

Kamil WYROBEK<sup>1</sup>, Jakub KLIŚ<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.53052/9788366249875.05>

## **DRUK 3D – NOWY WYMIAR WYTWARZANIA WIELOMATERIAŁOWEGO**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono technologie wytwarzania przyrostowego jaką jest druk 3D. Dokonano analizy procesu rozwoju tej technologii oraz wskazano potencjalne obszary jej zastosowania oraz kierunki rozwojowe. Szczególną uwagę poświęcono najbardziej rozpowszechnionej na świecie technologii FDM/FFF

**Słowa kluczowe:** druk 3D, technologia FDM/FFF

## **3D PRINTING - A NEW CHALLENGES OF MULTI MATERIAL- MANUFACTURING**

**Abstract:** In the paper, new technology of additive manufacturing i.e. 3D printing is described and discussed. An analysis of development of this technology has been done. The potential areas of its usage as well as the directions of development were indicated. Particular attention was focused on the most widely popular, world-wide known technology FDM/FFF.

**Keywords:** 3D printing, FDM.FFF technology

### **1. Wprowadzenie**

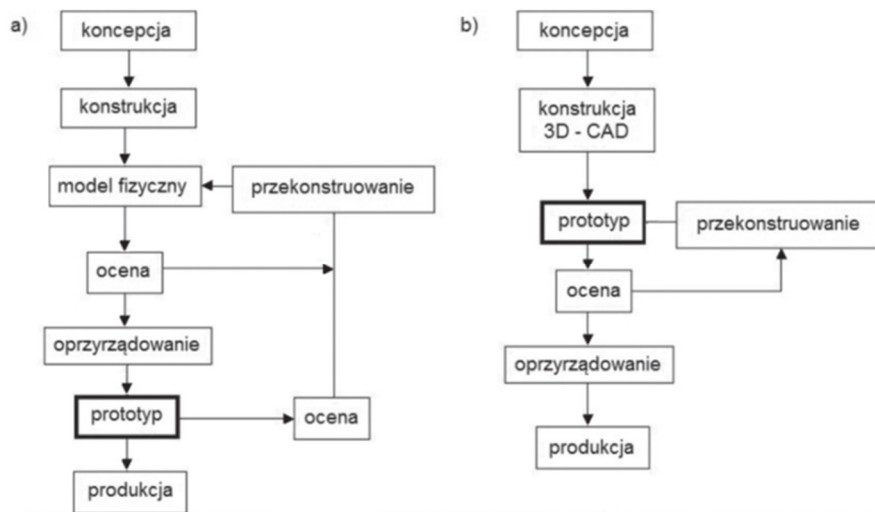
Dzisiejszy rynek charakteryzuje się silnym, stałym trendem szybkiego dostosowywania niepowtarzalnych, spersonalizowanych i wysoce funkcjonalnych produktów do oczekiwań klienta.

Pociąga to za sobą konieczność dysponowania elastycznymi i rekonfigurowanymi systemami produkcyjnymi, skracania czasu projektowania i wdrażania produktów do produkcji (Rys. 1) oraz ograniczaniu ich cyklu życia.

---

<sup>1</sup> mgr inż. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, [kwyrobek@ath.bielsko.pl](mailto:kwyrobek@ath.bielsko.pl)

<sup>2</sup> mgr inż. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej



Rysunek 1. Proces produkcji wyrobu, a) podejście tradycyjne, b) z wykorzystaniem metod rapid prototyping [1]

Naprzeciw tym oczekiwaniom wychodzi wytwarzanie przyrostowe AM (ang. Additive Manufacturing) oraz techniki hybrydowe, w których AM jest obecne. Wytwarzanie przyrostowe (addytywne) jest formalnie definiowane przez ISO/ASTM 52900:2015 [29], jako „proces łączenia materiałów w celu wykonania części z danych modelu 3D, zwykle warstwa po warstwie”. Stąd, wytwarzanie przyrostowe to warstwowe wytwarzanie (ang. layered manufacturing) brył trójwymiarowych bezpośrednio z modeli CAD (ang. Computer Aided Design).

Proces wytwarzania polega na sukcesywnym dodawaniu surowca w warstwach, aby stworzyć bryłę o określonym kształcie. Wytwarzania przyrostowe dzieli się na siedem podstawowych kategorii: fotopolimeryzacja VAT, laminowanie arkuszy, natryskiwanie spoiwa, wyłaczanie materiału, natryskiwanie materiału, stapianie w złożu proszkowym i bezpośrednie osadzanie energii [2].

Wytwarzanie przyrostowe jest obecnie uważane za nową falę rewolucji przemysłowej. Umożliwia ono wytwarzanie wielofunkcyjnych elementów o złożonej i niestandardowej geometrii, nieosiągalnej innymi metodami strukturze wewnętrznej i dostosowywalnych właściwościach materiału. Mogą tworzyć modele z różnych materiałów, w tym materiały reaktywne, nanokompozyty, lepkosprężyste, ceramiczne, a nawet łączyć ze sobą wiele materiałów. Podstawowym wymaganie przy wytwarzaniu części warstwa po warstwie jest przyleganie kolejnych warstw do siebie. Stąd podstawowa klasyfikacja tych metod wynika z fizycznego procesu adhezji, którą można osiągnąć za pomocą wiązania chemicznego, nakładania klejów pomiędzy kolejnymi warstwami lub poprzez spiekanie proszków z poprzednią warstwą materiału.

Współczesne procesy wytwarzania przyrostowego wywodzą się z wielu starszych praktyk. Tworzenie trójwymiarowych map terenu poprzez modelowanie gliny lub układanie woskowych odlewów wyciętych z linii konturów; było znane już w okresie chińskiej dynastii Han [4]. Druk trójwymiarowy (3D), należący do przyrostowych technik wytwarzania, jest wykorzystywany od ponad 30 lat. Pionierem w tej

dziedzinie jest Charles Hull, który w 1984 r. opracował technologię zwaną stereolitografią (SLA).

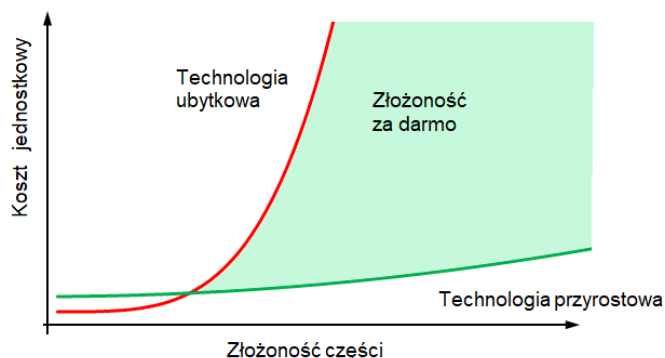
Dynamicznie rozwój technik wytwarzania przyrostowego datuje się od połowy lat 80-tych. Początkowo rozwijały się głównie jako narzędzie szybkiego prototypowania (ang. *Rapid Prototyping*). Prototyp pomaga konstruktorowi ocenić i zmodyfikować projekt, a technologowi określić najlepszą metodę wytwarzania. Stopniowo technologia od szybkiego prototypowania przeszła do szybkiego wytwarzania narzędzi (ang. *Rapid Tooling*) za pomocą których można wykonać nowe produkty, także w sposób konwencjonalny taki jak między innymi formowanie wtryskowe, termo-formowanie, formowanie z rozdmuchem lub do wytwarzanie elektrod do zastosowań w obróbce elektroerozyjnej. Kolejnym etapem była implementacja technologii przyrostowych do szybkiego wytwarzania (ang. *Rapid Manufacturing*) w pełni funkcjonalnych produktów [5]. Potencjalnymi użytkownikami technologii wytwarzania przyrostowego, oprócz inżynierów budowy maszyn są medycy, architekci, archeolodzy, nauczyciele, producenci elektroniki, artyści i wielu innych [6]. Na uwagę zasługuje rozpiętość skali budowanych obiektów, poczynając od wytwarzania biomateriałów w mikroskali po wielkogabarytowe konstrukcje architektoniczne. Technologie przyrostowe zapewniają znacznie większą swobodę w projektowaniu złożonych komponentów, wysoce konfigurowalnych produktów przy efektywnej minimalizacji odpadów produkcyjnych. Daje to możliwość tworzenia wysoce zoptymalizowanych komponentów, w których forma podąża za funkcjonalnością, bez ograniczeń narzucanych przez konwencjonalne procesy produkcyjne. Wszystkie procesy są sterowane komputerowo, umożliwiają więc ograniczenie liczby pracowników, skrócenie czasu uruchomienia produkcji, skrócenie czasu bezczynności między etapami projektowania i produkcji, zmniejszają liczbę operacji niezbędnych do wyprodukowania części, poprawiają efektywność zarządzania łańcuchem dostaw, dostosowują produkt do wymagań klientów oraz ograniczają zużycie materiału poprzez minimalizację odpadów, redukcję emisji CO<sub>2</sub> [8] i optymalizację struktury formowanych elementów. Ponadto znacząco zmniejszają koszty wytwarzania, najczęściej bez pogorszenia parametrów mechanicznych i funkcjonalności wytwarzanej części.

Koszt jednostkowy, pomijając etap budowy modelu, dla technologii przyrostowych jest stały (Rys. 2) i niezależny od stopnia złożoności części [3,7].



Rysunek 2. Zależność kosztu jednostkowego od liczby produkowanych części i ich złożoności dla przyrostowych i ubytkowych technologii [3]

Uwzględniając koszty projektowania części uwidacznia się obszar (Rys. 3) przewagi technologii przyrostowych w stosunku do technologii ubytkowych, uwzględniający także koszty projektowe.



Rysunek. 3. Zależność kosztu jednostkowego od złożoności części z uwzględnieniem kosztów projektowania części [36]

Odpady materiałowe w technologiach przyrostowych są zmniejszone o 40% w porównaniu z tradycyjnymi, ubytkowymi metodami, a co najmniej 95% pozostałych materiałów można poddać recyklingowi [10]. Również koszt urządzeń i materiałów wykorzystywanych w technologiach przyrostowych spadł o ponad 50% [35]. Można oczekiwać, że te technologie ze względu na swoje niezaprzeczalne zalety, staną się podstawą nowej branży przemysłowej już w najbliższej przyszłości.

Dzięki licznym korzyściom metody wytwarzania przyrostowego doskonale wpisują się w ideę „Przemysł 4.0”, integrując systemy informatyczne i elastyczne środki produkcji sterowane komputerowo, oferując wysoki poziom automatyzacji zarówno prac projektowych jak produkcji, stanowiąc istotny krok w kierunku urzeczywistnienia w praktyce inteligentnego wytwarzania. Znakomitym przykładem rosnących perspektyw rozwoju technologii przyrostowych jest przemysł lotniczy i kosmiczny, gdzie wymaga się małych partii komponentów, które mają złożoną geometrię, z odpowiednimi charakterystykami funkcji przepływu powietrza i rozpraszania ciepła [11]. Ponadto wyposażenie maszyn może zostać zoptymalizowane pod kątem redukcji wagi elementów, a co za tym idzie zmniejszenia zużycia paliwa i kosztów. Technologia druku 3D oferuje zaawansowane materiały spełniające rygorystyczne wymagania przemysłu lotniczego. Lekkie części z tworzyw mogą z powodzeniem zastępować elementy metalowe, nie ustępując pod względem wytrzymałości.

Jako przykład można przedstawić Satair, firmę usługową Airbusa, która dostarczyła jednemu ze swoich klientów pierwszą certyfikowaną, drukowaną w 3D z metalu część zamienną do samolotu A320ceo. Pozwoliło to na zmniejszenie prawdopodobieństwa uziemienia samolotu starszej generacji, do którego nie produkowano już danego elementu zamiennego.



*Rysunek 4. Element skrzydła samolotu Airbus A320neo [12]*

Część zamienna (Rys. 4), która została wykonana dla klienta to jeden z elementów skrzydła, który występuje w czterech różnych wersjach. Z racji braku posiadania odpowiedniej formy oraz po analizie innych konwencjonalnych metod produkcji oraz związanych z nimi kosztów, podjęto decyzję o wykonaniu danego elementu przy pomocy druku 3D. Proces druku 3D zajął około 26 godzin, podczas których wykonano cztery sztuki danego elementu, aby zmniejszyć jego koszt jednostkowy. Po zakończeniu etapu produkcji oraz obróbki końcowej, przeprowadzono standardowe procedury testowe, które pozwoliły na nadanie części zamienniej certyfikatu EASA Form 1 [12]

Często konieczne jest również stworzenie produkcji na żądanie i na miejscu, aby np. astronauta mogli wytwarzać części do naprawy lub konserwacji stacji kosmicznych. Pierwsza „kosmiczna” drukarka (Rys. 5) została umieszczona na orbicie na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) już w 2014 roku.



*Rysunek 5. Drukarka stosowana w warunkach zerowej (lub minimalnej) grawitacji [27]*

Tak więc, technologiami przyrostowymi jesteśmy w stanie wytwarzać części o niskim stosunku masy do wytrzymałości, co jest niezbędne w przypadku samolotów i promów kosmicznych [30]. Powyższe cechy są także bardzo istotne w protetyce, motoryzacji, a także w przemyśle budowlanym.

Technologie przyrostowe stwarzają również duże możliwości w zakresie zrównoważonej produkcji, czyli produkcji zaspokajającej obecne potrzeby społeczeństwa bez uszczerbku dla zdolności przyszłych pokoleń do zaspokojenia ich potrzeb. Zaletami zrównoważonej produkcji wykorzystującej procesy wytwarzania

przyrostowego są [13]: mniejsze ilości surowca potrzebnego w łańcuchu procesu dostaw, wyższa efektywność wykorzystania dostępnych zasobów; mniejsze odpady produkcyjne, mniejsze zanieczyszczenie środowiska (niektóre popularne materiały jak np. PLA są biodegradowalne i bioaktywne [14]), możliwości recyklingu materiałów, wyższa swoboda, efektywność i elastyczność w projektowaniu bardziej funkcjonalnych produktów; mniejsza liczba czynności transportowych, mniejszy ślad węglowy, zdecentralizowana i bliska konsumentom produkcja oraz wydłużenie żywotności produktów poprzez ułatwienie regeneracji i naprawy istniejących produktów.

Wytwarzanie przyrostowe zostało opracowane w oparciu o zasady technologii warstwowej. Wykorzystuje szereg procesów, takich jak m.in. natryskiwanie, osadzanie, wyłaczanie, stapianie proszków, laminowanie i polimeryzację.

Najbardziej popularne procesy druku 3D to:

- SLA (ang. *Stereolithography*) - żywice utwardzane są za pomocą lasera,
- FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*), - osadzanie topionego materiału przeciskanego przez rozgrzaną dyszę,
- DLP (ang. *Digital Light Processing*) – utwardzanie materiałów światłoczułych (fotopolimerów) za pomocą światła projektora,
- SLS (ang. *Selective Laser Sintering*) - selektywne spiekanie laserowe proszków,
- SLM - (ang. *Selective Laser Melting*) – selektywne stapianie proszków za pomocą wiązki laserowej,
- LOM (ang. *Laminated Object Manufacturing*) wytwarzanie obiektów laminowanych,
- PolyJet - żywica akrylowa utwardzana wiązką UV.

Za główną wadę technologii druku 3D uznaje się niską wydajność drukowania. Średnio wydrukowanie normalnego modelu 3D zajmuje 8-12 godzin [15]. Nie należy oczekiwać, że w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej techniki wytwarzania przyrostowego będą konkurencyjne w stosunku do formowania wtryskowego. Jednak dzięki wykorzystaniu nowego oprogramowania, sprzętu i materiałów można znacznie zwiększyć szybkość produkcji i funkcjonalność wytwarzanych części. Dla zaawansowanych urządzeń, które są w stanie konkurować z tradycyjnymi procesami produkcyjnymi w przypadku części średniej wielkości, zaproponowano nowy termin HSAM (ang. *High Speed Additive Manufacturing*) [16].

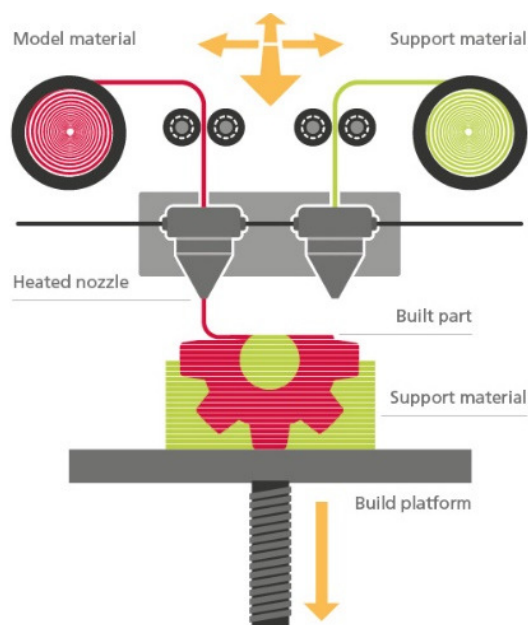
Szersze wykorzystanie procesów wytwarzania przyrostowego do zastosowań przemysłowych wymaga poprawy jakości wytwarzanych części zarówno pod względem dokładności wymiarowo-kształtowej jak i mniejszej chropowatości powierzchni. Osiągalna chropowatość jest najbardziej ograniczającym aspektem ich zastosowania [17]. Często występuje konieczność zastosowania dodatkowej obróbki wykończeniowej w celu usunięcia charakterystycznych linii łączenia kolejnych warstw materiału i struktur podporowych. Istnieje także możliwość odkształceń na dużych powierzchniach płaskich lub cienkich wystających elementach, duża anizotropia wydrukowanych elementów oraz możliwość osłabienia struktury formowanej części na połączeniach pomiędzy warstwami. Podpory są źródłem wielu problemów, w tym trudnych do usunięcia, uszkodzeń powierzchni i strat materiałowych, jak podsumowano w pracy [18]. Integralność powierzchni jest bardzo krytycznym problemem w przypadku elementów wykonywanych na drukarkach 3D, ponieważ nieodłącznie wpływa na nie zjawisko efektu klatki schodowej wynikające z charakteru procesu produkcji warstwa po warstwie. Poprawa jakości powierzchni

części może wymagać kosztownych i czasochłonnych operacji. Operacje te często wykonywane są ręcznie ze względu na złożoność kształtu produkowanych części. Typowe drukarki 3D posiadają szereg ograniczeń związanych z ich kinematyką, co przekłada się na błędne odwzorowanie kształtu drukowanych części. Dlatego atrakcyjna wydaje się alternatywa użycia dla celów druku 3D urządzeń takich jak wieloosiowy robot przemysłowy czy 5-cio osiowa obrabiarka, przystosowana do druku 3D. Obecnie druk 3D jest bardzo rzadko stosowany na obrabiarkach 5-cio osiowych. Biorąc pod uwagę potencjał jaki posiadają hybrydowe (ubytkowo-przyrostowe) techniki wytwarzania oraz możliwość, praktycznie dowolnego zorientowania głowicy drukującej względem formowanego przedmiotu, można - w nieodległej przyszłości - przewidywać dynamiczny rozwój tego typu procesów.

## 2. Metoda FDM/FFF

Wprowadzony pod koniec lat 80-tych, skomercjalizowany przez Stratasys Inc. (USA) [19] i opatentowany przez Scotta Crumpa w 1992 roku [20] proces Fused Deposition Modeling (FDM) jest obecnie zdecydowanie najszerzej stosowaną techniką wytwarzania przyrostowego. Jej udział w rynku przekracza 40% [21]. Rozpowszechnianie się technologii FDM zostało ostatnio wzmocnione przez wygaśnięcie patentu Stratasys i późniejszy światowy rozwój tanich drukarek 3D, przez ogromną liczbę małych firm. Adrian Bowyer rozwinął pogląd, że wygasające patenty z oryginalnej technologii FDM mogłyby zostać wykorzystane do opracowania systemu AM typu *open source*, który byłby zdolny do samo-replikacji. Opracowany system RepRap [34] zainspirował kolejnych twórców, do budowy wysoce funkcjonalnych, niedrogich systemów FDM, dostępnych dla hobbystów, ale także skutecznych w produkcji komercyjnej w pełni profesjonalnych elementów, np. w lotnictwie, medycynie, modelarstwie, itd.

FDM jest spopularyzowaną nazwą handlową metody, w normach międzynarodowych oznaczanej jako FFF (ang. *Fused Filament Fabrication*). Proces ten należy do szerszej grupy technologii znanej pod akronimem MEX (ang. *Material Extrusion*), obejmującej wytłaczanie metalu, polimeru, czy betonu. ASTM (ang. *American Society for Testing and Materials*) formalnie zdefiniowała procesy MEX jako „proces wytwarzania przyrostowego, w którym materiał jest selektywnie dozowany przez dyszę lub zwężkę” [29]. Obecnie FFF to już nie tylko metoda wytwarzania modeli koncepcyjnych czy elementów dla prototypów ale także w pełni funkcjonalnych wyrobów o wysokiej jakości z szerokiej gamy tworzyw sztucznych, w relatywnie krótkim czasie. Polega na osadzaniu fluidyzowanego w komorze grzewczej materiału termoplastycznego, w postaci cienkich warstw, jedna na drugiej, w odpowiednich odstępach (Rys. 6). Stopiony polimer stygnie podczas osadzania warstwa po warstwie ze względu na niższą temperaturę otoczenia, twardnieje i konsoliduje z sąsiednią warstwą.



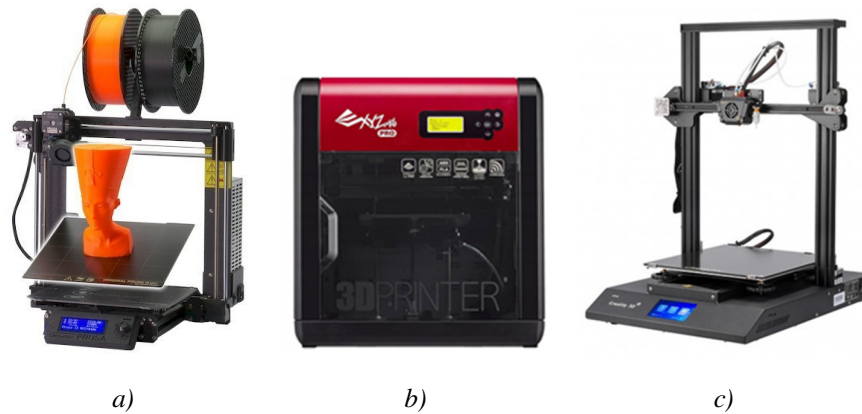
Rysunek. 6. Schemat procesu druku metodą FDM/FFF [28]

Proces FFF jest wspierany poprzez dostępność różnorodnych materiałów termoplastycznych, takich jak ABS, nylon 12, poliwęglan (PC), mieszanka PC-ABS i inne. Dotyczy to także wysokowytrzymałych tworzyw termoplastycznych posiadających wysokie właściwości wytrzymałościowe oraz dużą odporność na działanie wysokich temperatur oraz chemikaliów. Jako materiał podporowy istnieje możliwość wykorzystania materiału biodegradowalnego, łatwo łamliwego, rozpuszczalnego w kąpieli ługowej, usuwalnego poprzez wytrawienie [22].

Na obecnym etapie rozwoju procesy FFF zapewniają szereg korzystnych cech techniczno-ekonomicznych spośród metod produkcji elementów z tworzyw termoplastycznych, w związku ze stosunkowo szybkim tempem budowy części oraz niewielkimi stratami materiałowymi. Z uwagi na łatwość implementacji, dużą dostępność systemów FFF, umożliwiającą wytwarzanie produktów bliżej punktu ich wykorzystania, automatyczny tryb budowy, zazwyczaj w jednej operacji, metoda ta oferuje krótkie czasy realizacji zleceń produkcyjnych i uproszczenie łańcucha dostaw. W przypadku drukowania nieskomplikowanych geometrii proces FFF jest prosty. Końcówkę głowicy drukarki należy przecierać między kolejnymi warstwami, aby usunąć nadmiar materiału, ale poza tym drukowanie jest ciągłe. Dodatkowo nie wymaga drogiego oprzyrządowania specjalistycznego, umożliwiając realizację druku 3D także w warunkach biurowych. Obecnie tanie drukarki 3D typu *open source* są uważane za systemy o dużym potencjale dla przyszłości produkcji. Już obecnie można kupić drukarkę 3D i mieć możliwość jej aktualizacji nawet po wielu latach do najnowszej wersji, chroniąc system przed zdezaktualizowaniem się.

Na rysunku 7 przedstawiono kilka drukarek desktopowych, których cena nie przekracza 5 tysięcy złotych.

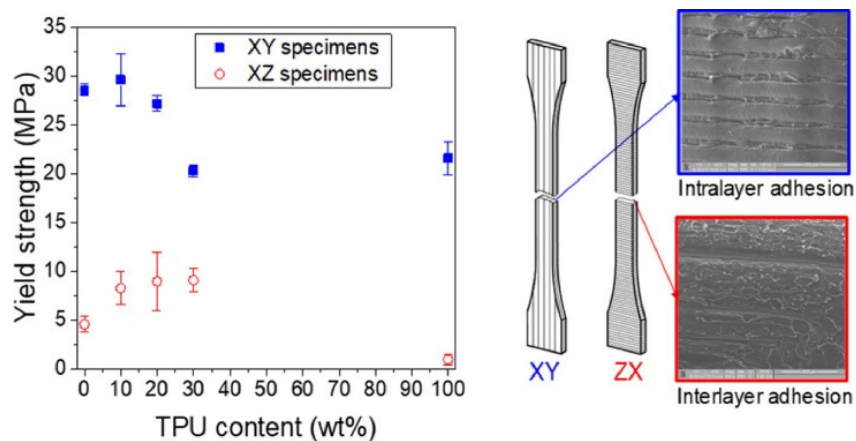




Rysunek 7. Desktopowe drukarki 3D: a) Prusa i3 MK3S+[31]; b) XYZprinting da Vinci 1.0 Pro 3in1 [32]; c) Creality CR-X Pro [33]

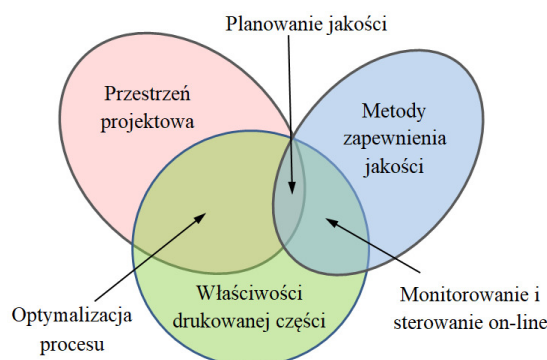
Istnieje kilka barier uniemożliwiających szybsze rozpowszechnienie procesów FFF, jak: ograniczona dokładność wykonania, stosunkowo wysoki koszt i długi czas jednostkowy operacji w kontekście produkcji wielkoseryjnej i masowej, ograniczenia materiałowe, w tym koszt niektórych materiałów [23], ograniczenia rozmiaru produkowanych elementów ich gęstości oraz wykończenia powierzchni zewnętrznych. Istotny jest również wymóg posiadania zaawansowanego oprogramowania CAD/CAM umożliwiającego podział modelu na warstwy, generowania ścieżek druku 3D (umożliwiających zapis danych programu w odpowiednim formacie oraz wirtualną symulację formowania wytwarzanych części). Większość drukarek 3D dostępnych obecnie na rynku nakłada znaczne ograniczenia rozmiaru na części, ograniczając tym samym zakres ich stosowania.

W technologiach warstwowych właściwości wytrzymałościowe w kierunku osi Z (kierunek nakładania filamentu) są znacznie niższe od właściwości uzyskiwanych w płaszczyźnie XY (Rys. 8).



Rysunek 8. Wpływ kierunku druku na wytrzymałość na rozciąganie mieszanki elastomerów termoplastycznych (TPE) [24]

W związku z tym technologia FFF nie jest wykorzystywana do budowy części oraz podzespołów silnie obciążonych mechanicznie. Obecnie największą barierą w szybszym rozwoju technologii jest niepewność działania wytworzonych komponentów i ich trwałość ze względu na małą ciągle dojrzałość technologii wytwarzania przyrostowego i ograniczone rozpowszechnienie wiedzy na jej temat. Stąd celowa jest intensyfikacja prac badawczych, które wypełniłyby szereg białych plam w obszarze tej technologii i przyczyniły się do jej popularyzacji. Pollard [4] opracował diagram Venna dla zademonstrowania wzajemnego położenia różnych obszarów badawczych (Rys. 9).



Rysunek 9. Diagram Venna dla obszarów badań w dalszym rozwoju technik AM [4]

Celem ogólnym jest szybka produkcja elementu o odpowiedniej jakości geometrycznej, zoptymalizowanej wytrzymałości i akceptowalnych kosztach. Kształtowanie przestrzeni projektowej pozwala na elastyczność systemu umożliwiającą produkcję szeregu komponentów. Metody zapewnienia jakości powinny gwarantować niezawodność komponentów wytwarzanych przez system, np. zgodność z oryginalnym projektem i unikanie braków wytwórczych. Modele właściwości części pozwalają estymować końcowe właściwości mechaniczne wytworzonego komponentu i planować jakość, poprzez interakcje pomiędzy metodą krojenia, dystrybucją ciepła, itp., a właściwościami końcowej części. Optymalizacja procesu powinna mieć na uwadze dostosowanie metod projektowania i „krojenia” w celu poprawy wytrzymałości końcowej części. Monitorowanie przebiegu procesu powinno pozwolić na dalsze podwyższenie poziomu niezawodności produkcji, umożliwiając wykonywanie każdorazowo, także za pierwszym razem, poprawnej części.

### 3. Systemy CAD/CAM

Różne technologie druku 3D, parametry procesu lub materiały wprowadzają ograniczenia geometryczne dotyczące tego, co można wyprodukować, a co nie. Kluczową kwestią w ocenie modelu pod kątem możliwości produkcyjnych jest identyfikacja krytycznych cech, które mają wpływ na proces drukowania. Efektywne wykorzystanie potencjału wytwarzania przyrostowego wymaga więc kompleksowych, opartych na wiedzy systemów wspomaganie projektowania konstrukcyjnego i technologicznego CAD/CAM, które mogą pomóc projektantom

i inżynierom zrozumieć, w jaki sposób projekt geometryczny i parametry procesu będą wpływać na siebie nawzajem oraz jak skonfigurować parametry procesu, aby spełniały specyfikacje konstrukcyjne [28]. W ostatnim czasie dokonano w tym zakresie znaczącego postępu. Systemy CAD/CAM oraz nowa klasa systemów komputerowego wspomaganie projektowanie dla wytwarzania przyrostowego DFAM (ang. *Design for Additive Manufacturing*) zostały opracowane w celu ułatwienia projektowania i poprawy jakości i funkcjonalności produktów. DFAM ujmuje wiedzę jak i praktyczne umiejętności, które umożliwiają konstruktorowi lub technologowi tworzenie obiektów optymalnie wykorzystujących geometryczny potencjał techniki wytwarzania przyrostowego. Przydatne w tym względzie metody lub narzędzia DFAM obejmują optymalizację topologii produktu, projektowanie struktur kratowych lub komórkowych, projektowanie wielomateriałowe, konsolidację produkowanych części i inne specyficzne dla danej techniki wytwarzania przyrostowego. Metody optymalizacji topologicznej często prowadzą do geometrii, która nie jest kompatybilna z tradycyjnym wytwarzaniem ubytkowym, ale jest potencjalnie kompatybilna z technologiami wytwarzania przyrostowego [26]. DFAM nie zawsze jest oddzielone od szerszego projektowania pod wytwarzanie DFM (ang. *Design for Manufacturing*), ponieważ w wielu przypadkach proces ma charakter hybrydowy, zawierając zarówno etapy addytywne, jak i ubytkowe. Wytwarzanie przyrostowe daje wielką szansę zastosowania zasad DFM w innowacyjny sposób, aby zmaksymalizować korzyści, a także zminimalizować wady technologii. DFAM oferuje możliwość realizacji niezwykle złożonych geometrii bez konieczności zwiększania kosztów użytych w porównaniu z prostymi geometriami, umożliwiając optymalizację produktu bez tradycyjnych ograniczeń produkcyjnych

#### 4. Podsumowanie

Technologie druku 3D umożliwiają drukowanie wysokojakościowych i funkcjonalnych prototypów w relatywnie krótkim czasie. Szeroka gama materiałów umożliwia drukowanie elementów z tworzyw termoplastycznych posiadających wysokie właściwości wytrzymałościowe oraz dużą odporność na działanie wysokich temperatur oraz chemikaliów. Istotnym problemem w przypadku technologii FDM/FFF jest duża anizotropia wydrukowanych części oraz konieczność postprocessingu (dodatkowej obróbki wykończeniowej mającej na celu usunięcie charakterystycznych linii łączenia kolejnych warstw materiału).

Produkcja addytywna umożliwia produkcję nietypowych części zamiennych, zwłaszcza gdy nie są już dostępne lub koszt ich zakupu jest zbyt wysoki. Gwarantuje to mniejszą przestojów w procesach wytwarzania, ograniczając do minimum czas oczekiwania na części do maszyn wykorzystywanych na linii produkcyjnej.

Technologie druku 3D są szeroko wykorzystywane począwszy od przemysłu motoryzacyjnego, energetycznego, maszynowego i zbrojeniowego, architektury i budownictwa, medycyny i stomatologii poprzez budownictwo i edukację aż po branżę reklamową, przemysł spożywczy i modę.

Kolejnymi wyzwaniem stojącymi przed wytwarzaniem przyrostowym to druk wyrobów wielomateriałowych, druk wielkogabarytowy, wysokowydajny druk 3D, precyzyjny druk 3D, wytwarzanie hybrydowe oraz druk naprawczy i mikro-druk.

**LITERATURA**

1. MIECIELICA M. Techniki szybkiego prototypowania - Rapid Prototyping. *Przegląd Mechaniczny* 02/2010, str. 39-45.
2. GIBSON I., ROSEN D., STUCKER B.: *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Springer 2015.
3. MARTORELLI M., GERBINO S., LANZOTTI A., PATALANO S., VITOLO F.: Flatness, circularity and cylindricity errors in 3D printed models associated to size and position on the working plane, *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing* pp 201-212, 2016.
4. POLLARD D.: Improved thermal control and mechanical property evaluation for multi-dimensional fused filament fabrication of sandwich cores, 2018.
5. BIKAS H., STAVROPOULOS P., CHRYSOLOURIS G.: Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *Int J Adv Manuf Technol* (2016) 83:389–405, 2015.
6. PATTERSON A.E., MESSIMER S.L., FARRINGTON P.A.: Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need, *Technologies* 5(2017)2.
7. ATZENI E., SALMI A.: Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62(2012), 1147–1155.
8. ZIELIŃSKI D.: Optymalizacja topologiczna części lotniczych. *Staleo: Portal przemysłowy*, 1-6, 2018.
9. KIRCHHEIM A., DENNIG H. J., ZUMOFEN L.: Why Education and Training in the Field of Additive Manufacturing is a Necessity, *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications*, 229-335, 2018.
10. PETROVIC V., GONZALEZ J.V.H., FERRANDO O.J., GORDILLO J., DPUCHADES. J.R.B., GRINAN L.P.: Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies, *Int. J. Prod. Res.*, 49(2011)4, 1061-1079.
11. KUMMAR L., KRISHNADAS NAIR C.G: Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry, *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies* pp 39-54, 2016.
12. Serwis internetowy: <https://3dwpraktyce.pl/2020/11/satair-produkuje-pierwsza-certyfikowana-drukowana-w-3d-czesc-do-samolotu-airbus> (dostęp 29.11.2021).
13. MEHRPOUYA M., DEHGHANGHADIKOLAEI A., FOTOVVATI B., VOISOOGHNI A., EMAMIAN S.S., GISARIO A.: The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review, *Appl. Sci.* (2019)9, 3865.
14. ADDEPALLI P., THIRUKKURUNGUDI S.: An Investigation of in fill process variables to reduce warpage in fused filament fabrication, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(2021)01.
15. WANG C., TAN X.P., TOR S.B., LIM C.S.: Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives, *Additive Manufacturing*, 36(2020), 101538.

16. BROOKS H., LUPEANU M.E, PIORKOWSKI B.: Research towards high speed extrusion freeforming, *International Journal of Rapid Manufacturing*, 3(2013)2-3, 154-171.
17. BOSCHETTO A., BOTTINI L., VENIALI F.: Integration of FDM surface quality modeling with process design, *Additive Manufacturing*, 12(2016)B, 334-344.
18. HU K., JIN S., WANG C.L.: Support slimming for single material based additive manufacturing, *Computer-Aided Design*, 65(2015), 1-10.
19. GUO N., LEU M.C.: Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *Frontiers of Mechanical Engineering* 8(2013), 215–243.
20. BEYCA O.F., HANCERLIOGULLARI G., YAZICI I.: Industry 4.0: Managing The Digital Transformation, *Additive Manufacturing Technologies and Applications*, Springer, 217-232.
21. PARANDOUSH P., LIN D.: A Review on Additive Manufacturing of Polymer-Fiber Composites, *Composite Structures* 182:36-53.
22. DIKSHIT V., BHUDOLIA S.K., JOSHI S.C.: Multiscale Polymer Composites: A Review of the Interlaminar Fracture Toughness Improvement, *Fibers* 2017, 5(2017)4, 38.
23. YEONG W.Y., CHUA C.K., LEONG K.F., CHANDRASEKARAN M.: Rapid prototyping in tissue engineering: challenges and potential, *Trends in Biotechnology*, 22(2004)12, 643-652.
24. de LEON A.S., DOMINGUEZ-CALVO A., MOLINA S.I.: Materials with enhanced adhesive properties based on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends for fused filament fabrication (FFF), *Materials & Design*, 182(2019).
25. QI Q., PAGANI L., SCOTT P.J., JIANG X.: A categorical framework for formalising knowledge in additive manufacturing, *15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing - CIRP CAT 2018, Procedia CIRP 75 (2018)*, 87-91.
26. LEARY M., MERLI L., TORTI F., MAZUR M., BRANDT M.: Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support free optimal structures, *Mater. Des.* 63 678–690.
27. Serwis internetowy: <https://spaceflight101.com/iss/made-in-space-1st-iss-3d-printer> (dostęp 19.11.2021).
28. Serwis internetowy: <https://rapidfab.ricoh-europe.com/de/technologies/fdm/> (dostęp 29.11.2021).
29. ISO/ASTM 52900:2015 - Additive manufacturing — General principles — Terminology.
30. Serwis internetowy Forsal: Reaktor atomowy i śmigłowce z drukarki 3D? Czyli jak technologie rodem z lotnictwa mogą rozwinąć energetykę jądrową, <https://forsal.pl/biznes/energetyka/artykuly/7809816,reaktor-atomowy-i-smiglowce-z-drukarki-3d-lotnictwo-energetyka-jadrowa.html>, (dostęp 19.11.2021).
31. Serwis internetowy: [https://www.prusa3d.com/pl/kategoria/original-prusa-i3-mk3s/?gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0WiAZ3t-K9IFw3vDbDLNu6ePTuh58SAkYa5GuMpqNP4DL7GT83PjTRAaAivgEALw\\_wcB/](https://www.prusa3d.com/pl/kategoria/original-prusa-i3-mk3s/?gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0WiAZ3t-K9IFw3vDbDLNu6ePTuh58SAkYa5GuMpqNP4DL7GT83PjTRAaAivgEALw_wcB/) (dostęp 19.11.2021).

32. Serwis internetowy: [https://www.conrad.pl/p/drukarka-3d-xyzprinting-davinci-10-pro-3in1-3flasxeu01k-1498548?AdW=SEARCH&gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0WgVvd8Wh taGmhH-QciXeFT9OVFWHkkQKhLPy-SEQnMK2-fctji5YUMaAgeAEALw\\_wcB](https://www.conrad.pl/p/drukarka-3d-xyzprinting-davinci-10-pro-3in1-3flasxeu01k-1498548?AdW=SEARCH&gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0WgVvd8Wh taGmhH-QciXeFT9OVFWHkkQKhLPy-SEQnMK2-fctji5YUMaAgeAEALw_wcB) (dostęp 19.11.2021).
33. Serwis internetowy: [https://botland.com.pl/drukarki-3d-creality-seria-cr/17460-drukarka-3d-creality-cr-x-pro-6971636409397.html?gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0Wgi8o0xpZbhO TI4y5L67579vrDKSYhCilT3dtlrXi7KP1W8C6Nv\\_eAaArYrEALw\\_wcB](https://botland.com.pl/drukarki-3d-creality-seria-cr/17460-drukarka-3d-creality-cr-x-pro-6971636409397.html?gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0Wgi8o0xpZbhO TI4y5L67579vrDKSYhCilT3dtlrXi7KP1W8C6Nv_eAaArYrEALw_wcB) (dostęp 19.11.2021).
34. JONES R., HAUFE P., SELLS E., IRAVANI P., OLLIVER V., PALMER C.: A. Bowyer: RepRap – the replicating rapid prototype, *Robotica*, 29(2011)1: Robotic Self-X Systems.
35. LASI H., FETTKE P., KEMPER H.-G., FELD T., HOFFMANN M.: Industry 4.0, *Business & Information Systems Engineering* 6(2014), 239–242.
36. Additive Manufacturing: SASAM Standardisation Roadmap, 2014.