

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Zastosowanie szybkiego prototypowania w procesie wytwarzania łopatek silników turbinowych

Rapid prototyping in manufacturing of turbine engine blades

JACEK NAWROCKI
 PAWEŁ ROKICKI
 DARIUSZ SZELIGA
 ANDRZEJ NOWOTNIK
 MARCIN DRAJEWICZ
 GRZEGORZ BUDZIK
 JAN SIENIAWSKI*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.575

W ramach badań oraz wykonanych symulacji numerycznych wytworzono model zamka łopatki, który zastosowano w procesie wytwarzania form ceramicznych metodą tracowego wosku. Przedstawione wyniki badań stanowią podstawę weryfikacji metody szybkiego prototypowania w procesie odlewania precyzyjnego łopatek silnika turbiny.

SŁOWA KLUCZOWE: szybkie prototypowanie, odlewanie precyzyjne, zamek łopatki, symulacja numeryczna

The research methodology and numerical simulations presented in the study were focused on execution of tip shroud blades element in meaning of further preparation of ceramic shell moulds. Obtained research results are a basis for verification of presented method in meaning of the manufacturing process.

KEYWORDS: rapid prototyping, investment casting, tip shroud, numerical simulation

Wstęp

Nowoczesne metody wytwarzania elementów z pomocą procesów wspomaganych urządzeniami sterowanymi komputerem, stają się coraz bardziej popularne w przemyśle lotniczym, w szczególności w produkcji odpowiedzialnych części silników lotniczych. Metody te, w tym szybkiego prototypowania (Rapid Prototyping – RP),

pozwalają na wytworzenie modelu z wykorzystaniem techniki szybkiego wytwarzania - Rapid Manufacturing (RM). Zastosowanie tych metod pozwala na wyprodukowanie, w oparciu o trójwymiarowy model komputerowy (Computer Aided Design – CAD), komponentów silnika lotniczego o złożonej geometrii, które ze względu na skomplikowaną geometrię nie są łatwe do wytworzenia innymi metodami [1,2,3]. Techniki wytwarzania RP oraz RM znacząco przyspieszają procesy pozyskiwania nowych oraz rozwijania dotychczas stosowanych rozwiązań technologicznych. Prototypy otrzymane w ten sposób mają szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej. Mogą one zostać użyte jako modele badawcze w badaniach laboratoryjnych, w warunkach eksploatacyjnych, także jako elementy funkcjonalne gotowych wyrobów. W zależności od projektu elementu wytwarzanego i jego wymogów konstrukcyjnych, do produkcji stosuje się techniki przyrostowe typu solo-incremental lub hybrydowe, które stanowią połączenie technologii przyrostowych oraz obróbki wykończeniowej [4,5,6].

Artykuł przedstawia wyniki symulacji numerycznej będącej podstawą weryfikacji modeli otrzymanych z wykorzystaniem techniki Rapid Prototyping. Badania dotyczą modelu zamka łopatki turbiny silnika lotniczego. Metodykę opracowano w oparciu o analizę procesu wytwarzania modeli woskowych zamka łopatki turbiny silnika lotniczego, z uwzględnieniem zastosowania uzyskanych parametrów w produkcji ceramicznych form odlewniczych z przeznaczeniem do odlewania precyzyjnego. Równolegle wykonano symulacje numeryczne procesu odlewania w celu określenia optymalnych parametrów procesu. Do wytworzenia modeli 3D wykorzystano urządzenie 3Z Pro Solidscape (rys. 1), w którym topi się materiał termoplastyczny w niskiej

Mgr inż. Jacek Nawrocki (jaceknaw@prz.edu.pl), dr inż. Paweł Rokicki (prokicki@prz.edu.pl), dr inż. Dariusz Szeliga (dszeliga@prz.edu.pl), dr inż. Andrzej Nowotnik (nowotnik@prz.edu.pl), dr inż. Marcin Drajewicz (drajewicz@prz.edu.pl), prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik (gbudzik@prz.edu.pl), prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski (jan-sien@prz.edu.pl)

temperaturze. Specjalnie zaprojektowany do tego celu materiał wraz z całym systemem stanowią odpowiednie urządzenie do zastosowania w procesie wytwarzania modeli dla form ceramicznych procesu odlewania precyzyjnego.



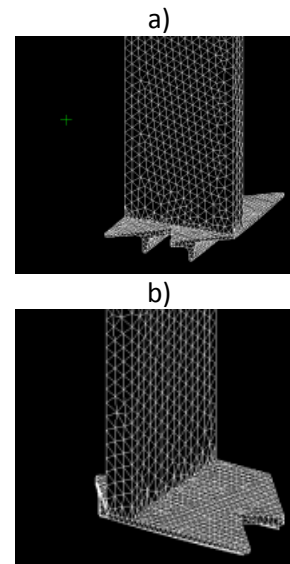
Rys. 1. Urządzenie do wytwarzania modeli woskowych metoda Rapid Prototyping 3Z Pro Solidscape

Dokonano analizy badań w celu weryfikacji otrzymanych w badaniach modeli. Przeprowadzono badania mające na celu określenie obecności defektów odlewniczych oraz analizę mikrostruktury otrzymanych odlewów. Odlewy zostały wykonane wykorzystując formy ceramiczne wytworzone na otrzymanych w modelach łopatek. Wyniki badań, w szczególności symulacji komputerowej, są podstawą weryfikacji geometrycznej i wymiarowej modeli.

Metodyka oraz wyniki badań

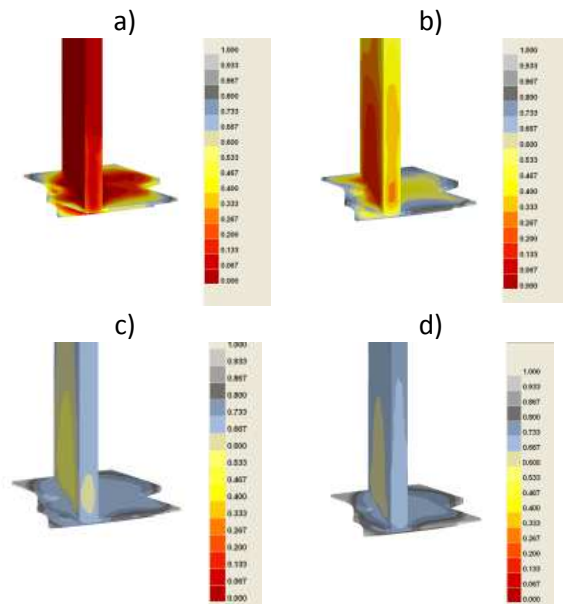
Symulację numeryczną procesu odlewania precyzyjnego przeprowadzono przy użyciu oprogramowania ProCast. Symulacja ma na celu określenie warunków przepływu ciekłego metalu w formie ceramicznej, rozkładu temperatury, oraz możliwości pojawienia się defektów odlewniczych takich jak niedolewy czy porowatość skurczowa, które są istotne w procesie analizy geometrycznej dokładności wykonania elementów łopatek turbiny silnika lotniczego. Trójwymiarowy model geometryczny zamka łopatek turbiny oraz forma ceramiczna do procesu odlewania precyzyjnego zostały zaprojektowane w oprogramowaniu NX (rys. 2).

Przedstawiony model uwzględnia zastosowanie formy ceramicznej o określonej geometrii z izolacją termiczną. Model geometryczny układu wlewowego i łopatek połączono ze sobą w zestaw modelowy oraz wraz z izolacją termiczną zaimportowano do modułu MeshCAST oprogramowania ProCAST (rys. 2). Wygenerowano siatkę elementów skończonych na zestawie modelowym oraz następnie warstwę formy ceramicznej o grubości 10mm. Na przedstawionym modelu geometrycznym wygenerowano także warstwę izolacji cieplnej. Przygotowany w ten sposób zestaw modelowy był podstawą do określenia optymalnych parametrów procesu krystalizacji odlewów z zastosowaniem form ceramicznych wytworzonych na bazie opisanych modeli RP.



Rys. 2. Trójwymiarowy model zamka łopatek turbiny silnika lotniczego z wygenerowaną siatką elementów skończonych w programie ProCAST.

Symulacja numeryczna procesów odlewniczych – przepływu ciekłego metalu, rozkładu wartości temperatury i krystalizacji odlewu zamka łopatek turbiny silnika lotniczego została wykonana z użyciem komercyjnego oprogramowania ProCAST. Założono odpowiednie warunki brzegowe oraz przyjęto parametry cieplne i fizyczne dla nadstopu niklu oraz formy ceramicznej. Rysunki 3–6 przedstawiają wyniki symulacji numerycznej rozkładu wartości objętości względnej fazy stałej oraz rozkładu temperatury w zależności od czasu procesu.



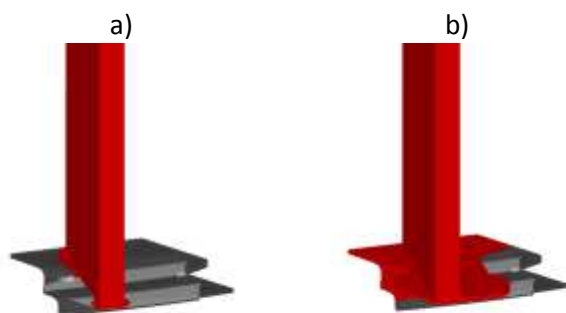
Rys. 3. Symulacja numeryczna elementu zamka łopatek turbiny silnika lotniczego prezentująca zmianę udziału objętościowego fazy stałej po: a) 1.8, b) 3.2, c) 4.6 oraz d) 5.2 sekundy

Wykonano symulację numeryczną procesu zalewania wnętrza formy ceramicznej ciekłym metalem (rys. 4). Wyniki przepływu ciekłego metalu były podstawą doboru optymalnych rozmiarów układu wlewowego. Ustalono rozkład wartości temperatury oraz na tej podstawie prognozowane miejsca pojawienia się porowatości skurczowej (rys. 4-6). Wyniki tych badań pozwoliły na

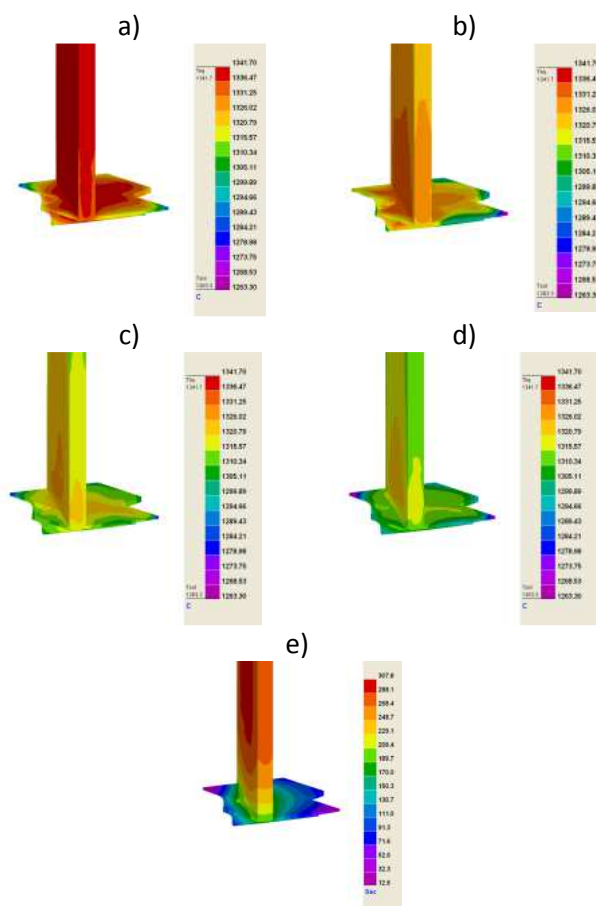
wyznaczenie potencjalnych miejsc możliwego wystąpienia niedolewów.

Wykazano, że lokalizacja modelu odlewu oraz układu wlewowego ma znaczący wpływ na sposób transportu ciekłego metalu w formie co bezpośrednio wpływa na rozkład temperatury w czasie krystalizacji oraz na występowanie wad odlewniczych. Zaprojektowanie formy ceramicznej w taki sposób aby rozkład temperatury był jak najbardziej zbliżony do równomiernego pozwoli na otrzymanie odlewów całkowicie pozbawionych niedolewów.

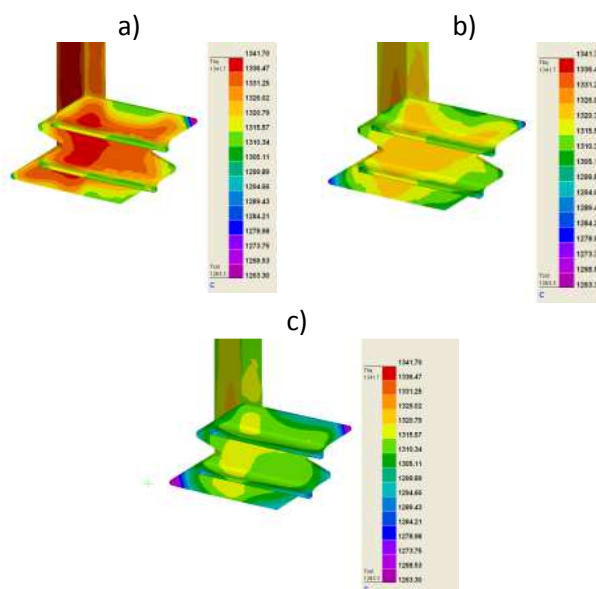
W ostatnim etapie badań, na podstawie zaprojektowanego modelu CAD (rys.2) wytworzono prototypy RP (rys. 7). Otrzymany model został poddany inspekcji wizualnej oraz po zatwierdzeniu wymiarów geometrycznych oraz braku wad, został wykorzystany do wytworzenia formy ceramicznej z przeznaczeniem do odlewania metodą wosku traconego. Odlew otrzymany z tej formy (rys. 8) poddano weryfikacji pod kątem określenia prawidłowej geometrii oraz zastosowanej metodyki produkcji w celu zatwierdzenia całego procesu uwzględniającego brak możliwości wystąpienia defektów odlewniczych w zamku łopatki turbiny silnika lotniczego.



Rys. 4. Symulacja numeryczna zalewania formy ceramicznej dla elementu zamka łopatki turbiny silnika lotniczego po czasie: a) 0.31, b) 0.32 s.



Rys. 5. Symulacja numeryczna procesu krystalizacji elementu zamka łopatki turbiny silnika lotniczego po czasie: a) 1.18, b) 3.42, c) 4.15, d) 4.72 e) 11.2 s.



Rys. 6. Symulacja numeryczna rozkładu wartości temperatury na powierzchni dolnej części elementu zamka łopatki turbiny silnika lotniczego po czasie a) 27.3, b) 42.0 oraz c) 47 s od zalania formy



Rys. 7. Element zamka łopatki turbiny silnika lotniczego - model RP wytworzony na urządzeniu 3Z Pro Solidscape.

a)



b)



Rys. 8. Zamek łopatki turbiny silnika lotniczego a) w procesie krystalizacji po zalaniu formy ceramicznej oraz b) gotowy odlew po usunięciu formy ceramicznej oraz odcięciu układu wlewowego.

Podsumowanie

Opracowana metodyka badań miała na celu ocenę możliwości wykorzystania urządzenia 3Z Pro Solidscape do wytworzenia modeli RP elementu zamka łopatki turbiny silnika lotniczego z przeznaczeniem do zastosowania w praktyce przemysłowej produkcji odlewniczych form ceramicznych metodą wosku traconego. Analiza dokładności geometrycznej oraz inspekcja wizualna wytworzonego prototypu potwierdziła brak występowania defektów oraz zgodność wymiarową modelu z projektem CAD. Przeprowadzona w ramach realizacji badań symulacja numeryczna procesu odlewania precyzyjnego pozwoliła na dobranie odpowiednich parametrów procesu technologicznego oraz wytworzenie odlewu elementu prototypu, który posłużył weryfikacji poprawności wytworzonego elementu. Urządzenie 3Z Pro Solidscape oraz technologia Rapid Prototyping umożliwiają wytworzenie modeli woskowych, które z powodzeniem mogą zostać użyte w procesie produkcji form ceramicznych elementów turbiny silnika lotniczego o złożonej geometrii.

PODZIĘKOWANIA

The work was financed from the public resources of the Polish National Centre for Research and Development and European Union. The project was realized within the frames of the Program INNO-LOT/1/7/NCBR/2013.

LITERATURA

1. Liu W. "Rapid Prototyping and engineering applications – a toolbox for prototype development", *Taylor & Francis Group*(2008)
2. Rokicki P., Budzik G., Kubiak K., Bernaczek J., Dziubek T., Nowotnik A., Sieniawski J., Matysiak H., Cygan R., Trojan A., Magniszewski M. "Rapid prototyping in manufacturing of core models of aircraft engine blades". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* (2014), Volume 86 Issue: 4, p.323-327.
3. Nowotnik, A., Kubiak, K., Sieniawski, J., Rokicki, P., Pedrak, P., Mrówka-Nowotnik, G. "Development of nickel based superalloys for advanced turbine engines". *Advanced Materials Research* (2014), Volume 783-786, p. 2491-2496
4. Syrek H. „Zastosowanie drukarek 3D do wytwarzania modeli woskowych w procesie odlewania metoda traconego wosku”. *NAFTA-GAZ* (2013), Nr 12 ROK LXIX
5. Piekło J., Maj M. "Methods of Additive Manufacturing used in the Technology of Skeleton Castings". *Archives of Metallurgy and Materials* (2014), Volume 59, Issue 2, s. 699-702
6. Budzik G., Matysiak H., Cygan R., Bąk S., Cygnar M. "Rapid prototyping process of monocrystal aircraft engine blades". *Journal of Kones Powertrain and Transport* (2010) s. 81-86