

Analiza dokładności odwzorowania modeli CAD części polimerowych wytwarzanych z zastosowaniem reprezentatywnych technik addytywnych w procesie produkcji w konwencji Przemysł 4.0

Maciej Cader¹⁾, Małgorzata Zaborniak^{2), *)}, Michał Stączek²⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.6.7

Streszczenie: Przedstawiono metodykę oraz wyniki oceny jakości części maszyn wytworzonych bezpośrednio z modelu numerycznego CAD 3D. Analizowano właściwości części otrzymanych za pomocą reprezentatywnych technik addytywnych opartych na przetwarzaniu polimerów oraz światłoczułych żywic. Cały proces wytwarzania części prowadzono zgodnie z konwencją Przemysł 4.0. Ocena dokładności odtwarzania modeli numerycznych CAD obejmowała zarówno jakość powierzchni zewnętrznych i objętość wytworzonych części, jak i stopień odwzorowania wymiarów.

Słowa kluczowe: techniki addytywne, produkcja części, ABS, żywice światłoutwardzalne, analiza dokładności, reprodukcja, Przemysł 4.0.

Accuracy analysis of the CAD models reproduction for polymers parts, produced using additive manufacturing at manufacturing process based on Industry 4.0 convention

Abstract: This paper presents the methodology and quality assessment results for machine parts produced directly from CAD 3D numerical model. The parts were produced using representative additive manufacturing technologies based on polymers and UV light-cured resins processing and their properties were analyzed. The whole process was conducted according to Industry 4.0 convention. The assessment of the reproduction accuracy of CAD 3D models covered the quality of external surfaces, volume of manufactured parts as well as dimension accuracy.

Keywords: additive manufacturing, parts manufacturing, ABS, UV light-cured resins, accuracy analysis, reproduction, Industry 4.0.

Koncepcja Przemysł 4.0 zmienia model produkcji przemysłowej. Prognozuje się, że dotychczasowe procesy zarządzania produkcją zostaną zmodyfikowane w kierunku akwizycji i obróbki dużej liczby danych generowanych przez systemy sterowania. Obecnie dane te są wykorzystywane głównie do monitorowania stanu procesów technologicznych, w przyszłości natomiast umożliwią przewidywanie tych procesów oraz w konsekwencji – parametrów jakościowych produktów; umożliwią także sterowanie produkcją w skali globalnej [1–3]. Technologie komunikacji służące do wymiany informacji między maszynami (M2M – *machine to machine*), wykorzystanie przemysłowego Internetu Rzeczy (IoT – *internet of things*),

a także zaawansowane metody przetwarzania informacji będą stanowiły istotne czynniki cyfrowej transformacji w ramach struktury Przemysł 4.0 [4, 5]. Dzięki zastosowaniu metod przetwarzania informacji proces produkcji stanie się bardziej elastyczny, co pozwoli wytwórcom na szybszą i tańszą niż dotychczas realizację bardziej złożonych zamówień. Przyspieszenie realizacji nowych indywidualnych zamówień będzie możliwe m.in. w wyniku zastosowania drukarek 3D w procesie przygotowania produkcji. Jednym z kluczowych elementów struktury Przemysł 4.0, który przechodzi obecnie rewolucję w zakresie druku 3D, jest proces produkcji ultralekkich prototypów i części na bazie całkowicie numerycznych modeli CAD (*computer aided design*). Automatyzacja produkcji opierająca się na numerycznych modelach CAD teoretycznie pozwala na uzyskanie elementów spełniających najwyższe wymagania jakościowe, gwarantuje jednocześnie bardzo dużą wydajność. Pozyskane modele CAD, stanowiące podstawę funkcjonowania narzędzi wytwór-

¹⁾ Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa.

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

*) Autor do korespondencji; e-mail: mzab@prz.edu.pl

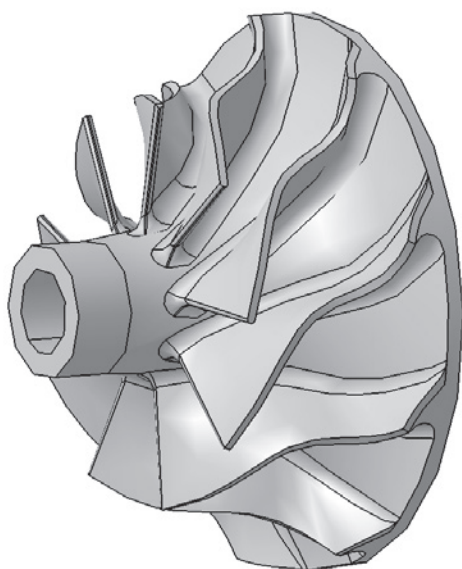
czych, oraz metodyka ich odtwarzania (reprodukcji) powinny więc spełniać wysokie standardy w zakresie dokładności odwzorowania wymiarów. Celem pracy była ocena jakości części polimerowych uzyskiwanych bezpośrednio w procesach odtwarzania modeli CAD za pomocą reprezentatywnych technik addytywnych.

Przeprowadzenie procesu reprodukcji części zgodnie z konwencją Przemysł 4.0 oznacza m.in. wykorzystanie drukarek 3D adaptowalnych w produkcji. Także zastosowanie drukarek 3D jest możliwe po uprzednim poznaniu dokładności wykonania części maszyn za pomocą reprezentatywnych technik addytywnych, pracujących w konwencji Przemysł 4.0. Od dokładności reprodukcji cyfrowych modeli CAD zależy użyteczność polimerowych technik addytywnych w kontekście wymagań przemysłu.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Za reprezentatywny model badawczy przyjęto, skomplikowaną w ujęciu obróbki skrawaniem część – wirnik kompresora (rys. 1). Wykonano go z powszechnie wykorzystywanych w przemyśle materiałów: terpolimerów akrylonitryl-butadien-styren (ABS) [6] i żywicy światłoutwardzalnej o nazwie handlowej Objet FullCure® 830 Vero White Resin for Rapid Prototyping [6], za pomocą stosowanych w przemyśle technik addytywnych – FDM [6, 7] oraz PolyJet [6, 7]. Do wykonania modeli bryłowych posłużyły dwa przemysłowe urządzenia – Objet 30 produkcji Stratasys w wypadku techniki PolyJet oraz uPrint SE, również produkcji Stratasys, w wypadku techniki FDM.



Rys. 1. Model 3D-CAD polimerowego wirnika kompresora wytworzony z zastosowaniem technik addytywnych

Fig. 1. 3D-CAD model of polymer compressor rotor produced using additive manufacturing techniques

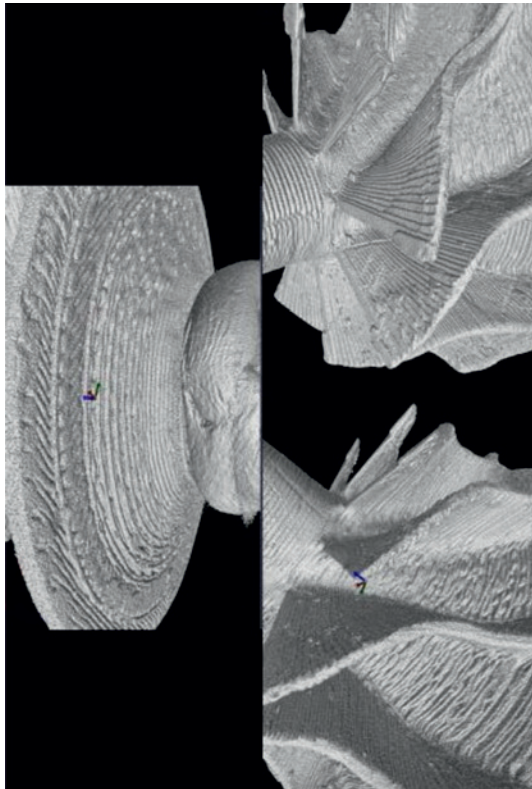
Metodyka badań

Niniejsza praca koncentruje się na analizie dokładności wykonania modeli polimerowych zgodnie z metodyką produkcji w konwencji Przemysł 4.0. Unikatowość pracy polega na przeprowadzeniu kompleksowych badań nie tylko powierzchni zewnętrznych, ale też w objętości modeli przy użyciu tomografu komputerowego [8]. Zastosowanie tomografii komputerowej w przemyśle ma na celu bezinwazyjną identyfikację wad występujących w strukturze wewnętrznej detali. Rentgenowska tomografia komputerowa (CT – *computed tomography*) pozwala na uzyskanie obrazów warstwowych badanego obiektu – złożenie projekcji elementów wykonywanych z różnych kierunków wykorzystuje do utworzenia obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D). Metoda CT w praktyce przemysłowej jest stosowana do określania tolerancji wymiarów i geometrii wyrobów, analizy wyników produkcji wykonywanej bezpośrednio z modeli CAD, defektoskopii, dokonywania pomiarów objętości, wyznaczania ilości tzw. materiału lotnego, który nie został usunięty podczas obróbki, oraz inżynierii odwrotnej. W badaniach użyto mikroogniskowego tomografu NIKON XT H 450, umożliwiającego wykonywanie pomiarów elementów odlewanych, łopatek turbin, tworzywowych elementów, np. obudów, oraz przeprowadzenie oceny jakości montażu zespołów montażowych. Tomograf był wyposażony w lampę rentgenowską mikrofokus 450 kV, zapewniającą rozdzielczość i dokładność do mocy 450 W, system był wyposażony w płaski panel do pomiarów 3D oraz zakrzywioną, liniową matrycę diodową (CLDA – *curved linear diode array*) do pomiarów 2D. Detektor optymalizował zbieranie promieni rentgenowskich bez przechwytywania niepożądanych rozproszonych promieni X. Rozmiar ogniskowej wynosił 80 μm do 50 W. Wielkość plamki – 320 μm . Parametry detektora: 16-bit, rozmiar pikseli 200 mikronów, piksele aktywne 2000 \times 2000, częstotliwość wyświetlania klatek 3,75 fps.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Na podstawie obrazów projekcji wielu przekrojów dokonano rekonstrukcji obrazu całego wirnika za pomocą transformaty Radona [9]. Dokładność procesu odwzorowania zależała od liczby projekcji wykonanych dla pełnego obrotu wirnika. Badania geometrii i struktury wirnika kompresora obejmowały analizę porowatości, chropowatości, rozwarstwienia oraz defektoskopię, a także analizę dokładności odwzorowania wymiarów wzorca – numerycznego modelu CAD. Rysunek 2 przedstawia porowatość koła wykonanego z materiału ABS.

Rysunek 2 wyraźnie uwidacznia sposób budowania modelu – nakładania poszczególnych warstw polimeru ABS w procesie wytwarzania przyrostowego metodą FDM. Można też zaobserwować występowanie licznych defektów w postaci wtrąceń grudek materiału, które naj-

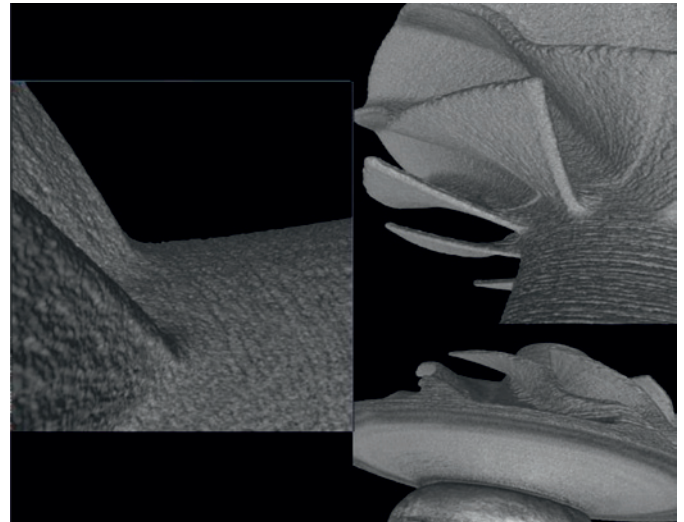


Rys. 2. Porowatość powierzchni wirnika kompresora wykonanego metodą FDM

Fig. 2. Surface porosity of compressor rotor produced using FDM method

prawdopodobnie są pozostałością po elementach podporowych powstałych w procesie [7].

Powierzchnia koła kompresora wykonanego z żywicy światłoutwardzalnej metodą PolyJet (rys. 3) wykazuje znacznie mniejszą porowatość oraz brak defektów



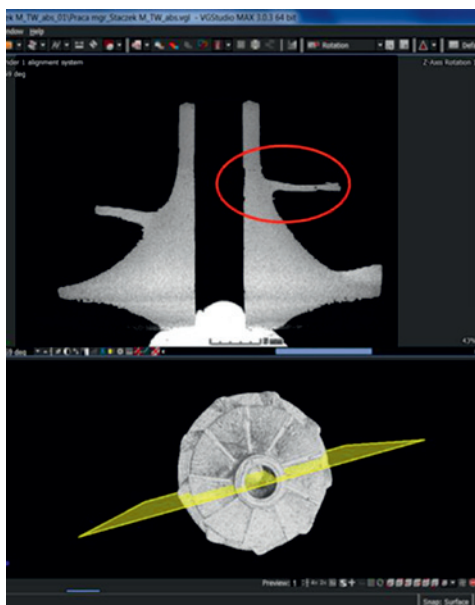
Rys. 3. Porowatość powierzchni wirnika kompresora wykonanego metodą PolyJet

Fig. 3. Surface porosity of compressor rotor produced using PolyJet method

w postaci wtrąceń materiału podporowego. Wirniki wykonane metodą nakładania żywicy światłoutwardzalnej charakteryzowały się również znacznie większą dokładnością odwzorowania numerycznego wzorcowego modelu CAD.

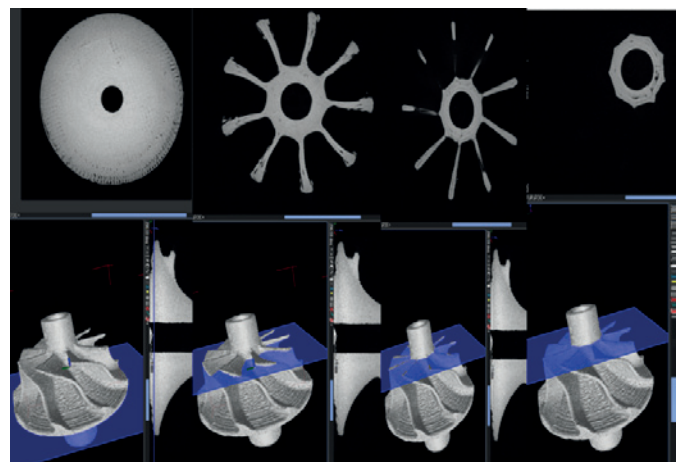
Kolejnym etapem badań była defektoskopia wykonana w dwóch charakterystycznych płaszczyznach modelu: X-Y oraz X-Z, umożliwiającą analizę defektów struktury, rozchodzących się w materiale w różnych kierunkach. Defekty w płaszczyźnie X-Z wirnika wykonanego z polimeru ABS przedstawia rys. 4. Natomiast defekty materiałowe w płaszczyźnie X-Y wirnika przedstawia rys. 5.

W wypadku modelu wykonanego techniką FDM w strukturze wewnętrznej zaobserwowano liczne nieciągłości. Wyraźnie uwidoczniły się niewielkie przestrzenie powietrzne oraz ślady pojedynczych wiązek nakładanego materiału ABS. Można więc uznać, że struktura



Rys. 4. Defektoskopia w przekroju X-Z próbki wirnika wykonanego z ABS

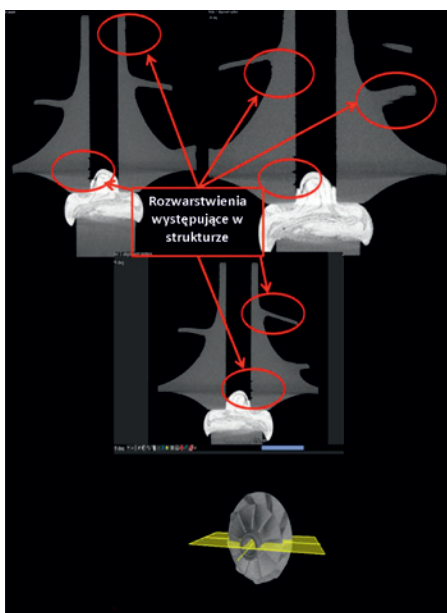
Fig. 4. Flaw detection in X-Z cross-section for compressor rotor made of ABS



Rys. 5. Defekty strukturalne w płaszczyźnie X-Y wirnika wykonanego z materiału ABS

Fig. 5. Structural defects in X-Y cross-section of compressor rotor made of ABS

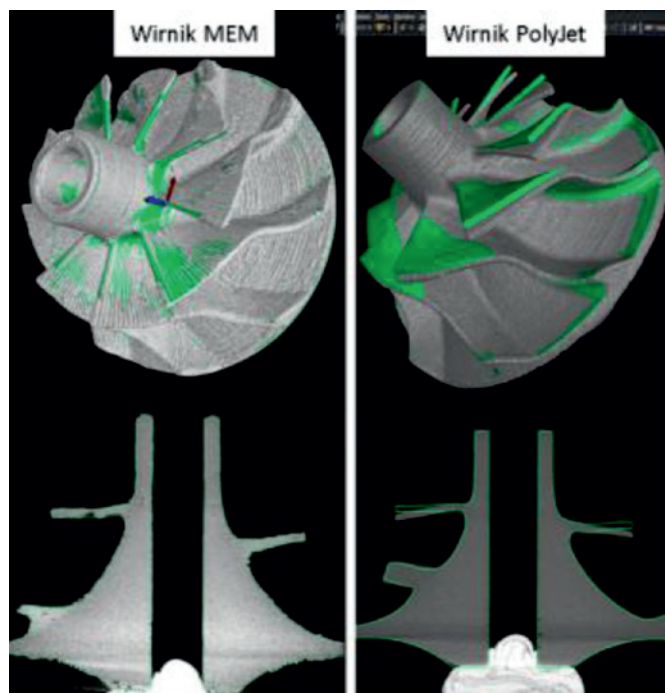
modeli FDM nie wykazuje właściwości izotropowych. W przeciwieństwie do modeli powstałych za pomocą techniki FDM, modele powstałe z zastosowaniem techniki PolyJet wykazują silną tendencję do izotropii struktury wewnętrznej. W tym wypadku, w przekroju X-Z zaobserwowano natomiast zjawisko delaminacji (rys. 6). Rozwarstwienia są spowodowane najprawdopodobniej nieciągłością nakładanego materiału w procesie wytwarzania części lub, jak ustalono z ekspertem od produkcji addytywnej, deformacją (pękaniem) modelu wynikającą z jego, relatywnie dużych, wymiarów w stosunku do wymiarów komory maszyny.



Rys. 6. Delaminacja w strukturze wirnika wykonanego metodą PolyJet

Fig. 6. Delamination in the structure of compressor rotor produced using PolyJet method

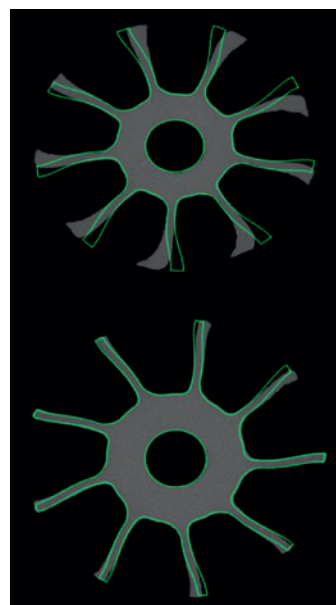
Na etapie dalszych badań wykonano kluczową analizę porównawczą reprodukowanych modeli CAD części polimerowych, wytwarzanych z zastosowaniem reprezentatywnych technik addytywnych, w procesie produkcji realizowanym w konwencji Przemysł 4.0. Analizie poddano wymiary wzorcowych modeli numerycznych 3D-CAD oraz wymiary rzeczywistych modeli wytworzonych reprezentatywnymi technikami addytywnymi (druku 3D), wyniki odniesiono do danych uzyskanych metodą tomografii komputerowej (rys. 7). Badania porównawcze wirnika kompresora wykonanego metodą FDM wykazały tzw. spęczenie detalu. Przyczyną spęczenia elementu rzeczywistego jest najprawdopodobniej relatywnie duża higroskopijność materiału na etapie produkcji oraz schładzanie warstwy bezpośrednio po procesie wytwarzania przyrostowego. Materiał wskutek schładzania zmienił swoją objętość, co było przyczyną jego odkształcenia w stosunku do modelu rzeczywistego. Higroskopijność materiału ABS tłumaczy, oprócz zmiany w gabarytach modelu, także nieciągłość w jego strukturze wewnętrznej (silną anizotropowość). Na etapie tłoczenia przez ciekłą



Rys. 7. Analiza modelu CAD w odniesieniu do danych z CT
Fig. 7. CAD model analysis in relation to CT data

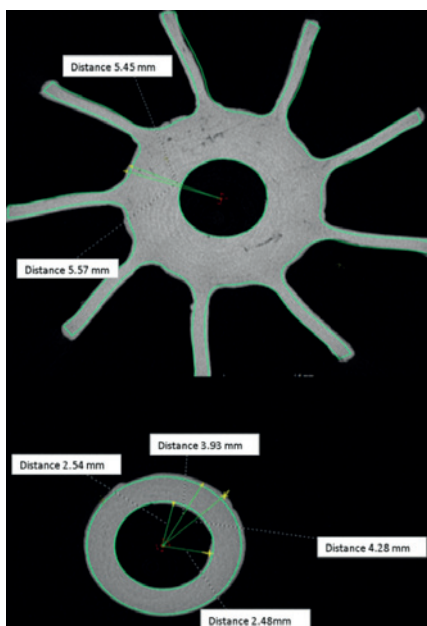
dyszę maszyny wilgotnego materiału ABS dochodzi do przemiany fazowej zawartej w materiale wody do pary wodnej, która zostaje zamknięta w szczelnych „mikrokomorach” o ściankach z uplastycznionego materiału. Po zastygnięciu są one widoczne w postaci niewielkich przestrzeni powietrznych (rys. 5).

W wypadku wirnika wykonanego z żywicy światłoutwardzalnej (rys. 8) [10, 11] nastąpiła deformacja łopatek koła kompresora najprawdopodobniej powstająca w wyniku usuwania materiału podporowego oraz na skutek



Rys. 8. Odkształcenia detalu w przekroju X-Y względem modelu rzeczywistego

Fig. 8. Deformation of the part in X-Y cross-section in relation to real model



Rys. 9. Wyniki pomiarów geometrycznych w płaszczyźnie X-Y wirnika wykonanego metodą FDM

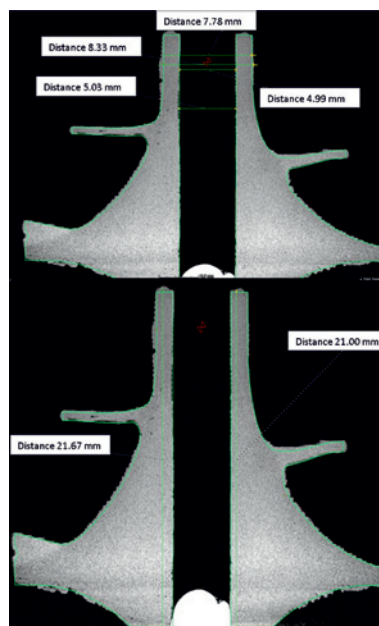
Fig. 9. Measurements of geometric parameters in X-Y cross-section of compressor rotor produced using FDM method

relatywnie niewielkiej temperatury uplastyczniania żywicy. Strumień wody pod wysokim ciśnieniem spowodował odkształcenie cienkościennych elementów, jakimi są łopatki. Z tego względu najlepszym sposobem usuwania materiału podporowego jest wytrawianie podpór w wodzie o odczynie zasadowym, w znacznie mniejszym stopniu wpływające bezpośrednio na rzeczywistą geometrię koła wirnika.

Analizowano również odkształcenia koła wirnika wykonanego metodami FDM oraz PolyJet na płaszczyźnie X-Y (rys. 9), a także koła wirnika wykonanego metodą FDM na płaszczyźnie X-Z (rys. 10). Model referencyjny 3D-CAD nałożono na model uzyskany metodą tomografii komputerowej, będący odwzorowaniem modelu rzeczywistego.

PODSUMOWANIE

W badaniach wykorzystano dwie powszechnie stosowane w przemyśle [11], reprezentatywne techniki bazujące na polimerach oraz żywicach światłoutwardzalnych jako materiałach budulcowych [10]. Przeprowadzone prace miały charakter strategiczny pod względem oceny zdolności technik FDM oraz PolyJet w procesie reprodukcji części bezpośrednio z modeli numerycznych 3D-CAD [12]. Model wytworzony techniką FDM wykazywał silne cechy anizotropowości, w przeciwieństwie do modelu wytworzonego techniką PolyJet, wykazującego cechy silnej izotropowości struktury wewnętrznej. Model otrzymany techniką FDM charakteryzował się znacznie większą chropowatością powierzchni niż model otrzymany techniką PolyJet. Ponadto, w wypadku zastosowania techniki PolyJet zaobserwowano mikropęknięcia po-



Rys. 10. Wyniki pomiarów geometrycznych w płaszczyźnie X-Z wirnika wykonanego metodą FDM

Fig. 10. Measurements of geometric parameters in X-Z cross-section of compressor rotor produced using FDM method

wierzchni modelu, które potencjalnie mogą skutkować jego uszkodzeniem, wymaga to jednak dodatkowych badań weryfikujących. W obu modelach stwierdzono deformacje wynikające z higroskopijności materiału ABS (technika FDM) oraz niskiej temperatury uplastyczniania żywicy i warunków brzegowych obróbki wykańczającej.

W perspektywie dalszych badań potwierdzenie trendów występujących w obu technikach addytywnych umożliwi wypracowanie zbioru kluczowych poprawek technologicznych, które będą musiały być uwzględnione na etapie tworzenia modeli 3D-CAD.

LITERATURA

- [1] Lee J., Bagheri B., Kao H-A.: *Manufacturing Letters* **2015**, 3, 18.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [2] Lasi H., Fettke P., Kemper H. i in.: *Business & Information Systems Engineering: The International Journal of Wirtschaftsinformatik* **2014**, 6, 239.
<http://hdl.handle.net/10.1007/s12599-014-0334-4>
- [3] Jazdi N.: "Cyber physical systems in the context of Industry 4.0", 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca, Romania, 22–24 May 2014.
<http://dx.doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857843>
- [4] Stock T., Selinger G.: *Procedia CIRP* **2016**, 40, 536.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- [5] Lee J., Kao H.-A., Yang S.: *Procedia CIRP* **2014**, 16, 3.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- [6] Budzik G., Siemiński P.: „Techniki Przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.

- [7] Budzik G., Zboiński M., Cader M.: *Mechanik* **2013**, 8–9, 762.
- [8] Villarraga-Gómez H., Ramsey A., Peitsch Ch., Smith S.: 2018 ASPE and euspen Summer Topical Meeting – Advancing Precision in Additive Manufacturing, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA 2018, 69, 201.
- [9] “Visualization in Medicine: Theory, Algorithms, and Applications” (Eds. Preim B., Bartz D.), “The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics”, 2007.
- [10] Budzik G.: *Archives of Foundry Engineering* **2007**, 7 (2), 83.
- [11] Budzik G.: „Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania prototypów elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
- [12] Budzik G., Markowski T., Kozik B. i in.: *Archives of Foundry Engineering* **2014**, 14, 87.

Otrzymano 15 X 2018 r.

INSTYTUT INŻYNIERII MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH I BARWNIKÓW
w TORUNIU

ODDZIAŁ FARB I TWORZYW w GLIWICACH

zaprasza do udziału

w XIII Międzynarodowej Konferencji

ADVANCES IN PLASTICS TECHNOLOGY

(POSTĘPY W TECHNOLOGII TWORZYW POLIMEROWYCH)

Chorzów, 29–31 października 2019 r.

Tematyka Konferencji:

- **Nowości w zakresie bazy surowcowej do produkcji tworzyw:** materiały polimerowe (żywice, mieszanki do formowania, polimery biodegradowalne, nanopolimery), kompozyty i nanokompozyty polimerowe, pigmenty i barwniki, koncentraty polimerowe, napełniacze i dodatki wzmacniające, środki pomocnicze i modyfikatory
- **Osiągnięcia w zakresie przetwórstwa tworzyw i ich stosowania**
- **Nowoczesne rozwiązania dotyczące maszyn i oprzyrządowania w przetwórstwie tworzyw**
- **Ochrona środowiska naturalnego, recykling, regulacje prawne**
- **Zagadnienia badawcze i rozwojowe oraz kontrolno-pomiarowe**
- **Trendy rynkowe**

Język konferencji: angielski i polski (symultaniczne tłumaczenie).

Czas prezentacji referatu – 25 min. (wraz z dyskusją).

Opłata konferencyjna: 1 000 zł + 23 % VAT

Termin przysłania tytuł referatu lub plakatu (w j. angielskim i polskim), skrótów (do 120 słów) oraz biografii autora (do 50 słów w j. ang.) – **31 maja 2019 r.**

Termin przysłania pełnych tekstów wystąpienia (do 10 stron formatu A-4 w j. ang.) – **30 sierpnia 2019 r.**

Jest możliwość promocji firmy w formie wkładki reklamowej, plakatu lub stanowiska promocyjnego podczas konferencji.

Miejsce konferencji: HOTEL GORCZOWSKI, Chorzów, ul. Stefana Batorego 35

Informacje: mgr inż. Anna Pajak, Maria Błach, Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników Oddział Farb i Tworzyw, ul. Chorzowska 50A, 44-100 Gliwice, tel. +48 (32) 231 9043; fax: +48 (32) 231 2674; e-mail: a.pajak@impib.pl

www.impib.pl