

Selected quality issues of models produced by 3D printing using MEX technology

Wybrane problemy jakości modeli wytwarzanych drukiem 3D w technologii MEX

JERZY BOCHNIA
TOMASZ KOZIOR*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.3.5>

This article discusses the problems of print defects occurring in MEX technology in the context of broadly defined quality, defined in multifaceted terms. It presents the procedure for producing models using 3D printing technology. It presents the results of microscopic examinations of the produced models of various components and discusses their significance. It also highlights the importance of 3D printing simulation, which should precede manufacturing to identify and correct certain defects.

KEYWORDS: quality, MEX technology, print defects

W artykule omówiono problemy występujących wad wydruku w technologii MEX w kontekście szeroko rozumianej jakości definiowanej wieloaspektowo. Przedstawiono procedurę wytwarzania modeli technologią druku 3D. Zaprezentowano wyniki badań mikroskopowych wytworzonych modeli różnych elementów i omówiono ich znaczenie. Przedstawiono również znaczenie symulacji druku 3D, która powinna poprzedzać proces wytwórczy w celu korygowania niektórych wad.

SŁOWA KLUCZOWE: jakość, technologia MEX, wady wydruku

Wprowadzenie

Warstwowe przetłaczanie materiałów lub inaczej ekstruzja materiałów znane jako MEX (ang. Material Extrusion) jest jedną z najpopularniejszych technologii druku 3D. Do warstwowego przetłaczania materiałów termoplastycznych zalicza się dwie metody:

- FDM (Fused Deposition Modeling),
- FFF (Fused Filament Fabrication).

Technologia MEX polega na warstwowym budowaniu części na płaskiej platformie roboczej z materiału (najczęściej termoplastycznego), który jest wytłaczany z dyszy ekstrudera. Materiał podgrzany jest w komorze grzewczej do odpowiedniej temperatury, nieznacznie niższej od temperatury topnienia materiału, np. dla materiału PLA wynosi ona około 200–240°C. Odpowiednio wysoka temperatura zapewnia przejście materiału z fazy stałej do ciekłej, jego przepływ i wypełnienie warstwy zgodnie z programem sterującym drukarką 3D. Szczegółowe opisy procesu technologicznego MEX można znaleźć w wielu publikacjach, np. [1, 2]. Trzeba tu podkreślić, że proces technologiczny ma niezwykle istotny wpływ na jakość wytwor-

zonych modeli. Warto przytoczyć tu kilka definicji jakości, żeby łatwiej można było dokonywać jej oceny.

Jakość

W aspekcie inżynierii mechanicznej definiowana może być na wiele sposobów. Na przykład John S. Oakland, Leslie J. Porter [3] definiują jakość jako stopień zaspokojenia potrzeb i spełnienia wymagań klienta, zaś D.A. Garvin [4] definiuje jakość jako stopień, w jakim określony produkt spełnia projekt albo specyfikację, oraz jako zgodność z wymaganiami sformułowanymi podczas projektowania produktu.

W normach PN-ISO 8402-1996 [5], PN-EN ISO 9000:2006 [6] oraz PN-EN ISO 9000:2015-10 [7] jakość zdefiniowano jako „Ogół właściwości obiektu wiążących się z jego zdolnością do zaspokojenia potrzeb stwierdzonych i oczekiwanych”.

A. Hamrol [8] przedstawił jakość jako zbiór cech przynależnych temu przedmiotowi, którego jakość jest oceniana. W książce S. Adamczak, W. Makieła dotyczącej podstaw metrologii i inżynierii jakości zdefiniowano to pojęcie w następujący sposób: „Inżynieria jakości – obszar wiedzy ściśle związany z problemami metrologicznymi” [9].

Aby dokonać oszacowania jakości części wytwarzanych technologią MEX, należy zatem uwzględnić wiele czynników, np.:

- zgodność otrzymanego modelu z dokumentacją CAD 3D,
- zgodność z wymaganymi właściwościami fizycznymi (np. właściwościami mechanicznymi) materiału, z którego model został wykonany,
- zgodność z oczekiwaniami (specyfikacjami) klienta – w przypadku części handlowych,
- zgodność z wymaganymi cechami sensorycznymi (barwa, zapach itp.).

Autorzy w tej pracy przedstawili tylko niektóre problemy dotyczące jakości druku technologią MEX, z którymi spotkali się podczas wytwarzania różnych części użytkowych, ale również próbek stosowanych w badaniach właściwości mechanicznych materiałów. Problemy te dotyczą błędów wydruku, które czasami są ukryte, a decydują o właściwościach użytkowych wytworzonych elementów.

* Dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk – jbochnia@tu.kielce.pl, <https://ordic.org/0000-0001-7540-3822> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Metrologii i Niekonwencjonalnych Metod Wytwarzania, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska
dr hab. inż. Tomasz Kozior, prof. PŚk – tkozior@tu.kielce.pl, tomasz.kozior@gum.gov.pl, <https://ordic.org/0000-0002-8922-4187> – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Metrologii i Niekonwencjonalnych Metod Wytwarzania, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska; Główny Urząd Miar, Laboratorium Informatyki Metrologicznej, Warszawa, Polska

Błędy wydruku

Technologia MEX może być realizowana za pomocą różnych drukarek, począwszy od małych, tzw. desktopowych, przez średnie, a skończywszy na dużych, wielkogabarytowych przemysłowych maszynach technologicznych. Maszyny druku 3D mogą posiadać różne konstrukcje, np.:

- z otwartą komorą roboczą lub zamkniętą komorą roboczą,
- z platformą roboczą stacjonarną, przesuwną, uchylną lub obrotową,
- jednogłowicowe, wielogłowicowe,
- z różnymi systemami podawania materiału (filamentu),
- z różnymi systemami sterowania i programami komputerowymi.

Jak widać z powyżej wymienionych cech konstrukcyjnych, różne mogą być przyczyny błędów wydruku, zależnie od rodzaju konstrukcji i stosowanego materiału. Można jednak mówić o pewnych charakterystycznych błędach wydruku, jeśli prześledzi się błędy w kontekście ogólnej procedury druku 3D stosowanej w technologii MEX. Procedurę taką zaprezentowano na rys. 1.

Na rys. 1 przedstawiono główne etapy technologii wytwarzania części. Pokazano również pętlę sprzężenia zwrotnego występującą w przypadku stwierdzenia błędnego wydruku. Proces wytwarzania rozpoczyna się od wykonania modelu 3D za pomocą dowolnego oprogramowania CAD 3D, tak aby otrzymać model trójwymiarowy. Model ten jest zapisywany do formatu na przykład (stl.), następuje więc aproksymacja modelu za pomocą siatki trójkątów. Tu mogą powstawać błędy

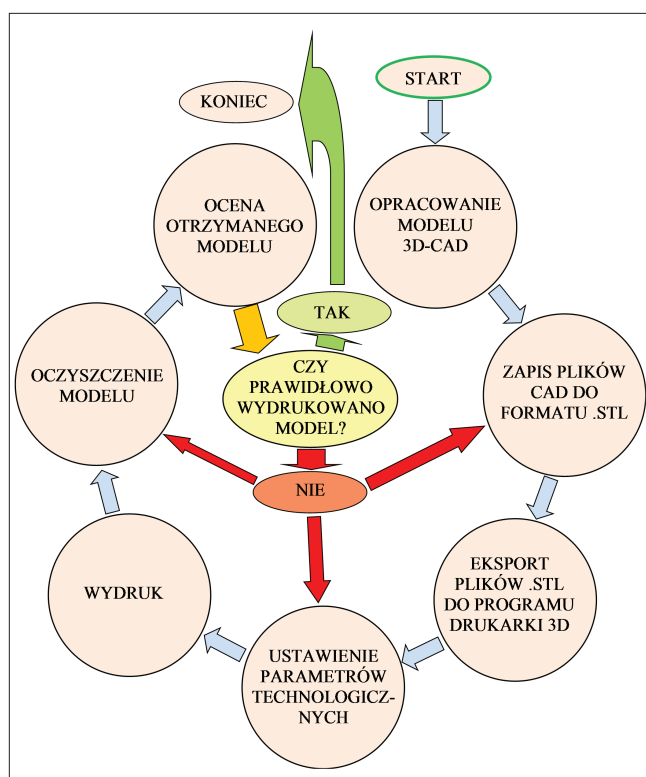


Fig. 1. Procedure for manufacturing models using 3D printing technology [10]

Rys. 1. Procedura wytwarzania modeli technologią druku 3D [10]

zapisu, które mogą generować uszkodzenia siatki trójkątów, a w konsekwencji błędy w wykonanym modelu. Następny krok to eksport do oprogramowania konkretnej drukarki 3D, gdzie ustawiane są w kolejnym kroku parametry technologiczne procesu wytwarzania w oprogramowaniu, które posiada dana maszyna.

Po wykonaniu powyższych kroków procedury następuje rozpoczęcie procesu wytwarzania (druku 3D), a po jego zakończeniu model jest zdejmowany z platformy budowania i oczyszczany z materiału podporowego. Tak wykonany model jest oceniany pod względem jakościowym według założonych kryteriów. W przypadku stwierdzenia rozbieżności, np. dotyczących dokładności wykonania, należy rozważyć ponowne wykonanie wydruku z uwzględnieniem wskazanych na rys. 1, za pomocą czerwonych strzałek, korekt na poszczególnych etapach procesu.

W aspekcie jakości modeli wytwarzanych technologiami druku 3D kluczowe znaczenie dla spełnienia wybranych założeń jakościowych mają parametry technologiczne procesu wytwarzania. Do takich parametrów w technologii MEX zaliczyć można:

- grubość budowanej warstwy,
- kierunek wytwarzania,
- temperaturę stołu roboczego, komory i dyszy w ekstruderze,
- rodzaj wypełnienia i procentową gęstość,
- typ wypełnienia,
- prędkość rozprowadzania materiału etc.

Samo dobranie parametrów technologicznych nie jest jednak wystarczające – pewne błędy technologiczne związane są z matematycznym algorytmem budowania cyfrowych ścieżek dla druku 3D poszczególnych warstw. Kolejny problem może wynikać ze zjawiska adhezji pomiędzy warstwami lub poszczególnymi materiałami składowymi filamentu (w przypadku kompozytów). Poniżej przedstawiono kilka wybranych przykładów wad procesu technologicznego, co stanowi graficzną interpretację wad procesu produkcyjnego.

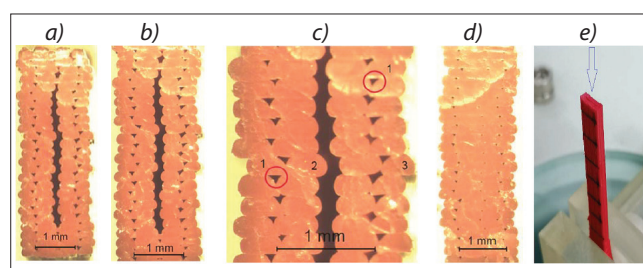


Fig. 2. Cross-sections of PLA samples observed using a stereomicroscope; (a) 1.8 mm thick sample, 6× magnification, (b) 1.8 mm thick sample, 12× magnification, (c) 1.8 mm thick sample, 25× magnification, (1 – no material filling at the interface of applied layers, 2 – layer displaced inside the sample, 3 – layer displaced outside the sample), (d) 1.4 mm thick sample, 12× magnification, (e) top view of samples during microscopic measurement [11]

Rys. 2. Przekroje poprzeczne próbek z materiału PLA zaobserwowane za pomocą mikroskopu stereoskopowego; (a) próbka o grubości 1,8 mm, powiększenie 6×, (b) próbka o grubości 1,8 mm, powiększenie 12×, (c) próbka o grubości 1,8 mm, powiększenie 25×, (1 – niewypełnienie materiałem na styku nakładanych warstw, 2 – warstwa przemieszczona do wewnątrz próbki, 3 – warstwa przemieszczona na zewnątrz próbki), (d) próbka o grubości 1,4 mm, powiększenie 12×, (e) widok z góry próbek podczas pomiaru mikroskopowego [11]

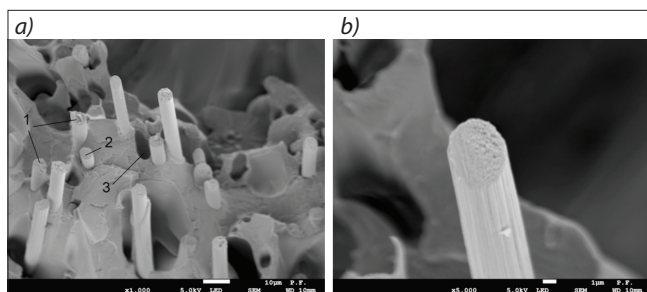


Fig. 3. Cross-sectional area of a 1.8 mm thick PLA-CF sample after tearing, in axonometric view, (a) 1000 $\times$ magnification, 1 – broken fibers, 2 – fibers not broken and well embedded in the base material, 3 – hole left by the protruding carbon fiber, (b) 5000 $\times$ magnification – a single carbon fiber as a component of the PLA-CF material [11]

Rys. 3. Powierzchnia przekroju próbki o grubości 1,8 mm z PLA-CF po rozerwaniu, w widoku aksonometrycznym, (a) powiększenie 1000 $\times$, 1 – zerwane włókna, 2 – włókna niezerwane i dobrze osadzone w materiale bazowym, 3 – otwór po wysuniętym włóknie węglowym, (b) powiększenie 5000 $\times$ – pojedyncze włókno węglowe jako komponent materiału PLA-CF [11]

Na rys. 2 i 3 przedstawiono zdjęcia mikroskopowe próbek pochodzące z pracy [11], w której szerzej opisano analizę właściwości mechanicznych cienkościennych próbek wykonanych technologią FDM z dwóch materiałów: czystego PLA i kompozytu PLA z włóknom węglowym – PLA-CF. W badaniach użyto próbek cienkościennych o grubościach 1 mm, 1,4 mm i 1,8 mm oraz próbek referencyjnych o grubości 4 mm, wykonanych za pomocą drukarki Makerbot Replikator 5th gen. Opisano proces technologiczny wytworzenia próbek, podstawowe pomiary metrologiczne ich geometrii, przeprowadzone próby wytrzymałościowe oraz przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego – SEM. Przedstawiony w artykule materiał badawczy może być wykorzystany do dalszych prac nad usprawnieniem zarówno technologii nakładania warstw filamentu, jak i prac związanych z modyfikacją materiału bazowego różnymi komponentami, w tym przypadku włóknom węglowym. Wyniki badań wykazały, że cienkościennie modele wytwarzane technologiami FDM/FFF wykazują wyraźne różnice w zależności od grubości modelu. Jednocześnie wyniki badań ujawniły różne błędy wydruku, które oceniać można w kategoriach jakościowych. Te błędy wydruku mają również wpływ na właściwości wytrzymałościowe i geometrię poszczególnych próbek.

Na rys. 2 [11] przedstawiono zdjęcia wybranych próbek w miejscu rozerwania, które wykonano za pomocą mikroskopu stereoskopowego. Rysunek 2a, b i c przedstawia przekrój poprzeczny zerwanej próbki z materiału PLA o grubości 1,8 mm wydrukowanej w orientacji Y. Widać wyraźne rozwarstwienie (szczelinę) w środku próbki. W innych próbkach o grubościach 1 mm i 1,4 mm nie zaobserwowano podobnych szczelin. Natomiast we wszystkich próbkach widać wyraźnie miejsca niewypełnienia materiałem na styku nakładanych warstw, które na rysunku 2c oznaczono okręgami z numerem 1. Zaobserwowano również przemieszczone warstwy materiału, np. warstwa 3 przemieszczona na zewnątrz próbki lub warstwa 2 przemieszczona do wewnątrz.

Rys. 3 [11] przedstawia przekrój próbki o grubości 1,8 mm wykonanej z PLA-CF w aksonometrii (głowica mikroskopu ustawiona pod kątem do powierzchni przekroju próbki). To ujęcie aksonometryczne przy powiększeniu 1000 $\times$, na którym można zobaczyć zerwane włókna (1), włókna niezerwane (2) i dobrze osadzone w materiale bazowym oraz otwór po wysuniętym włóknie węglowym z materiału bazowego w wyniku słabej jego przyczepności (rys. 3a). Rys. 3b przedstawia pojedyncze włókno węglowe przy powiększeniu 5000 $\times$.

Rys. 2 pokazuje, że przyczyną błędu wydruku jest program sterujący przemieszczeniami głowicy ekstrudera. Ruch głowicy ma charakter skokowy, czyli przemieszczenie o określoną wielkość, która w przypadku niektórych wymiarów modelu jest odpowiednia, a w przypadku innych – nieodpowiednia i generuje wewnętrzne szczeliny. Natomiast rys. 3 udowadnia, że jeżeli stosowany jest komponent w osnowie materiału bazowego, to istotne są relacje między tymi materiałami. W przypadku włókna węglowego, który jest komponentem, nie ma odpowiedniej adhezji między materiałem bazowym (osnową) a komponentem, dlatego niektóre włókna są „wyciągane” z osnowy, tworząc tzw. „dziury” (rys. 3a nr 3). To zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie, pogarszając tym samym jakość wykonanego elementu.

W pracy [12] przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych cienkościennych próbek wykonanych technologią FDM z materiału kompozytowego PLA + brąz również za pomocą drukarki Makerbot Replikator 5th gen. Opisano proces technologiczny wytworzenia próbek, podstawowe pomiary metrologiczne ich geometrii, przeprowadzone próby wytrzymałościowe oraz przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego – SEM. Zdjęcia mikroskopowe przykładowych próbek w miejscu rozerwania przedstawione na rys. 4, 5 i 6 dostarczają interesujących informacji o błędach powstających podczas wydruku, czyli w momencie kształtowania modelu na platformie roboczej drukarki oraz o wadach niektórych materiałów kompozytowych.

Jeszcze bardziej wyraźnie „rozwarstwienia” lub inaczej braki wypełnienia, mimo realizacji wydruku w opcji pełnego wypełnienia, pokazują zdjęcia na rys. 5 i 6 wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego.

Rys. 6 pokazuje dwie typowe wady druku wykonywanego technologią MEX:

- brak przyczepności (adhezji) lub mała przyczepność między osnową, w tym przypadku PLA, a proszkiem brązu jako komponentem (rys. 6a);
- szczeliny (brak wypełnienia) między nitkami filamentu (rys. 6b).

W jaki sposób powstające wady wydruku skutkują w wydrukach konkretnych modeli pokazano na przykładzie przekroju belki cienkościennej, której wyniki badań wytrzymałościowych opisano w pracy [13]. Tu pokazano tylko fragment dotyczący symulacji wydruku, którą zawsze warto zrobić przed wydrukiem. Symulacje można wykonywać w programach

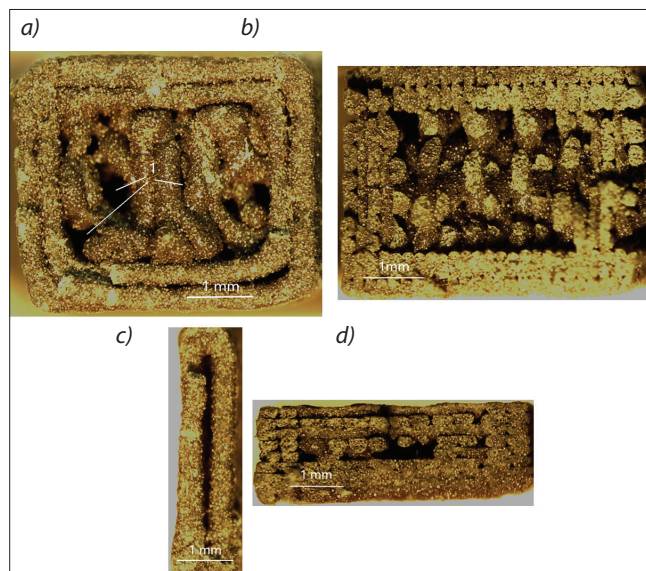


Fig. 4. Cross-sections of sample PLA+bronze samples after tearing, observed using a stereoscopic microscope at 12 $\times$ magnification; (a) 4 mm thick sample made in the Z direction, i.e. vertical, 1 – visible black spots indicate no filament filling, (b) 4 mm thick sample made in the Y direction, (c) 1 mm thick sample made vertically, i.e. in the Z direction, (d) 1.8 mm thick sample made in the X direction [12]

Rys. 4. Przekroje poprzeczne przykładowych próbek z PLA+brąz po zerwaniu, zaobserwowane za pomocą mikroskopu stereoskopowego przy powiększeniu 12 $\times$; (a) próbka o grubości 4 mm wykonana w kierunku Z, czyli pionowo, 1 – widoczne czarne miejsca oznaczają brak wypełnienia filamentem, (b) próbka o grubości 4 mm wykonana w kierunku Y, (c) próbka o grubości 1 mm wykonana pionowo, tj. w kierunku Z, (d) próbka o grubości 1,8 mm wykonana w kierunku X [12]

dedykowanych poszczególnym drukarkom. W symulacji przedstawionej na rys. 7 był to program Maker-Bot.

Inny przykład symulacji, usytuowanie na platformie roboczej modeli próbek do badań opisywanych w pracy [12], pokazano na rys. 8.

Rys. 8 przedstawia symulacje drukowania próbek w osi Y dla różnych analizowanych grubości. Na przekroju warstw konstrukcyjnych dla próbki o grubości 1,4 mm widać, że program wprowadził dodatkowe, nakładające się (zaznaczone na czerwono) warstwy wewnątrz modelu (w wypełnieniu). W przypadku innych typów próbek nie występowało nakładanie się warstw wewnątrz modelu, a ścieżki były uporzą-

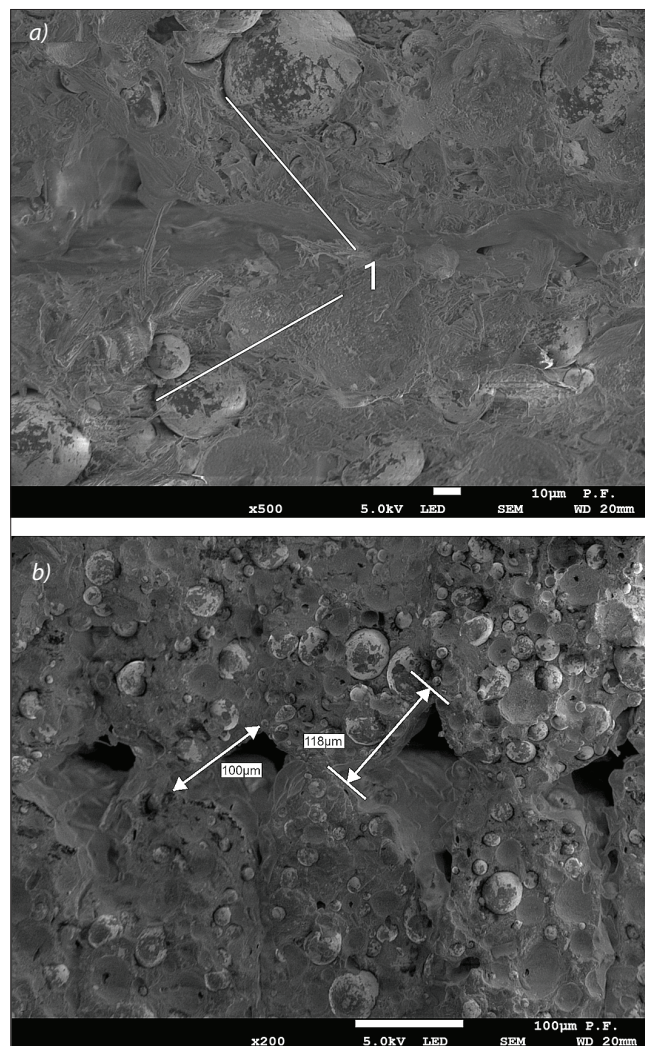


Fig. 6. Cross-section of a 4 mm thick sample printed in the Y direction from PLA+bronze after tearing, observed with a scanning microscope; observation direction – perpendicular to the cross-section (a), observation direction – at an angle of 45° to the cross-section, magnification 100 $\times$, where 1 – gaps between the bronze powder grains and the PLA matrix, (b) size of gaps between the filament threads, magnification 100 $\times$

Rys. 6. Przekrój poprzeczny próbki o grubości 4 mm wydrukowanej w kierunku Y z PLA+brąz po zerwaniu, zaobserwowany za pomocą mikroskopu skaningowego; kierunek obserwacji – prostopadłe do przekroju (a), kierunek obserwacji – pod kątem 45° do przekroju, powiększenie 100 $\times$, gdzie 1 – szczeliny między ziarnami proszku brązu a osnową z PLA, (b) wielkości szczelin między położonymi nitkami filamentu, powiększenie 100 $\times$

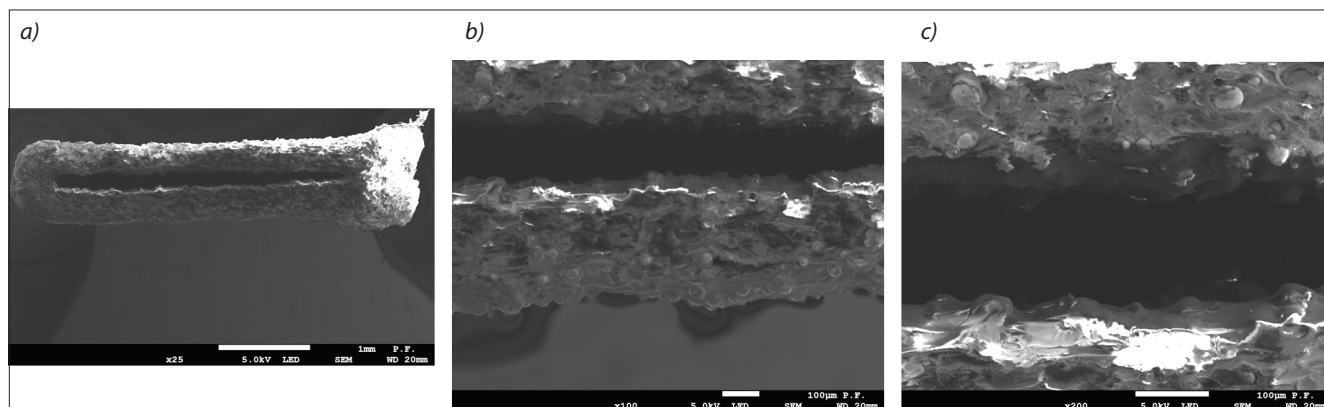


Fig. 5. Cross-section of a 1 mm thick sample made in the Z direction, i.e., vertically from PLA+bronze after tearing, observed using a scanning microscope. Observation direction – perpendicular to the cross-section; (a) 25 $\times$ magnification, (b) 100 $\times$ magnification, (c) 200 $\times$ magnification [12].
Rys. 5. Przekrój poprzeczny próbki o grubości 1 mm wykonanej w kierunku Z, tj. pionowo z PLA+brąz po zerwaniu, zaobserwowany za pomocą mikroskopu skaningowego. Kierunek obserwacji – prostopadłe do przekroju; (a) powiększenie 25 $\times$, (b) powiększenie 100 $\times$, (c) powiększenie 200 $\times$ [12]

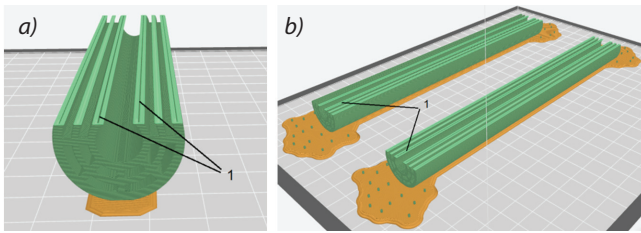


Fig. 7. Print simulations made using the MakerBot program, a) for the Sketch printer, b) for the Replicator 5th Gen. printer, 1 – places not filled with material [13]

Rys. 7. Symulacje wydruków wykonane przy użyciu programu MakerBot, (a) dla drukarki Sketch, (b) dla drukarki Replicator 5th Gen., 1 – miejsca niewypełnione materiałem [13]

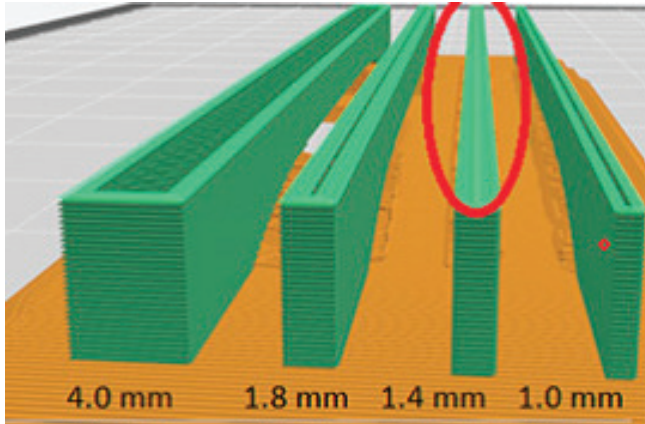


Fig. 8. Simulation of sample printing in the Y direction, cross-section [12]

Rys. 8. Symulacja wydruku próbek w kierunku Y, przekrój [12]

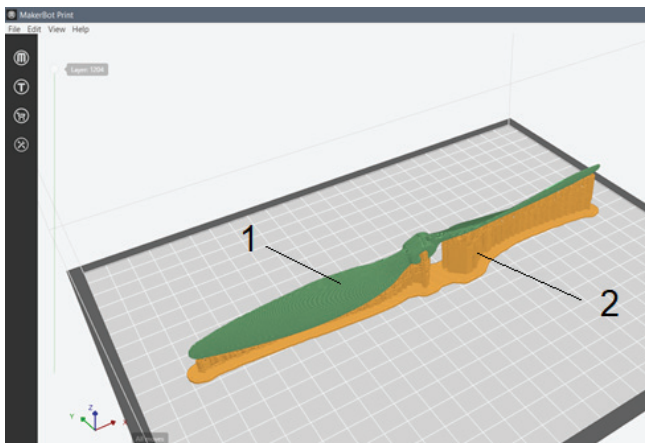


Fig. 9. Propeller print simulation. 1 – propeller model, 2 – support material

Rys. 9. Symulacja wydruku śmigła: 1 – model śmigła, 2 – materiał podporowy

kowane i uformowane w bryłę. W odniesieniu do próbki 1,4 wystąpił wzrost wymiaru „a” w stosunku do modelu CAD, ze względu na dodatkowe nakładanie się warstw modelu w tym kierunku. W próbkach o grubościach 1,8 mm i 1 mm symulacja pokazuje brak wypełnienia w środku próbek. Potwierdziły to zdjęcia mikroskopowe po wydruku.

Inne przykłady symulacji wykonane za pomocą programu MakerBot pokazano na rysunkach 9–11.

Przedstawione na rysunkach 8–11 wyniki symulacji wydruku pokazują możliwości wstępnej oceny przyszłego wydruku. Dzięki temu można korygować ustawienie modelu na platformie roboczej lub dobór

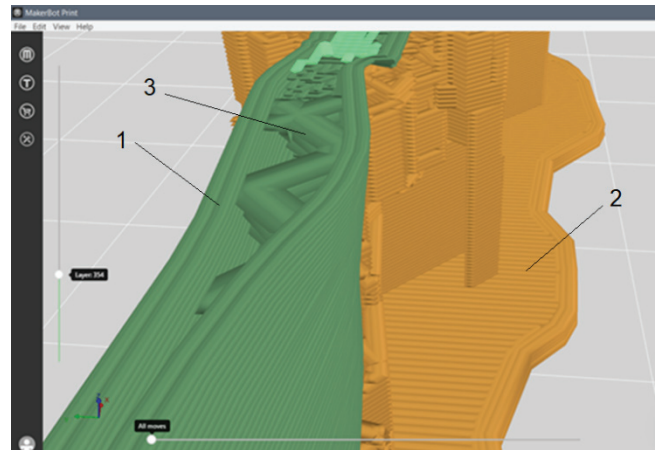


Fig. 10. Propeller print simulation. 1 – propeller model fragment, 2 – support material, 3 – model infill

Rys. 10. Symulacja wydruku śmigła: 1 – fragment modelu śmigła, 2 – materiał podporowy, 3 – wypełnienie modelu

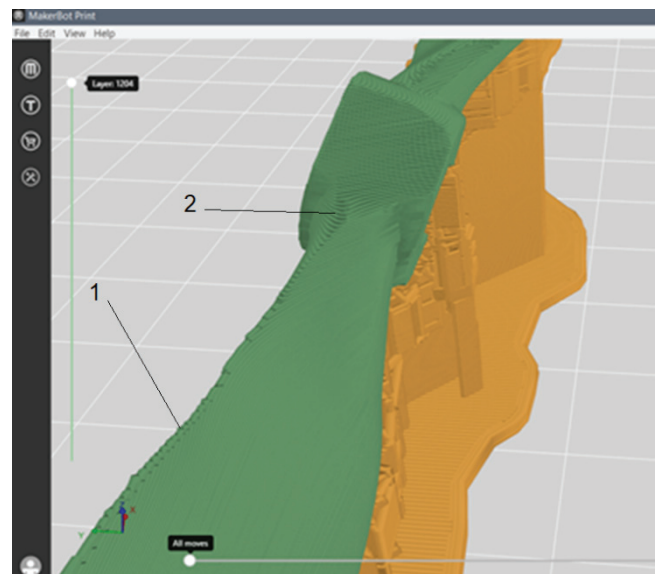


Fig. 11. Propeller print simulation. 1 – propeller edge, 2 – “step effect” filament layers

Rys. 11. Symulacja wydruku śmigła: 1 – krawędź śmigła, 2 – warstwy filamentu „efekt schodkowy”

parametrów technologicznych, np. grubość warstwy, wypełnienie, aby poprawić parametry jakości po wydruku. Niestety, pewne wady ze względu na specyfikę technologii MEX nie będą mogły być usunięte, np. efekt „schodkowy” pokazany na rys. 11 widoczny na krawędzi modelu śmigła i na powierzchniach o pewnej krzywiznie.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule problemy dotyczące wykonywania elementów technologią druku MEX w kontekście szeroko rozumianego pojęcia jakości, prezentowanego w formie definicji omówionych na wstępie tej pracy, skłania do kilku wniosków:

- wady wydruku powstające w procesie technologicznym MEX można podzielić na dwie zasadnicze grupy, tj. na możliwe do skorygowania z zastosowaniem wstępnej oceny poprzez symulację wydruku i niemożliwe do usunięcia,

- wady niemożliwe do usunięcia, wynikające z konstrukcji drukarki i systemu sterowania oraz oprogramowania, nie leżą w kompetencjach technologicznych i szukać ich eliminacji należy w modernizacji konstrukcji i systemów,
- grupa wad materiałowych, dotycząca głównie materiałów kompozytowych wiąże się przeważnie z małą przyczepnością komponentów do osnowy i usunięcia tych wad należy szukać w metodach konstituowania materiałów.

LITERATURA

- [1] Budzik, G., Woźniak, J., Przeszlowski, Ł.: *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów (2022).
- [2] Gipson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, New York (2010). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>.
- [3] Oakland, S.J., Porter, J.L.: *Total Quality Management*. Butterworth-Heinemann, Oxford (1995).
- [4] Garvin, D.A.: *Managing Quality: The Strategic and Competitive Edge*. Free Press (1988).
- [5] PN-ISO 8402:1996, Zarządzanie jakością i zapewnienie jakości. Terminologia, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa (1996).
- [6] PN-EN ISO 9000:2006, Systemy zarządzania jakością – Podstawy i terminologia, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa (2006).
- [7] PN-EN ISO 9000:2015-10, Systemy zarządzania jakością – Podstawy i terminologia, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa (2015).
- [8] Hamrol, A.: *Zarządzanie i inżynieria jakości*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (2017).
- [9] Adamczak, S., Makiela, W.: *Podstawy metrologii i inżynierii jakości dla mechaników. Ćwiczenia praktyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (2010).
- [10] Bochnia, J., Kozior, T.: *Podstawy szybkiego prototypowania. Druk 3D. Technologia FDM/FFF*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce (2024).
- [11] Bochnia, J., Blasiak, M., Kozior, T.: „A comparative study of the mechanical properties of fdm 3d prints made of PLA and carbon fiber-reinforced PLA for thin-walled applications”. *Materials (Basel)*. 14, 7062 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14227062>.
- [12] Bochnia, J., Kozior, T., Blasiak, M.: „The Mechanical Properties of Thin-Walled Specimens Printed from a Bronze-Filled PLA-Based Composite Filament Using Fused Deposition Modelling”. *Materials (Basel)*. 16, 3241 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16083241>.
- [13] Bochnia, J., Kozior, T., Blasiak, S.: „Three-point Bending of Elements Produced by Additive Technology with a Thin-Walled Spatial Structure”. *MM Science. Journal. MMSJ.2024_10_2024065*. 2024, 7475–7479 (2024). https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_10_2024065. ■