

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH**

**Wydział Mechaniczny Technologiczny**



*mgr inż. Grzegorz Florek*

## **PRACA DOKTORSKA**

*Nowe metody poprawy więzi międzywarstwowej w produktach  
z tworzyw i kompozytów polimerowych  
wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM*

Promotor:

dr hab. inż. Józef Stabik Prof. Pol. Śl.

Kędzierzyn-Koźle, 2024

*Podziękowania:*

*Dziękuję firmie EMT-Systems z Gliwic, za udostępnienie laboratorium pomiarowego.*

*Dziękuję firmie Solvay (obecnie Syensqo), która dostarczyła filamenty PEEK do badań.*

*Serdecznie dziękuję Panu Profesorowi dr hab. Andrzejowi Puszowi, za wsparcie podczas przeprowadzanych badań wytrzymałościowych.*

*Pragnę wyrazić szczególne podziękowania mojemu **Promotorowi, Panu dr hab. inż. Józefowi Stabikowi, Prof. Pol. Śl.**, za niezastąpioną pomoc, ogrom poświęconego mi czasu oraz nadzwyczajną cierpliwość, które okazały się bezcenne w procesie realizacji niniejszej pracy. Pańskie zaangażowanie, wszechstronna wiedza i gotowość do udzielenia wsparcia na każdym etapie pracy będą dla mnie źródłem inspiracji i motywacji.*

## **Spis treści**

1. WSTĘP .....	5
2. CEL I ZAKRES PRACY .....	7
3. STUDIUM LITERATUROWE .....	9
3.1 Wprowadzenie do drukowania 3D .....	10
3.2 Metody drukowania 3D .....	12
3.2.1 Wytłaczanie materiału .....	13
3.2.2 Fotopolimeryzacja kadziowa .....	14
3.2.3 Warstwowe spiekanie proszku .....	15
3.2.4 Natryskiwanie spoiwa .....	17
3.2.5 Laminowanie arkuszy .....	19
3.2.6 Natryskiwanie materiału .....	20
3.2.7 Osadzanie materiału z wykorzystaniem energii skupionej .....	22
3.3 Drukowanie 3D metodą FDM .....	25
3.3.1 Zasady działania technologii FDM .....	25
3.3.1.1 Procesy termiczne i mechaniczne w FDMF .....	25
3.3.1.2 Wytłaczanie materiałów polimerowych .....	27
3.3.1.3 Etapy przetwarzania modeli cyfrowych na fizyczne .....	28
3.3.2 Materiały polimerowe stosowane w drukowaniu metodą FDM .....	31
3.3.2.1 Najczęściej stosowane materiały polimerowe w FDM .....	32
3.3.2.2 Techniczne materiały polimerowe stosowane w FDM .....	35
3.3.2.3 Materiały polimerowe stosowane w medycynie w FDM .....	38
3.3.2.4 Funkcyjne materiały polimerowe do druku FDM .....	40
3.3.3 Parametry technologiczne i optymalizacja procesu FDM .....	44
3.3.3.1 Podstawowe parametry drukowania metodą FDM .....	44
3.3.3.2 Programowa optymalizacja procesu drukowania FDM .....	48
3.3.3.3 Rola kondycjonowania filamentu w technologii FDM .....	50
3.3.4 Wyzwania i ograniczenia technologii FDM .....	53
3.3.5 Zastosowania technologii FDM .....	56
3.3.5.1 Prototypowanie .....	56
3.3.5.2 Produkcja części funkcjonalnych .....	57
3.3.5.3 Zastosowania medyczne .....	57
3.3.5.4 Zastosowania w przemyśle lotniczym i kosmicznym .....	58
3.3.5.5 Zastosowania w przemyśle naftowym i gazowym .....	58
3.3.5.6 Zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym .....	59
3.3.5.7 Inne zastosowania technologii FDM .....	59
3.4 Techniki poprawy adhezji międzywarstwowej w drukowaniu metodą FDM .....	60
3.4.1 Teorie adhezji i ich znaczenie w drukowaniu 3D .....	60
3.4.1.1 Mechaniczna teoria adhezji .....	61
3.4.1.2 Elektrostatyczna teoria adhezji .....	62
3.4.1.3 Dyfuzyjna teoria adhezji .....	63
3.4.1.4 Fizyczno-chemiczna teoria adhezji .....	64
3.4.1.5 Znaczenie adhezji w drukowaniu 3D .....	64
3.4.2 Modyfikowanie powierzchni .....	65
3.4.2.1 Plazmowe modyfikowanie powierzchni .....	65
3.4.2.2 Chemiczne modyfikowanie powierzchni .....	66
3.4.3 Dodawanie środków adhezyjnych .....	67
3.4.3.1 Polimery adhezyjne .....	67

3.4.3.2 Nanocząstki jako środki adhezyjne -----	68
3.4.4 Optymalizacja parametrów procesu drukowania -----	69
3.4.4.1 Zmiana temperatury dyszy -----	69
3.4.4.2 Zmiana prędkości drukowania -----	71
3.4.5 Techniki podgrzewania międzywarstwowego -----	72
3.4.5.1 Podgrzewanie promieniowaniem IR -----	72
3.4.5.2 Podgrzewanie mikrofalowe -----	73
3.4.5.3 Podgrzewanie laserowe -----	74
3.4.5.4 Podgrzewanie konwekcyjne -----	75
3.4.6 Drukowanie FDM w kontrolowanej atmosferze -----	76
3.4.6.1 Drukowanie w atmosferze gazów obojętnych -----	78
3.4.6.2 Drukowanie w atmosferze gazów aktywnych -----	78
3.4.6.3 Drukowanie w próżni -----	79
3.4.6.4 Drukowanie w warunkach wysokiego ciśnienia -----	80
3.5 Podsumowanie i teza pracy -----	82
4. PRACA WŁASNA -----	83
4.1 Program prac własnych -----	83
4.2 Nowe koncepcje drukowania 3D FDM -----	87
4.3 Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą -----	89
4.3.1 Opis procesu technologicznego -----	90
4.3.2 Konstrukcja drukarki 3D z głowicą rotującą -----	92
4.3.3. Przebieg badań weryfikacyjnych -----	100
4.4 Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym ----	112
4.4.1 Modernizacja drukarki -----	112
4.4.2 Przebieg badań weryfikacyjnych -----	118
4.5 Technologia drukowania 3D z górną płytą grzejną [570] -----	123
4.5.1 Opis procesu technologicznego -----	123
4.5.2 Konstrukcja drukarki 3D z górną płytą grzejną -----	127
4.6 Przebieg badań głównych -----	136
4.6.1 Dobór materiału do badań -----	136
4.6.2 Metodyka badań -----	137
4.6.3 Plan badań weryfikacyjnych technologii drukowania 3D -----	141
z górną płytą grzejną	
4.6.4 Wyniki badań i ich analiza -----	146
4.6.5 Analiza statystyczna wyników badań -----	152
4.6.6 Analiza merytoryczna wyników badań -----	157
5. PODSUMOWANIE -----	167
6. WNIOSKI KOŃCOWE -----	169
Spis literatury -----	172
Streszczenie -----	206
Abstract -----	207

## **1. WSTĘP**

Produkcja addytywna, znana również jako wytwarzanie przyrostowe czy drukowanie 3D, stała się jedną z najbardziej rewolucyjnych metod wytwarzania części. Metoda ta umożliwia tworzenie od prostych prototypów po w pełni funkcjonalne i często bardzo złożone elementy, takie jak struktury szkieletowe czy komórkowe, które są niemożliwe do wykonania innymi technikami. Drukowanie 3D obejmuje modelowanie medyczne, wytwarzanie implantów, drukowanie tkankowe, a także tworzenie nanostrukturalnych materiałów. Zakres zastosowań druku 3D jest szeroki, obejmujący, między innymi, edukacyjne pisaki 3D dla dzieci, szerokie zastosowanie przez użytkowników domowych, niemal wszystkie dziedziny przemysłu, aż po technologię kosmiczną. Zalety drukowania 3D to bardzo krótki czas od projektu do wytworzenia gotowej części, brak potrzeby korzystania z drogich maszyn i oprzyrządowania, możliwość łatwej korekty i optymalizacji kształtu prototypu, niski koszt wyprodukowania jednostkowego komponentu, możliwość szybkiego wyprodukowania części na żądanie oraz łatwość tworzenia części specjalnych i spersonalizowanych.

Drukowanie 3D metodą wytłaczania filamentów polimerowych, zwykle określane jako FFF (Fused Filament Fabrication – wytwarzanie przyrostowe przy użyciu topionego filamentu), znane również pod nazwą handlową FDM (Fused Deposition Modeling – modelowanie przez osadzanie topionego materiału), jest najczęściej stosowaną techniką wytwarzania przyrostowego. W kontekście technologii druku 3D, filament jest terminem powszechnym w środowisku branżowym i literaturze, określającym materiał, zazwyczaj polimerowy, w postaci ciągłej żyłki, używany jako surowiec. Filament jest wprowadzany do głowicy drukującej, gdzie jest topiony i precyzyjnie nakładany warstwa po warstwie, tworząc trójwymiarowy obiekt. Popularność tej metody wynika z jej prostoty, dostępności i szerokiego wyboru materiałów eksploatacyjnych.

Pomimo swoich licznych zalet, drukowanie 3D metodą FDM ma również pewne wady. Proces ten charakteryzuje się niższą precyzją i gorszą jakością powierzchni w porównaniu z innymi technikami drukowania 3D, co wynika z warstwowej natury wydruków i może prowadzić do widocznych linii warstwowych. Anizotropia właściwości mechanicznych może ograniczać zastosowanie drukowanych części w wymagających konstrukcjach. Dodatkowo, proces drukowania FDM bywa czasochłonny, zwłaszcza przy wysokiej rozdzielczości, a konieczność stosowania struktur podporowych dla złożonych geometrii zwiększa zużycie materiału i wymaga dodatkowej obróbki po zakończeniu druku. Ograniczona przestrzeń robocza

drukarek FDM utrudnia wytwarzanie większych komponentów, a kontrola jakości i powtarzalność procesu mogą stanowić wyzwanie przy produkcji seryjnej.

Technologia FDM została opracowana w latach 80. XX wieku przez Scotta Crumpa, który założył firmę Stratasys. Od tego czasu technologia ta przeszła długą drogę rozwoju, stając się jedną z najbardziej popularnych metod druku 3D na świecie. Wczesne wersje drukarek FDM były stosunkowo proste, ale postęp technologiczny umożliwił wprowadzenie zaawansowanych funkcji, takich jak podgrzewane komory czy drukowanie wielomateriałowe.

Materiały polimerowe stosowane w technologii FDM, w tym zarówno czyste polimery, kompozycje polimerów jak i kompozyty wzmocnione włóknami, odgrywają kluczową rolę w określaniu właściwości mechanicznych drukowanych elementów. W ostatnich latach można zaobserwować szczególnie intensywny wzrost zainteresowania wytwarzaniem addytywnym z użyciem tworzyw polimerowych o dużej wytrzymałości, takich jak polieteroeteroketon (PEEK), ze względu na ich wyjątkowe parametry wytrzymałościowe oraz unikalne właściwości chemiczne i termiczne. PEEK, będący częściowo krystalicznym termoplastem, charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością na działanie chemikaliów oraz wysoką temperaturą topnienia, co czyni go odpowiednim materiałem do zastosowań w dziedzinach gdzie występują trudne warunki eksploatacyjne, takich jak medycyna, lotnictwo czy przemysł naftowy. Unikalne cechy PEEK-u, takie jak biokompatybilność, odporność na chemicznie agresywne środowisko organizmu człowieka oraz przezierność w obrazowaniu medycznym, predestynują go do zastosowań biomedycznych.

Jednym z kluczowych wyzwań w technologii FDM jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej drukowanych elementów. Powszechnie obserwuje się najmniejszą wytrzymałość w kierunku prostopadłym do powierzchni kolejno drukowanych warstw. Wytrzymałość ta jest silnie zależna od więzi międzywarstwowych, czyli sił, z jakimi kolejne warstwy materiału łączą się ze sobą podczas procesu drukowania. Słabe więzi międzywarstwowe mogą prowadzić do defektów strukturalnych, zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie oraz zginanie, a także do przedwczesnego uszkodzenia elementów w trakcie ich eksploatacji. W literaturze naukowej można znaleźć różne metody mające na celu poprawę więzi międzywarstwowych w technologii FDM. Do najczęściej badanych należą zmiany parametrów drukowania, takie jak zwiększenie temperatury drukowania, zmniejszenie prędkości drukowania oraz zastosowanie różnych metod modyfikacji powierzchni, takich jak plazmowe modyfikacje powierzchni, chemiczne środki adhezyjne oraz zastosowanie promieniowania podczerwonego.

---

## **2. CEL I ZAKRES PRACY**

Należy zauważyć, że dynamiczny rozwój technologii druku 3D metodą FDM stawia przed badaczami wyzwanie związane z ograniczoną dostępnością aktualnej literatury naukowej w tym obszarze. Wiele dostępnych publikacji nie nadąża za tempem innowacji, w szczególności w zakresie nowych metod poprawy więzi międzywarstwowej drukowanych części. Większość nowych rozwiązań w jest w pierwszej kolejności opisywana w patentach a później prezentowana jest w literaturze technicznej i naukowej. Brak kompleksowych opracowań literaturowych dotyczących najnowszych osiągnięć wymusza na badaczach konieczność samodzielnego eksperymentowania w celu rozwiązania złożonych problemów technologicznych.

W niniejszej pracy, bazując na analizie dostępnej literatury, zaprezentowane zostaną w pierwszej części najważniejsze osiągnięcia w dziedzinie drukowania metodami przyrostowymi. Szczegółowo opisana zostanie technologia drukowania 3D FDM (Fused Deposition Modeling), gdyż to ta odmiana druku 3D jest objęta zakresem badań własnych. W drugiej części pracy przedstawione zostaną innowacje technologiczne druku 3D FDM opracowane przez autora dysertacji. Innowacje te mają na celu zwiększanie wytrzymałości części z tworzyw polimerowych oraz ich kompozytów, wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM, poprzez poprawę więzi międzywarstwowej. Analizowany będzie wpływ różnych parametrów procesu drukowania, takich jak temperatura i prędkość wytłaczania oraz grubość i szerokość drukowanej warstwy, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów rozkładu temperatur w obszarze drukowanych części, takich jak temperatura wytłaczania, temperatura komory grzewczej oraz temperatura nadmuchu powietrza osłonowego na wierzchnią warstwę wytwarzanego elementu. Ponadto przedstawione zostaną innowacyjne metody modyfikacji powierzchni, takie jak podgrzewanie warstwy wierzchniej wiązką lasera oraz wprowadzenie ruchu oscylacyjnego dyszy drukarki w celu zwiększenia więzi międzywarstwowej. Prezentowane badania przeprowadzono na prototypowych urządzeniach własnej konstrukcji, porównując wyniki z próbkami wykonanymi z tych samych materiałów polimerowych na konwencjonalnych drukarkach 3D, co pozwoli na dokładną analizę wpływu nowych metod na właściwości mechaniczne drukowanych elementów.

Celem badawczym niniejszej pracy doktorskiej jest przyczynienie się do rozwoju technologii druku 3D poprzez opracowanie innowacji technologicznych umożliwiających wytwarzanie części o lepszych właściwościach mechanicznych i większej trwałości. Ma to

---

fundamentalne znaczenie dla szerokiego zakresu zastosowań przemysłowych. W pracy szczególna uwaga będzie poświęcona innowacyjnemu rozwiązaniu, będącemu przedmiotem patentu autora pracy, jakim jest zastosowanie płyty grzewczej jako elementu środowiska spajania elementów, która umożliwi precyzyjną kontrolę temperatury w wytwarzanym modelu podczas procesu drukowania FDM. Przeprowadzone badania mają na celu potwierdzenie skuteczności proponowanych metod i uzasadnienie potrzeby dalszych badań w tym kierunku. Za cel użyteczny pracy przyjęto wskazanie możliwych kierunków zastosowań opracowanych modyfikacji technologii drukowania. Ocenie poddane zostanie też działanie prototypowych drukarek, zaprojektowanych i wykonanych w ramach pracy



### **3. STUDIUM LITERATUROWE**

Niniejsze studium literaturowe ma na celu przedstawienie kompleksowej analizy technologii drukowania 3D, ze szczególnym uwzględnieniem metody Fused Deposition Modeling (FDM). Rozpoczynając od ogólnego wprowadzenia do druku 3D, praca systematycznie omawia różne metody wytwarzania przyrostowego, takie jak wytłaczanie materiału, fotopolimeryzacja kadziowa czy warstwowe spiekanie proszku. Taki szeroki kontekst pozwala na zrozumienie miejsca i znaczenia technologii FDM wśród innych dostępnych metod druku 3D.

W dalszej części skupiono się na szczegółowym omówieniu technologii FDM, w tym jej zasad działania, procesów termicznych i mechanicznych oraz etapów przetwarzania modeli cyfrowych na fizyczne obiekty. Analiza materiałów polimerowych stosowanych w FDM, zarówno tych najczęściej używanych, jak i zaawansowanych technicznie oraz specjalistycznych, podkreśla różnorodność i potencjał aplikacyjny tej metody. Uwzględniono również materiały dedykowane zastosowaniom medycznym, co odzwierciedla rosnące znaczenie druku 3D w biotechnologii i medycynie. Kolejne rozdziały poświęcono parametrom i optymalizacji procesu FDM, gdzie omówiono podstawowe parametry drukowania, programowe metody optymalizacji oraz rolę kondycjonowania filamentu. Zrozumienie tych aspektów jest istotne dla poprawy jakości wydrukowanych części i efektywności procesu. Identyfikacja wyzwań i ograniczeń technologii FDM oraz ich krytyczna analiza pozwala na świadome podejście do implementacji tej metody w różnych gałęziach przemysłu. W kontekście praktycznych zastosowań technologii FDM, praca prezentuje jej wykorzystanie w prototypowaniu, produkcji części funkcjonalnych oraz w sektorach takich jak medycyna, przemysł lotniczy, kosmiczny, naftowy i motoryzacyjny. Wskazano również na inne obszary, gdzie FDM znajduje zastosowanie, podkreślając jej wszechstronność i potencjał innowacyjny. Kluczowym elementem studium jest analiza technik poprawy adhezji międzywarstwowej w drukowaniu metodą FDM. Poprzez omówienie różnych teorii adhezji i ich znaczenia w druku 3D, takich jak mechaniczna, elektrostatyczna, dyfuzyjna czy fizyczno-chemiczna, praca podkreśla wagę tego zagadnienia dla wytrzymałości i trwałości wydruków. Szczegółowo opisano metody modyfikacji powierzchni, dodawania środków adhezyjnych, optymalizacji parametrów procesu, drukowania w kontrolowanej atmosferze oraz techniki podgrzewania międzywarstwowego.

Włączenie poszczególnych działów jest uzasadnione dążeniem do kompleksowego ujęcia tematu oraz pozwala na zrozumienie obecnego stanu wiedzy w zakresie drukowania 3D

---

metodą FDM, co jest niezbędne dla opracowania innowacyjnych rozwiązań w zakresie poprawy jakości i funkcjonalności części drukowanych z tworzyw polimerowych.

### **3.1. Wprowadzenie do drukowania 3D**

Drukowanie 3D to potoczna nazwa procesu wytwarzania przyrostowego (ang. AM - additive manufacturing), który polega na tworzeniu obiektów trójwymiarowych poprzez nakładanie kolejnych warstw materiału [1]. W przemyśle funkcjonuje także określenie szybkiego prototypowania (RP - rapid prototyping) jako alternatywne dla drukowania 3D, ponieważ pierwotnie technologia ta była najczęściej wykorzystywana do tworzenia prototypów [2]. Obecnie, wraz z rozwojem nauki, technologii materiałów i urządzeń, drukowanie 3D jest używane do produkcji części oraz wielu innych zastosowań [3]. Najbardziej rozpowszechnioną grupą materiałów w wytwarzaniu przyrostowym są materiały polimerowe, które dominują w tej dziedzinie i wykazują dynamiczny rozwój, zwłaszcza w sektorach takich jak biomedycyna, lotnictwo oraz elektronika [4]. Drukowanie 3D jest często omawiane w kontekście IV Rewolucji Przemysłowej [5]. Obecnie technologie wytwarzania przyrostowego wykraczają daleko poza najczęściej spotykane drukowanie 3D tworzyw polimerowych. Techniki te obejmują także części metalowe i ceramiczne, a coraz częściej stosowane są do wytwarzania tkanek biologicznych oraz tworzenia nanostruktur [6]. Do optymalizowania topologii drukowanych przestrzennie struktur wykorzystuje się sztuczną inteligencję [7].

Cechą wspólną wszystkich procesów drukowania 3D jest podejście do produkcji oparte na oprogramowaniu komputerowym. Wytwarzanie przyrostowe obejmuje szereg kroków, które przechodzą od wirtualnych modeli CAD do gotowej części [8]. Modele CAD mogą być tworzone w dowolnym środowisku projektowania przestrzennego, generując bryły lub zespoły powierzchni, które następnie są zapisywane w formacie pliku wymiany. Standardowym formatem jest .STL (stereolitografia - format przedstawiający geometrię przestrzenną w postaci powierzchni utworzonej z zespołu małych trójkątów) [2]. Zazwyczaj producenci drukarek 3D dostarczają własne, specjalistyczne oprogramowanie do dzielenia modelu z pliku wymiany na poszczególne warstwy oraz szczegółowej konfiguracji procesu drukowania 3D, a następnie generują kod maszynowy [1]. Urządzenia drukujące 3D wytwarzają część warstwowo, nanosząc uplastyczniony materiał, spiekając proszek lub sieciując polimer wiązką światła. Wydrukowana

część zwykle wymaga mechanicznej obróbki wykańczającej, która może obejmować takie procesy jak utwardzanie, wyżarzanie, chemiczna obróbka powierzchni czy malowanie [9].

Technologia druku 3D może znacząco obniżyć koszty produkcji w porównaniu do konwencjonalnych metod, eliminując konieczność dużych zapasów surowców i półfabrykatów, redukując koszty robocizny oraz umożliwiając łatwe przemieszczenie drukarki w dowolne miejsce. Jej zaletą w porównaniu z metodami konwencjonalnymi, z racji addytywnego charakteru produkcji, jest znaczne ograniczenie odpadów produkcyjnych [10]. Najczęściej wymieniane zalety drukowania 3D to bardzo krótki czas od projektu do wytworzenia gotowej części, brak potrzeby korzystania z drogich maszyn i oprzyrządowania, możliwość łatwej korekty i optymalizacji kształtu części prototypu, niski koszt wyprodukowania prototypowych części, możliwość szybkiego wyprodukowania części na żądanie oraz łatwość tworzenia części specjalnych i spersonalizowanych. Drukowanie 3D umożliwia wytwarzanie bardziej złożonych części, których wykonanie konwencjonalnymi metodami wymagałoby wyprodukowania i złożenia kilku części lub byłoby w ogóle niemożliwe [11]. Struktura części może być daleko bardziej złożona niż w przypadku konwencjonalnych metod wytwarzania – możliwe jest wytwarzanie struktur szkieletowych lub skorupowych z wypełnieniem szkieletowym w postaci siatki lub struktur komórkowych [12]. Wykorzystanie numerycznych metod optymalizacji kształtu pozwala na zmniejszenie masy części o podobnych właściwościach użytkowych nawet o połowę [13].

Dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii drukowanie 3D znajduje coraz więcej zastosowań przemysłowych i staje się coraz bardziej powszechne [7]. Pomimo swoich wyjątkowych możliwości i zalet w porównaniu z tradycyjnym wytwarzaniem, techniki addytywnego wytwarzania części, zwłaszcza z materiałów polimerowych, mają swoje ograniczenia i wymagają dalszego rozwoju w takich obszarach jak szybkość wytwarzania, gama dostępnych materiałów, powtarzalność właściwości stosowanych materiałów oraz ograniczenie kosztów produkcji [14]. Szczególnie istotne jest poprawienie właściwości mechanicznych wydrukowanych części, które często wykazują anizotropowe właściwości wytrzymałościowe oraz niską odporność na zmęczenie [9].

## **3.2. Metody drukowania 3D**

Intensywny rozwój wielu różnych metod wytwarzania przyrostowego w ostatnich trzech dekadach zaowocował mnogością rozwiązań, z których część wyznaczyła nowe kierunki dalszych badań i innowacji [1]. Każda z metod ma swoje unikalne cechy, zalety i ograniczenia, które wpływają na jej zastosowanie w różnych branżach [15]. Metody te można sklasyfikować na podstawie wielu różnych kryteriów, między innymi biorąc pod uwagę postać tworzywa polimerowego używanego do drukowania 3D:

Technologie bazujące na materiale w postaci ciekłej - wykorzystujące głównie tworzywa polimerowe sieciowane wiązką światła [4].

Technologie bazujące na materiale w postaci stałej - obejmujące wszystkie postacie materiału w stanie stałym z wyjątkiem proszków, takie jak druty, taśmy, arkusze, granulaty czy filamenty (żyłki).

Technologie bazujące na materiale w formie proszku - obejmujące różne techniki łączenia proszków, przede wszystkim stapianie wiązką lasera i selektywne łączenie spoiwami [2].

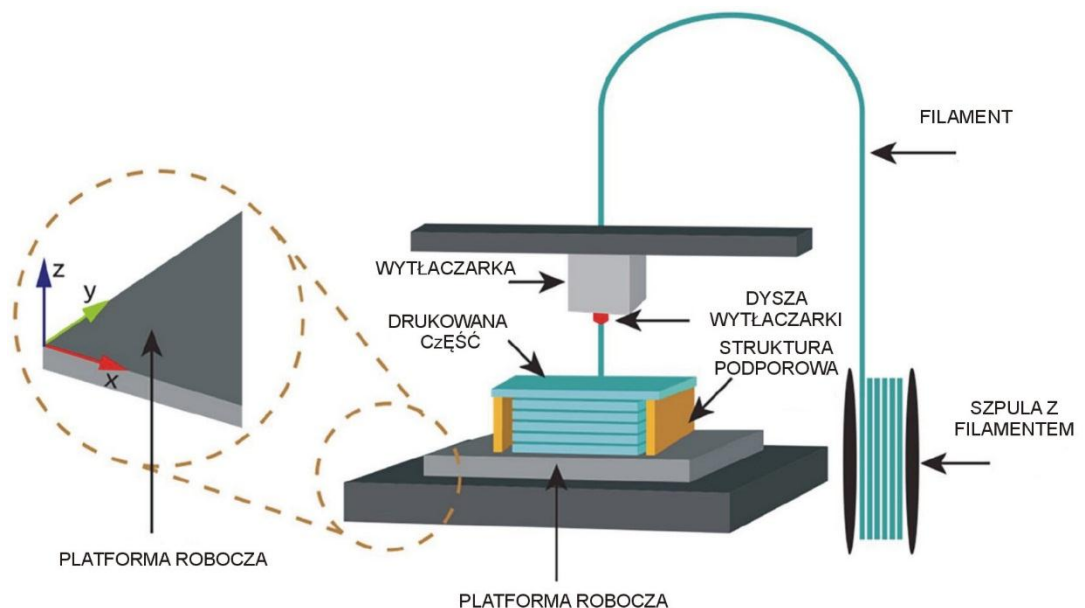
Normy ISO/ASTM PN-EN ISO/ASTM 52900:2022-05 [16] (istnieje wyłącznie wersja angielska) systematyzują terminologię i klasyfikują metody wytwarzania addytywnego na siedem głównych grup:

- Wytłaczanie materiału (ang. material extrusion)
- Fotopolimeryzacja kadziowa (ang. vat photopolymerization)
- Warstwowe spiekanie proszku (ang. powder bed fusion)
- Natryskiwanie spoiwa (ang. binder jetting)
- Laminowanie arkuszy (ang. sheet lamination)
- Natryskiwanie materiału (ang. material jetting)
- Osadzanie materiału z wykorzystaniem energii skupionej (ang. directed energy deposition)

Metoda drukowania 3D przez wytłaczanie materiału techniką FDM stanowi obszar szczególnego zainteresowania niniejszej dysertacji, dlatego będzie bliżej zaprezentowana w punkcie 2.3 analizy literatury.

### 3.2.1. Wytłaczanie materiału

Wytłaczanie materiału (ang. material extrusion) to zdecydowanie najbardziej rozpowszechniona i dostępna metoda drukowania 3D, znana pod nazwą branżową FFF (ang. Fused Filament Fabrication) lub pod nazwą handlową FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Polega ona na wytłaczaniu uplastycznionego tworzywa polimerowego przez rozgrzaną głowicę drukującą i nakładaniu go warstwami na platformę roboczą. Materiał, najczęściej w postaci filamentu odwijanego ze szpuli, jest uplastyczniany w głowicy, a następnie precyzyjnie deponowany na podłoże zgodnie z ustalonym wzorem. Wytłaczany materiał polimerowy łączy się z poprzednimi warstwami i zestala po ochłodzeniu [17]. W procesie drukowania kontrolowane są parametry takie jak: temperatura głowicy uplastyczniającej, temperatura platformy roboczej oraz temperatura i cyrkulacja powietrza w komorze drukarki – zwłaszcza w przypadku drukowania polimerów wysokotemperaturowych [18]. Na rys. 3.1 przedstawiono schemat budowy drukarki typu FDM.

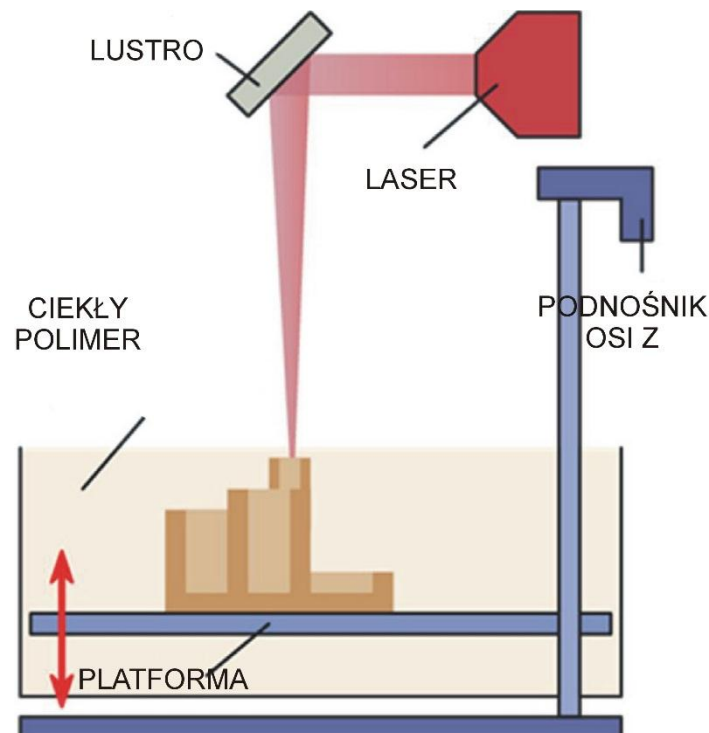


Rys. 3.1. Schemat budowy drukarki 3D typu FDM

Technologia drukowania 3D oparta na wytłaczaniu materiałów może być wykorzystana do wielomateriałowego i wielobarwnego modelowania kształtek z tworzyw polimerowych. Drukarki FFF w wykonaniu przemysłowym mogą przetwarzać szeroką gamę tworzyw termoplastycznych o specjalnych właściwościach takich jak wysoka wytrzymałość, rozpraszanie elektrostatyczne, przezroczystość, biokompatybilność czy odporność na promieniowanie UV. Dzięki temu nadają się do różnych zastosowań: od modeli koncepcyjnych, przez funkcjonalne prototypy, po specjalizowane części produkcyjne [19, 20].

### **3.2.2. Fotopolimeryzacja kadziowa**

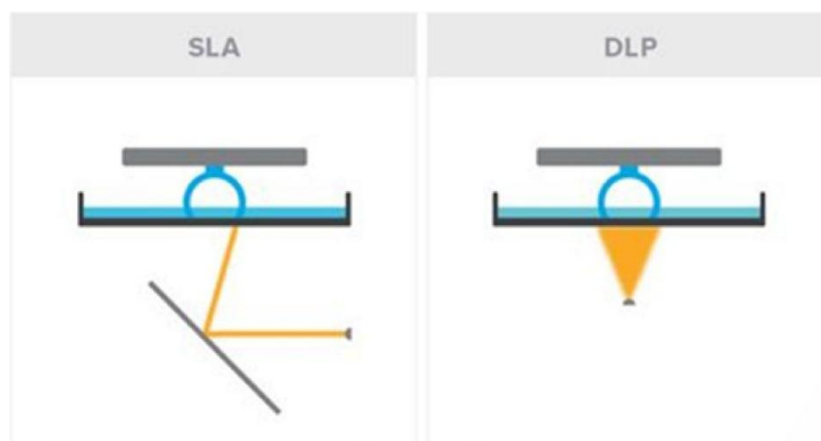
Fotopolimeryzacja kadziowa (ang. vat photopolymerization), znana najszerzej jako SLA (ang. Stereolithography - stereolitografia), to jedna z najwcześniej opracowanych technik wytwarzania przyrostowego, polegająca na warstwowym utwardzaniu fotoreaktywnych żywic polimerowych za pomocą światła o określonej długości fali [21]. Platforma robocza, na której budowany jest obiekt, zanurzona jest w zbiorniku z ciekłą żywicą, która po utwardzeniu tworzy kolejne warstwy modelu. Proces ten powtarza się cyklicznie, aż do pełnego uformowania obiektu. Na rys. 3.2 przedstawiono schemat budowy drukarki typu SLA.



Rys. 3.2. Schemat budowy drukarki 3D typu SLA

Technika ta umożliwia tworzenie wydruków o bardzo wysokiej rozdzielczości, co sprawia, że jest odpowiednia do wytwarzania prototypów, które wymagają dużej precyzji wymiarowej i gładkich powierzchni. Modele te znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, energetycznym oraz medycznym, zwłaszcza w produkcji modeli odlewniczych dla części metalowych. Materiały stosowane w tej technologii obejmują żywice transparentne, odporne na wilgoć i wysokie temperatury. Główną zaletą metody SLA jest izotropowość własności mechanicznych wytwarzanych komponentów, natomiast do wad należy zaliczyć relatywnie wysoką cenę urządzeń i materiałów eksploatacyjnych.

Podobną techniką do SLA jest DLP (ang. Digital Light Processing - cyfrowe przetwarzanie światłem), która zamiast używania skanującej wiązki laserowej wykorzystuje cyfrową maskę do sieciowania warstw żywicy. Choć metoda DLP jest szybsza od SLA, nie dorównuje jej pod względem rozdzielczości i jakości powierzchni wytwarzanych obiektów. Na rys. 3.3 przedstawiono schematycznie różnicę sposobu naświetlania fotopolimeru w drukarkach 3D typu SLA i DLP.



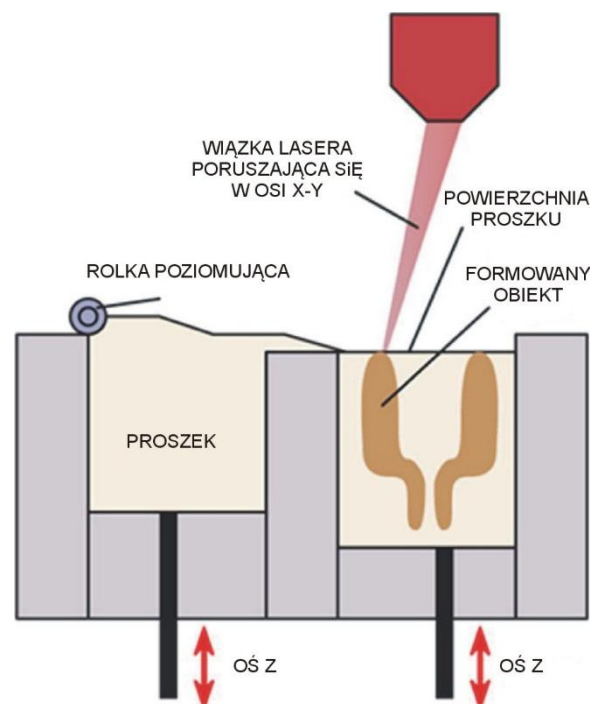
Rys. 3.3. Schemat różnych sposobów naświetlania w drukarkach 3D typu SLA i DLP

### **3.2.3 Warstwowe spiekanie proszku**

Warstwowe spiekanie proszku (ang. Powder Bed Fusion, PBF) to technika wytwarzania addytywnego, wykorzystująca energię w postaci wiązki lasera, wiązki elektronów lub źródła ciepła do scalania drobnego proszku warstwami. W zależności od rodzaju materiału, źródła

energii i ewentualnego spoiwa, można wyszczególnić kilka rodzajów drukowania 3D w tej kategorii:

Selektywne spiekanie laserowe (ang. Selective Laser Sintering, SLS) – to jedna z najstarszych, a przy tym wciąż rozwijanych metod wytwarzania addytywnego. Proces ten jest podobny do metody fotopolimeryzacji kadziowej, gdzie komponenty wytwarzane są warstwowo, z tą różnicą, że zamiast ciekłego polimeru stosuje się proszki termoplastycznych tworzyw polimerowych. Kolejno nakładane warstwy proszku o grubości około 0,1 mm są spiekane lub stapiane przez ukierunkowane źródło ciepła, najczęściej laser CO<sub>2</sub>. Drukarka SLS zwykle składa się z komory rezerwowej proszku i komory drukowania, które są wstępnie podgrzewane do temperatury nieco poniżej temperatury topnienia sproszkowanego materiału. Zaletami procesu SLS są: brak konieczności stosowania dodatkowych struktur nośnych przy drukowaniu skomplikowanych modeli i duża różnorodność materiałów bazowych, natomiast wadami są: duża wielkość i koszt urządzenia, wysoki pobór energii i słaba jakość powierzchni wytwarzanych komponentów [22]. Na rys. 3.4 przedstawiono schemat budowy drukarki 3D typu SLS.



Rys. 3.4. Schemat budowy drukarki 3D typu SLS



Selektywne stapianie laserowe (ang. Selective Laser Melting, SLM) – to metoda bardzo podobna do SLS, z tą zasadniczą różnicą, że materiałem stapianym są proszki metali. Komory z proszkiem wypełniane są gazem obojętnym, aby zapobiec utlenianiu stapianego materiału. Wadami tego procesu są duża wielkość i koszt urządzenia oraz wysoki pobór energii, a zaletami brak konieczności stosowania dodatkowych struktur nośnych przy drukowaniu skomplikowanych części, szeroki zakres możliwych do zastosowania metali (w tym złoto), niemal całkowita gęstość wytworzonych komponentów w porównaniu z metalem bazowym, ich dobre właściwości wytrzymałościowe i dokładność wymiarowa [23].

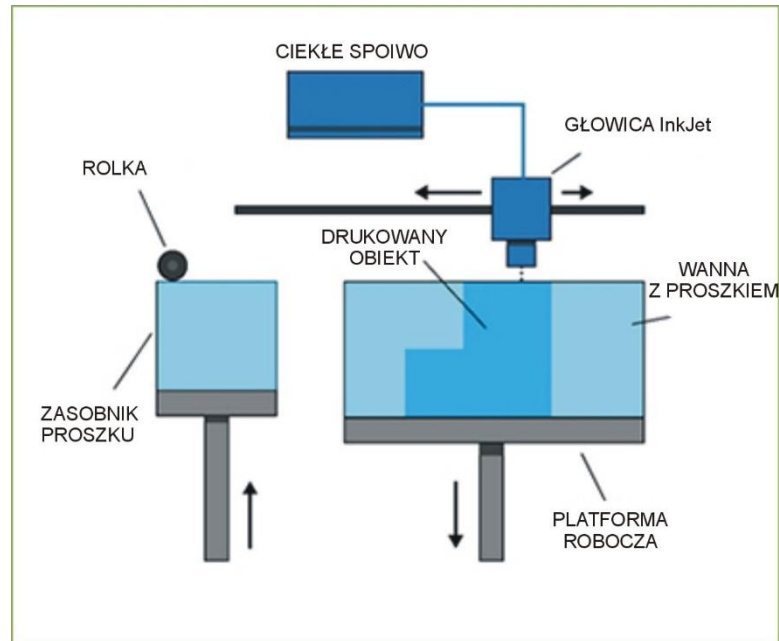
Topienie wiązką elektronów (ang. Electron Beam Melting, EBM) – to metoda podobna do selektywnego spiekania laserowego, polegająca na warstwowym stapianiu proszków metali za pomocą wiązki elektronów w warunkach wysokiej próżni [24]. Wytworzone tą techniką komponenty mają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe dzięki równomiernemu rozkładowi temperatury podczas stapiania proszku oraz dobrą jakość powierzchni, co sprawia, że nadają się do zastosowań w lotnictwie i medycynie. Metoda ta pozwala również na precyzyjne kontrolowanie procesu wytwarzania, co jest istotne dla produkcji komponentów o wysokich wymaganiach jakościowych [25].

Selektywne spiekanie termiczne (ang. Selective Heat Sintering, SHS) – to technika drukowania 3D o podobnej zasadzie działania jak SLS, z tą różnicą, że do spiekania sproszkowanych termoplastycznych tworzyw polimerowych wykorzystuje się podgrzewaną głowicę. W porównaniu do selektywnego spiekania laserowego, metoda ta jest bardziej wydajna energetycznie, jednak słabsza jakość wytwarzanych modeli sprawia, że nadaje się głównie do tworzenia prototypów koncepcyjnych [22].

#### **3.2.4. Natryskiwanie spoiwa**

Natryskiwanie spoiwa (ang. binder jetting) to metoda warstwowego wytwarzania addytywnego, przypominająca drukowanie tradycyjną drukarką atramentową. Proces ten wykorzystuje dwa materiały – materiał bazowy w postaci sproszkowanych metali, tworzyw polimerowych lub ceramiki oraz płynne polimerowe spoiwo. Spoiwo jest selektywnie natryskiwane na warstwę nanoszonego proszku, tworząc tym samym spoiwo łączące cząstki proszku w trwałą strukturę. Następnie, po zakończeniu etapu natryskiwania spoiwa, następuje

proces utwardzania, który może być realizowany pod wpływem światła ultrafioletowego (UV) lub ciepła [26]. Na rys. 3.5 przedstawiono schemat budowy drukarki 3D natryskującej spoiwo.



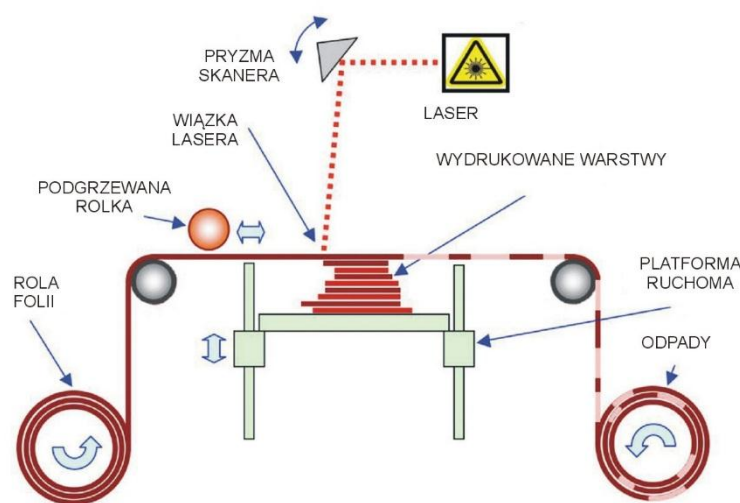
Rys. 3.5. Schemat budowy drukarki 3D natryskującej spoiwo

Metoda natryskiwania spoiwa umożliwia stosowanie specjalistycznych spoiw funkcjonalnych, co pozwala na przetwarzanie szerokiej gamy proszkowych materiałów do wytwarzania części o specjalnych właściwościach [27]. Proces natryskiwania spoiwa jest relatywnie szybki, dokładny i pozwala na bezpośrednie drukowanie 3D wielokolorowych modeli o wysokim poziomie szczegółowości. Jedną z głównych zalet tej metody jest możliwość tworzenia modeli o złożonych kształtach bez potrzeby stosowania struktur podporowych, co jest częstym ograniczeniem innych metod drukowania 3D [28].

Natryskiwania spoiwa znajduje zastosowania w wielu dziedzinach, w tym w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, medycznym oraz w produkcji prototypów i modeli koncepcyjnych. Modele wytwarzane tą techniką mogą być dodatkowo wzmacniane przez impregnację lub infuzję różnymi substancjami, co zwiększa ich wytrzymałość i stabilność. Wadą tej metody jest konieczność usunięcia niespieczonego proszku, co może być czasochłonne, oraz ograniczenia związane z rozdzielczością i dokładnością wymiarową w porównaniu do innych metod addytywnego wytwarzania [29].

### 3.2.5. Laminowanie arkuszy

Laminowanie arkuszy (ang. sheet lamination) obejmuje metody produkcji addytywnej z wykorzystaniem ultradźwięków (UAM, ang. Ultrasonic Additive Manufacturing) oraz produkcji przedmiotów laminowanych (LOM, ang. Laminated Object Manufacturing) [2]. Na rys. 3.6 przedstawiono schemat budowy drukarki 3D działającej na zasadzie laminowania arkuszy.



Rys. 3.6. Schemat budowy drukarki 3D laminującej arkusze

#### 1. Laminated Object Manufacturing (LOM):

LOM to technika druku 3D, która polega na nakładaniu warstw materiału w postaci arkuszy, które są kolejno przyklejane do siebie i wycinane w odpowiednie kształty. Proces ten zazwyczaj obejmuje cykle walcowania arkusza materiału, który jest aktywowany termicznie i laminowany na podłożu za pomocą wałka grzewczego. Następnie, laser wycina kształt danej warstwy, a nadmiar materiału jest usuwany. Proces ten powtarza się, aż do utworzenia gotowego modelu [30]. LOM jest stosunkowo tanią metodą i nadaje się do produkcji dużych modeli koncepcyjnych, jednak wytwarzane tą metodą części mają ograniczoną wytrzymałość mechaniczną, co sprawia, że nadają się głównie do wizualizacji i prototypowania.

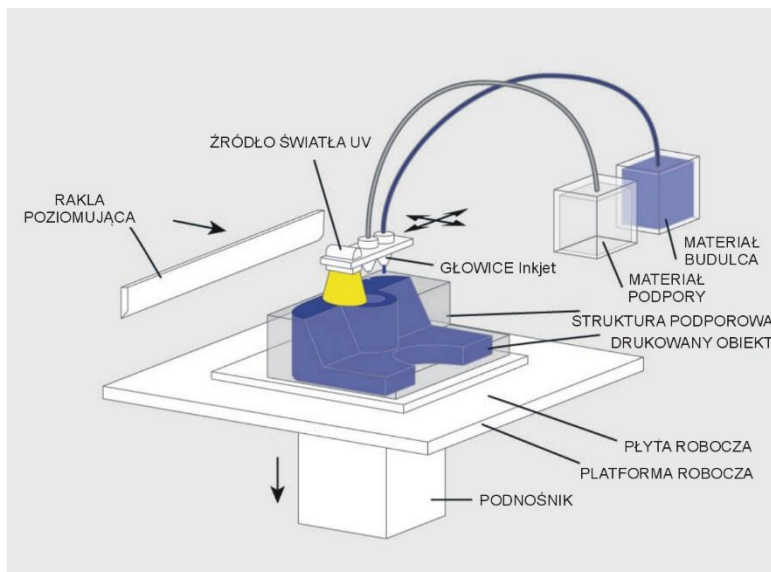
## 2. Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM):

UAM to zaawansowana technika druku 3D, która wykorzystuje arkusze lub taśmy metalowe, wykonane ze stopów aluminium, miedzi, stali nierdzewnej i tytanu. Arkusze te są zgrzewane za pomocą ultradźwięków, co pozwala na tworzenie solidnych struktur warstwowych. Proces ten łączy techniki produkcji addytywnej z obróbką ubytkową, taką jak frezowanie CNC, w celu usunięcia nadmiaru materiału po zgrzaniu każdej warstwy [31]. UAM jest niskotemperaturowym i energooszczędnym procesem, który pozwala na łączenie różnych materiałów w jednym wytwarzanym elemencie, co otwiera nowe możliwości w produkcji wielomateriałowych części o złożonych właściwościach.

Zastosowanie laminowania arkuszy znajduje się w wielu dziedzinach, w tym w produkcji form, prototypów i modeli koncepcyjnych. W szczególności UAM jest wykorzystywane w przemyśle lotniczym i kosmicznym do produkcji części wymagających połączenia różnych materiałów. Wadą tej metody jest ograniczona wytrzymałość mechaniczna wytwarzanych części metodą LOM, co ogranicza jej zastosowanie do prototypowania i wizualizacji, natomiast UAM oferuje lepsze właściwości mechaniczne, lecz jest bardziej kosztowne i skomplikowane [32].

### **3.2.6. Natryskiwanie materiału**

Natryskiwanie materiału (ang. Material Jetting, MJ) to technika druku 3D, która polega na natrykiwaniu małych kropelek materiału na platformę roboczą warstwa po warstwie. Proces ten jest zbliżony do działania drukarek atramentowych, gdzie głowica natrykuje kropelki ciekłego materiału budulcowego, które następnie utwardzane są za pomocą światła ultrafioletowego (UV) lub ciepła, w zależności od rodzaju materiału [2]. Na rys. 3.7 przedstawiono schemat budowy drukarki 3D działającej na zasadzie natryskiwania materiału.



Rys. 3.7. Schemat budowy drukarki 3D natryskującej materiał

### 1. PolyJet:

PolyJet to komercyjna technologia strumieniowania materiału, która polega na natrykiwaniu cienkich warstw fotopolimeru na platformę roboczą, a następnie utwardzaniu każdej warstwy światłem UV. Technologia ta pozwala na uzyskanie bardzo wysokiej rozdzielczości i dokładności, co sprawia, że jest odpowiednia do tworzenia precyzyjnych modeli i prototypów. Możliwość jednoczesnego natrykiwania różnych materiałów pozwala na tworzenie części o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych, takich jak elastyczność i twardość. PolyJet umożliwia również drukowanie wielokolorowych modeli, co jest istotne w przypadku tworzenia realistycznych prototypów [34].

### 2. NanoParticle Jetting (NPJ):

NPJ to zaawansowana technologia natrykiwania materiału, w której nanocząstki materiału są zawieszone w cieczy i natrykiwane na platformę roboczą. Cząstki te są następnie utwardzane, a ciecz odparowywana, co pozwala na tworzenie precyzyjnych i szczegółowych struktur. Technologia NPJ jest szczególnie użyteczna w przypadku drukowania materiałów ceramicznych i metalowych, gdzie wymagane są duża precyzja i wytrzymałość mechaniczna [33].

### 3. Drop-On Demand (DOD):

DOD to technika natrykiwania materiału, w której głowica drukująca natrykuje kropelki ciekłego materiału tylko tam, gdzie jest to konieczne. Proces ten obejmuje również

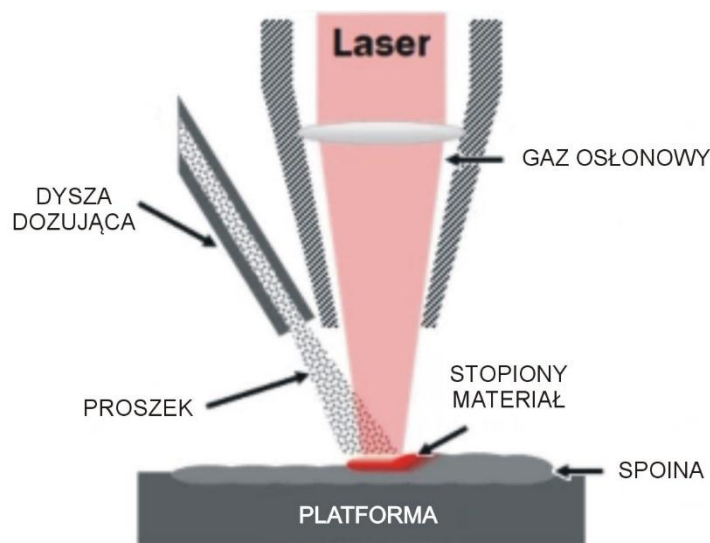
natryskiwanie materiału podporowego, który jest później usuwany. Każda warstwa jest wyrównywana po natryśnięciu, co zapewnia wysoką dokładność wymiarową [35]. DOD jest często stosowane do drukowania precyzyjnych modeli woskowych, które są następnie używane w procesach odlewniczych, na przykład w jubilerstwie i medycynie [36].

Natryskiwanie materiału jako technika druku 3D cechuje się wysoką precyzją, zdolnością do drukowania złożonych geometrii oraz możliwością użycia wielu materiałów w jednym procesie. Jednak metoda ta ma również swoje ograniczenia, takie jak konieczność stosowania materiałów podporowych, które muszą być usuwane po zakończeniu drukowania, oraz relatywnie wysokie koszty operacyjne i materiałowe w porównaniu z innymi technologiami druku 3D [1].

### **3.2.7. Osadzanie materiału z wykorzystaniem energii skupionej**

Osadzanie materiału z wykorzystaniem energii skupionej (ang. Directed Energy Deposition, DED) to zaawansowana technika wytwarzania addytywnego, która polega na stopniowym dodawaniu materiału w postaci proszku lub drutu do obszaru topnienia, utworzonego przez skupioną energię cieplną, wytworzoną przez laser, wiązkę elektronów, łuk plazmowy lub łuk elektryczny. Proces ten odbywa się w kontrolowanej atmosferze, zazwyczaj gazu obojętnego, aby zapobiec utlenianiu materiału [2].

DED jest szeroko stosowane do produkcji części metalowych o wysokiej wytrzymałości mechanicznej oraz do ich naprawy i regeneracji, szczególnie w przemyśle lotniczym, energetycznym i obronnym. Technologia ta pozwala na tworzenie dużych, strukturalnie złożonych elementów, które mogą być dodatkowo obrabiane skrawaniem w celu uzyskania dokładnych wymiarów i pożądanymi właściwościami powierzchni [37]. Na rys. 3.8 przedstawiono schemat budowy głowicy drukarki 3D działającej na zasadzie osadzania materiału z wykorzystaniem energii skupionej.



Rys. 3.8. Schemat budowy głowicy drukarki 3D typu DED

### **1. Laserowe osadzanie materiału** (ang. Laser Directed Energy Deposition, L-DED):

L-DED to metoda, w której materiał jest dostarczany do obszaru topnienia za pomocą dyszy, a następnie topiony za pomocą skupionej wiązki laserowej. Ta technika umożliwia precyzyjne kontrolowanie procesu wytwarzania, co jest istotne dla produkcji części o wysokich wymaganiach jakościowych. L-DED pozwala na osadzanie różnych materiałów, w tym metali, stopów i kompozytów, co jest szczególnie korzystne dla aplikacji wymagających zróżnicowanych właściwości mechanicznych i termicznych [38].

### **2. Osadzanie materiału z wykorzystaniem wiązki elektronów** (ang. Electron Beam Directed Energy Deposition, EB-DED):

EB-DED to technika, w której materiał jest topiony za pomocą wiązki elektronów w warunkach wysokiej próżni. Metoda ta pozwala na bardzo efektywne kontrolowanie procesu topienia i osadzania materiału, co prowadzi do uzyskania części o wysokiej gęstości i doskonałych właściwościach mechanicznych. EB-DED jest szczególnie użyteczne w produkcji elementów z metali wysokotopliwych, takich jak tytan, tantal i wolfram, które są stosowane w lotnictwie, medycynie i przemyśle energetycznym [39].

**3. Plazmowe osadzanie materiału** (ang. Plasma Arc Directed Energy Deposition, PA-DED): PA-DED to metoda, w której plazmowy łuk elektryczny jest wykorzystywany do topienia materiału bazowego. Plazma, będąca silnie zjonizowanym gazem, dostarcza energii niezbędnej do stopienia materiału, który jest następnie osadzany warstwowo na platformie roboczej. Plazmowe osadzanie materiału jest efektywne energetycznie i pozwala na szybkie wytwarzanie dużych części metalowych, choć precyzja tej metody jest zazwyczaj mniejsza niż w przypadku L-DED czy EB-DED [2]. Na rys. 3.9 pokazano przykładowe zastosowanie drukowania 3D metodą PA-DED.



Rys. 3.9. Przykładowe zastosowanie drukowania 3D typu PA-DED

DED jest wyjątkowo wszechstronną techniką, która oferuje możliwość naprawy, regeneracji i modyfikacji istniejących części, a także tworzenia nowych, złożonych struktur. Dzięki możliwości osadzania różnych materiałów w jednej operacji, DED pozwala na produkcję części wielomateriałowych o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych, termicznych i chemicznych. Ta technologia jest kluczowa dla wielu zaawansowanych aplikacji przemysłowych, gdzie wymagana jest wysoka precyzja, niezawodność i wytrzymałość [38].



### **3.3. Drukowanie 3D metodą FDM**

#### **3.3.1. Zasady działania technologii FDM**

Technologia FDM (Fused Deposition Modeling) jest jedną z najpopularniejszych metod druku 3D, szeroko stosowaną zarówno w prototypowaniu, jak i w produkcji małoseryjnej [1]. Proces FDM polega na warstwowym osadzaniu termoplastycznych materiałów polimerowych, które są uplastyczniane i wytłaczane przez ruchomą głowicę drukującą, formując trójwymiarowe obiekty [40]. Proces rozpoczyna się od stworzenia modelu 3D w oprogramowaniu CAD, który jest następnie konwertowany na format STL (Stereolithography) [41]. Plik STL jest importowany do specjalistycznego oprogramowania do cięcia modeli, które dzieli model na cienkie poziome warstwy i generuje instrukcje dla drukarki, zapisane w pliku G-code [42]. Głowica drukująca, zwana wytłaczarką lub ekstruderem, podgrzewa filament do temperatury plastyfikacji, a następnie wytłacza go przez dyszę. Filament jest podawany ze szpuli, przechodzi przez podgrzewaną strefę plastyfikacji i w stanie półpłynnym jest nakładany warstwa po warstwie na platformę roboczą lub na wcześniej nałożone warstwy materiału. Platforma robocza odsuwa się po każdej nałożonej warstwie, utrzymując stałą odległość między dyszą a powierzchnią budowanego modelu. Podstawowe mechanizmy działania technologii FDM obejmują plastyfikację i wytłaczanie materiału, nakładanie warstw oraz ich chłodzenie i utwardzanie [43]. Zaawansowane drukarki FDM mogą być wyposażone w podgrzewane komory robocze, które utrzymują stabilne warunki termiczne podczas drukowania, co jest szczególnie ważne dla materiałów o wysokiej temperaturze topnienia, takich jak PEEK [44].

##### **3.3.1.1. Procesy termiczne i mechaniczne w FDM**

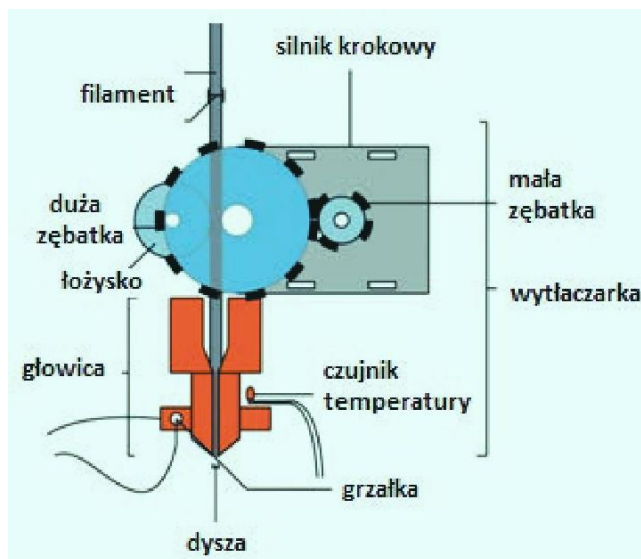
W technologii FDM kluczową rolę odgrywają procesy termiczne i mechaniczne, które wpływają na jakość i wytrzymałość drukowanych części [45]. Termoplastyczne polimery używane w FDM przechodzą przez cykle podgrzewania i chłodzenia, co wymaga precyzyjnej kontroli temperatury i prędkości chłodzenia, aby uniknąć naprężeń termicznych i odkształceń materiału [46]. Odpowiednia temperatura topnienia filamentu jest kluczowa dla uzyskania jednolitego przepływu materiału i dobrej więzi międzywarstwowej. Dla różnych materiałów

polimerowych wymagane są różne temperatury, np. dla PLA wynosi ona 190–220°C, a dla PEEK 350–400°C [47][48]. Utrzymanie odpowiedniej temperatury platformy roboczej zapobiega odkształceniom i poprawia adhezję pierwszej warstwy [49]. Przykładowo, zalecana temperatura platformy dla PLA to około 60°C, podczas gdy dla ABS jest to około 100°C [50].

Mechaniczne aspekty procesu FDM obejmują prędkość drukowania, która wpływa na czas drukowania i jakość powierzchni, oraz grubość warstwy, która wpływa na rozdzielczość wydruku oraz jego wytrzymałość mechaniczną. Cienkie warstwy (0,1 mm lub mniej) pozwalają na uzyskanie gładkich powierzchni i precyzyjnych detali, ale wydłużają czas drukowania. Natomiast grubsze warstwy (0,2–0,3 mm) skracają czas drukowania, ale mogą wpływać na jakość powierzchni i dokładność wymiarową [51].

Proces odpowiedniego chłodzenia i utwardzania materiału jest konieczny dla uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych i termicznych wydruków [52]. Szybkie chłodzenie może prowadzić do powstawania naprężeń wewnętrznych i pęknięć, podczas gdy zbyt wolne chłodzenie może powodować zwiększony skurcz i odkształcenia [53].

Na rysunku 3.10 przedstawiono schemat budowy typowej głowicy drukarki typu FDM.



Rys. 3.10. Schemat budowy głowicy drukarki 3D typu FDM

Filament – termoplastyczny materiał w postaci żyłki.

Wytłaczarka (ekstruder) – mechanizm podający filament do głowicy drukującej.

Dysza – otwór o określonej średnicy, przez który wytłaczany jest uplastyczniony filament.

### **3.3.1.2. Wytłaczanie materiałów polimerowych**

W technologii FDM filament termoplastyczny jest plastyfikowany i wytłaczany przez dyszę na platformę roboczą [2]. Wytłaczanie musi być precyzyjnie kontrolowane, aby zapewnić jednolity przepływ materiału i odpowiednią adhezję międzywarstwową [9]. Średnica dyszy wpływa na szczegółowość wydruku oraz jego wytrzymałość mechaniczną [54]. Mniejsze średnice dyszy (0,2–0,4 mm) pozwalają na uzyskanie bardziej szczegółowych wydruków, ale mogą wydłużać czas drukowania. Natomiast większe średnice dyszy (0,5–1,0 mm) skracają czas drukowania i są używane do drukowania większych, mniej szczegółowych modeli [55].

Aby zapewnić stabilny przepływ materiału oraz uniknąć problemów technologicznych, takich jak zatkanie dyszy wytłaczarki, konieczna jest kontrola prędkości podawania filamentu [56]. Optymalne ustawienia zależą od rodzaju filamentu oraz geometrii modelu [57]. Systemy wytłaczania, takie jak wytłaczanie bezpośrednie i system Bowdena, różnią się sposobem podawania filamentu i mają różne zalety. W systemach wytłaczania bezpośredniego filament jest podawany bezpośrednio do głowicy drukującej, co pozwala na precyzyjną kontrolę przepływu materiału. Natomiast w systemach Bowdena filament jest podawany przez rurkę prowadzącą, co zmniejsza masę ruchomej głowicy i pozwala na jej szybsze ruchy, ale może wprowadzać opóźnienia w reakcji na zmiany prędkości podawania [58]. Aby uzyskać wydruki o powtarzalnej, wysokiej jakości i wytrzymałości mechanicznej, konieczna jest okresowa kalibracja systemu podawania materiału [59].

Podczas drukowania metodą FDM zachodzą następujące podstawowe procesy fizyczne:

- Uplastycznianie w dyszy: Filament jest podgrzewany w głowicy drukującej do temperatury powyżej jego temperatury topnienia lub zeszklenia, co umożliwia jego przepływ [60]. Proces ten wymaga precyzyjnej kontroli temperatury, aby zapobiec degradacji materiału [61].
- Wymiana ciepła: Po wytłoczeniu materiału przez dyszę następuje wymiana ciepła między stopionym polimerem a otoczeniem oraz wcześniej nałożonymi warstwami [46]. Szybkość chłodzenia wpływa na krystalizację materiału i właściwości mechaniczne wydruku [62].
- Przepływ tworzywa: Przepływ polimeru przez dyszę jest zjawiskiem reologicznym, gdzie lepkość materiału zależy od temperatury i szybkości ścinania

[63, 64]. Sterowanie prędkością wytłaczania jest niezbędne dla uzyskania jednolitego strumienia materiału.

- Łączenie warstw: Adhezja między warstwami zachodzi głównie poprzez dyfuzję łańcuchów polimerowych na styku wytłaczanego materiału i poprzedniej warstwy [65]. Wpływ na ten proces mają temperatura, czas oraz nacisk wywierany przez wytłaczany materiał.
- Chłodzenie: Kontrolowane chłodzenie jest niezbędne do zminimalizowania naprężeń wewnętrznych i skurczu materiału [66]. Nieprawidłowe chłodzenie może prowadzić do deformacji i spadku wytrzymałości mechanicznej.

### **3.3.1.3. Etapy przetwarzania modeli cyfrowych na fizyczne**

Etapy przetwarzania modeli cyfrowych na fizyczne w technologii FDM obejmują kilka podstawowych kroków [1, 2, 42, 67]:

- Tworzenie modelu 3D: Model jest projektowany w oprogramowaniu CAD i zapisywany w formacie STL.
- Przetwarzanie w oprogramowaniu slicer: Plik STL jest importowany do slicera, który dzieli model na warstwy i generuje G-code.
- Konfiguracja parametrów drukowania: Użytkownik ustawia parametry takie jak temperatura, prędkość, grubość warstwy.
- Drukowanie: Drukarka interpretuje G-code i buduje model warstwa po warstwie.
- Post-processing: Usuwanie podpór, obróbka powierzchniowa, ewentualne wygrzewanie.

Podczas drukowania metodą FDM kluczową rolę odgrywa oprogramowanie typu *slicer* (ang. slice – ciąć na plastry/warstwy), które przetwarza trójwymiarowe modele na instrukcje zrozumiałe dla drukarki 3D. **Programiści** tworzący to oprogramowanie implementują zaawansowane algorytmy odpowiedzialne za generowanie optymalnych ścieżek drukowania, co wpływa na efektywność ruchu głowicy oraz precyzyjną kontrolę parametrów procesowych [68]. Dzięki ich pracy możliwe jest uzyskanie wydruków o wysokiej jakości przy jednoczesnym skróceniu czasu drukowania i minimalizacji zużycia materiału.

Z kolei **użytkownik** oprogramowania ma możliwość dostosowania wielu parametrów procesu drukowania, co pozwala na personalizację wydruków zgodnie z indywidualnymi potrzebami. Do najważniejszych ustawień należą:

- **Grubość warstwy:** wpływa na jakość powierzchni wydruku oraz czas drukowania. Cieńsze warstwy zapewniają wyższą precyzję detali, ale wydłużają proces drukowania.
- **Prędkość drukowania:** determinuje czas realizacji wydruku i może wpływać na jego jakość. Wyższe prędkości skracają czas drukowania, lecz mogą obniżyć dokładność i wytrzymałość modelu.
- **Temperatury dyszy i stołu roboczego:** są kluczowe dla adhezji między warstwami oraz przylegania pierwszej warstwy do stołu. Odpowiednie temperatury zapobiegają deformacjom i zapewniają spójność strukturalną wydruku.
- **Wypełnienie:** użytkownik może określić procent oraz wzór wypełnienia modelu, co wpływa na jego wytrzymałość mechaniczną i zużycie materiału.
- **Struktury podporowe:** umożliwiają drukowanie skomplikowanych geometrii poprzez wsparcie przewieszonych elementów. Ustawienia podpór pozwalają na ich łatwe usunięcie po zakończeniu drukowania [69].

**Zaawansowane oprogramowanie typu slicer** charakteryzuje się:

- **Intuicyjnym interfejsem użytkownika**, który ułatwia nawigację i konfigurację nawet zaawansowanych ustawień, co jest szczególnie ważne dla początkujących użytkowników.
- **Zaawansowanymi algorytmami**, które optymalizują ścieżki drukowania, redukując czas procesu i poprawiając jakość wydruku poprzez inteligentne rozmieszczenie warstw i wypełnień.
- **Regularnymi aktualizacjami i wsparciem technicznym**, zapewniającymi dostęp do najnowszych funkcji, poprawek bezpieczeństwa oraz pomoc w rozwiązywaniu ewentualnych problemów.
- **Funkcją symulacji druku**, która pozwala na wczesne wykrycie potencjalnych błędów i przewidzenie zachowania modelu podczas drukowania, co minimalizuje ryzyko niepowodzenia [70].

Natomiast **proste programy** do sterowania drukarek 3D mogą cechować się:

- **Ograniczonymi funkcjami**, uniemożliwiającymi precyzyjną kontrolę nad parametrami drukowania i dostosowanie procesu do specyficznych wymagań projektowych.

- **Niską stabilnością**, objawiającą się częstymi błędami, awariami lub niekompatybilnością z różnymi modelami drukarek, co może prowadzić do frustracji i strat materiałowych.
- **Brakiem wsparcia technicznego i rzadkimi aktualizacjami**, co utrudnia rozwiązywanie problemów i korzystanie z najnowszych osiągnięć technologicznych w dziedzinie druku 3D [71].

Podczas drukowania głowica drukująca porusza się zgodnie z instrukcjami zawartymi w G-code, nakładając warstwa po warstwie uplastyczniony filament na platformę roboczą [90]. Po nałożeniu każdej warstwy platforma przesuwa się w osi Z, na odległość odpowiadającą grubości drukowanej warstwy. Proces ten powtarza się, aż cały model zostanie wydrukowany [1].

Po zakończeniu drukowania model może wymagać dodatkowej obróbki, takiej jak usunięcie struktur podporowych, szlifowanie, polerowanie lub innych technik wykańczania, aby uzyskać pożądaną jakość powierzchni i dokładność wymiarową [72].

W procesie przetwarzania modeli cyfrowych na fizyczne obiekty duże znaczenie ma również optymalizacja parametrów drukowania [73]. Nowoczesne algorytmy optymalizacyjne stosowane w oprogramowaniu slicer pozwalają na automatyczne dostosowanie tych parametrów, aby uzyskać najlepszą możliwą jakość wydruków.

Optymalizacja polega na zastosowaniu predefiniowanych profili materiałów i ustawień drukarki, które bazują na doświadczeniu użytkowników i producentów [74]. Programy slicer korzystają z danych takich jak temperatura topnienia materiału, zalecane prędkości drukowania czy specyfikacje techniczne drukarki [75]. Choć program nie zna bezpośrednio właściwości mechanicznych czy elektrycznych wydruków, może optymalizować proces drukowania poprzez:

- **Analizę geometrii modelu**: identyfikacja cienkich ścianek, zwisów, potrzebnych podpór [76].
- **Dostosowanie parametrów ruchu**: zmiana prędkości i przyspieszeń w zależności od złożoności geometrii [77].
- **Zastosowanie algorytmów kompensujących skurcz**: minimalizacja deformacji poprzez odpowiednie ustawienia [78].

Użytkownik ma możliwość ręcznej modyfikacji parametrów na podstawie własnej wiedzy i wymagań, co pozwala na lepsze dostosowanie procesu do oczekiwanych właściwości wydruku [79].

### **3.3.2. Materiały polimerowe stosowane w drukowaniu metodą FDM**

W technologii drukowania 3D metodą FDM (Fused Deposition Modeling) stosuje się szeroką gamę materiałów polimerowych, które różnią się właściwościami mechanicznymi, termicznymi i chemicznymi. Materiały te znajdują zastosowanie w zależności od specyficznych wymagań aplikacyjnych. W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd najczęściej stosowanych materiałów polimerowych w tej technologii, materiałów polimerowych na filamenty techniczne, materiałów polimerowych stosowanych w medycynie oraz materiałów polimerowych funkcyjnych. Materiały polimerowe na filamenty techniczne są to tworzywa o podwyższonych właściwościach mechanicznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na zginanie i udarność. Są stosowane w aplikacjach przemysłowych, gdzie od drukowanych części wymaga się trwałości i odporności na trudne warunki środowiskowe, np. wysokie temperatury i środki chemiczne. Materiały polimerowe stosowane w medycynie cechują się takimi własnościami jak biokompatybilność czy wytrzymałość na sterylizację. Materiały polimerowe funkcyjne to filamenty, które mają specyficzne właściwości, umożliwiające zastosowanie w specjalnych aplikacjach. Przykłady obejmują filamenty przewodzące prąd, antystatyczne, a także materiały zawierające dodatki metaliczne lub ceramiczne, które nadają im unikalne cechy. Filamenty funkcyjne znajdują zastosowanie np. w drukowaniu obudów dla elektroniki czy w aplikacjach wymagających ochrony przed ładunkami elektrostatycznymi.

Omówienie obejmuje zarówno czyste polimery, mieszaniny i kompozycje polimerowe, a także kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami. Dzięki ciągłemu rozwojowi i innowacjom w dziedzinie materiałów polimerowych, drukownie 3D umożliwia nowe zastosowania i usprawnienia w procesach produkcyjnych. Na rys. 3.11 przedstawiono widok typowych rolek filamentu technicznego.



Rys. 3.11. Widok typowych rolek filamentów technicznych firmy Solvay (obecnie Syensqo)

### **3.3.2.1. Najczęściej stosowane materiały polimerowe w FDM**

#### **PLA (Polilaktyd)**

Polilaktyd (PLA) jest jednym z najpopularniejszych materiałów używanych w druku 3D [83, 84]. Jest to biodegradowalny polimer produkowany z odnawialnych surowców, takich jak skrobia kukurydziana. PLA jest ceniony za łatwość drukowania, niską temperaturę topnienia (około 180–220°C) oraz brak konieczności stosowania podgrzewanego stołu roboczego [47]. Jego właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie i sztywność, są wystarczające dla wielu zastosowań, choć jego kruchość ogranicza zastosowania w bardziej wymagających warunkach [80]. PLA jest również bezpieczny, ponieważ nie wydziela szkodliwych oparów podczas drukowania [85].

#### **ABS (Kopolimer Acrylonitryl-Butadien-Styren)**

ABS jest szeroko stosowanym materiałem w druku 3D ze względu na jego wysoką wytrzymałość mechaniczną i odporność na uderzenia [86]. Drukowanie z ABS wymaga temperatury około 210–250°C oraz podgrzewanego stołu roboczego, aby zapobiec nadmiernemu skurczowi i odkształceniom [87]. ABS jest ceniony w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i do tworzenia



prototypów [88, 89]. Jego wadą jest wydzielanie szkodliwych oparów styrenu podczas drukowania, co wymaga odpowiedniej wentylacji [90, 91]. ABS jest łatwy do obróbki mechanicznej [43].

### **PETG (Kopolimer glikolu etylenowego i politereftalanu etylenu)**

PETG łączy zalety PLA i ABS, oferując dobrą wytrzymałość mechaniczną, elastyczność oraz łatwość drukowania [92, 93]. Jego temperatura topnienia wynosi około 220–240°C [94]. PETG jest mniej podatny na skurcz i odkształcenia w porównaniu do ABS, a jednocześnie bardziej wytrzymały mechanicznie niż PLA [9, 95]. PETG jest dopuszczony do kontaktu z żywnością, co czyni go odpowiednim do produkcji pojemników, butelek oraz innych przedmiotów mających styczność z produktami spożywczymi. Jest również odporny na działanie wielu chemikaliów, co sprawia, że jest szeroko stosowany w przemyśle opakowaniowym [96].

### **PA (Poliamid)**

Poliamidy, takie jak poliamid 6 i poliamid 12, są cenione za wysoką wytrzymałość mechaniczną, elastyczność oraz odporność na ścieranie [97, 98]. Są one stosowane w aplikacjach wymagających trwałości i wytrzymałości, takich jak elementy mechaniczne, przekładnie czy złącza [81]. Drukowanie z PA wymaga wyższej temperatury topnienia (około 240–260°C) oraz podgrzewanego stołu roboczego, aby zapobiec dużemu skurczowi i odkształceniom [99]. Poliamid ma również skłonność do absorpcji wilgoci, co wymaga przechowywania w suchych warunkach przed procesem drukowania [100]. Własności mechaniczne wydrukowanej części mogą się poprawić po zaabsorbowaniu wilgoci z otoczenia.

### **PC (Poliwęglan)**

Poliwęglan (PC) jest materiałem o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i odporności na uderzenia [101]. Jest często stosowany w aplikacjach wymagających wysokiej wytrzymałości i odporności na ciepło, takich jak obudowy elektroniki czy części samochodowe [102, 103]. Drukowanie z PC wymaga wyższej temperatury topnienia (około 260–310°C) oraz podgrzewanego stołu roboczego [104]. Poliwęglan charakteryzuje się również dobrą przejrzystością i stabilnością termiczną. Jest jednak bardzo wrażliwy na oddziaływanie promieniowania UV [105].

### **PP (Polipropylen)**

Polipropylen jest materiałem o niskiej gęstości, wysokiej elastyczności i dobrej odporności chemicznej [106]. Jego temperatura topnienia wynosi około 160–180°C [42]. PP jest stosowany w aplikacjach wymagających lekkości i wytrzymałości chemicznej, takich jak opakowania, elementy medyczne, a także w przemyśle motoryzacyjnym [107]. Jednak drukowanie z PP jest wyzwaniem ze względu na jego tendencję do skurczu i słabą adhezję do stołu roboczego [108].

### **PC-ABS (Mieszanka Poliwęglanu oraz kopolimeru ABS)**

PC-ABS łączy zalety poliwęglanu i ABS, oferując wysoką wytrzymałość mechaniczną, odporność na uderzenia oraz dobrą stabilność wymiarową [109, 110]. Jest stosowany w aplikacjach przemysłowych, takich jak obudowy elektroniki, części samochodowe i sprzęt AGD [15]. PC-ABS jest bardziej odporny na wysokie temperatury i ma lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu do czystego ABS [111].

### **HIPS (Polistyren wysokoudarowy)**

HIPS to termoplastyczny materiał o dobrych właściwościach mechanicznych, zwłaszcza pod kątem odporności na uderzenia i łatwości obróbki [79], jednak ustępuje innym polimerom pod względem wytrzymałości na rozciąganie i sztywności, takim jak ABS czy PEEK [112]. Jest lekki i odporny na uderzenia. Typowe temperatury przetwórstwa HIPS wynoszą około 230–250°C [113]. Ze względu na swoje właściwości, HIPS jest stosowany jako materiał podporowy, który można łatwo rozpuścić w roztworze d-limonenu, co czyni go idealnym do drukowania złożonych geometrii [114]. HIPS znajduje zastosowanie w produkcji obudów elektroniki, zabawek i prototypów [6].

### **ASA (Akrylonitryl-styren-akrylan)**

ASA to kopolimer charakteryzujący się doskonałą odpornością na warunki atmosferyczne, co sprawia, że jest odpowiedni do zastosowań zewnętrznych [115, 116]. Jest odporny na promieniowanie UV, chemikalia i wilgoć, co czyni go trwałym materiałem na zewnątrz [117]. ASA ma temperaturę przetwórstwa w zakresie 240–260°C [118]. Jego właściwości mechaniczne są porównywalne do ABS, jednak ASA oferuje lepszą odporność na starzenie [119]. Zastosowania obejmują obudowy urządzeń zewnętrznych, elementy motoryzacyjne i komponenty przemysłowe [120].

### **PCTG (Policykloheksylenodimetylotereftalan glikolu)**

PCTG to modyfikacja PETG, charakteryzująca się lepszą wytrzymałością na uderzenia i większą przezroczystością [96, 121]. PCTG jest materiałem łatwym w druku, z dobrą adhezją międzywarstwową i niskim skurczem, co czyni go odpowiednim do dużych wydruków [122]. Typowe temperatury przetwórstwa PCTG wynoszą około 220–240°C [121]. Dzięki swojej chemicznej odporności i wytrzymałości mechanicznej, PCTG znajduje zastosowanie w przemyśle spożywczym, medycznym oraz w produkcji opakowań i butelek [123, 124].

### **Termoplastyczne elastomery (TPE), w tym poliuretany termoplastyczne (TPU)**

Termoplastyczne elastomery, w tym najczęściej stosowane w technologii drukowania FDM poliuretany termoplastyczne (TPU), to elastyczne materiały polimerowe stosowane do drukowania części wymagających wysokiej elastyczności i odporności na ścieranie [125, 126]. Są one odpowiednie do drukowania elementów takich jak uszczelki, ochroniacze czy elastyczne złącza [127, 128]. TPU ma temperaturę uplastycznienia w zakresie 210–230°C i jest łatwy w drukowaniu, choć może wymagać dostosowania ustawień drukarki, aby uniknąć zatykania dyszy [129].

## **3.3.2.2. Techniczne materiały polimerowe w FDM**

### **PP+GF (Polipropylen z włóknem szklanym)**

Polipropylen wzmocniony włóknem szklanym łączy zalety małej gęstości PP z dodatkowymi korzyściami wynikającymi z obecności włókien szklanych, takimi jak zwiększona wytrzymałość i sztywność [130, 131]. PP+GF jest stosowany w aplikacjach wymagających wysokiej wytrzymałości mechanicznej i stabilności wymiarowej, takich jak części motoryzacyjne, przemysłowe oraz produkty konsumenckie [80].

### **PA+CF (Poliamid wzmocniony włóknem węglowym)**

Poliamid wzmocniony włóknem węglowym oferuje dużą wytrzymałość mechaniczną, sztywność oraz odporność na ścieranie [81, 132]. Włókna węglowe znacząco poprawiają właściwości mechaniczne materiału, redukując jego wagę [133]. PA+CF jest stosowany w

produkcji części maszyn przemysłowych oraz części motoryzacyjnych, gdzie wymagana jest duża wytrzymałość i trwałość [134, 135].

### **PETG+CF (Kopolimer glikolu etylenowego i politereftalanu etylenu wzmocniony włóknem węglowym)**

PETG+CF to materiał, który łączy zalety PETG, takie jak dobra adhezja międzywarstwowa, łatwość drukowania oraz odporność na warunki atmosferyczne, z dodatkowymi korzyściami wynikającymi z obecności włókien węglowych [136]. Włókna węglowe zwiększają wytrzymałość mechaniczną i sztywność, co czyni PETG+CF odpowiednim do zastosowań wymagających większej wytrzymałości i stabilności wymiarowej [79, 137].

### **PEI (Polietierimid)**

Polietierimid jest materiałem polimerowym o wysokiej wytrzymałości, który charakteryzuje się doskonałą stabilnością termiczną i mechaniczną [138, 139]. PEI jest odporny na wysokie temperatury (do 217°C) i posiada dobrą odporność chemiczną, co sprawia, że jest często stosowany w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i medycznym [140].

### **PEEK (Polietereeteroketon)**

PEEK jest jednym z najbardziej zaawansowanych technicznie polimerów stosowanych w wielu wymagających aplikacjach przemysłowych, głównie dzięki wyjątkowym właściwościom mechanicznym, termicznym i chemicznym [141, 142]. Posiada półkryształiczną strukturę, co przekłada się na dużą odporność na ścieranie, małe zużycie mechaniczne i dużą odporność na zmęczenie materiału [143, 144]. Jego wysoka temperatura topnienia wynosząca około 343°C oraz wyjątkowa stabilność wymiarowa w wysokich temperaturach sprawiają, że PEEK jest powszechnie stosowany w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, naftowym i gazowym [145, 146]. Materiał ten cechuje się także bardzo dobrą odpornością na działanie wielu chemikaliów, w tym rozpuszczalników organicznych, kwasów i zasad [147, 148]. Dodatkowo, PEEK wykazuje niską emisję toksycznych gazów i dymu podczas spalania, co czyni go odpowiednim do zastosowań w lotnictwie, gdzie priorytetowe znaczenie mają standardy bezpieczeństwa [46, 149]. Ze względu na swoją wytrzymałość mechaniczną, PEEK jest często stosowany jako zamiennik metali w wielu aplikacjach technicznych, takich jak części turbin, zawory czy elementy pomp [150, 151].

---

### **PEEK+CF (Polietereketon wzmocniony włóknem węglowym)**

Dodanie włókien węglowych do PEEK znacząco poprawia jego właściwości mechaniczne, takie jak sztywność i wytrzymałość, jednocześnie redukując wagę materiału [81, 146]. PEEK+CF charakteryzuje się dużą odpornością na oddziaływania ciepła oraz doskonałą wytrzymałością na zmęczenie, co sprawia, że jest materiałem spełniającym wymogi do zastosowań w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym oraz w produkcji części mechanicznych o dużej wytrzymałości [152, 153].

### **PEKK (Polietereketonoketon)**

PEKK jest materiałem podobnym do PEEK, ale z nieco innym składem chemicznym, co daje mu unikalne właściwości [147]. PEKK ma wyższą temperaturę topnienia i lepszą odporność na utlenianie niż PEEK (około 360–370°C, w zależności od składu i stopnia krystaliczności) [154, 155]. Jest stosowany w przemyśle lotniczym, kosmicznym, medycznym oraz w produkcji części wymagających ekstremalnej wytrzymałości i stabilności termicznej [156, 157].

### **PPS (Polifenylosulfid)**

PPS to wysokowytrzymały, odporny na chemikalia polimer, który charakteryzuje się dużą stabilnością termiczną (do około 200°C) i wymiarową [158, 159]. PPS jest stosowany w aplikacjach wymagających odporności na wysokie temperatury i agresywne chemikalia, takich jak przemysł motoryzacyjny, elektryczny oraz elektroniczny [160].

### **POM (Polioksymetylen)**

POM jest znany również jako polioksymetylen, poliacetal i poliformaldehyd [161]. Charakteryzuje się wysoką sztywnością, niskim współczynnikiem tarcia i dużą odpornością na uderzenia [162, 163]. POM jest również odporny na wilgoć, chemikalia i działanie promieniowania UV [164, 165]. Jego zalety sprawiają, że jest używany do produkcji elementów takich jak łożyska ślizgowe i koła zębate [166]. Drukowanie filamentem POM wymaga szczególnej uwagi na temperaturę, ponieważ powyżej 230°C POM może zacząć wydzielać opary formaldehydu [167, 168]. Zalecane jest drukowanie w dobrze wentylowanym pomieszczeniu lub w zamkniętej komorze z filtrem powietrza [169].

### **PAI (Poliamidoimid)**

PAI jest znany z doskonałych właściwości mechanicznych i termicznych, w tym dużej wytrzymałości i odporności na wysokie temperatury (do około 275°C), chemikalia oraz zużycie [170, 171]. Materiał ten jest stosowany w aplikacjach wymagających wysokiej wytrzymałości, takich jak elementy turbin, uszczelki i komponenty elektroniczne [172, 173]. PAI jest szczególnie odporny na promieniowanie UV oraz wykazuje odporność na promieniowanie jonizujące, dzięki czemu znajduje zastosowanie w urządzeniach medycznych i przemysłowych [174, 175]. Filamenty PAI są jednak bardzo drogie i wymagają zaawansowanych urządzeń do drukowania, co ogranicza ich powszechne zastosowanie [20].

### **3.3.2.3. Materiały polimerowe stosowane w medycynie w FDM**

Technologia druku 3D metodą FDM (Fused Deposition Modeling) znajduje szerokie zastosowanie w medycynie, gdzie stosuje się innowacyjne rozwiązania w diagnostyce, terapii oraz edukacji medycznej [6, 176]. Dzięki możliwości tworzenia precyzyjnych i złożonych struktur z materiałów polimerowych, FDM umożliwia realizację spersonalizowanych implantów, narzędzi chirurgicznych, rusztowań tkankowych oraz systemów kontrolowanego uwalniania leków [177, 178]. W medycynie druk 3D pozwala również na tworzenie modeli anatomicznych, które służą jako narzędzia edukacyjne oraz symulatory operacyjne, umożliwiające trening procedur chirurgicznych na biomimetycznych modelach odwzorowujących wygląd i strukturę tkanek [179, 180].

### **PEEK (Polietereeteroketon)**

W medycynie PEEK znalazł zastosowanie głównie dzięki swojej biokompatybilności, odporności na sterylizację oraz wyjątkowym właściwościom mechanicznym [181, 182]. PEEK jest w stanie wytrzymać wielokrotne cykle sterylizacji, co czyni go odpowiednim materiałem do produkcji narzędzi chirurgicznych oraz implantów [183, 184]. Materiał ten jest odporny na hydrolizę, co umożliwia jego długotrwałe stosowanie w środowisku wilgotnym, np. jako elementy protez dentystycznych lub implantów kraniomaksilofacjalnych [185, 186]. Dodatkowo, PEEK charakteryzuje się niskim współczynnikiem zużycia i bardzo dobrą odpornością na zmęczenie materiału, co czyni go optymalnym materiałem polimerowym do zastosowania w implantach ortopedycznych, zwłaszcza w implantach kręgosłupa oraz

endoprotezach stawów [187]. W porównaniu do tradycyjnych materiałów, takich jak tytan, PEEK oferuje podobną wytrzymałość mechaniczną przy jednoczesnym obniżeniu masy [188, 189]. PEEK może być także stosowany jako alternatywa dla metali i ceramiki w konstrukcji indywidualnie dostosowanych implantów, np. w chirurgii ortopedycznej [190, 191].

### **PLA (Polilaktyd, poli(kwas mlekowy))**

W medycynie PLA jest stosowany do produkcji implantów, które ulegają biodegradacji w organizmie, eliminując potrzebę ich chirurgicznego usunięcia po zakończeniu okresu leczenia [192, 193]. PLA jest również wykorzystywany w produkcji szwów chirurgicznych oraz rusztowań tkankowych [194, 195].

### **PGA (Poli(kwas glikolowy))**

PGA jest kolejnym biodegradowalnym polimerem stosowanym w medycynie [196, 197]. Charakteryzuje się szybkim tempem degradacji w organizmie, co jest korzystne w przypadkach, gdzie wymagana jest krótka trwałość materiału [198]. PGA jest często używany w produkcji szwów chirurgicznych oraz rusztowań tkankowych [199, 200]. Dzięki dużej wytrzymałości mechanicznej oraz zdolności do formowania porowatych struktur, PGA wspiera regenerację tkanek, umożliwiając integrację z komórkami i naczyniami krwionośnymi [201, 202].

### **PLGA (Poli(kwas mlekowo-glikolowy))**

PLGA, będący kopolimerem PLA i PGA, łączy zalety obu tych materiałów, oferując kontrolowaną biodegradację oraz dobre właściwości mechaniczne [203, 204]. Stosunek PLA do PGA w kopolimerze można modyfikować w celu dostosowania czasu degradacji materiału do specyficznych wymagań aplikacyjnych [205, 206]. PLGA jest szeroko stosowany w medycynie, w tym w produkcji rusztowań tkankowych, nośników leków oraz mikrosfer stosowanych w terapii kontrolowanego uwalniania leków [207].

### **PCL (Poli(kwas kaprolaktonowy))**

PCL jest biodegradowalnym polimerem termoplastycznym o niskiej temperaturze topnienia (około 60°C), co czyni go odpowiednim do przetwarzania techniką FDM [208, 209]. Jego elastyczność i możliwość tworzenia złożonych struktur o porowatości sprzyjającej kolonizacji komórek sprawiają, że jest szeroko stosowany w inżynierii tkankowej, zwłaszcza w produkcji rusztowań tkankowych wspomagających regenerację kości i chrząstki [210, 211]. PCL charakteryzuje się długim czasem biodegradacji, co umożliwia jego wykorzystanie w

aplikacjach wymagających długotrwałego wsparcia strukturalnego, takich jak implanty resorbowalne [212]. W połączeniu z kontrolowanym uwalnianiem leków, PCL jest również stosowany w systemach dostarczania substancji czynnych [213, 214]. Jego właściwości mechaniczne, zbliżone do tkanek miękkich, kwalifikują go do aplikacji medycznych, gdzie wymagana jest biokompatybilność i stopniowa degradacja [215].

### **Kompozyty polimerowe wzbogacone substancjami bioaktywnymi**

W celu poprawy właściwości biologicznych materiałów stosowanych w medycynie, coraz częściej stosuje się kompozyty polimerowe wzbogacone substancjami bioaktywnymi [216, 217]. Przykładem są kompozyty PEEK z dodatkiem hydroksyapatytu, które zwiększają osteointegrację w przypadku implantów kostnych [182, 218]. Dodatek tych bioaktywnych substancji wspiera integrację z tkankami organizmu, przyspieszając procesy regeneracyjne i poprawiając wyniki kliniczne [219].

### **Materiały do modeli biomimetycznych**

Modele biomimetyczne służą do odwzorowywania wyglądu i struktury tkanek, co umożliwia realistyczne treningi chirurgiczne i precyzyjne planowanie zabiegów [220, 221]. Materiały polimerowe używane do tworzenia takich modeli muszą cechować się wysoką precyzją odwzorowania detali oraz odpowiednimi właściwościami mechanicznymi, które pozwalają na realistyczne symulacje procedur medycznych [222, 223]. W tej kategorii często stosowane są elastyczne polimery, takie jak TPU (termoplastyczny poliuretan), które mogą naśladować właściwości tkanek miękkich [179, 224]. Dodatkowo, przezroczyste filamenty, takie jak PETG, pozwalają na wizualizację wewnętrznych struktur anatomicznych podczas symulacji [225, 226].

#### **3.3.2.4. Funkcyjne materiały polimerowe do druku FDM**

##### **PVA (Poli(alkoholwinylowy))**

PVA to rozpuszczalny w wodzie polimer odpowiedni do tworzenia podpór w dwugłowicowych drukarkach 3D [227]. Jest biodegradowalny i łatwo rozpuszcza się w wodzie, co ułatwia usuwanie podpór po zakończeniu drukowania [228-230]. Jego główną zaletą jest kompatybilność z wieloma materiałami polimerowymi, w tym PLA i PA [231].



### **HIPS (Polistyren wysokoudarowy)**

W zastosowaniach medycznych w technologii druku FDM, HIPS jest wykorzystywany głównie jako materiał podporowy, zwłaszcza w połączeniu z ABS [79, 80]. Jego rozpuszczalność w limonie pozwala na łatwe usuwanie podpór bez uszkodzenia głównej struktury wydruku, co jest istotne przy tworzeniu modeli anatomicznych i prototypów urządzeń medycznych [7, 114]. Dzięki swojej odporności na uderzenia oraz łatwości obróbki, HIPS sprawdza się również w produkcji precyzyjnych struktur o złożonych geometriach, wykorzystywanych w planowaniu operacji i szkoleniach chirurgicznych [6, 232].

### **BVOH (Kopolimer butenodiolu i alkoholu winylowego)**

BVOH jest zaawansowanym materiałem podporowym stosowanym w druku FDM, który rozpuszcza się w wodzie szybciej niż PVA i wykazuje wyższą kompatybilność z filamentami takimi jak PLA, ABS i poliamid [233, 234]. Kompatybilność ta odnosi się do zdolności materiału do skutecznego tworzenia podpór bez problemów z przyczepnością czy deformacją, co jest ważne w drukowaniu złożonych modeli [235, 236]. BVOH umożliwia precyzyjne tworzenie podpór o stabilnych właściwościach mechanicznych, które można łatwo usunąć po zakończeniu procesu druku, co przyspiesza postprodukcję i zwiększa dokładność wydruków [237].

### **PLA napełniony drewnem (ang. Wood-Filled PLA)**

PLA napełniony drewnem to materiał polimerowy, który zawiera drobne cząstki drewna zmieszane z PLA [238, 239]. Dzięki swoim walorom estetycznym i teksturze przypominającej drewno, nadaje się do zastosowań dekoracyjnych i artystycznych [240, 241]. Kompozyty te są stosunkowo łatwe w drukowaniu i oferują podobne właściwości mechaniczne jak czyste PLA, choć mogą być bardziej kruche [242, 243].

### **PLA napełniony metalem (ang. Metal-Filled PLA)**

PLA napełniony metalem to materiał polimerowy zawierający proszki metali, takie jak miedź, brąz czy stal [244, 245]. Dzięki swojemu wyglądowi i ciężarowi zbliżonemu do metali, jest odpowiedni do tworzenia ozdobnych elementów, biżuterii oraz replik historycznych [246, 247]. PLA napełniony metalem ma jednak mniejszą wytrzymałość mechaniczną w porównaniu do czystego PLA i wymaga utwardzanych, odpornych na ścieranie dysz drukarek [244].

---

### **Filament napelniony stalą nierdzewną (ang. Stainless Steel-Filled Filament)**

Ten rodzaj materiału polimerowego zawiera proszek stali nierdzewnej, co pozwala na drukowanie części o właściwościach mechanicznych i estetycznych zbliżonych do stali [248, 249]. Po wydruku elementy te mogą być poddane dalszej obróbce mechanicznej i polerowaniu [250, 251].

### **PLA napelniony ceramiką (ang. Ceramic-Filled PLA)**

PLA napelniony ceramiką zawiera proszki ceramiczne, które zwiększają sztywność i odporność termiczną materiału [252]. Filamenty te są używane w drukowaniu form do odlewów, elementów dekoracyjnych oraz komponentów wymagających wyższej wytrzymałości termicznej [253, 254]. Ceramiczne dodatki poprawiają również stabilność wymiarową i odporność na zużycie materiału [255, 256].

### **TPU napelniony silikonem (ang. Silicone-Filled TPU)**

Jest to kompozyt TPU z dodatkiem silikonu, który poprawia elastyczność i odporność na ścieranie [257, 258]. Jest często stosowany w aplikacjach wymagających miękkich, elastycznych i trwałych materiałów, takich jak uszczelki czy elementy ochronne [259, 260].

### **PLA z dodatkiem grafitu**

PLA z dodatkiem grafitu to przewodzący elektryczność kompozytowy materiał polimerowy, który może być używany do drukowania elementów elektronicznych, takich jak ścieżki przewodzące, sensory czy obwody drukowane [261, 262]. Łączy łatwość przetwarzania PLA z przewodzącymi właściwościami grafitu, co otwiera nowe możliwości w druku 3D elektroniki [263]. Choć jego przewodność elektryczna jest niższa niż metali, jest wystarczająca do zastosowań niskonapięciowych, takich jak drukowane czujniki czy proste obwody elektryczne [264].

### **ABS z dodatkiem nanorurek węglowych**

Kompozyt ABS z dodatkiem nanorurek węglowych jest materiałem przewodzącym elektryczność, wykorzystywanym w produkcji komponentów elektronicznych, które wymagają jednoczesnego przewodnictwa elektrycznego i zachowania wytrzymałości mechanicznej typowej dla ABS [265]. Dodatek nanorurek węglowych umożliwia stosowanie tego materiału w drukowaniu 3D elementów o właściwościach przewodzących, takich jak czujniki czy inne

urządzenia elektroniczne [266, 267]. Nanorurki węglowe dodatkowo wzmacniają materiał, poprawiając jego moduł sprężystości i odporność na uszkodzenia mechaniczne [268].

### **Polimery fluorescencyjne**

Polimery fluorescencyjne zawierają specjalne dodatki, które nadają im zdolność do emitowania światła po naświetleniu [269, 270]. Materiały te są stosowane w aplikacjach wymagających widoczności w ciemności, takich jak oznaczenia bezpieczeństwa, oświetlenie awaryjne oraz dekoracje artystyczne [271, 272]. Emitowane światło jest wynikiem procesu fluorescencji, w którym materiał pochłania energię świetlną i emituje ją w postaci widzialnego światła [273].

### **Polimery z pamięcią kształtu (SMP - ang. Shape Memory Polymers)**

Polimery z pamięcią kształtu to innowacyjne materiały, które charakteryzują się zdolnością do powrotu do uprzednio zaprogramowanego kształtu pod wpływem określonego bodźca, najczęściej temperatury [274, 275]. Po deformacji w stanie tymczasowym materiał ten powraca do swojego pierwotnego kształtu po dostarczeniu bodźca aktywującego, takiego jak ciepło, światło, pole magnetyczne lub wilgoć [276, 277]. W technologii wytwarzania addytywnego zastosowanie takich polimerów określane jest mianem druku 4D [278, 279]. Czwarty wymiar odnosi się do zdolności materiału do zmiany kształtu po zakończeniu procesu drukowania, w czasie, pod wpływem bodźców zewnętrznych [280]. Druk 4D znajduje zastosowanie w licznych dziedzinach, takich jak medycyna, gdzie umożliwia tworzenie inteligentnych implantów i struktur reagujących na zmiany temperatury ciała lub inne czynniki, a także w przemyśle lotniczym czy robotyce [281, 182].

### **3.3.3. Parametry technologiczne i optymalizacja procesu drukowania FDM**

Precyzyjna kontrola parametrów w procesie FDM jest niezbędna do uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych, fizycznych i estetycznych drukowanych części [1, 283]. Dobór parametrów jest procesem niezwykle istotnym i zarazem trudnym, wymagającym optymalizacji wielokryterialnej, obejmującej zarówno podstawowe ustawienia, jak temperatura dyszy wylączarki i stołu roboczego, grubość drukowanej warstwy czy prędkość drukowania, jak i parametry dodatkowych funkcji, takich jak temperatura komory roboczej, prędkość chłodzenia wydruku i wiele innych [55, 284].

Aby poprawić jakość i efektywność procesu drukowania 3D, nowoczesne programy do przetwarzania modeli 3D mogą wykorzystywać zaawansowane algorytmy. Algorytmy te, na podstawie danych zbieranych w czasie rzeczywistym z czujników i monitoringu procesu, automatycznie dostosowują parametry drukowania [285, 286].

Jednym z najistotniejszych wyzwań w procesie FDM jest odpowiednie przygotowanie materiału przed drukowaniem, zwłaszcza w odniesieniu do jego wilgotności [287]. Wiele filamentów z tworzyw polimerowych, takich jak PA, PETG, PLA czy PC, ma skłonność do absorbowania wilgoci z otoczenia, co prowadzi do poważnych problemów w trakcie drukowania. Wchłanianie wilgoci przez materiały polimerowe może skutkować degradacją materiału na drodze hydrolizy, czyli reakcji chemicznej, w wyniku której dochodzi do rozkładu wiązań estrowych, amidowych lub karbonatowych w strukturze polimeru [288]. Proces ten może znacząco pogorszyć właściwości mechaniczne wydruków, powodując niestabilny przepływ materiału, powstawanie pęcherzyków powietrza podczas uplastyczniania, osłabienie więzi międzywarstwowej i zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej [289].

#### **3.3.3.1. Podstawowe parametry drukowania metodą FDM**

Parametry drukowania metodą FDM mają bezpośredni wpływ na jakość, wytrzymałość oraz dokładność wymiarową uzyskiwanych wydruków [283, 290]. Optymalizacja tych parametrów jest niezbędna do uzyskania wydruków o wysokiej jakości, spełniających wymagania zarówno estetyczne, jak i mechaniczne [291, 292]. Precyzyjne dostosowanie parametrów takich jak temperatura dyszy, temperatura stołu roboczego, prędkość drukowania, grubość warstwy, prędkość chłodzenia, temperatura komory roboczej, średnica dyszy oraz

retrakcja jest procesem skomplikowanym i wymaga zaawansowanego podejścia opartego na wiedzy naukowej i doświadczeniu praktycznym [293].

### **Temperatura dyszy**

Temperatura dyszy jest jednym z najważniejszych parametrów procesu drukowania FDM, wpływającym na lepkość materiału oraz jego zdolność do łączenia się z poprzednimi warstwami [294]. Właściwie dobrana temperatura dyszy zapewnia najlepszą adhezję między warstwami, co jest kluczowe dla wytrzymałości mechanicznej wydruku przy zachowaniu stabilności jego kształtu [295]. Typowe temperatury dla różnych materiałów to: PLA: 190–220°C, ABS: 220–250°C, PETG: 220–240°C, PC: 260–310°C, a dla zaawansowanych materiałów takich jak PEEK: 350–400°C [296].

Zbyt wysoka temperatura wytłaczania może prowadzić do degradacji materiału polimerowego i powodować defekty w strukturze wydruków [63, 297]. Zbyt niska temperatura może prowadzić do niedostatecznej plastyfikacji materiału, co może skutkować słabą adhezją międzywarstwową i defektami strukturalnymi w drukowanych częściach [57].

### **Temperatura stołu roboczego**

Temperatura stołu roboczego wpływa na adhezję pierwszej warstwy do platformy drukującej oraz na wielkość skurczu i odkształceń materiału podczas stygnięcia drukowanych części [298]. Dla PLA typowa temperatura stołu roboczego wynosi około 60°C, natomiast dla ABS około 100°C [299, 300]. Dla PETG zalecana temperatura stołu roboczego wynosi około 70–90°C, dla PC 110–130°C, a dla PEEK 120–160°C [301, 302].

### **Prędkość drukowania**

Prędkość drukowania wpływa na czas potrzebny do wytworzenia części oraz na jakość powierzchni [283]. Standardowe materiały, takie jak PLA i ABS, mogą być drukowane z prędkościami od 40 do 100 mm/s [303, 304]. W przypadku technicznych materiałów, takich jak PETG i PC, prędkości drukowania są zazwyczaj mniejsze, w zakresie 30–60 mm/s, aby zapewnić odpowiednie łączenie warstw i kontrolę nad procesem [305, 306]. Mniejsze prędkości drukowania pozwalają na lepszą kontrolę nad przepływem materiału i minimalizację defektów powierzchniowych, takich jak warstwy przesunięte czy niestabilne struktury [289].

Optymalizacja prędkości drukowania jest kompromisem pomiędzy oczekiwanymi własnościami mechanicznymi drukowanego elementu a prędkością jego wytworzenia [1, 55].

### **Grubość warstwy**

Grubość warstwy w procesie FDM ma istotny wpływ na takie aspekty drukowania 3D jak estetyka powierzchni, dokładność odwzorowania cyfrowego modelu, czas potrzebny do wykonania części oraz własności wytrzymałościowe [307]. Cienkie warstwy, wynoszące około 0,1 mm lub mniej, pozwalają na uzyskanie dużej precyzji, lepszego odwzorowania detali i gładkich powierzchni [308]. Wydruki o cienkich warstwach mają mniej widocznych linii warstw, co sprawia, że są bliższe modelowi cyfrowemu [283]. Jednak stosowanie cieńszych warstw znacząco wydłuża czas drukowania, ponieważ proces wymaga nałożenia większej liczby warstw do wytworzenia modelu. Z drugiej strony, grubsze warstwy (od 0,2 mm do 0,3 mm) pozwalają na szybsze zakończenie druku, ale mogą prowadzić do pogorszenia jakości powierzchni oraz zmniejszenia dokładności odwzorowania modelu [309].

Grubość warstwy ma także wpływ na właściwości mechaniczne wydrukowanych części, poprzez ilość ciepła przekazywanego przez uplastyczniony materiał polimerowy podczas nakładania kolejnych warstw oraz rozpraszanie tego ciepła przez już wydrukowane fragmenty modelu [9, 310]. Przy nakładaniu grubszych warstw przekazywana jest większa ilość ciepła do poprzednich warstw wytwarzanej kształtki, a szybsze wytwarzanie części wpływa na czas rozpraszania tego ciepła [46, 53]. Ponadto grubość drukowanej warstwy ma wpływ na stopień krystaliczności materiałów półkrystalicznych, takich jak PLA, PA czy PETG [143]. Wysoka ilość ciepła przekazywanego w przypadku grubszych warstw może prowadzić do wydłużonego czasu chłodzenia, co w konsekwencji pozwala na rozwój krystalicznych struktur w polimerze [156]. Stopień krystaliczności ma bezpośredni wpływ na właściwości mechaniczne i termiczne materiału, takie jak wytrzymałość na rozciąganie czy odporność na odkształcenia cieplne [311, 312]. Z kolei przy cieńszych warstwach chłodzenie następuje szybciej, co może ograniczać krystalizację, prowadząc do bardziej amorficznej struktury materiału, która może charakteryzować się innymi właściwościami mechanicznymi i termicznymi [313].

### **Grubość warstwy startowej**

Grubość warstwy startowej to odległość między dyszą a platformą roboczą podczas nakładania pierwszej warstwy materiału [314, 315]. Wysokość warstwy startowej wpływa na przyczepność drukowanego modelu do platformy roboczej [316]. Zbyt mała odległość może

prowadzić do zatykania dyszy i nadmiernego spłaszczenia pierwszej warstwy, podczas gdy zbyt duża odległość może skutkować słabą adhezją pierwszej warstwy [317]. Kalibracja wysokości warstwy startowej jest zazwyczaj realizowana automatycznie lub manualnie przed każdym rozpoczęciem procesu drukowania [318].

### **Prędkość chłodzenia wymuszonego**

Prędkość chłodzenia wymuszonego materiału w czasie drukowania, zwykle poprzez nadmuch powietrza o temperaturze otoczenia, wpływa na jego właściwości mechaniczne i termiczne [319]. Szybkie chłodzenie może prowadzić do naprężeń wewnętrznych i pęknięć, podczas gdy zbyt wolne chłodzenie może powodować skurcz i odkształcenia [66]. Kontrola prędkości chłodzenia jest szczególnie ważna w przypadku drukowania materiałów takich jak PC i PETG, które wymagają precyzyjnej kontroli warunków termicznych, aby uniknąć defektów strukturalnych [320, 321]. Chłodzenie powinno być tak realizowane, aby zapewnić jednolite właściwości mechaniczne w całym wydruku. Zastosowanie odpowiednich systemów chłodzenia, takich jak wentylatory lub dmuchawy, może znacząco wpłynąć na jakość i trwałość końcowego produktu. Prędkość chłodzenia wymuszonego, podobnie jak grubość drukowanych warstw, wpływa na stopień krystaliczności półkrystalicznych materiałów polimerowych [66, 322].

### **Temperatura komory roboczej**

Przy drukowaniu wysokowytrzymałych materiałów, takich jak PEI czy PEEK, konieczne jest stosowanie w drukarkach komory roboczej, separującej środowisko drukowania od otoczenia [134, 323]. Komory drukarek mają na celu utrzymywanie wytwarzanego elementu w wyższej od otoczenia temperaturze, zwykle do 80–150°C, co minimalizuje naprężenia termiczne i odkształcenia [324]. Kontrola temperatury komory roboczej jest szczególnie ważna dla materiałów wymagających wysokich temperatur przetwarzania [325, 326].

### **Prędkość przepływu powietrza w komorze roboczej**

Prędkość przepływu powietrza w komorze roboczej wpływa na równomierność rozprowadzania ciepła i efektywność chłodzenia wydrukowanych części [327]. Kontrola przepływu powietrza jest istotna dla uniknięcia lokalnych przegrzań lub przechłodzeń w wytwarzanych elementach, co wpływa na ich właściwości mechaniczne [328].

### **Średnica dyszy**

Średnica dyszy wpływa na szczegółowość wydruku oraz na jego wytrzymałość mechaniczną [290, 329]. Mniejsze średnice dyszy (0,2–0,4 mm) pozwalają na uzyskanie bardziej szczegółowych wydruków, ale mogą wydłużać czas drukowania [283]. Większe średnice dyszy (0,5–1,0 mm) skracają czas drukowania i mogą być używane do drukowania większych, mniej szczegółowych modeli [55]. Dla zaawansowanych materiałów, takich jak PEEK+CF, konieczne mogą być dysze wykonane z materiałów odpornych na ścieranie, takich jak wolfram czy rubin, aby zapobiec zużyciu spowodowanemu przez włókna, m.in. szklane i węglowe oraz napelniacze o dużej twardości [62, 81].

### **Retrakcja**

Retrakcja to wycofanie filamentu w wytłaczarce w celu zapobiegania wyciekom materiału podczas ruchów jałowych drukarki (zmiany miejsca wytłaczania materiału polimerowego) [330, 331]. Optymalne ustawienia parametrów kontrolujących retrakcję, tj. jej ilość i prędkość, zależą od rodzaju filamentu oraz geometrii modelu [332, 333]. Nieprawidłowe ustawienia mogą prowadzić do tzw. nitkowania (ang. stringing), zatykania dyszy lub niewłaściwego nałożenia warstw [334, 335]. Dla materiałów takich jak PLA, PETG i ABS, aby zapewnić czyste i precyzyjne wydruki, retrakcja musi być starannie dobrana doświadczalnie. Kontrola retrakcji wpływa na minimalizację artefaktów powierzchniowych i jakość wykończenia powierzchni. Typowe prędkości retrakcji wynoszą od 20 mm/s do 70 mm/s, a długość drogi wycofania filamentu przy retrakcji zwykle mieści się w granicach 0,5 do 8 mm [337, 338].

#### **3.3.3.2. Programowa optymalizacja procesu drukowania FDM**

Oprogramowanie do przetwarzania modeli 3D (ang. slicer software) przekształca cyfrowe modele 3D w instrukcje dla drukarki 3D, zwane G-kodem, które zawierają szczegółowe dane na temat ruchów drukarki oraz parametrów procesu drukowania [339, 340]. W ostatnich latach obserwuje się znaczący rozwój algorytmów optymalizacyjnych stosowanych w oprogramowaniu do przetwarzania modeli 3D [341, 342]. Algorytmy te mają na celu nie tylko poprawę jakości i efektywności procesu drukowania, ale również optymalizację parametrów drukowania w czasie rzeczywistym [343].



Wprowadzenie tych algorytmów poprawiło jakość i wydajność druku 3D metodą FDM, umożliwiając realizację bardziej zaawansowanych i złożonych projektów [1]. Poniżej przedstawione zostaną najczęściej stosowane procedury optymalizacyjne.

### **Adaptacyjna wysokość warstwy**

Adaptacyjna wysokość warstwy to nazwa funkcji, której algorytm dynamicznie dostosowuje grubość warstwy w zależności od geometrii modelu [344]. Cienkie warstwy są stosowane w miejscach wymagających wysokiej precyzji, podczas gdy grubsze warstwy są używane w obszarach mniej szczegółowych [346]. Zmiana grubości warstwy jest realizowana poprzez regulację odległości dyszy wytłaczającej uplastyczniony materiał od wytwarzanego modelu. Kiedy drukarka przechodzi nad bardziej skomplikowanymi obszarami modelu, wytłaczarka nakłada cieńsze warstwy. Algorytm w oprogramowaniu do cięcia na warstwy modelu CAD (ang. slicer) analizuje geometrię modelu i automatycznie dostosowuje wysokość każdego przemieszczenia głowicy. Dzięki temu zmiany w grubości warstw są płynne i nie wpływają na ciągłość procesu druku [345]. Drukarki wyposażone w adaptacyjną wysokość warstwy wykonują te zmiany na podstawie wcześniej zaprogramowanych parametrów, takich jak maksymalna i minimalna grubość warstwy, co zapewnia optymalną równowagę między precyzją a szybkością produkcji [15].

### **Dynamiczne dostosowanie prędkości**

Dynamiczne dostosowanie prędkości to nazwa funkcji, której algorytm automatycznie zmienia prędkość drukowania w zależności od złożoności geometrii i aktualnych warunków drukowania [347]. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie optymalnej jakości powierzchni i wytrzymałości mechanicznej wydruków [323]. Algorytm ten uwzględnia zmienne takie jak kształt modelu, rodzaj materiału oraz specyficzne właściwości termiczne, co pozwala na bardziej precyzyjną kontrolę procesu [348].

### **Algorytmy kontroli temperatury**

Nowoczesne oprogramowanie do przetwarzania modeli 3D potrafi dynamicznie sterować temperaturą dyszy i stołu roboczego w zależności od drukowanej geometrii i używanego materiału [349]. Tego typu algorytmy pozwalają na lepszą kontrolę nad procesem chłodzenia, minimalizację naprężeń termicznych oraz redukcję ryzyka powstawania defektów

strukturalnych [350]. Przykładem może być algorytm, który automatycznie obniża temperaturę dyszy podczas drukowania cienkich ścianek, aby zapobiec przegrzewaniu materiału [351, 352].

### **Optymalizacja struktur podporowych**

Algorytmy optymalizujące struktury podporowe generują minimalną ilość podpór niezbędnych do utrzymania stabilności modelu podczas drukowania [354, 355]. Tego typu optymalizacja redukuje czas i materiał potrzebny na usunięcie podpór oraz poprawia jakość powierzchni wydruku [356, 357]. Dzięki zaawansowanym algorytmom możliwe jest tworzenie struktur podporowych, które są łatwiejsze do usunięcia, pozostawiających mniej śladów na gotowym wydruku [358, 359].

### **Planowanie ścieżek**

Zaawansowane algorytmy planowania ścieżek optymalizują trajektorię ruchu dyszy, aby zminimalizować czas drukowania i poprawić jakość powierzchni drukowanych części [15, 348]. Algorytmy te uwzględniają złożoność geometrii oraz specyficzne właściwości materiału, co pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie czasu i materiałów [360]. Planowanie ścieżek obejmuje również optymalizację kierunków drukowania, co może znacząco wpłynąć na wytrzymałość mechaniczną wydruku [361].

### **Algorytmy adaptacyjne**

Algorytmy adaptacyjne w programach do przetwarzania modeli 3D potrafią dostosować parametry druku w czasie rzeczywistym na podstawie danych zbieranych z czujników i monitoringu procesu [343]. Na przykład, algorytmy te mogą dostosowywać prędkość i temperaturę w odpowiedzi na zmiany warunków środowiskowych, takich jak wahania temperatury otoczenia czy wilgotność [347]. Takie dynamiczne dostosowanie parametrów zapewnia lepszą, powtarzalną jakość wydruków [323].

### **3.3.3.3. Rola kondycjonowania filamentu w technologii FDM**

Higroskopijność, czyli zdolność do absorpcji wilgoci z otoczenia, jest powszechną cechą wielu polimerów stosowanych w technologii FDM [79, 362]. Wilgoć zawarta w filamencie może prowadzić do licznych problemów, które znacząco wpływają na jakość wydruków 3D [363].

Problemy te obejmują tworzenie się pęcherzyków pary wodnej w wyniku wysokiej temperatury podczas wytłaczania, niestabilny przepływ uplastycznionego materiału, osłabienie adhezji międzywarstwowej, a w konsekwencji obniżenie właściwości mechanicznych wydruków [364]. Zjawiska te mogą skutkować także defektami powierzchniowymi, takimi jak wgłębienia, dziury i nieregularności, które pogarszają estetykę i integralność strukturalną wydruków [365]. Filamenty takie jak PLA, PETG, PC, PA, PVA czy TPU są szczególnie narażone na absorpcję wilgoci, co czyni proces kondycjonowania niezwykle istotnym elementem przygotowania materiału do druku [366].

Obecność wilgoci w filamencie może również prowadzić do hydrolizy, czyli chemicznego rozkładu polimeru pod wpływem wody, co osłabia właściwości mechaniczne materiału [288]. Ponadto wilgoć osłabia adhezję międzywarstwową, co obniża wytrzymałość mechaniczną wydruków [9]. Słaba adhezja prowadzi do rozwarstwienia wydruku, czyniąc go bardziej podatnym na pęknięcie i inne uszkodzenia mechaniczne. Obecność wilgoci może również powodować skurcz i odkształcenia materiału podczas chłodzenia, co wpływa na dokładność wymiarową końcowego produktu [45].

### **Proces suszenia filamentu**

Aby zapewnić wysoką jakość wydruków 3D metodą FDM, należy odpowiednio przygotować filament przed drukowaniem, minimalizując wpływ wilgoci na proces przetwarzania polimeru [367, 368]. Proces ten obejmuje dwa etapy: suszenie filamentu oraz przechowywanie w warunkach kontrolowanej wilgotności [369, 370]. Do przechowywania filamentów najczęściej stosuje się hermetyczne pojemniki z pochłaniaczami wilgoci, takimi jak żel krzemionkowy [371].

- PLA powinien być suszony w temperaturze 40–50°C przez 4–6 godzin [372].
- PETG zaleca się suszyć w temperaturze 65–75°C przez 4–6 godzin [373].
- PC powinien być suszony w temperaturze 100–120°C przez 4–6 godzin [374].
- PA wymaga suszenia w temperaturze około 70–90°C przez co najmniej 4–6 godzin [375]. Poliamid jest bardzo higroskopijny i może szybko wchłaniać wilgoć z powietrza, dlatego konieczne jest przechowywanie go w szczelnie zamkniętych pojemnikach z pochłaniaczami wilgoci [376].

- PVA należy suszyć w temperaturze około 50–60°C przez 2–4 godziny [377]. PVA jest materiałem szczególnie podatnym na absorpcję wilgoci ze względu na swoją rozpuszczalność w wodzie [378].
- TPU powinno być suszone w temperaturze 45–55°C przez 4–6 godzin [379].
- PEEK wymaga suszenia w temperaturze 120–150°C przez co najmniej 4–6 godzin [380]. Ze względu na wysoką higroskopijność i specyficzne właściwości mechaniczne, PEEK wymaga szczególnej uwagi podczas przygotowania [381].

### **Metody suszenia filamentów**

Do suszenia filamentów w procesach druku 3D stosuje się zaawansowane urządzenia, które umożliwiają precyzyjną kontrolę parametrów suszenia, zapewniając optymalną jakość przetwarzanych materiałów polimerowych [382, 383]. Wyróżnić można kilka typów urządzeń o różnym stopniu zaawansowania technologicznego:

**Suszarki do filamentów:** Są to urządzenia wyposażone w grzałki oraz wentylatory, które zapewniają równomierne rozpraszanie ciepła po całej powierzchni filamentu [384]. Kontrola temperatury oraz wilgotności w tego typu suszarkach umożliwia skuteczne usuwanie wilgoci [385]. Dzięki odpowiednio zaprojektowanym systemom cyrkulacji powietrza, suszarki te minimalizują ryzyko przegrzewania filamentu, co może prowadzić do jego degradacji [386].

**Komory suszące:** Są to bardziej zaawansowane urządzenia, wyposażone w czujniki higrometryczne oraz systemy precyzyjnej regulacji wilgotności i temperatury [387]. Tego rodzaju komory pozwalają na ścisłą kontrolę warunków suszenia, co jest szczególnie istotne przy pracy z zaawansowanymi materiałami kompozytowymi lub higroskopijnymi, takimi jak PA czy PEEK [388].

**Suszarki próżniowe:** W urządzeniach tych stosuje się technologię próżniową, która umożliwia obniżenie temperatury wrzenia wody zawartej w polimerach, co pozwala na skuteczne usuwanie wilgoci przy niższych temperaturach [389]. Jest to szczególnie korzystne dla materiałów wrażliwych na wysoką temperaturę, takich jak PLA czy TPU, które mogą ulec degradacji przy dłuższej ekspozycji na ciepło [390]. Suszarki próżniowe charakteryzują się również krótszym czasem suszenia, co przekłada się na większą efektywność procesu przygotowania filamentu do druku [391].

### **3.3.4. Wyzwania i ograniczenia technologii FDM**

Technologia FDM (Fused Deposition Modeling) jest szeroko stosowana ze względu na swoje liczne zalety, jednak stawia przed użytkownikami szereg wyzwań i ograniczeń związanych z jakością, wytrzymałością oraz zastosowaniem drukowanych części [1, 43]. Rozwiązanie tych problemów wymaga analizy procesów drukowania, precyzyjnego dobrania parametrów oraz zastosowania odpowiednich materiałów [290, 392].

Jednym z najważniejszych wyzwań technologii FDM jest zapewnienie odpowiedniej adhezji między warstwami [9, 45]. Wytrzymałość mechaniczna drukowanych części w dużej mierze zależy od siły wiązań między kolejnymi warstwami materiału [289]. Słaba adhezja może prowadzić do delaminacji, pęknięć oraz zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie [292]. Podstawowymi czynnikami wpływającymi na adhezję międzywarstwową są temperatura dyszy, prędkość drukowania, grubość drukowanej warstwy oraz prędkość chłodzenia [295, 310]. Optymalizacja tych parametrów jest niezbędna dla uzyskania trwałych i wytrzymałych wydruków. Wysokowytrzymałe materiały, takie jak PEEK, ze względu na swoje właściwości termiczne i mechaniczne, wymagają precyzyjnej kontroli parametrów drukowania, aby zapewnić odpowiednią adhezję międzywarstwową [323, 393].

Kolejnym istotnym problemem w technologii FDM jest skurcz materiału podczas stygnięcia [394]. Termoplasty mają tendencję do skurczu podczas chłodzenia, co może prowadzić do odkształceń, wypaczeń i odklejania się modelu od platformy roboczej [395, 396]. Skurcz materiału może być minimalizowany poprzez zastosowanie podgrzewanej platformy roboczej i zamkniętej komory roboczej [397]. Mimo to skurcz pozostaje wyzwaniem, szczególnie przy drukowaniu dużych i złożonych geometrii [398]. W przypadku materiałów wysokowytrzymałych, takich jak PEEK, kontrola skurczu jest jeszcze bardziej skomplikowana ze względu na wysoką temperaturę topnienia i specyficzne właściwości termiczne [399, 400].

Drukowanie metodą FDM charakteryzuje się widocznymi liniami warstw, co może wpływać na estetykę oraz właściwości powierzchni wydrukowanych części [401]. Grubość warstw, prędkość drukowania oraz ustawienia wytłaczarki mają wpływ na gładkość powierzchni i widoczność warstw [307]. Aby uzyskać lepszą jakość powierzchni, konieczne może być zastosowanie dodatkowych procesów obróbki, takich jak szlifowanie, polerowanie czy chemiczne wygładzanie powierzchni [2]. Dodatkowe operacje obróbki zwiększają czas i koszty

produkcji, jednak mogą być niezbędne do osiągnięcia wymaganych standardów jakości powierzchni [402].

Technologia FDM ma ograniczenia w zakresie drukowania bardzo złożonych geometrii bez zastosowania struktur podporowych [354, 355]. Drukowanie nawisów, mostów i innych złożonych kształtów wymaga użycia struktur podporowych, które muszą być później usunięte [403]. Struktury podporowe mogą wpływać na jakość powierzchni i wymagać dodatkowej obróbki [356]. Ponadto usuwanie struktur podporowych z wnętrza zamkniętych przestrzeni może być trudne i czasochłonne [358].

Precyzja i dokładność wymiarowa drukowanych części zależy od wielu czynników, takich jak kalibracja drukarki, jakość filamentu, ustawienia parametrów drukowania oraz warunki środowiskowe [308, 404]. Wąskie pola tolerancji wymiarowych mogą być trudne do osiągnięcia, szczególnie w przypadku dużych modeli [309]. Kalibracja drukarki, regularna konserwacja oraz optymalizacja parametrów drukowania są kluczowe dla uzyskania dokładnych wymiarowo wydruków [405, 406].

Chociaż technologia FDM wykorzystuje szeroką gamę materiałów, wciąż istnieją ograniczenia w dostępności materiałów o specjalnych właściwościach, takich jak wysokie temperatury topnienia, wyjątkowa odporność chemiczna czy przewodnictwo elektryczne [5, 407]. Nowe materiały są ciągle rozwijane, ale ich dostępność i koszty mogą być ograniczeniem w niektórych aplikacjach [293]. PEEK i jego kompozyty, mimo swoich zalet, są nadal drogie i wymagają specjalistycznego sprzętu do drukowania, co ogranicza ich powszechne zastosowanie [408].

Wiele filamentów, takich jak PA i PVA, jest higroskopijnych, co oznacza, że pochłaniają wilgoć z otoczenia [409]. Wilgoć w filamencie może prowadzić do problemów z wytłaczaniem, pęcherzyków powietrza oraz osłabienia adhezji międzywarstwowej [410, 411]. Filamenty muszą być przechowywane w suchych warunkach i suszone przed drukowaniem, co może być uciążliwe i czasochłonne [412]. W przypadku PEEK wilgoć może znacząco wpływać na jakość druku, dlatego filament musi być odpowiednio przygotowany przed każdym użyciem [380, 388].

Mimo że technologia FDM jest relatywnie tania w porównaniu do innych metod wytwarzania addytywnego, koszty takie jak zużycie energii, konserwacja drukarki oraz koszty materiałów sumują się [15, 413]. Czas drukowania, zwłaszcza przy dużej dokładności i cienkich warstwach, może być długi, co wpływa na efektywność produkcji [414, 415]. Drukowanie zaawansowanych materiałów, takich jak PEEK, dodatkowo zwiększa koszty operacyjne ze

względu na wyższe temperatury i bardziej zaawansowany sprzęt wymagany do drukowania [416].

W przypadku awarii lub uszkodzeń podczas drukowania naprawa części może być skomplikowana i kosztowna [417]. Często, na skutek błędów w procesie drukowania, konieczne jest ponowne drukowanie całego modelu, co zwiększa koszty i czas produkcji [418]. Techniki regeneracji i naprawy części drukowanych metodą FDM są nadal w fazie rozwoju i nie zawsze są skuteczne. W przypadku drukowania PEEK regeneracja uszkodzonych części może być jeszcze bardziej skomplikowana ze względu na specyficzne właściwości materiału [419].

Dla materiałów o wysokiej temperaturze topnienia, takich jak PEEK, podstawowe znaczenie ma kontrola warunków w komorze roboczej [416]. Stabilna temperatura i przepływ powietrza wewnątrz komory są niezbędne do minimalizacji naprężeń termicznych i odkształceń [325, 393]. Brak właściwej kontroli tych parametrów może prowadzić do znacznego pogorszenia jakości i wytrzymałości mechanicznej drukowanych części [420].

Drukowanie zaawansowanych materiałów, takich jak PEEK+CF, wiąże się z wyższym zużyciem narzędzi, szczególnie dysz i systemów podających filament [81, 421]. Włókna węglowe są abrazyjne i mogą szybko zużywać standardowe dysze, co wymaga stosowania specjalnych, kosztownych dysz wykonanych z materiałów odpornych na ścieranie, takich jak węgiel wolframu czy rubin [422, 423]. Konieczność częstej wymiany narzędzi eksploatacyjnych zwiększa koszty operacyjne i utrzymania drukarek 3D [1].

Jednorodność chemiczna i strukturalna filamentu jest warunkiem uzyskania wysokiej jakości wydruków [63, 424]. Niejednorodne filamenty mogą prowadzić do problemów z wytłaczaniem, takich jak zatykanie dyszy, niestabilny przepływ materiału i wahania grubości warstw [283, 425]. W przypadku zaawansowanych materiałów, takich jak PEEK, jednorodność materiału jest jeszcze bardziej istotna ze względu na wysokie wymagania mechaniczne i termiczne [426].

Technologia FDM, mimo swoich licznych zalet i szerokiego zakresu zastosowań, stawia przed użytkownikami szereg wyzwań i ograniczeń. Optymalizacja parametrów procesu, wybór odpowiednich materiałów oraz zastosowanie dodatkowych technik obróbki mogą pomóc w przezwyciężeniu tych trudności i uzyskaniu wysokiej jakości wydruków [2]. Kontynuowanie badań nad nowymi materiałami, technikami i procesami przyczyni się do dalszego rozwoju i doskonalenia technologii FDM [341].

### **3.3.5. Zastosowania technologii FDM**

Zastosowania technologii FDM są niezwykle zróżnicowane, co wynika z jej wszechstronności, dostępności i możliwości przetwarzania szerokiej gamy materiałów [1, 407]. Wykorzystanie tej metody druku 3D obejmuje zarówno sfery przemysłowe, jak i hobbystyczne, najczęściej prototypowanie, produkcję części funkcjonalnych oraz zastosowania medyczne [427]. W niniejszym rozdziale omówione zostaną główne obszary zastosowań technologii FDM, ze szczególnym uwzględnieniem specyficznych wymagań i korzyści związanych z użyciem zaawansowanych materiałów, takich jak PEEK i jego kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym (PEEK+CF) [408].

#### **3.3.5.1. Prototypowanie**

Technologia FDM jest niezwykle wartościowa w procesie szybkiego prototypowania, umożliwiając szybkie przejście od projektowania do testowania funkcjonalnych prototypów [15, 417]. Dzięki możliwości szybkiego wytworzenia fizycznych modeli na podstawie cyfrowych projektów CAD firmy mogą wprowadzać kolejne poprawki i optymalizować projekt przed rozpoczęciem produkcji masowej [2]. Branże takie jak motoryzacja, lotnictwo, elektronika i produkty konsumenckie korzystają z możliwości szybkiego wprowadzania zmian w projektach, co znacząco skraca czas wprowadzania produktów na rynek [428, 429]. FDM umożliwia tworzenie prototypów o złożonych geometriach, które są trudne lub niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami [309]. Zaawansowane materiały, takie jak PEEK, pozwalają na tworzenie prototypów poddawanych testom kinematycznym w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, co zwiększa wartość procesu [181].

Choć FDM odgrywa istotną rolę w szybkim prototypowaniu, to posiada pewne ograniczenia, które wpływają na jej zastosowanie w tworzeniu prototypów funkcjonalnych [289]. Jednym z nich jest anizotropia wytrzymałości, związana z relatywnie słabą więzią międzywarstwową w wydrukowanych częściach [295]. Innym ograniczeniem jest precyzja odwzorowania bardzo drobnych detali i wymóg dodatkowej obróbki postprodukcyjnej, takiej jak szlifowanie czy polerowanie [43, 404]. Choć istnieją materiały o wysokiej wytrzymałości, takie jak PEEK napelniony włóknem węglowym, to wciąż nie dorównują one właściwościom



materiałów stosowanych w tradycyjnych metodach produkcji, takich jak formowanie wtryskowe czy obróbka skrawaniem [430, 431].

### **3.3.5.2. Produkcja części funkcjonalnych**

FDM jest stosowana do produkcji części funkcjonalnych, które mogą być używane jako końcowe produkty, szczególnie w produkcji małoseryjnej [86, 227]. Tradycyjne metody wytwarzania są często zbyt kosztowne lub czasochłonne, dlatego FDM staje się atrakcyjną alternatywą [432]. Części funkcjonalne wytwarzane metodą FDM znajdują zastosowanie w produkcji narzędzi, uchwytów, elementów mocujących i części zamiennych [433, 434]. PEEK, dzięki swoim wyjątkowym właściwościom mechanicznym, chemicznym i termicznym, jest materiałem do produkcji części wymagających dużej wytrzymałości i odporności na ciężkie warunki [426, 435]. Kompozyty PEEK wzmocnione włóknem węglowym (PEEK+CF) oferują dodatkową sztywność i wytrzymałość, co czyni je odpowiednimi do zastosowań w lotnictwie, motoryzacji i przemyśle naftowym [81].

### **3.3.5.3. Zastosowania medyczne**

Technologia FDM odgrywa istotną rolę w nowoczesnej medycynie, umożliwiając produkcję spersonalizowanych implantów, narzędzi chirurgicznych oraz modeli anatomicznych [436]. PEEK, ze względu na swoje wyjątkowe właściwości mechaniczne, termiczne i chemiczne, jest szeroko stosowany w medycynie [181, 183]. Jest biokompatybilny, odporny na działanie chemikaliów i posiada wysoką wytrzymałość mechaniczną, co czyni go odpowiednim materiałem na implanty kostne, takie jak kręgi, płytki do stabilizacji złamań oraz elementy endoprotez stawowych [48, 437]. Drukowanie FDM pozwala na tworzenie precyzyjnych modeli anatomicznych na podstawie danych z obrazowania medycznego, co jest niezwykle pomocne w planowaniu i symulacji skomplikowanych operacji chirurgicznych [176, 220]. Modele te są wykorzystywane do szkolenia chirurgów, co znacznie poprawia ich umiejętności i przygotowanie do rzeczywistych zabiegów [177]. Ponadto drukowanie FDM umożliwia produkcję narzędzi chirurgicznych dostosowanych do specyficznych potrzeb operacji, co zwiększa precyzję i efektywność zabiegów [438, 439].

#### **3.3.5.4. Zastosowania w przemyśle lotniczym i kosmicznym**

W przemyśle lotniczym technologia FDM znajduje zastosowanie w produkcji lekkich, ale wytrzymałych części konstrukcyjnych oraz narzędzi montażowych [1, 440]. PEEK oraz jego kompozyty wzmacniane włóknem węglowym (PEEK+CF) są szczególnie cenione za swoją wytrzymałość mechaniczną, odporność na wysokie temperatury i korozję oraz małą masę [441, 442]. Drukowanie FDM pozwala na szybkie prototypowanie oraz produkcję małoseryjną części lotniczych, takich jak uchwyty, osłony, elementy konstrukcyjne oraz kanały przewodów [134]. FDM umożliwia również produkcję narzędzi i przyrządów wykorzystywanych w procesach montażowych i konserwacyjnych, co przyspiesza czas realizacji oraz obniża koszty produkcji [394].

Technologia ta znalazła również zastosowanie w przemyśle kosmicznym, gdzie jest wykorzystywana do produkcji części, narzędzi oraz elementów statków kosmicznych [443, 444]. PEEK, ze względu na swoje właściwości, takie jak odporność na promieniowanie kosmiczne, niska masa i wysoka wytrzymałość, jest odpowiednim materiałem do zastosowań w przestrzeni kosmicznej [445, 446]. Drukowanie FDM umożliwia produkcję części na pokładzie statków kosmicznych, co jest niezwykle cenne w misjach długoterminowych, gdzie konieczność przewożenia dużych zapasów części zamiennych jest niepraktyczna [447, 448]. Technologia ta pozwala na szybkie wytwarzanie narzędzi i części zamiennych na żądanie, co znacząco zwiększa elastyczność i autonomię misji kosmicznych. Drukowanymi modelami mogą być zarówno proste narzędzia, jak i złożone komponenty strukturalne [449].

#### **3.3.5.5. Zastosowania w przemyśle naftowym i gazowym**

W przemyśle naftowym i gazowym technologia FDM zyskuje na znaczeniu dzięki możliwościom drukowania z zaawansowanych materiałów, takich jak PEEK, które są odporne na ciężkie warunki, w tym wysokie ciśnienie, temperaturę i agresywne chemikalia [450, 451]. FDM umożliwia produkcję komponentów, takich jak uszczelki, zawory, obudowy sensorów oraz elementy pomp i kompresorów [452, 453]. Drukowanie FDM bezpośrednio na platformach wiertniczych redukuje czas przestojów i koszty logistyczne związane z dostarczaniem części zamiennych [454]. Możliwość drukowania części o złożonych kształtach z zaawansowanych

---

materiałów polimerowych pomaga w zapewnieniu szczelności i niezawodności systemów naftowych [455].

### **3.3.5.6. Zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym**

W przemyśle motoryzacyjnym FDM jest wykorzystywana do produkcji prototypów, części zamiennych oraz narzędzi montażowych [456, 457]. Materiały takie jak PEEK i jego kompozyty są stosowane do produkcji części, które muszą wytrzymywać wysokie temperatury i obciążenia mechaniczne, takie jak elementy silników, systemy wydechowe i komponenty układów hamulcowych [408, 458]. FDM umożliwia szybkie prototypowanie oraz produkcję małoseryjną, co przyspiesza procesy projektowania i testowania nowych rozwiązań [459]. Technologia ta pozwala na redukcję masy pojazdów, co przekłada się na oszczędność paliwa i zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> [460, 461]. Drukowane części mogą być zoptymalizowane pod kątem wytrzymałości i masy, co wpływa na poprawę wydajności i efektywności pojazdów [394].

### **3.3.5.7. Inne zastosowania technologii FDM**

Technologia FDM znajduje zastosowanie w wielu innych branżach i dziedzinach [2, 462]. W przemyśle elektronicznym jest wykorzystywana do produkcji obudów, uchwytów, złączy i innych części wymagających precyzji i wytrzymałości [463]. PEEK, dzięki swoim właściwościom izolacyjnym i odporności na wysokie temperatury, jest idealnym materiałem do produkcji elementów elektronicznych [426, 464]. W edukacji drukarki 3D są wykorzystywane do nauczania podstaw projektowania i wytwarzania przyrostowego, rozwijając umiejętności praktyczne w zakresie projektowania i inżynierii [465, 466]. FDM jest również popularne wśród hobbystów, którzy realizują własne projekty, takie jak modele do gier, elementy dekoracyjne czy części zamienne [467].

W branży architektonicznej i budowlanej FDM jest stosowane do tworzenia modeli architektonicznych, makiet oraz elementów dekoracyjnych, pomagając architektom w wizualizacji projektów [227, 468]. Technologia ta umożliwia także tworzenie niestandardowych elementów budowlanych [469]. W branży jubilerskiej i modowej FDM umożliwia tworzenie prototypów biżuterii, akcesoriów oraz elementów odzieży, przyspieszając proces projektowania

i produkcji [470, 471]. W branży spożywczej specjalne drukarki 3D mogą być używane do tworzenia złożonych wzorów z materiałów jadalnych, takich jak czekolada, marcepan czy pasty cukrowe [472].

### **3.4. Techniki poprawy adhezji międzywarstwowej w drukowaniu metodą FDM**

Adhezja międzywarstwowa jest czynnikiem bezpośrednio wpływającym na własności wytrzymałościowe wydruków FDM. Słaba adhezja międzywarstwowa może prowadzić do delaminacji, zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie oraz osłabienia trwałości części. Obecnie obserwuje się intensywny rozwój badań technik mających na celu poprawę adhezji międzywarstwowej, które można zastosować w procesie FDM. Poniżej przedstawiono szczegółowy przegląd tych technik, z uwzględnieniem modyfikacji powierzchniowych, dodawania środków adhezyjnych, optymalizacji parametrów procesu drukowania, technik podgrzewania międzywarstwowego oraz drukowania w kontrolowanej atmosferze.

#### **3.4.1. Teorie adhezji i ich znaczenie w drukowaniu 3D**

Adhezja, czyli zdolność różnych materiałów do przylegania do siebie pod wpływem sił międzycząsteczkowych, odgrywa bardzo ważną rolę w wielu procesach technologicznych, w tym w drukowaniu 3D metodą FDM [473]. Zrozumienie mechanizmów adhezji jest niezbędne do właściwej optymalizacji parametrów druku, przekładającej się na poprawę wytrzymałości i jakości wytwarzanych elementów [474]. Niniejszy rozdział szczegółowo omawia główne teorie adhezji i ich znaczenie w kontekście drukowania 3D.

Mechaniczne, elektrostatyczne, dyfuzyjne i fizyczno-chemiczne mechanizmy adhezji oferują różne podejścia do poprawy przyczepności międzywarstwowej [475]. Zastosowanie zaawansowanych technik druku i modyfikacji powierzchni, takich jak plazmowe lub chemiczne modyfikowanie powierzchni, dodawanie polimerów lub nanocząstek adhezyjnych, optymalizacja parametrów procesu drukowania, a także podgrzewanie międzywarstwowe różnymi technologiami, pozwala na osiągnięcie lepszych własności wytrzymałościowych wydrukowanych części w przypadku wielu materiałów polimerowych stosowanych w drukowaniu FDM, a zwłaszcza wysokiej wytrzymałości takich jak PEEK [400].

W drukowaniu FDM ustawienie wielu różnych parametrów procesu może wpływać na adhezję międzywarstwową. Temperatury wytłaczania i komory roboczej są krytyczne, ponieważ wpływają na stopień uplastycznienia materiału oraz jego zdolność do penetracji w poprzednią warstwę [310, 323]. Badania wykazały, że optymalizacja tych temperatur, wraz z kontrolą prędkości druku i szybkości chłodzenia, może znacznie poprawić jakość wiązania międzywarstwowego [9].

### **3.4.1.1. Mechaniczna teoria adhezji**

Mechaniczna teoria adhezji, rozwinięta przez McBaina, zakłada, że siła połączeń adhezyjnych wynika z mechanicznego zakotwiczenia materiału w mikroskopijnych nierównościach powierzchni [473]. W technologii FDM warstwy termoplastycznego materiału są nakładane sekwencyjnie, a wytrzymałość międzywarstwową zależy od tego, jak skutecznie materiał zakotwiczony się w strukturach poprzedniej warstwy [474]. Istotną rolę w tym procesie odgrywa chropowatość powierzchni, gdyż zwiększa powierzchnię kontaktu i umożliwia lepsze mechaniczne zakotwiczenie. Proces ten wspomagają odpowiednio dobrane parametry, takie jak temperatura i prędkość wytłaczania, które wpływają na płynność materiału oraz jego zdolność do penetracji w warstwę uprzednio nałożoną [294].

W ramach poszukiwania metod poprawy więzi międzywarstwowej w technologii FDM badane są różne mechaniczne techniki wspomagające ten proces. Jedną z takich metod jest stosowanie wałków dociskowych, które bezpośrednio po nałożeniu warstwy dociskają ją do poprzedniej, zwiększając fizyczny kontakt międzywarstwowy oraz redukując pory powietrzne, które mogłyby osłabiać połączenie [478]. Przykładem zastosowania tej technologii jest modyfikacja FDM przez Yang i współpracowników [479], w której do docisku materiału stosuje się podgrzewany wałek. Wałek dociskowy pozwala na dokładniejsze przyleganie warstw, co przekłada się na poprawę parametrów mechanicznych wydruków [480].

Kolejną mechaniczną metodą poprawy więzi międzywarstwowej jest wibracyjne wspomaganie procesu wytłaczania, polegające na wprowadzaniu wibracji mechanicznych do dyszy drukującej [481]. Wibracje zwiększają ruchliwość molekularną cząsteczek materiału, co sprzyja lepszemu mechaniczno-molekularnemu zakotwiczeniu między warstwami. W badaniach przeprowadzonych przez Li i współpracowników [482] zaobserwowano poprawę wytrzymałości mechanicznej próbek dzięki intensyfikacji procesu interdyfuzji i lepszemu kontaktowi między

sąsiednimi warstwami. Metoda ta nadal pozostaje na etapie badań i nie została jeszcze wdrożona na szeroką skalę w przemyśle.

Inna rozwijana technologia to ultradźwiękowe wspomaganie spajania warstw, w której do poprawy kontaktu między warstwami uplastycznionego polimeru stosuje się drgania ultradźwiękowe wysokiej częstotliwości [483]. Ultradźwięki umożliwiają lepsze "rozluźnienie" struktury polimeru na granicy warstw, co pozwala na zwiększenie powierzchni kontaktu i poprawę wytrzymałości na ścinanie oraz rozciąganie [484]. Podobnie jak w przypadku wibracji, technologia ta jest w fazie badań i wymaga dalszych testów przed ewentualnym wdrożeniem w przemyśle [485].

### **3.4.1.2. Elektrostatyczna teoria adhezji**

Elektrostatyczna teoria adhezji tłumaczy procesy adhezyjne za pomocą oddziaływań elektrostatycznych pomiędzy łączonymi materiałami [486]. Zjawisko to jest szczególnie widoczne, gdy dwa różne materiały stykają się i wymieniają ładunki elektryczne, co prowadzi do powstania oddziaływania elektrostatycznego. Teoria ta opiera się na różnicy pracy wyjścia elektronów pomiędzy powierzchniami. Kiedy materiały o różnej pracy wyjścia są w kontakcie, zachodzi transfer elektronów od materiału o niższej energii pracy wyjścia do tego o wyższej energii, co powoduje naładowanie powierzchni i powstanie sił elektrostatycznych, które przyciągają obie powierzchnie do siebie [487, 488].

W technologii druku 3D FDM elektrostatyczna teoria adhezji ma ograniczone zastosowanie ze względu na niskie przewodnictwo elektryczne polimerów. Jednakże w przypadku pewnych materiałów, takich jak kompozyty wzmacniane włóknem węglowym czy polimery przewodzące, siły elektrostatyczne mogą przyczynić się do poprawy więzi międzywarstwowej [489].

Ponadto stosuje się obróbkę koronową czy plazmową, które mogą prowadzić do zwiększenia liczby ładunków na powierzchni materiału [490]. Takie procesy modyfikują powierzchnie polimerów, tworząc na nich aktywne centra, które mogą prowadzić do silniejszych oddziaływań elektrostatycznych na styku materiałów, a tym samym do poprawy ich więzi [491].

### **3.4.1.3. Dyfuzyjna teoria adhezji**

Dyfuzyjna teoria adhezji wyjaśnia proces tworzenia silnych połączeń adhezyjnych poprzez przenikanie się cząsteczek materiałów w miejscu ich kontaktu. Zjawisko to zachodzi, gdy dwa materiały znajdują się w bezpośrednim kontakcie w warunkach termodynamicznych umożliwiających swobodny ruch makrocząsteczek – czyli w temperaturach powyżej temperatury zeszklenia dla polimerów amorficznych lub powyżej temperatury topnienia dla polimerów półkryształicznych [473]. Mechanizmem odpowiedzialnym za powstawanie trwałych połączeń jest interdyfuzja łańcuchów polimerowych, polegająca na wzajemnym przenikaniu makrocząsteczek z jednej warstwy do drugiej, co prowadzi do powstania więzi na poziomie molekularnym [492]. Proces ten można porównać do zjawisk zachodzących podczas zgrzewania tworzyw sztucznych [493, 494].

W technologii FDM dyfuzyjna teoria adhezji ma kluczowe znaczenie dla wyjaśnienia procesu łączenia kolejnych warstw materiału [294]. Każda nowo nałożona warstwa termoplastyczna musi przenikać na poziomie molekularnym do warstwy poprzedniej, umożliwiając uzyskanie trwałego połączenia [310]. Zjawisko to jest wysoce zależne od temperatury – polimery muszą być podgrzane do temperatury przekraczającej temperaturę zeszklenia w przypadku materiałów amorficznych lub temperaturę topnienia dla materiałów półkryształicznych [495].

Proces dyfuzji w FDM zależy od wielu czynników. Istotną rolę odgrywa temperatura, ponieważ wpływa na ruchliwość cząsteczek polimeru. Wyższe temperatury wytłaczania sprzyjają intensyfikacji dyfuzji molekularnej, co bezpośrednio przekłada się na siłę połączeń międzywarstwowych [496]. Czas kontaktu między warstwami jest również istotny – im dłużej warstwy materiału utrzymują się w stanie uplastycznienia, tym większa jest możliwość głębokiej penetracji łańcuchów polimerowych [473]. Ważnym czynnikiem jest również lepkość materiału, która wpływa na łatwość przenikania przez granicę faz. Materiały o niższej lepkości mają większą zdolność do penetracji, co przekłada się na lepszą więź międzywarstwową [48, 497].

#### **3.4.1.4. Fizyczno-chemiczna teoria adhezji**

Fizyczno-chemiczna teoria adhezji wyjaśnia proces powstawania połączeń adhezyjnych poprzez oddziaływania międzycząsteczkowe i chemiczne na granicy faz dwóch materiałów. Główne siły odpowiedzialne za takie połączenia to siły van der Waalsa, a także potencjalne wiązania chemiczne, takie jak wiązania kowalencyjne, jonowe, donorowo-akceptorowe czy wodorowe. Siły te umożliwiają wzajemne przyciąganie się cząsteczek, gdy są wystarczająco blisko siebie [474].

W przypadku materiałów takich jak PEEK, który cechuje się niską zwilżalnością oraz wysoką odpornością chemiczną, odpowiednia modyfikacja powierzchni staje się konieczna dla poprawy adhezji międzywarstwowej [48]. Aby zwiększyć więź międzywarstwową w przypadku PEEK, stosuje się różne metody modyfikacji powierzchni, takie jak wyładowania koronowe, obróbka plazmowa, aktywacja chemiczna oraz użycie laserów [498, 499]. Metody te prowadzą do wprowadzenia reaktywnych grup chemicznych na powierzchni materiału, które mogą tworzyć silniejsze wiązania chemiczne z sąsiednimi warstwami [500].

#### **3.4.1.5. Znaczenie adhezji w drukowaniu 3D**

Adhezja między warstwami w procesie FDM jest fundamentalnym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość mechaniczną drukowanych elementów [289]. Słaba przyczepność międzywarstwowa prowadzi do anizotropii wytrzymałości, gdzie wytrzymałość w osi prostopadłej do warstw jest znacznie niższa niż w płaszczyźnie warstw [295]. Znajomość teorii adhezji pozwala na lepsze zrozumienie procesów zachodzących podczas łączenia warstw polimerowych [501]. Dzięki temu można skuteczniej optymalizować parametry procesowe, takie jak temperatura głowicy drukującej, temperatura komory roboczej oraz szybkość druku, co przekłada się na poprawę właściwości mechanicznych i użytkowych drukowanych elementów [9, 310].

Podstawowym czynnikiem wpływającym na adhezję między warstwami jest temperatura głowicy drukującej [294]. Wyższa temperatura umożliwia lepsze uplastycznienie materiału, co sprzyja procesowi interdyfuzji łańcuchów polimerowych między warstwami [478]. W badaniach nad drukiem 3D wykazano, że zbyt niska temperatura może prowadzić do niepełnego przetopienia warstw, co skutkuje powstawaniem słabych połączeń [55], a w konsekwencji



obniżeniem wytrzymałości mechanicznej elementów. Z kolei zbyt wysoka temperatura może powodować degradację materiału [128].

Temperatura komory roboczej drukarki także odgrywa ważną rolę w przypadku tworzyw polimerowych o wysokiej temperaturze przetwórstwa. Utrzymywanie wyższej temperatury komory zmniejsza ryzyko wystąpienia naprężeń termicznych i deformacji wydruku [502]. W badaniach nad materiałami o wysokiej temperaturze przetwórstwa, takimi jak PEEK, wykazano, że podgrzewanie komory do temperatury bliskiej temperaturze zeszklenia lub topnienia materiału poprawia adhezję międzywarstwową [323].

Na siłę więzi międzywarstwowej wpływa również szybkość druku [61]. Zbyt szybkie drukowanie może nie dać wystarczającego czasu na uplastycznienie materiału i jego pełne połączenie z poprzednią warstwą [292], co skutkuje powstawaniem słabych wiązań [63]. Optymalizacja prędkości druku ma zatem duże znaczenie dla uzyskania mocnych i trwałych połączeń między warstwami. Badania wykazują, że zmniejszenie prędkości druku prowadzi do lepszego przenikania cząsteczek polimeru między warstwami [504], co zwiększa wytrzymałość mechaniczną drukowanych części [283].

### **3.4.2. Modyfikowanie powierzchni**

Modyfikowanie powierzchni tworzyw polimerowych jest jednym z obszarów badawczych w technologii FDM, mającym na celu poprawę adhezji międzywarstwowej, a poprzez to właściwości mechanicznych drukowanych części [505]. Metody plazmowe i chemiczne modyfikowanie powierzchni odgrywają istotną rolę w zwiększeniu wytrzymałości i trwałości elementów polimerowych [506]. W niniejszym rozdziale omówione zostaną najważniejsze techniki modyfikowania powierzchni oraz ich wpływ na jakość wydruków.

#### **3.4.2.1. Plazmowe modyfikowanie powierzchni**

Plazmowe modyfikowanie powierzchni tworzyw polimerowych stanowi jedną z najbardziej efektywnych metod poprawy adhezji międzywarstwowej w technologii FDM [500]. Proces ten polega na poddaniu powierzchni materiału na działanie plazmy, co prowadzi zarówno

do zmian chemicznych, jak i fizycznych w strukturze powierzchniowej. Plazma zwiększa energię powierzchniową materiału oraz usuwa zanieczyszczenia [506].

Celem obróbki plazmowej powierzchni jest wzrost polarności powierzchniowej, co z kolei poprawia zwilżalność przez polimery. Zastosowanie plazmy tlenowej lub argonowej prowadzi do wprowadzenia grup funkcyjnych, takich jak hydroksylowe i karboksylowe, na powierzchnię materiału, co zwiększa jego powinowactwo do innych polimerów stosowanych w procesie drukowania FDM [507].

Plazma może być stosowana zarówno do obróbki filamentu przed drukowaniem, jak i warstw już wydrukowanych [508]. W literaturze opisano przypadki, gdzie plazma była stosowana do bezpośredniej obróbki powierzchni wydrukowanych warstw, co prowadziło do znacznej poprawy adhezji międzywarstwowej i wytrzymałości mechanicznej wydruków [509].

Badania wykazały, że zastosowanie plazmy w połączeniu z laserem może znacząco poprawić wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe kompozytów PEEK z włóknem węglowym. Plazma jest stosowana do oczyszczania i modyfikacji chemicznej włókien węglowych, co prowadzi do lepszego wiązania międzyfazowego między włóknami a osnową PEEK [510].

#### **3.4.2.2. Chemiczne modyfikowanie powierzchni**

Chemiczne modyfikowanie powierzchni ma na celu zwiększenie więzi międzywarstwowej poprzez zastosowanie środków chemicznych, które reagują z powierzchnią materiału, tworząc nowe wiązania chemiczne [511]. Działania te pozwalają na poprawienie właściwości mechanicznych drukowanych elementów.

W kontekście technologii FDM chemiczne modyfikowanie może być stosowane na różnych etapach procesu drukowania [512]. Filamenty polimerowe mogą być pokrywane środkami chemicznymi jeszcze przed rozpoczęciem druku, aby zwiększyć ich zwilżalność oraz więź międzywarstwową [513]. Alternatywnie modyfikacje mogą być wprowadzane w trakcie samego procesu druku, na przykład poprzez dodawanie substancji adhezyjnych bezpośrednio do wytłaczanego materiału [511].

Przykładem innowacyjnego podejścia jest zastosowanie techniki L-FDM (Liquid Fused Deposition Modeling), gdzie filament polimerowy jest zanurzany w roztworze chemicznym, zanim zostanie wykorzystany w procesie druku [85, 517]. Tego typu modyfikacja umożliwia

bezpośrednie wprowadzenie aktywnych substancji chemicznych, takich jak silany, które znacząco poprawiają adhezję poprzez tworzenie silnych wiązań chemicznych z powierzchnią materiału [473]. Proces ten, jak potwierdzono w badaniach, może być stosowany do różnych typów polimerów, takich jak PLA, ABS czy PEEK [515], prowadząc do znaczącej poprawy ich właściwości mechanicznych [511].

W przypadku filamentów wykonanych z ABS zastosowano roztwór silanowy zawierający związek chemiczny  $\gamma$ -metakryloksypropylotrimetoksysilan (MPS) [516], który tworzył na powierzchni filamentu warstwę aktywną chemicznie, poprawiającą zwilżalność i zdolność do tworzenia mocnych wiązań z kolejnymi warstwami [473]. Dodatkowo modyfikacje chemiczne mogą zmniejszać skurcz materiałów podczas stygnięcia, co z kolei redukuje ryzyko odkształceń i pęknięć w wydrukowanych elementach. Zjawisko to wynika z ograniczenia wewnętrznych naprężeń w strukturze polimeru, co skutkuje bardziej jednolitym stygnięciem materiału [515].

### **3.4.3. Dodawanie środków adhezyjnych**

Wprowadzenie odpowiednich środków adhezyjnych do procesu drukowania metodą FDM jest kolejną metodą poprawy adhezji międzywarstwowej, bezpośrednio wpływającą na wytrzymałość mechaniczną i stabilność wymiarową wydruków 3D [62]. Środki te mogą być dodawane zarówno w postaci polimerów adhezyjnych, jak i nanocząstek [518].

W badaniach wykazano, że zastosowanie polimerów adhezyjnych, takich jak poli(adypinian butylenu-co-tereftalanu) (PBAT) oraz poli(bursztynianu butylenu) (PBS) do matrycy PLA, pozwala na istotne zwiększenie adhezji międzywarstwowej w procesie FDM. Trójskładnikowe kompozyty PLA/PBAT/PBS z dodatkiem nanocząstek talku wykazują znaczną poprawę właściwości mechanicznych wydruków 3D [519]. Dodanie PBS do kompozytu poprawiło również odporność termiczną i zmniejszyło anizotropię mechaniczną, co przekłada się na lepsze właściwości wytrzymałościowe wydruków zarówno w osi poziomej, jak i pionowej [519].

#### **3.4.3.1. Polimery adhezyjne**

Polimery adhezyjne mogą być wprowadzane na różne sposoby, zarówno poprzez modyfikację składu filamentu, jak i poprzez aplikację na powierzchnię warstw w trakcie procesu drukowania [517]. Wprowadzenie polimerów adhezyjnych do filamentu przed procesem

drukowania pozwala na uzyskanie jednorodnej mieszanki, która podczas wytłaczania tworzy silniejsze wiązania międzywarstwowe [521, 522]. Przykładami takich polimerów mogą być modyfikowane kopolimery etylenu i akrylanów, które zawierają grupy funkcyjne zdolne do tworzenia wiązań wodorowych lub innych silnych interakcji z materiałem podstawowym, stosowane w kompozytach polimerowych, takich jak PLA lub ABS [523].

Jednym z często stosowanych podejść jest dodawanie polimerów kompatybilizujących, które mają zdolność do tworzenia mostków molekularnych pomiędzy różnymi polimerami w kompozycie [524]. Takie podejście jest szczególnie użyteczne w przypadku drukowania z kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami, gdzie zapewnienie odpowiedniej adhezji między matrycą a włóknami wpływa na uzyskanie wysokiej wytrzymałości mechanicznej [525].

Badania nad zastosowaniem polimerów adhezyjnych w procesie FDM wykazały, że wprowadzenie polimerów takich jak poliwęglan (PC) czy kopolimery etylenu i akrylanów do kompozytów z PLA oraz ABS może znacząco poprawić wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie wydrukowanych elementów [526, 527]. Polimery adhezyjne odgrywają również rolę w redukcji skurczu materiału podczas stygnięcia, co wpływa na zmniejszenie odkształceń i pęknięć w wydrukach, a także poprawę ogólnej jakości powierzchni [47]. Zjawisko to występuje, gdy dodatek polimeru adhezyjnego zmienia strukturę krystaliczną materiału, co prowadzi do bardziej kontrolowanego procesu krzepnięcia i redukcji naprężeń wewnętrznych. Przykładem jest zastosowanie PBS (polibursztynianu butylenu) w kompozytach opartych na PLA, które wykazały zmniejszony skurcz oraz poprawę spójności strukturalnej między warstwami [528].

### **3.4.3.2. Nanocząstki jako środki adhezyjne**

Napełnianie polimerów nanocząstkami stanowi innowacyjne rozwiązanie w kontekście poprawy adhezji międzywarstwowej w technologii FDM [529]. Dodanie nanocząstek do filamentu lub bezpośrednio na powierzchnię warstw podczas drukowania może znacząco zwiększyć wytrzymałość mechaniczną wydrukowanych części [518]. Mechanizm działania nanocząstek opiera się na ich zdolności do wnikania w mikroskopijne pory i szczeliny na powierzchni materiału, co prowadzi do zwiększenia powierzchni kontaktu i siły adhezji [530].

Nanocząstki mogą być dodawane do filamentu w procesie produkcji, tworząc kompozyty nanomateriałowe, które charakteryzują się poprawionymi właściwościami mechanicznymi, termicznymi i chemicznymi [531]. Najczęściej stosowane nanocząstki to nanorurki węglowe,

nanocząstki krzemionki, nanocząstki glinokrzemianów oraz nanocząstki tlenków metali, takich jak tlenek cynku (ZnO) czy tlenek tytanu (TiO<sub>2</sub>) [532]. Jednym z najbardziej obiecujących materiałów są nanocząstki grafenu [533].

Nanocząstki krzemionki (SiO<sub>2</sub>) są kolejnym przykładem środków adhezyjnych. Krzemionka, ze względu na swoją dużą powierzchnię właściwą oraz zdolność do tworzenia silnych wiązań z polimerami, jest dodatkiem poprawiającym adhezję [534]. Wprowadzenie nanocząstek krzemionki do materiałów takich jak poliamidy czy poliwęglany prowadzi do zwiększenia wytrzymałości mechanicznej oraz odporności na ścieranie [535].

Badania wykazały, że wprowadzenie nanocząstek do kompozytów polimerowych może prowadzić do znacznego zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie, zginanie oraz ściskanie [536]. Nanocząstki poprawiają również właściwości barierowe materiałów, co zmniejsza ich przepuszczalność dla gazów i cieczy, a także zwiększa odporność na działanie czynników chemicznych i termicznych [537].

Jednym z obiecujących kierunków badań jest zastosowanie nanocząstek funkcjonalizowanych, które mają zdolność do tworzenia specyficznych wiązań chemicznych z osnową polimerową [538]. Takie nanocząstki mogą zawierać grupy funkcyjne, które reagują z polimerem, tworząc silne i trwałe wiązania chemiczne, co prowadzi do dalszej poprawy adhezji międzywarstwowej i wytrzymałości mechanicznej.

### **3.4.4. Optymalizacja parametrów technologicznych procesu drukowania**

Optymalizacja parametrów procesu drukowania FDM jest fundamentalna dla osiągnięcia najwyższej jakości i wytrzymałości wydruków [290]. Precyzyjna kontrola parametrów takich jak temperatura dyszy, prędkość drukowania oraz wysokość warstwy jest konieczna dla uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych i estetyki drukowanych elementów [289].

#### **3.4.4.1. Zmiana temperatury dyszy**

Temperatura dyszy wylączarki jest jednym z podstawowych parametrów wpływających na jakość druku w technologii FDM [539]. Odpowiednia temperatura dyszy zapewnia właściwe uplastycznienie i wylączanie materiału polimerowego, co bezpośrednio wpływa na siłę

wiązania międzywarstwowego [295]. Każdy materiał polimerowy posiada określony zakres temperatur przetwarzania, który jest optymalny dla uzyskania maksymalnej więzi między warstwami, a przez to wytrzymałości mechanicznej wydrukowanego elementu [11, 310]. Na przykład, temperatury dla PLA mieszczą się w zakresie 190–220°C, dla ABS 220–250°C, dla PETG 220–240°C, a dla wysokowytrzymałych materiałów, takich jak PEEK, wymagane są znacznie wyższe temperatury, w przedziale 350–420°C [154, 155].

Mechanizm wpływu temperatury na tworzenie więzi międzywarstwowej opiera się przede wszystkim na procesie interdyfuzji łańcuchów polimerowych, która zachodzi na granicy warstw [9, 294]. Gdy materiał jest wytłaczany w odpowiednio wysokiej temperaturze, jego łańcuchy polimerowe uzyskują wystarczającą ruchliwość, co pozwala im przenikać do sąsiednich warstw. Proces ten jest istotny dla uzyskania mocnych więzi między warstwami, ponieważ im głębsza interpenetracja łańcuchów polimerowych, tym wyższa wytrzymałość mechaniczna połączenia [540]. Optymalna temperatura dyszy musi zapewniać wystarczającą energię, aby cząsteczki polimeru mogły się swobodnie poruszać i łączyć z poprzednią warstwą, ale jednocześnie nie może przekraczać progu, przy którym dochodzi do degradacji materiału [541].

Zbyt niska temperatura dyszy powoduje, że materiał nie ulega pełnemu uplastycznieniu, co ogranicza ruchliwość łańcuchów polimerowych [289]. W konsekwencji proces interdyfuzji między warstwami jest zakłócony, co prowadzi do słabego zakotwiczenia materiału. W efekcie wytrzymałość mechaniczna wydrukowanego elementu jest znacznie obniżona, zwłaszcza w kierunku prostopadłym do warstw, gdzie siły adhezyjne między warstwami są najsłabsze [540]. Zbyt wysoka temperatura dyszy może prowadzić do degradacji materiału, zwłaszcza w przypadku bardziej wrażliwych polimerów, takich jak PLA czy PETG [542]. Degradacja termiczna polega na rozrywaniu łańcuchów polimerowych, co ogranicza ich zdolność do tworzenia silnych połączeń międzywarstwowych [474]. Dodatkowo, nadmierna temperatura może powodować problemy podczas wytłaczania, takie jak nitkowanie czy wycieki, które negatywnie wpływają na jakość wydruku i mogą prowadzić do defektów powierzchniowych oraz niedoskonałych połączeń między warstwami [543, 544].

### **3.4.4.2. Zmiana prędkości drukowania**

Prędkość drukowania ma duży wpływ na jakość, wytrzymałość oraz dokładność wydruków w technologii FDM [9]. Proces tworzenia więzi międzywarstwowej opiera się na interakcji termicznej i mechanicznym łączeniu uplastycznionych warstw polimeru [294]. Zmiana prędkości drukowania wpływa na czas, jaki materiał pozostaje w stanie uplastycznienia, a tym samym na czas, w którym może dojść do procesów interdyfuzji łańcuchów polimerowych, które odpowiadają za siłę połączeń międzywarstwowych [310].

Prędkość drukowania bezpośrednio wpływa na ilość czasu, w którym wytłaczany materiał ma kontakt z już wydrukowaną warstwą i jej temperaturą. Przy zbyt wysokiej prędkości drukowania materiał nie ma wystarczająco dużo czasu na to, by uplastyczyć się na granicy z poprzednią warstwą, co skutkuje niewystarczającym procesem interdyfuzji łańcuchów polimerowych [545].

Niższa prędkość drukowania zapewnia dłuższy czas uplastycznienia materiału, co sprzyja lepszemu przenikaniu cząsteczek polimeru między sąsiednimi warstwami. Wydłużenie czasu kontaktu sprzyja również dyfuzji ciepła z warstwy nowo nałożonej do już ułożonej, co zwiększa ruchliwość cząsteczek polimeru i poprawia proces łączenia. Zbyt niska prędkość drukowania może prowadzić do nadmiernego przegrzewania materiału, co z kolei może prowadzić do degradacji polimeru i osłabienia jego właściwości mechanicznych [283, 546]. Dla materiałów takich jak PLA czy ABS optymalizacja prędkości drukowania ma duże znaczenie w zapewnieniu odpowiedniej równowagi pomiędzy czasem uplastycznienia materiału a jego degradacją [547].

Optymalne prędkości drukowania różnią się w zależności od rodzaju materiału i geometrii wydruku. Dla PLA i ABS prędkości drukowania zazwyczaj mieszczą się w zakresie 40–100 mm/s [2]. Dla bardziej zaawansowanych polimerów, takich jak PEEK, prędkości te muszą być znacznie niższe, zwykle w przedziale 15–30 mm/s [150]. Wynika to z wysokiej lepkości PEEK i jego wymagań termicznych [48]. Niższa prędkość pozwala na lepsze uplastycznienie materiału i dłuższy czas na interdyfuzję łańcuchów polimerowych między warstwami, co wpływa na uzyskanie dobrej więzi w przypadku tego typu materiałów [493].

Na wybór prędkości drukowania wpływa także oczekiwana tolerancja wymiarowa geometrii wydruku. Bardziej skomplikowane kształty wymagają niższych prędkości, aby zapewnić precyzyjne nakładanie kolejnych warstw i zachowanie odpowiednich tolerancji

wymiarowych. Zbyt szybkie drukowanie w przypadku złożonych geometrii może prowadzić do błędów druku, takich jak przesunięcia warstw lub niedokładne nakładanie materiału [548].

### **3.4.5. Techniki podgrzewania międzywarstwowego**

Podgrzewanie międzywarstwowe jest jedną z metod poprawy adhezji międzywarstwowej w drukowaniu 3D metodą FDM. Technika ta polega na podgrzewaniu powierzchni poprzednio nałożonej warstwy materiału przed nałożeniem kolejnej, prowadzącej do zwiększenia siły wiązań międzywarstwowych. Zastosowanie podgrzewania międzywarstwowego ma na celu zmniejszenie naprężeń termicznych, poprawę dyfuzji materiału i eliminację pęcherzyków powietrza, co skutkuje zwiększeniem wytrzymałości mechanicznej i trwałości wydrukowanych elementów.

#### **3.4.5.1. Podgrzewanie promieniowaniem IR**

Podgrzewanie promieniowaniem podczerwonym (IR) jest efektywną metodą poprawy adhezji międzywarstwowej w technologii FDM. Promieniowanie IR jest skutecznie absorbowane przez materiały polimerowe, co umożliwia szybkie i równomierne podgrzewanie powierzchni wcześniej nałożonych warstw przed depozycją kolejnych [550, 551].

Badania wykazały, że zastosowanie podgrzewania promieniowaniem IR podczas procesu drukowania może znacząco zwiększyć wytrzymałość mechaniczną wydrukowanych elementów. Yang i Pitchumani [550] zintegrowali system podgrzewania IR z głowicą drukującą, co pozwoliło na lokalne podniesienie temperatury powierzchni warstwy tuż przed nałożeniem nowego materiału. W rezultacie uzyskano wzrost wytrzymałości na rozciąganie w kierunku prostopadłym do warstw o około 40% w porównaniu z wydrukami bez dodatkowego podgrzewania. Autorzy przypisują ten efekt lepszej interdyfuzji łańcuchów polimerowych na granicy warstw, wynikającej z podwyższonej temperatury powierzchni.

Podobne rezultaty uzyskali Kishore i in. [551], którzy zastosowali promieniowanie IR w druku dużych komponentów z wykorzystaniem technologii Big Area Additive Manufacturing (BAAM). Zastosowanie podgrzewania IR przed depozycją kolejnych warstw doprowadziło do



wzrostu wytrzymałości na ścinanie między warstwami o około 25%. Badacze zauważyli również zmniejszenie porowatości oraz poprawę jednorodności struktury wewnętrznej wydruków.

Mechanizm działania podgrzewania promieniowaniem IR opiera się na podniesieniu temperatury powierzchni warstwy do poziomu zbliżonego do temperatury zeszklenia lub topnienia materiału [294]. To zwiększa ruchliwość łańcuchów polimerowych, sprzyjając efektywnej interdyfuzji między warstwami i tworzeniu mocniejszych połączeń [310]. Ważne jest jednak precyzyjne sterowanie parametrami procesu, takimi jak moc promieniowania, długość fali oraz czas ekspozycji, aby uniknąć przegrzewania i degradacji materiału [552].

### **3.4.5.2. Podgrzewanie mikrofalowe**

Podgrzewanie mikrofalowe jest innowacyjną metodą stosowaną w technologii FDM w celu poprawy adhezji międzywarstwowej. Mikrofałe penetrują materiał polimerowy i podgrzewają go od wewnątrz, co prowadzi do równomiernego rozkładu temperatury w całej objętości warstwy [553]. Ta technika jest szczególnie efektywna dla materiałów o wysokiej absorpcji mikrofal, takich jak polimery zawierające dodatki przewodzące, np. włókna węglowe czy nanocząstki metaliczne [554].

Podatność materiałów polimerowych na nagrzewanie mikrofalowe zależy głównie od ich właściwości dielektrycznych, w szczególności od stałej dielektrycznej oraz współczynnika strat dielektrycznych (tzw. tangens delta,  $\tan \delta$ ). Materiały o wysokim współczynniku strat dielektrycznych efektywniej absorbują energię mikrofalową, co prowadzi do szybszego nagrzewania [555]. Polimery polarne, zawierające grupy chemiczne takie jak karbonylowe czy hydroksylowe, wykazują większą podatność na nagrzewanie mikrofalowe ze względu na ich zdolność do dipolowej polaryzacji w polu elektromagnetycznym [556].

Podgrzewanie mikrofalowe może poprawić adhezję międzywarstwową poprzez zwiększenie mobilności łańcuchów polimerowych i ułatwienie ich dyfuzji między warstwami. W rezultacie dochodzi do lepszego zespolenia warstw i zwiększenia wytrzymałości mechanicznej wydruków. Badania nad zastosowaniem podgrzewania mikrofalowego w druku FDM są wciąż rozwijane. Na przykład Hiralal i in. [557] przeprowadzili eksperymenty z wykorzystaniem mikrofal do łączenia kompozytów polimerowych zawierających nanorurki węglowe. Zastosowanie mikrofal skutkowało znaczącym wzrostem wytrzymałości mechanicznej złączy w porównaniu do tradycyjnych metod łączenia. Autorzy przypisują ten

efekt efektywnemu nagrzewaniu się nanorurek węglowych, które absorbują energię mikrofalową i przekazują ciepło do matrycy polimerowej.

W innym badaniu Kishore i in. [558] badali wpływ podgrzewania mikrofalowego na poprawę adhezji międzywarstwowej w wydrukach z poliwęglanu wzmocnionego włóknami węglowymi. Wyniki wykazały zwiększenie wytrzymałości na ścinanie między warstwami o około 30%, co przypisano efektywnemu nagrzewaniu materiału dzięki obecności przewodzących włókien węglowych. Badacze zauważyli również zmniejszenie porowatości oraz poprawę jednorodności struktury wewnętrznej wydruków.

W tej metodzie ważne jest precyzyjne kontrolowanie mocy mikrofal i czasu ekspozycji, aby uniknąć przegrzewania i potencjalnej degradacji materiału. Nadmierne nagrzewanie może prowadzić do degradacji polimeru, zmiany jego właściwości mechanicznych oraz deformacji geometrycznych wydruku. Dodatkowo, implementacja podgrzewania mikrofalowego w drukarkach 3D wymaga uwzględnienia kwestii bezpieczeństwa, takich jak odpowiednie ekranowanie i kontrola emisji mikrofal [559].

### **3.4.5.3. Podgrzewanie laserowe**

Podgrzewanie laserowe jest jedną z najbardziej zaawansowanych metod wspomaganie procesu drukowania FDM w celu poprawy adhezji międzywarstwowej. Technika ta charakteryzuje się wysoką precyzją i kontrolą nad procesem, umożliwiając skierowanie energii lasera bezpośrednio na powierzchnię warstwy, co prowadzi do jej szybkiego i selektywnego podgrzania [560]. Poprzez zastosowanie lasera można zwiększyć temperaturę na granicy między warstwami, co sprzyja lepszemu spajaniu materiału i redukcji wad, takich jak porowatość czy delaminacja [561].

W procesie wspomaganie laserowego w technologii FDM najczęściej stosowane są lasery diodowe oraz lasery CO<sub>2</sub>. Lasery diodowe, pracujące zwykle w zakresie długości fali 800–980 nm, są popularne ze względu na swoją zdolność do precyzyjnego i efektywnego podgrzewania warstw polimerowych [562]. Typowa moc lasera diodowego używanego do poprawy adhezji międzywarstwowej wynosi od kilku do kilkunastu watów, co pozwala na kontrolowane podgrzewanie bez ryzyka degradacji materiału. Lasery te są skuteczne zwłaszcza w przypadku materiałów o niższej temperaturze topnienia, takich jak PLA czy ABS [47, 50].

Lasery CO<sub>2</sub>, pracujące w zakresie długości fali około 10,6 μm, są szczególnie efektywne przy obróbce materiałów o wyższej temperaturze topnienia, takich jak PEEK czy PPS [143]. Moc lasera CO<sub>2</sub> stosowanego w procesach FDM może sięgać nawet kilkudziesięciu watów, co pozwala na głębsze podgrzewanie warstw i lepszą kontrolę nad procesem topienia i krystalizacji materiału. Zastosowanie lasera CO<sub>2</sub> w dużych drukarkach FDM umożliwia uzyskanie równomiernego podgrzania na całej szerokości warstwy, co prowadzi do lepszego spajania materiału i zmniejszenia liczby wad strukturalnych [564].

Badania przeprowadzone przez Choudhury i Ananda [560] wykazały, że zastosowanie laserowego podgrzewania przed depozycją kolejnej warstwy znacząco poprawia wytrzymałość mechaniczną wydruków z ABS. Autorzy zastosowali laser diodowy o mocy 2 W, co pozwoliło na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie w kierunku prostopadłym do warstw o około 35%. Podobne wyniki uzyskali Wang i in. [561], którzy wykorzystali laser CO<sub>2</sub> do podgrzewania warstw w wydrukach z kompozytów termoplastycznych wzmocnianych włóknami ciągłymi. Zastosowanie lasera przyczyniło się do zwiększenia wytrzymałości międzywarstwowej oraz poprawy jednorodności struktury materiału.

Mechanizm działania podgrzewania laserowego opiera się na lokalnym podniesieniu temperatury powierzchni warstwy do poziomu zbliżonego do temperatury topnienia materiału [562]. Powoduje to zwiększenie ruchliwości łańcuchów polimerowych i sprzyja efektywnej interdyfuzji między warstwami [493]. Ważne jest jednak precyzyjne sterowanie parametrami procesu, takimi jak moc lasera, prędkość skanowania czy odległość ogniskowania, aby uniknąć przegrzewania i degradacji materiału [563].

#### **3.4.5.4. Podgrzewanie konwekcyjne**

Podgrzewanie konwekcyjne, wykorzystujące nadmuch gorącego powietrza bezpośrednio na drukowaną warstwę, jest metodą stosowaną w technologii FDM w celu poprawy adhezji międzywarstwowej [565]. W przeciwieństwie do podgrzewania w zamkniętej komorze, bezpośrednie podgrzewanie konwekcyjne umożliwia precyzyjne i lokalne dostarczenie ciepła dokładnie tam, gdzie jest to najbardziej potrzebne [45]. Ukierunkowane działanie ciepła wpływa na jakość połączenia warstw, redukując defekty i zwiększając wytrzymałość mechaniczną wydruków [478].

Badania nad wpływem strumienia gorącego powietrza wykazały, że parametry takie jak temperatura powietrza, prędkość przepływu i odległość dyszy od powierzchni mają istotny wpływ na właściwości mechaniczne drukowanych części [310]. Partain [565] w swoim wynalazku zastosował nadmuchi gorącego powietrza w celu podgrzania warstwy przed nałożeniem kolejnej. Wyniki pokazały znaczącą poprawę wytrzymałości na rozciąganie próbek drukowanych z ABS w kierunku prostopadłym do warstw.

Dodatkowo, technika ta pozwala na lepszą kontrolę nad procesem uplastyczniania materiału. Poprzez precyzyjne dostarczanie ciepła możliwe jest utrzymanie optymalnych warunków przetwórstwa, minimalizując ryzyko deformacji czy degradacji materiału [283]. Jest to szczególnie istotne w przypadku materiałów wrażliwych na temperaturę lub wymagających specyficznych warunków przetwarzania [289].

### **3.4.6. Drukowanie FDM w kontrolowanej atmosferze**

Drukowanie 3D w technologii FDM w kontrolowanej atmosferze jest zaawansowaną metodą mającą na celu poprawę jakości oraz właściwości mechanicznych wydrukowanych elementów [566]. Wprowadzenie kontrolowanej atmosfery podczas procesu drukowania pozwala na minimalizację degradacji termicznej polimerów, zwiększenie adhezji międzywarstwowej oraz optymalizację warunków krystalizacji, co przekłada się na lepsze parametry mechaniczne i wyższą precyzję wymiarową wydruków [567].

Kontrolowana atmosfera odnosi się do zastosowania specjalnych gazów w celu stworzenia określonych warunków środowiskowych wokół obszaru drukowania. Gazy te mogą być chemicznie obojętne, takie jak azot czy argon, które zapobiegają utlenianiu materiału i degradacji termicznej polimerów [568]. Alternatywnie, mogą to być gazy aktywne chemicznie, które wpływają na właściwości powierzchniowe polimerów, modyfikując ich strukturę chemiczną i poprawiając adhezję międzywarstwową.

Zastosowanie kontrolowanej atmosfery w druku FDM przynosi szereg korzyści. Przede wszystkim redukuje utlenianie i degradację termiczną polimerów. W obecności tlenu i wysokiej temperatury polimery mogą ulegać degradacji, co prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych i estetycznych wydruków [569]. Atmosfera obojętna zapobiega tym procesom, utrzymując integralność materiału.

Ponadto, kontrolowana atmosfera sprzyja poprawie wiązania międzywarstwowego. Umożliwia ona lepszą dyfuzję łańcuchów polimerowych między warstwami, co prowadzi do silniejszego połączenia i wyższej wytrzymałości mechanicznej wydruków. Dodatkowo, optymalizacja warunków krystalizacji jest kluczowa dla półkryształicznych polimerów, takich jak PEEK. Kontrola atmosfery umożliwia precyzyjne sterowanie procesem krystalizacji, wpływając na właściwości termiczne i mechaniczne końcowego produktu [570].

Do drukowania FDM w kontrolowanej atmosferze stosuje się różne metody i urządzenia. Najczęściej wykorzystuje się hermetyczne komory drukarek, które pozwalają na wprowadzenie i utrzymanie określonego gazu wokół obszaru drukowania [571]. Komory te są wyposażone w uszczelnienia oraz systemy monitorowania i regulacji składu atmosfery. Utrzymanie stabilnych warunków termicznych i składu chemicznego atmosfery w komorze drukarki jest niezbędne dla stabilności procesu drukowania; systemy cyrkulacji i regulacji temperatury zapewniają jednolite warunki w całej objętości komory [572]. Dostarczanie gazów obojętnych pomaga w wyparciu tlenu i wilgoci z komory drukującej, minimalizując ryzyko utleniania materiału.

Badania nad wpływem kontrolowanej atmosfery na proces drukowania FDM wskazują na jej pozytywny wpływ na jakość wydruków. W przypadku materiałów termoplastycznych, takich jak PLA czy ABS, zastosowanie atmosfery obojętnej może zmniejszyć ryzyko degradacji termicznej, prowadząc do lepszej jakości powierzchni i zwiększonej wytrzymałości mechanicznej [568, 573]. Dla materiałów wysokotemperaturowych, takich jak PEEK, kontrolowana atmosfera jest niezbędna do utrzymania odpowiednich warunków krystalizacji. Pozwala to na osiągnięcie optymalnych właściwości mechanicznych i termicznych wydruków [48].

Choć drukowanie w kontrolowanej atmosferze oferuje liczne korzyści, wiąże się również z pewnymi wyzwaniem. Konieczność stosowania specjalistycznych komór i systemów kontrolnych zwiększa koszty inwestycyjne i eksploatacyjne [413]. Precyzyjna kontrola składu atmosfery i warunków termicznych wymaga zaawansowanych systemów monitorowania i regulacji. Ponadto, praca z niektórymi gazami może wymagać dodatkowych środków ostrożności i zgodności z przepisami bezpieczeństwa.

### **3.4.6.1. Drukowanie w atmosferze gazów obojętnych**

Drukowanie metodą FDM w atmosferze gazów obojętnych, takich jak azot czy argon, stanowi zaawansowaną technikę mającą na celu ochronę materiałów polimerowych przed niekorzystnymi reakcjami z tlenem podczas procesu drukowania [567]. Wprowadzenie gazów obojętnych do komory drukującej pozwala na stworzenie środowiska o zredukowanej zawartości tlenu, co minimalizuje ryzyko degradacji oksydacyjnej polimerów, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach charakterystycznych dla procesu FDM [576].

Podczas drukowania FDM materiały polimerowe są podgrzewane do temperatur zbliżonych lub przekraczających ich temperatury topnienia. W takich warunkach obecność tlenu może prowadzić do reakcji utleniania, które powodują degradację łańcuchów polimerowych [575]. Skutkuje to pogorszeniem właściwości mechanicznych, termicznych i chemicznych wydruków. Zastosowanie atmosfery gazów obojętnych zapobiega tym niekorzystnym procesom poprzez eliminację tlenu z otoczenia materiału. Azot i argon, jako gazy chemicznie obojętne, nie reagują z polimerami ani nie wpływają na przebieg procesu drukowania. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie wysokiej jakości materiału oraz zachowanie jego pierwotnych właściwości mechanicznych i fizykochemicznych [6].

Materiały takie jak PEEK (polieteroeteroketon), PEI (polieteroimid) czy PPSU (polieterosulfon) charakteryzują się wysokimi temperaturami przetwórstwa i są szczególnie wrażliwe na degradację oksydacyjną [572]. Drukowanie PEEK w atmosferze azotu prowadzi do znacznej poprawy wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości w porównaniu z wydrukami wykonanymi w atmosferze powietrza [577].

Eliminacja tlenu z komory drukującej zapobiega reakcjom rodnikowym, które są inicjowane przez ciepło i obecność tlenu [578]. Reakcje te prowadzą do rozrywania łańcuchów polimerowych i tworzenia niskocząsteczkowych produktów degradacji. W atmosferze gazów obojętnych te niekorzystne procesy są zahamowane, co pozwala na zachowanie ciągłości łańcuchów polimerowych i utrzymanie właściwości mechanicznych materiału.

### **3.4.6.2. Drukowanie w atmosferze gazów aktywnych**

Drukowanie metodą FDM w atmosferze gazów aktywnych jest innowacyjnym podejściem mającym na celu modyfikację powierzchniową polimerów podczas procesu drukowania. Takie modyfikacje mogą prowadzić do poprawy adhezji międzywarstwowej oraz

właściwości mechanicznych wydruków. Gazy aktywne, takie jak ozon, oddziałują chemicznie z powierzchnią polimerów, prowadząc do zmian w ich strukturze chemicznej i energetyce powierzchniowej.

Ozon ( $O_3$ ) jest silnym utleniaczem, który może reagować z polimerami zawierającymi nienasycone wiązania lub grupy funkcyjne podatne na utlenianie. Wprowadzenie ozonu do atmosfery drukowania prowadzi do utlenienia powierzchni warstw polimerowych, co skutkuje zwiększeniem swobodnej energii powierzchniowej materiału [473]. Zwiększona energia powierzchniowa sprzyja lepszemu zwilżaniu i adhezji między warstwami, co przekłada się na silniejsze połączenia międzywarstwowe i poprawę właściwości mechanicznych wydruków.

Badania dotyczące modyfikacji powierzchni polimerów za pomocą ozonu wykazały, że taka obróbka może zwiększać adhezję międzywarstwową w materiałach kompozytowych [576]. Badania nad modyfikacją powierzchni PLA przy użyciu plazmy atmosferycznej zawierającej ozon, wskazały na znaczący wzrost polarności powierzchni oraz poprawę adhezji, co może być korzystne w kontekście druku FDM [579].

Oddziaływanie gazów aktywnych z powierzchnią polimeru prowadzi do wprowadzenia grup funkcyjnych takich jak hydroksylowe, karbonylowe czy karboksylowe [473]. Zwiększona polarność sprzyja interakcjom między łańcuchami polimerowymi z sąsiednich warstw, prowadząc do silniejszego spajania.

Zastosowanie gazów aktywnych w drukowaniu FDM wiąże się jednak z pewnymi wyzwaniami. Ozon jest toksyczny i silnie reaktywny, przez co wymaga specjalnych środków ostrożności podczas stosowania. Nadmierne utlenienie powierzchni polimeru przez ozon może również prowadzić do degradacji materiału i pogorszenia jego właściwości mechanicznych [578].

### **3.4.6.3. Drukowanie w próżni**

Drukowanie w próżni to innowacyjna technika w technologii FDM, polegająca na przeprowadzaniu procesu drukowania w środowisku o obniżonym ciśnieniu atmosferycznym. Eliminacja powietrza i wilgoci z komory drukującej minimalizuje wpływ tlenu i pary wodnej na materiał polimerowy, co jest szczególnie istotne przy drukowaniu materiałów higroskopijnych lub wrażliwych na utlenianie [569].

W warunkach próżniowych zmniejsza się ryzyko degradacji oksydacyjnej i hydrolitycznej polimerów, co prowadzi do zachowania integralności strukturalnej materiału

[567]. Redukcja ciśnienia atmosferycznego może sprzyjać również lepszemu ułożeniu i spajaniu filamentów, przekładając się na wyższą gęstość i jednorodność wydruków [568].

Badania nad drukowaniem w próżni są jednak ograniczone, a technika ta nie jest jeszcze szeroko stosowana w przemyśle ani opisana w licznych publikacjach naukowych. Istnieją jednak badania nad drukowaniem w kontrolowanych warunkach atmosferycznych, które sugerują potencjalne korzyści z eliminacji gazów i wilgoci podczas procesu drukowania [580].

Drukowanie w próżni może wpływać także na proces krzepnięcia i krystalizacji polimerów. Obniżone ciśnienie modyfikuje warunki termodynamiczne procesu, co może wpływać na strukturę morfologiczną materiału [48]. W przypadku materiałów kompozytowych, takich jak kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami, technika ta może potencjalnie pozwolić na lepsze rozmieszczenie włókien oraz redukcję porowatości, co przekłada się na poprawę właściwości mechanicznych.

Implementacja drukowania w próżni wiąże się jednak z wyzwaniami technicznymi i kosztowymi. Wymaga stosowania szczelnych komór próżniowych oraz systemów pomp, co zwiększa koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

#### **3.4.6.4. Drukowanie w warunkach wysokiego ciśnienia**

Drukowanie FDM w warunkach podwyższonego ciśnienia atmosferycznego jest innowacyjną metodą mającą na celu poprawę właściwości mechanicznych wydrukowanych części. Zastosowanie wysokiego ciśnienia podczas procesu drukowania wpływa na lepsze zespolenie warstw, redukcję porowatości oraz zwiększenie gęstości wydruku.

Proces ten realizowany jest przy użyciu autoklawów lub komór ciśnieniowych, które pozwalają na precyzyjną kontrolę ciśnienia i temperatury podczas drukowania. Wprowadzenie gazu obojętnego, takiego jak azot, pod podwyższonym ciśnieniem minimalizuje obecność tlenu i wilgoci, zapobiegając degradacji oksydacyjnej polimerów.

Badania przeprowadzone przez J.P. Shaik i in. (2023) wykazały, że drukowanie w atmosferze azotu przy ciśnieniu 5 barów znacząco poprawia właściwości mechaniczne wydruków z PLA (567). Autorzy zaobserwowali wzrost wytrzymałości na rozciąganie o 34% oraz wytrzymałości na zginanie o 28% w porównaniu z próbkami drukowanymi w standardowych warunkach atmosferycznych. Właściwości mechaniczne wydruków zbliżyły się do tych uzyskiwanych w procesie formowania wtryskowego.



Mechanizm poprawy wynika z faktu, że podwyższone ciśnienie zwiększa siły działające na stopiony polimer, co sprzyja lepszemu wypełnieniu przestrzeni międzywarstwowych i redukcji porowatości. Dodatkowo, wyższe ciśnienie może wpływać na proces krystalizacji polimerów półkryształicznych, prowadząc do powstawania bardziej jednorodnej struktury krystalicznej.

Zastosowanie druku FDM w warunkach wysokiego ciśnienia ma potencjał w produkcji elementów wymagających wysokiej wytrzymałości mechanicznej i precyzji wymiarowej, takich jak komponenty w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym czy medycznym. Jednakże implementacja tej metody wiąże się z wyzwaniem technicznymi i ekonomicznymi. Wymaga stosowania specjalistycznego sprzętu oraz zapewnienia bezpieczeństwa przy pracy z podwyższonym ciśnieniem i temperaturą.

### **3.5. Podsumowanie i teza pracy**

Studium literaturowe dotyczące technologii druku 3D metodą FDM uwzględnia kluczowe aspekty wpływające na jakość i wytrzymałość drukowanych elementów. Technologia FDM, ze względu na swoją wszechstronność i zdolność do tworzenia skomplikowanych geometrii, jest ceniona zarówno jako narzędzie do szybkiego prototypowania, jak i do produkcji części funkcjonalnych. Jej szerokie zastosowanie obejmuje różne branże, takie jak medycyna, lotnictwo, przemysł motoryzacyjny, naftowy, edukacja oraz sektor konsumencki.

Problemy z więzią międzywarstwową oraz wpływ skurczu materiału polimerowego podczas chłodzenia na jego jednorodność strukturalną, stanowią istotne wyzwania technologii drukowania FDM. Rozwiązanie tych problemów wymaga dogłębnej analizy procesów drukowania, precyzyjnego ustawienia parametrów drukowania oraz zastosowania zaawansowanych technik modyfikacji powierzchni polimerów. Analiza literatury wskazuje, że innowacyjne metody usprawnienia procesu drukowania 3D techniką wytłaczania materiału polimerowego mogą znacząco poprawić przyleganie międzywarstwowe i kontrolę rozkładu temperatury w drukowanych częściach, a w konsekwencji ich właściwości wytrzymałościowe.

#### **Teza pracy:**

**Zastosowanie innowacyjnych metod drukowania 3D FDM, w połączeniu z optymalizacją parametrów procesu drukowania, pozwoli znacząco poprawić więź międzywarstwową produktów drukowanych z tworzyw i kompozytów polimerowych.**

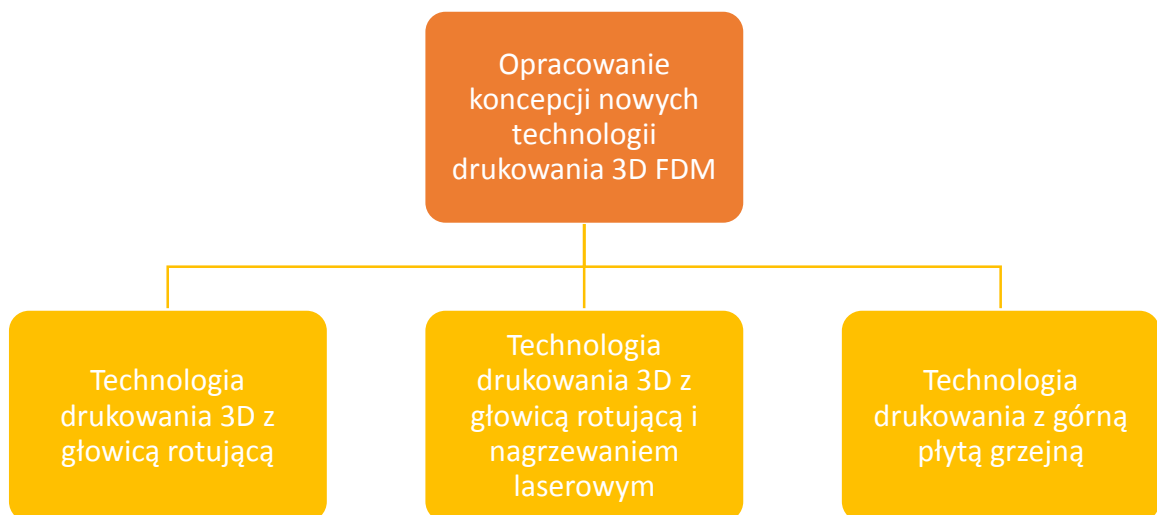
## 4. PRACA WŁASNA

### 4.1. Program prac własnych

#### Plan prac wstępnych – opracowanie koncepcji nowych technologii drukowania 3D FDM

Zgodnie z celem niniejszej dysertacji nakreślonym we wstępie jak i dla udowodnienia postawionej w pracy tezy, przyjęto opisany poniżej program prac własnych.

W pierwszym kroku programu prac własnych, na podstawie analizy literatury jak i rozpoznania podstawowych niedoskonałości techniki druku FDM, opracowano trzy koncepcje innowacyjnych metod poprawy więzi międzywarstwowej w przedmiotach drukowanych tą techniką. Schematycznie przedstawiono to na rys. 4.1.

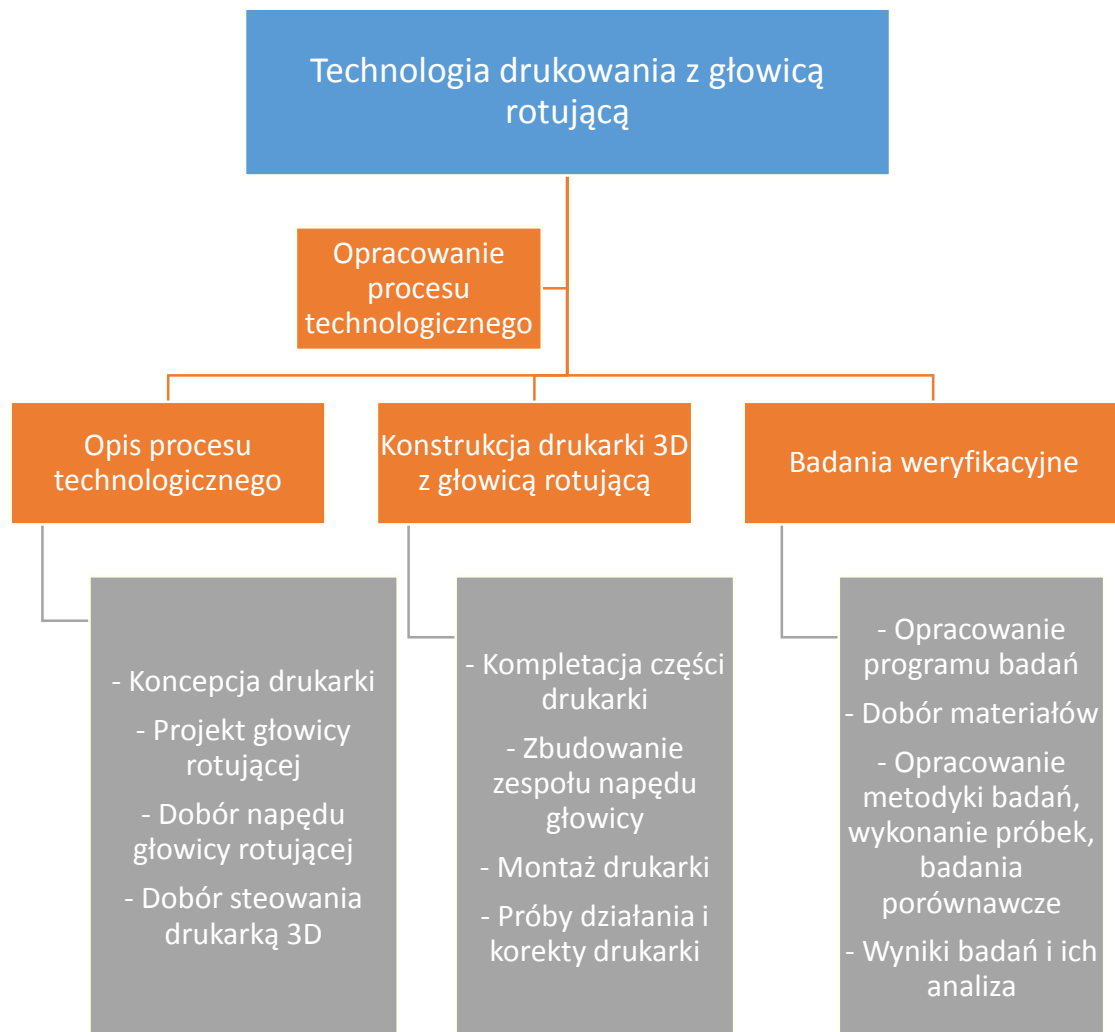


Rys. 4.1. Plan prac wstępnych nad koncepcjami innowacyjnych modyfikacji technologii drukowania 3D FDM

W dalszej kolejności program prac własnych przewiduje szczegółowe opracowanie zmodyfikowanych technologii druku 3D FDM, konstrukcję drukarek oraz weryfikację ich działania.

### **Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą**

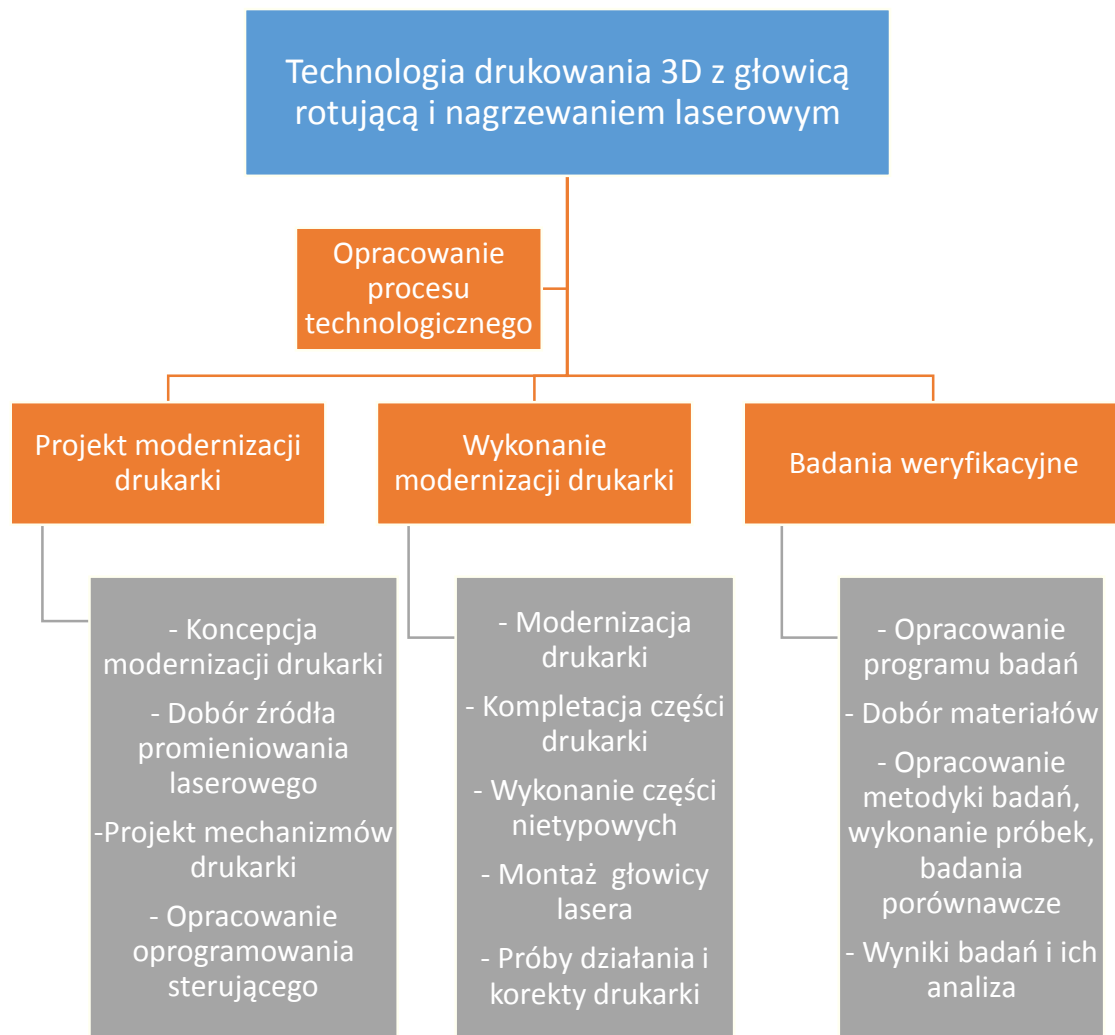
Etapy prac związanych z opracowaniem technologii druku 3D FDM z wykorzystaniem głowicy rotującej, konstrukcją drukarki i weryfikacją jej działania przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Program prac nad opracowaniem technologii drukowania 3D z głowicą rotującą

### **Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym**

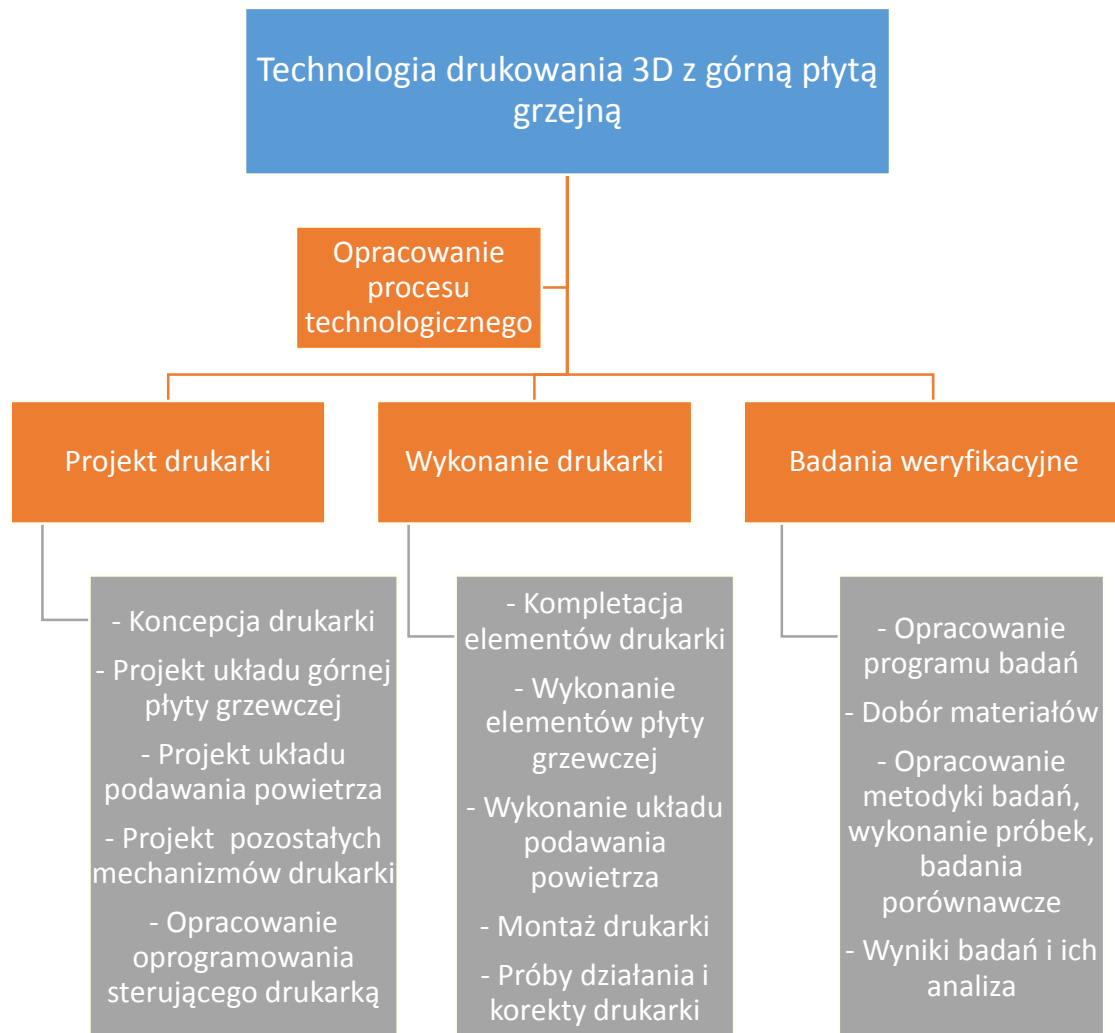
Kolejne etapy prac związanych z technologią drukowania 3D FDM z połączonym działaniem nagrzewania laserowego i głowicy rotującej przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Program prac nad opracowaniem technologii drukowania 3D z głowicą rotującą i jednoczesnym nagrzewaniem laserem

## Technologia drukowania 3D z górną płytą grzejną

Etapy prac własnych związanych z zastosowaniem górnej płyty grzewczej w technologii druku 3D FDM przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Program prac nad opracowaniem technologii drukowania 3D z dodatkową górną płytą grzejną

W ostatnim etapie pracy zostanie przedstawione podsumowanie wyników badań weryfikacyjnych wszystkich zaprezentowanych innowacji oraz sformułowane zostaną wnioski końcowe.

## **4.2. Nowe koncepcje drukowania 3D FDM**

Przedstawione w przeglądzie literatury rozwiązania, mające na celu poprawę więzi pomiędzy kolejnymi warstwami druku 3D FDM można podzielić na dwie klasy:

- techniki modyfikacji tworzywa filamentu i powierzchni filamentu celem poprawy więzi adhezyjnej pomiędzy warstwą wcześniej nałożoną a warstwą aktualnie nakładaną;
- techniki modyfikacji procesu technologicznego tak, aby ułatwić dyfuzję makrocząsteczek polimeru nakładanego w postaci filamentu do warstwy polimeru wcześniej nałożonej.

Zdaniem autora druga klasa technik daje lepsze rezultaty i jest łatwiejsza do implementacji. Modyfikacja tworzywa wiąże się z bardzo dużymi nakładami finansowymi, szczególnie wtedy, kiedy myśli się o masowej produkcji nowego tworzywa i filamentu z takiego tworzywa. Równie kłopotliwa jest modyfikacja powierzchni filamentu. Obserwowana poprawa więzi międzywarstwowej jest istotna ale nie bardzo duża. Metody poprawy warunków dyfuzji makrocząsteczek są znacznie bardziej skuteczne. Warunki łączenia się kolejnych warstw w technice FDM są bardzo podobne do warunków łączenia się tworzyw w technice spawania (szczególnie spawania ekstruzyjnego) i zgrzewania gorącą płytą [581]. Doświadczenia wskazują, że przy dobrze dobranych parametrach wytrzymałość połączeń spawanych sięga 80% wytrzymałości rodzimego materiału (PE, PP) a w przypadku zgrzewania doczołowego od 60% dla PSU do 100% dla PE i PP [582, 583]. Dlatego zdecydowano się poszukiwanie dróg poprawy więzi międzywarstwowej poprzez modyfikacje procesu technologicznego. Na etapie rozważań koncepcyjnych wytypowano trzy modyfikacje oraz jedną, która jest połączeniem dwóch wcześniej opracowanych

**Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą** polega na wprowadzeniu dodatkowego, oscylacyjnego ruchu dyszy drukującej, w płaszczyźnie nakładanych warstw. Taka modyfikacja może prowadzić do poprawy więzi międzywarstwowej poprzez generowanie dodatkowej energii mechanicznej na styku uplastycznionego materiału polimerowego z wcześniej wydrukowanymi warstwami. Ruch obrotowy dyszy będzie powodował dodatkowe naprężenia ścinające w materiale w miejscu styku, co będzie sprzyjało lepszej dyfuzji łańcuchów polimerowych między tworzywem filamentu a tworzywem nałożonej wcześniej warstwy. Powstająca w ten sposób złożona ścieżka drukowania i struktura powierzchni

drukowanej warstwy, poprzez zwiększenie powierzchni kontaktu oraz intensyfikacji procesów dyfuzji, może przełożyć się na istotnie wyższą wytrzymałość mechaniczną wydruków.

**Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym** opiera się na współdziałaniu dwóch metod w technologii FDM.

*Technologia drukowania 3D FDM ze wspomaganie laserem* opiera się na wykorzystaniu promieniowania lasera jako dodatkowego źródła ciepła dostarczanego do przestrzeni, w której następuje połączenie tworzywa wytłaczanego filamentu z tworzywem wcześniej wydrukowanej warstwy. Strumień promieniowania laserowego będzie kierowany na warstwę wcześniej nałożoną, która zdążyła zestalić się w czasie drukowania poprzedniej warstwy i warstwy bieżącej. Dodatkowe źródło ciepła ma uplastyczyć powierzchnię warstwy nakładanej wcześniej a przez to istotnie ułatwić warunki wzajemnej dyfuzję makrocząsteczek polimeru na powierzchni filamentu i na powierzchni warstwy.

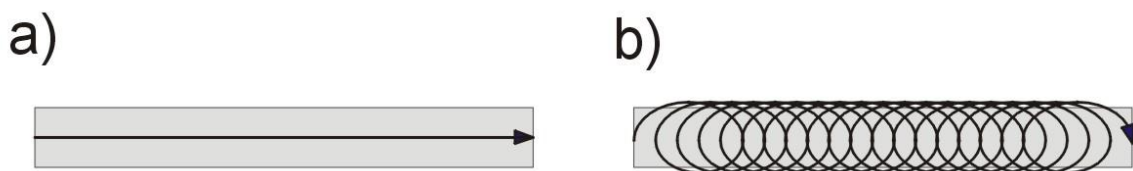
Integracja drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym ma znacząco poprawiać więź międzywarstwową poprzez jednoczesne wykorzystanie efektów termicznych i mechanicznych. Podgrzewanie za pomocą wiązki laserowej wierzchniej warstwy drukowanej części w połączeniu z rotacyjnym ruchem dyszy drukującej pozwoli na zwiększenie energii dostarczanej do strefy łączenia warstw materiału a także zwiększy powierzchnię kontaktu warstw, co może silnie promować procesy dyfuzji makrocząsteczek łączonych warstw.

**Technologia drukowania 3D FDM z górną płytą grzejną** opiera się na zastosowaniu górnej płyty grzejnej, umożliwiającej kontrolowane nagrzewanie wierzchniej warstwy drukowanych części podczas nakładania kolejnych warstw. Przewiduje się poprawę warunków dyfuzji, co ma sprzyjać zwiększeniu więzi międzywarstwowej, oraz redukcję anizotropii mechanicznej, obserwowanej w kowencjonalnym druku FDM. Równomierne podgrzewanie wierzchniej warstwy wydruków przez górną płytę grzejną zapobiegnie intensywnemu chłodzeniu ich górnych warstw i zminimalizuje naprężenia cieplne powstające podczas stygnięcia materiału polimerowego. Będzie to sprzyjać uzyskaniu bardziej jednorodnej struktury wydrukowanych części. Utrzymanie podwyższonej temperatury w strefie drukownia ma wydłużać czas, w którym materiał pozostaje w stanie uplastycznionym, co ułatwi dyfuzję makrocząsteczek między warstwową wydrukowaną a aktualnie drukowaną.



### **4.3. Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą**

Technologia drukowania 3D opiera się na koncepcji, w której ruch rotacyjny dyszy będzie powodował dodatkowe naprężenia ścinające w materiale w miejscu styku, co będzie sprzyjało lepszej dyfuzji łańcuchów polimerowych między tworzywem filamentu a tworzywem nałożonej wcześniej warstwy. Na rys. 4.5 przedstawiono przebieg ścieżki wytłaczanej przez głowicę drukującą drukarek typu FDM w urządzeniach konwencjonalnych oraz w drukarce z głowicą rotującą. Jak pokazano na rysunku, ruch dyszy drukarki jest złożeniem ruchu postępowego i ruchu po okręgu. Dodatkowy ruch dyszy po okręgu będzie dalej dla uproszczenia nazywany dalej ruchem rotacyjnym. Jak w konwencjonalnej drukarce, tak i w tym przypadku, ruch postępowy nie musi się odbywać po linii prostej, ale może być krzywoliniowy.



Rys. 4.5. Ścieżka drukowana w konwencjonalnej technice FDM (a), oraz w proponowanej modyfikacji (b)

Obraz powierzchni próbki drukowanej z użyciem głowicy rotującej z widocznym śladem ruchu dyszy pokazano na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Widok powierzchni próbki wydrukowanej na drukarce 3D z głowicą rotującą

Taka modyfikacja ma na celu poprawę więzi międzywarstwowej poprzez generowanie dodatkowej energii cieplnej w wyniku dodatkowego ścinania tworzywa na styku uplastycznionego materiału polimerowego z wcześniej wydrukowanymi warstwami. Wzrost temperatury w wyniku dyssypacji energii ścinania spowoduje wzrost temperatury na styku materiałów, co będzie skutkowało zmniejszaniem lepkości zarówno tworzywa filamentu jak i tworzywa warstwy wcześniej nałożonej. Czym wyższa jest temperatura tym większa jest też ruchliwość makrocząsteczek polimerowych. Oba te czynniki sprzyjają wzajemnej dyfuzji makrocząsteczek obu łączonych elementów. Także mikro-przepływy, jak wszystkie procesy przepływu, zachodzące w trakcie ścinania skutkują mieszaniem się tworzyw, co jest jednym z podstawowych mechanizmów dyfuzji składników płynów.

Dodatkowy ruch dyszy po okręgu wydłuża ścieżkę drukowania, przez co zwiększa się powierzchnia styku kolejnych warstw. Oczekuje się, że będzie to kolejny czynnik powodujący wzrost sił więzi międzywarstwowej.

#### **4.3.1. Opis procesu technologicznego**

Proponowany proces technologiczny co do zasady nie różni się od typowego drukowania 3D FDM. Nadal używany jest filament, który uplastyczniany jest w cylindrze i wytłaczany z głowicy wytłaczarki. Istotą innowacji jest zastosowanie głowicy wytłaczającej nadającej dyszy drukującej dodatkowy ruch po okręgu w płaszczyźnie nakładanych warstw (ruch rotacyjny), przez co rozwinięta zostaje ścieżka drukowania.

W związku z tym, że drukowanie z wykorzystaniem głowicy rotującej jest rozwinięciem konwencjonalnej technologii drukowania FDM, podstawowe etapy procesu drukowania są dla tych urządzeń podobne.

#### **Etapy procesu drukowania FDM**

##### **Przygotowanie modelu 3D**

- Projektowanie modelu w oprogramowaniu CAD.
- Przetwarzanie modelu na kod G-code za pomocą programu typu „slicer”.
- Dostosowanie parametrów drukowania do materiału i drukarki ( wysokość warstwy, średnica dyszy, gęstość wypełnienia)

##### **Przygotowanie drukarki**

- Kalibracja urządzenia:
- Poziomowanie stołu roboczego.
- Kalibracja osi ruchu.
- Kalibracja wylączarki.

Ustawienie temperatur:

- Głowicy drukującej (wylączarki).
- Stołu roboczego.

Sprawdzenie systemów pomocniczych:

- Systemu chłodzenia elementów mechanicznych i elektroniki.
- Systemów wentylacji i filtracji powietrza.

#### **Przygotowanie materiału**

- Suszenie filamentu.

#### **Proces drukowania**

Nanoszenie pierwszej warstwy:

- Zapewnienie adhezji do stołu roboczego.
- Ustawienie parametrów pierwszej warstwy.

Warstwowe nakładanie materiału:

- Utrzymanie stabilnych warunków termicznych.
- Ustawienie parametrów druku (prędkość, intensywność nadmuchu).

Monitorowanie procesu:

- Kontrola parametrów w czasie rzeczywistym.
- Detekcja błędów i interwencja.

#### **Schładzanie wydruku**

- Stopniowe obniżanie temperatury komory grzewczej.
- Stabilizacja wymiarowa.

#### **Obróbka dodatkowa (opcjonalnie)**

- Obróbka cieplna (odprężanie).

Obróbka mechaniczna:

- Usuwanie podpór i elementów pomocniczych.
- Obróbka powierzchni (szlifowanie, polerowanie).

Drukowanie 3D w technologii z użyciem głowicy rotującej wymaga doboru dodatkowych parametrów jej pracy:

### **Typowe parametry technologiczne w procesie FDM**

- Temperatura wytłaczania.
- Temperatura platformy roboczej.
- Natężenie przepływu nadmuchu chłodzenia wydruku.
- Prędkość drukowania.
- Średnica wymiennej dyszy drukarki.
- Wysokość drukowanej ścieżki.

### **Parametry pracy głowicy rotującej**

- Prędkość obrotowa głowicy rotującej - ustawiane w zakresie: 50 - 2000 obr./min.
- Wartość mimośrodu dyszy drukującej - bezstopniowa, w zakresie: 0 -1 mm.

### **4.3.2. Konstrukcja drukarki 3D z głowicą rotującą**

Mając na uwadze masę głowicy rotującej z osprzętem oraz możliwe dodatkowe obciążania związane z ruchem głowicy rotującej, do budowy drukarki 3D wykorzystano bardzo stabilną platformę, jaką stanowił korpus frezarki numerycznej własnej konstrukcji. Frezarka ta, dzięki swojej precyzji, stabilności i sztywności stanowiła odpowiednią bazę do zamontowania zespołu głowicy rotującej z wbudowanym system wytłaczającym materiał polimerowy w technologii FDM. Na rys. 4.6 przedstawiono widok obrabiarki numerycznej zaadaptowanej do zbudowania prototypowej drukarki 3D.

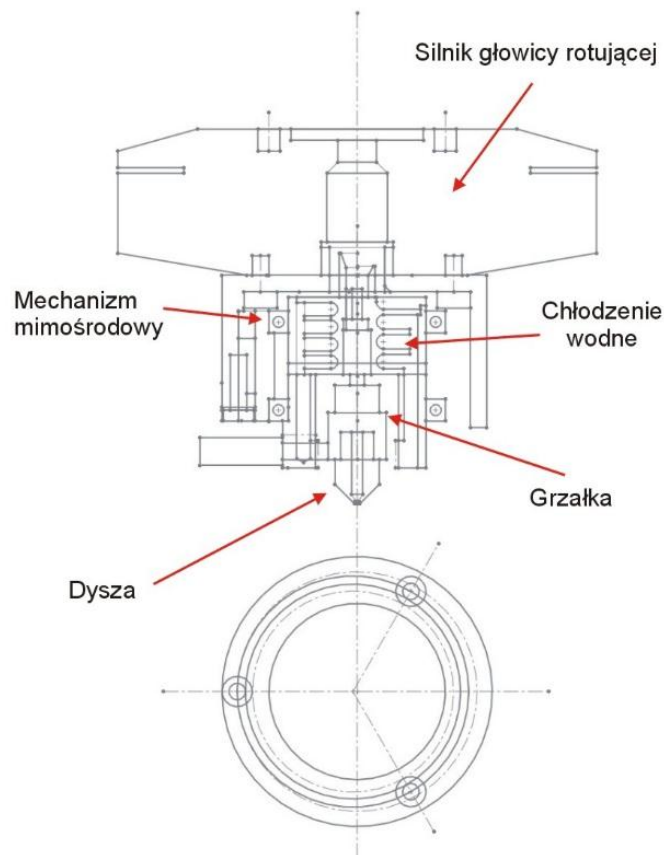


Rys. 4.6. Obrabiarka CNC zaadaptowana do zbudowania drukarki 3D FDM z głowicą rotującą

Konstrukcja całej drukarki nie będzie szczegółowo omawiana, bo budowa tego typu urządzeń jest powszechnie znana, a jedynie jej układ związany z proponowaną innowacją.

### **Projekt głowicy rotującej**

Schematyczny rysunek głowicy rotującej wraz z silnikiem napędowym przedstawiono na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Szkic koncepcyjny głowicy rotującej drukarki 3D FDM z silnikiem napędowym

Na szkicu na rys. 4.7 widoczne są najważniejsze elementy głowicy rotującej. Na rotorze zewnętrznym silnika zamontowano mechanizm mimośrodowy. We wnętrzu tego układu znajduje się płaszcz chłodzenia wodnego przegrody cieplnej, grzałka wytłaczarki oraz dyszę drukarki.

### **Dobór napędu głowicy rotującej**

W trakcie pracy głowic drukarek 3D FDM występują znaczne przyspieszenia, a przez to przeciążenia, wynikające z rozpędzania i zatrzymywania głowic oraz z ich ruchu krzywoliniowego. Biorąc pod uwagę tę dynamikę ruchu, szczególny nacisk położono na dobór silnika tak, aby przy małej masie uzyskiwać duże moment obrotowy. W rezultacie analizy dostępnych rozwiązań, do napędu głowicy rotującej wytypowano silnik BLDC (silnik bezszczotkowy prądu stałego) stosowany w modelarstwie lotniczym, o symbolu U8 firmy T-motor, widoczny na rys. 4.8. Wytypowany silnik, oprócz cech wymienionych powyżej, posiada

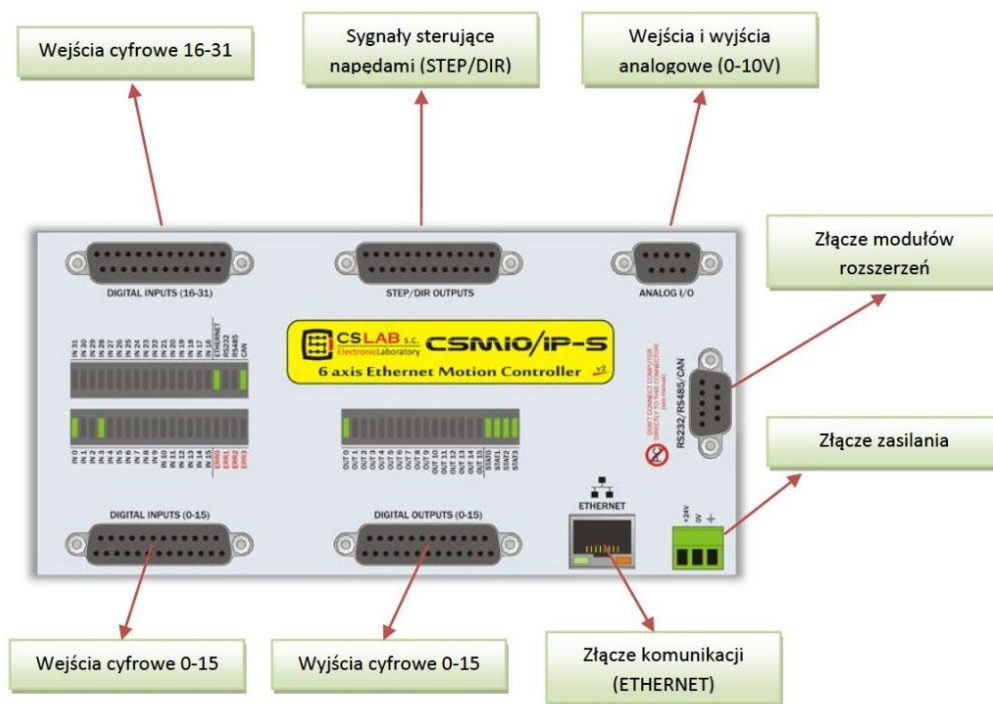
możliwość precyzyjnej kontroli prędkości obrotowej. Duży moment obrotowy wytypowanego napędu wyeliminował konieczność stosowania dodatkowej przekładni, przez co uproszczono konstrukcję głowicy obrotowej. Przy doborze silnika szczególną uwagę zwrócono na możliwość przeprowadzenia przez wał, w jego osi, przewodu podającego filament do głowicy.



Rys. 4.8. Silnik U8 firmy T-motor, z zewnętrznym rotorem, zastosowany do napędu głowicy rotującej

### **Dobór sterowania drukarką 3D**

Do sterowania pracą drukarki wykorzystano sterownik ruchu CS-MIO IP-S, którego schemat złącz przestawiono na rys. 4.9, współpracujący z oprogramowaniem Mach3. Sterownik IP-S umożliwia sterowanie 6 osiami. Zaletami użytego systemu sterowania CNC jest jego stabilność, osiągnięta dzięki połączeniu z komputerem PC za pomocą izolowanej galwanicznie sieci Ethernet, a także możliwościami konfiguracji za niewygórowaną cenę.



Rys. 4.9. Schemat złączy sterownika ruchu zastosowanego do sterowania drukarką 3D

### Kompletacja części drukarki

Budowa prototypowej drukarki wymagała skompletowania wykorzystanych w projekcie części typowych, takich jak napęd filamentu wylączarki, czujniki, łożyska, grzałki czy wentylatory oraz wykonania dużej ilości zaprojektowanych elementów nietypowych. Przykładem nielicznych wykorzystanych elementów typowych jest dysza drukarki. W związku z abrazyjnym oddziaływaniem dodatkowego, rotacyjnego ruchu głowicy na dyszę zespołu wylączającego, szczególnie przy drukowaniu materiałów polimerowych napelnionych włóknem, zastosowano dyszę firmy Olssen z rubinową wkładką, o dużej odporności na ścieranie - rys. 4.10.





Rys. 4.10. Widok dyszy rubinowej firmy Olsson, zastosowanej w drukarce 3D FDM z górną płytą grzejącą

Na części nietypowe użyte przy budowie drukarki 3D z głowicą rotującą składają się przede wszystkim zaprojektowane części głowicy rotującej, oraz jej mocowania do osi obrabiarki CNC.

### **Budowa zespołu napędu głowicy**

Zaprojektowana głowica, po zgromadzeniu wchodzących w jej skład elementów oraz wykonaniu i dopasowaniu części nietypowych została zmontowana. Zbudowana głowica rotująca drukarki 3D widnieje na rys. 4.11.



Rys. 4.11. Moduł głowicy rotującej

### **Montaż drukarki**

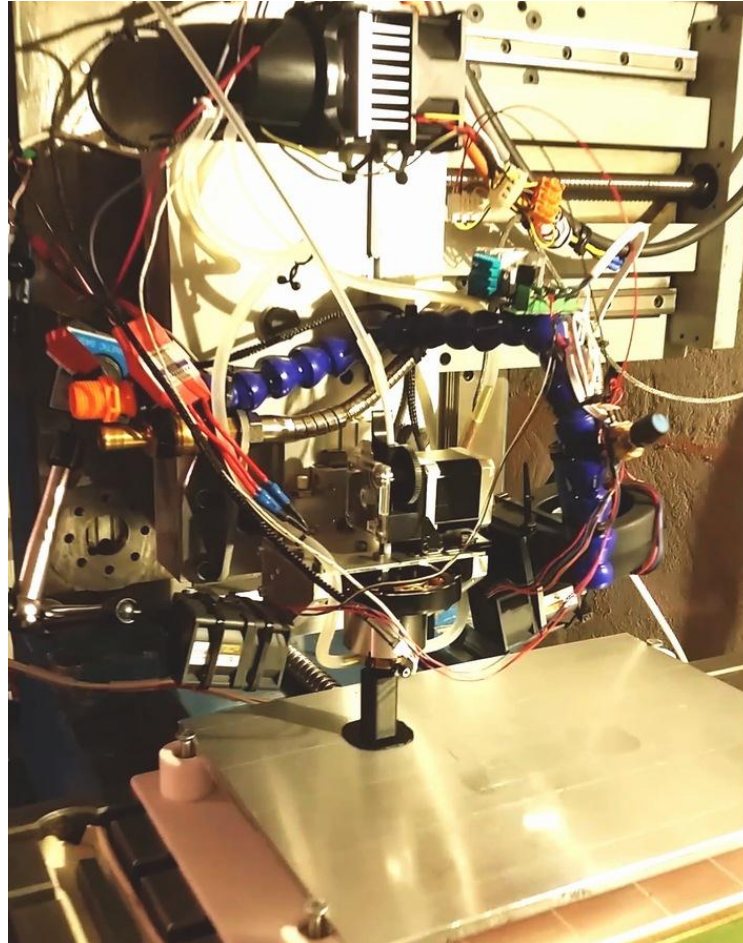
Gotowy moduł głowicy rotującej zamontowany na obrabiarce CNC w trakcie drukowania 3D pokazano na rys. 4.12.



Rys. 4.12. Widok zamontowanej w drukarce 3D głowicy rotującej w trakcie pracy

### **Próba działania i korekty drukarki**

Na rys. 4.13 pokazano prototypową drukarkę 3D z głowicą rotującą podczas prób działania.



Rys. 4.13. Widok drukarki 3D z głowicą rotującą podczas prób

Po dokonaniu szeregu poprawek i korekcie parametrów drukowania, testy drukarki 3D z głowicą rotującą potwierdziły, że dobrany silnik spełnia oczekiwania technologiczne. Mechanizm mimośrodowy działał zgodnie z założeniami projektowymi.

### **4.3.3. Przebieg badań weryfikacyjnych**

W technologii FDM druku 3D występują znaczne ograniczenia wytwarzania w kierunku prostopadłym do powierzchni drukowanych warstw elementów smukłych. W związku z tym wydrukowanie próbek przewidywanych normami do próby wytrzymałości na rozciąganie nie było możliwe. Z tego powodu, jako miarę wytrzymałości między warstwami przyjęto naprężenia niszczące próbkę w zmodyfikowanej próbie zginania trójpunktowego. Kierunek drukowanych warstw w próbkach przyjęto tak, aby w próbie zginania, naprężenia normalne były do niego prostopadłe. Ze względu na ograniczone gabaryty próbek, jakie można było wydrukować w prototypowej drukarce, nie można było spełnić warunku odpowiedniej odległości między podporami próbek, przy której siły tnące można pominąć w obliczeniach naprężeń. Ponieważ przeprowadzone badania miały charakter jedynie porównawczy, nie wyznaczano liczbowej wartości sił niszczących próbki a jedynie ich pośrednią miarę. Z tego powodu uzyskane wartości nie mogą być zakwalifikowane jako wytrzymałość na zginanie a jedynie jako porównawcza miara więzi międzywarstwowej. Podobne badania przeprowadza się do oceny wytrzymałości połączeń spawanych i zgrzewanych [583, 584].

### **Program badań weryfikacyjnych**

Weryfikacji skuteczności innowacyjnej technologii druku 3D FDM dokonano przez porównanie obciążeń niszczących w próbie zginania dla wybranych tworzyw polimerowych, stosowanych na filamenty.

Dla każdego wytypowanego tworzywa filamentu, przewidziano serię badań referencyjnych – wykonanych przy wyłączonej głowicy rotującej, co odpowiada działaniu konwencjonalnej drukarki FDM. Przy drukowaniu kształtek, z których będą przygotowywane próbki, dla każdego z wytypowanych materiałów, zastosowany będzie taki sam, wcześniej dobrany zestaw parametrów podstawowych drukowania, czyli: temperatury wytłaczania, prędkości drukowania i wartości nadmuchu powietrza chłodzącego.

## **Metodyka badań**

Weryfikacja będzie polegała na porównaniu pośredniej miary naprężeń niszczących w próbie zginania na aparacie pomiarowym autorskiej konstrukcji.

Aby ograniczyć ilość zmiennych niezależnych w badaniach weryfikacyjnych drukarki 3D z głowicą rotującą, dla wszystkich przygotowanych do testów porównawczych próbek, przyjęto stałą wartość mimośrodowość głowicy rotującej równą 0,2 mm.

Rozstaw podpór przy zginaniu trójpunktowym został ustalony na 24 mm, co stanowiło 80% długości próbki, zgodnie z zaleceniami normy *PN-EN ISO 178:2011* dla próbek o zmniejszonych wymiarach. Taki dobór rozstawu zapewnił właściwe warunki zginania i minimalizował wpływ efektów brzegowych.

Naprężenia ( $\sigma$ ) w próbie zginania wyznaczano zgodnie powszechnie znanym wzorem:

$$\sigma = \frac{Mg}{W} \quad (4.1)$$

gdzie:

Mg – moment gnący,

W – wskaźnik wytrzymałości na zginanie.

Moment gnący (Mg) w próbie zginania trójpunktowego wyznacza się ze wzoru:

$$Mg = \frac{F}{2} \cdot L \quad (4.2)$$

gdzie:

F – siła nacisku

L – odległość między podporami.

Wskaźnik wytrzymałości na zginanie dla belki o przekroju prostokątnym wynosi:

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6} \quad (4.3)$$

gdzie:

B – szerokość próbki,

H – wysokość (grubość) próbki.

Po wstawieniu wzorów (4.2) i (4.3) do (4.1) otrzymuje się zależność, zgodnie z którą wyznaczano naprężenia:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot B \cdot H^2} \quad (4.4)$$

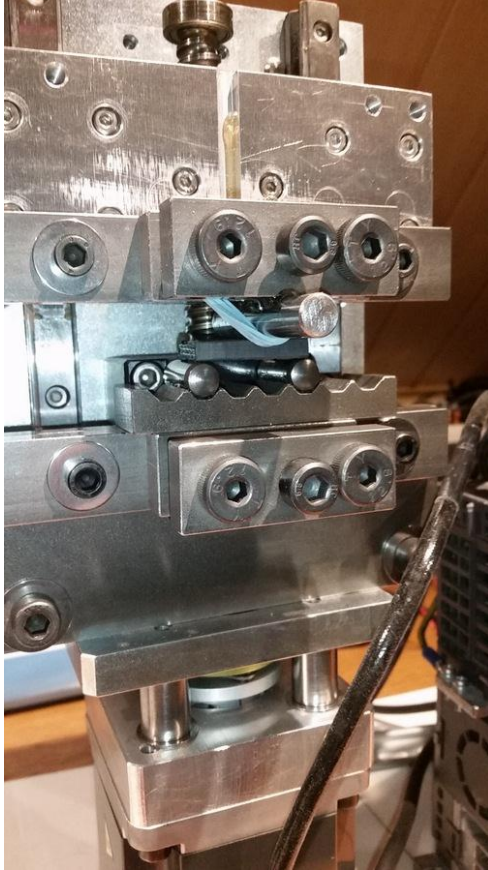
Wstawiając do wzoru (4.4) siłę, przy której następowało pęknięcie próbki, otrzymywano naprężenia niszczące.

## **Budowa aparatu pomiarowego**

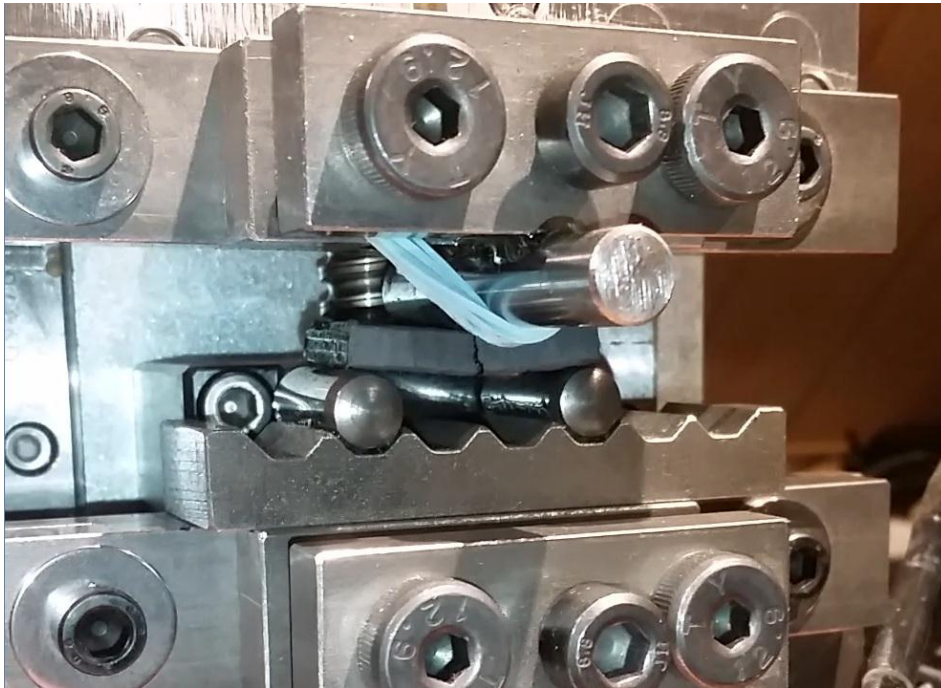
Celem ograniczenia problemów logistycznych związanych z tym, że próby technologiczne odbywały się poza Politechniką Śląską a badania wytrzymałościowe miały odbywać się w laboratorium tej Uczelni, a przede wszystkim żeby znacząco przyspieszyć proces doboru parametrów przy drukowaniu nowego typu drukarkami FDM wielu rodzajów tworzyw polimerowych, skonstruowano aparat do realizacji próby zginania. Aparat ten pełnił funkcję prostej maszyny wytrzymałościowej. Dzięki temu możliwe było przeprowadzanie uproszczonych badań próbek w lokalizacji, gdzie były drukowane i możliwa była szybka weryfikacja wpływu dokonywanych zmian parametrów technologicznych na poziom sił więzi międzywarstwowej. Przyjęto, że mimo, iż wyniki tak przeprowadzanych pomiarów nie są bardzo dokładne, ani nie można ich wprost odnosić do badań na laboratoryjnych maszynach wytrzymałościowych, to do celów weryfikacji skuteczności innowacyjnej technologii drukowania 3D są wystarczające.

Jako miarę wytrzymałości międzywarstwowej przyjęto naprężenia niszczące próbkę w zmodyfikowanej próbie zginania trójpunktowego. Warstwy drukowano tak, aby w próbie zginania naprężenia normalne miały kierunek prostopadły do warstw. Niewielka odległość między podporami powoduje, że oprócz naprężeń normalnych o odmiennym znaku po obu stronach osi obojętnej belki zginanej, będą występowały naprężenia styczne. Dlatego uzyskane wyniki nie mogą być zakwalifikowane jako wytrzymałość na zginanie a jedynie jako porównawcza miara więzi międzywarstwowej. Podobne badania są też używane od oceny wytrzymałości połączeń spawanych i zgrzewanych [ 583, 584].

Zbudowany aparat do porównawczych prób wytrzymałości widnieje na rys. 4.14. Przelamaną w trakcie testu wytrzymałości próbkę, umieszczoną na podporach aparatu pomiarowego pokazano na rys. 4.15.



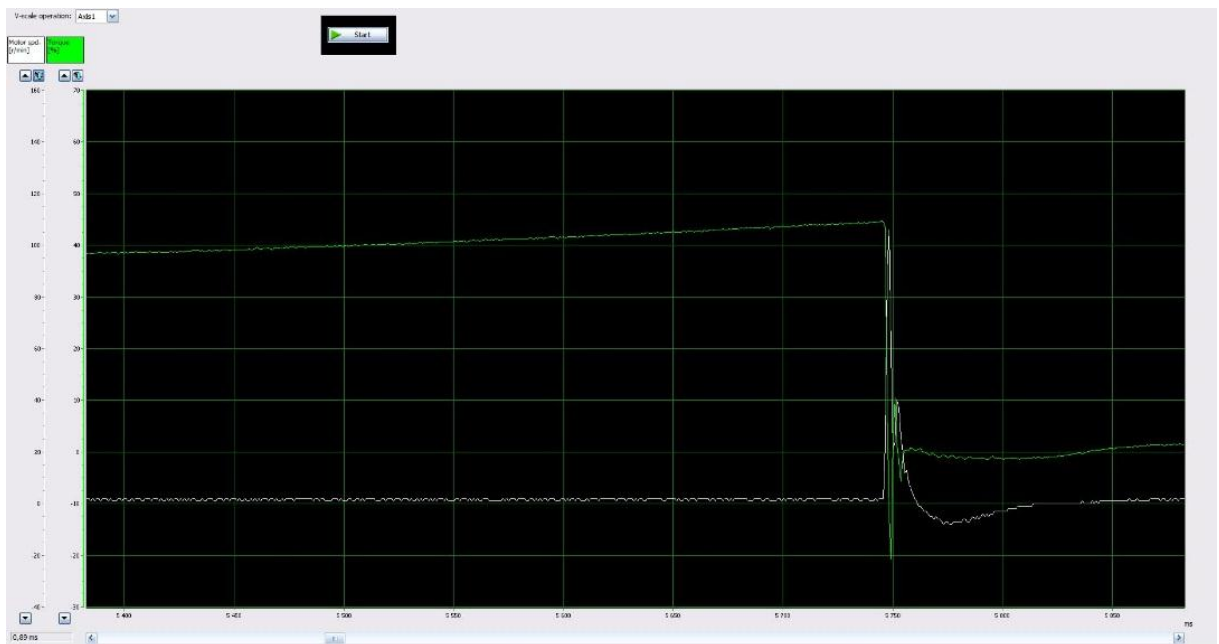
Rys. 4.14. Aparat do prób wytrzymałości międzywarstwowej drukowanych próbek



Rys. 4.15. Próbką przełamana w trakcie testu na aparacie do prób wytrzymałości

Budowa i zasada działania skonstruowanego aparatu do prób wytrzymałości jest zbliżona do prostych, laboratoryjnych maszyn wytrzymałościowych, jednak inaczej niż w przypadku tych maszyn, do pomiaru siły wywieranych na próbkę nie zastosowano czujnika siły. Poprzez zastosowanie enkodera bardzo wysokiej rozdzielczości, zaawansowanych, wbudowanych w serwowzmazniacz algorytmów przetwarzania ruchu i przy wykorzystaniu dedykowanego oprogramowania, możliwe było wygenerowanie wykresów obciążeń w funkcji drogi, podczas badania próbek. Przykładowy wykres, na podstawie którego wyznaczano porównawczą miarę siły niszczącej próbkę przedstawiono na rys. 4.16.





Rys. 4.16. Fragment przykładowego wykresu zależności siły od strzałki ugięcia próbki w obszarze jej złamania

Aparat pomiarowy skalibrowano za pomocą czujnika siły i wyznaczono współczynnik skalowania, który wyniósł 15,6. Odczytywane z programu monitorującego napęd serwo aparatu pomiarowego wartości momentu silnika w miejscu przełamania próbki, po przemnożeniu przez ten współczynnik dawały przybliżoną wartość siły.

## **Dobór materiałów**

Do zbadania wpływu zastosowania głowicy rotującej na więź międzywarstwową drukowanych części wytypowano trzy kompozytowe materiały polimerowe z grupy filamentów technicznych. Producentem wszystkich wybranych tworzyw jest firma BASF/Innofil. Wszystkie te materiały są wzmocnione różnymi rodzajami mielonych włókien. Tego typu filamenty uważane za najtrudniejsze w przetwarzaniu technologią FDM. Poniżej podano sugerowane przez Producenta parametry drukowania oraz najważniejsze właściwości.

**Ultrafuse® PET CF15 (Poli(tereftalan etylenu) +15% włókien węglowych)**

Sugerowane parametry drukowania:

Temp. dyszy: 250-270 °C  
Temp. platformy: 65 - 85 °C  
Materiał platformy: Glass, PEI  
Średnica dyszy:  $\geq 0.6$  mm, rubinowa lub hartowana  
Prędkość drukowania: 30 - 80 mm / s

Wybrane właściwości:

Temp. zeszklenia: 79 °C (ISO 11357-2)  
Temp. krystalizacji: 204 °C (ISO 11357-3)  
Temp. topnienia: 245 °C (ISO 11357-3)  
Objętościowy wskaźnik płynięcia MVR: 25 cm<sup>3</sup>/10 min (260 °C, 2.16 kg) (ISO 1133)

**Ultrafuse® PAHT CF15 (Poliamid wysokotemperaturowy +15% włókien węglowych)**

Sugerowane parametry drukowania:

Temp. dyszy: 250-270 °C  
Temp. platformy: 65 - 85 °C  
Materiał platformy: Glass, PEI  
Średnica dyszy:  $\geq 0.6$  mm, rubinowa lub hartowana  
Prędkość drukowania: 30 - 80 mm / s

Wybrane właściwości:

Temp. zeszklenia: 70 °C (ISO 11357-2)  
Temp. krystalizacji: 180 °C (ISO 11357-3)  
Temp. topnienia: 234 °C (ISO 11357-3)  
Objętościowy wskaźnik płynięcia MVR: 42,2 cm<sup>3</sup>/10 min (275 °C, 5 kg) (ISO 1133)

**Ultrafuse® PP GF30 (Polipropylen +30% włókien szklanych)**

Sugerowane parametry drukowania:

Temp. dyszy: 240-260 °C  
Temp. platformy: 20 - 40 °C  
Materiał platformy: taśma PP, klej PP GF  
Średnica dyszy:  $\geq 0.6$  mm, rubinowa lub hartowana  
Prędkość drukowania: 30 - 80 mm / s

Wybrane właściwości:

Temp. zeszklenia: -5 °C (ISO 11357-2)  
Temp. krystalizacji: 125 °C (ISO 11357-3)  
Temp. topnienia: 245 °C (ISO 11357-3)  
Objętościowy wskaźnik płynięcia MVR: 11,7 cm<sup>3</sup>/10 min (260 °C, 2,16 kg) (ISO 1133)

## Wykonanie próbek

Próbki do badania wykonano zgodnie z programem badań weryfikacyjnych dla technologii druku 3D z głowicą rotującą. Kształtki do wykonania próbek mają postać kątowników o boku 32 mm, wysokości 30mm i grubości ścianki 5 mm. Kształtki jednej z serii testów widnieją na rys. 4.17.

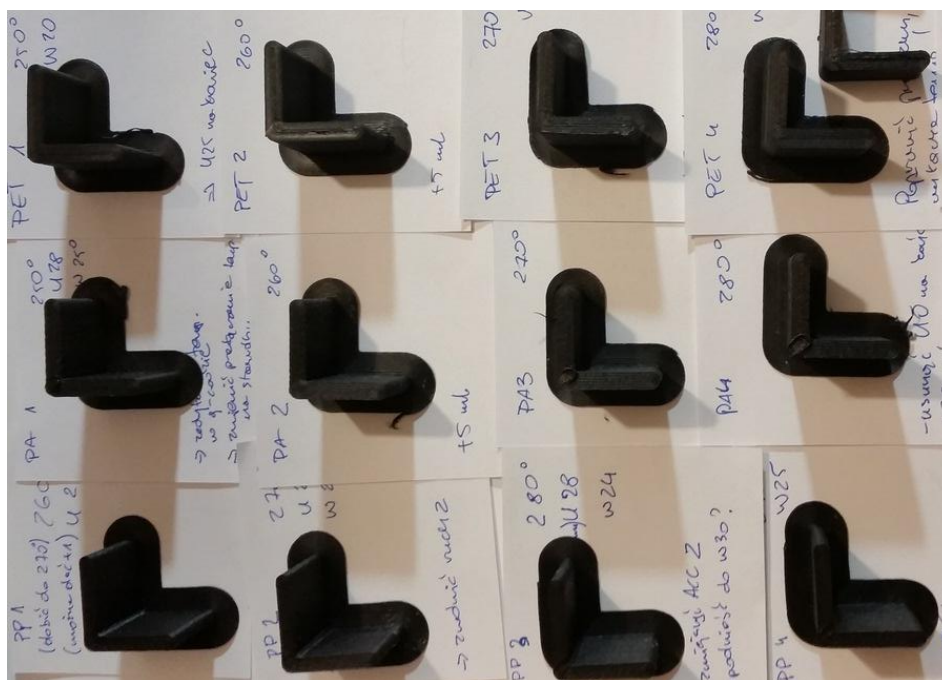
Do wygenerowania kodów sterujących ruchami osi drukarki 3D użyto oprogramowania Ultimaker Cura (wersja 4.13), dostępnego bezpłatnie [594].

W wyniku prób technologicznych dokonano wyboru następujących, podstawowych parametrów drukowania 3D FDM z rotującą głowicą:

- średnica dyszy: 0,8 mm
- wysokość warstwy: 0,25 mm
- prędkość drukowania: 10 mm/s
- gęstość wypełnienia: 100%

Parametry głowicy rotującej:

- Prędkość obrotowa – ustawiono stałą wartość dla wszystkich prób – 600 obr./min.
- Wartość mimośrodu dyszy drukującej – 0,2 mm.



Rys. 4.17. Postać wydrukowanych do programu badań weryfikacyjnych kształtek

Próbki z wydrukowanych kształtek wycinano na obrabiarce uniwersalnej OUS-1 polskiej produkcji, którą zaadaptowano do tego celu (rys. 4.18). Obrabiarka posiada zmodernizowane, wysokoobrotowe wrzeciono z płynną regulacją obrotów. Celem minimalizacji oporów skrawania, do wycinania próbek użyto średnioziarnistej tarczy diamentowej o grubości 1mm. Proces cięcia prowadzono zwilżając próbkę wodą, aby wyeliminować wpływu ciepła na tworzywo.



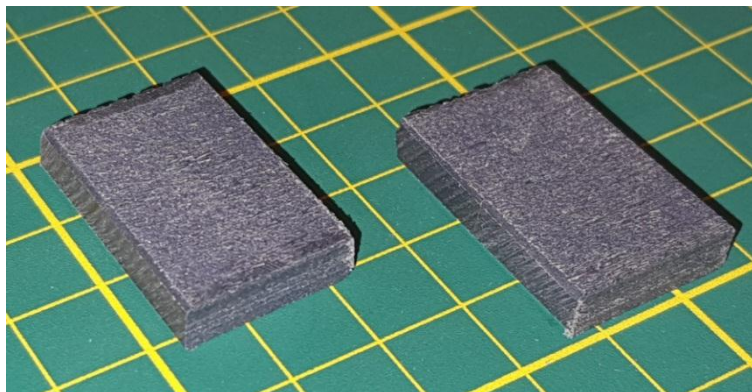
Rys. 4.18. Obrabiarka uniwersalna OUS-1 zaadaptowano do wycinania próbek

Na rys. 4.31 przedstawiono widok próbek z PEEK CF10 przygotowanych do badań.

Próbki do badań miały następujące wymiary po wycięciu:

- długość 30: mm,
- szerokość: 20 mm,
- grubość: ~ 6mm, zależnie od parametrów, z jakimi drukowana była kształtka próbki.

Na rys. 4.19 przedstawiono przykładowe próbki, wycięte z kształtek wydrukowanych z PAHT CF15.



Rys. 4.19. Próbki z PAHT CF15 do badań porównawczych

## **Wyniki badań**

W tabeli 4.1 przedstawiono wyniki badań referencyjnych dla próbek wydrukowanych z PAHT CF15 konwencjonalną metodą FDM. Wyniki wykonanych metodą FDM z użyciem rotującej głowicy przedstawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.1 Wyniki pomiarów próbek referencyjnych dla PAHT CF15

<b>Nr</b>	<b>B</b>	<b>H</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma_{PA}</math></b>
	mm	mm	N	MPa
1	20,00	5,90	102	5,27
2	20,10	5,90	142	7,31
3	20,10	6,00	129	6,42
4	20,20	6,10	119	5,70
5	19,90	6,00	150	7,54
6	19,90	6,00	123	6,18
7	20,00	6,20	122	5,71
8	19,80	6,20	136	6,43
<b>Średnia</b>				<b>6,32</b>

Tabela 4.2. Wyniki pomiarów próbek z głowicą rotującą dla PAHT CF15

<b>Nr</b>	<b>B</b>	<b>H</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma_R_{PA}</math></b>
	mm	mm	N	MPa
1	19,90	6,10	167	8,12
2	20,00	6,00	118	5,90
3	19,90	6,20	139	6,54
4	20,20	5,90	150	7,68
5	19,80	6,10	141	6,89
6	20,10	6,10	149	7,17
<b>Średnia</b>				<b>7,05</b>

W tabeli 4.3 przedstawiono wyniki badań referencyjnych dla próbek wydrukowanych z PAHT CF15 konwencjonalną metodą FDM. Wyniki wykonanych metodą FDM z użyciem rotującej głowicy przedstawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4.3. Wyniki pomiarów próbek referencyjnych dla PET CF15

<b>Nr</b>	<b>B</b>	<b>H</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma_{PET}</math></b>
	mm	mm	N	MPa
1	20,10	6,00	82	4,08
2	20,00	5,90	103	5,33
3	20,20	6,10	63	3,02
4	20,20	6,10	96	4,60
5	19,90	6,10	90	4,38
6	20,00	6,00	80	4,00
7	20,00	6,00	86	4,30
8	19,80	5,90	72	3,76
<b>Średnia</b>				<b>4,18</b>

Tabela 4.4. Wyniki pomiarów próbek z głowicą rotującą dla PET CF15

<b>Nr</b>	<b>B</b>	<b>H</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma_R_{PET}</math></b>
	mm	mm	N	MPa
1	19,80	5,90	81	4,23
2	20,10	6,00	119	5,92
3	20,00	6,10	84	4,06
4	20,20	6,10	102	4,89
5	20,00	6,00	80	4,00
6	20,00	6,00	95	4,75
<b>Średnia</b>				<b>4,64</b>

W tabeli 4.5 przedstawiono wyniki badań referencyjnych dla próbek wydrukowanych z PP GF30 konwencjonalną metodą FDM. Wyniki wykonanych metodą FDM z użyciem rotującej głowicy przedstawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.5. Wyniki pomiarów próbek referencyjnych dla PP GF30

<b>Nr</b>	<b>B</b>	<b>H</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma_{PP}</math></b>
	mm	mm	N	MPa
1	20,20	5,90	300	15,36
2	20,00	5,90	294	15,20
3	20,10	6,00	265	13,18
4	20,20	6,10	282	13,51
5	19,80	6,00	286	14,44
6	20,00	6,00	288	14,40
7	20,10	5,90	310	15,95
8	20,10	5,90	254	13,07
<b>Średnia</b>				<b>14,39</b>

Tabela 4.6. Wyniki pomiarów próbek z głowicą rotującą dla PP GF30

<b>Nr</b>	<b>B</b>	<b>H</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma_{R\_PP}</math></b>
	mm	mm	N	MPa
1	20,20	6,10	265	12,69
2	20,10	6,00	288	14,33
3	20,00	6,00	266	13,30
4	19,80	6,10	272	13,29
5	20,00	6,10	242	11,71
6	20,10	6,10	276	13,28
<b>Średnia</b>				<b>13,10</b>

Porównanie wyników zostanie przedstawione we wspólnym podsumowaniu dla metod drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej i z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym.

## **4.4. Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym**

Technologia drukowania 3D z jednoczesnym nagrzewaniem wiązką lasera i działaniem głowicy rotującej opiera się na połączeniu dwóch metod w technologii FDM. Integracja tych technik ma na celu dalszą poprawę więzi międzywarstwowej poprzez jednoczesne wykorzystanie efektów termicznych i mechanicznych.

### **4.4.1. Modernizacja drukarki**

Konstrukcja drukarki 3D z głowicą rotującą wspomaganą laserem obejmowała szereg etapów: od precyzyjnej obróbki elementów mechanicznych, przez montaż układów optycznych i grzewczych, aż po integrację całości z zaawansowanym systemem sterowania. Bazą dla drukarki była własnej konstrukcji frezarka numeryczna, która zapewniła wysoką stabilność i dokładność pozycjonowania, niezbędną w systemach wieloosiowych. Na tej platformie zamontowano kluczowe części drukarki 3D: głowicę wytłaczającą oraz moduł obrotowej platformy roboczej drukarki 3D. Platforma ta została zaprojektowana tak, aby mogła obracać się wielokrotnie bez ograniczeń kątowych, jednocześnie umożliwiając utrzymanie zadanej temperatury zamontowanego na niej stołu grzewczego (ang. hot bed) drukarki 3D. Wymagało to zastosowania specjalnych złączy obrotowych do doprowadzenia przewodów mocy i czujników temperatury.

Modernizacja drukarki 3D z głowicą rotującą polega na dołożeniu wytypowanego modułu lasera do układu drukarki tak, aby umożliwić dostęp wiązki światła w strefę styku wytłaczanego materiału polimerowego z warstwą wierzchnią drukowanego przedmiotu. W celu umożliwienia precyzyjnej kontroli położenia wiązki, do zamontowania modułu lasera użyto wieloosiowego, precyzyjnego stolika koordynacyjnego. W zastosowanej koncepcji drukowania 3D z nagrzewaniem laserowym, kierunek wiązki światła lasera w płaszczyźnie platformy roboczej, dostosowywany jest do kierunku ścieżki drukowania. Funkcję tę zrealizowano przez dodanie sterowanego stolika obrotowego do obrabiarki CNC, realizującej ruchy głowicy wytłaczającej drukarki 3D w układzie kartezyjskim. Interpolację osi liniowych i obrotowej zrealizowano przez modyfikację programów G-code.



### **Dobór źródła promieniowania laserowego**

Najważniejszymi parametrami przy wyborze lasera były długość fali, moc oraz precyzja wiązki. Moc lasera powinna umożliwiać precyzyjne podgrzewanie materiału, unikając nadmiernego przegrzewania, co mogłoby prowadzić do degradacji wytłoczonego tworzywa polimerowego.

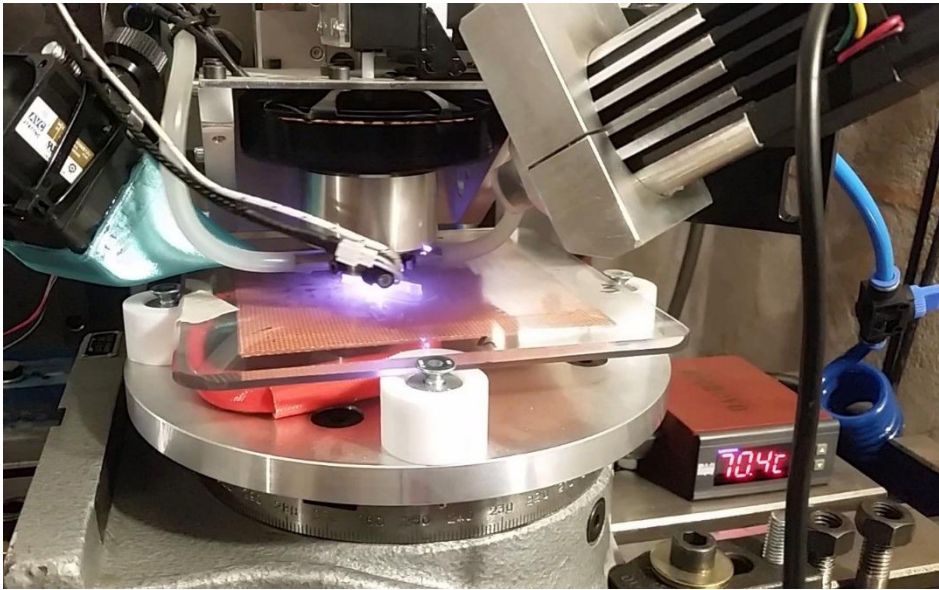
Po analizie dostępnej literatury, jako źródło światła laserowego wybrano głowicę z laserem diodowym o mocy 8W, o długości fali emitowanego światła 808nm, wyposażonej w kolimator umożliwiający ustawianie skupienia wiązki światła. Wzmacniacz modułu lasera zasilany napięciem 12V umożliwia sterowanie mocą emitowanego światła. Sterowanie mocą lasera polega na wykorzystaniu cyfrowych sygnałów sterujących (0 i 5 V) do kontrolowania stanu lasera (włączony/wyłączony) oraz średniej mocy poprzez modulację sygnału, taką jak PWM (ang. Pulse Width Modulation – modulacja szerokości impulsu). Zastosowany zestaw lasera po modyfikacji korpusu głowicy drukującej, mającej na celu dostosowanie do mechanicznego układu drukarki 3D i jej zamontowaniu na precyzyjnym stoliku koordynacyjnym, widnieje na rys. 4.20.



Rys. 4.20. Zestaw źródła lasera o mocy 8W i długości fali wiązki światła 808 nm

### **Projekt mechanizmów drukarki**

Zastosowany obrotowy stół roboczy musiał poruszać się w taki sposób, aby stale współpracować z ruchem głowicy drukującej, utrzymując precyzyjnie ustawioną wiązkę lasera w odpowiedniej pozycji względem warstwy materiału, na której następowało osadzanie kolejnej warstwy, przy zachowaniu stałej, zaprogramowanej prędkości liniowej drukowania. Na rys. 4.21 widoczny jest zespół platformy roboczej drukarki 3D zamontowany na stole obrotowym, którego ruch zsynchronizowany jest z ruchami głowicy drukującej.



Rys. 4.21. Platforma robocza drukarki 3D wspomaganą laserem w trakcie pracy

### **Opracowanie programu sterującego**

Ze względu na złożoność systemu, w którym głowica drukująca porusza się wzdłuż osi prostopadłych, a stół roboczy drukarki (ang. hot bed) obraca się, niezbędne było dostosowanie programu sterującego do drukarki 3D wspomaganą laserem. Polegało ono na stworzeniu kodu sterowania ruchem maszyny cnc (G-code), który pozwoli na zapewnienie pełnej synchronizacji ruchu wszystkich osi maszyny oraz umożliwi kontrolę nad działaniem lasera.

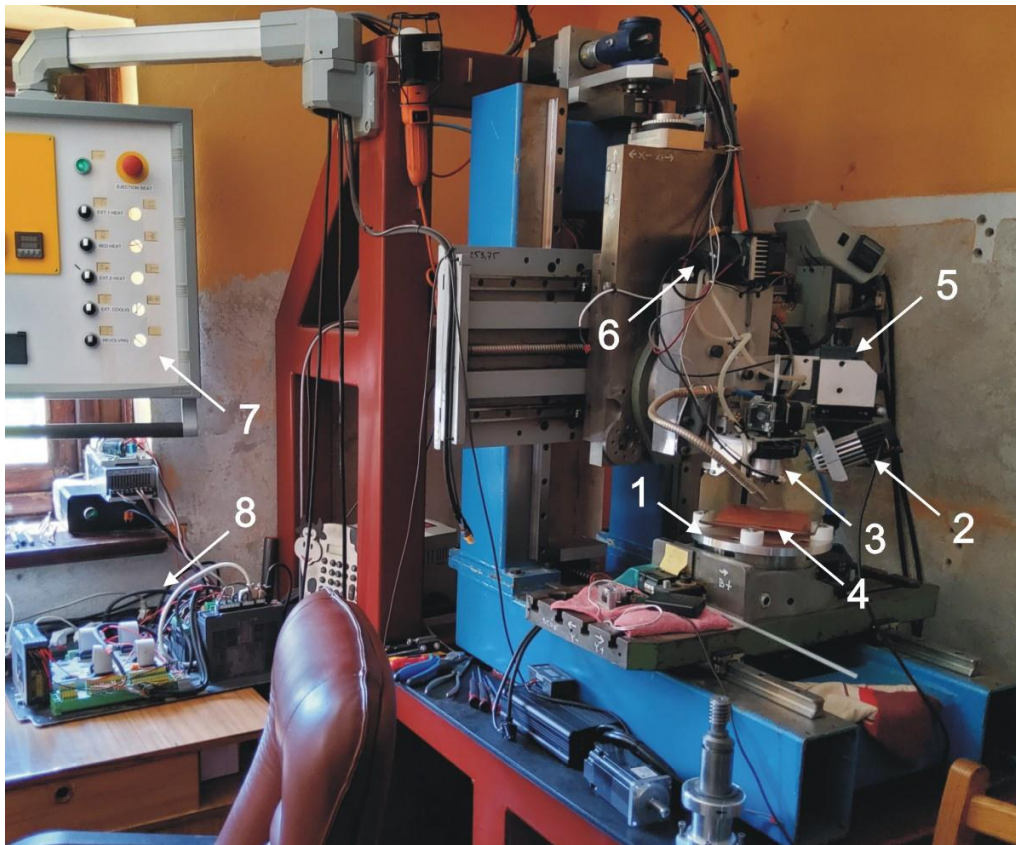
Zastosowany do wcześniej zbudowanej drukarki 3D z głowicą rotacyjną sterownik ruchu CS-MIO IP-S, po przekonfigurowaniu, umożliwił kontrolę zsynchronizowanego ruchu głowicy drukującej i osi obrotowej stołu roboczego. Okno współpracującego ze sterownikiem ruchu programu Mach3 widoczne jest na rys. 4.22.



Rys. 4.22. Okno programu Mach3 podczas pracy drukarki 3D wspomaganej laserem

### Kompletacja części, wykonanie części nietypowych, montaż głowicy lasera

Moduł lasera został zamocowany na pionowej osi obrabiarki CNC, przy głowicy drukującej w sposób zapewniający bezkolizyjne ruchy oraz precyzyjne kierowanie wiązki na powierzchnię drukowanego materiału. Na rys. 4.23 przedstawiono widok zbudowanej do celów badawczych drukarki 3D z głowicą rotacyjną, z zamontowanym modułem lasera. Na ilustracji widać grzaną, obrotową platformę roboczą drukarki z precyzyjną kontrolą temperatury, oraz zamontowaną na precyzyjnym, wieloosiowym stoliku koordynacyjnym głowicę lasera.



Rys. 4.23. Drukarka 3D wykonana do celów badania wspomaganie laserowego drukowania 3D.  
1) Platforma obrotowa drukarki 2) Moduł lasera diodowego 3) Moduł głowicy rotującej 4) Stolik grzejny drukarki 5) Stolik koordynacyjny modułu lasera 6) Moduł chłodzenia wodnego separatora temperatury wytłaczarki 7) Panel sterujący 8) Sterownik ruchu CS-MIO

### **Próby działania i korekty drukarki**

W końcowej fazie wykonania urządzenia, wszystkie części zostały poddane kalibracji, a następnie przeprowadzono testy funkcjonalne drukarki. Weryfikacji poddano zarówno precyzję ruchu mechanicznego, jak i efektywność działania modułu.

#### **4.4.2. Przebieg badań weryfikacyjnych**

##### **Program badań weryfikacyjnych**

Weryfikacji skuteczności innowacyjnej technologii druku 3D FDM dokonano przez porównanie obciążeń niszczących w próbie zginania dla wybranych tworzyw polimerowych, stosowanych na filamenty.

Dla każdego wytypowanego tworzywa filamentu, przewidziano serię badań wykonanych metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym.

W celu porównania wpływu na metodę drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej połączonej z nagrzewaniem laserowym, przewidziano serię badań próbek wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej).

Przy drukowaniu kształtek, z których będą przygotowywane próbki, dla każdego z wytypowanych materiałów, zastosowany będzie taki sam, wcześniej dobrany zestaw parametrów podstawowych drukowania, czyli: temperatury wytłaczania, prędkości drukowania i wartości nadmuchu powietrza chłodzącego.

Zastosowane do badań **materiały** filamentów, a także **metodyka badań** dla technologii drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym, jako, że są rozwinięciem technologii drukowania 3D z głowicą rotującą, są te same.

##### **Wyniki badań**

W tabeli 4.7 przedstawiono wyniki badań dla próbek wydrukowanych z PAHT CF15 metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym. Wyniki badań wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej) przedstawiono w tabeli 4.8.

Tabela 4.7. Wyniki pomiarów próbek z PAHT CF15 wykonanych metodą FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym

Nr	B	H	F	$\sigma_{LR\_PA}$
	mm	mm	N	MPa
1	19,90	6,00	204	10,25
2	20,00	6,00	221	11,05
3	20,10	5,90	174	8,95
4	20,10	5,90	169	8,70
5	19,90	6,00	195	9,80
6	20,00	6,20	208	9,74
<b>Średnia</b>				<b>9,75</b>

Tabela 4.8. Wyniki pomiarów próbek z PAHT CF15 wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej)

Nr	B	H	F	$\sigma_{L\_PA}$
	mm	mm	N	MPa
1	19,90	6,00	203	10,20
2	20,00	6,00	231	11,55
3	20,10	6,20	206	9,60
4	20,20	6,00	245	12,13
5	20,10	6,10	201	9,67
6	19,80	6,00	199	10,05
<b>Średnia</b>				<b>10,53</b>

W tabeli 4.9 przedstawiono wyniki badań dla próbek wydrukowanych z PET CF15 metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym. Wyniki badań wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej) przedstawiono w tabeli 4.10.

Tabela 4.9. Wyniki pomiarów próbek z PET CF15 wykonanych metodą FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym

Nr	B	H	F	$\sigma_{LR\_PET}$
	mm	mm	N	MPa
1	19,80	5,90	145	7,57
2	20,10	6,00	109	5,42
3	20,00	6,10	141	6,82
4	20,20	6,10	131	6,27
5	20,00	6,00	94	4,70
6	20,00	6,00	135	6,75
<b>Średnia</b>				<b>6,26</b>

Tabela 4.10. Wyniki pomiarów próbek z PET CF15 wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej)

Nr	B	H	F	$\sigma_{L\_PET}$
	mm	mm	N	MPa
1	19,80	5,90	82	4,28
2	20,10	6,00	109	5,42
3	20,00	6,10	149	7,21
4	20,20	6,10	111	5,32
5	20,00	6,00	90	4,50
6	20,00	6,00	115	5,75
<b>Średnia</b>				<b>5,41</b>

W tabeli 4.11 przedstawiono wyniki badań dla próbek wydrukowanych z PP GF30 metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym. Wyniki badań wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej) przedstawiono w tabeli 4.12.

Tabela 4.11. Wyniki pomiarów próbek z PP GF30 wykonanych metodą FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym

Nr	B	H	F	$\sigma_{LR\_PP}$
	mm	mm	N	MPa
1	20,00	5,90	110	5,69
2	20,10	6,00	131	6,52
3	20,10	6,10	149	7,17
4	20,10	6,10	122	5,87
5	20,00	6,00	128	6,40
6	19,90	6,00	125	6,28
<b>Średnia</b>				<b>6,32</b>

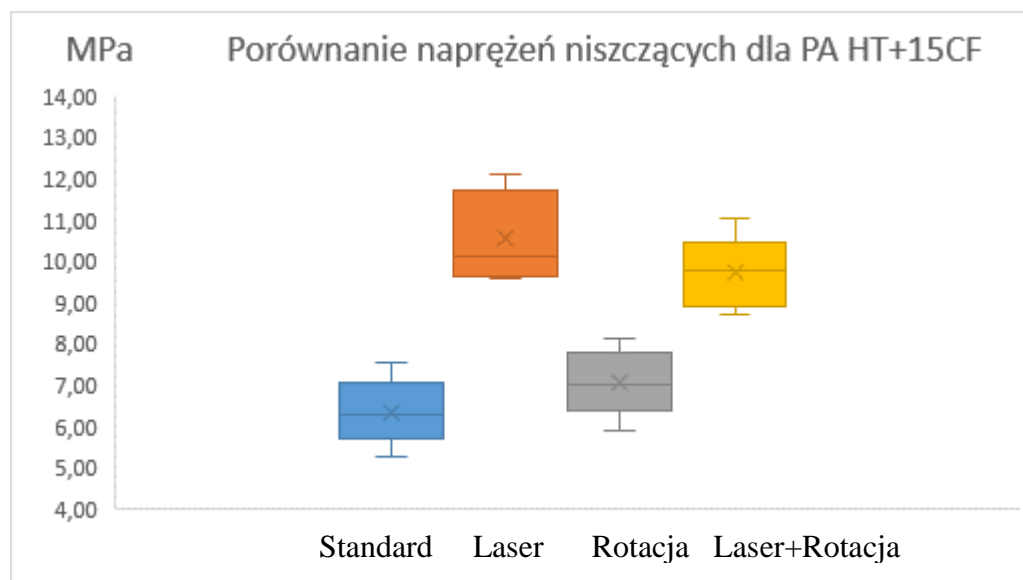
Tabela 4.12. Wyniki pomiarów próbek z PP GF30 wykonanych metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej)

Nr	B	H	F	$\sigma_{L\_PP}$
	mm	mm	N	MPa
1	20,10	6,00	144	7,16
2	20,00	6,00	160	8,00
3	20,00	6,10	158	7,64
4	19,90	6,00	161	8,09
5	20,00	6,10	178	8,61
6	20,20	6,10	132	6,32
<b>Średnia</b>				<b>7,64</b>



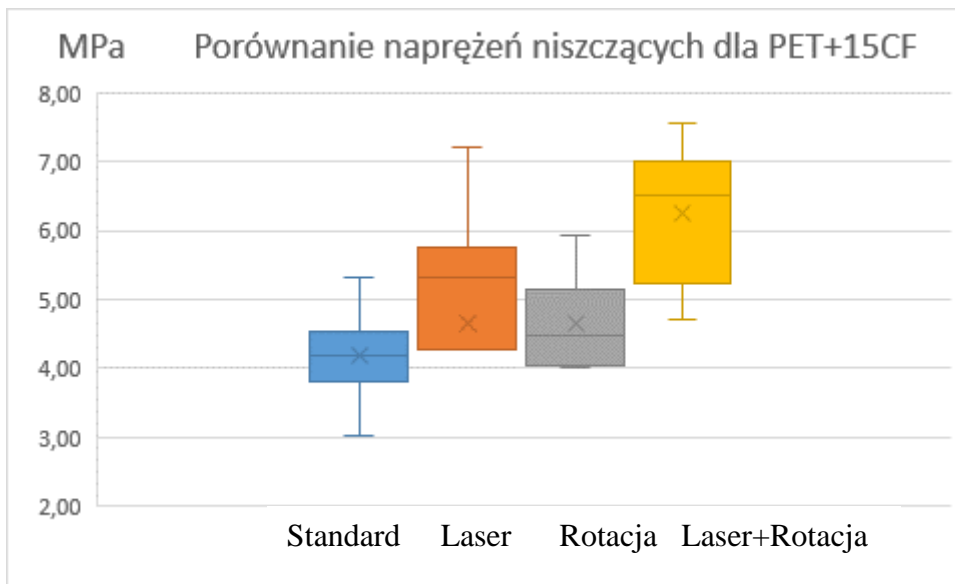
**Porównanie wyników** dla metod drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej, z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym i z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej).

Na wykresie na rys. 4.24 przedstawiono porównanie wyników próby zginania próbek z PAHT+15% włókien węglowych uzyskanych: konwencjonalną metodą drukowania FDM – opisaną jako *Standard*, metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej) – opisaną jako *Laser*, metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej – opisaną jako *Rotacja* oraz drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym – opisanego jako *Laser+Rotacja*.



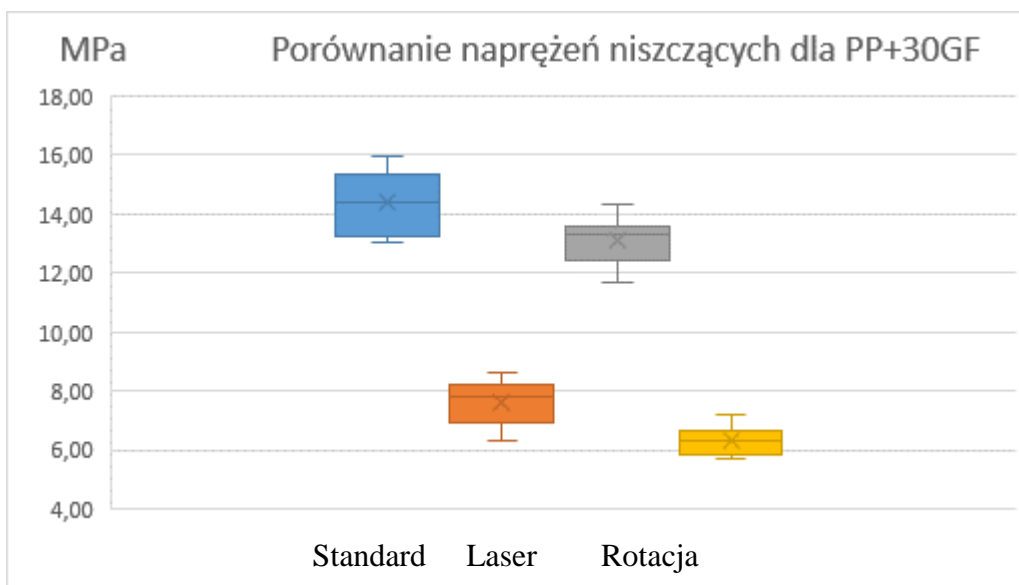
Rys. 4.24. Porównanie wyników prób zginania próbek dla filamentu PAHT CF15

Wykres na rys. 4.25 przedstawia porównanie wyników próby zginania próbek z PET+15% włókien węglowych uzyskanych: konwencjonalną metodą drukowania FDM – opisaną jako *Standard*, metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej) – opisaną jako *Laser*, metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej – opisaną jako *Rotacja* oraz drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym – opisanego jako *Laser+Rotacja*.



Rys. 4.25 Porównanie wyników prób zginania próbek dla filamentu PET CF15

Na wykresie na rys. 4.26 przedstawiono porównanie wyników próby zginania próbek z PP+30 włókien szklanych uzyskanych: konwencjonalną metodą drukowania FDM – opisaną jako *Standard*, metodą FDM z nagrzewaniem laserowym (przy wyłączonej głowicy rotującej) – opisaną jako *Laser*, metodą drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej – opisaną jako *Rotacja* oraz drukowania FDM z użyciem głowicy rotującej w połączeniu z nagrzewaniem laserowym – opisanego jako *Laser+Rotacja*.



Rys. 4.26 Porównanie wyników prób zginania próbek dla filamentu PP GF30

## **4.5. Technologia drukowania 3D z górną płytą grzejną [570]**

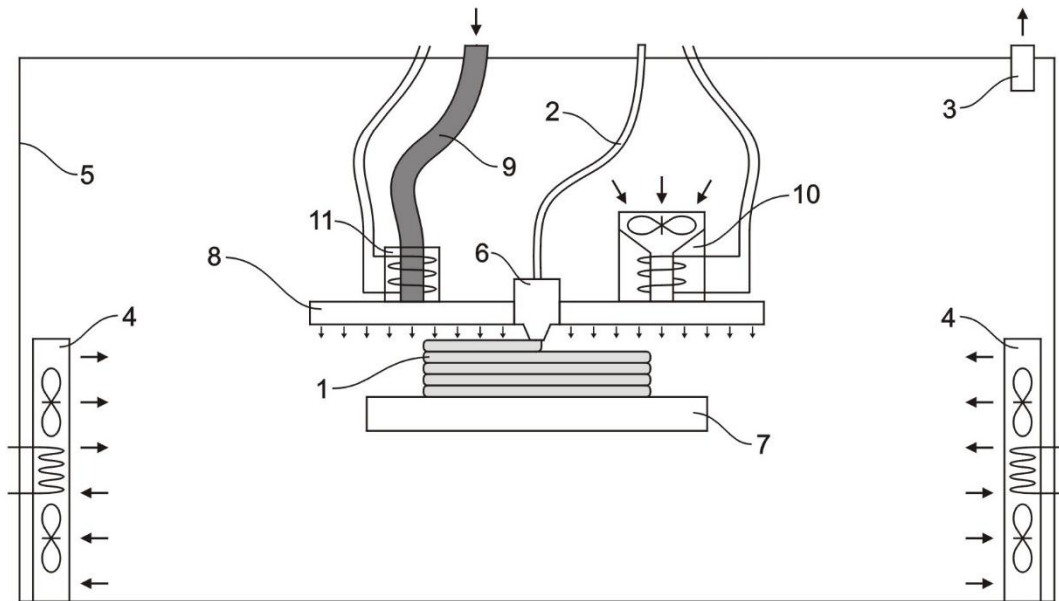
Jak opisano w punkcie 4.2., zastosowanie górnej płyty grzejnej umożliwia kontrolowane nagrzewanie wierzchniej warstwy drukowanych części podczas nakładania kolejnych warstw, co może sprzyjać lepszej więzi międzywarstwowej i redukcji anizotropii mechanicznej, będącej istotnym wyzwaniem w technologii FDM [45].

Utrzymanie podwyższonej temperatury w strefie drukownia ma wydłużać czas, w którym materiał pozostaje w stanie uplastycznionym, co ułatwi dyfuzję makrocząsteczek między warstwową wydrukowaną a aktualnie drukowaną.

### **4.5.1. Opis procesu technologicznego**

Poprzez równomierne podgrzewanie wierzchniej warstwy części podczas drukowania, górna płyta grzejna utrzymuje podwyższoną temperaturę w strefie drukownia, wydłużając czas, w którym materiał pozostaje w stanie uplastycznionym. Bardzo istotnie poprawia to warunki dyfuzji międzywarstwowej wywołanej ciepłem, zwiększa ruchliwość cząsteczek polimeru a także zmniejsza jego lepkość [294]. Jednocześnie, można oczekiwać zmniejszenia gradientu temperatury między wcześniej nałożonymi, sąsiadującymi warstwami. Mniejsze różnice temperatur skutkują zmniejszeniem poziomu naprężeń cieplnych generowanych podczas stygnięcia materiału polimerowego, co umożliwia uzyskanie bardziej jednorodnej struktury wydrukowanych części [313]. Działanie tych mechanizmów wpływa na poprawę więzi międzywarstwowej.

Istotę procesu technologicznego można opisać w oparciu o przedstawiony na rys. 4.27 schemat, pochodzący z opisu patentowego autora [570].



Rys. 4.27. Schemat drukarki 3D FDM z górną płytą grzejącą. 1) wytwarzany przedmiot 2) filament 3) przyłącze wylotowe 4) moduły kontroli cyrkulacji i temperatury 5) komora drukarki 6) głowica drukująca 7) platforma robocza 8) **górną płytą grzewczą** 9) przewód nadmuchu 10) moduł nadmuchu wewnętrznego [570]

Na schemacie widocznym na rys. 4.27 przedstawiono typowe dla drukarek FDM części i zespoły jak: komora robocza drukarki, platforma robocza czy moduł wewnętrznej cyrkulacji powietrza. Tym, co zasadniczo odróżnia technologię konwencjonalnego drukowania FDM od badanej, nowej technologii drukowania jest górną płytą grzewczą (8). Choć możliwości realizacji nadmuchu powietrza i innych gazów, opisane w 24 zastrzeżeniach patentowych, jest wiele, w przeprowadzonym programie badań ograniczono się do wykorzystania górnej płyty grzewczej drukarki jako promiennika ciepła, oraz obiegu powietrza chłodzącego wytwarzany przedmiot wewnątrz zamkniętej komory drukarki.

Drukowanie z wykorzystaniem drukarki 3D FDM z górną płytą grzejącą jest rozwinięciem technologii drukowania FDM z zamkniętą komorą grzejącą. Drukarki takie wykorzystywane są do drukowania tworzyw polimerowych wymagających temperatur uplastycznienia powyżej 300°C, podwyższonej temperatury powietrza otaczającego drukowany przedmiot oraz powolnego schładzania.

Podstawowe etapy procesu technologicznego realizowanego w opisywanej drukarce i w drukarkach z zamkniętą komorą grzejną są następujące:

### **Przygotowanie modelu 3D**

- Projektowanie modelu w oprogramowaniu CAD.
- Programowe przetwarzanie modelu na kod G-code.
- Dostosowanie parametrów drukowania do materiału i drukarki ( wysokość warstwy, średnica dyszy, gęstość wypełnienia)

### **Przygotowanie drukarki**

- Kalibracja urządzenia:
- Poziomowanie stołu roboczego.
- Kalibracja osi ruchu.
- Kalibracja wytłaczarki.

Ustawienie temperatur:

- Głowica drukująca (wytłaczarka).
- Komora grzewcza.
- Stół roboczy.

Sprawdzenie systemów pomocniczych:

- System chłodzenia elementów mechanicznych i elektroniki.
- Systemy wentylacji i filtracji powietrza.

### **Przygotowanie materiału**

- Suszenie filamentu w suszarce laboratoryjnej.
- Kontrola jakości filamentu:
- Sprawdzenie średnicy i okrągłości.
- Inspekcja wizualna.

### **Proces drukowania**

Nanoszenie pierwszej warstwy:

- Zapewnienie adhezji do stołu roboczego.
- Ustawienie parametrów pierwszej warstwy.

Warstwowe nakładanie materiału:

- Utrzymanie stabilnych warunków termicznych.
- Ustawienie parametrów druku (prędkość, intensywność nadmuchu).

Monitorowanie procesu:

- Kontrola parametrów w czasie rzeczywistym.
- Detekcja błędów i interwencja.

#### **Schładzanie wydruku**

- Stopniowe obniżanie temperatury komory grzewczej.
- Stabilizacja wymiarowa.

#### **Obróbka dodatkowa (opcjonalnie)**

- Obróbka cieplna (odprężanie).

Obróbka mechaniczna:

- Usuwanie podpór i elementów pomocniczych.
- Wykończenie powierzchni (szlifowanie, polerowanie).

W technologii drukowania FDM z górną płytą grzejącą wskazać można następujące parametry technologiczne:

- Temperatura wytłaczania
- Temperatura stołu roboczego
- Temperatura zamkniętej komory drukarki
- Temperatura nadmuchu powietrza zewnętrznego
- Prędkość drukowania
- Współczynnik korekty prędkości drukowania
- Współczynnik korekty ilości wytłaczanego materiału
- Moc dodatkowej płyty grzewczej
- Wartość obiegu powietrza w cyrkulacji wewnętrznej komory drukarki
- Wartość przepływu nadmuchu powietrza zewnętrznego
- Intensywność obiegu cieczy chłodzącej barierę termiczną wytłaczarki

Analiza procesu drukowania jak i przeprowadzone z wieloma tworzywami polimerowymi próby technologiczne wskazują, że fundamentalną rolę w uzyskiwaniu dobrych jakościowo wydruków odgrywa dobór wartości i precyzyjne kontrolowanie trzech podstawowych parametrów tego procesu:

- temperatura wytłaczania,
- moc górnej płyty grzewczej,
- wydajność przepływu powietrza chłodzącego.

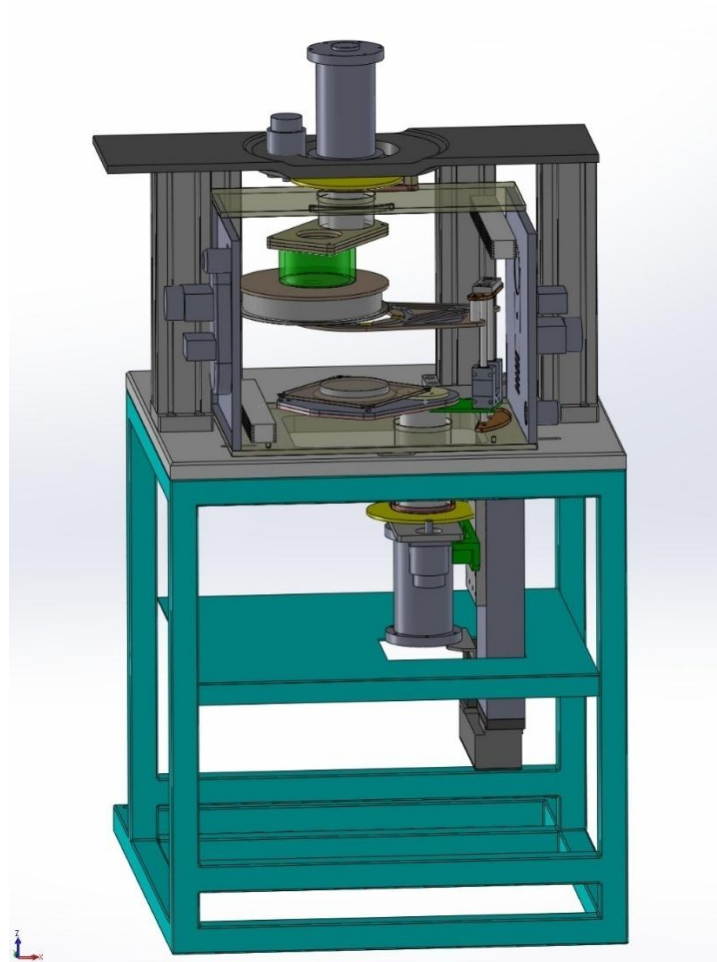
Wybór zestawu wartości wymienionych parametrów drukowania, który pozwoli uzyskać największą wytrzymałość drukowanych przedmiotów, powinien opierać się na wiedzy o fizycznych postawach procesu oraz obszernym programie doświadczalnym. W późniejszej praktyce produkcyjnej zbierane doświadczenia umożliwią dalszą korektę parametrów technologicznych. Proces doboru parametrów powinien być przeprowadzony oddzielnie dla każdego rodzaju materiału polimerowego filamentu.

#### **4.5.2. Konstrukcja drukarki 3D z górną płytą grzejącą**

Do zbadania koncepcji drukarki 3D z górną płytą grzewczą zaprojektowano i wykonano urządzenie, przy zachowaniu wysokich standardów technicznych. Na sztywnej podstawie ze splanowanym blatem zamontowano mechanizmy ruchów oraz komorę grzewczą grzewczą drukarki. Następnie montowano wykonywane wg projektu zespoły, w tym kluczowy dla badanej technologii zespół górnej płyty grzewczej.

Na rys. 4.28 przedstawiono widok modelu CAD zaprojektowanej drukarki 3D z górną płytą grzejącą.

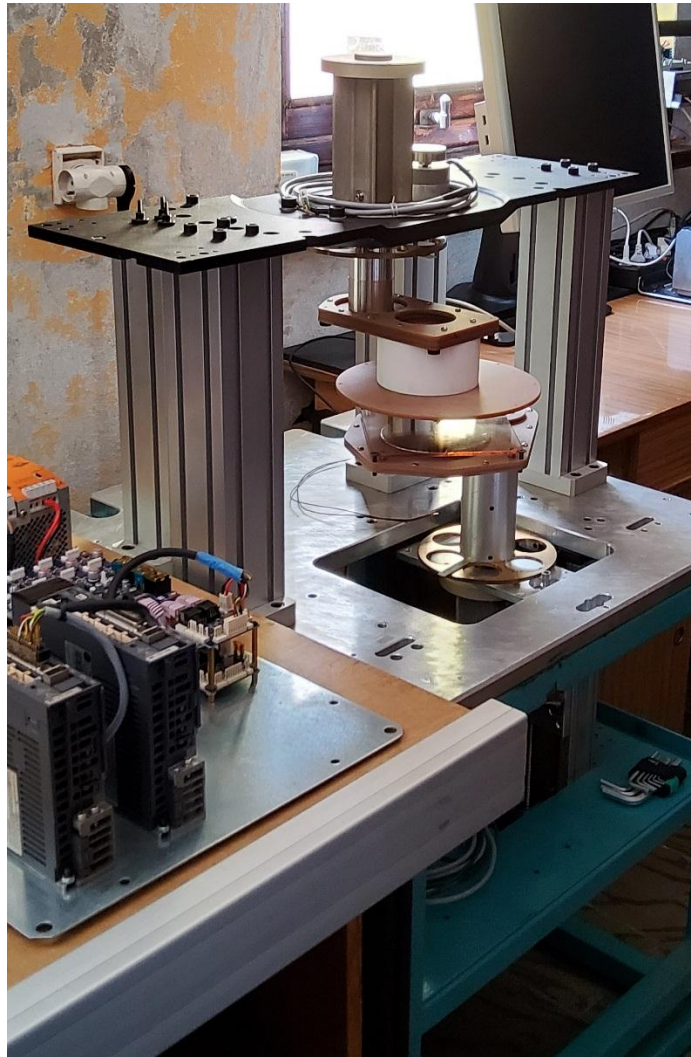
Jako bazy do budowy drukarki 3D FDM z dodatkową górną płytą grzejącą użyto skonstruowanej podstawy z blatem. Podstawa wykonana jest z profili stalowych i posiada obrobiony mechanicznie blat z płyty ze stopu aluminium.



Rys.4.28. Model CAD drukarki 3D z górną płytą grzejącą

Sztywność i precyzja ruchów prototypowej drukarki 3D została zapewniona dzięki wykorzystaniu do jej budowy wysokiej klasy komponentów, takich jak napędy liniowe z wózkami i śrubami tocznymi oraz napędy obrotowe. Widok drukarki 3D z górną płytą grzejącą w trakcie jej budowy przedstawiono na rys. 4.29.

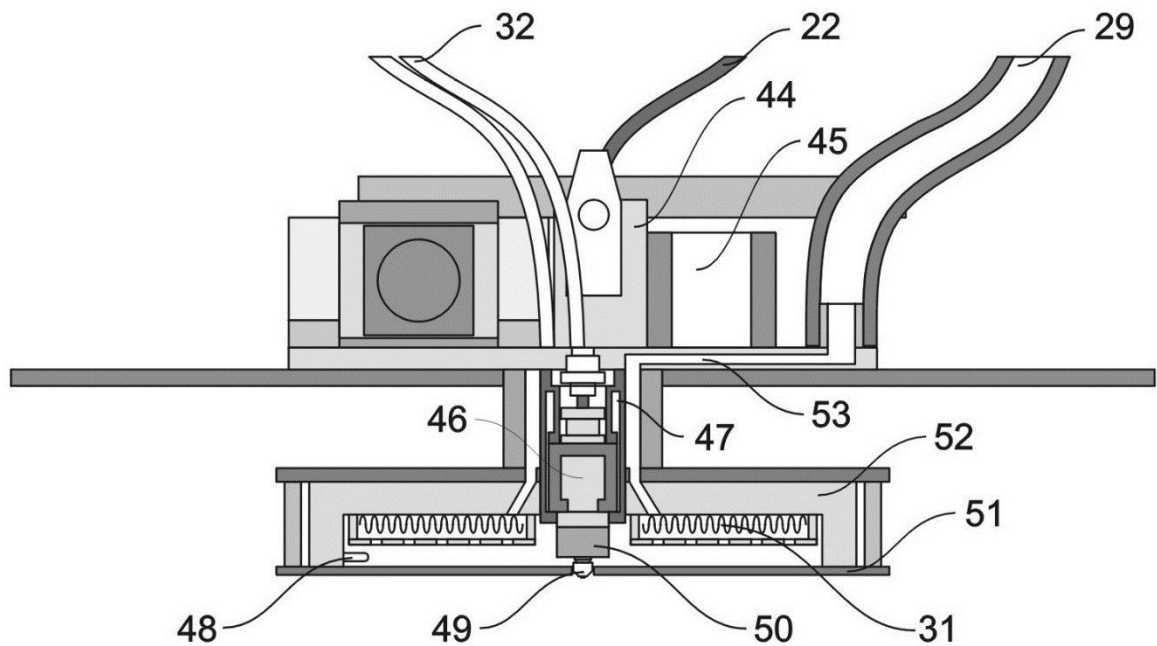




Rys. 4.29. Widok konstrukcji drukarki 3D z górną płytą grzejącą w trakcie budowy

### **Projekt zespołu górnej płyty grzewczej**

Autorska koncepcja innowacyjnej technologii drukowania 3D, a przez to także konstrukcja drukarki, opiera się na zastosowaniu górnej płyty grzewczej, która w trakcie pracy drukarki swoją powierzchnią całkowicie pokrywa kontur drukowanych części. Budowę zespołu głowicy drukarki 3D z górną płytą grzejącą przedstawiono na rys. 4.30.



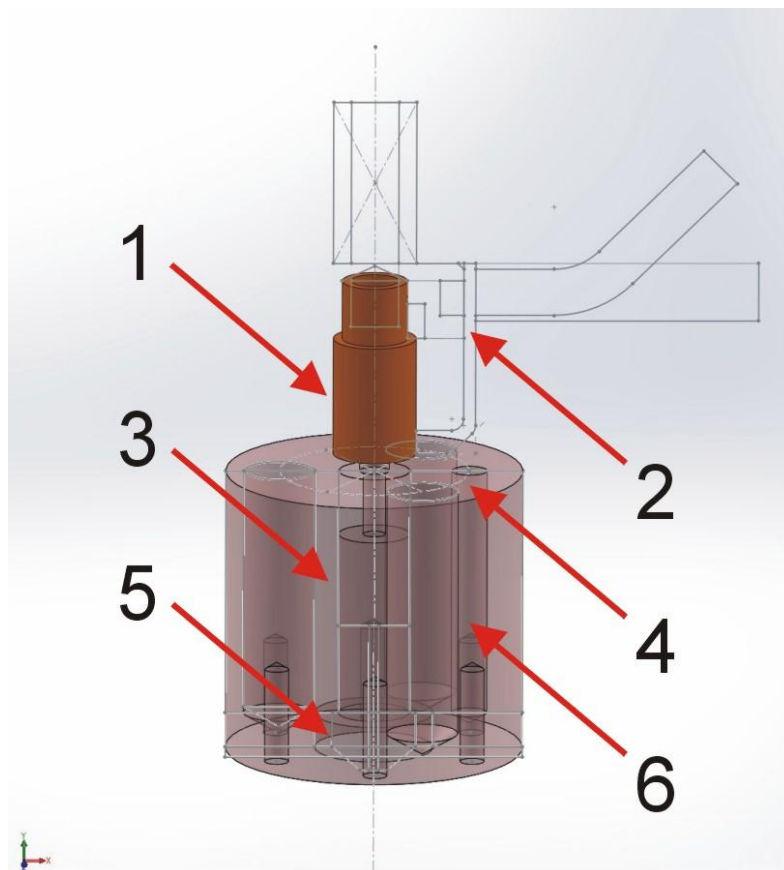
Rys. 4.30. Budowa zespołu głowicy drukującej drukarki 3D z górną płytą grzejącą [570]. 22) doprowadzenie filamentu, 29) przewód doprowadzający powietrze nadmuchu, 31) moduł grzewczy, 32) przewody obiegu cieczy chłodzącej głowicę drukującą, 44) wytłaczarka, napęd wytłaczarki 45), 46) separator obszarów o różnej temperaturze (ang. heat break), 47) izolator termiczny, 48) czujnik temperatury, 49) dysza, 50) układ grzania wytłaczarki (ang. hotend), 51) płyta ceramiczna, 52) izolator termiczny, 53) kanał doprowadzający gaz osłonowy.

## **Projekt pozostałych zespołów drukarki 3D**

Ze względu na swój innowacyjny charakter i zaawansowaną, prototypową konstrukcję, zespoły drukarki 3D z górną płytą grzejną niemal w całości zostały zaprojektowane i wykonana przez autora pracy. W dalszej części podrozdziału skrótowo przedstawione zostaną najważniejsze z nich.

### **Głowica uplastyczniająca filament**

Schemat na rys. 4.31 przedstawia głowicę uplastyczniającą (ang. hotend) nagrzewaną trzema grzałkami patronowymi) wykonaną ze stopu miedzi. Typowe drukarki FDM posiadają jedną grzałkę.

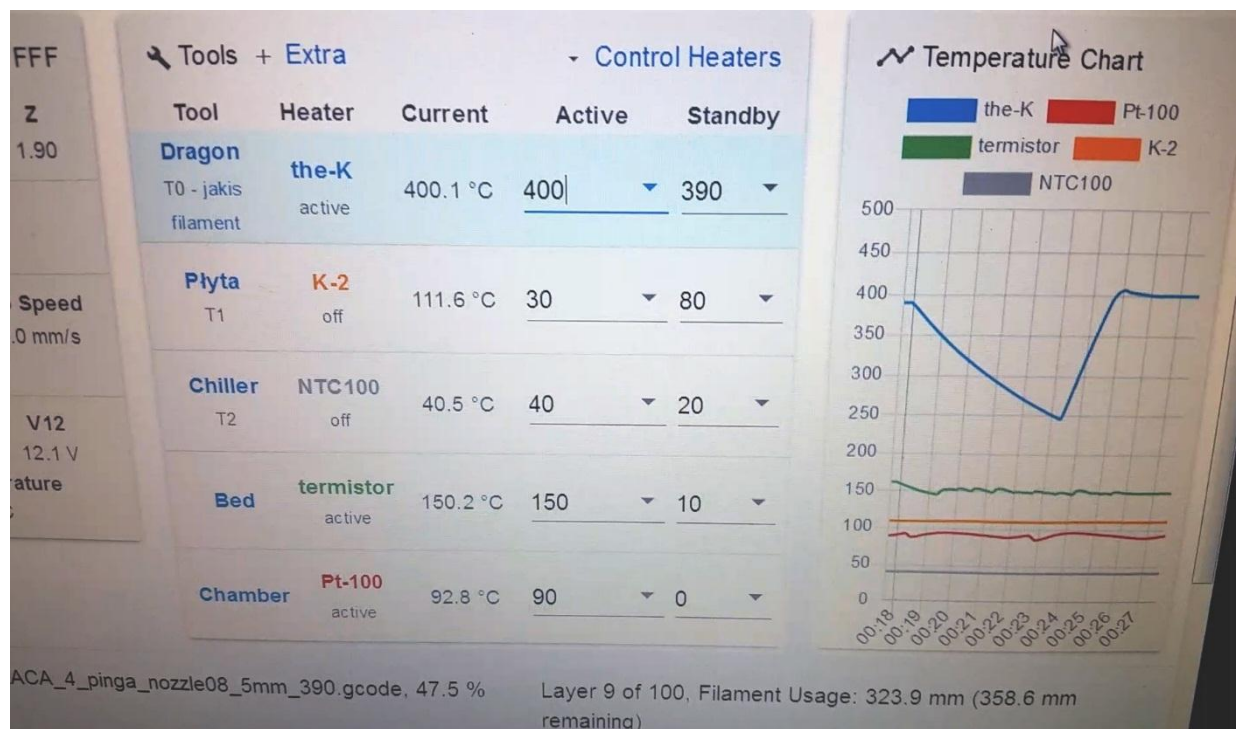


Rys.4.31. Schemat prototypowej głowicy uplastyczniającej (ang. hotend) drukarki 3D FDM z górną płytą grzejną. 1) Separator obszarów o różnej temperaturze 2) Płaszcz chłodzenia wodnego separatora 3) miedziany korpus głowicy uplastyczniającej 4) Miejsce mocowania czujnika temperatury 5) Miejsce mocowania głowicy drukującej 6) Miejsce mocowania grzałek patronowych

Takie rozwiązanie techniczne ma przyczynić się do bardziej jednorodnego uplastycznienia filamentu z PEEK przy dużych prędkościach wytłaczania niż tego można oczekiwać w drukarkach konwencjonalnych. Na rysunku można też dostrzec szczegóły konstrukcyjne chłodzonej cieczą bariery cieplnej (ang. heat break).

### Systemu sterowania drukarką 3D

Sterowanie ruchem, oraz kontrola parametrów drukowania została zrealizowana za pomocą płyty głównej 6HC firmy Duet3D Ltd. [587]. Widok dostępnego przez przeglądarkę internetową interfejsu sterowania drukarką, umożliwiającego kontrolę procesu drukowania, przedstawiono na rys. 4.32.

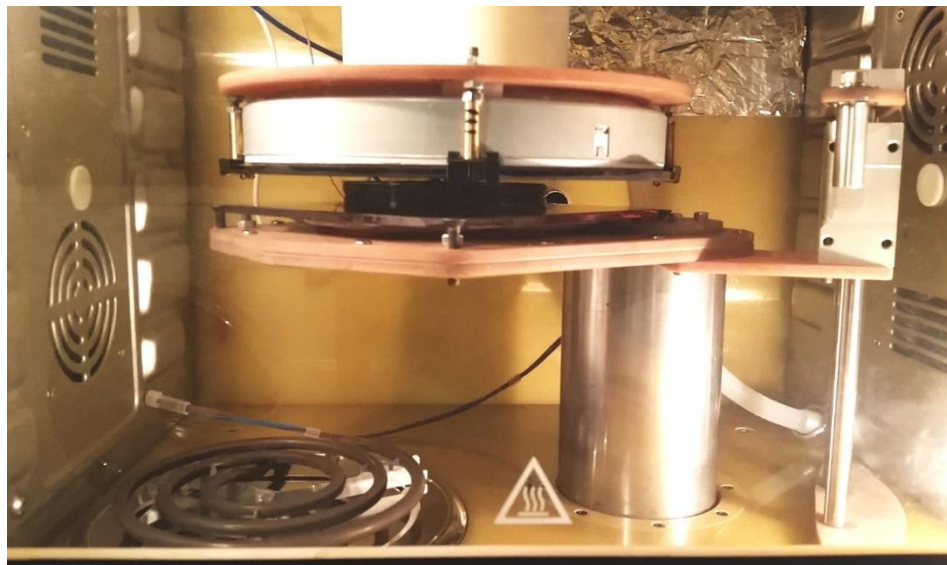


Rys. 4.32. Widok funkcji kontroli parametrów drukowania interfejsu sterowania Duet3D drukarki 3D z górną płytą grzejną

Sterownik Duet3D 6HC działa z oprogramowaniem RepRapFirmware, które jest zaawansowanym, otwartoźródłowym oprogramowaniem dla drukarek 3D i urządzeń CNC.

### **Zespół górnej płyty grzewczej**

Do budowy zespołu płyty grzewczej wykorzystano moduł grzałki oporowej o mocy 2000 W wraz z płytą ceramiczną. Precyzyjna kontrola temperatury promiennika została zrealizowana przez programową regulację PID sterownika Duet3D za pośrednictwem regulatora mocy typu SSR (ang. Solid State Relay – przekaźnik półprzewodnikowy). Na rys. 4.33 przedstawiono widok wnętrza komory drukarki 3D z górną płytą grzejącą w trakcie drukowania.



Rys. 4.33. Widok wnętrza komory drukarki 3D z górną płytą grzejącą w trakcie drukowania.

W celu zapewnienia równomiernego rozkładu temperatury wewnątrz komory drukarki użyto dwóch, umieszczonych naprzeciwko siebie nadmuchów powietrza pracujących w obiegu zamkniętym.

### **Komora robocza**

Komorę roboczą drukarki zaprojektowano tak, by wytrzymała temperaturę do 150 °C przy pracy ciągłej. Elementy osłony komory drukarki wykonano z płyty szklano-epoksydowej EP GC 308/TSE-6 firmy IzoErg o długotrwałej odporności cieplnej 180 °C [590]. Moduł napędu wytłaczarki w układzie bezpośrednim zabudowano w chłodzonej obudowie, stanowiącej część konstrukcji ruchomego ramienia drukarki.

### **Kompletacja części typowych i wykonanie części nietypowych**

W konstrukcji drukarki wykorzystano szereg elementów gotowych takich jak grzałki, wentylatory, czujniki temperatury, napęd wyłaczarki, łożyska, napędy liniowe czy napędy obrotowe. Najważniejszym z nich dla działania drukarki była dysza (rys. 4.35).



Rys. 4.35. Widok dyszy rubinowej firmy Olsson, zastosowanej w drukarce 3D FDM z górną płytą grzejącą.

Ze względu na silnie abrazyjny charakter filamentów napełnionych mielonym włóknom węglowym, dla których zbudowano drukarkę 3D, zastosowano w niej dyszę w wkładką rubinową firmy Olsson [591].

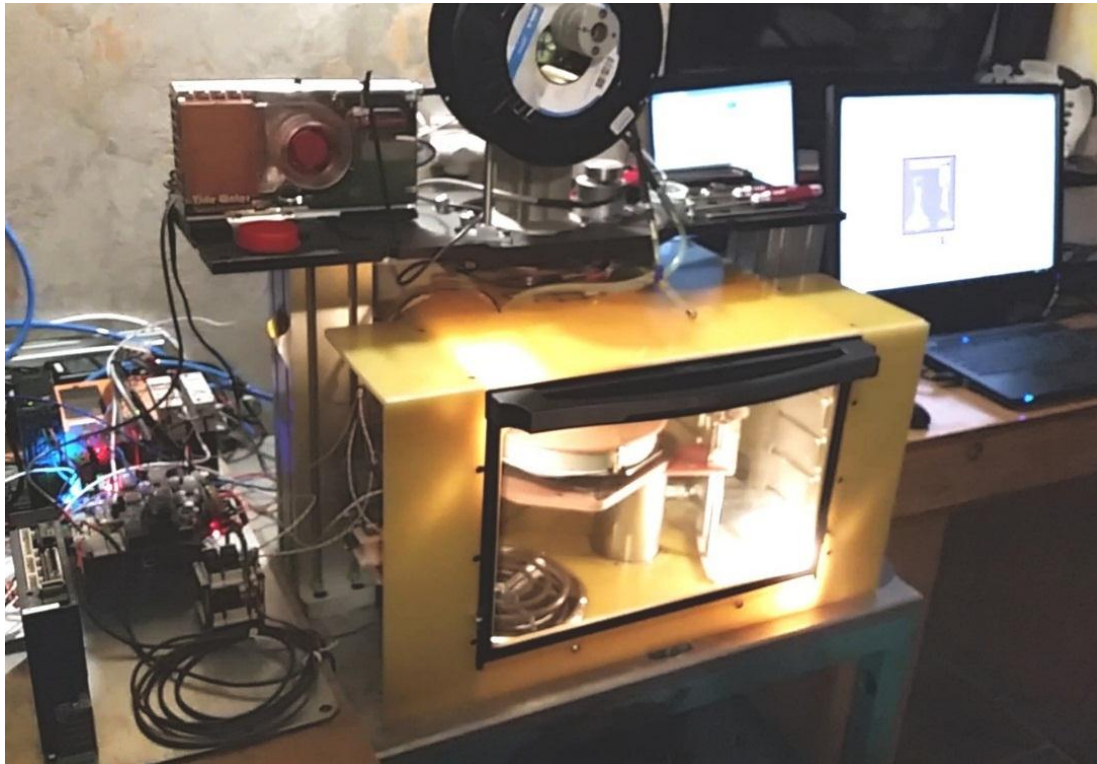
Wykonano też samodzielnie szereg elementów nietypowych takich jak: podstawa drukarki z blatem, obudowa komory drukarki, mechanizm platformy roboczej czy mechanizm ruchu głowicy drukującej.

### **Próby działania i korekty drukarki 3D**

Gotowy prototyp drukarki poddano próbom eksploatacyjnym. W trakcie testów działania drukarki 3D zmodyfikowano i przetestowano szereg rozwiązań technicznych. Modyfikacji podlegały takie zespoły jak układ nawiewu powietrza chłodzącego część w trakcie drukowania.

### **Montaż drukarki**

Po zgromadzeniu wytypowanych podzespołów, oraz wykonaniu zaprojektowanych części drukarki przystąpiono do jej budowy. Na rys. 4.36 przedstawiono widok gotowej drukarki 3D z górną płytą grzejącą.



Rys. 4.36. Widok gotowej drukarki 3D z górną płytą grzejącą w trakcie drukowania

## **4.6. Przebieg badań głównych**

Zdaniem autora, technika drukowania z dodatkową płytą grzejną jest najbardziej perspektywiczna i pozwala na drukowanie bardzo wymagających tworzyw wysokotemperaturowych i ich kompozytów. Potwierdzają to wyniki wielu prób technologicznych i badań wstępnych. Dla tej techniki postanowiono przeprowadzić szeroki program badań więzi międzywarstwowej. Celem tych badań było nie tylko stwierdzenie czy drukowane w ten sposób próbki cechuje lepsza więź międzywarstwowa niż ta uzyskiwana w konwencjonalnej metodzie druku FDM, ale też określenie wpływu najważniejszych parametrów technologicznych drukowania na wartość charakterystyki będącej miarą wspomnianej więzi.

### **4.6.1. Dobór materiału do badań**

Ponieważ technologię druku z dodatkową płytą grzewczą opracowano z myślą wykorzystania jej do przetwarzania polimerów i kompozytów wysokotemperaturowych, do badań weryfikacyjnych wytypowano kompozyt polimerowy powszechnie uważany jako jeden z najtrudniejszych technologicznie materiałów a mianowicie poli(eteroeteroketon) (PEEK) wzmocniony włóknem węglowym.

Bardzo wysoka cena filamentu PEEK wzmocnionego mielonym włóknem węglowym znacznie ograniczała ilość dostępnego tworzywa. Po procesie testów niewielkich ilości filamentów PEEK różnych dostawców, wybrano poli(eteroeteroketon) napełniony mielonym włóknem węglowym – KetaSpire PEEK CF10, firmy Solvay (obecnie Syensqo)[592].

Dzięki uprzejmości firmy Solvay (Syensqo) pozyskano bezpłatnie do realizacji głównego programu badań 0,5 kg filamentu KetaSpire PEEK CF10. W tabeli 4.1 podano deklarowane przez producenta, wybrane właściwości tego materiału.



Tabela 4.13. Wybrane właściwości mechaniczne, fizyczne i termiczne filamentu Solvay KetaSpire PEEK CF10 1.75mm

Właściwość	Typowa wartość	Jednostka	Metoda badawcza
Gęstość / Właściwa masa	1,33 g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Moduł sprężystości	11 000 MPa	MPa	ASTM D638
Wytrzymałość na rozciąganie (przy zerwaniu)	140 MPa	MPa	ASTM D638
Wydłużenie przy zerwaniu	1,7%	%	ASTM D638
Udarność wg Izoda z karbem	89 J/m	J/m	ASTM D256
Temperatura topnienia	343°C	°C	ASTM D3418
Średnica filamentu	1,75 mm	mm	-

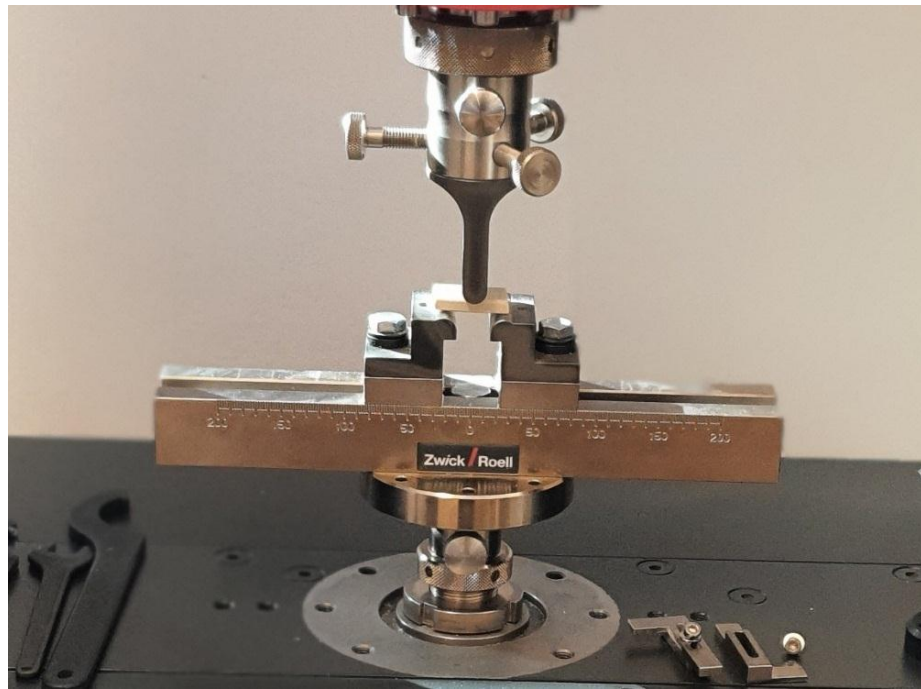
Przed drukowaniem filament KetaSpire PEEK CF10 wysuszono zgodnie z zaleceniami producenta: przez 4 godziny w temperaturze 150 °C.

## 4.6.2. Metodyka badań

### Procedura pomiarowa

Ograniczona przestrzeń drukowania a nade wszystko bardzo wysoka cena filamentu PEEK i PEEK+10% włókien węglowych, uniemożliwiły drukowanie próbek przewidzianych do próby wytrzymałości na rozciąganie. Dlatego, jako miarę wytrzymałości międzywarstwowej przyjęto naprężenia niszczące próbkę w zmodyfikowanej próbie zginania trójpunktowego. Warstwy drukowano tak, aby w próbie zginania naprężenia normalne miały kierunek prostopadły do warstw. Niewielka odległość między podporami powoduje, że oprócz naprężeń normalnych o odmiennym znaku po obu stronach osi obojętnej belki zginanej, będą występowały naprężenia styczne. Dlatego uzyskane wyniki nie mogą być zakwalifikowane jako wytrzymałość na zginanie a jedynie jako porównawcza miara więzi międzywarstwowej. Podobne badania są też używane od oceny wytrzymałości połączeń spawanych i zgrzewanych [ 583, 584]. Połączenia wykonuje się tak, aby spoina była usytuowana prostopadle do kierunku naprężeń rozciągających i ściskających.

Badania wytrzymałości na zginanie przeprowadzono w laboratorium pomiarowym firmy EMT-Systems z Gliwic, na maszynie wytrzymałościowej firmy Zwick/Roell typu Z010 [593]. Na rys. 4.37 pokazano sposób podparcia próbki i jej obciążania, z nietypowym rozstawem podpór.



Rys. 4.37. Próbkę z PEEK przygotowaną do badań zginania trójpunktowego

Do programu sterowania maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z010 wprowadzono następujące dane:

- Rodzaj badania: 3-punktowa próba zginania,
- Odległość podpór: 24 mm
- Kształt próby dla obliczenia przekroju poprzecznego: próba płaska
- Siła wstępna: 0,1 MPa,
- Prędkość posuwu trawersy: 10mm/min.

Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia  $23\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

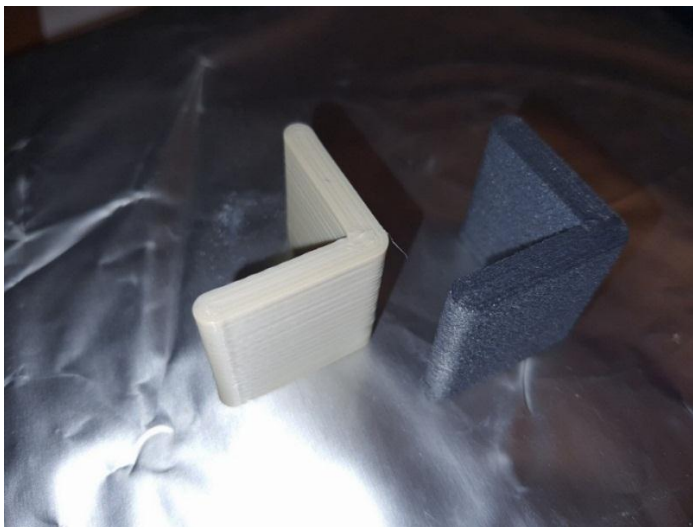
Rzeczywiste wymiary przekroju poprzecznego próbek mierzono suwmiarką elektroniczną i przed każdą próbą i wprowadzono do programu sterującego maszyną wytrzymałościową.

Naprężenia i odkształcenia obliczane były w programie obsługi próby zginania, będącym częścią oprogramowania maszyny.

### **Wykonanie próbek**

Ograniczona, wynikająca z bardzo wysokiej ceny, dostępność badanego tworzywa, wymusiła konieczność zmniejszenia wielkości próbek pomiarowych tak, aby możliwe było przeprowadzenie pełnego programu badań, pozwalającego na ocenę wpływu najważniejszych parametrów technologicznych na siły więzi międzywarstwowej i porównanie rezultatów z wynikami badań próbek wykonanych konwencjonalną metodą druku 3D FDM.

Wydrukowane kształtki, z których wycięto próbki do badań, przedstawiono na rys. 4.38.



Rys. 4.38. Kształtki, z których wycinano próbki do badań

Kształtki miały postać kątownika o boku 32 mm, wysokości 30mm i grubości ścianki 5 mm.

Do wygenerowania kodów sterujących ruchami osi drukarki 3D użyto oprogramowania Ultimaker Cura (wersja 4.13), dostępnego bezpłatnie [594].

Zestaw podstawowych parametrów do generowanych g-kodów sterowania ruchami drukarki 3D, przy których drukowano próbki do badań porównawczych jest następujący:

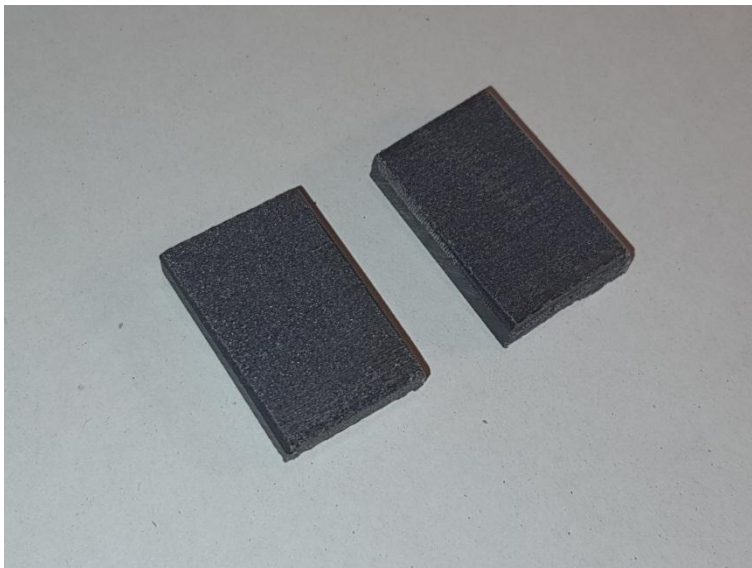
- średnica dyszy: 0,8 mm
- wysokość warstwy: 0,25 mm
- prędkość drukowania: 30 mm/s
- gęstość wypełnienia: 100%

Wartości temperatury wytłaczania, mocy górnej płyty grzewczej i wartości natężenia przepływu powietrza chłodzącego ustawiano bezpośrednio w drukarce.

Z wydrukowanych kształtek, za pomocą precyzyjnej przecinarki z tarczą diamentową i chłodzeniem wodnym, wycięto próbki o wymiarach:

- długość 30: mm,
- szerokość: 20 mm,
- grubość: ~ 6mm, zależnie od parametrów, z jakimi drukowana była kształtka do wycinania próbek.

Na rys. 4.39 przedstawiono widok próbek z PEEK CF10 przygotowanych do badań.



Rys. 4.39. Próbki z PEEK CF10 KetaSpire przygotowane do próby zginania

### **4.6.3. Plan badań weryfikacyjnych technologii drukowania 3D z górną płytą grzejącą**

Złożona natura związków pomiędzy parametrami technologicznymi drukowania a wartością sił międzywarstwowych, jak i bardzo wysoka cena filamentu skłoniła autora do wykorzystania metod programowania badań eksperymentalnych do opracowania programu badań. Metody te mają kilka istotnych zalet [585, 586] :

- pozwalają uchwycić związki pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi jednocześnie i zmienną zależną,
- umożliwiają bardzo znaczne ograniczenie liczby koniecznych, co ogranicza czas badań i konieczne do poniesienia nakłady finansowe,
- uzyskane rezultaty są podstawą wyznaczenia funkcji obiektu badań wiążącej zmienną zależną i wszystkie zmienne niezależne jednocześnie

W wyniku analizy zalet i wad poszczególnych planów eksperymentu wybrano program badań o następującym oznaczeniu: PS/RS-P:  $\lambda$  [585, 586]. W oznaczeniu tym poszczególne symbole niosą następującą informację:

- P – program badań doświadczalnych;
- S – program jest statyczny, czyli wartości czynników niezależnych są wszystkie wyznaczone na etapie planowania eksperymenty i nie zmieniają się niezależnie od uzyskiwanych rezultatów;
- R – program randomizowany, czyli kolejność realizacji punktów pomiarowych jest dobierana losowo. Pozwala to ograniczać wpływ błędów systematycznych, którymi może być obciążona metodyka pomiaru. Błędy te wynikają z zużycia przyrządów pomiarowych, niewielkich zmian temperatury, niezauważalnych zmian nastawionych wartości w wyniku uchybu regulacji itp.;
- S – program jest selekcyjny, czyli spośród wszystkich możliwych zestawów wartości czynników niezależnych wybiera się niektóre, tak aby możliwe było wyznaczenie funkcji obiektu badań i spełnienie pewnych dodatkowych założeń dotyczących metodyki jej wyznaczania i rozkładu jej niedokładności;
- P – program wieloczynnikowy, czyli badany będzie jednoczesny wpływ wielu czynników niezależnych na badaną charakterystykę;

-  $\lambda$  – program uniform-rotatabilny (w skrócie opisywany jako rotatabilny), czyli punkty pomiarowe dobierane są tak, aby błąd funkcji obiektu badań opisany wariancją był taki sam na wszystkich sferach jednakowo oddalonych od środka dziedziny funkcji (centrum programu).

Na podstawie prób technologicznych i analizy procesu drukowania wybraną metodą jako czynniki niezależne wytypowano trzy parametry technologiczne:  $x_1$  - temperatura wytłaczania,  $x_2$  - moc dodatkowej płyty grzewczej i  $x_3$  - prędkość przepływu powietrza chłodzącego. Analiza możliwości technicznych drukarki jak i wyników prób technologicznych pozwoliła na określenie zakresów zmienności czynników niezależnych:

- $x_1$  - temperatura wytłaczania: <350°C - 420°C>
- $x_2$  - moc dodatkowej płyty grzewczej: <50W – 100W>
- $x_3$  - prędkość przepływu powietrza chłodzącego: <70l/min – 140l/min>

Pełny plan eksperymentu w postaci zakodowanej (macierz programu) dla trzech czynników niezależnych przedstawiono w tabeli 4.14.

Tabela 4.14. Liczba układów doświadczalnych programu PS/RS-P: $\lambda$  oraz unormowane wartości zmiennych wejściowych.

Numer układu		Unormowane wartości zmiennych wejściowych		
		$\check{x}_1$	$\check{x}_2$	$\check{x}_3$
1	Jądro programu $n_k = 2^3 = 8$	-1	-1	-1
2		+1	-1	-1
3		-1	+1	-1
4		+1	+1	-1
5		-1	-1	+1
6		+1	-1	+1
7		-1	+1	+1
8		+1	+1	+1
9	Centrum $n_o = 6$	0	0	0
10		0	0	0
11		0	0	0
12		0	0	0
13		0	0	0
14		0	0	0
15	Punkty gwiazdne $n_\alpha = 2i = 6$	$-\lambda$	0	0
16		$+\lambda$	0	0
17		0	$-\lambda$	0
18		0	$+\lambda$	0
19		0	0	$-\lambda$
20		0	0	$+\lambda$

Dla planu uniform-rotabilnego i trzech czynników niezależnych wartość parametru  $\lambda$  (zwanego też ramieniem gwiazdnym) wynosi  $\lambda = 1,682$ .

Znając zakresy zmienności czynników niezależnych można wyznaczyć wartości nastaw poszczególnych czynników niezależnych (często nazywane wartościami rzeczywistymi) z następujących wzorów:

Wartość centralna (kod „0”)

$$x_{k_0} = \frac{x_{k \max} - x_{k \min}}{2} \quad (4.5)$$

gdzie k to kolejne numery zmiennych (tu k= 1,2 lub 3).

Następnie wyznaczamy tzw. jednostkę zmienności:

$$\Delta x_k = \frac{x_{k \max} - x_{k_0}}{\lambda} \quad (4.6)$$

gdzie to  $\lambda$  – wartość ramienia gwiazdowego.

Związek pomiędzy wartościami kodowymi a rzeczywistymi jest następujący:

$$\tilde{x}_k = \frac{x_k - x_{k_0}}{\Delta x_k} \quad (4.7)$$

gdzie

$\tilde{x}_k$  – wartość kodowa zmiennej niezależnej

$x_k$  – wartość rzeczywista zmiennej niezależnej

k – numer zmiennej niezależnej (tu k = 1,2,3)

Obliczone wartości zmiennych niezależnych dla poszczególnych wartości kodowych przedstawiono w tabeli 4.15.

Tabela 4.15. Kodowane i rzeczywiste wartości zmiennych niezależnych

Oznaczenie punktu	Dolna wartość ramienia gwiazdowego $-\lambda$	Dolna wartość jądra programu	Wartość centralna	Górna wartość jądra programu	Górna wartość ramienia gwiazdowego $+\lambda$
Wartości kodowe					
	-1,682	-1	0	1	1,682
Wartości rzeczywiste					
Zmienna					
$x_1$	350	364,19	385	405,81	420
$x_2$	50	60,14	75	89,86	100
$x_3$	70	84,19	105	125,81	140

W następnym kroku dokonano randomizacji punktów pomiarowych. Do wygenerowania liczb losowych w zakresie zaplanowanej liczby prób użyto biblioteki random w środowisku programowania Python. Wyznaczoną w wyniku randomizacji kolejność realizacji punktów



pomiarowych planu wraz z rzeczywistymi wartościami nastaw czynników niezależnych przedstawiono w tabeli 4.16. Jest to jednocześnie ostateczna postać macierzy planu badań.

Tabela 4.16. Macierz planu badań po randomizacji wraz z zestawem rzeczywistych wartości zmiennych niezależnych

L.p.	Nr punktu*	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	7	364,19	89,86	125,81
2	15	350	75	105
3	3	364,19	89,86	84,19
4	11	385	75	105
5	1	364,19	60,14	84,19
6	9	385	75	105
7	20	385	75	140
8	14	385	75	105
9	18	385	100	105
10	4	405,81	89,86	84,19
11	2	405,81	60,14	84,19
12	12	385	75	105
13	17	385	50	105
14	5	364,19	60,14	125,81
15	16	420	75	105
16	6	405,81	60,14	125,81
17	19	385	75	70
18	13	385	75	105
19	8	405,81	89,86	125,81
20	10	385	75	105

\* - nr pkt. pomiarowego w nierandomizowanej macier

Kodowe i rzeczywiste wartości zmiennych niezależnych przedstawiono w tabeli 4.17.

Tabela 4.17. Kodowe i rzeczywiste wartości zmiennych niezależnych

L.p.	Rzeczywiste wartości zmiennych wejściowych		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	364,19	60,14	84,19
2	405,81	60,14	84,19
3	364,19	89,86	84,19
4	405,81	89,86	84,19
5	364,19	60,14	125,81
6	364,19	60,14	125,81
7	364,19	89,86	125,81
8	405,81	89,86	125,81
9	385	75	105
10	385	75	105
11	385	75	105
12	385	75	105
13	385	75	105
14	385	75	105
15	350	75	105
16	420	75	105
17	385	50	105
18	385	100	105
19	385	75	70
20	385	75	140

#### 4.6.4. Wyniki badań i ich analiza

Tabela 4.18 przedstawia wyniki badań więzi międzywarstwowej próbek z materiału PEEK CF10, wydrukowanych na drukarce 3D z dodatkową górną płytą grzejną. Ze względu na ograniczoną dostępność badanego materiału polimerowego wykonano po dwie próbki dla każdego z 20 punktów zaplanowanego planu. Oczywiście w centrum programu, którego głównym zadaniem jest ocena rozrzutu wyników, dokonano sześciu powtórzeń, czyli wydrukowano 12 próbek. Wyniki podano w kolejności wg planu przed randomizacją.

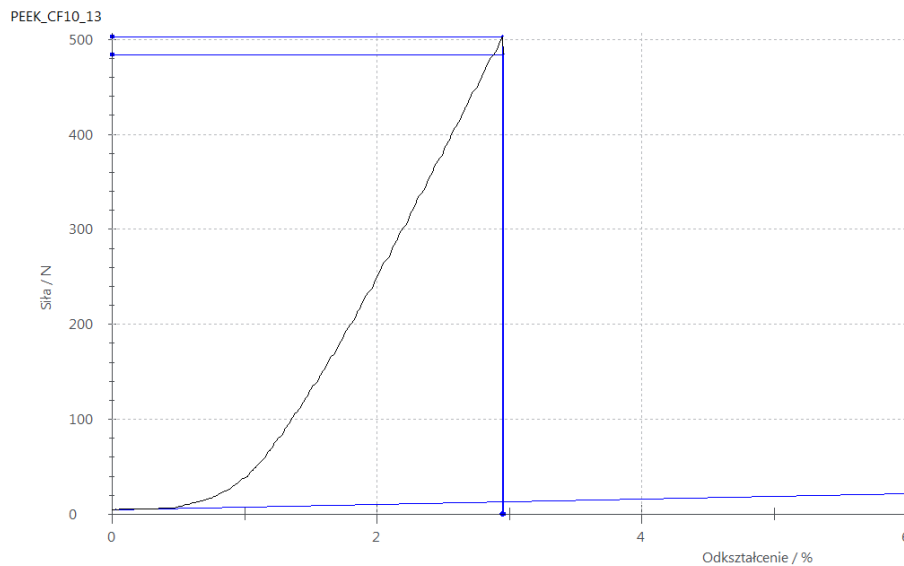
Tabela 4.18. Wyniki badań naprężeń niszczących w próbie zginania próbek z tworzywa PEEK CF10 wykonanych na drukarce 3D z górną płytą grzejącą

Nr	Nazwy próbek	temp. dyszy [°C]	moc płyty [W]	przepływ pow. [l/min.]	$\sigma_N$ [MPa]
1	PEEK_CF10_1	364,19	60,14	84,19	11,1
2	PEEK_CF10_1_	364,19	60,14	84,19	13,2
3	PEEK_CF10_2	405,81	60,14	84,19	17,44
4	PEEK_CF10_2_	405,81	60,14	84,19	18,0
5	PEEK_CF10_3	364,19	89,86	84,19	11,3
6	PEEK_CF10_3_	364,19	89,86	84,19	13,0
7	PEEK_CF10_4	405,81	89,86	84,19	13,4
8	PEEK_CF10_4_	405,81	89,86	84,19	11,8
9	PEEK_CF10_5	364,19	60,14	125,81	10,0
10	PEEK_CF10_5_	364,19	60,14	125,81	12,2
11	PEEK_CF10_6	405,81	60,14	125,81	14,6
12	PEEK_CF10_6_	405,81	60,14	125,81	13,6
13	PEEK_CF10_7	364,19	89,86	125,81	8,72
14	PEEK_CF10_7_	364,19	89,86	125,81	9,77
15	PEEK_CF10_8	405,81	89,86	125,81	16,1
16	PEEK_CF10_8_	405,81	89,86	125,81	19,0
17	PEEK_CF10_9	385	75	105	11,0
18	PEEK_CF10_9_	385	75	105	11,3
19	PEEK_CF10_10	385	75	105	10,6
20	PEEK_CF10_10_	385	75	105	14,93
21	PEEK_CF10_11	385	75	105	16,6
22	PEEK_CF10_11_	385	75	105	13,0
23	PEEK_CF10_12	385	75	105	12,9
24	PEEK_CF10_12_	385	75	105	10,6
25	PEEK_CF10_13	385	75	105	16,26
26	PEEK_CF10_13_	385	75	105	15,6
27	PEEK_CF10_14	385	75	105	11,0
28	PEEK_CF10_14_	385	75	105	13,3
29	PEEK_CF10_15	350	75	105	8,32
30	PEEK_CF10_15_	350	75	105	6,33
31	PEEK_CF10_16	420	75	105	21,28
32	PEEK_CF10_16_	420	75	105	18,9
33	PEEK_CF10_17	385	50	105	8,32
34	PEEK_CF10_17_	385	50	105	9,4
35	PEEK_CF10_18	385	100	105	15,0
36	PEEK_CF10_18_	385	100	105	16,5
37	PEEK_CF10_19	385	75	70	14,8
38	PEEK_CF10_19_	385	75	70	11,89
39	PEEK_CF10_20	385	75	140	14,0
40	PEEK_CF10_20_	385	75	140	13,0

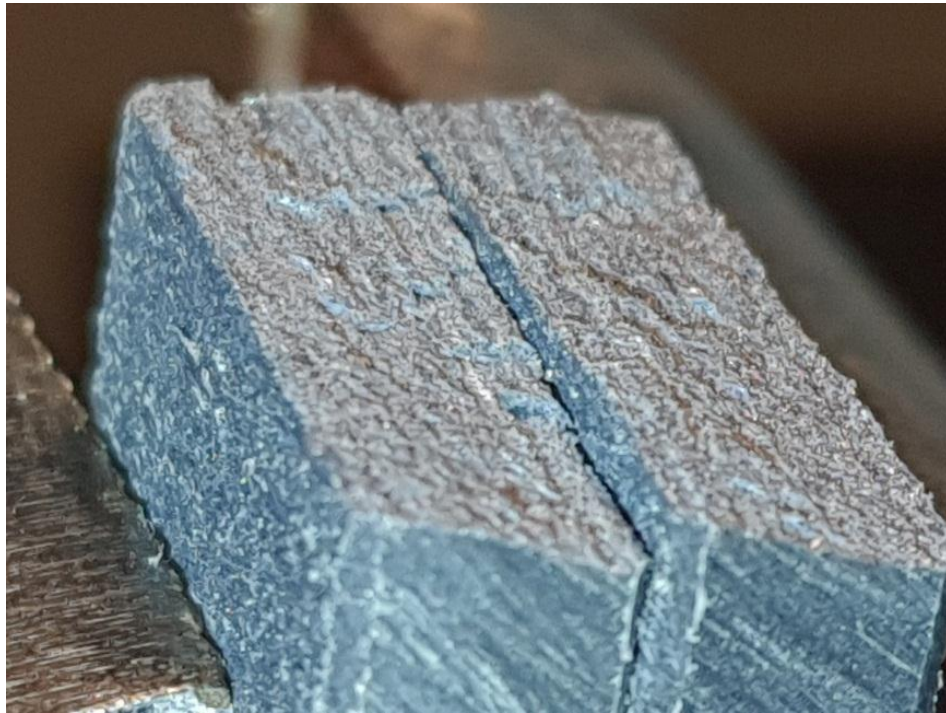
Przykładowe wykresy zależności siły gnącej od poziomu odkształceń wygenerowane przez program obsługi maszyny wytrzymałościowej oraz odpowiadające im obrazy przełomów próbek przedstawiono na rys. 4.40 do 4.45. Symbole poszczególnych próbek odpowiadają tym z drugiej kolumny tabeli 4.18. Wszystkie próbki pękały w środku długości próbek, w miejscu największych naprężeń gnących.

Na wykresach przedstawionych na rys. 4.40, 4.42 i 4.44 można zaobserwować typowy przebieg zależności naprężeń gnących od odkształceń przy próbie zginania tworzyw polimerowych sztywnych i kruchych, aczkolwiek warto wskazać na istotne różnice.

Na wykresie na rys. 4.40 przedstawiono przebieg zależności siły (naprężeń) gnących od odkształceń w próbie zginania dla próbki PEEK\_CF10\_13. Taki kształt wykresu wskazuje, że pęknięcie nastąpiło na całym przekroju jednocześnie. Widok przełomu tej próbki pokazano na rys. 4.41.



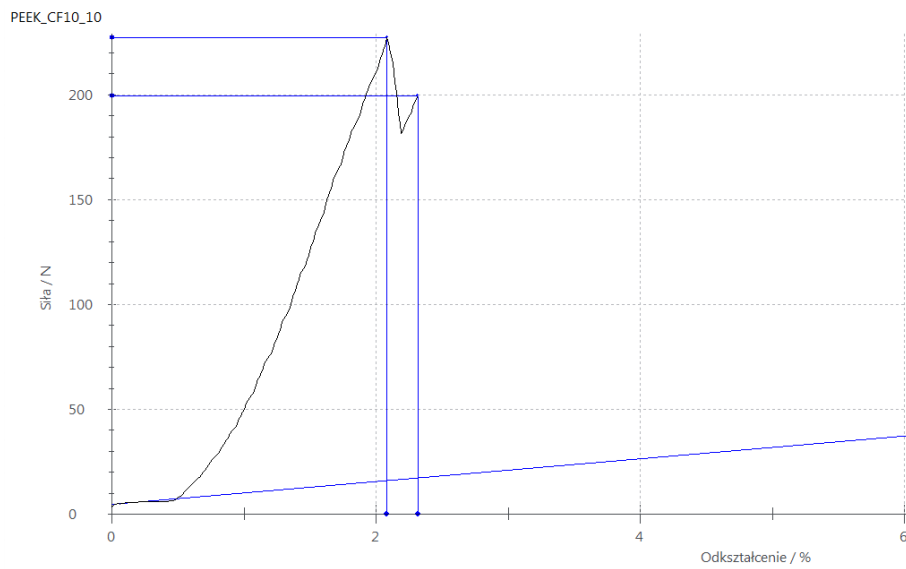
Rys. 4.40. Wykres zależności siły gnącej od odkształceń w próbie zginania dla próbki PEEK\_CF10\_13



Rys. 4.41. Widok przełomu próbki PEEK\_Cf10\_13

Na obrazie przełomie próbki PEEK\_Cf10\_13 można zaobserwować powierzchnię o jednolitej strukturze, bez widocznych śladów odkształceń plastycznych. Widoczne duże nierówności powierzchni sugerują, że pęknięcie nastąpiło nie tylko na powierzchni styku dwóch drukowanych warstw, ale częściowo także w obrębie warstw. Świadczy o dobrej więzi międzywarstwowej pomiędzy warstwami badanego materiału kompozytowego. Nie zaobserwowano delaminacji kolejnych warstw przełomu, co też można uznać za zjawisko pozytywne. Nie zauważono też pęknięcia poszczególnych ściągów wytłoczonego filamentu. Ta próbka wykazała największą wartość naprężeń niszczących spośród wszystkich badanych.

Wykres na rys. 4.42 przedstawia przebieg zależności (siły) naprężeń gnących od odkształceń w próbie zginania dla próbki PEEK\_Cf10\_10. Próbka ta łamała się w dwóch etapach. W pierwszym etapie prawdopodobnie nastąpiła utrata spójności na części powierzchni pęknięcia lub częściowa delaminacja, czego obrazem jest spadek siły, a w drugim etapie całkowite pęknięcie. Taki przebieg procesu pęknięcia jest często obserwowany w próbie zginania kompozytów warstwowych. Mniejszą więź międzywarstwową od spójności wewnątrz warstw w wydrukach FDM można uznać za analog mniejszej spójności międzywarstwowej laminatów od ich spójności w obrębie warstw. Na rys. 4.43 pokazano widok przełomu tej próbki.



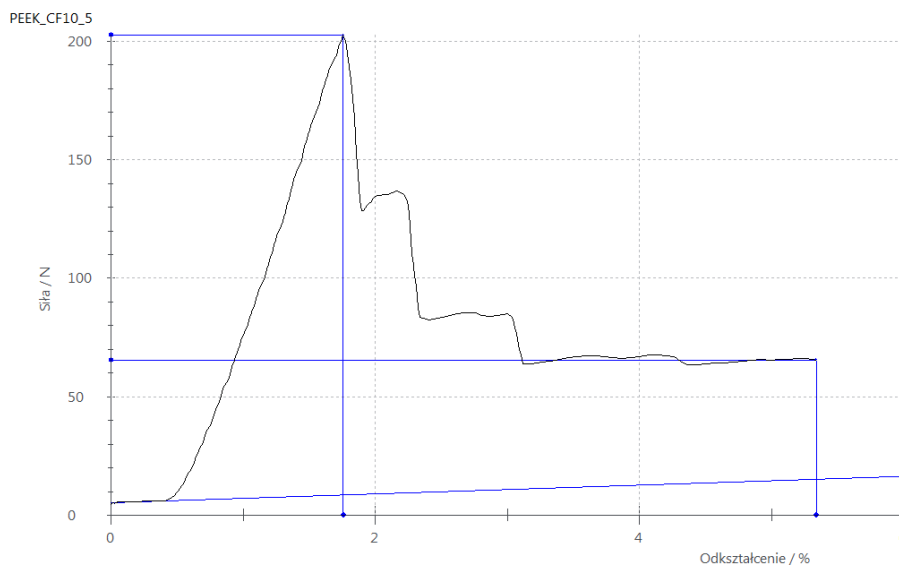
Rys. 4.42. Wykres badania wytrzymałości na zginanie próbki PEEK\_CF10\_10



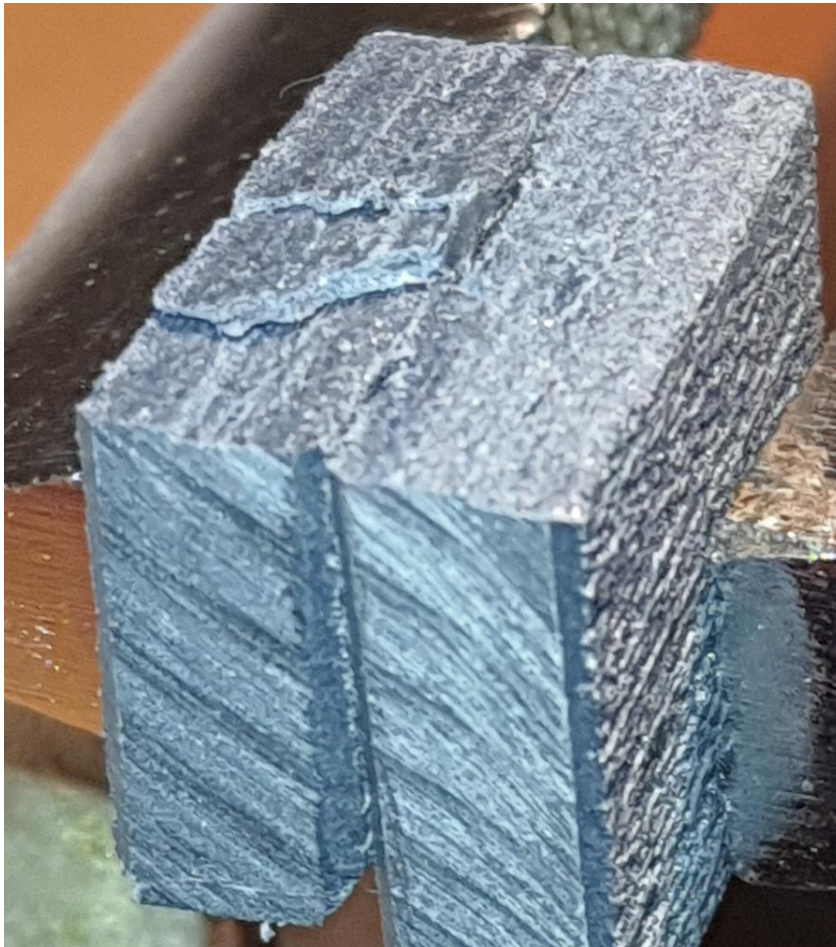
Rys. 4.43. Widok przelomu próbki PEEK\_CF10\_10

Na przełomie próbki PEEK\_CF10\_10, widocznym na rys. 4.43 można zaobserwować powierzchnię o jednolitej strukturze. Widoczna jest częściowa delaminacja sąsiedniej warstwy, co sugeruje ograniczoną więź międzywarstwową. Zaobserwowano także w niewielkim zakresie pękanie przez ściegi wytłoczonego filamentu. Wartość siły niszczącej jest znacznie mniejsza niż próbki wcześniej prezentowanej. Zarówno obraz pęknięcia jak i przebieg próby wskazują, że próbka CF10\_10 wykazała mniejszą więź międzywarstwową niż próbka CF10\_13\_ a obraz pęknięcia jest niepożądany.

Na wykresie na rys. 4.44 przedstawiono przebieg zależności (siły) naprężeń gnących od odkształceń w próbie zginania dla próbki PEEK\_CF10\_5. Można zaobserwować wieloetapowe pękanie próbki do całkowitego zniszczenia przy znacznym jej odkształceniu. Na rys. 4.45 pokazano przełom próbki PEEK\_CF10\_5.



Rys. 4.44. Wykres badania wytrzymałości na zginanie próbki PEEK\_CF10\_5.



Rys. 4.45. Widok przełomu próbki PEEK\_Cf10\_5

Na przełomie próbki PEEK\_Cf10\_5, widocznym na rys. 4.45 można zaobserwować powierzchnię o niejednorodnej strukturze. Pękanie w ograniczonym stopniu przebiega przez ściegi wytłoczonego filamentu. Widoczna częściowa delaminacja trzech sąsiadujących warstw w obrębie przełomu. Tłumaczy to relatywnie duże odkształcenie tej próbki do całkowitego zniszczenia. Ocena tej próby i obrazu zniszczenia jest podobna jak próbki PEEK\_Cf10\_10. Kształt wykresu i obraz powierzchni przełomu można uznać za najmniej pożądanych z trzech zaprezentowanych, typowych pęknięć.

#### **4.6.5. Analiza statystyczna wyników badań**

W pierwszym kroku analizy uzyskanych wyników poszukiwano zależności funkcyjnej pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną. Jak zaznaczono w opisie metodyki badań jako miarę wytrzymałości międzywarstwowej przyjęto naprężenia ( $\sigma_N$ ), przy których rozpoczynał się proces pęknięcia próbki w zmodyfikowanej próbie zginania.



$$\sigma_N = F(x_1, x_2, x_3) \quad (4.8)$$

gdzie:  $\sigma_N$  – zmienna zależna (naprężenia niszczące),  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – zmienne niezależne.

Zależność tę nazywa się funkcją obiektu badań lub inaczej modelem matematycznym (doświadczalnym) obiektu badań.

Funkcję obiektu badań przyjęto w postaci wielomianu 2-stopnia (z interakcjami) (4.9):

$$\sigma_N = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (4.9)$$

gdzie:  $a_{ij}$  – współczynniki wielomianu opisujące wpływ zmiennych „i” i „j”,  
 $x_i$  – zmienne niezależne,  
 $\sigma_N$  – zmienna zależna.

Postać wielomianu drugiego stopnia przyjmowana jest najczęściej, kiedy bada się nowe, niecałkowicie rozpoznane zjawiska i procesy a nieznany jest dokładnie wpływ czynników niezależnych na zmienną zależną. Wielomian drugiego stopnia jest najprostszą funkcją nieliniową i jego wykorzystanie umożliwia uwzględnienie nieliniowości wpływu zmiennych niezależnych. Ta postać funkcji obiektu badań zalecana jest też w przypadku wykorzystania rotatabilnych planów eksperymentu, aby możliwe było uzyskanie efektu jednakowego błędu funkcji obiektu na wszystkich sferach jednakowo oddalonych od środka (centrum) dziedziny funkcji. Wprowadzenie do wielomianu iloczynów czynników niezależnych (tzw. interakcji) umożliwia określenie jedoczesnego wpływu dwóch zmiennych zależnych.

Nie wszystkie czynniki składającej się na całość wielomianu opisanego wzorem (4.9) mają tak samo istotny wpływ na zmienną zależną. Selekcji czynników na mniej i bardziej istotne można dokonać wykorzystując procedury analizy regresji. Wygodną metodą takiej analizy jest regresja krokowa wsteczna. Polega na tym, że wychodząc od pełnej postaci funkcji obiektu badań, w kolejnych krokach bada się, czy usunięcie czynnika istotnie wpływa na stopień dopasowania funkcji do uzyskanych wyników badań. W ten sposób wyznacza się istotność wpływu poszczególnych czynników na zmienną zależną i odrzuca mniej istotne. Kryterium przyjęcia lub odrzucenia jest wartość statystyki F (Snedecora). Czym większa jest wartość tej statystyki dla danego czynnika, tym istotniejszy jest jego wpływ na zmienną zależną. Większość programów statystycznych przyjmuje jako wartość graniczną  $F=1,00$ . Czynniki, które mają

mniejsze wartości tej statystyki są usuwane z modelu a te, dla których wartość  $f \geq 1,00$  są w modelu utrzymywane. Procedura regresji krokowej poszukuje też wartości współczynników  $a_{ij}$ . Równoległe do analizy regresji prowadzona jest analiza wariancji oceniającą jaką część zmienności zmiennej zależnej zdeterminowana jest zmiennością (wariancją) poszczególnych czynników.

Tak opisaną regresję krokową wsteczną przeprowadzono w programie Statistica 13.3.

W tabeli 4.19 przedstawiono wynik selekcji czynników funkcji obiektu przeprowadzonej drogą regresji krokowej.

Tabela 4.19. Końcowy rezultat selekcji czynników metodą regresji krokowej wstecznej

<b>Czynnik</b>	<b>Krok</b>	<b>F do usunięcia</b>	<b>P do usunięcia</b>	<b>F do przyjęcia</b>	<b>P do przyjęcia</b>	<b>Wynik selekcji</b>
$x_1 \cdot x_3$	Krok 6	46,74905	0,000000			w modelu
$x_2^2$		2,11441	0,154827			w modelu
$x_3$		27,1978	0,000008			w modelu
$x_2 \cdot x_3$		2,9627	0,093952			w modelu
$x_1$				0,029840	0,863878	poza modelem
$x_1^2$				0,004362	0,947729	poza modelem
$x_3^2$				0,089614	0,766491	poza modelem
$x_2$				0,028159	0,867730	poza modelem
$x_1 \cdot x_2$				0,036277	0,850077	poza modelem

W tabeli 4.13 przyjęto następujące oznaczenia:

- krok – numer kroku regresji, w którym osiągnięto ostateczną selekcję czynników;
- F do usunięcia – wartość statystyki F Snedecora, przy której czynnik przyjęty do modelu zostałby usunięty;
- F do przyjęcia - wartość statystyki F Snedecora, przy której czynnik usunięty z modelu zostałby do niego wprowadzony;
- P do usunięcia – prawdopodobieństwo, że dołączony czynnik ma nieistotny wpływ na zmienną zależną;
- P do przyjęcia – prawdopodobieństwo, że czynnik usunięty ma nieistotny wpływ na zmienną zależną;

Z analizy wyników zaprezentowanych w tabeli 4.19 można wywnioskować, wszystkie parametry technologiczne, wytypowane jako zmienne niezależne, mają istotny wpływ na zmienną zależną, albo bezpośrednio albo jako składnik interakcji. Świadczy to poprawnym wyborze zmiennych niezależnych. Największy wpływ na zmienną zależną ma interakcja  $x_1 \cdot x_3$  oraz zmienna  $x_3$ . Statystyka F Snedecora dla wszystkich czynników przyjętych do modelu jest znacznie większa niż przyjęto do obliczeń wartość graniczna  $F=1,00$ .

W tabeli 4.20 przedstawiono wartości współczynników wyznaczonych w procedurze regresji krokowej oraz ich błędy standardowe i 95-cio procentowe przedziały ufności.

Tabela 4.20. Współczynniki funkcji obiektu badań i ich ocena

<b>Współczynnik</b>	<b>Wartość</b>	<b>Błąd standardowy</b>	<b>Dolna granica 95%-go przedziału ufności</b>	<b>Górna granica 95%-go przedziału ufności</b>
<b>a<sub>0</sub></b>	22,81813	6,38787	13,96413	31,67213
<b>a<sub>3</sub></b>	-0,70163	0,134537	-0,974752	-0,42850
<b>a<sub>13</sub></b>	0,00131	0,000191	0,000918	0,00169
<b>a<sub>23</sub></b>	0,00254	0,001478	-0,000456	0,00555
<b>a<sub>22</sub></b>	-0,00151	0,001041	-0,003627	0,00060

Wartości błędu standardowego dla poszczególnych współczynników jak i dolnej i górnej granicy 95-cio procentowego przedziału ufności wskazują na znaczący rozrzut wyników. Obserwowano to już w trakcie realizacji badań. Jest to prawdopodobnie wynik przypadkowo pojawiających się karbów zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych.

W tabeli 4.21 przedstawiono uzyskany współczynnik regresji i determinacji a w tabeli 4.22 wyniki analizy wariancji dotyczącej adekwatności funkcji obiektu badań.

Tabela 4.21. Współczynnik korelacji i determinacji

<b>Współczynnik korelacji R</b>	<b>Współczynnik determinacji R<sup>2</sup></b>
0,7782	0,6056

Wartość współczynnika korelacji, R, jest na tyle wysoka, że można wskazać na istotną korelację pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi. Nie jest to jednak wartość bardzo wysoka (powyżej 0,9), co jest wynikiem znacznego rozrzutu zmierzonych wartości naprężeń niszczących  $\sigma_N$ . Współczynnik determinacji określa jaka część zmienności zmiennej zależnej zdeterminowana jest zmiennością zmiennych niezależnych.

Tabela 4.22. Wyniki analizy wariancji dotyczącej adekwatności funkcji obiektu badań (przyjęty poziom istotności  $\alpha=0,05$ )

<b>Liczba stopni swobody dla modelu</b>	<b>Liczba stopni swobody dla reszt</b>	<b>Wartość statystyki F wyznaczona z badań</b>	<b>Wartość krytyczna statystyki F*</b>	<b>Ocena funkcji obiektu badań</b>
$df_M$	$df_R$	$F_A$	$F_\alpha$	
4	35	12,9082	8,60055	Adekwatna

\* - wartość  $F_\alpha$  odczytano z tablic rozkładu F-Snedecora [584]

W teście adekwatności funkcji porównuje się wariancję wyników wynikającą z przewidywań modelu (wariancja międzygrupowa) z sumą wariancji wynikających z rozrzutu pomiarów (wariancje wewnątrzgrupowe). Stawia się hipotezę zerową stwierdzającą (w uproszczeniu), że obserwowana zmienność wielkości mierzonej nie wynika z wpływu czynników niezależnych a z rozrzutu wyników pomiarów. W celu weryfikacji hipotezy wyznacza się wartość statystyki F wynikającą ze wskazanych wariancji i porównuje ją z wartością krytyczną wyznaczoną dla zestawu liczb stopni swobody dla modelu i dla reszt [585]

Przyjmuje się, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o braku istotności związku między pomiędzy zmiennością wartości zależnej a przewidywaniami modelu jeżeli jest spełniony warunek.

$$F_\alpha > F_A \quad (4.10)$$

Ponieważ powyższy warunek nie jest spełniony, można przyjąć, że wyznaczona funkcja obiektu badań (model eksperymentalny) w sposób adekwatny opisuje zależność pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną.

Ostatecznie więc funkcja obiektu badań przyjęła postać (4.11):

$$\sigma_N = a_0 + a_3x_3 + a_{22}x_2^2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (4.11)$$

gdzie:  $a_{ij}$  to współczynniki modelu (wielomianu) aproksymacyjnego.

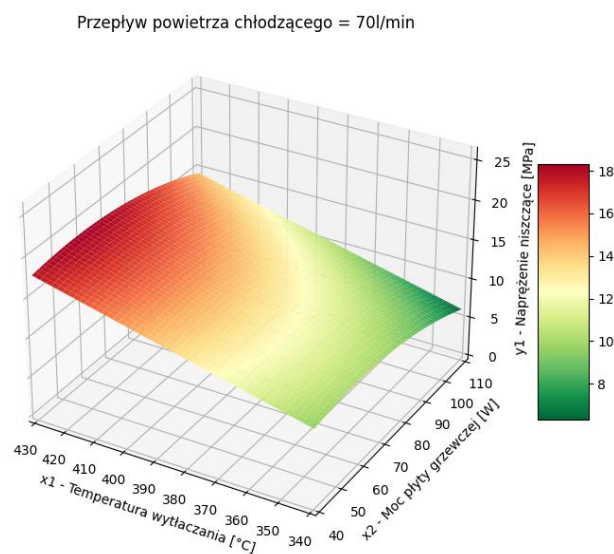
Po podstawieniu wyznaczonych współczynników do wzoru 4.11, poszukana funkcja przyjęła postać (4.12):

$$\sigma_N = 22,81813 - 0,70163x_3 - 0,00151x_2^2 + 0,00131x_1x_3 + 0,00254x_2x_3 \quad (4.12)$$

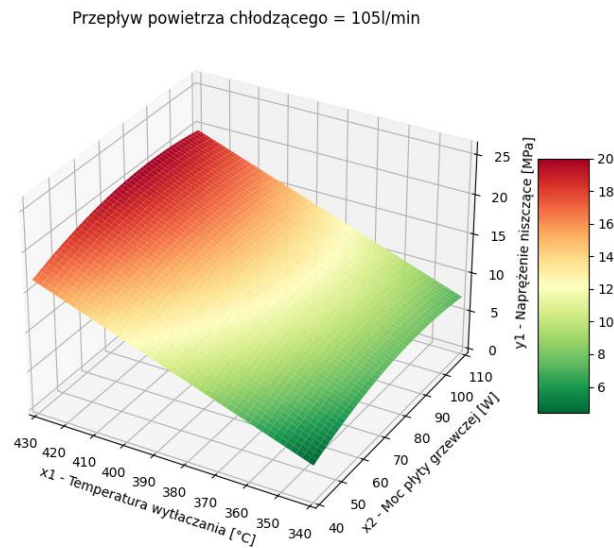
#### 4.6.6. Analiza merytoryczna wyników badań

Model doświadczalny opisany wzorem (4.12) jest zależności określoną w przestrzeni czterowymiarowej – trzy zmienne niezależne i jedna zmienna zależna. Tego typu funkcji nie można graficznie przedstawić w przestrzeni trójwymiarowej jaką maksymalnie dysponują programy graficzne i w której porusza się człowiek. Zatem, aby umożliwić graficzną prezentację modelu wykonano trójwymiarowe przekroje funkcji (4.12).

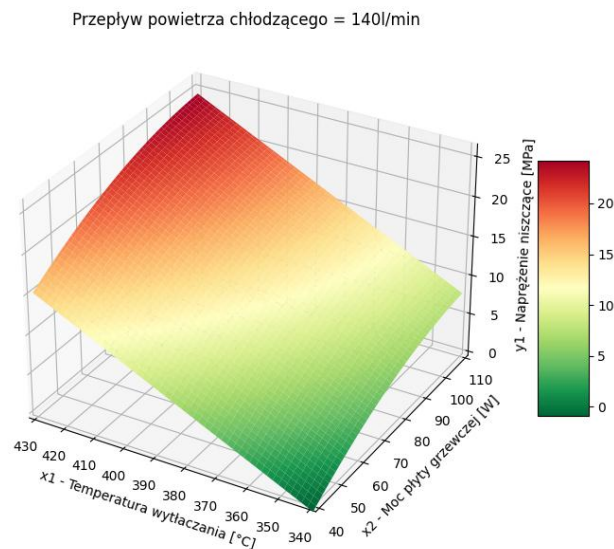
Na rysunkach 4.46 – 4.48 przedstawiono zależności naprężeń niszczących [MPa] ( $y_1$ ) od temperatury wytłaczania [ $^{\circ}$ C] ( $x_1$ ) i mocy grzewczej dodatkowej płyty [W] ( $x_2$ ) dla trzech różnych wartości natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) równych odpowiednio:  $x_3 = 70$  l/min,  $x_3 = 105$  l/min, oraz  $x_3 = 140$  l/min.



Rys. 4.46. Zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania [ $^{\circ}$ C] ( $x_1$ ) i mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) dla natężenia przepływu powietrza chłodzącego ( $x_3$ )=70 l/min



Rys. 4.47. Zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania [°C] ( $x_1$ ) i mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) dla natężenia przepływu powietrza chłodzącego ( $x_3$ )=105 l/min



Rys. 4.48. Zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania [°C] ( $x_1$ ) i mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) dla natężenia przepływu powietrza chłodzącego ( $x_3$ )=140 l/min

Charakter zależności naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania i mocy dodatkowej płyty grzewczej jest podobny niezależnie od wartości natężenia przepływu powietrza chłodzącego. Największe wartości tych naprężeń na poszczególnych wykresach

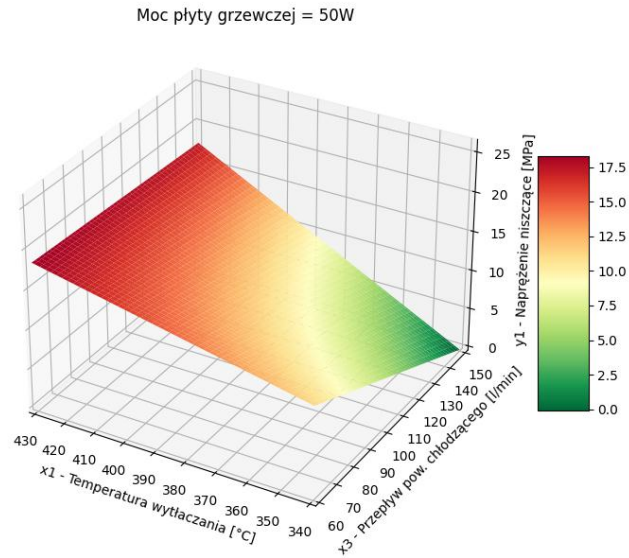
różnią się jednak przy różnych poziomach natężenia przepływu. Maksymalną wartość naprężeń niszczących, powyżej 25 MPa, uzyskano dla natężenia przepływu powietrza chłodzącego ( $x_3$ )=105 l/min.

Analizując zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania widać, że w całym badanym zakresie mocy grzewczej i dla wszystkich poziomów natężenia przepływu wartości naprężeń niszczących więz międzywarstwową są rosnącą funkcją temperatury wytłaczania. Jest to zrozumiałe biorąc pod uwagę fizyczne podstawy procesu dyfuzji zachodzącej pomiędzy tworzywem warstwy wcześniej nałożonej a tworzywem nakładanego filamentu. Zwiększenie temperatury wytłaczanego filamentu zmniejsza lepkość tworzywa i zwiększa ruchliwość jego makrocząsteczek. Oba te czynniki sprzyjają utworzeniu silnej więzi międzywarstwowej.

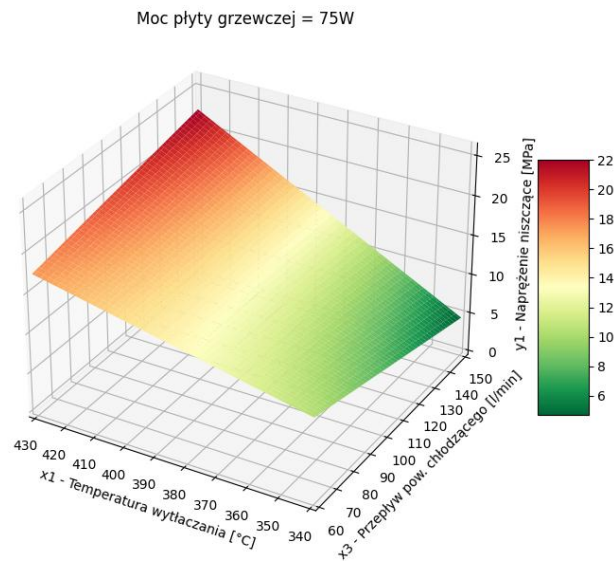
Wpływ drugiego z parametrów zobrazowany na rys. 4.46 – 4.48, a mianowicie mocy dodatkowej płyty grzewczej, na naprężenia niszczące nie jest już tak jednoznaczny i ma charakter nieliniowy. Wskazuje to, że konkurują ze sobą co najmniej dwa zjawiska przeciwstawnie wpływające na więz międzywarstwową. Z jednej strony, zwiększenie mocy dodatkowej płyty grzewczej jest korzystne, bo prowadzi do wzrostu temperatury powierzchni tworzywa warstwy wcześniej nałożonej a to ma taki sam skutek jak podniesienie temperatury filamentu. Trzeba jednak pamiętać, że można się spodziewać częściowej degradacji polimeru przy zbyt intensywnym jego nagrzewaniu. Przypuszczenie to potwierdza analiza różnic pomiędzy obrazami analizowanej zależności dla różnych natężeń przepływu powietrza chłodzącego. Kiedy natężenie to jest zbyt małe, dominują procesy degradacyjne, co widać na rys. 4.46. Przy wystarczającym natężeniu przepływu powietrza chłodzącego dominują korzystne zjawiska obniżenia lepkości i zwiększenia ruchliwości makrocząstek tworzywa warstw wcześniej założonej (rys. 4.47 i rys. 4.48).

Na rysunkach rys. 4.49, 4.50 i 4.51 przedstawiono zależności naprężeń niszczących [MPa] ( $y_1$ ) od temperatury wytłaczania [ $^{\circ}$ C] ( $x_1$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla trzech różnych wartości mocy grzewczej dodatkowej płyty równych odpowiednio:

$x_2 = 50$  W,  $x_2 = 75$  W oraz  $x_2 = 100$  W.

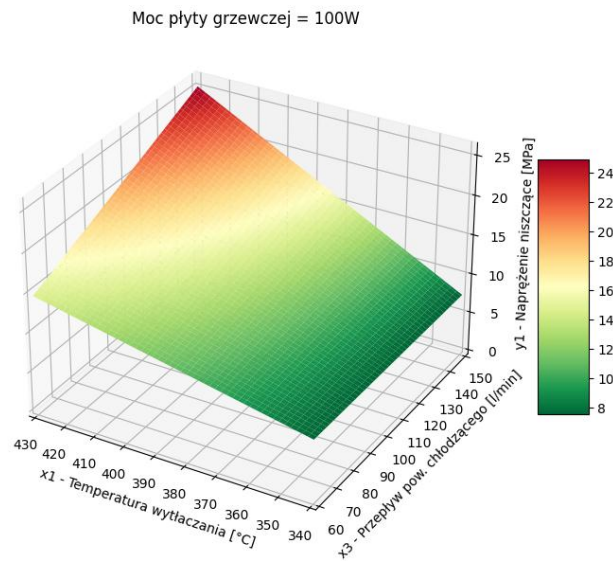


Rys. 4.49. Zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania [°C] ( $x_1$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla mocy płyty grzewczej  $x_2 = 50W$



Rys. 4.50. Zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania [°C] ( $x_1$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla mocy płyty grzewczej  $x_2 = 75W$





Rys. 4.51. Zależność naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania [°C] ( $x_1$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla mocy płyty grzewczej  $x_2 = 100W$

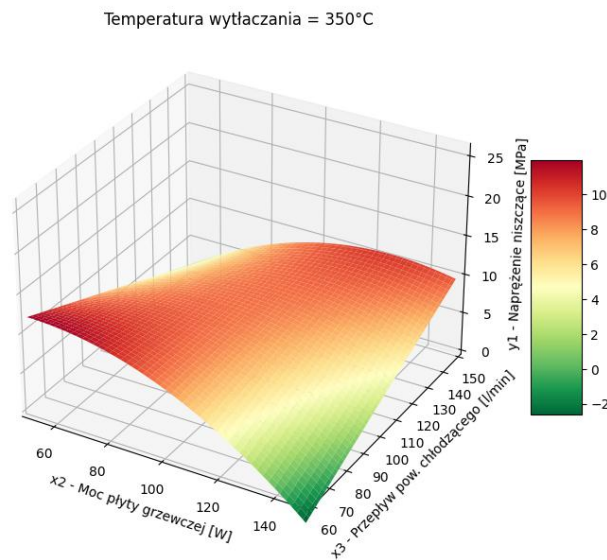
Charakter zależności naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania i natężenia przepływu powietrza chłodzącego jest podobny na wszystkich trzech wykresach i nie zależy od mocy dodatkowej płyty grzewczej. Wraz ze wzrostem obu zmiennych niezależnych zmienna zależna (naprężenia niszczące) zmieniają się liniowo. Największe wartości tych naprężeń na poszczególnych wykresach różnią się jednak przy różnych poziomach mocy dodatkowej grzewczej płyty. Maksymalną wartość naprężeń niszczących, 25 MPa, uzyskano dla największej mocy dodatkowej płyty grzewczej ( $x_2=100W$ ).

Wpływ zmian naprężeń niszczących od temperatury wytłaczania przeanalizowano wcześniej. Wykresy przedstawione na rys. 4.49, 4.50 i 4.51 potwierdzają obserwacje poczynione w trakcie analizy wykresów na rys. 4.46, 4.47 i 4.48.

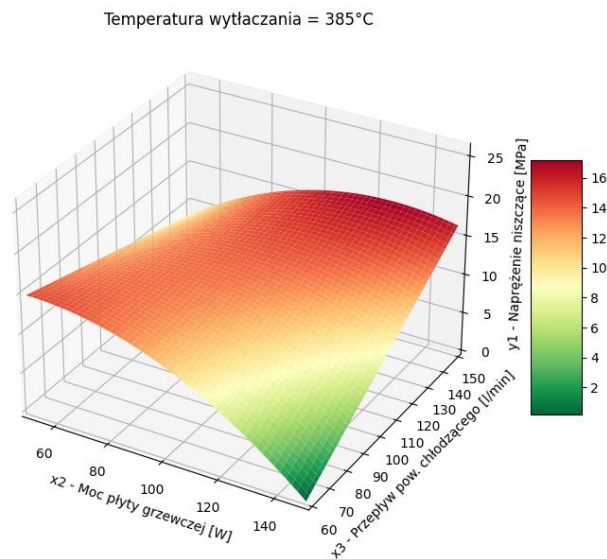
Zależność naprężeń niszczących od natężenia przepływu powietrza chłodzącego należy analizować biorąc pod uwagę ustalone poziomy mocy płyty grzewczej. Dla małej mocy płyty grzewczej i niskiej temperatury wytłaczanego tworzywa wskazane jest stosowanie niewielkiego natężenia nadmuchu powietrza chłodzącego. Wynika to bezpośrednio z analizy procesu dyfuzji makrocząsteczek. Intensywny nadmuch jest dodatkowym czynnikiem obniżającym temperaturę już tak czy tak słabo uplastycznionego tworzywa a to znacznie utrudnia procesy dyfuzyjne. Dla najwyższych temperatur wytłaczania i najwyższych mocy dodatkowej płyty grzewczej zwiększenie natężenia przepływu jest bardzo korzystne. Wysokie temperatury procesu dyfuzji

sprzyjają utworzeniu silnej więzi międzywarstwowej a intensywny nadmuch pozwala zestalić łączone warstwy przed nakładaniem kolejnej warstwy.

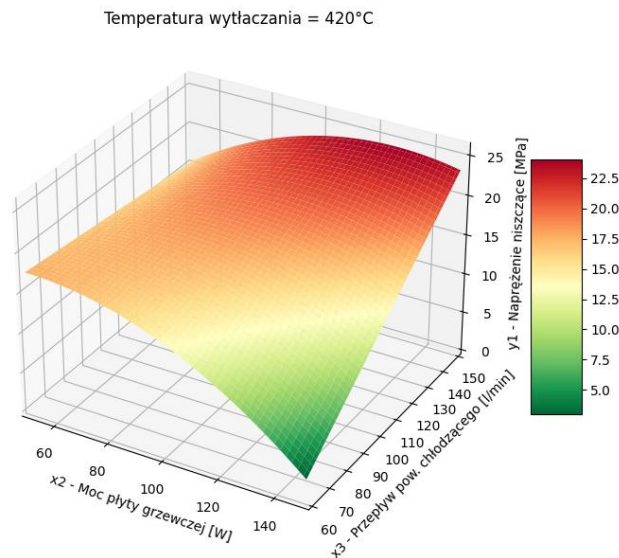
Na rysunkach 4.52, 4.53 i 4.54 przedstawiono zależności naprężeń niszczących [MPa] ( $y_1$ ) od mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla trzech różnych wartości temperatury wytłaczania równych odpowiednio  $x_1 = 350^\circ\text{C}$ ,  $x_1 = 385^\circ\text{C}$  oraz  $x_1 = 420^\circ\text{C}$ .



Rys. 4.52. Zależność naprężeń niszczących od mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla temperatury wytłaczania równej  $x_1 = 350^\circ\text{C}$



Rys. 4.53. Zależność naprężeń niszczących od mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla temperatury wytłaczania równej  $x_1 = 385^\circ\text{C}$



Rys. 4.54. Zależność naprężeń niszczących od mocy płyty grzewczej [W] ( $x_2$ ) i natężenia przepływu powietrza chłodzącego [l/min] ( $x_3$ ) dla temperatury wytłaczania równej  $x_1 = 420^\circ\text{C}$

Analiza wykresów zamieszczonych na rys. 4.52 do 4.54 potwierdza obserwacje do tej pory poczynione. Widać wyraźnie, że są obszary o bardzo niewielkiej więzi międzywarstwowej i o największych wartościach naprężeń niszczących. To, że są obszary dziedziny, dla których przewidywane modelem naprężenia niszczące przyjmują ujemne wartości wynika z rozrzutu mierzonych wielkości a w konsekwencji niedokładności funkcji obiektu badań.

Podsumowując tę część analizy wyników warto podkreślić, że opracowana funkcja obiektu badań i jej graficzne reprezentacje pozwalają na wybór najkorzystniejszych dla więzi międzywarstwowej parametrów technologicznych. Pokazują też, jak zmienne niezależne wpływają na badaną zmienną zależną. W efekcie znacznie przyspiesza się proces doboru parametrów drukowania i zyskuje się istotne korzyści ekonomiczne

### **Badania porównawcze**

Celem weryfikacji skuteczności nowej technologii druku 3D FDM przeprowadzono badania próbek PEEK CF10 wydrukowanych metodą konwencjonalną. Wydrukowano trzy serie

próbek po 12 sztuk przy trzech różnych temperatur wyłaczania kompozytu: 400°C, 405°C i 410°C. Pozostałe najważniejsze parametry drukowania były następujące:

- Temperatura zamkniętej komory drukarki - 90°C
- Prędkość drukowania – 30 mm/s
- Natężenie przepływu powietrza w cyrkulacji wewnętrznej komory drukarki – 70 l/min

Celem wyeliminowania wpływ czynników innych niż nastawiane parametry drukowania, mogących mieć wpływ na wytrzymałość drukowanych części, do testów referencyjnych użyta zostanie ta sama drukarka 3D z zamkniętą komorą grzejną, której użyto w programie badań z dodatkową płytą grzewczą, ale bez tej płyty.

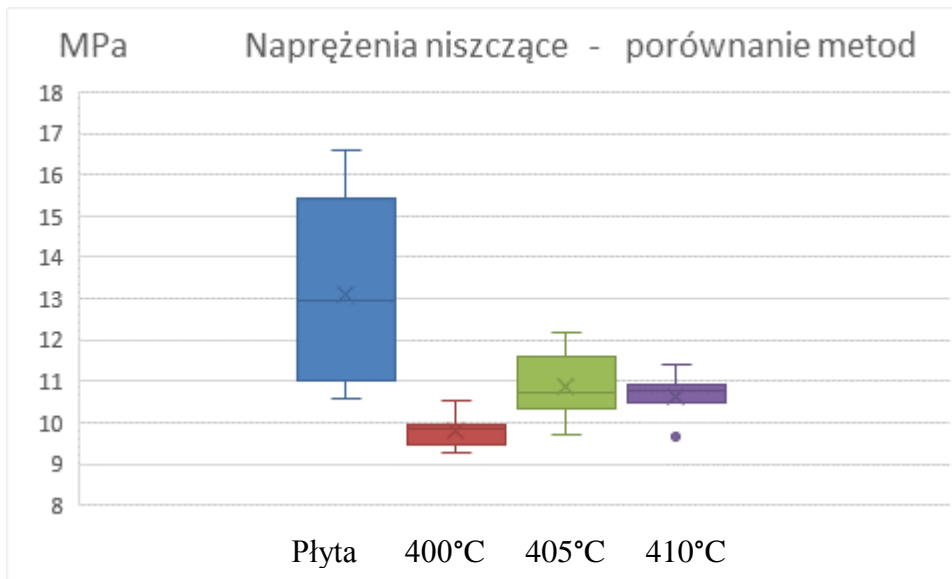
### **Wyniki badań i ich analiza**

Wyniki badań próbek referencyjnych przedstawiono w tabeli 4.23.

Tabela 4.23. Wyniki badań naprężeń niszczących dla próbek referencyjnych

Temperatura wyłaczania	400 °C	405 °C	410 °C
	Naprężenia niszczące		
Nr próbki	MPa		
1	9,64	10,31	10,80
2	9,94	10,57	10,46
3	9,98	11,82	10,79
4	10,05	10,67	10,56
5	9,47	9,97	9,64
6	9,46	10,78	10,92
7	9,53	11,08	10,91
8	9,88	12,16	9,70
9	9,28	9,69	11,00
10	10,55	11,58	10,69
11	9,94	10,39	11,41
12	9,84	11,63	10,88

Uzyskane wyniki porównano z rezultatami uzyskanymi w centrum planu badań, gdzie wszystkie próbki wydrukowano przy tych samych parametrach technologicznych (Tabela 4.17 i 4.18). Graficznie zestawienie wyników pomiarów naprężeń niszczących w próbkach referencyjnych oraz wyników uzyskanych w centrum planu badań próbek wytworzonych na drukarce 3D z górną płytą grzejną przedstawiono na wykresie pudełkowym na rys. 4.55.

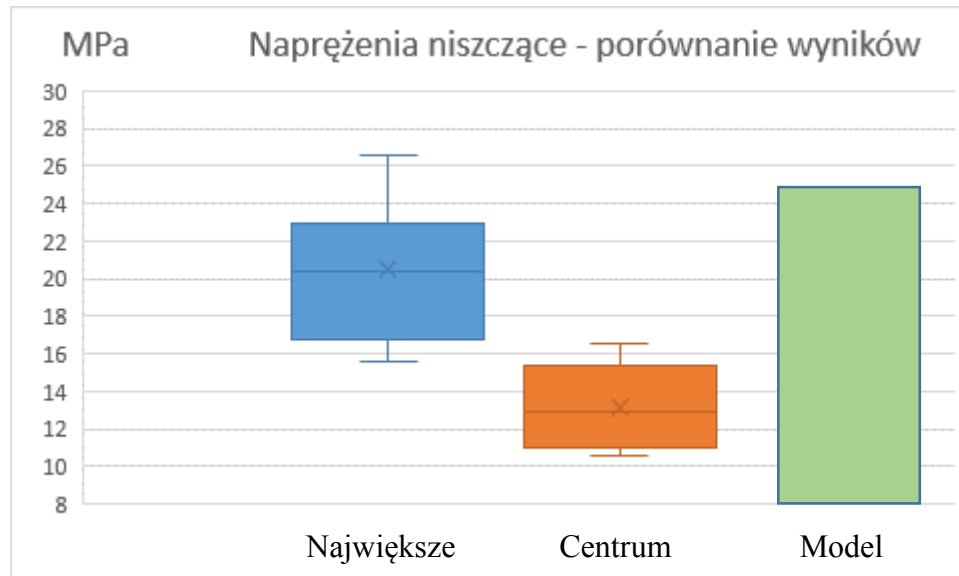


Rys. 4.55. Porównanie wyników badań naprężeń niszczących w próbkach referencyjnych i wydrukowanych na drukarce 3D z górną płytą grzejącą (oznaczone „Płyta”)

Rozrzut wyników badań dla drukarki 3D z górną płytą grzejącą jest największy, co opisano w trakcie wcześniejszych analiz (Punkt 4.6.5.) To co jest najistotniejsze, to bardzo duża różnica wartości średnich. Próbki wydrukowane innowacyjną metodą z wykorzystaniem dodatkowej płyty grzewczej wykazały największą spójność międzywarstwową. Barwne obszary na wykresach reprezentują 50% centralnych wartości z wszystkich pomiarów w danej grupie. Ich porównanie także dowodzi, że nowa technologia jest skutecznym sposobem poprawy więzi międzywarstwowej. W próbkach referencyjnych wydrukowanych przy najwyższej w zestawieniu temperaturze wylączania 410°C zakres wartości jest węższy w porównaniu do wyników z drukarki 3D z płytą i pozostałych zestawów referencyjnych, co wskazuje na najmniejszą zmienność wyników. W grupie próbek referencyjnych o najmniejszej temperaturze wylączania 405°C zmienność wyników jest największa spośród wszystkich zestawów referencyjnych. W próbkach referencyjnych wpływ temperatury wylączania jest niejednoznaczny. Konieczne są szersze badania, na przykład takie jak przeprowadzono dla próbek drukowanych z dodatkową płytą grzewczą, aby poznać wpływ najważniejszych parametrów drukowania konwencjonalną techniką FDM na więź międzywarstwową

Celem dokładniejszego rozpoznania możliwości poprawy więzi międzywarstwowej, jakie daje omawiana technika, na rys. 4.56 zestawiono wyniki uzyskane w centrum programu z

dziesięcioma największymi zmierzonymi wartościami naprężeń niszczących i największą wartością tych naprężeń, wynikającą z przewidywań funkcji obiektu badań.



Rys. 4.56. Porównanie zestawu największych naprężeń niszczących z tymi, uzyskanymi w centrum programu oraz największą wartością przewidywaną funkcją obiektu badań.

Przedstawione wyniki dowodzą, że przez odpowiedni dobór parametrów drukowania, technologia drukowania 3D FDM z płytą grzejną pozwala prawie dwukrotnie zwiększyć naprężenia niszczące więź międzywarstwową. Wykresy przedstawione na rys. 4.56 pokazują, że poprawnie dobrano zestaw kluczowych dla wytrzymałości wydrukowanych próbek parametrów technologicznych jako zmienne niezależne w programie badań.

## **5. PODSUMOWANIE**

Przeprowadzone studium literaturowe wskazuje, że najszerzej stosowana technologia drukowania 3D, jaką jest FDM, nadal jest intensywnie badana i rozwijana. Warto zatem podejmować badania naukowe w tej dziedzinie. Jednym z jej największych niedostatków jest niewielka więź łącząca kolejno drukowane warstwy. Analiza literatury, rozważania koncepcyjne jak i szeroko zakrojone badania wstępne pozwoliły na sformułowanie tezy pracy głoszącej, że zastosowanie innowacyjnych metod drukowania 3D FDM, w połączeniu z optymalizacją parametrów procesu drukowania, pozwoli znacząco poprawić więź międzywarstwową produktów drukowanych z tworzyw i kompozytów polimerowych.

W wyniku prac koncepcyjnych i konstrukcyjnych oraz prób technologicznych zaproponowano trzy modyfikacje technologii drukowania FDM:

- drukowanie FDM z głowicą rotującą;
- drukowanie FDM z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym;
- drukowanie FDM z dodatkową płytą grzewczą.

Dla każdej z tych wymienionych technologii zaprojektowano drukarki implementujące innowacyjne modyfikacji technologii FDM. Technologia z dodatkową płytą grzewczą została oraz drukarka pozwalająca na jej zastosowanie zostały objęte zastrzeżeniem patentowym [570].

Sprawdzenia skuteczności opracowanych innowacji technologicznych dokonano eksperymentalnie. Dwie pierwsze techniki sprawdzono w badaniach porównawczych. Wydrukowano trzy serie próbek referencyjnych, zmieniając temperaturę wytłaczanego tworzywa, z trzech technologicznie trudnych kompozytów tworzyw termoplastycznych. Badaniom poddano polipropylen z 30% (wagowo) dodatkiem mielonego włókna szklanego, poli(tereftalan etylenu) z 15% (wagowo) zawartością mielonych włókien węglowych oraz poliamid wysokotemperaturowy z 15% (wagowo) dodatkiem mielonych włókien węglowych. Następnie wydrukowano serię próbek w zmodyfikowanych technologiach. Wszystkie w ten sposób wytworzone próbki poddano badaniom wytrzymałościowym. Jako miarę więzi międzywarstwowej przyjęto wartość niszczących naprężeń rozciągających w zmodyfikowanej próbce zginania. Wyniki badań wskazują, że obie badane technologie pozwalają na uzyskiwanie większej więzi międzywarstwowej niż w technologii konwencjonalnej. Jednakże wskazany wzrost naprężeń nie dotyczy wszystkich tworzyw i wszystkich warunków drukowania.

Wskazuje to na konieczność dalszych i szerszych badań, które mogłyby wskazać optymalne parametry drukowania przy przyjętym kryterium maksymalizacji więzi międzywarstwowej.

Wstępne próby technologiczne wskazywały, że największy wzrost sił wiązania międzywarstwowego można uzyskać stosując technologię druku FDM z dodatkową płytą grzewczą. Dlatego dla tej technologii przeprowadzono najszerszy program badań eksperymentalnych. Badania przeprowadzono na próbkach wydrukowanych z tworzywa powszechnie uznawanego za jedno z najtrudniejszych do przetwarzania w technologii FDM, a mianowicie poli(eteroeteroketonie) z 10% (wagowo) zawartością mielonych włókien węglowych. Bardzo wysoka cena filamentu wytworzonego z tego tworzywa oraz ograniczona przestrzeń drukowania wymusiły ograniczenie wielkości i liczby drukowanych próbek. Jak w pierwszej części badań tak i tym razem jako miarę więzi międzywarstwowej przyjęto wartość niszczących naprężeń rozciągających w zmodyfikowanej próbie zginania. Na podstawie prób technologicznych wytypowano trzy parametry technologiczne, których wpływ na poziom naprężeń niszczących został następnie zbadany: temperatura wytłaczanego tworzywa, moc dodatkowej płyty grzewczej oraz natężenie przepływu powietrza chłodzącego. Wyznaczono też zakresy zmienności tych parametrów. Celem ograniczenia liczby koniecznych próbek wykorzystano metody planowania eksperymentu. Zastosowano statyczny, randomizowany, selekcyjny, wieloczynnikowy, uniform-rotatabilny plan badań. Jego realizacja i uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie funkcji obiektu badań, wiążącej zmienną zależną (naprężenia niszczące) z trzema zmiennymi niezależnymi (wybranymi parametrami). Funkcję obiektu badań przyjęto w postaci wielomianu drugiego stopnia z interakcjami. Taka postać funkcji pozwala uwzględnić wpływ wszystkich zmiennych niezależnych na zmienną zależną, ewentualną nieliniowość tego wpływu oraz wspólny wpływ dwóch zmiennych (tzw. interakcje). Doboru wartości współczynników wielomianu aproksymacyjnego (funkcji obiektu badań) dokonano metodą regresji krokowej. Metoda regresji krokowej pozwala nie tylko na dobór współczynników wielomianu aproksymacyjnego, ale też usuwa z modelu czynniki najmniej statystycznie istotne. Ostateczna postać funkcji obiektu badań wskazuje, że wszystkie wybrane zmienne niezależne mają istotny wpływ na zmienną zależną, albo bezpośrednio albo jako składowa interakcji. Analiza wyników, funkcji obiektu badań jak i wykresów opracowanych w oparciu o tę funkcję wskazuje na kilka istotnych prawidłowości:



- Możliwy jest bardzo duży wzrost więzi międzywarstwowej poprzez zastosowanie dodatkowej płyty grzewczej. Wzrost ten nie następuje jednak dla całego zakresu zmienności wybranych parametrów, konieczny jest ich dobór, w czym znacząco pomaga wyznaczona funkcja i jej obrazy graficzne;

- Wykorzystanie metod planowania badań eksperymentalnych i statystycznej analizy wyników pozwoliło na bardzo znaczne ograniczenie liczby próbek koniecznych zbadania aby wyznaczyć postać i współczynniki funkcji obiektu badań;

- Największy wpływ na wartość napężeń niszczących wykazała temperatura wytłaczanego tworzywa a w drugiej kolejności moc dodatkowej płyty grzewczej. Uzyskane wyniki dowodzą, że przez odpowiedni dobór parametrów drukowania, technologia drukowania 3D FDM z dodatkową płytą grzewczą pozwala prawie dwukrotnie zwiększyć naprężenia niszczące więź międzywarstwową kompozytu PEEK z włóknem węglowym.

Analiza wszystkich badań zrealizowanych w ramach niniejszej pracy dowodzi, że słuszną jest teza pracy, gdyż wszystkie opracowane modyfikacje techniki druku FDM, w połączeniu z optymalizacją parametrów procesu drukowania, pozwoliły znacząco poprawić więź międzywarstwową produktów drukowanych z trudnych technologicznie kompozytów polimerowych.

## **6. WNIOSKI KOŃCOWE**

### **Wnioski poznawcze**

1. Wyniki przeprowadzonych badań porównawczych oraz analiza merytoryczna i statystyczna uzyskanych wyników badań mechanicznych jednoznacznie wskazują, że zastosowanie opracowanych modyfikacji technologii druku 3D FDM (Fused Deposition Modelling) pozwala istotnie zwiększyć więź międzywarstwową produktów drukowanych z tworzyw i kompozytów polimerowych. **Tym samym udowodniono słusność tezy pracy sformułowanej w podsumowaniu studium literaturowego.**
2. Największe wartości wytrzymałości międzywarstwowej uzyskano w technologii druku z dodatkową płytą grzejącą.
3. Wyniki badań porównawczych próbek wytworzonych w technologii druku z dodatkowym źródłem ciepła w postaci promienia laserowego uzyskano poprawę więzi międzywarstwowej dla tworzyw takich jak PAHT CF15 i PET CF.

4. W technologii druku z wykorzystaniem głowicy rotującej uzyskano poprawę więzi międzywarstwowej dla tworzyw takich jak PAHT CF15, PET CF i PP GF.
5. W technologii druku z wykorzystaniem promieniowania laserowego i głowicy rotującej uzyskano poprawę więzi międzywarstwowej dla tworzyw takich jak PAHT CF15 i PET CF.
6. Zastosowanie dodatkowej płyty grzewczej pozwoliło na istotne zwiększenie więzi międzywarstwowej dla tworzywa bardzo trudnego do druku metodą FDM jakim jest kompozyt poli(etero etero ketonu) z dodatkiem mielonego włókna węglowego.
7. Wykorzystanie metod planowania badań eksperymentalnych i statystycznej analizy wyników pozwoliło na znaczne ograniczenie programu badawczego oraz na wyznaczenie funkcji obiektu badań wiążącej wytrzymałość międzywarstwową z parametrami technologicznymi procesu drukowania 3D.
8. Analiza funkcji obiektu badań poparta graficznymi jej obrazami w postaci wykresów przestrzennych pozwala stwierdzić, że w technologii druku z dodatkową, górną płytą grzejną największy wpływ na wytrzymałość międzywarstwową ma dodatkowa płyta grzewcza. Zwiększenie temperatury wytłaczanego tworzywa i mocy dodatkowej górnej płyty grzewczej powoduje wzrost wytrzymałości międzywarstwowej.
9. Przedstawione wyniki dowodzą, że przez odpowiedni dobór parametrów drukowania, technologia drukowania 3D FDM z płytą grzejną pozwala prawie dwukrotnie zwiększyć naprężenia niszczące więź międzywarstwową.
10. Wyniki analizy statystycznej i merytorycznej pokazują, że poprawnie dobrano zestaw kluczowych dla wartości naprężeń niszczących parametry technologiczne jako zmienne niezależne w programie badań.
11. Analiza merytoryczna wyników badań pozwoliła wskazać fizyczne podstawy obserwowanych zależności eksperymentalnych.

### **Wnioski użyteczne**

12. Wszystkie opracowane modyfikacje druku FDM mogą znaleźć praktyczne wykorzystanie przemysłowe.
13. Opracowane konstrukcje drukarek prototypowych mogą stać się podstawą do wytwarzania drukarek komercyjnych.

14. Wyniki badań porównawczych a szczególnie opracowany model eksperymentalny (funkcja obiektu badań) można wykorzystać w praktyce doboru parametrów drukowania.
15. Opracowanie technologii druku z dodatkową płytą grzejną pozwoliło na uzyskanie patentu (PL 244194 B1)

### **Kierunki dalszych badań**

16. Uzyskane wyniki badań w oparciu o metody planowania eksperymentu wskazują, że korzystne byłoby zastosowanie tych technik również w odniesieniu do pozostałych opracowanych technologii jak również wszystkich innych technik drukowania 3D.
17. Opracowane technologie mogą być w dalszym ciągu rozwijane w kierunku poprawy więzi międzywarstwowej i innych cech eksploatacyjnych.
18. Skonstruowane i wykonane drukarki mogą podlegać dalszym udoskonaleniom celem zwiększenia ich potencjału aplikacyjnego.

## **Spis literatury**

1. **Gibson I., Rosen D., Stucker B.** *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition, Springer New York, New York, NY, 2015. DOI: [10.1007/978-1-4939-2113-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3).
2. **Chua C.K., Leong K.F.** *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications: The 5th Edition of Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 2017. DOI: [10.1142/10200](https://doi.org/10.1142/10200).
3. **Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M.** "Development of Additive Manufacturing Technology." W: *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Cham, 2021.
4. **Izdebska-Podsiadły J.** (red.). *Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics*. Elsevier Science, 2022.
5. **Ligon S.C., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mülhaupt R.** "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing." *Chemical Reviews*, 117 (2017), s. 10212–10290.
6. **Chia H.N., Wu B.M.** "Recent Advances in 3D Printing of Biomaterials." *Journal of Biological Engineering*, 9(4) (2015), art. nr 4. DOI: [10.1186/s13036-015-0001-4](https://doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4).
7. **Berman B.** "3D Printing: The New Industrial Revolution." *Business Horizons*, 55(2) (2012), s. 155–162. DOI: [10.1016/j.bushor.2011.11.003](https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003).
8. **Gebhardt A.** *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Hanser Publishers, 2016. ISBN: 978-1-56990-582-1.
9. **Coogan T.J., Kazmer D.O.** "Bond and Part Strength in Fused Deposition Modeling." *Rapid Prototyping Journal*, 23(2) (2017), s. 414–422.
10. **Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D.** "Additive Manufacturing: A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges." *Composites Part B: Engineering*, 143 (2018), s. 172–196.
11. **Torres J., Coteló J., Karl J., Gordon A.P.** "Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives." *Rapid Prototyping Journal*, 21(4) (2015), s. 451–467.
12. **Valino A.D., Dizon J.R.C., Espera A.H. Jr., Chen Q., Messman J., Advincula R.C.** "Advances in 3D Printing of Thermoplastic Polymer Composites and Nanocomposites." *Progress in Polymer Science*, 98 (2019), art. nr 101162.
13. **Mandolini M., Pradel P., Cicconi P.** *Design for Additive Manufacturing. Methods and Tools*. MDPI, 2022. DOI: [10.3390/books978-3-0365-4926-2](https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-4926-2).
14. **Dies M.L., Blair J.C.** "Design for Additive Manufacturing: FDM Technology and Its Limitations." W: *Additive Manufacturing Handbook*, Elsevier, 2018. ISBN: 978-0-12-811820-5.
15. **Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., et al.** "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering." *Computer-Aided Design*, 69 (2015), s. 65–89.

- 
16. **PN-EN ISO/ASTM 52900:2022-05E.** *Additive Manufacturing — General Principles — Fundamentals and Vocabulary.* Polski Komitet Normalizacyjny, 2022.
17. **Aguilar-Duque J.I., Hernández-Arellano J.L., Avelar-Sosa L., Amaya-Parra G., Tamayo-Pérez U.J.** "Additive Manufacturing: Fused Deposition Modeling Advances." W: García Alcaraz J.L., et al. (red.), *Best Practices in Manufacturing Processes*, Springer, Cham, 2019.
18. **Marchewka J., Laska J.** "Processing of Poly-L-lactide and Poly(L-lactide-co-trimethylene Carbonate) Blends by Fused Filament Fabrication and Fused Granulate Fabrication Using RepRap 3D Printer." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (2020), s. 4933–4944.
19. **Yang L., Hsu K., Baughman B., Godfrey D., Medina F.** "Introduction to Additive Manufacturing." W: *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production.* Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer, Cham, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-55128-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-55128-9_1).
20. **Bourell D., Kruth J.P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A.M., Clare A.** "Materials for Additive Manufacturing." *CIRP Annals*, 66 (2017), s. 659–681.
21. **Kamran M., Saxena A.** "A Comprehensive Study on 3D Printing Technology." *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, 6(2) (2016), s. 63–69.
22. **Wudy K., Lanzl L., Drummer D.** "Selective Laser Sintering of Filled Polymer Systems: Bulk Properties and Laser Beam Material Interaction." *Physics Procedia*, 83 (2016), s. 991–1002.
23. **Valino A.D., Dizon J.R.C., Espera A.H. Jr., Chen Q., Messman J., Advincula R.C.** "Advances in 3D Printing of Thermoplastic Polymer Composites and Nanocomposites." *Progress in Polymer Science*, 98 (2019), art. nr 101162.
24. **Stichel T., Brandl T., Hauser T., Geißler B., Roth S.** "Electrophotographic Multi-Material Powder Deposition for Additive Manufacturing." *Procedia CIRP*, 74 (2018), s. 249–253.
25. **Stichel T., Laumer T., Raths M., Roth S.** "Multi-Material Deposition of Polymer Powders with Vibrating Nozzles for a New Approach of Laser Sintering." *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 13(2) (2018), s. 55–62.
26. **Miyanaji H., Orth M., Akbar J.M., Yang L.** "Process Development for Green Part Printing Using Binder Jetting Additive Manufacturing." *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(4) (2018), s. 504–512.
27. **Ziaee M., Crane N.B.** "Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods." *Additive Manufacturing*, 28 (2019), s. 781–801.
28. **Varotsis A.B.** "Introduction to Binder Jetting 3D Printing." Dostępne na: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/> (dostęp 16 czerwca 2021).
29. **Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R.** "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications." *Procedia Manufacturing*, 35 (2019), s. 1286–1296. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.06.089](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089).
30. **Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollertsen F., Levy G.N.** "Laser Based Additive Manufacturing in Industry and Academia." *CIRP Annals*, 66 (2017), s. 561–583.

- 
31. **Dermeik B., Travitzky N.** "Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials." *Advanced Engineering Materials*, 22(9) (2020), art. nr 2000256. DOI: 10.1002/adem.202000256.
32. **Thakar C.M., Deshmukh S.P., Mulla T.A.** "A Review on Selective Deposition Lamination 3D Printing Technique." *International Journal of Advanced Science Research Engineering Trends*, 4(8) (2019–2020), s. 7–11.
33. **Ziaee M., Crane N.B.** "Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods." *Additive Manufacturing*, 28 (2019), s. 781–801.
34. **Kalaskar D.M.** *3D Printing in Medicine*. Elsevier, 2017.
35. **Bourell D.L., Kruth J.P., Leu M.C., Levy G., Rosen D., Beese A.M., Clare A.** "Materials for Additive Manufacturing." *CIRP Annals*, 66(2) (2017), s. 659–681.
36. **Weaver J.S., Keeney J., Nandwana P., Dehoff R.R.** "Ultrasonic Additive Manufacturing: Advances and Limitations." *Journal of Manufacturing Processes*, 42 (2019), s. 341–350.
37. **Zhai Y., Lados D.A., Lagoy J.L.** "Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation." *JOM*, 66(5) (2014), s. 808–816. DOI: [10.1007/s11837-014-0886-2](https://doi.org/10.1007/s11837-014-0886-2).
38. **Varela C.** "The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing." *3Dnatives*, 2019. Dostępne na: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/> (dostęp 10 września 2019).
39. **Lee J.-Y., An J., Chua C.K.** "Fundamentals and Applications of 3D Printing for Novel Materials." *Applied Materials Today*, 7 (2017), s. 120–133.
40. **Berman B.** "3D Printing: The New Industrial Revolution." *Business Horizons*, 55(2) (2012), s. 155–162.
41. **Upcraft S., Fletcher R.** "The Rapid Prototyping Technologies." *Assembly Automation*, 23(4) (2003), s. 318–330.
42. **Slic3r Documentation.** *Slic3r Manual*. Dostępne na: <https://manual.slic3r.org/>.
43. **Turner B.N., Strong R., Gold S.A.** "A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling." *Rapid Prototyping Journal*, 20(3) (2014), s. 192–204.
44. **Singh S., Prakash C., Ramakrishna S.** "3D Printing of Polyether-Ether-Ketone for Biomedical Applications." *European Polymer Journal*, 114 (2019), s. 234–248. DOI: [10.1016/j.eurpolymj.2019.02.035](https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.035).
45. **Bellini A., Güçeri S.** "Mechanical Characterization of Parts Fabricated Using Fused Deposition Modeling." *Rapid Prototyping Journal*, 9(4) (2003), s. 252–264.
46. **Costa S.F., Duarte F.M., Covas J.A.** "Thermal Conditions Affecting Heat Transfer in FDM/FFE: A Contribution Towards the Numerical Modelling of the Process." *Virtual and Physical Prototyping*, 10(1) (2015), s. 35–46.
47. **Farah S., Anderson D.G., Langer R.** "Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications—A Comprehensive Review." *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107 (2016), s. 367–392.

- 
48. Kurtz S.M. (red.). *PEEK Biomaterials Handbook*. Elsevier, 2019. DOI: [10.1016/C2010-0-66334-6](https://doi.org/10.1016/C2010-0-66334-6).
49. Wang W., Jiang M. "Investigation of Bed Temperature Distribution During FDM Printing Process." W: *2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, 2017, s. 13–16.
50. Bhatia A., Gupta M.K. "A Review on 3D Printing of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Thermoplastic Polymer." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(11) (2020), s. 2228–2237.
51. Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L. "Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters: A Review of Current Research and Future Prospects." *Advances in Manufacturing*, 3(1) (2015), s. 42–53.
52. Fischer G., Schöppner V. "Investigations on the Effects of Process Parameters on the Interlayer Strength of Material Extrusion Parts." *Annual Technical Conference – ANTEC*, 2017, s. 1130–1134.
53. Yardimci M.A., Güçeri S.I. "Conceptual Framework for the Thermal Process Modelling of Fused Deposition." *Rapid Prototyping Journal*, 2(2) (1996), s. 26–31.
54. Wang Y., Shi Y., Huang S.H. "Study of the Influence of Nozzle Diameter on Fused Deposition Modeling Parts." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(9) (2019), s. 1913–1923.
55. Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L. "Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters: A Review of Current Research and Future Prospects." *Advances in Manufacturing*, 3(1) (2015), s. 42–53.
56. Ferretti D., Savastano R. "Optimization of Process Parameters in FDM to Prevent Nozzle Clogging." *Procedia CIRP*, 62 (2017), s. 403–408.
57. Tymrak B.M., Kreiger M., Pearce J.M. "Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions." *Materials & Design*, 58 (2014), s. 242–246.
58. Beniak J., Kačalová M., Pivovarníček P. "Comparison of Direct and Bowden Extruder in Terms of Achievable Print Speed." *MM Science Journal*, 2019(2), s. 2968–2973.
59. Espera A.H. Jr., Dizon J.R.C., Chen Q., Messman J., Advincula R.C. "3D-Printing and Advanced Manufacturing for Electronics." *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3) (2019), s. 245–267.
60. Wang P., Zou B., Xiao H., Ding S., Huang C. "Effects of Extrusion Parameters and Filament Temperature Distribution on the Quality of Extrudate in FDM." *Journal of Materials Processing Technology*, 248 (2017), s. 1–9.
61. Zhang Y., Chou K. "Three-Dimensional Finite Element Analysis Simulations of the Fused Deposition Modeling Process." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(8) (2008), s. 959–968.
62. Li L., Sun Q., Bellehumeur C., Gu P. "Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties." *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2) (2002), s. 129–141.

63. **McIlroy C., Olmsted P.D.** "Disentanglement Effects on Welding Behaviour of Polymer Melts During the Fused-Filament-Fabrication Method for Additive Manufacturing." *Polymer*, 123 (2017), s. 376–391.
64. **Stabik J.** *Wybrane Problemy Reologii Uplastycznionych Polimerów Napętnionych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2004.
65. **Seppala J.E., Migler K.D.** "Infrared Thermography of Welding Zones Produced by Polymer Extrusion Additive Manufacturing." *Additive Manufacturing*, 12 (2016), s. 71–76.
66. **Yang F., Pitchumani R.** "Healing of Thermoplastic Polymers at an Interface Under Nonisothermal Conditions." *Macromolecules*, 35(8) (2002), s. 3213–3224.
67. **Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., et al.** "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering." *Computer-Aided Design*, 69 (2015), s. 65–89.
68. **Ultimaker Cura Documentation.** *Ultimaker Cura Manual*. Dostępne na: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011811940-Ultimaker-Cura-manual>.
69. **Prusa J.** "Printing Complex Models with Supports." *Prusa Knowledge Base*, 2018. Dostępne na: [https://help.prusa3d.com/en/article/printing-complex-models-with-supports\\_1687](https://help.prusa3d.com/en/article/printing-complex-models-with-supports_1687).
70. **Autodesk.** *Netfabb Additive Manufacturing Software*. Dostępne na: <https://www.autodesk.com/products/netfabb/overview>.
71. **Smith P.** "Limitations of Basic 3D Printer Control Software." *Journal of 3D Printing Technologies*, 4(2) (2017), s. 45–52.
72. **Galantucci L.M., Lavecchia F., Percoco G.** "Experimental Study Aiming to Enhance the Surface Finish of Fused Deposition Modeled Parts." *CIRP Annals*, 58(1) (2009), s. 189–192.
73. **Rao Y.N., Liu H., Singh R.K.** "Optimization of Process Parameters of Fused Deposition Modelling for Improved Part Quality." *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 5(4) (2015), s. 75–86.
74. **Ultimaker.** *Material Technical Data Sheets*. Dostępne na: <https://ultimaker.com>.
75. **Simplify3D Documentation.** "Configuring Your Printer Settings." Dostępne na: <https://www.simplify3d.com/support/articles>.
76. **Kulkarni P., Dutta D.** "An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing." *Computer-Aided Design*, 28(9) (1996), s. 683–697.
77. **Brajlih T., Valásek P., Drstvenšek I.** "Speed and Accuracy Evaluation of Additive Manufacturing Machines." *Rapid Prototyping Journal*, 19(5) (2013), s. 575–583.
78. **Panda B.N., Leite M., Reiter L., Menezes M., Wei L., Yang M.B.** "Shrinkage and Warpage Minimization of Bio-Based Polymer Printed Parts Using Response Surface Methodology." *Procedia Manufacturing*, 26 (2018), s. 942–950.
79. **Pérez A.R.T., Roberson D.A., Wicker R.B.** "Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials." *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 15(1) (2015), s. 79–85.



80. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D. "3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective." *Composites Part B: Engineering*, 110 (2017), s. 442–458.
81. Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M., Duty C.E., Love L.J., Naskar A.K., Blue C.A., Ozcan S. "Highly Oriented Carbon Fiber–Polymer Composites via Additive Manufacturing." *Composites Science and Technology*, 105 (2014), s. 144–150.
82. Tao Y., Liu H., Chen Y., Xu P., Yu T. "Preparation and Properties of PLA/TiO<sub>2</sub> Composite Filament for 3D Printing." *Applied Sciences*, 7(12) (2017), art. nr 1285.
83. Auras R., Harte B., Selke S. "An Overview of Polylactides as Packaging Materials." *Macromolecular Bioscience*, 4(9) (2004), s. 835–864.
84. Drumright R.E., Gruber P.R., Henton D.E. "Polylactic Acid Technology." *Advanced Materials*, 12(23) (2000), s. 1841–1846.
85. Stefaniak A.B., LeBouf R.F., Duling M.G., Yi J., Abukabda A.B., McBride C.R., Nurkiewicz T.R. "Inhalation Exposure to Three-Dimensional Printer Emissions Stimulates Acute Hypertension and Microvascular Dysfunction." *Toxicology and Applied Pharmacology*, 363 (2019), s. 1–8.
86. Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J. "Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques." *Journal of Manufacturing Processes*, 21 (2016), s. 39–45.
87. Wang T.M., Xi J.T., Jin Y. "A Model Research for Prototype Warp Deformation in the FDM Process." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(11–12) (2007), s. 1087–1096.
88. Guo N., Leu M.C. "Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs." *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3) (2013), s. 215–243.
89. Singh R. "Biomedical Applications of Additive Manufacturing: Present and Future." *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2 (2017), s. 105–115.
90. Steinle P., Turner W.A., Perry J.L. "Short-Term Air Monitoring of Volatile Organic Compounds and Particulate Matter Emissions from a Desktop 3D Printer." *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(2) (2016), s. 121–132.
91. Azimi P., Zhao D., Pouzet C., Crain N.E., Stephens B. "Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments." *Environmental Science & Technology*, 50(3) (2016), s. 1260–1268.
92. Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciú F., Marinescu R. "FDM Process Parameters Influence Over the Mechanical Properties of Polymer Specimens: A Review." *Polymer Testing*, 69 (2018), s. 157–166.
93. Yang F., Zhang M., Zhang Z. "Mechanical Properties of PETG Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling." *Advanced Materials Research*, 1143 (2017), s. 205–209.
94. Prusa Research. "PETG Filament." Dostępne na: <https://www.prusa3d.com/>.
95. Beniak J., Kačalová M., Pivovarníček P. "Comparison of Mechanical Properties of Specimens Printed from Different Materials by FDM Method." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 566 (2019), art. nr 012023.

- 
96. **Eastman Chemical Company.** "Eastman Amphora™ 3D Polymer." Dostępne na: <https://www.eastman.com/>.
97. **Stratasys Ltd.** "Nylon 12 Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
98. **Kowalski J., Nowak A.** *Polimery w Inżynierii*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2019. ISBN: 978-83-7880-xxxx.
99. **PolyMaker.** "PolyMide™ PA6-CF." Dostępne na: <https://polymaker.com/>.
100. **Lan L., Liu J.** "Hygroscopic Behavior of Nylon-6/Clay Nanocomposites." *Journal of Applied Polymer Science*, 133(15) (2016), art. nr 43210.
101. **Bahr D., Skiba J., Meeks R.** "Mechanical Properties of Polycarbonate Specimens Fabricated Using Additive Manufacturing." *Additive Manufacturing*, 22 (2018), s. 12–19.
102. **Stratasys Ltd.** "PC Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
103. **Kim S., Love L.J., Kunc V., Lindahl J., Blue C.A.** "Structural Analysis of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials." *Rapid Prototyping Journal*, 23(2) (2017), s. 344–352.
104. **Prusa Research.** "Polycarbonate (PC) Filament." Dostępne na: <https://www.prusa3d.com/>.
105. **Wysocki M., Mruk A., Idźkowski A., Rozmus M.** "Effects of UV Radiation on Mechanical Properties of Polymer Composites Manufactured by FDM." *Composites Theory and Practice*, 18(2) (2018), s. 85–89.
106. **Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R.** "Fused deposition modeling with polypropylene." *Materials & Design*, 83 (2015), s. 768–776.
107. **Strong A.B.** *Plastics: Materials and Processing*. 3rd ed., Prentice Hall, 2006.
108. **Vahabi H., Saeb M.R., Boccardo L.** "Polypropylene and its nanocomposites for 3D printing: A review on synthesis, properties, and future perspectives." *Journal of Applied Polymer Science*, 137(12) (2020), art. nr 48574.
109. **Feng X., Wang L., Wang K., Chen L., Zhang Q.** "Mechanical and thermal properties of PC/ABS blends for fused deposition modeling." *Journal of Applied Polymer Science*, 134(30) (2017), art. nr 45131.
110. **Stratasys Ltd.** "PC-ABS Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
111. **Kim H.S., Yu J.H., Kim S.J.** "Comparison of thermal and mechanical properties of PC, ABS, and PC/ABS blends for automotive applications." *Journal of Applied Polymer Science*, 110(4) (2008), s. 2453–2459.
112. **Byun H.S., Lee K.H.** "Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1) (2006), s. 69–80.
113. **MakerBot Support.** "HIPS Filament Guide." Dostępne na: <https://support.makerbot.com/>.
114. **Rane K., Walunj A.** "Use of HIPS as a soluble support material in additive manufacturing." *Materials Today: Proceedings*, 5(2) (2018), s. 3875–3884.

115. **Yang Y., Chen Y., Wei Y., Li Y., Jia Z.** "UV-resistant ASA materials for fused deposition modeling technology." *Materials Science Forum*, 898 (2017), s. 2130–2135.
116. **Stratasys Ltd.** "ASA Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
117. **McKeen L.W.** *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers*. 3rd ed., William Andrew Publishing, 2014.
118. **Prusa Research.** "ASA Filament Guide." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
119. **Liu T., Wang J., Huang B.** "Mechanical properties of ASA materials in additive manufacturing." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394 (2018), art. nr 022024.
120. **Singh R., Singh S.** "Applications of additive manufacturing in the automotive industry: A review." *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(1) (2016), s. 115–129.
121. **FilamentPM.** "PCTG Filament Datasheet." Dostępne na: <https://www.filamentpm.com/>.
122. **Giri J., Singh A.K.** "Investigations on mechanical properties of PCTG parts fabricated by fused deposition modeling." *Materials Today: Proceedings*, 26 (2020), s. 2001–2005.
123. **Saroja R., Prema Kumar N.** "Application of PCTG in medical devices and packaging: A review." *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 6(1) (2019), s. 425–430.
124. **Polymer Technology.** "Properties and applications of PCTG polymer." Dostępne na: <https://www.polymerotechnology.com/>.
125. **Chien W., Yeh H.** "3D printing of thermoplastic elastomers: Materials and applications." *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 1(1) (2018), s. 20–25.
126. **Mark J.E.** (red.). *Physical Properties of Polymers Handbook*. 2nd ed., Springer, 2007.
127. **Ligon S.C., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mülhaupt R.** "Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing." *Chemical Reviews*, 117(15) (2017), s. 10212–10290.
128. **Stansbury J.W., Idacavage M.J.** "3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities." *Dental Materials*, 32(1) (2016), s. 54–64.
129. **Prusa Research.** "TPU Filament Guide." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
130. **Yang T., Liu T., Zhang M., Li D.** "Mechanical properties of glass fiber reinforced polypropylene parts fabricated by fused deposition modeling." *Materials Science and Engineering: A*, 701 (2017), s. 341–349.
131. **Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R.** "Fused deposition modeling with polypropylene." *Materials & Design*, 83 (2015), s. 768–776.
132. **Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S.** "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling." *Composites Part B: Engineering*, 80 (2015), s. 369–378.
133. **Li N., Li Y., Liu S.** "Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing." *Journal of Materials Processing Technology*, 238 (2016), s. 218–225.

134. **Brenken B., Barocio E., Favaloro A., Kunc V., Pipes R.B.** "Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review." *Additive Manufacturing*, 21 (2018), s. 1–16.
135. **Zhong W., Li F., Zhang Z., Song L., Li Z.** "Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling." *Materials Science and Engineering: A*, 301(2) (2001), s. 125–130.
136. **Kim H., Park J., Hahn H.T.** "Improvement of bonding strength in carbon fiber reinforced thermoplastic composites using conductive heating and pressure." *Composite Structures*, 116 (2014), s. 219–225.
137. **Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J.** "Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties." *Composites Science and Technology*, 181 (2019), art. nr 107688.
138. **Yang Y., Chen Y., Wei Y., Li Y., Jia Z.** "3D printing of polyetherimide parts via fused deposition modeling: Effect of the rheological behavior on processability." *Journal of Applied Polymer Science*, 134(48) (2017), art. nr 45469.
139. **Cicala G., Ognibene G., Portuesi S., Tosto C., Blanco I., Scialabba C., Latteri A.** "Comparison of Ultem® 9085 used in fused deposition modelling (FDM) with polyetherimide blends." *Materials*, 11(10) (2018), art. nr 1952.
140. **Duty C.E., Failla J., Kim S., Smith R., Lind R.** "Advanced materials for fused deposition modelling of high-temperature polymers." *International SAMPE Technical Conference*, 48 (2017).
141. **Vaezi M., Seitz H., Yang S.** "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8) (2013), s. 1721–1754.
142. **Deng H., Lin L., Ji X., Gao Y., Li D.** "Microstructure and mechanical properties of PEEK materials in FDM 3D printing." *Rapid Prototyping Journal*, 25(9) (2019), s. 1622–1630.
143. **Schöbel J., Weise M., Wirth T., Eyerer P.** "Processing of PEEK materials: Melt stabilisation and crystallisation behaviour." *Polymer Testing*, 44 (2015), s. 234–243.
144. **Berretta S., Evans K.E., Ghita O.R.** "Processability of PEEK, a new polymer for high temperature laser sintering (HT-LS)." *European Polymer Journal*, 68 (2015), s. 243–266.
145. **Bartolo P.J., Chua C.K., Almeida H.A., Chou S.M., Lim A.S.** "Biomanufacturing for tissue engineering: Present and future trends." *Virtual and Physical Prototyping*, 7(2) (2012), s. 73–86.
146. **Wang P., Zou B., Xiao H., Ding S., Huang C.** "Preparation and properties of PEEK reinforced with carbon fibers for FDM 3D printing." *Materials & Design*, 95 (2016), s. 54–58.
147. **Kemmish D.J.** *Update on the Technology and Applications of Polyaryletherketones*. Smithers Rapra Technology, 2017.
148. **Stein J., Lewis D.A., Peddada S.V.** "Evaluation of chemical resistance of PEEK and its composites." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(2) (2018), s. 720–726.
149. **Galetz M.C., Herold N.** "Flammability and thermal decomposition of PEEK composites for aerospace application." *Journal of Fire Sciences*, 29(1) (2011), s. 25–43.

150. **Geng P., Zhao J., Wu W., Ye W., Wang Y., Wang S., Zhang S.** "Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament." *Journal of Manufacturing Processes*, 37 (2019), s. 266–273.
151. **Stano K.L., Schirmer M.** "The use of polyetheretherketone (PEEK) in aerospace applications." *High Performance Polymers*, 25(1) (2013), s. 98–106.
152. **Berretta S., Davies R., Ghita O.R.** "Large-scale additive manufacturing of PEEK-based composites." *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(10) (2016), s. 1375–1394.
153. **Schöberl J., Riedl M., Nitzl C., Pinter G.** "Fatigue behavior of carbon fiber reinforced PEEK manufactured by fused filament fabrication." *Engineering Fracture Mechanics*, 205 (2019), s. 246–253.
154. **Seppala J.E., Han S., Hillgartner K.E., Davis C.S., Migler K.B.** "Weld formation during material extrusion additive manufacturing." *Soft Matter*, 13(38) (2017), s. 6761–6769.
155. **Stratasys Ltd.** "Antero 800NA (PEKK) Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
156. **Yang C., Tian X., Liu T., Cao Y., Li D., Zhang X.** "Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material." *Journal of Materials Processing Technology*, 248 (2017), s. 1–7.
157. **Vaezi M., Yang S.** "Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications." *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3) (2015), s. 123–135.
158. **Pickering K.L., Efendy M.G., Le T.M.** "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83 (2016), s. 98–112.
159. **Ensinger GmbH.** "PPS (Polyphenylene Sulfide) Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.ensingerplastics.com/>.
160. **Matsuura T., Okamoto K.** "Applications of PPS in the automotive industry." *Journal of Plastics Technology*, 14(3) (2018), s. 183–190.
161. **Rosato D.V.** *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*. Elsevier, 2000.
162. **Chien W., Yeh H.** "3D printing of high-performance polyoxymethylene (POM) polymer via a customized open-material printer." *Materials*, 11(12) (2018), art. nr 2250.
163. **MatWeb Material Property Data.** "Polyoxymethylene (POM) Properties." Dostępne na: <https://www.matweb.com/>.
164. **Chien W., Yeh H.** "3D printing of high-performance polyoxymethylene (POM) polymer via a customized open-material printer." *Materials*, 11(12) (2018), art. nr 2250.
165. **Kuo W.S., Chang C.P.** "Characterization of POM and its applications in engineering." *Journal of Polymer Engineering*, 31(2–3) (2011), s. 101–108.
166. **Holschuh B., Newman D.** "A redundant safety actuator for use in membrane-based spacesuits." *Acta Astronautica*, 115 (2015), s. 323–331.

167. **Chien W., Yeh H.** "3D printing of high-performance polyoxymethylene (POM) polymer via a customized open-material printer." *Materials*, 11(12) (2018), art. nr 2250.
168. **Occupational Safety and Health Administration (OSHA).** "Formaldehyde." Dostępne na: <https://www.osha.gov/>.
169. **MakerBot Support.** "Safety Guidelines for 3D Printing." Dostępne na: <https://support.makerbot.com/>.
170. **Drake J.R., Ginder R.S.** "High performance thermoplastics for aerospace applications." *SAMPE Journal*, 40(2) (2004), s. 6–12.
171. **Solvay Specialty Polymers.** "Torlon® PAI Design Guide." Dostępne na: <https://www.solvay.com/>.
172. **McGrath J.E., Morgan R.J.** (red.). *Advances in Polyimide: Science and Technology*. Springer, 1987.
173. **Naylor G.R., Lye W.** "High-temperature polymers for advanced aerospace applications." *Polymer International*, 47(3) (1998), s. 203–208.
174. **Kranbuehl D.E., Delos S.** "Radiation resistance of high performance polymers." *Radiation Physics and Chemistry*, 46(2) (1995), s. 235–241.
175. **Solvay Specialty Polymers.** "Torlon® PAI Properties." Dostępne na: <https://www.solvay.com/>.
176. **Ventola C.L.** "Medical applications for 3D printing: Current and projected uses." *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10) (2014), s. 704–711.
177. **Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligh H., Zechmann C.M., Unterhinninghofen R., Kauczor H.U., Giesel F.L.** "3D printing based on imaging data: Review of medical applications." *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(4) (2010), s. 335–341.
178. **Murphy S.V., Atala A.** "3D bioprinting of tissues and organs." *Nature Biotechnology*, 32(8) (2014), s. 773–785.
179. **Martelli N., Serrano C., van den Brink H., Pineau J., Prognon P., Borget I., El Batti S.** "Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review." *Surgery*, 159(6) (2016), s. 1485–1500.
180. **Rybicki F.J., Grant G.T.** (red.). *3D Printing in Medicine: A Practical Guide for Medical Professionals*. Springer, 2017.
181. **Kurtz S.M., Devine J.N.** "PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants." *Biomaterials*, 28(32) (2007), s. 4845–4869.
182. **Ma R., Tang T.** "Current strategies to improve the bioactivity of PEEK." *International Journal of Molecular Sciences*, 15(4) (2014), s. 5426–5445.
183. **Toth J.M., Wang M., Estes B.T., Scifert J.L., Seim H.B. III, Turner A.S.** "Polyetheretherketone as a biomaterial for spinal applications." *Biomaterials*, 27(3) (2006), s. 324–334.
184. **Shalash M.A., Rahmanian-Schwarz A., Nair A., Schenck T.L., Sauerbier S.** "Patient-specific implants (PSI) in reconstruction of orbital floor and wall fractures." *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 12(4) (2013), s. 382–386.

185. **Mohsin S., Zaman M., Jalil A., Shah M., Iqbal Z.** "PEEK biomedical implants: A review of the manufacturing techniques and properties." *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 51 (2015), s. 241–255.
186. **Han C.M., Lee E.J., Kim H.E., Koh Y.H., Kim K.N.** "The electron beam deposition of titanium on polyetheretherketone (PEEK) for enhanced osseointegration." *Biomaterials*, 31(13) (2010), s. 3465–3470.
187. **Evans N.T., Torstrick B., Lee C.S., Dupont K.M., Safranski D.L., Chang W.A., Gall K.** "High-strength, surface-porous polyetheretherketone for load-bearing orthopedic implants." *Acta Biomaterialia*, 13 (2015), s. 159–167.
188. **Yu S., Hariram K.P., Kumar R., Cheang P., Khor K.A.** "In vitro apatite formation and its growth kinetics on hydroxyapatite/polyetheretherketone biocomposites." *Biomaterials*, 26(15) (2005), s. 2343–2352.
189. **Wang L., Weng L.** "A novel bioactive polyetheretherketone/nano-hydroxyapatite composite with antibacterial activity." *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 102(1) (2014), s. 36–43.
190. **Lee W.T., Koak J.Y., Lim Y.J., Kim S.K., Kwon H.B., Kim M.J., Kim Y.S.** "Stress shielding and fatigue limits of poly-ether-ether-ketone dental implants." *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100(4) (2012), s. 1044–1052.
191. **Yu Y., Wang X., Li D., Zhang Q., Sun X.** "3D printing of PEEK implant: Feasibility, design and characteristics." *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 51 (2015), s. 250–259.
192. **Middleton J.C., Tipton A.J.** "Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices." *Biomaterials*, 21(23) (2000), s. 2335–2346.
193. **Dhandayuthapani B., Yoshida Y., Maekawa T., Kumar D.S.** "Polymeric scaffolds in tissue engineering application: A review." *International Journal of Polymer Science*, 2011 (2011), art. nr 290602.
194. **Hutmacher D.W.** "Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage." *Biomaterials*, 21(24) (2000), s. 2529–2543.
195. **Sun H., Mei L., Song C., Cui X., Wang P.** "The in vivo degradation, absorption and excretion of PCL-based implant." *Biomaterials*, 27(9) (2006), s. 1735–1740.
196. **Ikada Y., Tsuji H.** "Biodegradable polyesters for medical and ecological applications." *Macromolecular Rapid Communications*, 21(3) (2000), s. 117–132.
197. **Athanasίου K.A., Agrawal C.M., Barber F.A., Burkhart S.S.** "Orthopaedic applications for PLA-PGA biodegradable polymers." *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 14(7) (1998), s. 726–737.
198. **Frazza E.J., Schmitt E.E.** "A new absorbable suture." *Journal of Biomedical Materials Research*, 5(2) (1971), s. 43–58.
199. **Katz A.R.** "Biodegradable polymers in clinical use and clinical development." *Journal of Polymers and the Environment*, 16(3) (2008), s. 213–230.

200. **Suwantong O.** "Biomedical applications of electrospun polycaprolactone fiber mats." *Polymers for Advanced Technologies*, 27(10) (2016), s. 1264–1273.
201. **Shinoka T., Ma P.X., Shum-Tim D., Breuer C.K., Cusick R.A., Zund G., Vacanti J.P.** "Tissue-engineered heart valves. Autologous valve leaflet replacement study in a lamb model." *Circulation*, 94(9 Suppl) (1996), s. II164–II168.
202. **Lu L., Peter S.J., Lyman M.D., Lai H.L., Leite S.M., Tamada J.A., Mikos A.G.** "In vitro and in vivo degradation of porous poly(dl-lactic-co-glycolic acid) foams." *Biomaterials*, 21(18) (2000), s. 1837–1845.
203. **Biondi M., Ungaro F., Quaglia F., Netti P.A.** "Controlled drug delivery in tissue engineering." *Advanced Drug Delivery Reviews*, 60(2) (2008), s. 229–242.
204. **Makadia H.K., Siegel S.J.** "Poly lactic-co-glycolic acid (PLGA) as biodegradable controlled drug delivery carrier." *Polymers*, 3(3) (2011), s. 1377–1397.
205. **Freiberg S., Zhu X.X.** "Polymer microspheres for controlled drug release." *International Journal of Pharmaceutics*, 282(1–2) (2004), s. 1–18.
206. **Alexis F.** "Factors affecting the degradation and drug-release mechanism of poly(lactic acid) and poly((lactic acid)-co-(glycolic acid))." *Polymer International*, 54(1) (2005), s. 36–46.
207. **Anderson J.M., Shive M.S.** "Biodegradation and biocompatibility of PLA and PLGA microspheres." *Advanced Drug Delivery Reviews*, 28(1) (1997), s. 5–24.
208. **Woodruff M.A., Hutmacher D.W.** "The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century." *Progress in Polymer Science*, 35(10) (2010), s. 1217–1256.
209. **Dash T.K., Konkimalla V.B.** "Poly-ε-caprolactone based formulations for drug delivery and tissue engineering: A review." *Journal of Controlled Release*, 158(1) (2012), s. 15–33.
210. **Sobral J.M., Caridade S.G., Sousa R.A., Mano J.F., Reis R.L.** "Three-dimensional plotted scaffolds with controlled pore size gradients: Effect of scaffold geometry on mechanical performance and cell seeding efficiency." *Acta Biomaterialia*, 7(3) (2011), s. 1009–1018.
211. **Zein I., Hutmacher D.W., Tan K.C., Teoh S.H.** "Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications." *Biomaterials*, 23(4) (2002), s. 1169–1185.
212. **Lam C.X., Mo X.M., Teoh S.H., Hutmacher D.W.** "Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer." *Materials Science and Engineering: C*, 20(1–2) (2002), s. 49–56.
213. **Park J., Lakes R.S.** *Biomaterials: An Introduction*. 3rd ed., Springer, 2007.
214. **Sun H., Mei L., Song C., Cui X., Wang P.** "The in vivo degradation, absorption and excretion of PCL-based implant." *Biomaterials*, 27(9) (2006), s. 1735–1740.
215. **Ribeiro A.S., Zhao Y., Zhang Y.** "Biodegradable polymeric nanofibers: An overview." *Polymers for Advanced Technologies*, 26(7) (2015), s. 676–686.
216. **Ramakrishna S., Mayer J., Wintermantel E., Leong K.W.** "Biomedical applications of polymer-composite materials: A review." *Composites Science and Technology*, 61(9) (2001), s. 1189–1224.



217. **Zhang K., Wang Y., Hillmyer M.A., Francis L.F.** "Processing and properties of porous poly(L-lactide)/bioactive glass composites." *Biomaterials*, 25(13) (2004), s. 2489–2500.
218. **Wu X., Liu X., Wei J., Ma J., Deng F., Wei S., Deng Y.** "Nano-TiO<sub>2</sub>/PEEK bioactive composite as a bone substitute material: In vitro and in vivo studies." *International Journal of Nanomedicine*, 7 (2012), s. 1215–1225.
219. **Yao Q., Noeaid P., Roether J.A., Dong Y., Zhang Q., Boccaccini A.R.** "Bioglass®-based scaffolds incorporating polycaprolactone and chitosan coatings for controlled vancomycin delivery." *Ceramics International*, 39(7) (2013), s. 7517–7522.
220. **Bibb R., Eggbeer D., Paterson A.** "Medical modelling: The application of advanced design and rapid prototyping techniques in medicine." *Medical Engineering & Physics*, 37(11) (2015), s. 1038–1045.
221. **Li Z., Li Z., Xu R., Li M., Sun H., Chen Y.** "3D printing-based simulation for surgical training." *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 29(3) (2018), art. nr 40.
222. **Lal H., Patralekh M.K., Madhuripan N., Agarwal U., Mittal S.** "3D printing and its applications in orthopaedic trauma: A technological marvel." *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 10(6) (2019), s. 1007–1012.
223. **Chae M.P., Rozen W.M., McMenamin P.G., Findlay M.W., Spychal R.T., Hunter-Smith D.J.** "Emerging applications of bedside 3D printing in plastic surgery." *Frontiers in Surgery*, 2 (2015), art. nr 25.
224. **Witowski J., Sitkowski M., Zuzak T., Coles-Black J., Chuen J., Major P., Budzyński A.** "From ideas to long-term studies: 3D printing clinical trials review." *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 13(9) (2018), s. 1473–1478.
225. **Rengier F., Mehndiratta A., von Tengg-Kobligk H., Zechmann C.M., Unterhinninghofen R., Kauczor H.U., Giesel F.L.** "3D printing based on imaging data: Review of medical applications." *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(4) (2010), s. 335–341.
226. **Klein G.T., Lu Y., Wang M.Y.** "3D printing and neurosurgery—ready for prime time?" *World Neurosurgery*, 80(3–4) (2013), s. 233–235.
227. **Wohlert T., Caffrey T.** *Wohlert Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohlert Associates, 2015.
228. **Singh S., Singh G., Prakash C.** "Fused deposition modelling—A state of the art review and future applications." *Composites Part B: Engineering*, 115 (2017), s. 126–149.
229. **Espalin D., Ramirez J.A., Medina F., Wicker R.B.** "Multi-material, multi-technology FDM: Exploring build process variations." *Rapid Prototyping Journal*, 20(3) (2014), s. 236–244.
230. **Ultimaker.** "PVA Material Technical Data Sheet." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
231. **Kumar S., Kruth J.P.** "Composites by rapid prototyping technology." *Materials & Design*, 31(2) (2010), s. 850–856.
232. **Lieu D.K., Sorby S.A.** *Visualization, Modeling, and Graphics for Engineering Design*. Cengage Learning, 2015.

- 
233. **Sculpteo**. "BVOH Material Guide." Dostępne na: <https://www.sculpteo.com/>.
234. **BASF**. "Ultrafuse® BVOH." Dostępne na: <https://www.basf.com/>.
235. **BCN3D**. "BVOH Technical Data Sheet." Dostępne na: <https://www.bcn3d.com/>.
236. **3D Printing Industry**. "BVOH vs PVA: Which Support Material Should You Use?" Dostępne na: <https://3dprintingindustry.com/>.
237. **Raise3D**. "BVOH Support Filament." Dostępne na: <https://www.raise3d.com/>.
238. **Stoof D., Pickering K.** "Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene." *Composites Part B: Engineering*, 117 (2017), s. 26–34.
239. **Techshot**. "Wood-filled PLA Filament." Dostępne na: <https://www.techshot.com/>.
240. **Mazzanti V., Malagutti L., Mollica F.** "FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties." *Materials*, 12(7) (2019), art. nr 1056.
241. **Filamentive**. "Wood PLA Filament Guide." Dostępne na: <https://www.filamentive.com/>.
242. **Yang T., Li D., Liu J., Li L., Yu T.** "Preparation and properties of wood flour-filled polylactic acid composite filament for 3D printing." *Materials*, 10(5) (2017), art. nr 476.
243. **Materio3D**. "Wood PLA Technical Data Sheet." Dostępne na: <https://www.materio3d.com/>.
244. **Proto-Pasta**. "Metal-Filled Filaments." Dostępne na: <https://www.proto-pasta.com/>.
245. **3D Matter**. "Mechanical Properties of Metal-Filled PLA." Dostępne na: <https://my3dmatter.com/>.
246. **Leigh S.J., Bradley R.J., Purcell C.P., Billson D.R., Hutchins D.A.** "A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors." *PLoS ONE*, 7(11) (2012), e49365.
247. **Rao Y., Wang H., Gu F., Zhang X.** "Fabrication and characterization of metal-filled polylactic acid composites for 3D printing applications." *Materials Research Express*, 6(8) (2019), art. nr 085334.
248. **The Virtual Foundry**. "Filamet™ Stainless Steel 316L." Dostępne na: <https://www.thevirtualfoundry.com/>.
249. **Singh S., Singh G., Prakash C., Ramakrishna S., Penna R.** "Additive manufacturing of stainless steel alloys for customized medical devices: Recent developments and challenges." *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 13 (2020), s. 49–56.
250. **Basit A., Lockett H., Cooper G.** "Post-processing methods to improve surface finish of parts produced by fused deposition modeling." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9–12) (2019), s. 3891–3900.
251. **3D Printing Industry**. "Metal Filament 3D Printing Guide." Dostępne na: <https://3dprintingindustry.com/>.
252. **Yang T., Li D., Liu J., Li L., Yu T.** "Preparation and properties of ceramic-filled PLA composite filament for 3D printing of investment casting shells." *Materials*, 10(9) (2017), art. nr 1040.
253. **Ultimaker**. "CPE+ Material Technical Data Sheet." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
254. **ColorFabb**. "XT-Ceramic Filament." Dostępne na: <https://colorfabb.com/>.

255. **Kumar S., Kruth J.P.** "Composites by rapid prototyping technology." *Materials & Design*, 31(2) (2010), s. 850–856.
256. **Filamentworld.** "Ceramic PLA Filament." Dostępne na: <https://www.filamentworld.de/>.
257. **3DXTech.** "Flexure™ TPU-S." Dostępne na: <https://www.3dxtech.com/>.
258. **Lubrizol.** "Estane® TPU Solutions." Dostępne na: <https://www.lubrizol.com/>.
259. **Szykiedans K., Credo W.** "Mechanical properties of FDM and SLA additive manufactured samples made with TPU Elastomer." *Procedia Engineering*, 136 (2016), s. 257–262.
260. **NinjaTek.** "Cheetah™ TPU Filament." Dostępne na: <https://ninjatek.com/>.
261. **Savandaiah C., Spoerk M., Holzer C., Sapkota J.** "Effects of graphite and carbon black as conductive additives in 3D printed ABS composites." *Macromolecular Materials and Engineering*, 304(3) (2019), art. nr 1800430.
262. **Blackmagic 3D.** "Conductive Graphene PLA Filament." Dostępne na: <https://www.blackmagic3d.com/>.
263. **Taheri Andani M., Dehghani R., Karamooz-Ravari M.R., Mirzaeifar R., Ni J.** "Mechanical and microstructural characterization of 3D printed PLA prepared by fused deposition modeling." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1) (2018), s. 1–8.
264. **Kim H.S., Park J.H., Lee J.S.** "Conductive polylactic acid/polyaniline composites for 3D printing." *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(9) (2016), s. 9539–9543.
265. **Tao G., Xiong Z., Tan H., Yang Q., Liu H.** "Electrically conductive carbon nanotube/ABS composites for fused deposition modeling." *Materials & Design*, 131 (2017), s. 144–150.
266. **Cho H.S., Park C.W., Park J.H.** "Development of conductive ABS nanocomposites for 3D printing applications." *Materials*, 11(4) (2018), art. nr 616.
267. **Yan D., Xu X., Wang X.** "3D printing of conductive polymer composites: A mini-review." *Materials Today*, 20(8) (2017), s. 493–495.
268. **Gnanasekaran K., Heijmans T., van Bennekom S., Woldhuis H., Wijnia S., de With G., Friedrich H.** "3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling." *Applied Materials Today*, 9 (2017), s. 21–28.
269. **Huang W., Fang D., Zhang X., Zhao R.** "Preparation and luminescence properties of photoluminescent PLA filament for 3D printing." *Materials & Design*, 109 (2016), s. 197–204.
270. **Filaments.ca.** "Glow in the Dark Filament: Properties and Applications." Dostępne na: <https://www.filaments.ca/>.
271. **Verbatim.** "Glow in the Dark PLA Filament." Dostępne na: <https://www.verbatim.com/>.
272. **WASP.** "Fluorescent Filament." Dostępne na: <https://www.3dwasp.com/en/>.
273. **Perić M., Vuković M., Kovačević D.** "Photoluminescent properties of polymer materials." *Polymer Testing*, 54 (2016), s. 230–236.

274. **Lendlein A., Kelch S.** "Shape-memory polymers." *Angewandte Chemie International Edition*, 41(12) (2002), s. 2034–2057.
275. **Behl M., Lendlein A.** "Shape-memory polymers." *Materials Today*, 10(4) (2007), s. 20–28.
276. **Hu J., Zhu Y., Huang H., Lu J.** "Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications." *Progress in Polymer Science*, 37(12) (2012), s. 1720–1763.
277. **Meng H., Li G.** "A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites." *Polymer*, 54(9) (2013), s. 2199–2221.
278. **Tibbits S.** "4D printing: Multi-material shape change." *Architectural Design*, 84(1) (2014), s. 116–121.
279. **Momeni F., Liu X., Ni J.** "A review of 4D printing." *Materials & Design*, 122 (2017), s. 42–79.
280. **Raviv D., Zhao W., McKnelly C., et al.** "Active printed materials for complex self-evolving deformations." *Scientific Reports*, 4 (2014), art. nr 7422.
281. **Miao S., Castro N., Nowicki M., Xia L.** "4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration." *Materials Today*, 20(10) (2017), s. 577–591.
282. **Kuang X., Roach D.J., Wu J., Hamel C.M., Ding Z., Wang T., Qi H.J.** "Advances in 4D printing: Materials and applications." *Advanced Functional Materials*, 29(2) (2019), art. nr 1805290.
283. **Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J.** "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection." *Materials & Design*, 124 (2017), s. 143–157.
284. **Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F., Letcher T.** "Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation." *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3) (2016), s. 467–481.
285. **Slic3r.** "Open source 3D printing toolbox." Dostępne na: <http://slic3r.org/>.
286. **Ultimaker.** "Cura – Open source slicing application for 3D printers." Dostępne na: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>.
287. **Cicala G., Ognibene G., Portuesi S., Tosto C., Blanco I., Recca G.** "Polymers for Fused Deposition Modeling in Additive Manufacturing: Current Status and Challenges." W: *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2017, s. 47–68.
288. **Buehler M.J., Xu Z.** "Hydrolytic degradation of polyesters studied by atomistic modeling." *Macromolecules*, 41(24) (2008), s. 9491–9500.
289. **Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K.** "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS." *Rapid Prototyping Journal*, 8(4) (2002), s. 248–257.
290. **Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S.** "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts." *Materials & Design*, 31(1) (2010), s. 287–295.

291. **Fernandez-Vicente M., Calle W., Ferrandiz S., Conejero A.** "Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing." *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3) (2016), s. 183–192.
292. **Torrado Perez A.R., Roberson D.A., Wicker R.B.** "Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of polystyrene materials." *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3) (2014), s. 343–353.
293. **Farahani R.D., Dube M., Therriault D.** "Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites: Manufacturing techniques and applications." *Advanced Materials*, 28(28) (2016), s. 5794–5821.
294. **Bellehumeur C., Li L., Sun Q., Gu P.** "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process." *Journal of Manufacturing Processes*, 6(2) (2004), s. 170–178.
295. **Gurralla P.K., Regalla S.P.** "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling." *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3) (2014), s. 141–149.
296. **Stratasys Ltd.** "Material Specifications." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
297. **Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J.** "Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage." *Journal of Applied Polymer Science*, 136(23) (2019), art. nr 47598.
298. **Reddy N.M., Rao D.N.** "An experimental investigation to study the effect of bed temperature on adhesion of FDM parts." *Materials Today: Proceedings*, 18 (2019), s. 2135–2140.
299. **Prusa Research.** "Printing PLA." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
300. **Stratasys Ltd.** "ABS Material Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
301. **MatterHackers.** "PETG Filament." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
302. **3DXTech.** "PEEK Printing Guide." Dostępne na: <https://www.3dxtech.com/>.
303. **Prusa Research.** "Printing with PLA." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
304. **Stratasys Ltd.** "ABS-M30 Data Sheet." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
305. **MatterHackers.** "PETG Filament Guide." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
306. **3DXTech.** "Polycarbonate Filament Technical Data Sheet." Dostępne na: <https://www.3dxtech.com/>.
307. **Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P.** "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling." *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1–3) (2001), s. 385–388.
308. **Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S.** "Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method." *Materials & Design*, 30(10) (2009), s. 4243–4252.
309. **Dimitrov D., Schreve K., de Beer N.** "Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives." *Rapid Prototyping Journal*, 12(3) (2006), s. 136–147.

310. Sun Q., Rizvi G.M., Bellehumeur C.T., Gu P. "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments." *Rapid Prototyping Journal*, 14(2) (2008), s. 72–80.
311. Wang T., Faraj M., Trifol J., Dong M., Smeets N.M.B. "Influence of crystallinity on the mechanical properties of poly(lactic acid) nanocomposites." *Materials Today Communications*, 15 (2018), s. 344–350.
312. Yao T., Ye J., Chen C., Zhang W., Wang Q., Li H. "Tensile strength optimization of polylactic acid parts fabricated by fused deposition modeling: Theoretical modeling and experimental verification." *Rapid Prototyping Journal*, 25(7) (2019), s. 1229–1237.
313. Lee S.H., Joo C.W. "Effects of cooling rate on crystallinity and mechanical properties of poly(lactic acid)." *Journal of Applied Polymer Science*, 111(3) (2009), s. 1215–1221.
314. Prusa Research. "First Layer Calibration." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
315. Stratasys Ltd. "FDM Best Practice: First Layer Thickness." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
316. MatterHackers. "First Layer Adhesion." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
317. 3D Hubs. "First Layer Issues." Dostępne na: <https://www.3dhubs.com/>.
318. Ultimaker. "How to Level the Build Plate." Dostępne na: <https://support.ultimaker.com/>.
319. Stavropoulos P., Papacharalampopoulos A., Vasiliadis E., Chryssolouris G. "Temperature-based modeling of fused deposition modeling (FDM) process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4) (2018), s. 957–969.
320. 3DXTech. "Polycarbonate Printing Guide." Dostępne na: <https://www.3dxtech.com/>.
321. MatterHackers. "PETG Printing Guide." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
322. Pérez M., Agote I., Gómez A., Jiménez M. "Effect of cooling rate on crystallinity and mechanical properties of poly(lactic acid) parts fabricated by fused deposition modeling." *Polymers*, 11(8) (2019), art. nr 1366.
323. Wang P., Zou B., Xiao H., Wang L. "Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK." *Journal of Materials Processing Technology*, 248 (2017), s. 1–7.
324. Berretta S., Davies R., Ghita O. "Fused deposition modelling of high temperature polymers: exploring CNT PEEK composites." *Polymer Testing*, 44 (2015), s. 234–242.
325. Feng Z., Li M., Li W., Zhang X. "Effects of temperature field on residual stress and deformation of PEEK parts in fused deposition modeling." *Materials*, 11(12) (2018), art. nr 2414.
326. Li Q., Li Z. "Effects of chamber temperature on the interlayer bonding strength of 3D printed PEEK components." *Journal of Manufacturing Processes*, 28 (2017), s. 30–36.
327. Kim H., Oh Y. "Airflow analysis in 3D printing process of high-temperature polymer composites." *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7) (2017), s. 3417–3424.

328. **Gebisa A.W., Lemu H.G.** "Influence of 3D printing FDM process parameters on tensile property of ULTEM 9085." *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 14(1) (2019), art. nr 7.
329. **Ziemian S., Okwara M., Ziemian C.W.** "Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene." *Rapid Prototyping Journal*, 21(3) (2015), s. 270–278.
330. **Slic3r.** "Retraction Settings." Dostępne na: <http://slic3r.org/>.
331. **Cura.** "Retraction Settings." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
332. **MatterHackers.** "Retraction Guide." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
333. **Simplify3D.** "Retraction Settings." Dostępne na: <https://www.simplify3d.com/>.
334. **3D Hubs.** "How to Prevent Stringing and Oozing." Dostępne na: <https://www.3dhubs.com/>.
335. **Ultimaker.** "Preventing Clogs and Jams." Dostępne na: <https://support.ultimaker.com/>.
336. **Prusa Research.** "Retraction Calibration." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
337. **Simplify3D.** "Retraction Speed and Distance." Dostępne na: <https://www.simplify3d.com/>.
338. **3D Insider.** "Understanding Retraction in 3D Printing." Dostępne na: <https://3dinsider.com/>.
339. **Slic3r.** "G-code Generation." Dostępne na: <http://slic3r.org/>.
340. **Cura.** "Understanding G-code." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
341. **Zhang Y., Bernard A., Harik R., Gao J.** "Additive manufacturing: Towards a new future." *International Journal of Production Research*, 57(15–16) (2019), s. 5103–5108.
342. **Przybyła K., Kozak J.** "Optimization algorithms in additive manufacturing processes." *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 41(3) (2017), s. 5–17.
343. **Liao H., Li N., Li Z.** "Real-time process optimization for fused deposition modeling with data-driven approach." *Procedia Manufacturing*, 26 (2018), s. 948–958.
344. **Prusa Research.** "Adaptive Layer Height." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
345. **Slic3r.** "Variable Layer Height." Dostępne na: <http://slic3r.org/>.
346. **Wu H., Li C., Wang J.** "Adaptive slicing for fused deposition modeling based on stepwise error evaluation." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48 (2017), s. 44–52.
347. **Baumann F.W., Roller D.** "Increasing 3D printing speed by optimizing acceleration settings." *Procedia CIRP*, 62 (2017), s. 409–414.
348. **Zhang Y., Bernard A., Harik R., Duballet R.** "Path planning strategies and algorithms for additive manufacturing: A review." *Rapid Prototyping Journal*, 25(6) (2019), s. 1051–1066.
349. **Lindgren L., Lundbäck A., Fisk M., Pederson R., Andersson J.** "Simulation of additive manufacturing using coupled constitutive and microstructure models." *Additive Manufacturing*, 12 (2016), s. 144–158.
350. **Heinrich F., Klahn C., Meboldt M.** "Enhancing FDM machine capabilities with a parametric process model for adaptive slicing." *Procedia CIRP*, 41 (2016), s. 1023–1028.

- 
351. **Prusa Research.** "Temperature Management in 3D Printing." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
352. **Cura.** "Dynamic Temperature Control." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
353. **Vanek J., Galicia J.A., Benes B.** "Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication." *Computer Graphics Forum*, 33(5) (2014), s. 117–125.
354. **Hu Y., Zhu K., Wang C.C.L., Lai C.F.** "Support slimming for single material based additive manufacturing." *Computer-Aided Design*, 65 (2015), s. 1–10.
355. **Stratasys Ltd.** "Optimizing Support Structures in FDM." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
356. **Prusa Research.** "Improving Support Removal." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
357. **Dumas J., Hergel J., Lefebvre S.** "Bridging the gap: Automated steady scaffoldings for 3D printing." *ACM Transactions on Graphics*, 33(4) (2014), art. nr 98.
358. **Cura.** "Support Settings and Optimization." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
359. **Slic3r.** "Advanced Path Planning." Dostępne na: <http://slic3r.org/>.
360. **Huang Y., Leu M.C., Mazumder J., Donmez A.** "Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1) (2015), art. nr 014001.
361. **Cicala G., Ognibene G., Portuesi S., Tosto C., Blanco I., Recca G.** "Polymers for fused deposition modelling in additive manufacturing: Current status and challenges." W: *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2017, s. 47–68.
362. **Spoerk M., Holzer C., Sapkota J.** "Processing of amorphous and semi-crystalline polymers and their blends in additive manufacturing." *Applied Sciences*, 8(2) (2018), art. nr 270.
363. **Bertan V., Bolzan M., de Almeida E.S., et al.** "The effect of humidity on 3D printed PLA structural and mechanical properties." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9–12) (2015), s. 1827–1833.
364. **Gupta M.K., Talwar R.** "Investigations on surface roughness and mechanical properties of 3D printed parts." *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3) (2017), s. 235–240.
365. **Fischer M., Schöppner V.** "Investigations of the influence of material humidity on the processing of polyamide 12 in the FDM process." *AIP Conference Proceedings*, 1914 (2017), art. nr 150002.
366. **MatterHackers.** "Filament Drying Guide." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
367. **Stratasys Ltd.** "FDM Best Practice: Material Storage and Handling." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
368. **3D Printing Industry.** "How to Store and Dry 3D Printing Filament." Dostępne na: <https://3dprintingindustry.com/>.
369. **Ultimaker.** "Material Handling and Storage." Dostępne na: <https://support.ultimaker.com/>.
370. **Prusa Research.** "Drying and Storing Filaments." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.



- 
371. **3DXTech**. "PLA Drying Instructions." Dostępne na: <https://www.3dxtech.com/>.
372. **MatterHackers**. "PETG Filament Guide." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
373. **Sabic**. "Polycarbonate Processing Guide." Dostępne na: <https://www.sabic.com/>.
374. **DSM**. "PA6 Drying Guidelines." Dostępne na: <https://www.dsm.com/>.
375. **Taulman3D**. "Nylon Filament Storage and Drying." Dostępne na: <https://taulman3d.com/>.
376. **Ultimaker**. "PVA Material Guide." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
377. **BASF**. "PVA Properties and Handling." Dostępne na: <https://www.basf.com/>.
378. **NinjaTek**. "TPU Drying Instructions." Dostępne na: <https://ninjatek.com/>.
379. **Victrix**. "PEEK Processing Guide." Dostępne na: <https://www.victrix.com/>.
380. **Solvay**. "PEEK Handling and Drying." Dostępne na: <https://www.solvay.com/>.
381. **PrintDry**. "Filament Drying Systems." Dostępne na: <https://www.printdry.com/>.
382. **eSUN**. "eBOX Filament Dryer." Dostępne na: <https://www.esun3d.net/>.
383. **MatterHackers**. "Drying Filament with a Filament Dryer." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.
384. **PrintDry**. "PrintDry Filament Dryer Features." Dostępne na: <https://www.printdry.com/>.
385. **Prusa Research**. "Avoiding Filament Degradation During Drying." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
386. **Suker D**. "Advanced drying methods for hygroscopic polymers in additive manufacturing." *Journal of Materials Processing Technology*, 238 (2016), s. 208–215.
387. **3D Printing Industry**. "The Importance of Drying Filament for Advanced Materials." Dostępne na: <https://3dprintingindustry.com/>.
388. **Vacuum Drying Systems**. "Vacuum Filament Dryers." Dostępne na: <https://www.vacuumdryingsystems.com/>.
389. **eSUN**. "Vacuum Drying Box." Dostępne na: <https://www.esun3d.net/>.
390. **Kim H., Lee S., Park J**. "Effectiveness of vacuum drying for hygroscopic polymer filaments used in additive manufacturing." *Polymer Testing*, 63 (2017), s. 559–566.
391. **Boschetto A., Bottini L**. "Accuracy prediction in fused deposition modeling." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5–8) (2014), s. 913–928.
392. **Kim S.Y., Jung H.Y., Park H.J., et al**. "Thermal and mechanical properties of 3D-printed polyetheretherketone filament." *Materials Science and Engineering: A*, 682 (2017), s. 569–575.
393. **Diegel O., Nordin A., Motte D**. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Springer, 2019.

394. **Spoerk M., Holzer C., Sapkota J.** "Shrinkage and warpage optimization of printed parts by changing the infill pattern in Fused Deposition Modeling." *Journal of Applied Polymer Science*, 134(41) (2017), art. nr 45404.
395. **Kant R., et al.** "Warpage analysis of FDM parts using ANSYS." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(3) (2017), s. 75–85.
396. **Stratasys Ltd.** "FDM Best Practice: Reducing Warpage and Curl." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
397. **Prusa Research.** "Preventing Warping and Curling." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
398. **Benedetti M., et al.** "The effect of process parameters on mechanical properties of 3D-printed PEEK and a metal–plastic hybrid." *Composites Part B: Engineering*, 124 (2017), s. 17–25.
399. **Li Q., et al.** "Crystallization and interface behavior of PEEK in high-temperature selective laser sintering." *Polymer Testing*, 69 (2018), s. 366–372.
400. **Armillotta A.** "Assessment of surface quality on textured FDM prototypes." *Rapid Prototyping Journal*, 12(1) (2006), s. 35–41.
401. **Pérez M.A., Medina-Sánchez G., Pérez-González A., Otero J.E.** "Influence of post-processing conditions on mechanical properties of fused deposition modeling parts." *Polymer Testing*, 66 (2018), s. 212–221.
402. **Prusa Research.** "Using Supports in 3D Printing." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
403. **Boschetto A., Bottini L., Veniali F.** "Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining." *Robotica*, 31(7) (2013), s. 945–953.
404. **Prusa Research.** "Printer Calibration and Maintenance." Dostępne na: <https://help.prusa3d.com/>.
405. **Ultimaker.** "Optimizing Print Quality." Dostępne na: <https://support.ultimaker.com/>.
406. **Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D.** "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges." *Composites Part B: Engineering*, 143 (2018), s. 172–196.
407. **Fischer M., Wegener K.** "3D printing of polymer composites: A short review." *Journal of Applied Polymer Science*, 133(23) (2016), art. nr 43774.
408. **Fischer M., Schöppner V.** "Influence of Material Moisture on the Mechanical Properties of Fused Filament Fabricated Parts." *Rapid Prototyping Journal*, 23(5) (2017), s. 905–914.
409. **Levenhagen N.P., Dadmun M.D.** "The impact of filament moisture on the mechanical properties of 3D printed materials." *Polymer Testing*, 62 (2017), s. 51–56.
410. **Rodriguez J.F., Thomas J.P., Renaud J.E.** "Characterization of the mesostructure of fused-deposition ABS materials." *Rapid Prototyping Journal*, 9(4) (2003), s. 219–230.
411. **MatterHackers.** "How to Store and Dry Your Filament." Dostępne na: <https://www.matterhackers.com/>.

412. **Baumers M., et al.** "The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push." *Technological Forecasting and Social Change*, 102 (2016), s. 193–201.
413. **Baich L., Manogharan G., Marie H.** "Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts." *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(3–4) (2015), s. 308–319.
414. **Wong K.V., Hernandez A.** "A Review of Additive Manufacturing." *ISRN Mechanical Engineering*, 2012 (2012), art. nr 208760.
415. **Zhang L., et al.** "High-performance PEEK components prepared by additive manufacturing technology: properties and applications." *Journal of Materials Science*, 53(13) (2018), s. 9978–9991.
416. **Lipson H., Kurman M.** *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Wiley, 2013.
417. **Khan M.A., et al.** "Optimization of process parameters affecting the dimensional accuracy and surface roughness of FDM fabricated parts." *Materials Today: Proceedings*, 5(2) (2018), s. 19990–19999.
418. **Benedetti M., Van Der Veen S.** "Mechanical properties of PEEK printed parts by Fused Filament Fabrication." *AIP Conference Proceedings*, 1896(1) (2017), art. nr 040004.
419. **Solis J.L., et al.** "Characterization of 3D printed PEEK and PEKK materials for high temperature and high pressure applications." W: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017*.
420. **Lopresti F., et al.** "Additive Manufacturing of PEEK reinforced with carbon fibers using FDM: Influence of processing parameters on mechanical properties." W: *Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials*, 2018.
421. **3DXTech.** "Nozzle Wear and Abrasion Resistance." Dostępne na: <https://www.3dxtech.com/>.
422. **E3D.** "Hardening Nozzles." Dostępne na: <https://e3d-online.com/>.
423. **Jerez-Mesa R., et al.** "Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing." *Procedia Manufacturing*, 13 (2017), s. 872–879.
424. **Singh R., Singh S.** "Investigations for Dimensional Accuracy of Prototypes Prepared with ABS-M30 by Fused Deposition Modelling for Plastic Components." *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 97(1) (2016), s. 103–109.
425. **Schwab A., et al.** "3D Printing of PEEK Polymer and PEEK Composite Materials." *Additive Manufacturing*, 31 (2020), art. nr 100970.
426. **Sculpteo.** "The State of 3D Printing 2019." Dostępne na: <https://www.sculpteo.com/>.
427. **Gebhardt A.** *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. Hanser Publishers, 2012.
428. **Ford S., Despeisse M.** "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges." *Journal of Cleaner Production*, 137 (2016), s. 1573–1587.
429. **Gibson I., Shi D.** "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process." *Rapid Prototyping Journal*, 3(4) (1997), s. 129–136.

430. **Boparai K.S., Singh R., Singh H.** "Comparison of tribological behavior for Nylon6-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ABS parts fabricated by fused deposition modeling." *Virtual and Physical Prototyping*, 11(2) (2016), s. 153–160.
431. **Petrovic V., et al.** "Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies." *International Journal of Production Research*, 49(4) (2011), s. 1061–1079.
432. **Stratasys Ltd.** "FDM for Manufacturing." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
433. **Ultimaker.** "Industrial Applications of 3D Printing." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
434. **Victrex plc.** "PEEK in Additive Manufacturing." Dostępne na: <https://www.victrex.com/>.
435. **Singh S., Ramakrishna S., Berto F.** "3D printing of polymer composites: A short review." *Materials Today Advances*, 8 (2020), art. nr 100073.
436. **Williams D.F.** "On the mechanisms of biocompatibility." *Biomaterials*, 29(20) (2008), s. 2941–2953.
437. **Winder J., Bibb R.** "Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery." *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 63(7) (2005), s. 1006–1015.
438. **Li Z., et al.** "Application of 3D-printed customized external fixator in fracture reduction." *Injury*, 46(6) (2015), s. 1150–1155.
439. **Goh G.D., et al.** "Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential." *Additive Manufacturing*, 19 (2018), s. 1–20.
440. **Gardner J.M., Yunus E.R.** "High performance PEEK composites for aircraft interior applications." *SAMPE Conference Proceedings*, Baltimore, 2015.
441. **Melenka G.W., Schofield J.S., Dawson M.R., Carey J.P.** "Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer." *Rapid Prototyping Journal*, 22(4) (2016), s. 618–627.
442. **Pringle A.M., Rudnicki M., Pearce J.M.** "Open-source 3D printing technologies for space." *Rapid Prototyping Journal*, 24(5) (2018), s. 829–840.
443. **NASA.** "In-space manufacturing." Dostępne na: <https://www.nasa.gov/>.
444. **Zhang Z., et al.** "Development of high-performance PEEK components via fused deposition modeling and characterizations for space application." *Polymers*, 10(1) (2018), art. nr 92.
445. **Murr L.E., et al.** "Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies." *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1) (2012), s. 1–14.
446. **Carter W., Johnson R.** "Additive manufacturing technologies in space: Potentials and challenges." *Acta Astronautica*, 107 (2015), s. 162–176.
447. **Made In Space, Inc.** "Zero Gravity 3D Printer." Dostępne na: <https://www.madeinspace.us/>.
448. **Aliakbarian B., et al.** "Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—A review." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2) (2018), s. 1472–1484.

449. **Ríos S.D., Ríos J.C.** "Additive manufacturing in the oil and gas sector: Recent advances and future challenges." *Additive Manufacturing*, 23 (2018), s. 143–162.
450. **Morena L.C., et al.** "Additive manufacturing of high-performance polymers for oil and gas applications." W: *Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2017.
451. **Tehrani M., et al.** "Additive manufacturing of multi-material structures for oil and gas applications." *International Journal of Rapid Manufacturing*, 6(1) (2016), s. 1–17.
452. **Singh R.** "A review of composite materials based on additive manufacturing processes for aerospace applications." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(17) (2018), s. 1144–1157.
453. **Moylan S., Slotwinski J., Cooke A., Jurens K., Donmez M.A.** "Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes." *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012, s. 902–920.
454. **Kawola J.S.** "3D printing in the oil and gas industry: An opportunity for innovation and efficiency." *Journal of Petroleum Technology*, 69(8) (2017), s. 46–48.
455. **Ford S., Minshall T.** "Defining the research agenda for 3D printing-enabled re-distributed manufacturing." *International Journal of Production Research*, 53(20) (2015), s. 6436–6443.
456. **BMW Group.** "BMW uses 3D printing for individualized vehicle parts." Dostępne na: <https://www.bmwgroup.com/>.
457. **EOS GmbH.** "PEEK for Automotive Applications." Dostępne na: <https://www.eos.info/>.
458. **General Motors.** "GM speeds up development with 3D printing." Dostępne na: <https://media.gm.com/>.
459. **Wohlers T.T.** *Wohlers Report 2011: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. Wohlers Associates, 2011.
460. **Hopkinson N., Dickens P.M.** "Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1) (2003), s. 31–39.
461. **CustomPartNet.** "Fused Deposition Modeling (FDM)." Dostępne na: <https://www.custompartnet.com/>.
462. **Ultimaker.** "Applications of 3D Printing in Electronics." Dostępne na: <https://ultimaker.com/>.
463. **Victrex plc.** "PEEK in Electronics Applications." Dostępne na: <https://www.victrex.com/>.
464. **Lipson H., Kurman M.** *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Wiley, 2013.
465. **Educause.** "3D Printing: 7 Things You Should Know About." Dostępne na: <https://www.educause.edu/>.
466. **3D Hubs.** "3D Printing for Hobbyists." Dostępne na: <https://www.3dhubs.com/>.
467. **Architect Magazine.** "3D Printing in Architecture." Dostępne na: <https://www.architectmagazine.com/>.

- 
468. **Stratasys Ltd.** "FDM Applications in Architecture and Construction." Dostępne na: <https://www.stratasys.com/>.
469. **3D Printing Industry.** "3D Printing in Fashion and Jewelry." Dostępne na: <https://3dprintingindustry.com/>.
470. **Forbes.** "How 3D Printing is Transforming the Fashion Industry." Dostępne na: <https://www.forbes.com/>.
471. **3D Systems.** "Culinary 3D Printing Solutions." Dostępne na: <https://www.3dsystems.com/>.
472. **Żenkiewicz M.** *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych.* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
473. **Kinloch A.J.** *Adhesion and Adhesives: Science and Technology.* Springer, 1987.
474. **Mittal K.L.** (red.). *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion.* VSP, 2000.
475. **Pocius A.V.** *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction.* Hanser Publishers, 1997.
476. **Naka T., Kimura Y., Inoue T., Kawai T.** "Surface treatment of polymer films and their applications." *Polymer Journal*, 7(3) (1975), s. 241–245.
477. **Coogan T.J., Kazmer D.O.** "Healing simulation for bond strength prediction of FDM." *Rapid Prototyping Journal*, 23(3) (2017), s. 551–561.
478. **Yang S., et al.** "Enhanced mechanical properties of FDM parts via hybrid ultrasonic-assisted rolling." *Additive Manufacturing*, 21 (2018), s. 670–678.
479. **Wang X., et al.** "Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of polyamide 6." *Polymers*, 9(12) (2017), art. nr 644.
480. **Li L., et al.** "Improving interlayer adhesion of 3D printed parts by surface treatment and vibration assistance." *Materials & Design*, 140 (2018), s. 331–341.
481. **Li L., et al.** "Interfacial bonding enhancement of FDM printed polymers via vibrational welding." *Polymers*, 11(9) (2019), art. nr 1417.
482. **Zhao D., et al.** "Ultrasonic vibration-assisted fused deposition modeling of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites." *Journal of Materials Processing Technology*, 255 (2018), s. 1–13.
483. **Zhang J., et al.** "Improvement of interlayer bonding strength of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites by ultrasound." *Materials Letters*, 236 (2019), s. 77–80.
484. **Song Y., et al.** "Interlayer bonding enhancement of continuous fiber reinforced thermoplastic composites using ultrasonic vibration during 3D printing." *Materials & Design*, 145 (2018), s. 90–99.
485. **Kinloch A.J.** *Adhesion and Adhesives: Science and Technology.* Chapman and Hall, 1987.
486. **Comyn J.** *Adhesion Science.* Royal Society of Chemistry, 1997.
487. **Mittal K.L.** (red.). *Electrostatic Phenomena in Adhesion.* John Wiley & Sons, 2013.

488. **Benatar A., Gutowski T.G.** "Methods for fusion bonding thermoplastic composites." *SAMPE Quarterly*, 20(4) (1989), s. 44–54.
489. **Chan C.M., Ko T.M., Hiraoka H.** "Polymer surface modification by plasmas and photons." *Surface Science Reports*, 24(1–2) (1996), s. 1–54.
490. **Bhattacharya A., Misra B.N.** "Grafting: A versatile means to modify polymers: Techniques, factors and applications." *Progress in Polymer Science*, 29(8) (2004), s. 767–814.
491. **Kausch H.H.** *Polymer Fracture*. Springer, 1987.
492. **Crespo J.E., et al.** "Interdiffusion in welding of thermoplastic composites." *Polymer Engineering & Science*, 48(5) (2008), s. 951–961.
493. **Potente H.** "Welding of plastics." *Welding in the World*, 31(3) (1993), s. 201–210.
494. **Hyla I.** *Tworzywa sztuczne. Własności – przetwórstwo – zastosowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
495. **Pusz A.** *Materiałowe i technologiczne uwarunkowania stanu naprężeń własnych i anizotropii wtórnej powłok cylindrycznych wytłaczanych z polietylenu*. Politechnika Śląska, Gliwice, 2005.
496. **Choe H.S., Kim S.H.** "Effect of molecular weight on interdiffusion and adhesion strength at polymer/polymer interfaces." *Polymer*, 36(15) (1995), s. 2903–2910.
497. **Sabyrov N., et al.** "Enhancing interlayer bonding strength of FDM 3D printing technology by diode laser-assisted system." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2021). DOI: 10.1007/s00170-021-08293-1.
498. **Neubert T., Lachmann K., Schumann L., Zeren V., Abraham T.** "Atmospheric Pressure Plasma Sources for Additive Manufacturing." *Metallurgical and Materials Transactions A*, (2022). DOI: 10.1007/s11661-022-06693-3.
499. **Luo M., Xiaoyong T., Junfan S., Weijun Z., Dichena L.** "Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites." *Composites Part A*, (2023). DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.105122.
500. **Li L., et al.** "Investigation of interlayer adhesion of parts fabricated by fused deposition modeling." *Rapid Prototyping Journal*, 24(1) (2018), s. 80–92.
501. **Gebisa A.W., Lemu H.G.** "Investigating effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment." *Materials & Design*, 132 (2017), s. 174–185.
502. **Khan S., Kumar S.** "Effect of fused deposition modeling process parameters on mechanical properties of PC-ABS plastic material." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455(1) (2018), art. nr 012067.
503. **Gao T., Duan Y., Wang Y.** "Influence of printing parameters on mechanical properties of FDM PLA printed parts." *Materials Research Express*, 6(10) (2019), art. nr 105301.
504. **Deka M., Sinha N., Das R., Hazarika N.K., Das H., Daurai B., Gogoi M.** "A review on the surface modification of materials for 3D-printed diagnostic devices." *Analytical Methods*, 16 (2024), s. 485–495. DOI: 10.1039/D3AY01742G.

505. **Pan M., Nguyen K.-C.T., Yang W., Liu X., Chen X.-Z., Major P.W., Le L.H., Zeng H.** "Surface modification strategies for biomedical applications: Enhancing cell–biomaterial interfaces and biochip performances." *Chemical Engineering Journal*, (2022). DOI: 10.1016/j.cej.2021.134418.
506. **Mozetič M.** "Surface Modification of Polymers by Plasma Treatment for Appropriate Adhesion of Coatings." *Materials*, 17(7) (2024), art. nr 1494. DOI: 10.3390/ma17071494.
507. **Kosmachev P.V., Panin S.V., Panov I.L., Bochkareva S.A.** "Surface Modification of Carbon Fibers by Low-Temperature Plasma with Runaway Electrons for Manufacturing PEEK-Based Laminates." *Materials*, 15(21) (2022), art. nr 7625. DOI: 10.3390/ma15217625.
508. **Luo M., et al.** "Impregnation and Interlayer Bonding Behaviours of 3D-Printed Continuous Carbon-Fiber-Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone Composites." *Composites Part A*, (2023). DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.105122.
509. **Bardon J., Berthé V., Perrin H., Westermann S., Addiego F.** "Fused Filament Fabrication of Polymers and Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composites: Advances in Structure Optimization and Health Monitoring." *Polymers*, 13(5) (2021), art. nr 789. DOI: 10.3390/polym13050789.
510. **Nötzel D., Eickhoff R., Ehrmann A.** "Enhancing interlayer adhesion of 3D printed objects by polymer coating." *Journal of Applied Polymer Science*, 135(22) (2018), art. nr 46320.
511. **Chai Y., Wang Q., Yu Z.** "Interlayer adhesion improvement of FDM parts by exposing semi-crystalline thermoplastic to solvent vapor." *Rapid Prototyping Journal*, 26(3) (2020), s. 529–539.
512. **Hossain M.S., Ramos J.J., Espalin D., Perez M., Wicker R.B., Islam M.S.** "Improving interlayer adhesion and surface finish of 3D printed biomedical implants by micro-droplet coating deposition." *Journal of Manufacturing Processes*, 16(4) (2014), s. 454–462.
513. **He J., Zhang J., Lu B., Liu Y.** "Enhanced interfacial bonding strength of FDM-processed PLA parts by pre-deposition surface treatment." *Materials Letters*, 185 (2016), s. 98–101.
514. **Chougrani L., Zitoune R., Collombet F., Mernissi A.** "Effect of silane coupling agent on interlaminar fracture toughness of PEEK/C fibre composite." *Applied Surface Science*, 410 (2017), s. 171–181.
515. **Mittal K.L.** (red.). *Silanes and Other Coupling Agents*, vol. 5. CRC Press, 2009.
516. **Przekop R.E., Gabriel E., Pakuła D., Sztorch B.** "Liquid for Fused Deposition Modeling (L-FDM)—A Revolution in Application Chemicals to 3D Printing Technology: Mechanical and Functional Properties." *Applied Sciences*, 13(14) (2023), art. nr 8462. DOI: 10.3390/app13148462.
517. **Ahmed S., Susmita K.** "Effect of nanoclay on interlayer adhesion and mechanical properties of FDM printed parts." *Materials Today: Proceedings*, 5(2) (2018), s. 21153–21159.
518. **Prasong W., Ishigami A., Thumsorn S., Kurose T., Ito H.** "Improvement of Interlayer Adhesion and Heat Resistance of Biodegradable Ternary Blend Composite 3D Printing." *Polymers*, 13(5) (2021), art. nr 740. DOI: 10.3390/polym13050740.
519. **Wang L., Gardner D.J.** "Effect of fused layer modeling (FLM) processing parameters on impact strength of cellular polypropylene." *Polymer*, 113 (2017), s. 74–80.



520. Liu T., et al. "Improving interlayer bonding strength of 3D printed wood fiber/PLA composites by interface modification." *Materials & Design*, 139 (2018), s. 188–195.
521. Rahman A., Netravali A.N. "Green composites based on blends of polyvinyl alcohol, starch and talc: Effect of crosslinking on thermal and mechanical properties." *Composites Part B: Engineering*, 99 (2016), s. 116–125.
522. Wypych G. *Handbook of Polymers*. ChemTec Publishing, 2016.
523. Li Y., et al. "Compatibility improvement of PLA/PBAT blends via compatibilization with epoxy-functional styrene–acrylic copolymer." *Polymers for Advanced Technologies*, 29(5) (2018), s. 1385–1393.
524. Tian X., Liu T., Yang C., Wang Q., Li D. "Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88 (2016), s. 198–205.
525. Li H., Huneault M.A., Park C.B. "Poly(lactic acid)/poly(ethylene-co-acrylic acid) blends compatibilized with reactive chain extenders." *Polymer*, 82 (2016), s. 44–53.
526. Esmaeili N., Ghasemi I. "Improvement of mechanical properties of PLA/ABS blends compatibilized with SBS and SEBS for FDM 3D printing technology." *Journal of Applied Polymer Science*, 133(44) (2016), art. nr 44103.
527. Chieng B.W., Ibrahim N.A., Yunus W.M.Z.W., Hussein M.Z. "Poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) nanocomposites: Preparation, characterizations, and properties." *Journal of Nanomaterials*, 2014 (2014), art. nr 1–10.
528. Francis V., Jain P.K. "Advances in nanocomposite materials for additive manufacturing." *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(3–4) (2015), s. 215–233. DOI: 10.1504/IJRAPIDM.2015.074804.
529. Blais M., Tomlinson S., Khoda B. "Investigation of the Interfacial Adhesion Strength of Parts Additively Manufactured on Fabrics." *ASME Open Journal of Engineering*, 2 (2023), art. nr 021024. DOI: 10.1115/1.4062281.
530. Weng Z., Wang J., Senthil T., Wu L. "Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing." *Materials & Design*, 102 (2016), s. 276–283.
531. Haq R.H.A., Wahab M.S., Jaimi N.I. "Fabrication process of polymer nano-composite filament for fused deposition modeling." W: *4th Mechanical and Manufacturing Engineering*, Trans Tech Publications, 2014, s. 8–12.
532. Patra S.C., Swain S., Senapati P., Sahu H., Murmu R., Sutar H. "Polypropylene and Graphene Nanocomposites: Effects of Selected 2D-Nanofiller's Plate Sizes on Fundamental Physicochemical Properties." *Inventions*, 8 (2023), art. nr 8. DOI: 10.3390/inventions8010008.
533. Huang B., He H., Meng S., Jia Y. "Optimizing 3D printing performance of acrylonitrile-butadiene-styrene composites with cellulose nanocrystals/silica nanohybrids." *Polymer International*, 68(8) (2019), s. 1351–1360.

534. **Gurr M., Thomann Y., Nedelcu M., Kübler R.** "Novel acrylic nanocomposites containing in-situ formed calcium phosphate/layered silicate hybrid nanoparticles for photochemical rapid prototyping, rapid tooling and rapid manufacturing processes." *Polymer*, 51(22) (2010), s. 5058–5070.
535. **Sztorch B., Konieczna R., Pakuła D., Frydrych M., Marciniak B., Przekop R.E.** "Preparation and Characterization of Composites Based on ABS Modified with Polysiloxane Derivatives." *Materials*, 17(3) (2024), art. nr 561.
536. **Huang H.-D., Ren P.-G., Xu J.-Z., Xu L., Zhong G., Hsiao B., Li Z.-M.** "Improved barrier properties of poly(lactic acid) with randomly dispersed graphene oxide nanosheets." *Journal of Membrane Science*, 464 (2014), s. 110–118.
537. **Farahani R.D., Dubé M., Therriault D.** "Three-Dimensional Printing of Multifunctional Nanocomposites: Manufacturing Techniques and Applications." *Advanced Materials*, 28(28) (2016), s. 5794–5821.
538. **Gupta M.K., Singh R., Singh T., Mia M.** "Optimization of process parameters to minimize dimensional deviation of ABS replicas fabricated by fused deposition modelling process." *Measurement*, 135 (2019), s. 672–682.
539. **Li L.** "Modeling and simulation of microstructure evolution in fused deposition modeling of semicrystalline polymer." *Additive Manufacturing*, 17 (2017), s. 12–19.
540. **Yang F., Zhang M., He X.** "The effect of processing parameters on characteristics of 3D printed PA6 parts by fused deposition modeling." *AIP Conference Proceedings*, 2057 (2019), art. nr 020070.
541. **Niaki M.K., Safavi A.A.** "Thermal degradation of PLA in fused deposition modeling process and its consequences on mechanical properties." *Materials Today: Proceedings*, 19 (2019), s. 1850–1855.
542. **Zhang J., Guo S., Li G.** "Thermal degradation mechanism of poly(lactic acid): A review." *Journal of Polymers and the Environment*, 25(4) (2017), s. 1000–1010.
543. **Singh S., Ramakrishna S., Singh R.** "Material issues in additive manufacturing: A review." *Journal of Manufacturing Processes*, 25 (2017), s. 185–200.
544. **Zhang J., Chou K.** "A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, (2008).
545. **Costa S.F., Duarte F.M., Covas J.A.** "Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition modelling." *Journal of Materials Processing Technology*, 216 (2015), s. 484–493.
546. **Suresh Kumar B.N., Venkatesh M., Aravindan S.** "Influence of process parameters on interlaminar strength of 3D printed ABS components." *Materials Today: Proceedings*, 5(6) (2018), s. 13343–13349.
547. **Garg A., Bhattacharya A.** "An insight to the shrinkage and warpage behavior of FDM built parts." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(6) (2017), s. 1077–1088.

548. **Kuznetsov V.E., Solonin A.N., Tavitov A.G., Urzhumtsev O.D., Vakulik A.V.** "Strengthening of interlayer adhesion in FDM 3D printing technology by infrared heating." *Journal of Physics: Conference Series*, 1059(1) (2018), art. nr 012046.
549. **Yang F., Pitchumani R.** "Integration of infrared preheating with fused deposition modeling to enhance interlayer bonding and mechanical properties." *Additive Manufacturing*, 27 (2019), s. 151–159.
550. **Kishore V., Ajinjeru C., Chen X., Nycz A., Post B., Lindahl J., Kunc V., Duty C.** "Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components." *Additive Manufacturing*, 14 (2017), s. 7–12.
551. **Zhao H., Yang Y., Xu L., Gao B.** "Improving interlayer bonding in FDM 3D printing with infrared radiation." *Journal of Materials Processing Technology*, 257 (2018), s. 296–305.
552. **Metaxas A.C., Meredith R.J.** *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1983.
553. **Regnier A., Terriault P.** "Microwave curing for the bonding of thermoplastic composite parts in automated manufacturing." *Composites Part B: Engineering*, 95 (2016), s. 231–243.
554. **Meredith R.J.** *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*. The Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
555. **Kappe C.O.** "Controlled microwave heating in modern organic synthesis." *Angewandte Chemie International Edition*, 43(46) (2004), s. 6250–6284.
556. **Hiralal P., Unalan H.E., Amaratunga G.A.J.** "Microwave welding of carbon nanotube–polymer composites." *Carbon*, 48(14) (2010), s. 4385–4390.
557. **Kishore V., Chen X., Ajinjeru C., Lindahl J., Hassen A.A., Kunc V., Duty C.E.** "Microwave welding of 3D-printed carbon fiber-reinforced nylon composites." *Materials & Design*, 182 (2019), art. nr 108000.
558. **Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak T.** "Microwave material processing—a review." *AIChE Journal*, 58(2) (2012), s. 330–363.
559. **Choudhury S., Anand S.** "An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing." *Journal of Manufacturing Processes*, 24 (2016), s. 179–185.
560. **Wang F., Yang M., Xie Y., He X.** "Laser-assisted fused deposition modeling of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites." *Materials & Design*, 187 (2020), art. nr 108356.
561. **Zhang P., Liu J., Leng J., Liu Y.** "Laser-assisted fabrication of high-performance polymer and polymer composite structures: A review." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(16) (2018), s. 4999–5012.
562. **Song Y., Li Y., Song W., Yee K., Lee K.-Y., Tagarielli V.L.** "Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA." *Materials & Design*, 123 (2017), s. 154–164.
563. **Yang F., Pitchumani R.** "Integration of infrared preheating with fused deposition modeling to enhance interlayer bonding and mechanical properties." *Additive Manufacturing*, 27 (2019), s. 151–159.

564. **Partain S.C.** "System and method for improving interlayer adhesion in additive manufacturing." *U.S. Patent No. 10,843,403*, U.S. Patent and Trademark Office, 2020.
565. **Berretta S., Davies R., Ghita O.R.** "Additive manufacture of PEEK cranial implants: Manufacturing considerations versus accuracy and mechanical performance." *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 59 (2016), s. 499–512.
566. **Lederle F., Meyer F., Brunotte G.P., et al.** "Improved mechanical properties of 3D-printed parts by fused deposition modeling processed under the exclusion of oxygen." *Progress in Additive Manufacturing*, 1 (2016), s. 3–7. DOI: 10.1007/s40964-016-0010-y.
567. **Shaik Y.P., Schuster J., Naidu N.K.** "High-Pressure FDM 3D Printing in Nitrogen [Inert Gas] and Improved Mechanical Performance of Printed Components." *Journal of Composites Science*, 7 (2023), art. nr 153. DOI: 10.3390/jcs7040153.
568. **Maidin S., Wong J.U.H., Mohamed A.S., Mohamed S.B., Rashid R.A., Rizman Z.I.** "Vacuum fused deposition modelling system to improve tensile strength of 3D printed parts." *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(6S) (2017), s. 839–853.
569. **Dizon J.R.C., Espera A.H., Chen Q., Advincula R.C.** "Mechanical characterization of 3D-printed polymers." *Additive Manufacturing*, 20 (2018), s. 44–67.
570. **Patent PL 244194 B1** "Drukarka 3D z płytą środowiska lokalnego i sposób drukowania 3D", 13 grudnia 2021, BUP 37/2021.
571. **Lee S.W., Cho S.J., Kim W.** "Development of thermo-fluid simulation technique for extruder and chamber of FDM-type 3D printer for printing high-melting-point materials." *Microsystem Technologies*, 28 (2022), s. 2225–2234. DOI: 10.1007/s00542-022-05270-3.
572. **Ramli M., et al.** "The effect of tensile strength and surface roughness by varying oxygen level in 3D printer chamber." *Jurnal Tribologi*, 33 (2022), s. 80–96.
573. **Lu Y., Li Y., Liu Y., Zhang L., Wang Q., Wang H.** "Thermal oxidative degradation of polyetheretherketone (PEEK) fibers." *Polymer Degradation and Stability*, 112 (2015), s. 129–138.
574. **McKeen L.W.** "Effect of Oxygen on Plastics." W: *The Effect of Sterilization Methods on Plastics and Elastomers*, 3rd ed., William Andrew Publishing, 2014, s. 77–92.
575. **Li Q., Wang D., Yang R., Xiao M.** "Effects of nitrogen atmosphere on the 3D printing of PEEK by fused deposition modeling." *Journal of Applied Polymer Science*, 135(32) (2018), art. nr 46570.
576. **Gao J., Li W., Wang J., Wang X., Sha C., Zhao K.** "Comprehensive analysis of fused deposition modeling process conditions for enhancing mechanical properties and surface quality of 3D-Printed poly-ether-ether-ketone." *Polymer Testing*, 134 (2024).
577. **Lu J., Guo J., Zhang Y., Zhang J.** "Thermal oxidative degradation behaviors of polyimide fibers in air and nitrogen atmospheres." *Polymer Degradation and Stability*, 162 (2019), s. 83–91.
578. **Jordá-Vilaplana A., Fombuena V., García-García D., Samper M.D., Sánchez-Nácher L.** "Surface modification of polylactic acid (PLA) by air atmospheric plasma treatment." *European Polymer Journal*, 58 (2014), s. 23–33.

- 
579. **Slejško E.A., Gorella N.S., Makaya A., Gallina P., Scuor N., Seriani S.** "Vacuum 3D printing of highly filled polymeric matrix composites." *Acta Astronautica*, 204 (2023), s. 25–33.
580. **Maidin S., Wong J., Mohamed A., Mohamed S.** "Effect of Vacuum Assisted Fused Deposition Modeling on 3D Printed ABS Microstructure." *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (2017), s. 4877–4881.
581. **Troughton M.J.** „Handbook of Plastics Joining – A Practical Guide” – William Andrew Inc., New York 2008.
582. **Tres P.A.** „Designing Plastic Parts for Assembly”, Carla Hanser Verlag, Munich 2024.
583. **Pr.zbiorowa.** „Taschenbuch DVS – Merkblätter und Richtlinien – Fügen von Kunststoffen” DVS Media GmbH, Düsseldorf 2014.
584. **Norma PN-EN 12814-1** „Badania połączeń spawanych z półproduktów z tworzyw termoplastycznych. Część 1: Próba zginania”.
585. **Polński Z.**, "Metodyka badań doświadczalnych", Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1984.
586. **Polński Z.**, "Planowanie doświadczeń w technice", Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1984.
587. [www.statsoft.pl](http://www.statsoft.pl)
588. **Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A.** „Statystyka”, Wydawnictwo Defini, Warszawa 2011
589. [www.duet3d.com](http://www.duet3d.com)
590. [www.izoerg.com.pl/laminaty-techniczne-plyty/plyty-szkłano-epoksydowe-tse.html](http://www.izoerg.com.pl/laminaty-techniczne-plyty/plyty-szkłano-epoksydowe-tse.html)
591. [www.olssononline.com](http://www.olssononline.com)
592. [www.syensqo.com](http://www.syensqo.com)
593. [www.zwickroell.com](http://www.zwickroell.com)
594. [ww.ultimaker.com/software/ultimaker-cura/](http://ww.ultimaker.com/software/ultimaker-cura/)

## **Streszczenie**

Celem niniejszej pracy doktorskiej jest opracowanie nowych metod poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D metodą Fused Deposition Modeling (FDM).

W pracy przeprowadzono dogłębną analizę literatury dotyczącej technologii druku 3D, ze szczególnym uwzględnieniem metod poprawy więzi międzywarstwowej w technologii FDM. Omówiono teorie adhezji oraz techniki modyfikacji powierzchni, takie jak modyfikacje plazmowe i chemiczne, a także zastosowanie środków adhezyjnych i nanocząstek. Przedstawiono również wpływ optymalizacji parametrów procesu drukowania na poprawę adhezji międzywarstwowej.

W ramach własnych badań opracowano i skonstruowano prototypy nowych drukarek 3D FDM, wykorzystujących innowacyjne metody zwiększania więzi międzywarstwowej. Zaprojektowano i zbudowano cztery koncepcje technologiczne mające na celu poprawę więzi międzywarstwowej w drukowanych częściach: drukarkę 3D z nagrzewaniem laserowym, gdzie realizowane jest dodatkowe podgrzewanie warstw wiązką lasera; drukarkę 3D z głowicą rotującą, umożliwiającą mechaniczne zwiększenie powierzchni kontaktu między warstwami poprzez rotacyjne ruchy głowicy; drukarkę 3D łączącą głowicę rotującą z nagrzewaniem laserowym, integrującą korzyści obu poprzednich metod w celu poprawy więzi międzywarstwowej; oraz drukarkę 3D z górną płytą grzejącą, która poprzez kontrolę temperatury otoczenia drukowanego elementu minimalizuje skurcz materiału i poprawia więź między warstwami.

Przeprowadzono badania weryfikacyjne zaproponowanych rozwiązań, analizując wpływ zastosowanych metod na właściwości mechaniczne drukowanych elementów. Wyniki badań wykazały, że zastosowanie innowacyjnych metod w połączeniu z optymalizacją parametrów procesu drukowania prowadzi do znaczącej poprawy więzi międzywarstwowej, co przekłada się na zwiększenie wytrzymałości oraz podwyższenie trwałości drukowanych części.

Po przeprowadzeniu wstępnych badań oraz ocenie efektywności zaproponowanych technologii, zdecydowano się na wybór drukarki 3D z górną płytą grzejącą do głównej fazy badań. Wybór ten był podyktowany potencjałem tej technologii do przetwarzania najbardziej zaawansowanych materiałów, a w szczególności polieteroeteroketonu (PEEK) napełnionego mielonym włóknem węglowym. Stosowany w medycynie i lotnictwie PEEK CF, choć jest termoplastem o wyjątkowych właściwościach mechanicznych, termicznych i chemicznych, stawia wysokie wymagania technologiczne w drukowaniu FDM.

Wyniki badań wykazały, że zastosowanie górnej płyty grzejnej znacząco poprawiło zespolenie między warstwami w drukowanych kompozytach PEEK. Zaobserwowano wzrost wytrzymałości na zginanie w porównaniu z próbkami drukowanymi bez dodatkowego podgrzewania.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że integracja innowacyjnych rozwiązań technologicznych z optymalizacją parametrów procesu drukowania pozwala na znaczącą poprawę więzi międzywarstwowej w produktach wytwarzanych metodą FDM.

## **Abstract**

The aim of this doctoral thesis is to develop new methods to improve interlayer bonding in products made from polymers and polymer composites manufactured using Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing technology. A comprehensive literature review was conducted on 3D printing technologies, with particular emphasis on methods for enhancing interlayer bonding in FDM. Theories of adhesion and surface modification techniques, such as plasma and chemical modifications, as well as the application of adhesive agents and nanoparticles, were discussed. Additionally, the impact of optimizing printing process parameters, such as nozzle temperature and printing speed, on improving interlayer adhesion was presented.

In the course of the research, prototypes of new FDM 3D printers were developed and constructed, utilizing innovative methods to enhance interlayer bonding. Four technological concepts were designed and built to improve interlayer bonding in printed parts: a 3D printer with laser heating, which implements additional layer heating using a laser beam; a 3D printer with a rotating head, enabling mechanical increase of the contact surface between layers through rotational movements of the head; a 3D printer combining a rotating head with laser heating, integrating the benefits of both previous methods to enhance interlayer bonding; and a 3D printer with an upper heating plate, which, by controlling the temperature of the surrounding environment of the printed object, minimizes material shrinkage and improves interlayer bonding.

Verification studies of the proposed solutions were conducted, analyzing the impact of the applied methods on the mechanical properties of the printed elements. The study results demonstrated that the application of innovative methods in conjunction with the optimization of printing process parameters leads to a significant improvement in interlayer bonding, resulting in increased strength and enhanced durability of the printed parts.

After conducting preliminary studies and evaluating the effectiveness of the proposed technologies, a 3D printer with an upper heating plate was selected for the main phase of the research. This choice was driven by the potential of this technology to process the most advanced materials, particularly polyether ether ketone (PEEK) filled with ground carbon fiber. PEEK CF, used in medicine and aerospace, although a thermoplastic with exceptional mechanical, thermal, and chemical properties, poses high technological demands in FDM printing.

The research results demonstrated that the application of an upper heating plate significantly improved the bonding between layers in printed PEEK composites. An increase in bending strength was observed in comparison to samples printed without additional heating.

The conducted studies confirm that the integration of innovative technological solutions with the optimization of printing process parameters allows for a significant improvement in interlayer bonding in products manufactured using the FDM method.