

UNIWERSALNOŚĆ DRUKU 3D W TECHNOLOGII FDM

Dagmara MICHTA, Bożena KACZMARSKA, Wacław GIERULSKI, Artur SZMIDT

Streszczenie: Technika druku 3D jest przykładem innowacyjnego podejścia do zagadnień techniki wytwarzania. Znajduje ona kolejne obszary zastosowań, co jest możliwe dzięki szybkiemu rozwojowi drukarek oraz stosowanych materiałów. Przedstawiona praca prezentuje wstępne wyniki badań nad tworzeniem wyrobów multimateriałowych z wykorzystaniem drukarek 3D. Przykładem są wyroby o strukturze kompozytowej tworzone w technologii FDM, co wskazuje kolejny obszar zastosowań technologii druku 3D.

Słowa kluczowe: drukarki 3D, technologia FDM, materiały kompozytowe

1. Wstęp

Od kilku lat druk 3D jest przykładem niezwykle szybko rozwijającej się technologii wytwarzania. W początkowym okresie dotyczyło to tylko budowy prototypów odzwierciedlających jedynie kształt elementów, skąd wywodzi się nazwa szybkie prototypowanie (*Rapid prototyping*). Rozwój technologii umożliwił wytwarzanie nie tylko prototypów, ale także części zamiennych o wyrafinowanych właściwościach dotyczących parametrów eksploatacyjnych, lub całych urządzeń najczęściej o niewielkich wymiarach, będąc relatywnie tanim urzeczywistnieniem produkcji jednostkowej. Obecnie istnieje wiele technologii umożliwiających tworzenie obiektów 3D. Wszystkie zaliczane są do technologii przyrostowych, gdzie obiekt tworzony jest poprzez nakładanie materiału warstwa po warstwie. Najważniejsze z nich można opisać następująco:

FDM (*Fused Deposition Modeling*) – Proces technologiczny polega na wytwarzaniu modeli z tworzyw sztucznych (najczęściej termoplastów na bazie ABS'u lub poliwęglanu PC) poprzez osadzanie topionego materiału przy pomocy cienkiej dyszy modelującej.

POLYJET – Proces technologiczny polega na nanoszeniu kolejnych warstw fotopolimeru (najczęściej na bazie żywic akrylowych) za pomocą wielu dysz, a następnie na jego utwardzeniu za pomocą światła UV.

SLS (*Selective Laser Sintering*) – Proces technologiczny polega na spajaniu wiązką lasera proszków tworzyw sztucznych (najczęściej za bazie Poliamidów PA) lub metali.

DMLS – Technologia bezpośredniego spajania proszków metali za pomocą wiązki lasera o dużej mocy.

3DP (*Three Dimensional Printing*) – Technologia polegająca na zespalaniu materiału proszkowego za pomocą cieczy zespalającej. Technologia 3DP daje możliwość wykonania modeli kolorowych w 24 bitowej palecie barw.

SLA (*Stereolithography*) – Technologia polegająca na utwardzaniu ciekłego fotopolimeru za pomocą wiązki lasera. Wytwarzany przedmiot, zatopiony w ciekłym polimerze, przemieszcza się stopniowo w dół, aby kolejno utworzona warstwa połączyła się z poprzednią podczas utwardzania wiązką lasera.

LOM (*Laminated Object Modelling*) – Technologia polegająca na warstwowym łączeniu termozgrzewalnych folii, wycinanych za pomocą lasera. Podstawowym

materiałem jest specjalna folia papierowa lub też inne folie z tworzyw sztucznych i kompozytów [1, 2].

Technologia druku 3D nie podąża tradycyjną drogą rozwoju typowego dla drugiej połowy XX wieku. Obejmuje ona w bardzo szybkim tempie także obszary nie związane z działalnością inżynierską i sferą innowacyjnych wyrobów. Podobnie do technologii internetowych obejmuje ona swoim zasięgiem także najmłodszych użytkowników. Przykładem są istniejące w ofercie handlowej zestawy do rysowania w technice 3D dedykowane dla dzieci i młodzieży. W zestawach tych długopis pozwala na wykonywanie rysunku specjalnym żelem utwardzanym dołączonym źródłem promieniowania UV [3]. Stosunkowo gruba warstwa żelu pozwala na tworzenie obiektów przestrzennych, co jest istotą druku 3D.

Innym przykładem jest ręczna drukarka 3D, która posiada drukującą głowicę zasilaną typowym filamentem, tak jak w profesjonalnych urządzeniach [4]. Różnica polega na tym, że głowica przemieszczana jest ręcznie, a nie za pomocą programu komputerowego. Wydruki są więc wynikiem kreatywności dziecka, a nie odzwierciedleniem kształtu precyzyjnie opracowanego w procesie inżynierskiego projektowania. Rozpowszechnienie technologii druku 3D w wersji odpowiedniej dla dzieci wydaje się być jednoznacznym sygnałem, że jest to technika przyszłości.

Popularność technologii przyrostowych realizowanych w formie druku 3D zachęca do poszukiwania nowych zastosowań, wśród których znajduje się też tworzenie elementów multimateriałowych.

2. Wroby o strukturze multimateriałowej

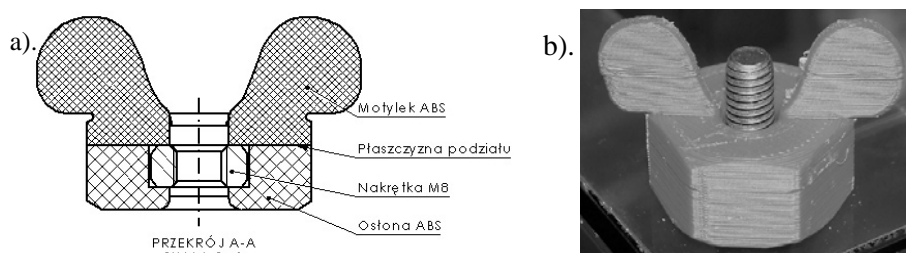
Technologia FDM jest obecnie najbardziej rozpowszechnionym sposobem wytwarzania elementów metodą druku 3D. Wynika to z jej prostoty oraz dostępności tanich drukarek. W technologii tej materiałem modelującym jest tworzywo termoplastyczne, najczęściej w formie cienkiego włókna (średnica 1 – 3 mm) nazywanego filamentem. Nazwa „filament” pochodzi z biologii, gdzie stosowana jest do określania długiego cienkiego wyrostka (łac. *filamentum*), w tym także nitkowatych białkowych struktur wchodzących w skład komórki [5].

W tradycyjnej technologii wydruki 3D będące przestrzennymi obiektami, wykonywane są w całości z tworzywa termoplastycznego. Czasami filament oprócz podstawowego składnika (tworzywo termoplastyczne) zawiera składniki dodatkowe, przykładowo takie jak: gumowe mikrokulki lub skrawki włókna szklanego. Ma to wpływ na właściwości wykonywanych elementów, które można taktować jako multimateriałowe w skali mikro.

Inny rodzaj multimateriałowych obiektów z wykorzystywaniem techniki druku 3D można otrzymywać poprzez obudowę tworzywem termoplastycznym elementów wykonanych z innych materiałów – metal, drewno itp. Te obudowywane elementy mają duże wymiary, a ich położenie w wykonywanym obiekcie jest ściśle określone. Powstają w takich przypadkach elementy multimateriałowe w skali makro [1].

Jako przykład wyrobu wykonanego tym sposobem można wskazać nakrętkę motylkową (rys. 1b). Drukowanie odbywa się etapami wyznaczanymi przez zastosowane płaszczyzny podziału (rys. 1a). W tym przypadku typowa nakrętka stalowa (M8) została obudowana tworzywem termoplastycznym w dwóch etapach druku, co wynika z zastosowania jednej płaszczyzny podziału. W pierwszym etapie wykonano dolną część do płaszczyzny podziału (Osłona ABS). Następnie wstrzymano proces drukowania i w odpowiednim miejscu

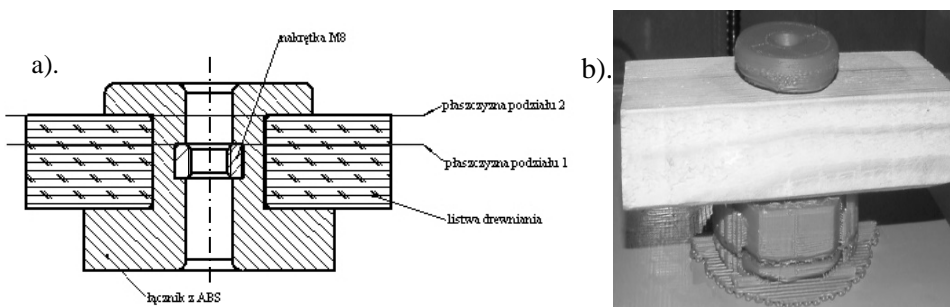
umieszczono metalową nakrętkę. Potem wznowiono proces drukowania, aż do uzyskania ostatecznego kształtu (Motylek ABS) [1].



Rys. 1. Nakrętka motylkowa
Źródło: opracowanie własne

W prezentowanym przypadku do druku wykorzystano tworzywo termoplastyczne ABS (*kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy*) w formie filamentu o średnicy 1,8 mm. Wykonywanie tego rodzaju wydruków uwarunkowane jest wskazaniem płaszczyzny podziału. Tylko na takiej płaszczyźnie występuje możliwość wstrzymania i ponownego uruchomienia procedury drukowania.

Innym przykładem jest gniazdo śrubowe wbudowane w listwę drewnianą (rys. 2b). Gniazdo wykonano z tworzywa termoplastycznego ABS, wewnątrz umieszczono stalową nakrętkę M8 (rys. 2a). W tym przypadku określono dwie płaszczyzny podziału, które wyznaczają trzy etapy druku. W pierwszym etapie drukowano dolną część łącznika do pierwszej płaszczyzny podziału. Następnie w odpowiedniej części wydruku umieszczono nakrętkę i rozpoczęto drukowanie łącznika pomiędzy płaszczyznami podziału (drugi etap). Po nałożeniu drewnianej listwy realizowano trzeci etap – drukowanie górnej części łącznika [1].



Rys. 2. Gniazdo śrubowe
Źródło: opracowanie własne

Możliwości wykonywania wyrobów tym sposobem są bardzo ograniczone. Mogą to być jedynie wyroby, dla których istnieje możliwość podziału na części oddzielone równoległymi płaszczyznami, wyznaczającymi kolejne etapy druku. Innym warunkiem realizacji takiego zadania jest umiejętność sterowania głowicą drukującą, tak, aby wstrzymać druk na czas umieszczania dodatkowych elementów. Problemem technicznym jest także wznowienie druku bez naruszenia ciągłości materiału.

3. Materiały kompozytowe

Materiały kompozytowe należą do najbardziej obiecującej i rozwijającej się grupy materiałów, która cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem w pracach badawczych i aplikacyjnych. Są to połączenia kilku, a najczęściej dwóch komponentów – faz o różnych właściwościach, co daje możliwość uzyskania innych, lepszych właściwości niż w przypadku materiałów wyjściowych, jako wynik sumowania właściwości poszczególnych komponentów. Jako pierwszy rodzaj kompozytu w powszechnym zastosowaniu można wskazać żelbet, w którym beton stanowi osnowę, a pręty stalowe są wzmocnieniem. Gwałtowny rozwój struktur kompozytowych nastąpił po upowszechnieniu się tworzyw sztucznych, będących materiałami otrzymywanymi na bazie polimerów syntetycznych [6].

Materiały polimerowe są mało wytrzymałe na deformacje i naprężenia w porównaniu z metalami; mają niski moduł sprężystości oraz niską wytrzymałość na zerwanie. Wzmocnienie polimeru cząstkami stałymi lub różnego typu włóknami umożliwia otrzymanie materiału kompozytowego o lepszych właściwościach mechanicznych. Za kompozytowy materiał polimerowy uznaje się kompozycję składającą się z osnowy polimerowej wzmocnionej napelniającymi różnego typu:

- napelniacze proszkowe wzmacniające (np. kaolin, krzemionka),
- włókna sztuczne (szklane, grafitowe, polimerowe itp.),
- włókna naturalne (np. juta),
- tkaniny.

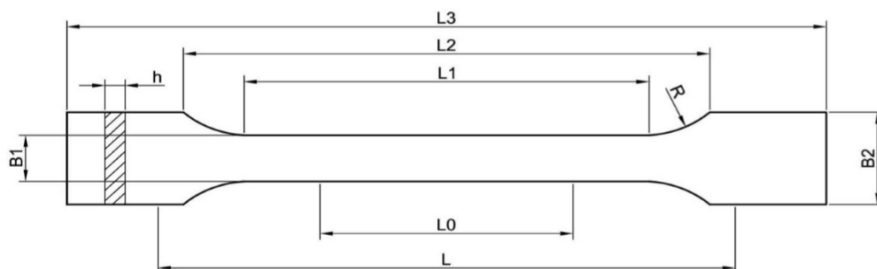
Kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, rolnictwie, jako elementy konstrukcyjne w przemyśle samochodowym, lotnictwie, aeronautyce, itd. Pierwsze kompozyty tego typu były tworzone na podstawie poliestrów termoutwardzalnych, które będąc materiałami relatywnie tanimi o niskiej lepkości, ułatwiały efektywną impregnację włókien i pozwalały na utworzenie kompozytu o wysokiej wytrzymałości. Kolejne kompozyty były otrzymywane dzięki zastosowaniu żywicy epoksydowej i włókien węglowych, poliamidowych, poliestrowych lub grafitowych. Włókna aramidowe – Kevlar stosowano do wytwarzania szczególnie wytrzymałych kompozytów konstrukcyjnych. [7]

Kompozyty na bazie polimerów są materiałem konstrukcyjnym stosowanym powszechnie w wielu dość prostych wyrobach dalekich od obszarów wysokiej techniki. Przykładem są rakietki tenisowe, sprzęt narciarski, wędkę, tyczki dla sportowców, kadłuby kajaków i jachtów, przyczepy kempingowe i wiele innych. Warto więc poszukiwać nowych zastosowań lub nowych technik ich wytwarzania. Każdy ze wskazanych przykładowych wyrobów ma opracowane specjalne techniki wytwarzania. Przykładowo kadłuby jachtów śródlądowych w większości są wytwarzane jako kompozyty będące połączeniem włókna szklanego z żywicą poliestrową lub epoksydową. Włókna stosowane są w formie tkaniny, której kolejne warstwy układane są na formie o odpowiednim kształcie i sklejane płynną żywicą zmieszaną z utwardzaczem. Tego rodzaju proces nazywany jest laminowaniem, a powstały kompozyt – laminatem.

4. Wydruki 3D w formie kompozytów

W Laboratorium Prototypowania Politechniki Świętokrzyskiej podjęto próby tworzenia kompozytów z wykorzystaniem drukarek 3D w technologii FDM. Jest to kolejny przykład wykorzystania drukarek 3D do tworzenia wyrobów o strukturze multimateriałowej. Wykonano szereg próbek poddawanych następnie badaniom wytrzymałościowym. Kształt i

wymiary próbek były zgodne z normą PN-EN ISO 527:1998, pt. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu* [8]. Kształt i wymiary próbki, zwanej w normie kształtką, przyjęto zgodnie z zaleceniami normy (rys. 3, tabela 1). W przypadku kształtek obrabianych mechanicznie typ próbki określa się jako B1.



Rys. 3. Kształtka uniwersalna

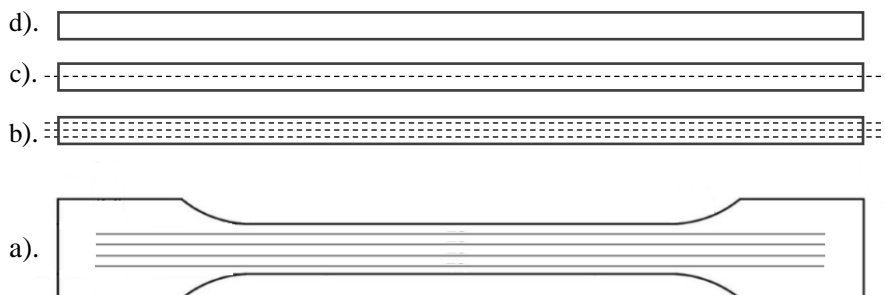
Źródło: opracowanie na podstawie normy PN-EN ISO 527:1998

Tab. 1. Wymiary kształtki

Wymiary kształtki – Typ B1		mm
L3 – długość całkowita		150
L1 – długość części ograniczonej liniami		40
R – promień		60
L2 – odległość między szerokimi równoległe usytuowanymi częściami		106
B2 – szerokość na końcach		20
B1 – szerokość wąskiej części		10
H – zalecana grubość		4
L0 – długość pomiarowa		50
L – początkowa odległość między uchwytami		115

Źródło: opracowanie na podstawie normy PN-EN ISO 527:1998

Model graficzny kształtki wykonano przy pomocy programu SolidWorks, w którym utworzono plik w formacie STL. Jest to format niezbędny do stworzenia w programie ACSON2 tzw. g-kodu, czyli kodu maszynowego sterującego drukarką 3D w technologii FDM. Drukowanie kształtek z materiału ABS w kolorze czerwonym odbywało się na drukarce 3D Touch firmy 3D Systems.



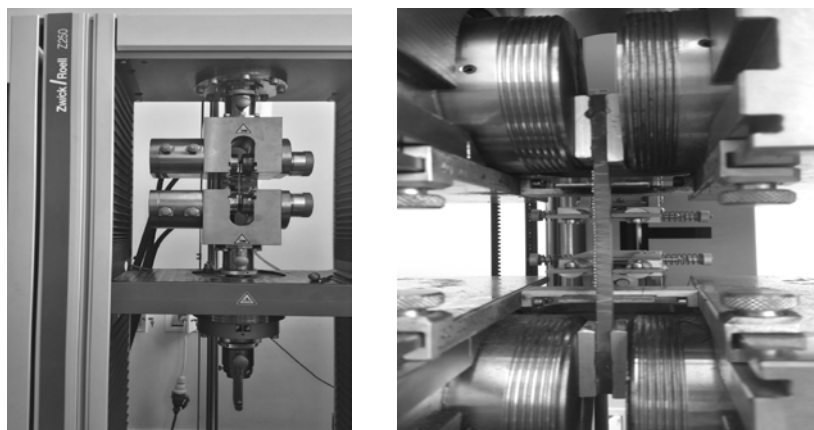
Rys. 4. Kształtka uniwersalna – układ włókien, źródło: opracowanie własne

Wykonano trzy rodzaje próbek (kształtek) różniące się ilością włókien szklanych tworzących strukturę kompozytu. Włókna układane były w warstwach na płaszczyznach podziału. W każdej warstwie umieszczano po cztery włókna (rys. 4a). Stosowane włókna pochodziły z tkaniny szklanej. Nie były więc to pojedyncze włókna, takie jak przykładowo stosowane są w światłowodach. Były to natomiast wiązki bardzo cienkich włókien splecionych pomiędzy sobą w nieuporządkowany sposób. Grubość włókien i wiązek nie była mierzona, jednak była znacznie mniejsza od grubości pojedynczej warstwy nakładanej w procesie drukowania. Przy wykonywaniu próbek grubość nakładanych warstw wynosiła 0,2 mm.

Pierwszy typ próbki zawierał trzy warstwy włókien na trzech równoległych płaszczyznach podziału (rys. 4b). Drugi typ (rys. 4c) zawierał jedną warstwę ułożoną na jednej płaszczyźnie podziału. Wykonano także próbki z samego tworzywa ABS bez wzmocnienia włóknem szklanym (rys. 4d). Technika drukowania była podobna do tej, opisanej dla nakrętki motylkowej i gniazda śrubowego. W pierwszym etapie drukowano warstwę do pierwszej płaszczyzny podziału. Wstrzymywano drukowanie i układano włókna. Następnie wznowiano proces drukowania aż do kolejnej płaszczyzny podziału. Ostatnią warstwę drukowano do momentu osiągnięcia końcowej grubości próbki.

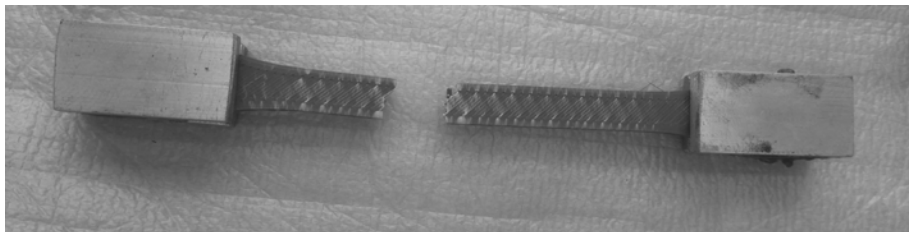
5. Badania wytrzymałościowe

Próbki poddano badaniom wytrzymałościowym w klasycznej próbie rozciągania, która jest jednym z podstawowych źródeł informacji o mechanicznych właściwościach materiałów. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z250 (rys. 5).



Rys. 5. Badania wytrzymałościowe
Źródło: opracowanie własne

Próbki poddawano jednoosiowym odkształceniom (rozciąganie) ze stałą prędkością, z jednoczesnym pomiarem siły, aż do momentu zerwania (rys.6). Końcówki próbek wzmocniano dodatkowymi aluminiowymi nakładkami, co zabezpieczało przed uszkodzeniem przy mocowaniu w szczękach maszyny wytrzymałościowej.

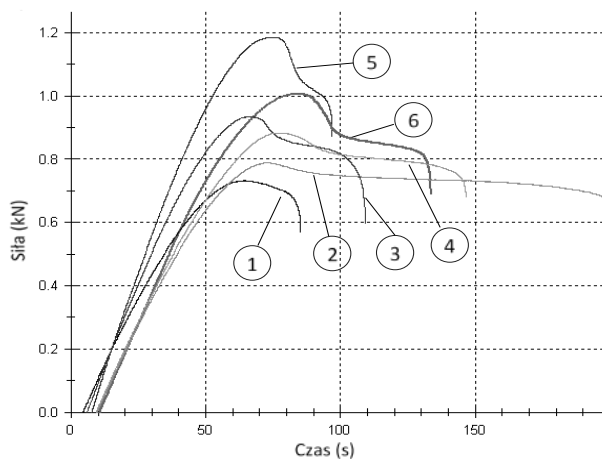


Rys. 6. Próba po zerwaniu
Źródło: opracowanie własne

Ponieważ były to badania wstępne, to próbę rozciągania przeprowadzono jedynie na sześciu kształtkach:

- dwie kształtki bez wzmocnienia,
- dwie kształtki z jedną warstwą wzmocnienia,
- dwie kształtki z trzema warstwami wzmocnienia.

Otrzymane wyniki w postaci graficznej pokazano na rysunku 7. Są to zależności siły rozciągającej od czasu, w postaci uzyskanej z maszyny wytrzymałościowej. Uwzględniając, że prędkość rozciągania wynosiła 2 mm/min, można określić odpowiednie odkształcenia. Rozciąganie rozpoczyna się po pewnym czasie od włączenia maszyny, co powoduje, że wykresy nie zaczynają się w początku układu współrzędnych (punkt 0,0). Wartości tego opóźnienia, różne dla kolejnych realizacji procesu rozciągania, były uwzględniane przy wyznaczaniu odkształceń. Na rysunku oznaczono numery badań, przyporządkowując wykresy do danych liczbowych zamieszczonych w tabeli 2.



Rys. 7. Wyniki próby rozciągania
Źródło: opracowanie własne

Poszczególne kolumny w tabeli dotyczą następujących wielkości obliczanych przez program sterujący pracą maszyny wytrzymałościowej, wynikających z próby rozciągania:

- $R_{p0,2}$ – umowna granica plastyczności,
- R_m – wytrzymałość na rozciąganie,

Tab. 2. Wyniki próby rozciągania

Nr	Liczba warstw	R _{p 0,2} Mpa	R _m Mpa	F _m kN	A _{gt (korr.)} %
1	0	14	15	0,73	1,30
2	0	14	16	0,79	1,44
3	1	17	19	0,93	1,64
4	1	17	18	0,88	1,54
5	3	22	24	1,19	1,65
6	3	18	20	1,01	1,87

Źródło: Opracowanie własne

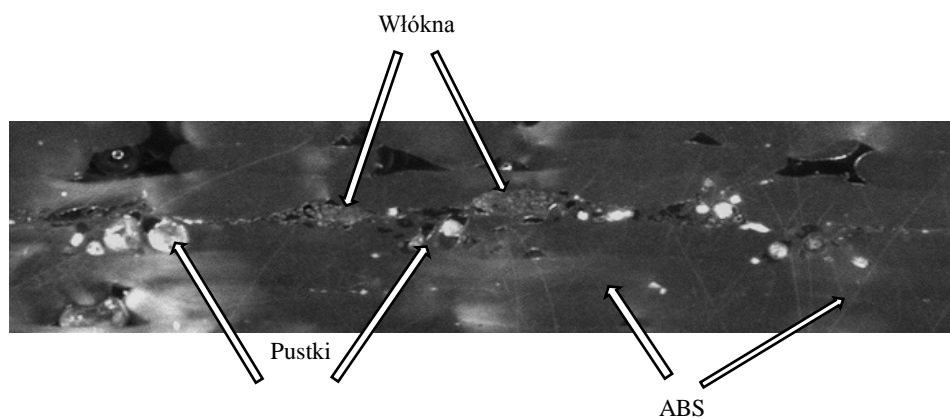
F_m – maksymalna siła przy rozciąganiu,

A_{gt (korr.)} – wydłużenie całkowite przy maksymalnej sile (w procentach).

Przedstawione wyniki pokazują, że otrzymane kompozyty odznaczają się lepszymi własnościami wytrzymałościowymi od próbek wykonanych bez wzmacniania włóknami. Wzrost wytrzymałości zależy od liczby włókien wprowadzonych do próbki. Badania były przeprowadzane dla bardzo małej liczby próbek, stąd należy je traktować jako orientacyjne, bez wyciągania wniosków o charakterze ilościowym.

6. Badania mikroskopowe struktury

Wykonane kształtki były także badane w aspekcie uzyskiwanej struktury. Były to badania przekrojów poprzecznych z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Multipurpose Nikon AZ100. Badaniu poddano kształtki po zerwaniu w próbie rozciągania. Z każdej badanej kształtki wycięto po dwa pięciomilimetrowe fragmenty, które następnie zatopiono w żywicy termoutwardzalnej, co ułatwia manipulowanie pod mikroskopem. Na rysunku 8 pokazano fragment przekroju jednej z badanych kształtek w 20-krotnym powiększeniu.



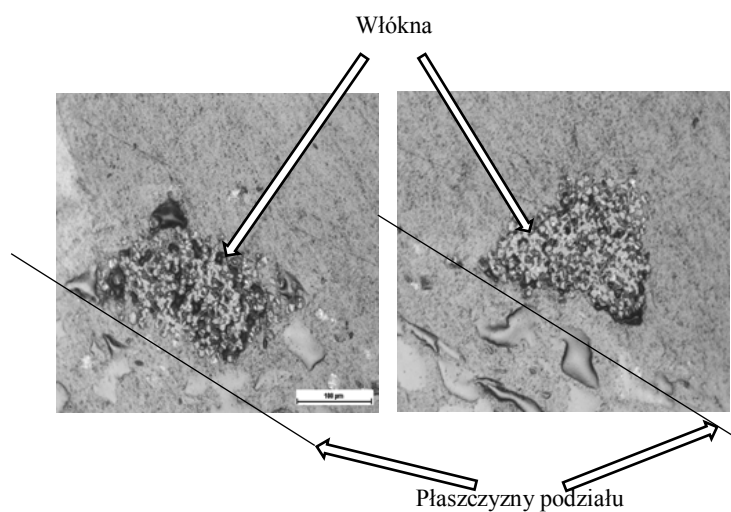
Rys. 8. Obraz pod mikroskopem – powiększenie 20x

Źródło: opracowanie własne

Na powyższym rysunku widoczne są obszary, w których znajdują się wiązki włókna szklanego tworzące strukturę kompozytową. Widoczne są także miejsca puste (bez tworzywa ABS) powstające w procesie wydruku. Miejsca takie powstają także w kształtkach bez włókien szklanych, są one wynikiem stosowanej technologii druku FDM. Tak więc, dla zapewnienia pełnej ciągłości należy modyfikować parametry druku, a w tym przypadku: prędkość przesuwu głowicy, grubość warstwy, odległość pomiędzy kolejnymi

przejściami oraz temperaturę. W tym celu konieczna jest ingerencja w program sterujący wydrukiem, co nie zawsze jest możliwe ze względu na brak dostępności do kodów źródłowych.

Na rysunku 9 pokazano dwie przykładowe wiązki włókna szklanego w 200-krotnym powiększeniu. Zaznaczono także położenie płaszczyzn podziału, dla których proces drukowania był przerywany i wznawiany. Obserwacja uzyskanych obrazów wskazuje, że włókna są dobrze zatopione w tworzywie ABS.



Rys. 9. Obraz pod mikroskopem – powiększenie 200x
Źródło: opracowanie własne

Badania mikroskopowe pokazują strukturę kompozytu uzyskiwanego metodą druki 3D z wykorzystaniem technologii FDM. Wyniki wydają się być zadowalające, jednak należy brać pod uwagę pewne przekłamania wynikające ze sposobu przygotowania przekrojów do badań mikroskopowych. W przedstawianych przykładach kształtki były cięte piłą mechaniczną, co może wpływać na uzyskiwany obraz.

7. Podsumowanie

Technikę wytwarzania kompozytów z wykorzystaniem drukarki 3D można uznać za innowacyjne rozwiązanie [9]. Jest to próba zmiany właściwości wytrzymałościowych drukowanych obiektów, tak aby pełniły one nie tylko rolę prototypów odwzorowujących kształt, ale stanowiły użytkowe elementy maszyn i urządzeń. W pracy pokazano tylko przykłady wykorzystania technologii FDM. Rozwijanie tej innowacyjnej metody powinno dotyczyć także innych technologii druku 3D.

Przedstawiona technika wytwarzania wyrobów o strukturze kompozytowej jest jeszcze w początkowym stadium rozwoju. Można ją odnieść do wykorzystywanej obecnie w Unii Europejskiej skali rozwoju technologii TRL (*Technology readiness levels*), nazywanej oceną gotowości technologicznej. Skala ta określa 9 następujących poziomów rozwoju technologii, które dla analizowanej koncepcji tworzenia kompozytów można przedstawić następująco [10, 11]:

- Poziom 1 – Znana jest koncepcja i zasady działania kształtowania przyrostowego w tworzeniu struktury kompozytowej z wykorzystaniem drukarek 3D. Znany jest

także sposób praktycznego wykorzystania technologii i koncepcja jej komercjalizacji.

- Poziom 2 – Sformułowana jest koncepcja technologii, zgodnie z którą wyroby będą wytwarzane w formie kompozytu z zastosowaniem techniki przyrostowej. Wykonywany jest projekt testowych wyrobów z uwzględnieniem analiz wytrzymałościowych.
- Poziom 3 – Przeprowadzono eksperymentalnie dowód na słuszność koncepcji wykonania wyrobów w formie kompozytu o różnej strukturze warstw włókna szklanego. Opracowano efektywny sposób układania włókien na płaszczyznach podziału.
- Poziom 4 – Przeprowadzono walidację koncepcji w warunkach laboratoryjnych poprzez badania na kilku wyrobach budowanych z wykorzystaniem różnych struktur kompozytowych. Mierzono własności wytrzymałościowe wykonanych egzemplarzy wyrobu.
- Poziom 5 – Wykonano serię wyrobów o zróżnicowanych parametrach wymiarowych z zastosowaniem różnej struktury kompozytu. Wyposażono program sterujący drukarką 3D w interfejs pozwalający na wstrzymywanie i wznowianie druku na płaszczyznach podziału.
- Poziom 6 – Zaprezentowano działanie prototypu technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W tym celu wykonano przykładowe wyroby z doбором parametrów wymiarowych do rzeczywistych potrzeb klientów, co wymagało opracowania metodyki doboru.
- Poziom 7 – przeniesiono technologię z warunków laboratoryjnych do warunków operacyjnych, czyli wykonano prototypy wyrobów na drukarkach 3D będących na wyposażeniu przedsiębiorstwa, przez przeszkolonych pracowników. Zbadano właściwości wytrzymałościowe wybranych egzemplarzy wykonanych w tych warunkach.
- Poziom 8 – Pracownicy przedsiębiorstwa wykonali kilka egzemplarzy wyrobów dla klientów. Uwzględniono uwagi klientów odnośnie parametrów i sposobu realizacji zamówień.
- Poziom 9 – Działająca technologia została sprawdzona w warunkach operacyjnych z pozytywnym wynikiem. Przedsiębiorstwo rozpoczęło działalność produkcyjno-usługową z wykorzystaniem innowacyjnej technologii tworzenia kompozytów w formie wydruków 3D metodą FDM.

W koncepcji oceny gotowości technologii TRL nie są uwzględniane zagadnienia ekonomiczne, prawne i organizacyjne. Ocena gotowości technologicznej skupia się głównie na możliwościach technicznych na etapie badawczym i operacyjnym w aspekcie możliwości zastosowań praktycznych. Oddzielnym zagadnieniem jest ocena potencjału komercjalizacyjnego, która uwzględnia zagadnienia ekonomiczne, prawne i organizacyjne.

Przedstawione przykłady wytwarzania kompozytów z wykorzystaniem drukarek 3D wskazują na drugi lub trzeci poziom według TRL. Konieczne są więc jeszcze szerokie badania, których efektem będzie zastosowanie praktyczne tego sposobu wytwarzania. Planowane badania mogą dotyczyć optymalizacji rozkładu płaszczyzn podziału, oraz ilości umieszczonych na nich włókien. Drugim obszarem planowanych badań jest zagadnienie rodzaju włókien tworzących kompozyt i sposobu ich układania na płaszczyznach podziału. Kolejnym problemem badawczym jest tworzenie kompozytów w innych technologiach druku 3D, nie tylko FDM. Do tego należy jeszcze dołączyć prace usprawniające proces wstrzymywania i wznowiania druku na płaszczyznach podziału. Wyniki tak rozległych

badań mogą sprawić, że kompozyty wykonywane przy pomocy drukarek 3D będą komercjalizowane, a w wyniku efektywnie wykorzystywane w systemach produkcyjnych. Wskazane kierunki badań są elementem przedstawionej drogi rozwoju technologii w ujęciu TRL.

Także pierwszy z przedstawionych przykładów tworzenia elementów wielomateriałowych (obudowa tworzywem innych elementów) zasługuje na kontynuację badań. Może być to sposób jednostkowego wytwarzania elementów lub technologia realizująca określone zadania w systemach produkcyjnych.

Literatura

1. Kaczmarek B., Michta D.: Wielomateriałowe elementy wytwarzane w technice 3D, w: Techniczne wyzwania rozwoju społeczno-gospodarczego kraju i regionów, Monografie, Studia, Rozprawy, Nr M79, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2016, s. 32-41
2. <http://3d-spot.pl/technologie-druku-3/> (dostęp 15.11.2016)
3. <http://www.taniaksiazka.pl/ido3d-delux-8-dlugopis-ow-3d-p-607247.html> (dostęp 15.11.2016)
4. <http://cr3d.pl/sklep/dlugopis-3d/3doodler-reczna-drukarka-3d/> (dostęp 15.11.2016)
5. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Filament> (dostęp 10.12.2016)
6. Ozimina D., Madej M.: Tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2015
7. Bakar M.: Właściwości mechaniczne polimerów, Politechnika Radomska, Radom 2009
8. PN-EN ISO 527:1998 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu
9. Knosala R., Boratyńska-Sala A., Jurczyk-Bunkowska M., Moczala A.: Zarządzanie innowacjami, PWE Warszawa 2014.
10. Kaczmarek B., Gierulski W., Bochnia J., Ocena gotowości technologii jako element procesu komercjalizacji, w: Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, (red.) Knosala R., Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2015, s. 104-115
11. <http://lctt.pollub.pl/uploads/2014%2011%2021%20PREZENTACJA%20RPK.PDF> (dostęp 5.01.2017)

Mgr inż. Dagmara MICHTA – doktorantka
Politechnika Świętokrzyska
e-mail: dagmara.michta@op.pl

Dr hab. inż. Bożena KACZMARSKA
Dr hab. inż. Wacław GIERULSKI, prof. PŚk
Dr inż. Artur Szmidt
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
e-mail: bozena.kaczmarska@tu.kielce.pl
waclaw.gierulski@tu.kielce.pl
szmidt@tu.kielce.pl