czas suszenia, min		
1	37	41	42
2	64	83	101
3	88	101	105
4	93	99	112

**TABLICA IV. Czas suszenia formy ceramicznej w obrębie kieszeni; warunki suszenia:  $T = 20\div 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_R = 55\div 65\%$ , natężenie przepływu powietrza  $0,1\div 0,6\text{ m}^3/\text{s}$**

Warstwa nr	Głębokość kieszeni, mm		
	5	10	15
	Czas suszenia, min		
1	46	56	63
2	242	269	327
3	393	654	768
4	nie określono		

Stwierdzono ponadto, że objętość zaabsorbowanej wody zależy od rozmiarów ziaren obryski stosowanej do wytworzenia warstwy (tabl. I). Warstwa nr 2 nakładana jest na warstwę wytworzoną z obryskami o ziarnach w rozmiarach do  $0,2\text{ mm}$ , warstwa nr 3 – na warstwę o ziarnach do  $0,5\text{ mm}$ , natomiast warstwa nr 4 – o ziarnach do  $1,0\text{ mm}$ . Im większe ziarna, tym większe tworzą się przestrzenie międzyziarnowe, które absorbują więcej wody, co prowadzi do wydłużenia czasu suszenia kolejnych warstw formy.

Na podstawie analizy przebiegu krzywych suszenia określono minimalne czasy suszenia kolejnych warstw dla różnych głębokości kieszeni i warunków procesu (tabl. III i IV).

## Podsumowanie

Analiza wyników badań procesu suszenia wielowarstwowej ceramicznej formy odlewniczej łopatek o dużych rozmiarach z wnękami (kieszeniami) o różnej głębokości potwierdza to, co jest znane z praktyki, czyli że czas suszenia kieszeni zależy od jej głębokości i warunków suszenia. Temperatura otoczenia  $23\div 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wilgotność  $40\div 50\%$  oraz przepływ powietrza  $2,6\div 3,2\text{ m}^3/\text{s}$  umożliwiają prawidłowe suszenie formy ceramicznej w obszarze występowania kieszeni o głębokości do  $15\text{ mm}$ . Czas suszenia form w obrębie najgłębszej kieszeni formy –  $15\text{ mm}$  – wynosi  $42\text{ min}$  dla pierwszej warstwy nanoszonej na model oraz  $112\text{ min}$  dla najdłuższej schnącej warstwy zewnętrznej.

Przy zachowaniu prawidłowych warunków procesu suszenia wytwarzanie wielowarstwowej ceramicznej formy odlewniczej z wnękami o głębokości do  $15\text{ mm}$  w zamku łopatki o dużych rozmiarach nie stanowi ograniczenia technologicznego.

*Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego INNOTECH-K2/IN2/8/181849/NCBR/13 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

## LITERATURA

1. <http://www.enginealliance.com/index.html>
2. Zielińska M., Sieniawski J., Poręba M. "Microstructure and mechanical properties of high temperature creep resisting superalloy René 77 modified CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>". *Archives of Materials Science and Engineering* 28 (2007) 10: pp. 629-632.
3. Zielińska M., Kubiak K., Sieniawski J. "Surface modification, microstructure and mechanical properties of investment cast superalloys". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 35 (2009) 1: pp. 55-62.
4. Zielińska M., Yavorska M., Poręba M., Sieniawski J. "Thermal properties of cast nickel based superalloys". *Archives of Materials Science and Engineering* 44 (2010) 1: pp. 35-38.
5. Chakrabarti B.K. "Drying conditions and their effect on ceramic shell investment casting process". *Materials Science and Technology* 18 (2002) 8: pp. 935-940.
6. Szeliga D., Kubiak K., Cygan R., Ziąja W. "Application of silicon carbide chills in controlling the solidification process of casts made of IN-713C nickel superalloy". *Archives of Foundry Engineering*, 12 (2012) 2: pp. 105-111.
7. Szeliga D., Kubiak K., Burelko A., Cygan R., Ziąja W. "Modelling of grain microstructure of IN-713C castings". *Solid State Phenomena* 197 (2013): pp. 83-88.
8. Matysiak H., Ferenc J., Lipiński Z., Grabarz K., Michalski J., Kurzydowski K.J. „Charakterystyka i kontrola właściwości technologicznych mieszanek ceramicznych do wytworzenia form odlewniczych do odlewania precyzyjnego części turbin lotniczych metodą Bridgmana”. *Inżynieria Materiałowa* 30 (2009) 4: pp. 239-244.
9. Matysiak H., Wiśniewski P., Ferenc-Dominik J., Michalski J., Kurzydowski K. J. „Badania właściwości reologicznych ceramicznych mas lejących do odlewania precyzyjnego części turbin lotniczych”. *Szkło i Ceramika* 62 (2011) 1: pp. 10-11. ■