

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Materiały lotnicze o zaawansowanej strukturze (monokryształ, krystalizacja kierunkowa)

Aeronautical materials of advanced structure (monocrystal, directional crystallization)

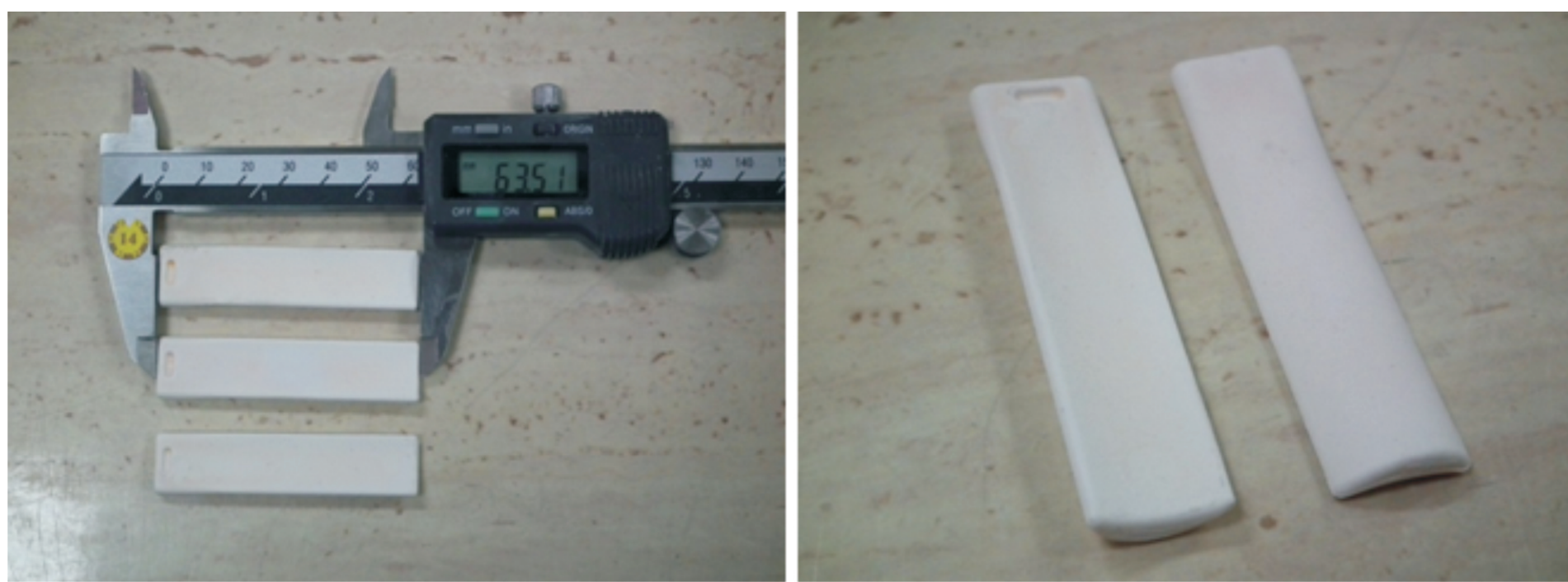
Politechnika Rzeszowska, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Uniwersytet Rzeszowski

Wyniki badań Results

Rdzeniowane łopatki turbiny silnika lotniczego z nadstopu niklu CMSX-4

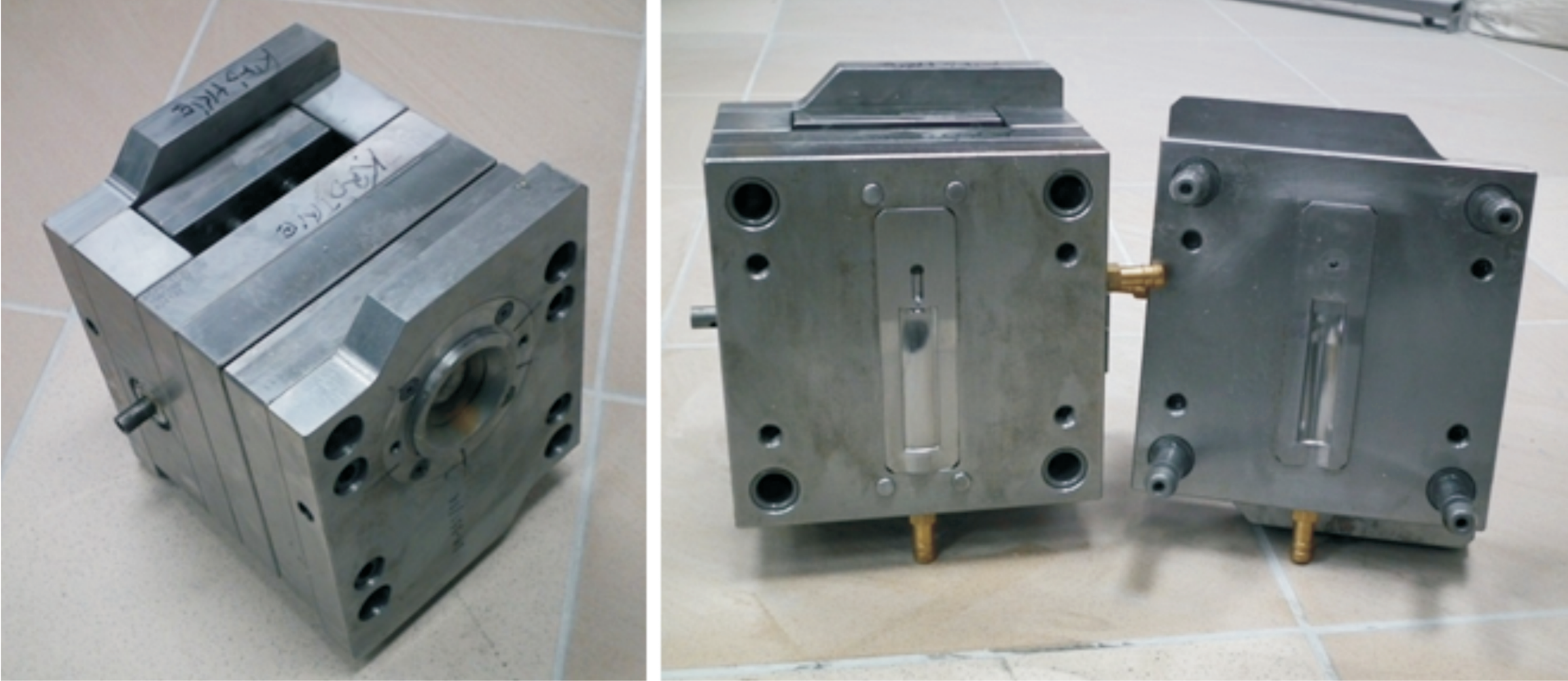
Turbine blades with ceramic cores of CMSX-4 for turboengines

Badania mikrostruktury, składu fazowego i właściwości mechanicznych w zależności od warunków odlewania i obróbki cieplnej. W ramach realizacji zadania prowadzono próby technologiczne nanoszenia cienkich warstw tlenku ZrO₂ stabilizowanego tlenkiem Y₂O₃ na powierzchnie ceramicznych rdzeni modeli woskowych do wytwarzania odlewów krytycznych wirujących elementów turbiny niskiego ciśnienia silników lotniczych. Celem było zmniejszenie chropowatości powierzchni rdzeni. Stosowano dwie metody wytwarzania cienkich warstw Ink Jet Printing i Dip Coating. Próby nanoszenia wykonano na rdzeniach (rys. 1) przeznaczonych do wytwarzania odlewów łopatek turbin. Opracowano rdzeń odwzorowujący kształt wewnętrzny kanału chłodzenia łopatki silnika.



Rys. 1. Rdzenie ceramiczne - temperatura wypalania 1250°C
Fig. 1. Ceramic cores - 1250°C annealing temperature

Rdzenie wykonano w procesie wtryskiwania wysokociśnieniowego. Stosowano masę formierską na osnowie tlenku SiO₂ o składzie chemicznym opracowanym w ramach realizacji zadania. Wtryskiwanie wysokociśnieniowe prowadzono do formy zaprojektowanej i wykonanej do wykonania planowanych badań. (rys. 2).



Rys. 2. Forma do wtryskiwania wysokociśnieniowego rdzeni ceramicznych
Fig. 2. Wax injection die for ceramic cores

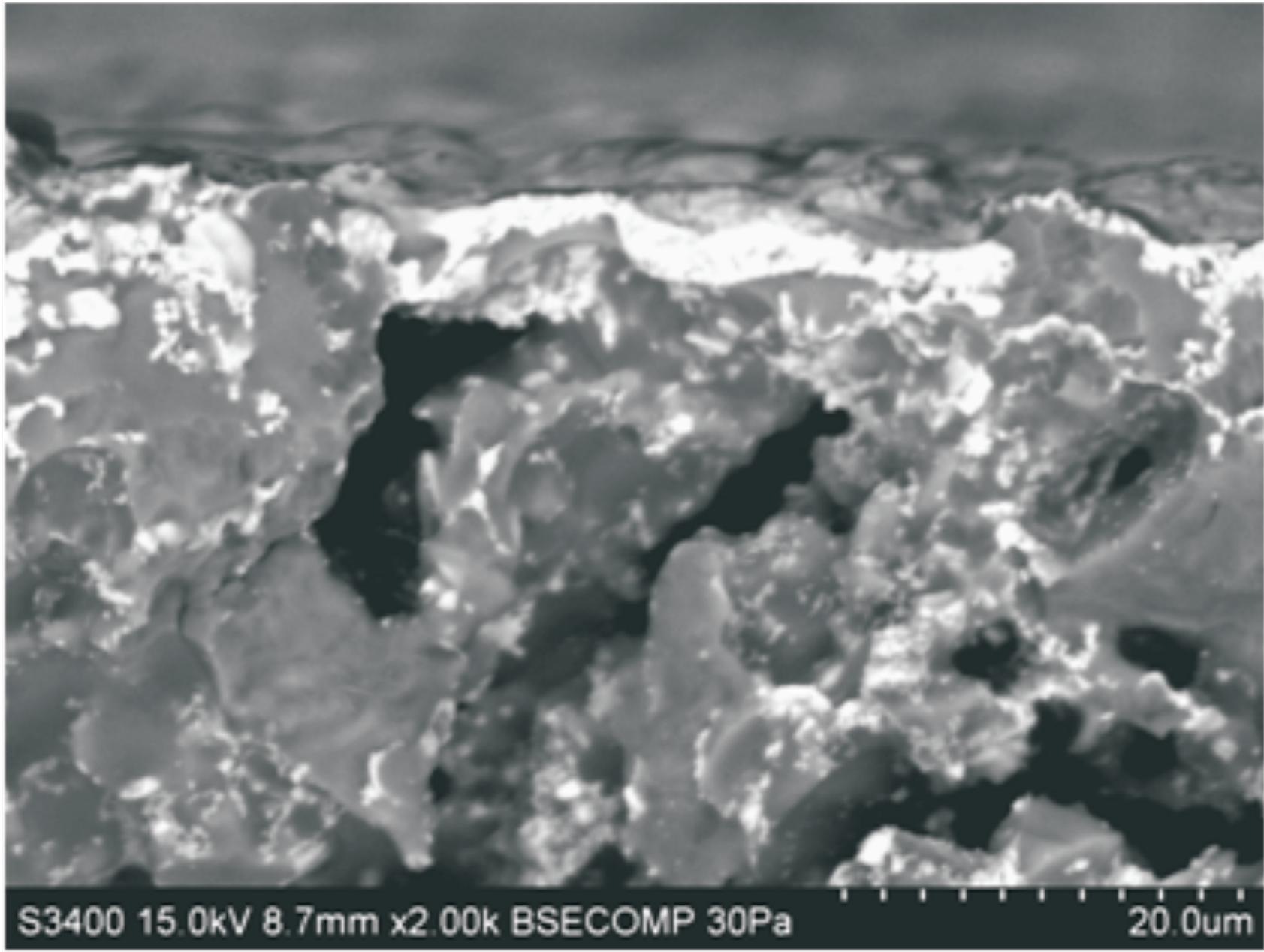
Wykonane rdzenie poddano spiekaniu w temperaturze 1200oC w celu usunięcia spoiwa organicznego pozostałego po wtryskiwaniu. Na powierzchnie rdzenia nanoszono cienkie warstwy ceramiczne. Używano komercyjne proszki tlenku ZrO₂ stabilizowanego Y₂O₃ japońskiej firmy TOSOH, o różnych rozmiarach cząstek: w postaci granulatu, proszku mielonego w młynie kulowym w czasie 13h oraz w młynie atrycyjnym w czasie 1h.

Warstwy ceramiczne nanoszono stosując metody Ink Jet Printing i Dip Coating. Używano zawiesiny proszku ceramicznego w etanolu z dodatkiem terpeneolu, etylocelulozy jako spoiwa i bis(2-etyloheksylo) ftalanu jako plastyfikatora. Wprowadzano również do zawiesiny tlenku ZrO₂ dodatek tlenku Al₂O₃ (0,2 % mol.) wspomagające proces spiekania Al₂O₃. Naniesione warstwy poddano spiekaniu w temperaturze 1250°C /1h. Dotychczas uzyskano najlepsze rezultaty przy zastosowaniu proszku ZrO₂ stabilizowanego tlenkiem Y₂O₃ rozdrobnionego w młynie atrycyjnym (tab. 1) nanoszonego metodą Dip Coating (rys. 3).

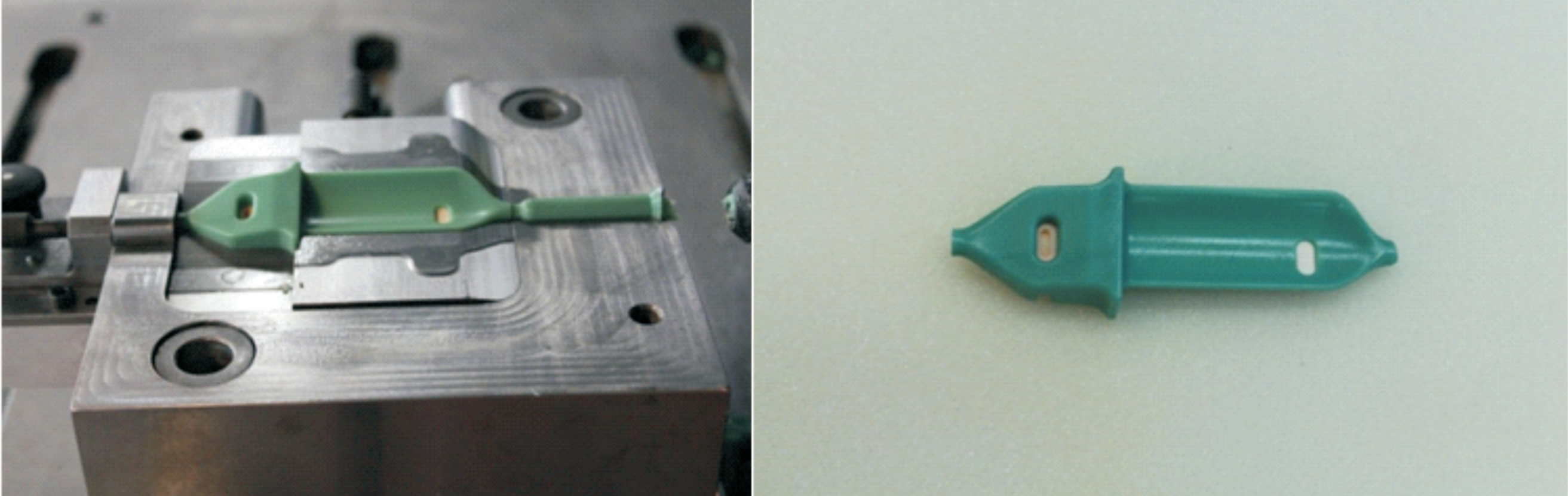
Tabela. 1 Chropowatość powierzchni i odkształcenie rdzeni z naniesioną i spieczoną warstwą stabilizowanego tlenku ZrO₂
Table 1. Surface roughness and distortion of cores with coated and sintered stabilised ZrO₂ layer

Warstwa-metody nanoszenia	Chropowatość powierzchni Ra, µm	Strzałka ugięcia, mm
Bez warstwy	2,5	0,05
Ink Jet Printing	1,67	0,05
Dip coating	1,57	0,05

Analiza wyników badań wskazuje, że chropowatość powierzchni rdzeni po wytworzeniu warstwy jest mniejsza o 40%.



Rys. 3. Obraz powierzchni przekroju rdzenia z naniesioną warstwą stabilizowanego ZrO₂ metodą Dip Coating - temperatura wypalania 1300°C
Fig. 3. Cross-section of the core coated with stabilized ZrO₂ layer by Dip Coating method - 1300°C sintering temperature



Rys. 4. Matryca z gotową łopatką
Fig. 4. Die with obtained blade



Rys. 5. Zestaw modelowy rdzeniowanych łopatek i płytek cienkościennych
Fig. 5. Wax model set of cored blades and thin-walled plates

Przygotowane zestawy modelowe były podstawą do wytworzenia wielowarstwowych form ceramicznych. Stosowano mieszanki ceramiczne ze spoiwem koloidalnym Ludox AM30. Na warstwę przymodelową użyto mieszaninę proszku Al₂O₃ Mesh 325 i Mesh 200 oraz spoiwo Ludox Am 30. Na warstwę przymodelową stosowano posypkę proszku tlenku AL₂O₃ o granulacji Mesh 80. Warstwy konstrukcyjne wykonano z proszku Mullitu o ziarnistości 0-0.07mm i 0-0.12mm oraz spoiwa Ludox AM 30. Jako posypkę na pierwsze dwie warstwy konstrukcyjne użyto Mullitu 0,25-0,5 natomiast na pozostałe warstwy Mullitu 0,5-1. Formy suszono po nałożeniu każdej warstwy w suszarni z wymuszonym obiegiem powietrza w temperaturze 220C i wilgotności 43% w czasie 8h (rys 6).



Rys. 6. Zestaw form podczas suszenia
Fig. 6. Ceramic moulds during drying

Wosk wytapiono z form w autoclawie Produkcji FCR- CALDAIE s.r.l. w temperaturze 1740C i ciśnieniu 0,8 Mpa.

Formy po wytopieniu wosku poddano wypalaniu w piecu komorowym typ IZO w temperaturze 7600C i w czasie 3h.

Proces zalewania form ciekłym metalem realizowano w piecu próżniowym VIM-IC 2E-DS/SC firmy ALD (rys 8).

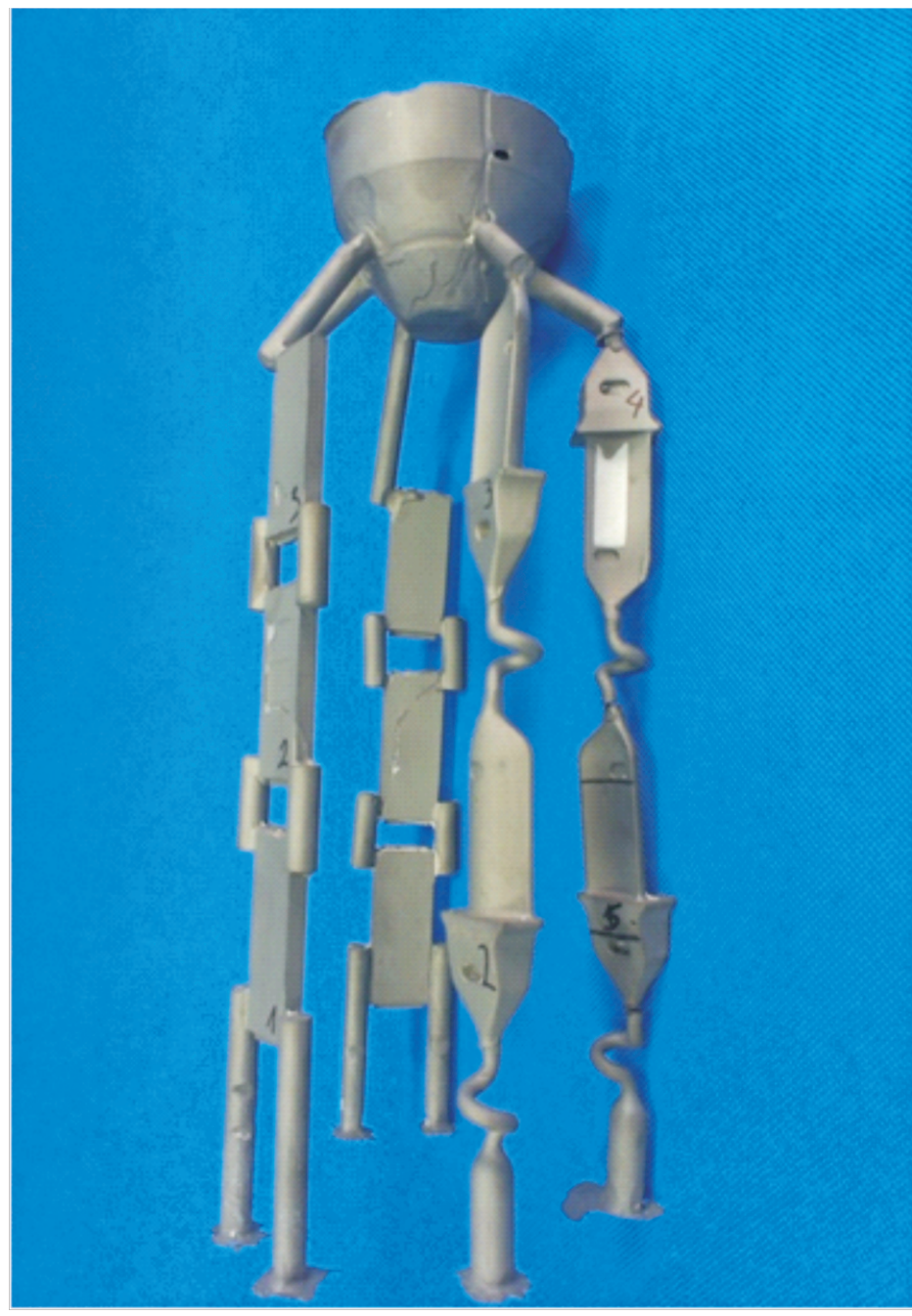


Rys.8. Piec do wytwarzania monokryształu VIM-IC 2E-DS/SC firmy ALD
Fig. 8. VIM-IC 2E-DS/SC investment casting furnace by ALD Vacuum Technologies for single crystal casting

Stosowano parametry zalewania form: temperatura ciekłego metalu 1520 oC, temperatura formy 1520 oC oraz prędkość wyciągania formy 3mm/min



Rys. 9. Odlewy po wybiciu z formy
Fig. 9. Final casings after knocking out



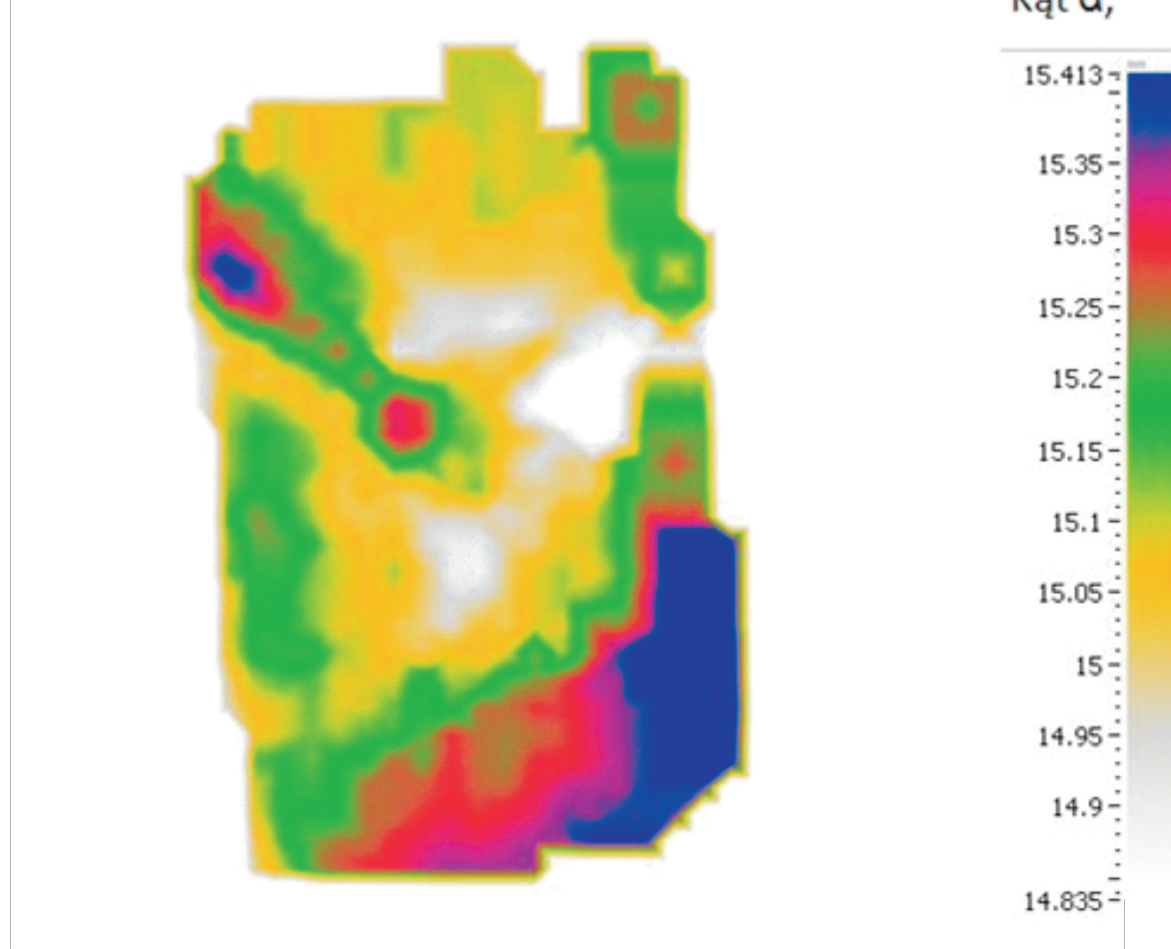
Rys. 10. Łopatki po obcięciu
Fig. 10. Blades after cutting

Ocenę doskonałości struktury krystalicznej rdzeniowanych monokrystalicznych odlewów łopatek prowadzono z użyciem dyfraktometru rentgenowskiego OD-EFG (rys.11). Wykonano pomiary wartości kąta α - odchylenia kierunku [001] od kierunku wyciągania monokryształu dla badanych łopatek (rys.12 i 13).

Rys. 11. Dyfraktometr rentgenowski OD-EFG
Fig. 11. OD-EFG X-ray diffractometer



Rys. 12. Rozkład wartości kąta α na przekroju poprzecznym zamka rdzeniowanego monokrystalicznego odlewu łopatki
Fig. 12. α angle distribution in the cross-section of single crystal cored blade root



Rys.13. Rozkład wartości kąta α na przekroju poprzecznym pióra rdzeniowanego monokrystalicznego odlewu łopatki
Fig. 13. α angle distribution in the cross-section of single crystal blade casting



Wnioski Conclusions

Podsumowanie
Wyniki prowadzonych zadań badawczych były podstawą do opracowania technologii: rdzeni ceramicznych, modeli woskowych, zestawów woskowych form ceramicznych, zalewania formy. Opracowane technologie umożliwiły wykonanie demonstracyjnej partii monokrystalicznych rdzeniowanych łopatek turbiny niskiego ciśnienia.

Summary
Results of the research tasks were the basis for development of: ceramic cores, wax model sets, mould pouring and solidification. Developed technologies led to execution of demo batch of single crystal cored low-pressure turbine blades.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty:

- M. Małek, P. Wiśniewski, H. Matysiak, K. J. Kurzydłowski, **“Technological properties of ceramic slurries based on aluminium III oxide for ceramic shell moulds fabrication”**, Innovative Manufacturing Technology, 3-5.12.2014, Zakopane, Poland.
- M. Małek, P. Wiśniewski, K. J. Kurzydłowski, **“Technological properties comparison of ceramic shell moulds based on ethyl silicate and colloidal silica binders”**, 4th International Conference of Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials, 9-13.03.2015, Sitges, Spain.
- D. Jakubowska, M. Małek, P. Wiśniewski, J. Mizera, K. J. Kurzydłowski, **“Characterization of Ceramic Slurries Based on Yttrium III Oxide For Investment Casting Process”**, APMAS2015, 16-19.04.2015, Oludeniz, Turkey.
- J. Szymańska, M. Małek, P. Wiśniewski, J. Mizera, **“Rheological Properties of Ceramic Slurries Based on Yttrium III Oxide for Ceramic Shell Moulds Preparation”**, Conference Aluminium 2000, 12-16.05.2015, Florence, Italy.
- D. Jakubowska, M. Małek, P. Wiśniewski, J. Mizera, K. J. Kurzydłowski, **“Technological Properties and Characterization of Ceramic Slurries Based on Yttrium III Oxide for Shell Moulds Preparation”**, 17th International Conference on Materials Science and Engineering, 14-15.05.2015, Amsterdam, Netherlands

Publikacje

- M. Małek, P. Wiśniewski, H. Matysiak, K. J. Kurzydłowski, **“Technological properties of ceramic slurries based on aluminium III oxide for ceramic shell moulds fabrication”**, pp. 235-242, Mechanik 2/2015.
- J. Szymańska, M. Małek, P. Wiśniewski, J. Mizera, **“Rheological Properties of Ceramic Slurries Based on Yttrium III Oxide for Ceramic Shell Moulds Preparation”**, Conference Aluminium 2000 proceedings, (w druku/in printing)

Zgłoszenia patentowe

- P. Wiśniewski, M. Małek, J. Mizera, K. J. Kurzydłowski, **“Lejna mieszanina formierska do produkcji warstw ceramicznych form odlewniczych”**, P.411174 (2015).
- P. Wiśniewski, M. Małek, J. Szymańska, J. Mizera, K. J. Kurzydłowski, **“Lejna mieszanina formierska do produkcji warstw ceramicznych form odlewniczych”**, P.411911 (2015).
- P. Wiśniewski, M. Małek, J. Mizera, K. J. Kurzydłowski, **“Lejna mieszanina formierska do produkcji warstw ceramicznych form odlewniczych”**, P.411912 (2015)

Prace mgr, dr. hab.

Prace inżynierskie:

- M.. Polak, Proces zarodkowania ziarn w odlewach z nadstopów niklu wytwarzanych metodą wytapianych modeli.
- J. Furmanek, Opracowanie technologii odlewów z nadstopu Haynes 282 oraz ocena ich mikrostruktury.
- M. Szeliga, Wpływ geometrii formy ceramicznej na mikrostrukturę kierunkowo krystalizowanych odlewów ze stopu Haynes 282.
- T. Gorzula, Wyznaczanie współczynnika emisyjności form ceramicznych do odlewów monokrystalicznych nadstopów niklu.

Prace magisterskie w realizacji:

- inż A Ząbek Mikrostruktura monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu
- Inż. J. Czuba Krystalizacja odlewów monokrystalicznych o zmiennym przekroju z nadstopów niklu