

INŻYNIERIA ROLNICZA

Seria: Monografie i Rozprawy

ISBN 978-83-64377-67-9

Jacek Mazur

Wybrane aspekty druku addytywnego 3D

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Kraków 2024

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Wybrane aspekty druku addytywnego 3D

Jacek Mazur

Kraków 2024

Rada Naukowa Wydawnictwa

Radomir Adamovsky, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic

Aylin Altan, Mersin University, Turkey

Vlodymyr Bulgakov, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

Karl-Heinz Dammer, Leibniz-Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy, Germany

Dariusz Dziki, University of Life Sciences in Lublin, Poland

Pavol Findura, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Dorota Haman, University of Florida, USA

Zuzana Hlaváčová, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Lisa A. Holden, College of Agricultural Sciences, USA

Ryszard Hołownicki, Research Institute of Horticulture in Skierniewice, Poland

Bruno Huyghebaert, Walloon Agricultural Research Centre, Belgium

Jacek Przybył, Poznań University of Life Sciences, Poland

Alaa Subr, University of Baghdad, Iraq

Bernardo Strasbourg, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil

Muhammad Sultan, Bahauddin Zakariya University, Pakistan

Komitet Redakcyjny

Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń – redaktor naczelny

Prof. dr hab. inż. Sławomir Kocira – sekretarz

Recenzenci:

dr hab. inż. Adam Ekielski, prof. SGGW – SGGW w Warszawie

dr hab. inż. Marek Jałbrzykowski, prof. PB – Politechnika Białostocka

Wydawca:

Wydawnictwo „Inżynieria Rolnicza”

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

ISBN 978-83-64377-67-9

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 6,58; ark. druk. 5,85

Nakład: 100 egz.

Spis treści:

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH AKRONIMÓW I OZNACZEŃ STOSOWANYCH W PRACY	5
1. WSTĘP	7
2. TECHNOLOGIE DRUKU 3D.....	11
2.1. Druk z tworzyw termoplastycznych FDM/FFF	11
2.2. Stereolitografia - SLA.....	13
2.3. Cyfrowe przetwarzanie światła - DLP	15
2.4. <i>PolyJet</i> / MJP	16
2.5. Druk z proszku gipsowego - CJP.....	17
2.6. Druk ze sklepanych proszków - <i>Binder Jetting</i>	18
2.7. Selektywne spiekanie laserowe - SLS.....	19
2.8. Selektywne topienie metali laserem - SLM / DMLS	20
2.9. Selektywne topienie metali wiązką elektronów - EBM	21
2.10. Druk z proszków polimerowych sklepanych klejem aktywowanym promieniami UV - MJF	22
2.11. Inne metody druku 3D	23
2.11.1. <i>Druk 3D żywności</i>	26
3. DRUK Z MATERIAŁÓW TERMOPLASTYCZNYCH METODĄ FDM/FFF....	29
3.1. Konstrukcja drukarek w technologii FDM/FFF	31
3.1.1. <i>Inne aspekty konstrukcji drukarek 3D drukujących w technologii FDM</i>	38
3.2. Wpływ parametrów druku 3D na jakość wytworzonego elementu.....	45
3.2.1. <i>Temperatura</i>	47
3.2.2. <i>Szybkość druku</i>	47
3.2.3. <i>Kierunek druku oraz geometria druku</i>	47
3.2.4. <i>Procent wypełnienia</i>	49
3.2.5. <i>Wzór wypełnienia</i>	50
3.2.6. <i>Grubość warstwy</i>	51
3.3. Materiały wykorzystywane do druku FDM/FFF	51
3.3.1. <i>ABS (Akrylonitrylo-Butadieno-Styren):</i>	53
3.3.2. <i>ASA (Akrylonitryl-Styren-Akrylan)</i>	54
3.3.3. <i>PLA (Polilaktyd)</i>	55
3.3.4. <i>PET-G</i>	56
3.3.5. <i>Poliamid</i>	56

3.3.6. Polipropylen (PP).....	57
3.3.7. HIPS.....	58
3.3.8. FLEX (TPU - termoplastyczny poliuretan).....	58
3.3.9. Poliwęglan (PC).....	59
3.3.10. PEEK/ PEAK.....	59
3.3.11. Filamenty podporowe (PVA, BVOH).....	60
3.3.12. Inne tworzywa stosowane przy druku 3D w technologii FDM.....	60
3.3.13. Tworzywa zmodyfikowane.....	60
3.4. Najczęstsze błędy druku.....	61
4. TWORZENIE I OBRÓBKĄ MODELI PRZESTRZENNYCH DO DRUKU 3D W TECHNOLOGII FDM/FFF.....	71
4.1. Przykłady programów do tworzenia i obróbki modeli przestrzennych do druku 3D.....	71
4.2. Podstawowe zasady przygotowania modelu 3D do druku w technologii FDM/FFF.....	71
4.3. Możliwość uzyskania modeli 3D z innych źródeł.....	72
4.4. Oprogramowanie do obróbki modeli przestrzennych przed drukiem 3D w technologii FDM/FFF.....	73
4.5. Obróbka modelu po zakończeniu druku.....	74
4.6. Możliwości wykorzystania AI do optymalizacji druku 3D.....	75
5. PODSUMOWANIE.....	77
6. BIBLIOGRAFIA.....	79
STRESZCZENIE.....	91
SPIS RYSUNKÓW.....	92
SPIS TABEL.....	94

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH AKRONIMÓW I OZNACZEŃ STOSOWANYCH W PRACY

3DCP	– technologia druku 3D betonem (ang. <i>3D Construction Printing</i>),
ABS	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D - akrylonitrylo-butadieno-styren,
AI	– sztuczna inteligencja (ang. <i>Artificial Intelligence</i>),
AM	– wytwarzanie addytywne (ang. <i>Additive Manufacturing</i>),
ASA	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – akrylonitryl-styren-akrylan,
BJ	– technologia druku 3D polegająca na spajaniu proszków (ang. <i>Binder Jetting</i>),
BVOH	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D głównie jako materiał podporowy - butenediol vinyl alcohol co-polymer,
CD	– oznaczenie napędy i nośnika optycznego (ang. <i>Compact Disc</i>),
CFRT	– kompozyty z tworzyw termoplastycznych wzmocnionych długimi włóknami (ang. <i>Continuous Fiber Reinforced Composites</i>),
CJP	– technologia druku 3D z proszku gipsowego (ang. <i>Color Jet Printing</i>),
CoreXY	– oznaczenie systemu ruchu głowicy drukarskiej 3D,
Delta	– oznaczenie systemu ruchu głowicy drukarskiej 3D,
DLP	– technologia druku 3D zbliżona do SLA (ang. <i>Direct Light Processing</i>),
DMLS	– technologia druku 3D polegająca na spajaniu proszków laserem (ang. <i>Direct Metal Laser Sintering</i>),
DVD	– oznaczenie napędy i nośnika optycznego (ang. <i>Digital Video Disc</i> lub <i>Digital Versatile Dis</i>),
EBM	– technologia druku 3D polegająca na spajaniu proszków wiązką elektronów (ang. <i>Electron Beam Melting</i>),
FDM	– technologia druku 3D polegająca na wytłaczaniu z termoplastów (ang. <i>Fused Deposition Modeling</i>),
FFF	– technologia druku 3D polegająca na wytłaczaniu z termoplastów (ang. <i>Fused Filament Fabrication</i>),
G-code	– znormalizowany język zapisu poleceń dla urządzeń CNC i drukarek 3D,
H-Bot	– oznaczenie systemu ruchu głowicy drukarskiej 3D,
HIPS	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – polistyren wysokoudarowy,
LCD	– wyświetlacz ciekłokrystaliczny (ang. <i>Liquid-Crystal Display</i>),
LDM	– technologia druku 3D polegająca na osadzaniu płynnego materiału (np. gliny, porcelany itp.) a następnie jego spiekaniu (ang. <i>Liquid Deposition Modeling</i>);
LOM	– technologia druku 3D polegająca na łączeniu ukształtowanych fragmentów folii lub papieru (ang. <i>Laminated Object Manufacturing</i>),
MJF	– technologia druku 3D polegająca na spajaniu proszków klejem aktywowanym UV (ang. <i>Multi Jet Fusion</i>),
MJM	– technologia druku 3D (ang. <i>Multi Jet Modeling</i>),
MJP	– technologia druku 3D zbliżona do druku atramentowego (ang. <i>Multi Jet Printing</i>)
PA	– Nylon - tworzywo wykorzystywane w druku 3D – poliamid,
PC	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – poliwęglan,
PC/ABS	– mieszanina tworzywa wykorzystywane w druku 3D – PC + ABS,

PEEK	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – polieteroeteroketon,
PEI	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – polieteroimid,
PETG (PET-G)	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D - politereftalan etylenu,
PJ	– technologia druku 3D zbliżona do druku atramentowego (ang. <i>PolyJet</i>)
PLA	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D - polilaktyd,
PMMA	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – poly(methyl methacrylate),
Polar	– oznaczenie systemu ruchu głowicy drukarskiej 3D,
POM	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – poliacetal,
PP	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – polipropylen,
PVA	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D głównie jako materiał podporowy – poli(alkohol winylowy),
RepRap	– projekt drukarki 3D umożliwiający samoreplikację,
SCARA	– oznaczenie systemu ruchu głowicy drukarskiej 3D (ang. <i>Selective Compliance Articulated Robot Arm</i>),
SFRC	– kompozyty z tworzyw termoplastycznych wzmocnionych krótkimi włóknami (ang. <i>Short Fiber Reinforced Composites</i>),
SHASAM	– technologia druku 3D polegająca na selektywnym spiekaniu materiału strumieniem gorącego powietrza,
SLA	– stereolitografia technologia druku 3D utwardzaniu płynnych materiałów z wykorzystaniem światła głównie UV (ang. <i>Stereolithography</i>),
Slicer	– oprogramowanie do cięcia modeli na warstwy – jeden z kroków przygotowywania obiektu do wydruku 3D,
SLM	– technologia druku 3D polegająca na spajaniu proszków metali laserem (ang. <i>Selective Laser Melting</i>),
SLS	– technologia druku 3D polegająca na spajaniu proszków laserem (ang. <i>Selective Laser Sintering</i>),
TPE	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D - termoplastyczny elastomer poliestrowy,
TPE/TPU	– mieszanina tworzywo wykorzystywana w druku 3D – TPE + TPU,
TPU	– tworzywo wykorzystywane w druku 3D – termoplastyczny poliuretan,
UV	– promieniowanie ultrafioletowe.

1. WSTĘP

Technika i technologia druku 3D ma wpływ na wiele aspektów życia, takich jak sztuka, edukacja, medycyna, lotnictwo, inżynieria oraz wiele innych (Candi i Beltagui, 2018).

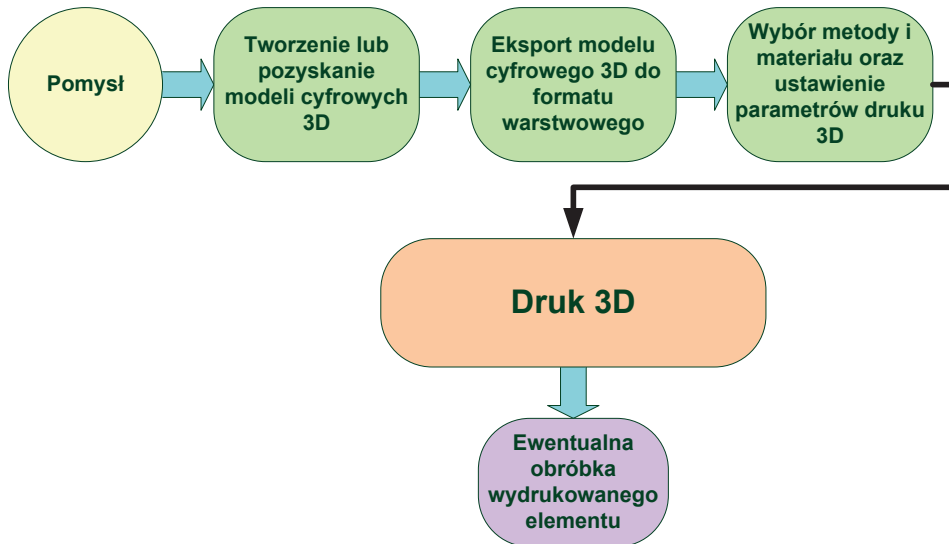
Druk 3D to proces tworzenia trójwymiarowego obiektu o praktycznie dowolnym kształcie z modelu cyfrowego. Druk 3D można popularnie nazwać wytwarzaniem addytywnym (AM - *Additive Manufacturing*). Upraszczając definicję, druk 3D jest metodą polegającą na nakładaniu materiału budulcowego warstwa po warstwie i jego selektywnym spajaniu. Każda technologia druku 3D używa innego materiału, który spajany jest w inny sposób (Standard 2012, ISO/ASTM 52900).

Przyjmuje się, że początki druku 3D sięgają lat 80-tych (Yadav i in., 2024), jednak to właśnie obecnie obserwujemy dynamiczny rozwój tej technologii, spowodowany zwiększoną dostępnością i obniżonymi kosztami materiałów i urządzeń. Drukowanie w technologii 3D zostało po raz pierwszy użyte przez Charlesa Hulla, który w 1984 przedstawił drukarkę 3D, a następnie w 1986 ją opatentował. Drukarka 3D opracowana przez Charlesa Hulla wykorzystywała technologię stereolitografii (SLA). SLA to potoczna nazwa jednej z technologii druku 3D, która wykorzystuje wiązkę lasera do miejscowego utwardzenia materiału (najczęściej w postaci specjalnej żywicy) (Hull, 1984).

Kolejnym krokiem w rozwoju tych technologii było opracowanie przez Scotta Crumpa w 1988 i w 1989 urządzenia do drukowania obiektów w technologii FDM - *Fused Deposition Modeling* (Scott Crump, 1989). FDM polega na topieniu tworzyw termoplastycznych, które są następnie nakładane warstwa po warstwie na platformę drukarki 3D, spajając (stapiając/"przyklejając" się warstwa po warstwie) do siebie, aż do chwili nałożenia wszystkich warstw. Technologia FDM jest obecnie najbardziej popularna w użyciu - głównie ze względu na możliwość jej zastosowania w tanich urządzeniach.

Takie były początki wykorzystania druku przestrzennego, natomiast obecnie dostępnych jest wiele różnych rodzajów technologii drukowania 3D, z których każda ma swoje unikalne cechy i zastosowanie.

W obecnych czasach druk 3D stał się bardzo popularny i prężnie rozwija się wielu dziedzinach, począwszy od przemysłu aż po zastosowania popularne (domowe) (Rayna i Striu-kova, 2016).



Rys. 1. Typowe etapy druku 3D (opracowanie własne)

W chwili obecnej druk 3D znajduje coraz szersze zastosowanie w szeroko rozumianym przemyśle do wytwarzania często bardzo złożonych przestrzennie elementów lub wytwarzania ich przy niskich nakładach początkowych, przy wytwarzaniu wzorów, modeli, prototypów czy produkcji małoseryjnej i jednostkowej. W obrębie przemysłu technologie te bardzo chętnie wykorzystuje się w wielu obszarach tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych (Bikas i in., 2016; Gao i in., 2015; Calignano i in., 2017; Peng i in., 2018; Niaki i in., 2019) np.:

- W motoryzacji do wykonywania części zamiennych, narzędzi oraz prototypowych elementów karoserii (Richardson, 2012; Tuazon i in., 2022);
- W lotnictwie czy przemyśle kosmicznym np. do tworzenia lekkich elementów z tworzyw które mogą z powodzeniem zastępować elementy metalowe, nie ustępując pod względem wytrzymałości, a charakteryzując się niską masą, czy możliwością wytworzenia bardzo złożonych przestrzennie elementów bez konieczności ich późniejszego łączenia np. poprzez spawanie. Dodatkowo często są one lżejsze i bardziej wytrzymałe niż te same elementy wykonane za pomocą technologii tradycyjnych (Najmon i in., 2019; Martinez i in., 2022);
- W budownictwie np. do drukowania elementów domów czy mieszkań z zaprawy betonowej (np. poprzez precyzyjne tłoczenie) wzmocnionej geopolimerami czy włóknami w celu uzyskania mocniejszej struktury (Alami i in., 2023);
- W medycynie metoda stosowana jest między innymi do druku protez kończyn, naczyń krwionośnych, części układu kostnego (np. zębów, kości czy elementów twarzoczaszki) czy nawet elementów tkanek. Oprócz tego, wytworzone tą technologią elementy pozwalają lepiej wyedukować lekarzy czy przygotować ich do nadchodzącej operacji, którą

- będą przeprowadzali na pacjencie (Placone i Engle, 2018; Haghighashtiani i in., 2020; Prakoso i in., 2023);
- W obszarze mody i stylizacji coraz powszechniej druk 3D stosowany jest w tworzeniu spersonalizowanych elementów ubioru, czy obuwia oraz projektowaniu i modyfikacji unikalnych elementów strojów (Vanderploeg i in., 2016);
 - W jubilerstwie coraz częściej wykorzystywana jest do tworzenia elementów o bardzo skomplikowanych kształtach z możliwością wykonywania jej wielokrotnie czy łatwego jej dalszego modyfikowania. Oprócz tego możemy jak w wielu innych dziedzinach łatwo tworzyć modele, które mogą być analizowane czy modyfikowane przed wdrożeniem ozdób do dalszej produkcji (Bingwen, 2021);
 - W żywności czy bio-druku technologie druku 3D wykorzystywane są do wytwarzania elementów żywności głównie metodami wytłaczania niskotemperaturowego (ekstruzji) zazwyczaj w temperaturze otoczenia. W tej dziedzinie wykorzystywane są jednak także inne metody druku np. wytłaczanie termiczne (wytłaczanie podgrzewanego – upłynnionego materiału), sklejanie proszków spożywczych itp. (Dankar i in., 2018);
 - Druk 3D wykorzystywany jest szeroko także w tzw. zastosowaniach popularnych czyli domowych. Użytkownicy drukują proste elementy takie jak pudełka, obudowy, pojemniki czy po prostu elementy dekoracyjne na swoje potrzeby;
 - Inne zastosowania będące w fazie badań i rozwoju.

2. TECHNOLOGIE DRUKU 3D

Poniżej omówione zostanie kilka przykładów dostępnych obecnie technologii druku 3D. Każda metoda ma swoje zalety i ograniczenia, a wybór technologii zależy od takich czynników, jak złożoność pożądanego obiektu, właściwości materiału, wymagania dotyczące wykończenia powierzchni i oczywiście budżet.

Druk 3D czy ściśle z nim związana produkcja przyrostowa w zależności od technologii druku wykorzystuje różne materiały (Nickels, 2016; Ford i Despeisse, 2016; Calignano i in., 2017; Peko i in., 2018; Tran i Peng, 2020; Freeman i in., 2023).

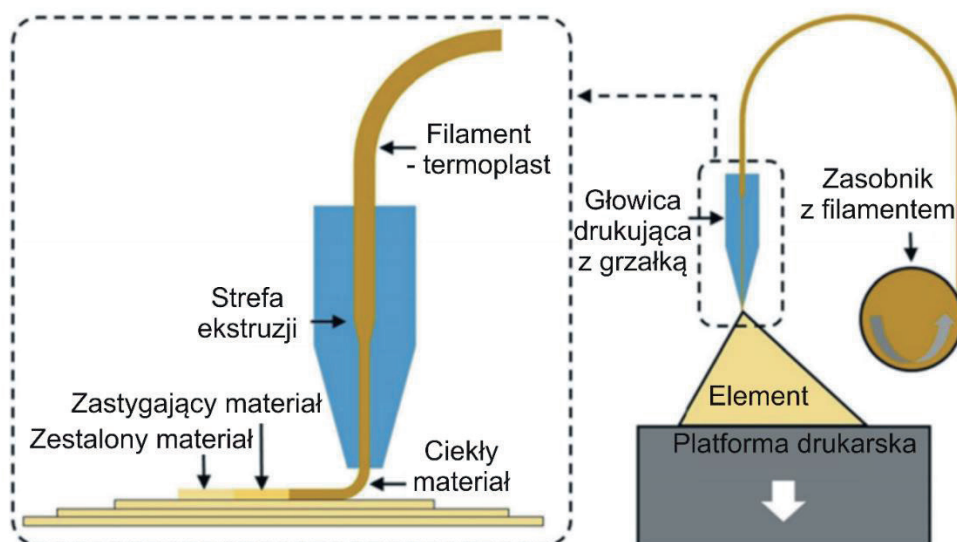
1. Produkty stałe:
 - a. Tworzywa termoplastyczne (np. druk metodą FDM/FFF);
 - b. Papier, tworzywa (np. druk metodą LOM).
2. Płyny:
 - a. Fotopolimery (np. druk metodą SLA, DLP, MJM);
 - b. Ciecze termopolaryzujące (np. druk metodą LDM).
3. Proszki:
 - a. Metale (np. druk metodą SLS, DMLS, SLM, EBM);
 - b. Tworzywa (np. druk metodą BJ, MJF, PJ, MJP);
 - c. Inne (np. druk z gipsu metodą CJP).
4. Pasty:
 - a. Beton (3DCP);
 - b. Niektóre produkty spożywcze;
 - c. Itp.

W dalszej części opracowania zostaną przedstawione bardziej szczegółowe zagadnienia związane z drukiem 3D z termoplastów (FDM/FFF).

W kolejnej części przedstawione zostały niektóre z najpopularniejszych rodzajów druku 3D:

2.1. Druk z tworzyw termoplastycznych FDM/FFF

FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) czy nazywana również FFF (ang. *Fused Filament Fabrication*) to obecnie chyba najczęściej stosowana technologia druku 3D. Polega na wytłaczaniu materiału termoplastycznego przez podgrzewaną dyszę. Metody te zaliczane są do technik przyrostowych, których cechą charakterystyczną jest wytłaczanie materiału z głowic drukujących. Warstwy są nakładane najpierw w osiach XY, a gdy drukarka 3D skończy je układać, głowica albo się podnosi do góry, albo stół roboczy opuszcza się w dół (w zależności od konstrukcji urządzenia) o wysokość warstwy, wówczas nakładana jest kolejna warstwa. Uplastycznione tworzywo sztuczne spaja się ze sobą i poniższą warstwą pod wpływem wysokiej temperatury (wychodząc z gorącej dyszy) i szybko zastyga tworząc (prawie) zwartą i zestaloną strukturę. Materiał drukarski podawany jest do głowicy w formie włókna - filamentu (Adikari, 2018; Shanmugam i in., 2021; Montez i in., 2022; Kafle i in., 2021; Kopec i in., 2023).



Rys. 2. Zasada druku metodą FDM/FFF (na podstawie Bikasi i in., 2016)

Metoda ta wykorzystuje szeroką gamę materiałów termoplastycznych, w tym ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren), ASA, PLA (kwas polimlekowy), PET-G (politereftalan etylenu), PC, czy PC-ABS i wiele innych. Wybór tworzywa z którego będzie drukowany element zależy od pożądanych właściwości drukowanego przedmiotu, takich jak wytrzymałość, elastyczność, odporność na ciepło i czynniki chemiczne, promieniowanie UV czy biodegradowalność i inne.

Do zalet tego typu druku możemy zaliczyć to, że jest on stosunkowo niedrogi (przykładowo w 2024 najtańsze drukarki kosztowały poniżej 400zł) i mogą wytwarzać szeroką gamę produktów takich jak funkcjonalne prototypy, artykuły gospodarstwa domowego, tanie części oraz wiele innych. Do zalet można także zaliczyć bardzo tani materiał drukarski, możliwość druku z materiałów pochodzenia naturalnego (np. PLA) (Joseph i in., 2023). Oczywiście technologia ta nie ustrzegła się pewnych mankamentów – można do nich zaliczyć stosunkowo długi czas druku (szczególnie elementów dużych i o złożonym kształcie), braku możliwości bezpośredniego drukowania elementów z pustymi przestrzeniami w środku, wiele elementów wymaga drukowania w procesie specjalnych podpór (usunięcie tego materiału często stwarza problemy i wymaga dodatkowego nakładu pracy) oraz gorsze parametry wytrzymałościowe (w stosunku do elementów wytworzonych metodami wtryskowymi). Druk w technologii FDM/FFF obciążony jest dość wysokim prawdopodobieństwem niepowodzenia (Jadhav i in., 2022).

Druk FDM jest szeroko stosowany w różnych branżach, m.in. w szybkim prototypowaniu, opracowywaniu produktów, produkcji niestandardowej, w placówkach edukacyjnych i projektach typu „zrób to sam”. Spowodowane jest to stosunkowo przystępną ceną, łatwością użytkowania i wszechstronnością w pracy z różnymi rodzajami materiałów termoplastycznych. W metodzie tej przyjmuje się dokładność na poziomie do 200μm (Jadhav i in., 2022).

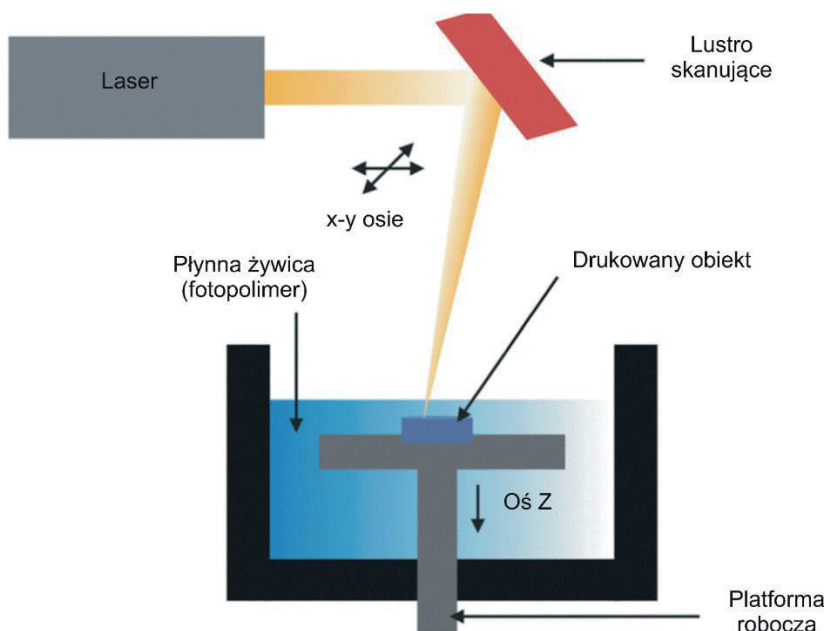
2.2. Stereolitografia - SLA

SLA (ang. *Stereolithography*) wykorzystuje proces zwany fotopolimeryzacją do tworzenia obiektów.

W uproszczeniu mechanizm druku metodą SLA polega na umieszczeniu w pojemniku ciekłej żywicy fotopolimerowej, w której zanurza się stół roboczy. Gdy stół jest opuszczany na dno pojemnika na wysokość zadanej warstwy, wiązka lasera UV lub źródła światła selektywnie "rysuje" kształt obiektu w płaszczyźnie XY (wiązka ogniskowana jest na wcześniej ustalonych punktach zwykle za pomocą zestawu specjalnych luster) powodując jej utwardzenie w tych miejscach gdzie ona pada. Po zakończeniu tej warstwy stół unosi się na wysokość kolejnej warstwy i proces się powtarza aż do chwili ukończenia całego druku. Należy pamiętać, że po zakończeniu druku element nie jest w pełni utwardzony i wymaga dodatkowych zabiegów. Po usunięciu elementu ze stołu roboczego drukarki należy usunąć pozostałości nie utwardzonego ciekłego fotopolimeru, a następnie zastosować powtórne jego naświetlanie w celu pełniejszego utrwalenia. Żywica powinna być cieczą, która szybko przyjmuje konsystencję ciała stałego po naświetleniu. Pierwsze żywice opracowane do użytku w stereolitografii opierały się na makromerach poliakrylanowych lub epoksydowych o małej masie cząsteczkowej, które tworzą szkliste sieci po fotoinicjowanej polimeryzacji i sieciowaniu (Wendel i in., 2008; Ferry i in., 2010; Wang i in., 2016; Manapat i in., 2017; Vaz i Kumar 2021; Kaffle i in., 2021; Kopec i in., 2023).

Aktualnie występują 2 główne konfiguracje tego rodzaju urządzeń: z góry do dołu – the top-down orientation oraz z dołu do góry – the bottom-up orientation. Pierwsza z nich polega na umieszczeniu lasera nad zbiornikiem z ciekłą żywicą. Platforma robocza umieszczona jest w początkowej fazie procesu wydruku na poziomie górnej powierzchni cieczy. W miarę nakładania kolejnych warstw materiału następuje jej obniżanie, aż do uzyskania pełnej geometrii drukowanego modelu.

W drukarkach 3D wykorzystujących odwrotną konfigurację laser umieszczony jest bezpośrednio pod zbiornikiem z płynną żywicą, natomiast obiekt budowany jest niejako "do góry nogami". Zastosowanie pojemnika ze specjalnym przezroczystym dnem oraz powłoką silikonową która umożliwia przepuszczenie wiązki światła lasera oraz zapobiega przywieraniu żywicy do jego dna. Przy takiej konfiguracji platforma robocza porusza się do góry. Po każdej nałożonej i utwardzonej warstwie żywicy następuje proces tzw. złuszczenia materiału, który polega na jego odrywaniu od dna zbiornika (<https://drukarki3d.pl/technologie/technologia-sla>).



Rys. 3. Druk SLA (na podstawie Vaz i Kumar, 2021)

Tabela 1. Zestawienie cech związanych z konfiguracją drukarek SLA (<https://drukarki3d.pl/technologie/technologie-sla>)

	o konfiguracji oddolnej (the top-down orientation)	o konfiguracji standardowej (the bottom-up orientation)
Zalety	– niższy koszt produkcyjny, – duża dostępność i łatwość obsługi.	– duża wielkość przestrzeni roboczej, – szybsze tempo budowy.
Wady	– niewielkie rozmiary przestrzeni roboczej, – mniejszy zakres przetwarzanych materiałów, – konieczność przeprowadzenia obróbki postprocesingowej w związku z zastosowaniem dużej ilości podpór.	– wyższe koszty produkcyjne, – obsługa wymagająca dużej wiedzy oraz doświadczenia operatora urządzenia, – zmiana materiału wymuszająca opróżnienie z materiału całego zbiornika.
Popularni producenci drukarek 3D	Formlabs.	3D Systems.
Typowa grubość warstwy	25÷100 μm .	25÷150 μm .
Dokładność wymiarowa	$\pm 0,5\%$ (dolna granica: $\pm 0,010 \div 0,250 \text{ mm}$).	$\pm 0,15\%$ (dolna granica $\pm 0,010 \div 0,030 \text{ mm}$).

SLA oferuje wysoką precyzję i gładkie wykończenie powierzchni, dzięki czemu nadaje się do szczegółowych modeli, biżuterii i zastosowań dentystycznych.

Do zalet tego typu druku zaliczamy to, że jest to jedna z najdokładniejszych technologii pozwalająca uzyskać doskonałą jakość powierzchni. Uzyskane elementy charakteryzują się wysoką spójnością, dostępna jest dość szeroka gama materiałów z których realizowany jest druk. Bardzo dużą zaletą jest brak ograniczeń kształtu drukowanego materiału (np. możliwość drukowania elementów z pustymi przestrzeniami wewnątrz nich). Druk charakteryzuje się dość dużą wydajnością (w stosunku do wcześniej omawianej metody). Do zalet należy zaliczyć także to, że jest dość tania w eksploatacji. Oczywiście metoda ta obciążona jest także pewnymi wadami – urządzenie jest dość drogie, druk wymaga dokładnej kalibracji i dodatkowych zabiegów po zakończeniu druku. Jedną z największych wad tej metody jest to, że wydruki są mało odporne na promieniowanie UV (można stosować dodatkowe powłoki ochronne w celu wyeliminowania tej wady) (Finnes, 2015; Layani i in., 2018).

Druk SLA posiada szereg zastosowań takich jak prototypowanie (uzyskujemy bardzo dokładne wydruki doskonale imitujące elementy otrzymywane metodą wtryskową). Metoda doskonale nadaje się do produkcji nisko i średnioseryjnej przy zachowaniu niskich kosztów produkcji. Metoda często wykorzystywana w stomatologii – stosuje się żywice z dodatkami ceramicznymi by uzyskać bardzo twarde wydruki.

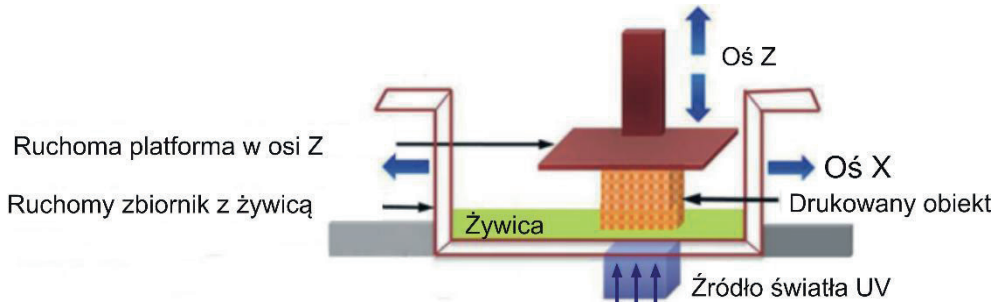
Przykładowe materiały stosowane do druku tą technologią:

- Żywica ACCURA 60;
- Poly1500;
- ProtoGen White;
- TuskXC2700T / Tusk2700W;
- Tusk Somos SolidGrey3000;
- Xtreme;
- NeXt;
- PerFORM.

2.3. Cyfrowe przetwarzanie światła - DLP

DLP (ang. *Direct Light Processing*) jest bardzo podobne do SLA pod względem wykorzystania fotopolimeryzacji. Jednak zamiast lasera wykorzystuje cyfrowy projektor świetlny do utwardzania żywicy. Cała warstwa jest wystawiona na działanie źródła światła jednocześnie, co zapewnia większą prędkość drukowania w porównaniu do SLA. Drukarki DLP są często używane do szybkiego prototypowania, tworzenia biżuterii i zastosowań dentystycznych.

Zaletą tej metody w porównaniu do druku SLA jest to, że cała warstwa jest naświetlana (utwardzana) równocześnie. Wadą jest to, że w dużych elementach (o długości / szerokości wyższej niż kilkanaście centymetrów) występuje duży skurek utwardzanej w tym samym czasie żywicy mogący powodować odpadanie elementu od platformy drukującej. W ostatnim okresie wiele firm wprowadziło modyfikację do tej techniki zastępując projektor DLP wyświetlaczem LCD. Rozwiązanie to – choć dużo tańsze, charakteryzuje się jednak nieco gorszą jakością osiąganych wydruków (Mu i in., 2017; Yang i James, 2018; Jiang i in., 2022; Swetha i in., 2024; 3D Printing - Encyclopedia MDPI).



Rys. 4. Zasada druku 3D metodą DLP (na podstawie Mu i in., 2017)

Przykładowe materiały stosowane do druku tą technologią:

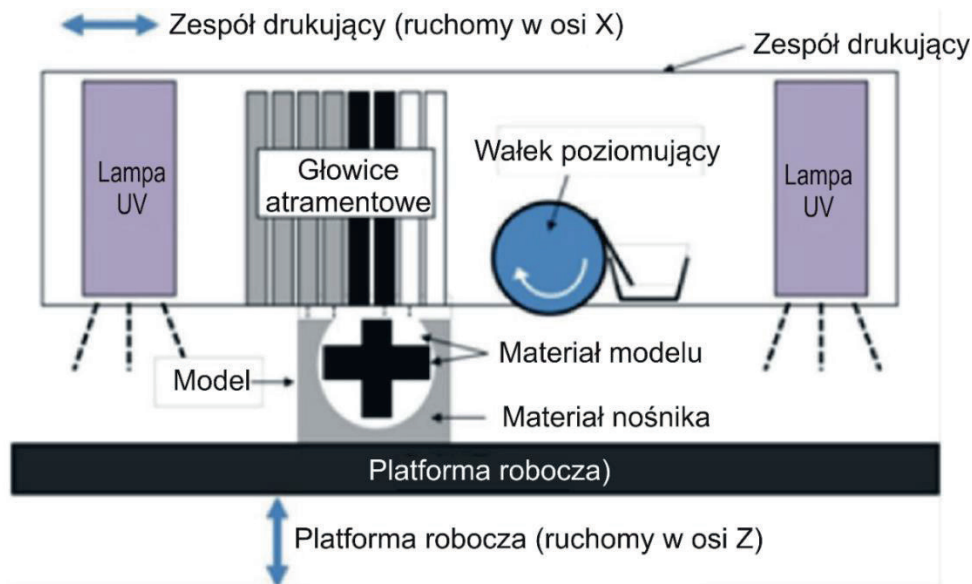
- Poly1500;
- ProtoGen White;
- TuskXC2700T / Tusk2700W;
- Tusk Somos SolidGrey3000;
- Xtreme;
- NeXt;
- PerFORM.

2.4. *PolyJet* / MJP

PolyJet / MJP (ang. *Multi Jet Fusion*) – proces zbliżony do tradycyjnego drukowania atramentowego lub laserowego na papierze. Nad stołem roboczym przesuwa się w osi X głowica, która selektywnie natryskuje żywicę światłoutwardzalną (dokładnie tak samo jak drukarka atramentowa natryskuje na papier atrament) na sproszkowany materiał modelu. Równocześnie żywica jest utwardzana światłem UV. Gdy warstwa zostanie wydrukowana, stół opuszcza się w osi Z i proces jest powtarzany przy kolejnej warstwie (po wcześniejszym naniesieniu sproszkowanego materiału modelu). *PolyJet* to nazwa handlowa firmy Objet, należącej do Stratasysa, MJP to nazwa handlowa firmy 3D Systems. Metody różnią się od siebie niewielkimi niuansami technologicznymi oraz gatunkami żywic które są stosowane (Bahniński i in., 2018; Espere i in., 2019; Kopec i in., 2023).

Do zalet druku *PolyJet* zaliczamy: możliwość drukowania skomplikowanych geometrii, części ruchomych, łatwość uzyskania funkcjonalnych wydruków. Materiały stosowane w tej metodzie podobnie jak w dwóch wcześniejszych charakteryzują się wysoką wytrzymałością (w porównaniu do elementów wytwarzanych z tworzyw w technologii FDM).

W metodzie tej nie uniknięto także pewnych wad. Są nimi – często przy większych detalach dość długi czas druku, częsta konieczność stosowania podpór i późniejsze ich wypłukiwanie, możliwość powstawania odkształceń i oczywiście słaba odporność na promieniowanie UV.



Rys. 5. Zasada druku 3D metodą PolyJet (na podstawie Espera i in., 2019)

Druk *PolyJet* umożliwia uzyskanie dokładnych i precyzyjnych wydruków do przymiarek i atrap oraz ostatecznych produktów dlatego też najczęściej stosowany jest do prototypowania. Uzyskane gotowe elementy charakteryzują się wysokim stopniem dokładności i możliwością uzyskania cienkich ścianek (Gaynor i in., 2014; Belgii i in., 2017; Severseike i in., 2019; Tomar i in., 2019; Childs i in., 2020; Kechagias i Maropoulos, 2021; Patpatiya i in., 2022).

Przykładowy materiał stosowany do druku tą metodą to żywica VisiJet M3 Proplast itp.

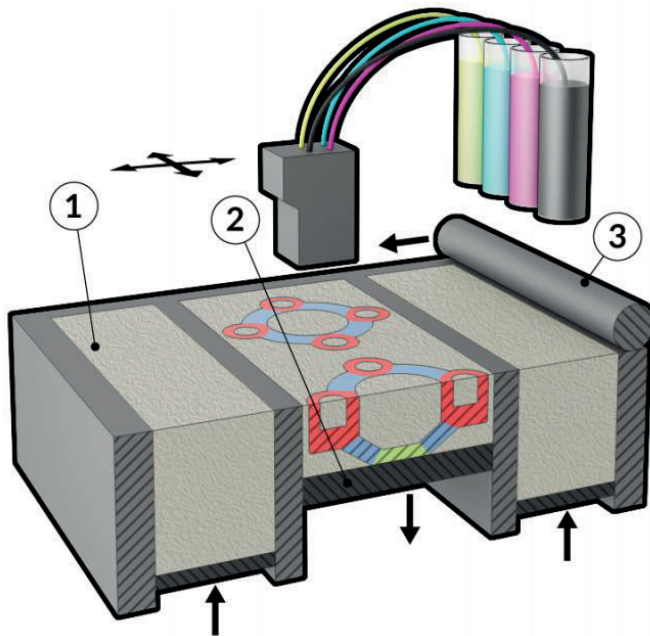
2.5. Druk z proszku gipsowego - CJP

CJP (ang. *Color Jet Printing*) – druk 3D z proszku gipsowego (lub podobnych np. proszki ceramiczne oraz ewentualnie proszków z dodatkami) w pełnym kolorze. Na stole roboczym drukarki 3D rozsypywana jest warstwa proszku gipsowego. Następnie głowica drukująca przesuwa się nad nim w osi X natryskując selektywnie lepiszcze i kolorowy atrament, na tej samej zasadzie jak w technologii *PolyJet* / MJP. Proszek skleja się ze sobą, tworząc obiekt przestrzenny. Po zakończonej pracy należy go “wydobyć” z niesklejonego proszku, oczyścić i utwardzić specjalnym preparatem chemicznym (Giganto i in., 2019; Kopec i in., 2023).

Do zalet druku CJP należy zaliczyć to, że to najtańsza z profesjonalnych technologii druku 3D, daje możliwość stosowania ponad 6 mln kolorów, brak konieczności stosowania podpór i ich usuwania, łatwość obróbki wydruków, możliwość uzyskiwania skomplikowanych geometrycznie figur.

Metoda ta posiada jednak również wady wynikające z materiału, z których wytwarzane są elementy: modele są stosunkowo ciężkie, charakteryzują się dużą kruchością i ograniczonym zastosowaniem funkcjonalnym, sam proces utwardzania jest dość uciążliwy.

Druk CJP najczęściej stosowany jest do produkcji gotowych wyrobów w krótkich seriach, wyróżnia się stosunkowo niskim kosztem jednostkowym wydrukowanego elementu, umożliwia szybkie i tanie tworzenie gadżetów reklamowych i marketingowych. Metoda ta może być zwykłą i przyjemną zabawą drukiem 3D dla początkujących i zaawansowanych użytkowników.



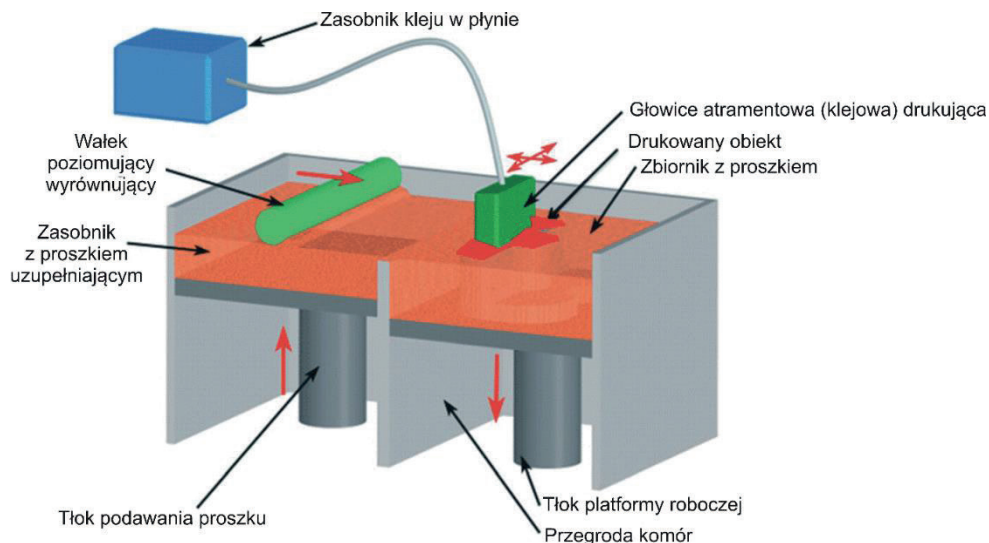
Rys. 6. Zasada druku 3D metodą CJP: 1 – sproszkowany materiał, 2 – platforma na której drukowany jest element, 3 - wałek wyrównujący i usuwający nadmiar materiału z którego drukowany jest element (na podstawie <https://www.addtec3dm.com/>...)

2.6. Druk ze sklepanych proszków - *Binder Jetting*

Technologia ta polega na selektywnym nakładaniu ciekłego środka wiążącego na warstwy sproszkowanego materiału (metal, piasek lub ceramiki). Warstwy są ze sobą łączone, tworząc ostateczny obiekt. Natryskiwanie spoiwa umożliwia wytwarzanie dużych części i ma zastosowanie w modelach architektonicznych, formach do odlewania z piasku i rzeźbach artystycznych.

Technologia *Binder Jetting*, podobnie jak CJP, opiera swoje działanie na stosowaniu ciekłych spoiw, które łączą piasek, sproszkowany metal lub ceramikę. Charakteryzuje się również dużą analogią do pracy klasycznych drukarek atramentowych gwarantując dzięki temu naprawdę bardzo dużą wydajność. *Binder Jetting* jest technologią w 100% przemysłową i jest szeroko stosowana do produkcji form oraz rdzeni odlewniczych, które są przystosowane

do zalewania ciekłymi metalami o temperaturach nawet 1600°C (Waheed i in., 2016). Największą zaletą tej technologii jest brak konieczności stosowania struktur wsparcia (Waheed i in., 2016).



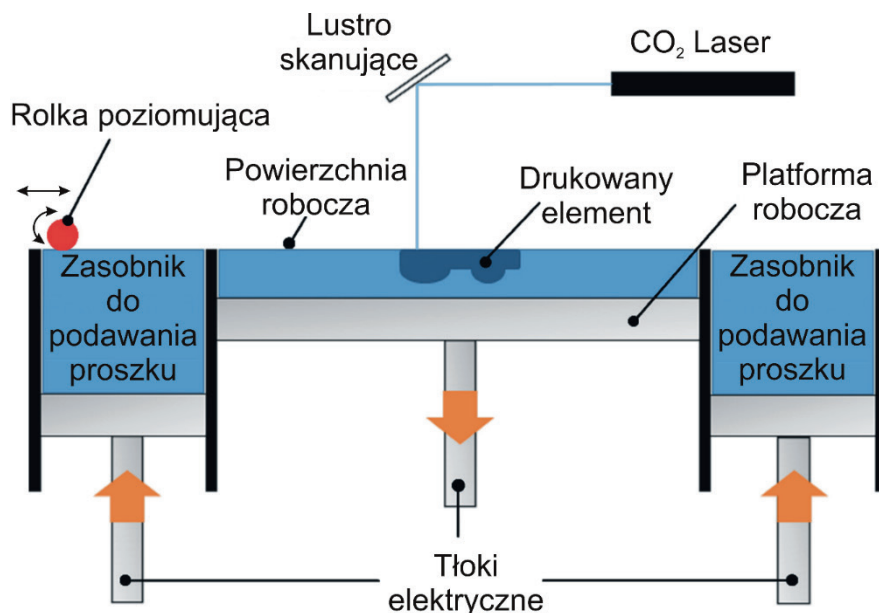
Rys. 7. Zasada druku 3D metodą Binder Jetting (na podstawie Waheed i in., 2016)

2.7. Selekttywne spiekanie laserowe - SLS

SLS (ang. *Selective Laser Sintering*) wykorzystuje laser o dużej mocy do stapiania sproszkowanego materiału, zazwyczaj plastiku lub metalu, w ciało stałe. Na stole roboczym drukarki 3D rozsypywana jest warstwa sproszkowanego materiału, która jest selektywnie spiekana wiązką lasera łącząc je ze sobą. Po ukończeniu każdej warstwy na platformę roboczą nakładana jest świeża warstwa proszku i proces się powtarza. SLS jest znany ze swojej zdolności do produkcji mocnych i funkcjonalnych części o złożonej geometrii, dzięki czemu jest popularny w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i medycznym. Podobnie jak w przypadku CJP lub *Binder Jetting*, po zakończeniu pracy, model (lub wiele modeli) wydobywa się z bryły niespieczonego proszku.

Zaletą druku metodą SLS jest brak konieczności stosowania podpór, możliwość drukowania skomplikowanych geometrii, możliwość drukowania części ruchomych i funkcjonalnych, materiały stosowane do druku są stosunkowo trwałe. Wadą tej metody druku jest wysoka cena maszyny i jej eksploatacji, a także konieczność stosowania osłony gazów neutralnych podczas procesu (by uniknąć utleniania). Niewykorzystany w druku materiał musi być proporcjonalnie mieszany z nowym materiałem, a gotowy produkt ma chropowatą powierzchnię (w porównaniu z produktami z wydruku metodą *Polyjet*, SLA). Metoda wykorzystywana jest głównie do uzyskiwania prototypów. Prototypy mogą być ruchome i charakteryzować się skomplikowaną geometrią i co chyba najważniejsze - trwałość materiałów pozwala na uzyskanie wydruków gotowych produktów, a krótkie serie są tańsze niż uzyskane przy pomocy

tradycyjnych metod (Chua i in., 2010; Stansbury i Idacavage, 2016; Stansbury i Idacavage, 2016; Greiner i in., 2017; Greiner i in., 2017; Kafle i in., 2021; Kruth i in., 2023; Kopec i in., 2023).



Rys. 8. Zasada druku 3D metodą SLS (na podstawie Gomes i in., 2022)

Głównym materiałem stosowanym w tej metodzie jest poliamid i jego odmiany. Jest to materiał o dużej wytrzymałości na rozciąganie. Jego wadą jest duża higroskopijność. Może być barwiony. Jest bardziej wytrzymały i odporny chemicznie od PLA i ABS. Warto stosować go do druków części mechanicznych. Wytrzymałość termiczna w zależności od zastosowanego rodzaju poliamidu - ok. 150°C (temperatura mięknięcia), zakres stosowania zazwyczaj od -70 do 80°C.

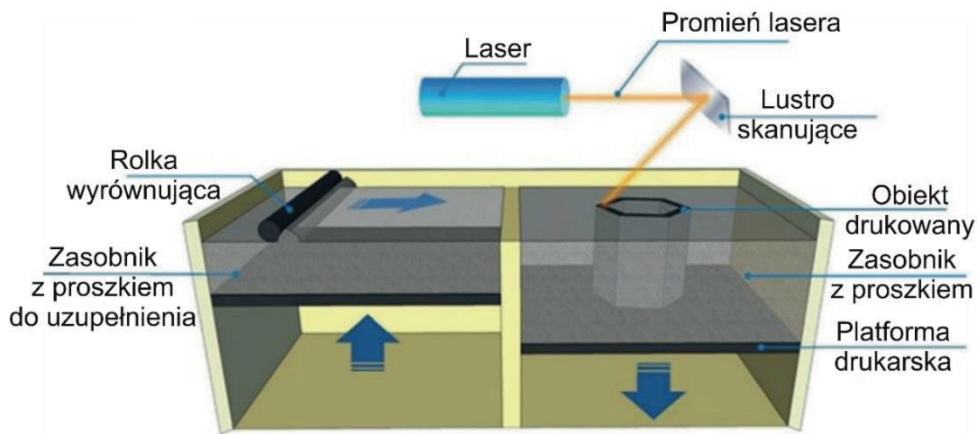
Przykładowe materiały stosowane w tej metodzie wydruku:

- Alumide;
- PA 12;
- PA-GF;
- PA 2241 FR;
- Poliamid PA2200.

2.8. Selekttywne topienie metali laserem - SLM / DMLS

SLM (ang. *Selective Laser Melting*) / DMLS (ang. *Direct Metal Laser Sintering*) – druk 3D ze sproszkowanych metali. Zasada działania jest dokładnie taka sama jak w przypadku metody SLS, z tą różnicą, że detale muszą mieć projektowane podpory spajające detal ze stołem roboczym. Nie można ich także piętować (drukować jeden na drugim), jak w przypadku innych metod proszkowych. Zaletą druku metodą SLM / DMLS jest to że dzięki niej

można uzyskać najwytrzymalsze elementy (spośród metod druku 3D) - wytrzymałość wydruków dorównuje tej z tradycyjnych odlewów. Istnieje możliwość stosowania szerokiej gamy metali (np. aluminium, stal, tytan, złoto, srebro i wiele innych), pozwala na produkcję komponentów końcowych. Wadą tej metody druku jest bardzo wysoka cena drukarki i materiałów z których realizowany jest wydruk i ich podatność na utlenianie (Ambrosi i Pumera, 2016; Patterson i in., 2017; Dvorak i in., 2021).



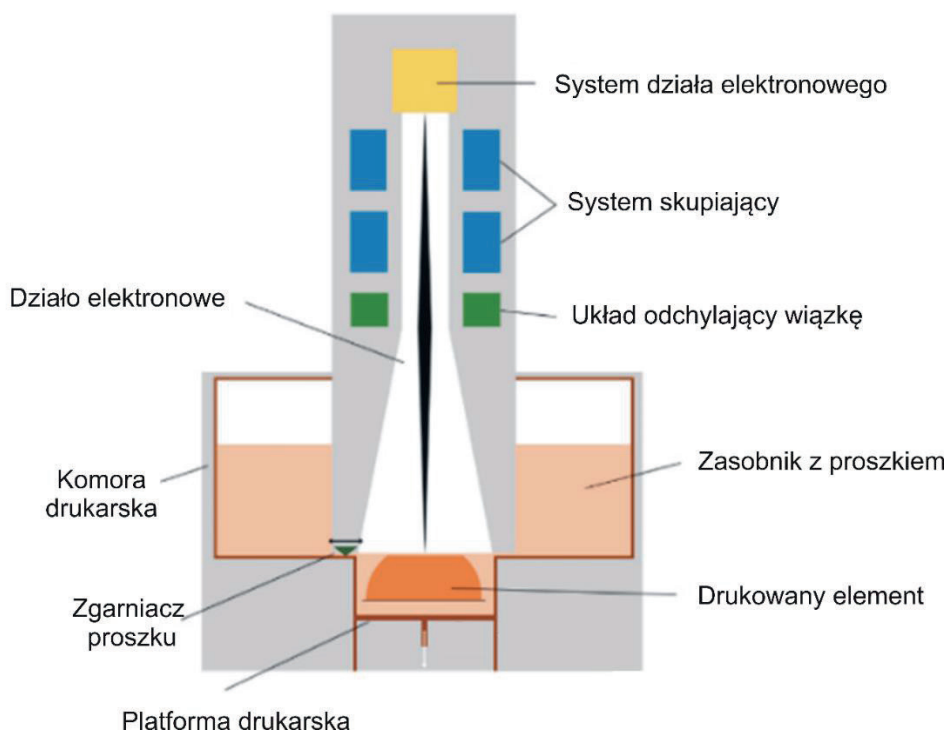
Rys. 9. Zasada druku 3D metodą SLM (na podstawie Ambrosi i Pumera, 2016)

Surowcem w tej metodzie są proszki metali najczęściej stali oraz tytanu oraz innych, przykładowo:

- Aluminium ($\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$);
- Tytan (TiAl_6V_4);
- Stal nierdzewna (316L lub 1.4404);
- Stal CL0ES;
- Inconel (IN718).

2.9. Selekttywne topienie metali wiązką elektronów - EBM

EBM (ang. *Electron Beam Melting*) – druk 3D ze sproszkowanych metali, zbliżona do SLM / DMLS, z tą różnicą, że zamiast wiązki lasera, do topienia metalu używana jest wiązka elektronów (Heinl i in., 2008; Dall'Ava i in., 2019).



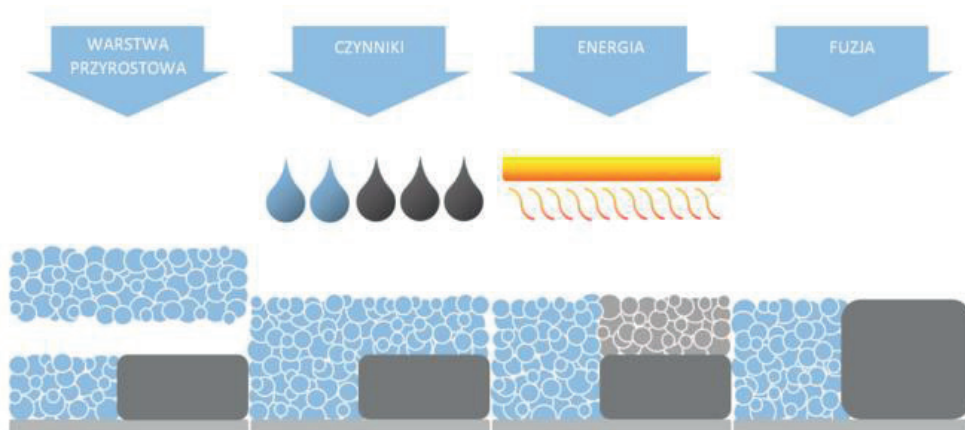
Rys. 10. Zasada druku 3D metodą EBM (na podstawie Dall'Ava i in., 2019)

Zalety i wady zbliżone jak przy metodzie SLM / DMLS.

2.10. Druk z proszków polimerowych sklejanym klejem aktywowanym promieniami UV - MJF

MJF (ang. *Muli Jet Fusion*) – technologia opracowana przez firmę HP, polegająca na druku 3D ze sproszkowanych tworzyw sztucznych (najczęściej są to poliamidy). Polega na selektywnym natryskiwaniu na sproszkowany materiał lepiszcza, które skleja ze sobą poszczególne warstwy modelu i naświetleniu jej promieniami UV, co powoduje ich trwałe zespolenie. Natryskiwanie materiałów działa podobnie do drukowania atramentowego. Wykorzystuje głowice drukujące do osadzania kropelek płynnego fotopolimeru na platformie roboczej. Ciecz jest następnie utwardzana światłem UV, zestalając warstwy. Natryskiwanie materiałów pozwala uzyskać wydruki o wysokiej rozdzielczości i możliwości łączenia wielu materiałów które są kompatybilne ze sobą, dzięki czemu nadaje się do tworzenia prototypów z materiałów o różnych właściwościach. Zalety druku MJF to: wysoka prędkość drukowania i szybki cykl produkcyjny, możliwość dokładnego drukowania drobnych szczegółów, brak konieczności stosowania podpór, możliwość wytwarzania kolorowych części, wysokiej jakości wykończenie powierzchni, dość niski jednostkowy koszt druku, niewielkie odształce-

nia wymiarów podczas druku, możliwość recyklingu materiału użytego do druku. W metodzie tej także nie uniknięto pewnych wad. Są nimi np. – wysoki koszt urządzenia, brak możliwości wyprodukowania niektórych zakrzywionych, pustych geometrii i inne. Druk MJF najczęściej wykorzystywany jest np. w medycynie (szczególnie w transplantologii), edukacji (możliwość wytworzenia atrakcyjnych wizualnie pomocy naukowych), jubilerstwie, uzyskiwanie małych serii nawet złożonych części do zastosowań końcowych itp. (Alomarah i in., 2019; Singh i Pervaiz, 2021; Abdallah i in., 2023; Róż i in., 2023).



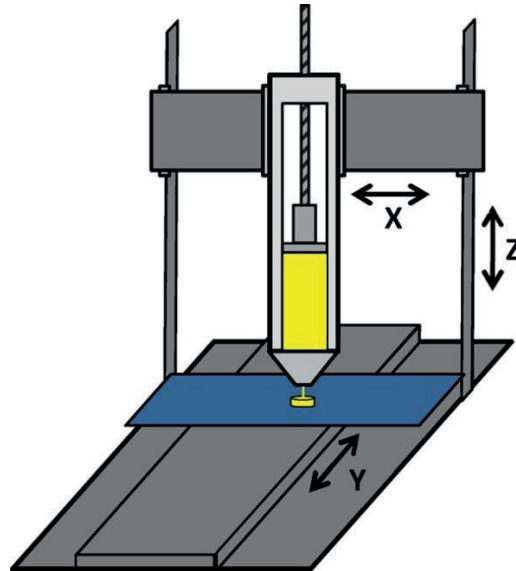
Rys. 11. Zasada druku z proszków polimerowych sklejanym klejem aktywowanym promieniami UV – MJF (na podstawie <https://www.backer.pl/...>)

Przykładowe materiały stosowane w tej metodzie wydruku:

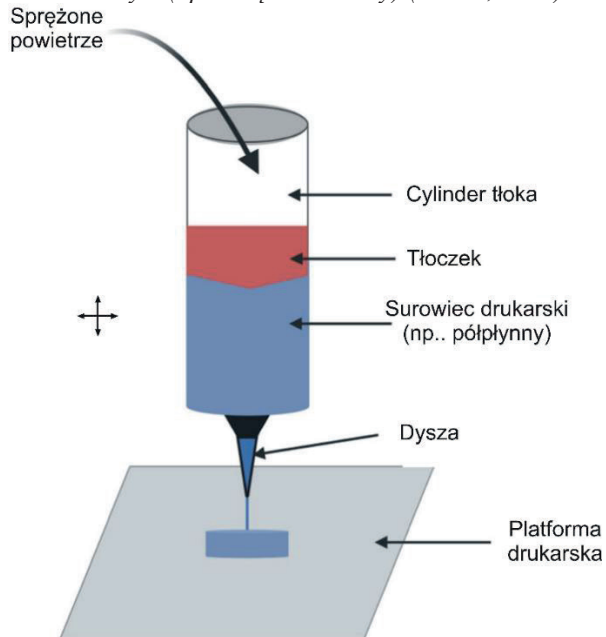
- Poliamid 12 (i jego warianty);
- Poliamid-11;
- PP;
- TPU;
- TPU 90A-01.

2.11. Inne metody druku 3D

Do tej grupy możemy zaliczyć np. trójwymiarowy druk ekstruzyjny (wytłaczania) polegający na nakładaniu w kontrolowany sposób materiału w postaci pasty. Znajduje on szerokie zastosowanie np. w budownictwie, medycynie, farmaceutyce ale również do druku żywności (Li i in., 2018; Vaz i Kumar, 2021; Agunbiade i in., 2022).



Rys. 12. Zasada druku w przykładowej drukarce 3D opartej na wytłaczaniu materiału oddziaływaniem mechanicznym (np. wkręcanie śruby) (Li i in., 2018)

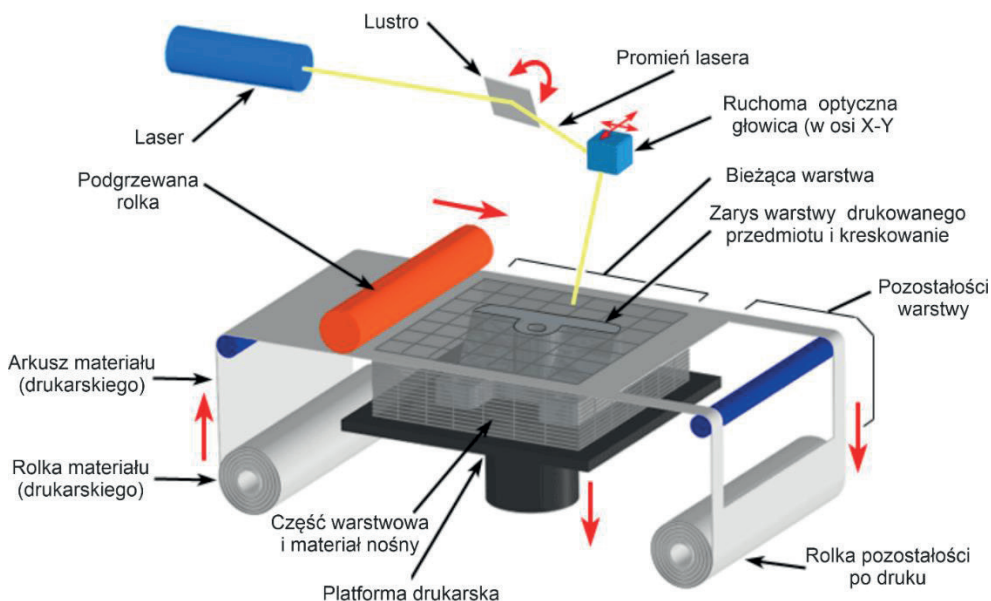


Rys. 13. Zasada druku w przykładowej drukarce 3D opartej na wytłaczaniu materiału w wyniku oddziaływania sprężonego powietrza na tłok – (na podstawie Vaz i Kumar, 2021)

Przykładem może być wielkoskalowy proces wytwarzania przyrostowego na bazie cementu stosowany w budownictwie, określane jako drukowanie betonu 3D (3DCP) (Buswell i in., 2018; Bos i in., 2022).

Szerzej metoda druku 3D związana z wytłaczaniem zostanie przedstawiona w podrozdziale związanym z drukiem żywności.

Do innych metod druku 3D możemy zaliczyć także LOM (ang. *Laminated Object Manufacturing*). W metodzie tej tworzy się modele poprzez łączenie z sobą specjalnych warstw cienkiego papieru lub folii poliestrowej pokrytych warstwą kleju które układane są na stole roboczym a następnie laser wycina odpowiedni kształt. Pozostałe warstwy materiału (nie będące częścią wytwarzanego przedmiotu) po zakończeniu druku są usuwane (podczas druku są one cięte na mniejsze fragmenty w celu ich późniejszego łatwiejszego usunięcia). Po naklejeniu pojedynczej warstwy stół się obniża i cykl jest powtarzany, aż do uzyskania ostatecznego kształtu. Metoda ta może być wykorzystywana w szybkim prototypowaniu (Park i in., 2000; Chua i in., 2010; Mercado i Rojas Arciniegas, 2020).



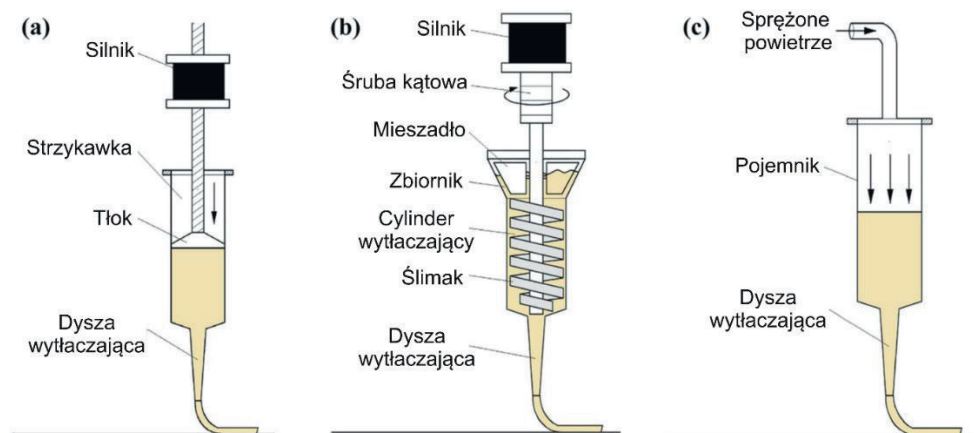
Rys. 14. Zasada druku 3D metodą LOM (na podstawie Hehr i Dapino, 2015)

Istnieje jeszcze wiele innych metod druku 3D zaliczanych do grupy umożliwiającej szybkie prototypowanie, jednak ze względu na ich mnogość i często niszowe wykorzystanie zostały w niniejszym opracowaniu pominięte.

2.11.1. Druk 3D żywności

Ze względu na bliski kontakt Autora opracowania z przemysłem spożywczym trochę więcej uwagi poświęcone zostanie zagadnieniu druku 3D żywności. W przemyśle spożywczym druk 3D najczęściej opiera się na ekstruzji w sposób kontrolowany materiału, ale wykorzystuje się także druk zbliżony do atramentowego (cząstki materiału spajane lepiszczem), czy nawet zbliżone metody do SLS (selektywnego spiekania laserem) (Agunbiade i in., 2022). Obecnie w drukarkach 3D do żywności stosowane są dysze wytłaczające, surowiec sproszkowany spajany np. , laserem lub lepiszczem. Stosowane są także ramiona robotyczne do tworzenia np. rzeźb z cukru, ozdób z czekolady i tworzenia ciast dekoracyjnych (Akhilai i in., 2023). Przykładowo ChefJet firmy 3D Systems, krystalizuje cienkie warstwy drobnziarnistego cukru w różne kształty geometryczne, czy urządzenie Edge firmy Natural Foods z Barcelony dozuje czekoladę z dysz tworząc w zasadzie dowolne wzory. Innym przykładem jest urządzenie do wytwarzania makaronu Barilli drukujące makaron z wodą i mąką czy z kaszy manny (Raghav, 2018). W przypadku druku 3D żywności chyba najbardziej popularną metodą jest druk poprzez wytłaczanie (ekstruzję), nie jest on jednak jedyny. Poniżej przedstawiono najczęściej wykorzystywane metody do druku 3D żywności wraz z objaśnieniem.

Druk ekstruzyjny – ma zbliżoną zasadę druku do stosowanego w metodzie FDM. Materiał układany jest warstwa po warstwie po wytłoczeniu przez dyszę (w wyniku nacisku ewentualnie wcześniejszego roztopienia surowca). W druku 3D opartym na ekstruzji stosowane są trzy metody: wytłaczanie strzykawkowe, wytłaczanie śrubowe i wytłaczanie oparte na wytłaczaniu pneumatycznym. Do technologii opartej na wytłaczaniu nadają się wyłącznie materiały płynne i półpłynne, takie jak ciasto, żelatyna, guma ksantanowa i czekolada ale stosowane są również przetworzone materiały spożywcze pochodzenia zbożowego i z roślin strączkowych, pulpy owocowe i warzywne. Metoda ta najczęściej stosowana jest w celu uzyskania cukierków, słodczy (Edutechwiki, 2018; Karyappa i Hashimoto, 2019; Caporizzi i in., 2019), kształtowania czekolad (Ontwerpia, 2021) i innych produktów (Tan i in., 2018; Kewuyemi i in., 2022; Kewuyemi i in., 2023; Raja i in., 2023; Wilson i in., 2023).



Rys. 15. Zasada druku 3D żywności metodą wytłaczania: a) wytłaczanie strzykawkowe, b) wytłaczanie ślimakowe, c) wytłaczanie pneumatyczne (na podstawie Tan i in., 2018)

Natryskiwanie spoiwa – Jest to technologia bardzo podobna do klasycznego druku atramentowego, w której na warstwę bazy proszkowej surowca spożywczego selektywnie natryskiwane jest spoiwo (spożywcze), następnie nakładana jest kolejna warstwa proszkowa i czynność jest powtarzana aż do zakończenia procesu druku. Metoda ta jest bardzo zbliżona do wcześniej omawianej technologii *Binder Jetting*. Materiałem najczęściej wykorzystywanym w tej technologii jest sproszkowany cukier, skrobia czy białko, a lepiszczem może być woda, dżemy, żele czy nawet pasty mięsne. Technikę druku atramentowego stosuje się głównie do drukowania ciast, ciasteczek i ciastek oraz innych wyrobów (nawet pizzy) (Sun i in., 2015; Pallottino i in., 2016; Pitayachaval i in., 2018; Holland i in., 2019; Liu i Zhang, 2019; Manstan i McSweeney, 2020; Zhu i in., 2020).

Selektywne spiekanie laserowe lub powietrzne – jest to technologia stosowana dla materiałów głównie w postaci proszku, który w warstwie jest selektywnie spiekany (stapiany) laserowo (metoda podobna do wcześniej omawianej SLS) lub strumieniem gorącego powietrza (SHASAM). Po zakończeniu spajania jednej warstwy nakładana jest kolejna warstwa proszku i proces jest powtarzany do momentu zakończenia druku. Nadaje się do substancji cukrowych i tłuszczowych o stosunkowo niskiej temperaturze topnienia (Sun i in., 2015; Godoi i in., 2016; Liu i Zhang, 2019; Le-Bail i in., 2020).

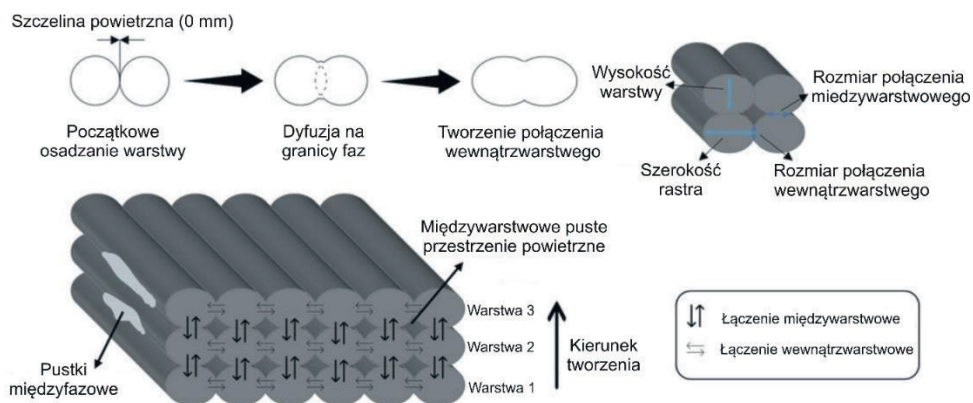


Rys. 16. Przykładowa drukarka oparta na zasadzie ekstruzji przeznaczona do druku żywności - DigitalFoodLab ([https://www.naturalmachines.com/...](https://www.naturalmachines.com/))

3. DRUK Z MATERIAŁÓW TERMOPLASTYCZNYCH METODĄ FDM/FFF

Metoda druku FDM/FFF to obecnie bardzo popularna technologia druku 3D. Posiada ona szereg zalet, jednak należy pamiętać również o pewnych ograniczeniach jakimi się charakteryzują elementy wytworzone w tej technologii w stosunku do elementów wytworzonych np. klasyczną metodą wtryskową. Należy jednak pamiętać, że próbki drukowane w technologii FDM/FFF są słabsze od uzyskanych metodą wtryskiwania. Przykładowo wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga, wydłużenie przy zerwaniu i uderność próbek wdrukowanych w technologii FDM/FFF dla takich tworzyw jak ABS, PLA i PA 6 były o około 48%, 50%, 48% i 78% niższe w porównaniu z próbkami formowanymi metodą wtryskową (Lay i in., 2019; Montez i in., 2022).

Zwykle jedno włókno filamentu wykonane z polimeru termoplastycznego jest podgrzewane na skutek czego obniża się jego lepkość co umożliwia jego wytłoczenie. Wytłaczany w sposób kontrolowany materiał (ilość i umiejscowienie) tworzy początkowo pojedynczą warstwę nakładaną na platformę drukarską a następnie na nią nakładana jest kolejna warstwa w celu zbudowania części. W wyniku podgrzania w dyszy ekstrudera materiału drukarskiego uzyskuje właściwości półpłynne które ułatwiają spajanie się kolejnych pasm nakładanego materiału w poziomie i w pionie. Wiązanie między pasmami nakładanego materiału drukarskiego wynika z interakcji cząsteczek, gdy nakładana warstwa płynnego surowca wiąże się z warstwą stałą podczas krzepnięcia. Jednak między warstwami mogą pojawić się puste przestrzenie z powodu szybkiego zastygania nakładanych pasm tworzywa lub braku prawidłowego zachodzenia na siebie materiału wytłaczanego co wywołuje nieprawidłowe jego zespolenie. W związku z tym wiązania te wykazują nieco gorsze właściwości mechaniczne w porównaniu do elementów wytworzonych z tego samego tworzywa, ale wytworzone w konwencjonalnym procesie produkcyjnym (Green, 2021; Kristiawan i in., 2021; Syrlybayev i in., 2021).



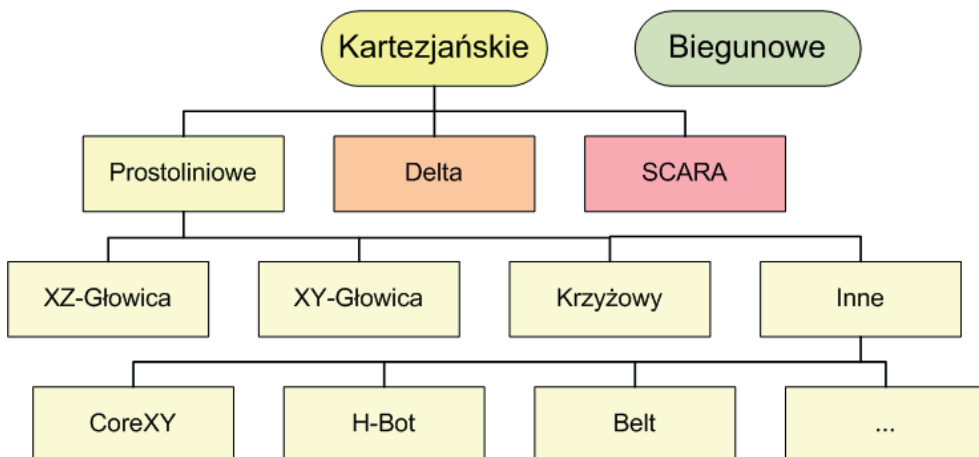
Rys. 17. Mechanizm sklejanie spoiwa podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (na podstawie Green, 2021)

Typowe etapy druku 3D w technologii FDM:

1. Wybór filamentu: drukarki FDM wykorzystują szeroką gamę materiałów termoplastycznych, w tym ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren), PLA (kwas polimlekowy), PET-G (politereftalan etylenu) i inne. Wybór filamentu zależy od pożądanych właściwości drukowanego przedmiotu, takich jak wytrzymałość, elastyczność, odporność na temperaturę czy biodegradowalność.
2. Przygotowanie modelu: Przed wydrukiem tworzony jest model 3D obiektu za pomocą oprogramowania do projektowania wspomaganego komputerowo (CAD) lub pozyskiwany z repozytoriów internetowych. Model jest następnie eksportowany jako standardowy format pliku 3D (np. STL), który jest kompatybilny z drukarką FDM.
3. Krojenie: Oprogramowanie do krojenia służy do przygotowania modelu 3D do druku. Oprogramowanie dzieli model na cienkie poziome warstwy, oblicza ścieżkę narzędzia dla każdej warstwy i generuje zestaw instrukcji (kod G), których będzie przestrzegać drukarka 3D.
4. Konfiguracja drukarki: Drukarka FDM musi zostać odpowiednio skalibrowana i skonfigurowana przed drukowaniem. Obejmuje to upewnienie się, że stół roboczy jest wypoziomowany i czysty, a dysza ekstrudera znajduje się w odpowiedniej odległości od stołu. Ustawienia temperatury drukarki są również dostosowywane w zależności od używanego filamentu. Ważne są także inne parametry takie jak szybkość druku, stopień wypełnienia i wiele innych.
5. Proces drukowania: Gdy drukarka jest gotowa, pocięty plik (kod G) jest przesyłany do drukarki (lub na kartę pamięci np. SD której zawartość odczytuje drukarka). Drukarka FDM podgrzewa filament w ekstruderze do temperatury topnienia. Stopiony filament jest następnie wytłaczany przez małą dyszę na stół roboczy lub wcześniej wydrukowane warstwy. Dysza porusza się w kontrolowany sposób, podążając ścieżką narzędzia zdefiniowaną w kodzie G, nakładając warstwa po warstwie, aby zbudować obiekt.
6. Chłodzenie i zestalanie: Po osadzeniu każdej warstwy stopiony filament szybko stygnie i zestala się. Dzięki temu warstwy łączą się ze sobą i tworzą „solidny” obiekt. Niektóre drukarki FDM mają wbudowane wentylatory chłodzące lub podgrzewane komory, które optymalizują proces chłodzenia i poprawiają dokładność wymiarową oraz integralność strukturalną obiektu (np. zmniejszając niekorzystny wpływ skurczu termicznego i/lub poprawiając termiczne warunki wytłaczania filamentu).
7. Struktury wsporcze (w razie potrzeby): druk FDM umożliwia tworzenie złożonych geometrii, w tym nawisów i mostków. Jednak w przypadku takich funkcji często wymagane są konstrukcje wsporcze. Struktury te zapewniają tymczasowe wsparcie podczas drukowania i można je usunąć po zakończeniu drukowania.
8. Przetwarzanie końcowe: Po zakończeniu drukowania wydrukowany obiekt może wymagać przetwarzania końcowego. Może to obejmować usunięcie wszelkich konstrukcji wsporczych, piaskowanie lub wygładzenie powierzchni oraz zastosowanie dodatkowych zabiegów, takich jak malowanie, polerowanie lub nakładanie powłok ochronnych.

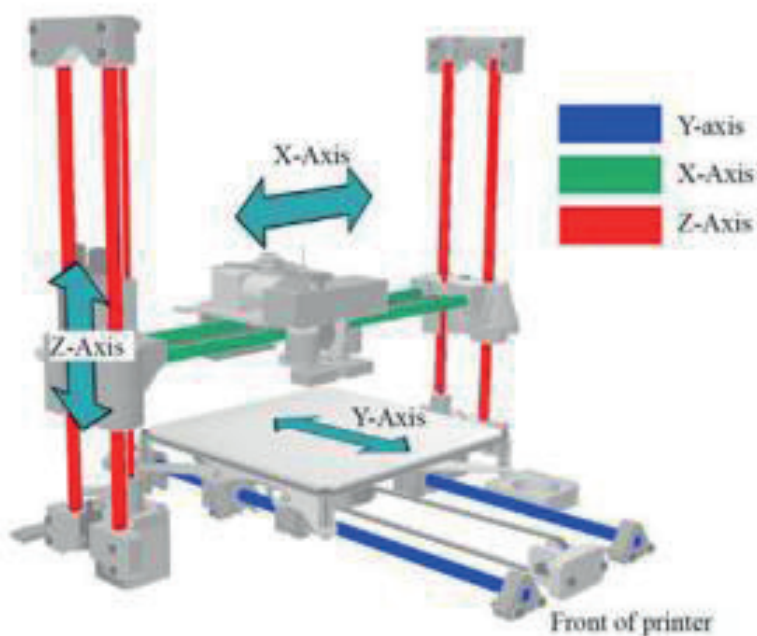
3.1. Konstrukcja drukarek w technologii FDM/FFF

W przypadku drukarek FDM/FFF istnieje kilka wariantów poruszania się platformy drukarskiej i głowicy.



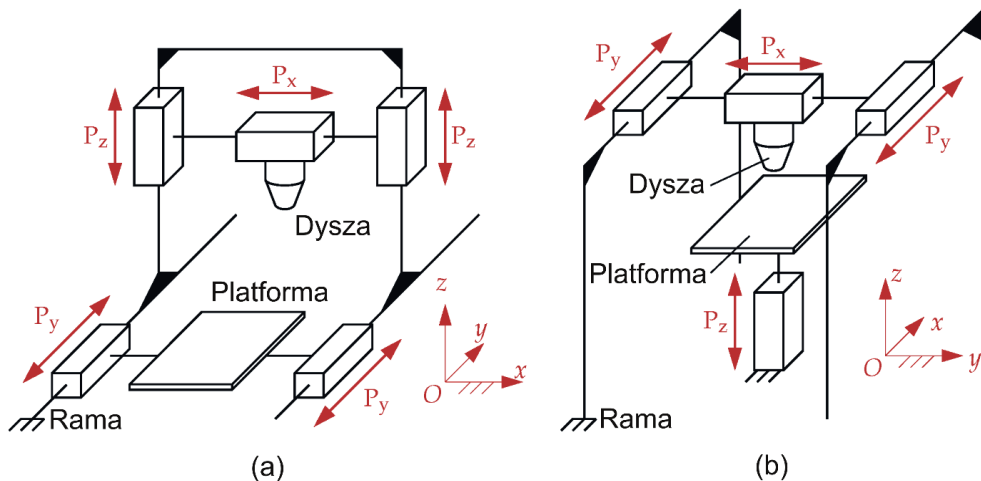
Rys. 18. Główne systemy ruchu w drukarkach 3D FDM/FFF (na podstawie <https://all3dp.com/...>)

1. Jednym z najpopularniejszych rodzajów drukarek FDM/FFF są wykorzystujące współrzędne w układzie kartezjańskim gdzie stosuje się trzy osie X, Y, Z. W przypadku tego typu drukarek istnieje kilka wariantów poruszania się platformy na której drukowany jest model jak i samej głowicy drukującej (Rodrigues Carneiro i Tavares, 2021; Ida i in., 2022):
 - a. Najszerzej rozpowszechnioną grupą są drukarki o ruchu prostoliniowym głowicy drukarskiej
 - Platforma drukarska porusza się poziomo wzdłuż jednej z osi – X lub Y a głowica drukująca (ekstruder) porusza się pionowo i wzdłuż drugiej osi poziomej.
 - Platforma porusza się poziomo w osi Z a głowica drukująca (ekstruder), porusza się dwuwymiarowo wzdłuż osi X i Y.
 - Platforma porusza się pionowo (oś Z) i wzdłuż jednej z poziomych osi (X lub Y) a głowica drukująca (ekstruder) porusza się poziomo w pozostałej osi w której nie porusza się platforma.
 - Platforma się nie rusza a głowica drukująca (ekstruder) porusza się w trzech osiach (X, Y, Z).
 - Platforma porusza się wzdłuż osi X i Y a głowica drukująca (ekstruder) porusza się pionowo (oś Z).



Rys. 19. Zasada druku 3D w przykładowej kartezyjskiej drukarce (Rodrigues Carneiro i Tavares, 2021)

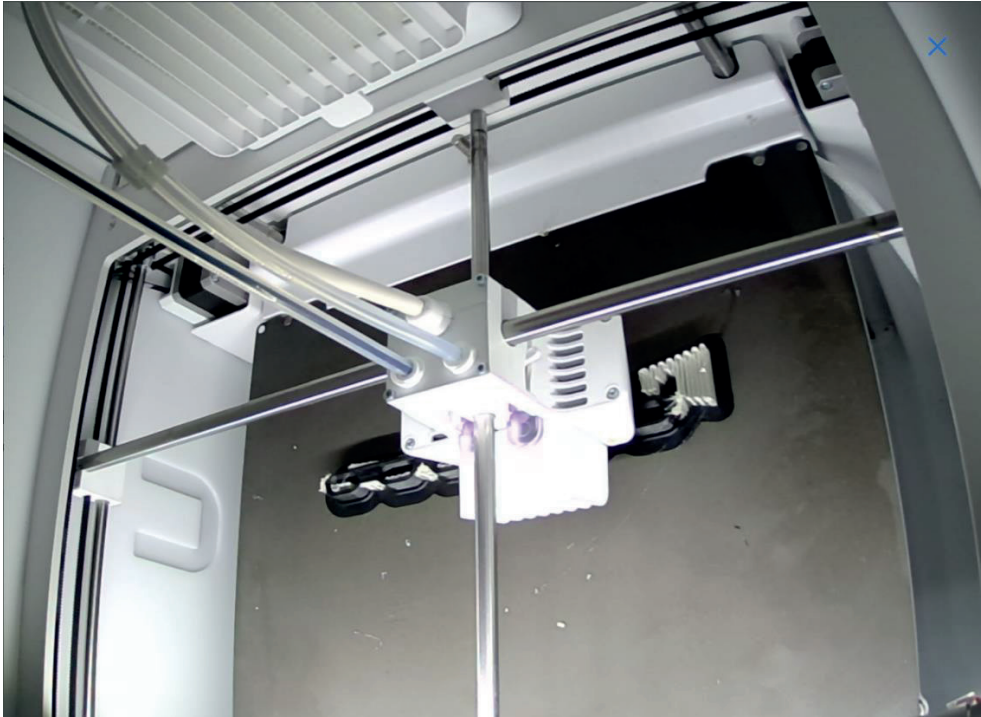
- System krzyżowy obejmuje konstrukcję w kształcie kwadratu składającą się z czterech zewnętrznych ram. Dwa wózki X i dwa wózki Y poruszają się w swoich kierunkach wzdłuż obwodu kwadratu, a każda para obsługuje dodatkowy pomost krzyżowy, który przechodzi przez pudełko w jednym kierunku. Głowica drukująca znajduje się w miejscu przecięcia się tych dwóch krzyżujących się pomostów, co oznacza, że gdy wózek porusza się wzdłuż jednego z zewnętrznych kwadratowych pomostów, punkt przecięcia ulega zmianie, a wraz z nim położenie głowicy drukującej. Podczas gdy ten aparat zapewnia bardzo stabilny ruch głowicy drukującej w osiach X i Y, pręty osi Z odpowiadają za przesuwanie płyty roboczej w górę i w dół oraz od głowicy drukującej (<https://all3dp.com/2/3d-printer-gantry-simply-explained>).



Rys. 20. Schemat drukarki z kartezjańską architekturą układu pozycjonowania głowicy (a) – schemat drukarki z kartezjańską architekturą głowicy XZ. (b) – schemat drukarki z kartezjańską architekturą głowicy XY. Prostopadłościany prostokątne są złączami pryzmatycznymi (P), gdzie indeks dolny (x , y lub z) oznacza oś ruchu – (na podstawie Ida i in., 2022)



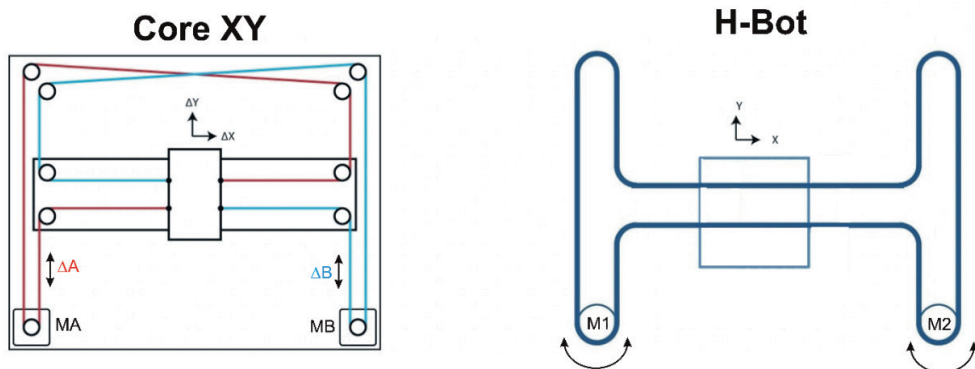
Rys. 21. Przykład popularnej drukarki 3D W systemie Kartezjańskim firmy CREALITY ([https://store.creality.com/...](https://store.creality.com/))



Rys. 22. Przykład popularnej drukarki 3D W systemie Krzyżowym – UltiMaker S7 (<https://www.3dnatives.com/...>)

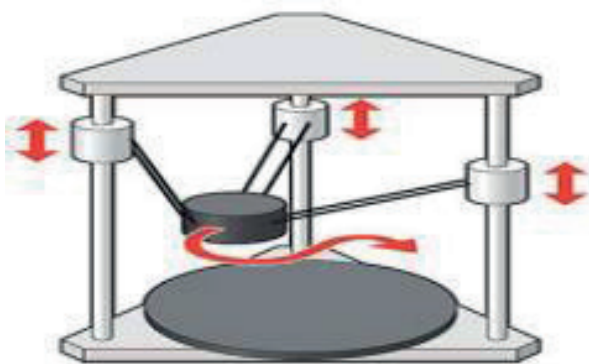
b. Kinematyka CoreXY i H-Bot

W drukarkach tego typu głowica drukująca porusza się w osi X i Y, a stół drukujący porusza się w osi Z. Do poruszania głowicy drukującej wykorzystywane są dwa silniki krokowe. Drukarki do poruszania głowicy w systemie CoreXY zwykle posiadają dwa paski napędowe, a system H-Bot jeden (Ida i in., 2022). Drukarki CoreXY są stosunkowo szybkie i wydajne (w stosunku do klasycznych drukarek w systemie kartezjańskim), zwykle stosowane w większych urządzeniach (pozwalają drukować elementy o większych gabarytach), W tym rozwiązaniu głowica jest stosunkowo lekka, więc ruch jej odbywa się z mniejszą ilością drgań i jest bardziej precyzyjny. By sterować w tym systemie wymagane są jednak silniki o większej mocy i precyzyjne mocowanie pasków napędowych.



Rys. 23. Drukarki 3D oparte na CoreXY i H-Bot. MA i MB oraz M1 i M2 – silniki napędowe (na podstawie <https://stuffnellymakes.wordpress.com/>...)

- c. Drukarki oparte o kinematykę Delta. W tego typu drukarkach podstawa jest nieruchoma. Porusza się jedynie głowica drukująca w trzech osiach - za ruchy osi odpowiadają zawsze trzy silniki, odpowiedzialne za poruszanie ekstruderem. W porównaniu z drukarkami kartezjańskimi, kinematyka Delta pozwala na większą prędkość druku, jej wadą jest mniejsza dokładność druku. Powodem jest fakt, że ruch głowicy wymaga jednoczesnego działania wszystkich trzech silników, co prowadzi do błędów w pozycjonowaniu współrzędnych (Sayel i in., 2023).



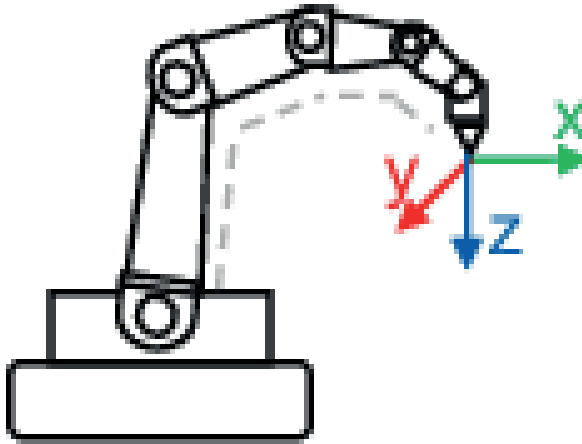
Rys. 24. Zasada działania drukarki 3D typu Delta (Sayel i in., 2023)

- d. Drukarki oparte o kinematykę SCARA.

SCARA (ang. *Selective Compliance Articulated Robot Arm*) to konstrukcja kinematyki oparta na bloku poruszającym się poziomo dzięki mechanizmowi dźwigni linkowej.

Urządzenia wykorzystujące tę kinematykę są bardziej kompaktowe. Mają bardzo wysoką dokładność i lepszą powtarzalność niż tradycyjne manipulatory zrobotyzowane. Zapewniają

niższy poziom hałasu i wibracji. Roboty SCARA są nie tylko dokładniejsze, ale także szybsze niż drukarki kartezjańskie o podobnej wielkości i masie (Kampker i in., 2019).



Rys. 25. Zasada działania drukarki 3D typu SCARA (Kampker i in., 2019)

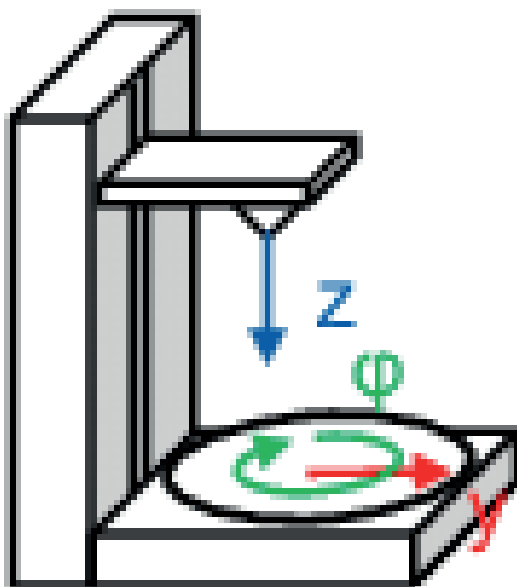
Urządzenia tego typu są stosunkowo drogie i mają ograniczoną sztywność wzdłuż osi XY, mniejszy obszar tworzenia wydruku i ograniczony ruch.

2. Drukarki oparte o kinematykę Polar.

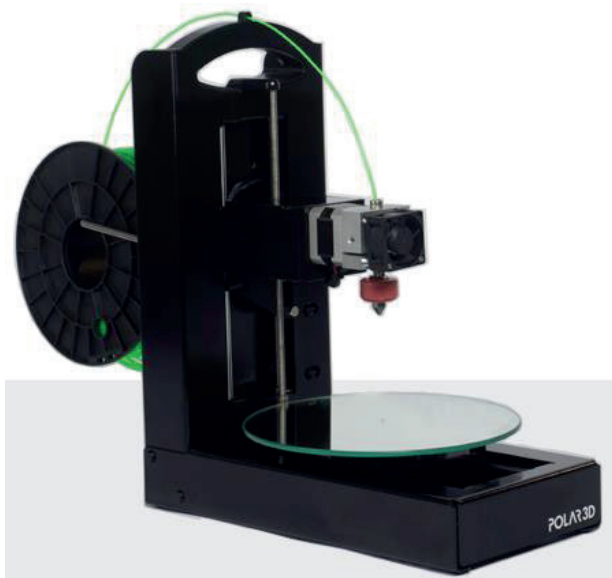
Mniej popularną konfiguracją jest system Polar, który wykorzystuje stół obrotowy, przesunięcie osi Z kontrolowane przez siłownik liniowy umieszczony poza krawędzią stołu obrotowego oraz ramię poziome połączone z osią Z, które przesuwa efektor końcowy wzdłuż środka osi

Wykorzystuje współrzędne biegunowe – oznacza to, że położenie jest określane przez promień i kąt zamiast powszechnie używanych osi X Y Z. Platforma robocza drukarki jest okrągła, obraca się i porusza poziomo w jednym wymiarze, podczas gdy ekstruder porusza się tylko w górę i w dół. Działanie można porównać do gramofonu i obracającej się płyty winylowej. Głowica drukująca jest jak igła, a platforma jest jak płyta. Różnica polega na tym, że ta druga nie tylko się obraca, ale także porusza się w jednej z osi. Podczas gdy głowica ma ograniczony ruch tylko w płaszczyźnie Z.

Kinematyka Polar 3D pozwala ograniczyć wielkość drukarek. Drukarka taka najlepiej wykorzystuje pole robocze w stosunku do wielkości jej samej. Dlatego na stosunkowo małej drukarce można zbudować nieco większe modele. Dodatkowo, podczas gdy drukarki kartezjańskie i Delta, zwykle wymagają 3 silników do zasilania każdej osi, Polar wymaga tylko dwóch silników. Jest to bardziej wydajne pod względem zużycia energii (Kampker i in., 2019).



Rys. 26. Zasada działania drukarki 3D typu Polar (Kampker i in., 2019)

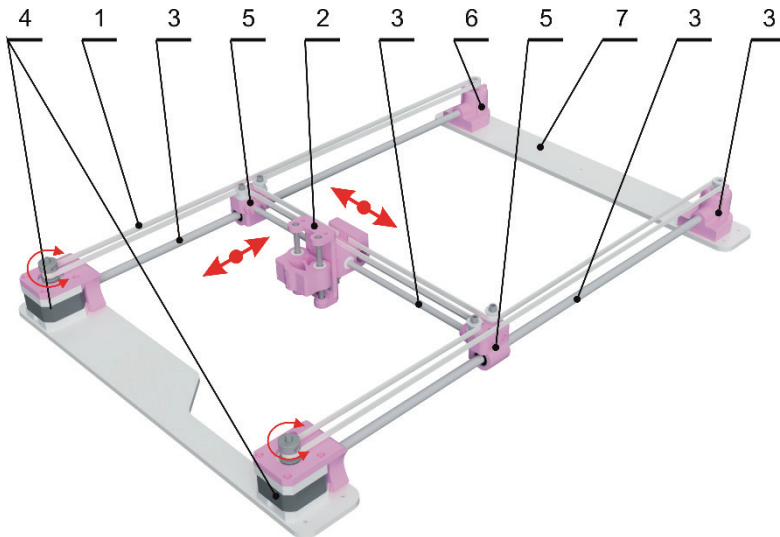


Rys. 27. Przykładowa drukarka 3D systemu Polar (firmy POLAR3D) ([https://3dprint.com/...](https://3dprint.com/))

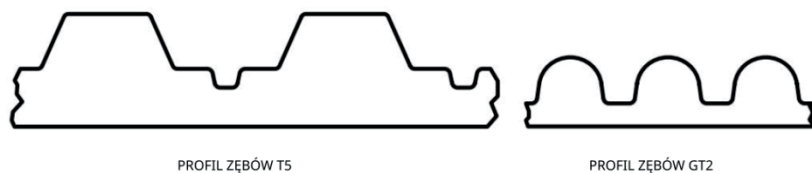
3.1.1. Inne aspekty konstrukcji drukarek 3D drukujących w technologii FDM

Mechanika zapewniająca ruch platformy i głowicy drukarskiej

Aby zapewnić stabilny trzyosiowy ruch drukarki 3D stosuje się kilka wariantów. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w układach kartezjańskich do zapewnienia ruchu w osiach X i Y jest stosowanie silników krokowych które następnie poprzez koło zębate przenoszą napęd na paski zębate do których zamocowany jest poruszany element (np. głowica drukująca). Sam przesuw realizowany jest po łożyskach liniowych (rys. 28). Wyznaczenie pozycji odbywa się poprzez określenie pozycji skrajnej (np. za pomocą wyłącznika krańcowego), a następnie znając liczbę kroków silnika krokowego (znając liczbę kroków na pełny obrót), stosując zębatkę o znanej liczbie zębów i skok zębów w pasku zębatym możemy określić pozycję mechanizmu. Mankamentem tego rozwiązania jest możliwość wystąpienia pewnych luzów przy współpracy koła zębatego na silniku oraz paskiem zębatym, jak również ryzyko wystąpienia poślizgów (szczególnie pod obciążeniem) czy „gubienie” kroków w silniku krokowym oraz rozciąganie czy zużycie samego paska zębatego. By uzyskać pożądaną dokładność ruchu w drukarce z tego typu rozwiązaniem należy sukcesywnie kontrolować luzy (i je ewentualnie minimalizować), okresowo kalibrować oraz w razie konieczności wymieniać nadmiernie zużyte elementy (np. wymieniać paski zębate). Na rysunku 29 przedstawiono przykładowe porównanie typowych pasków zębatych stosowanych w tego typu drukarkach. Pasek o profilu GT2 charakteryzuje się mniejszym skokiem i mniejszym luzem (jest on obecnie częściej stosowany w popularnych drukarkach) jednak jest mniej wytrzymały i jest przeznaczony do niewielkich mechanizmów (Evans, 2012; Wah i in., 2018).

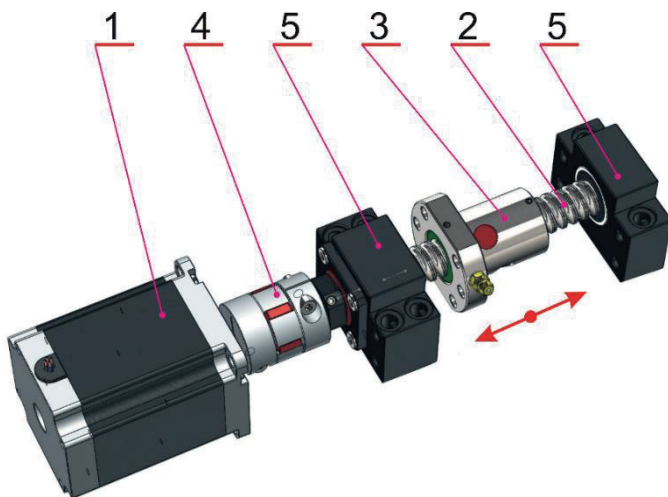


Rys. 28. Przykład zastosowania pasków zębatych w drukarce 3D do poruszania głowicy drukarskiej w osi X-Y dla kinematyki H-Bot. 1-pasek zębaty, 2-przesuwny element montażowy głowicy drukarskiej z łożyskiem liniowym, 3-prowadnica, 4-silniki krokowe, 5-przesuwny element z łożyskami liniowymi i rolkami zębatymi, 6-podstawa łożysk liniowych z rolkami zębatymi, 7-rama (na podstawie <https://grabcad.com/library/...>)



Rys. 29. Porównanie dwóch typowych profili pasków zębatych stosowanych w drukarkach 3D (na podstawie Evans, 2012)

Innym rozwiązaniem stosowanym do przesuwu elementów w drukarkach 3D w układach karteżjańskich jest stosowanie silników krokowych napędzających śruby pociągowe o określonym profilu i skoku (rys. 30). Znając liczbę kroków silnika oraz skok śruby pociągowej możemy precyzyjnie określić przesunięcie liniowe poruszanego elementu drukarki (po wcześniejszym ustaleniu pozycji początkowej np. za pomocą wyłączników krańcowych). Rozwiązanie to również może być obciążone pewnym błędem związanym z luzami występującymi między śrubą pociągową a nakrętką czy możliwością występowania poślizgów (szczególnie pod obciążeniem) czy „gubienie” kroków w silniku krokowym. Rozwiązanie to jest bardziej kosztowne jednak lepiej nadaje się do przesuwu elementów drukarki o większej masie. W popularnych rozwiązaniach drukarek 3D pracujących w technologii FDM najczęściej wykorzystywane jest do zapewnienia ruchu w osi Z (Evans, 2012).



Rys. 30. Wykorzystanie śruby pociągowej do przesuwu elementów drukarki 3D. 1 – silnik krokowy, 2 – śruba pociągowa (gwintowana), 3 – przesuwna nakrętka do której montowany jest element przemieszczany, 4 – sprzęgło, 5 – łożyska podporowe (na podstawie <https://grabcad.com/library/...>)

Jeszcze inne (jednak dość rzadko stosowane) rozwiązanie do przesuwu elementów drukarki 3D to wykorzystanie list zębatach i silników krokowych z zębatką. Znając liczbę kroków silnika i liczbę zębów w zębatce na nim oraz skok zębów w listwie zębatej możemy precyzyjnie określić przesunięcie liniowe poruszanego elementu drukarki (po wcześniejszym ustaleniu pozycji początkowej np. za pomocą wyłączników krańcowych). Rozwiązanie to również tak jak w przypadku zastosowania śruby pociągowej może być obciążone pewnym błędem związanym z luzami występującymi między śrubą pociągową a listwą zębatą czy możliwością występowania poślizgów (szczególnie pod obciążeniem) czy „gubienie” kroków w silniku krokowym. Tego typu rozwiązanie jest stosunkowo drogie i dodatkowo występuje przy tego typu napędzie większa ilość drgań (niż w przypadku zastosowania śruby pociągowej) pogarszające precyzję ruchu takich mechanizmów.

W celu zapewnienia większej precyzji ruchu elementów drukarki 3D czasami stosuje się dodatkowe np. enkodery które dostarczają informację systemowi sterującemu drukarką o rzeczywistym przesunięciu lub obrocie danego elementu. Rozwiązanie to jest droższe od wcześniej omawianych i wymaga stosowania systemów sterujących wyższej klasy o większych możliwościach obliczeniowych jednak zwiększa dokładność druku (Li i in., 2019).

Gabaryty elementu drukowanego

Kolejnym aspektem konstrukcyjnym jest oczywiście granica wielkości gabarytów drukowanych przedmiotów. Obecnie najmniejsze z nich umożliwiają wydruk w obszarze 100x100x100 mm, w przypadku większych urządzeń potrafią drukować elementy o rozmiarach nawet przekraczających 2000x2000x2000 mm.

Podgrzewanie stołu roboczego

Kolejną ważną kwestią konstrukcyjną jest podgrzewany stół. Podgrzewany stół poprawia podczas druku przyczepność elementu zapobiegając w ten sposób jego przesuwaniu. Problemem jest skurcz termiczny dla jednych materiałów mniejszy (np. PLA) dla innych większy (np. ABS czy ASA). Skurcz termiczny zależy od tego czy materiał jest amorficzny czy częściowo-krystaliczny. Przykładowo dla tworzywa ABS zawiera się on w granicach $0,3 \div 0,8\%$, dla ASA granicach $0,4 \div 0,7\%$, a dla PLA wynosi od 0,3 do 0,5%. Gorący materiał nakładany na stół roboczy w wyniku upływu czasu (i nakładania kolejnych warstw materiału) stygnie (obniża swoją temperaturę) co skutkuje jego kurczeniem się i odrywaniem od podłoża uniemożliwiając dalsze prawidłowe drukowanie elementu. Zastosowanie podgrzewanego stołu zmniejsza ten efekt, co jest szczególnie ważne przy druku z tworzyw charakteryzujących się większym skurczem. Najprostsze drukarki nie posiadają podgrzewanego stołu co ogranicza ich wykorzystanie w zasadzie tylko do możliwości druku z PLA który nie wymaga jego stosowania (posiada stosunkowo niewielki skurcz termiczny). Większość obecnie popularnych drukarek z technologii FDM/FFF posiada podgrzewany stół, umożliwiając jego podgrzanie zwykle do maksymalnie $100 \div 110^{\circ}\text{C}$.

Komora druku

Podczas druku z tworzyw charakteryzujących się dużym skurczem termicznym szczególnie - elementów o większych gabarytach zastosowanie podgrzewanego stołu może być niewystarczające. W takim przypadku aby zmniejszyć wpływ otoczenia i jego temperatury (znacznie niższej od temperatury druku) stosuje się zamkniętą przestrzeń w której się odbywa proces drukowania.



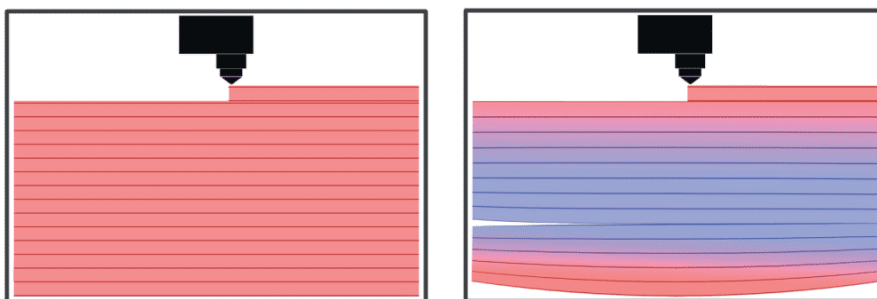
Rys. 31. Przykładowa drukarka 3D z zamkniętą komorą druku (<https://botland.com.pl/...>)

W przypadku prostszych i tańszych modeli istnieje możliwość zamknięcia drukarki w samodzielnie zbudowanej komorze zapewniającej większą stabilność termiczną podczas druku i ograniczenia wpływu warunków otoczenia (np. przeciągów). W sprzedaży są dostępne gotowe komory do drukarek. Przykład takiego prostego rozwiązania przedstawiono na rysunku 32.



Rys. 32. Przykładowa obudowa drukarki 3D (<https://botland.com.pl/...>)

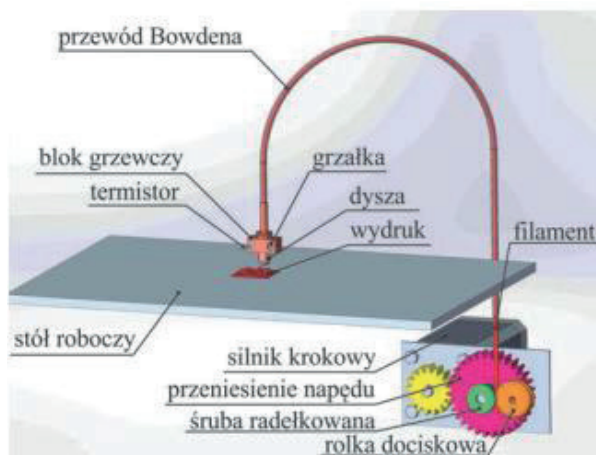
W niektórych przypadkach komory wyposażone są w termostaty i systemy grzewcze zwiększające stabilność termiczną podczas druku. Przy braku optymalnych parametrów termicznych szczególnie przy druku większych elementów szczególnie oraz z materiałów o dużym skurczu termicznym może wystąpić efekt wypaczenia elementów, powstawania reszkowych naprężeń wewnętrznych co może skutkować słabszymi właściwościami mechanicznymi elementu czy nawet powstawania w nich uszkodzeń zewnętrznych i wewnętrznych.



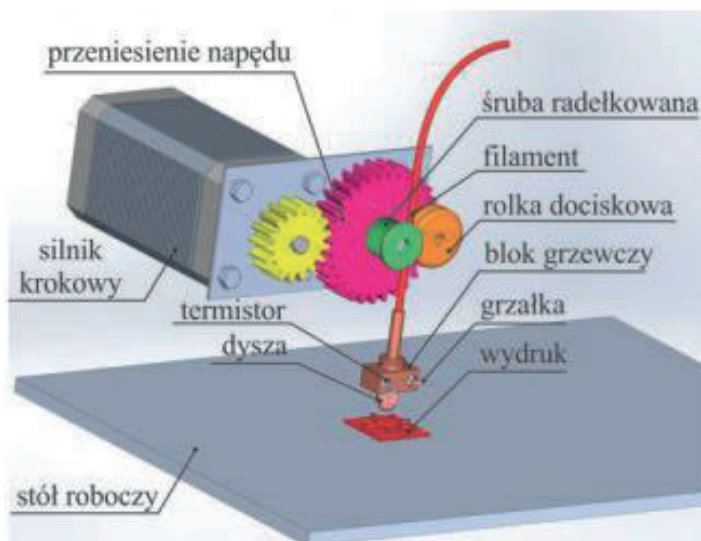
Rys. 33. Przykładowy rozkład temperatur drukowanego elementu w technologii FDM (po lewej – druk w podgrzewanej komorze zamkniętej, po prawej – druk bez zamkniętej komory osłonowej) (<https://get3d.pl/2021/07/05/podgrzewana-komora-robocza-czy-to-istotny-element-drukarki-3d/>)

Podawanie filamentu

W przypadku drukarek FDM/FFF rozróżniamy dwa główne warianty podawania filamentu do głowicy drukującej. Są to systemy tzw. Bowdena i Wade’a. Mają one swoje wady i zalety.



Rys. 34. Schemat działania drukarki z ekstruderem Bowdena (Szmidt i Rębosz-Kurdek, 2017)



Rys. 35. Schemat działania drukarki z ekstruderem Wade'a (Szmidt i Rębosz-Kurdek, 2017)

Tab. 2. Zestawienie wad i zalet systemu podawania filamentu systemem Bowdena i Wade'aem (opracowanie własne)

System podawania filamentu	Zalety	Wady
Bowdena	- Łatwiejszy ruch głowicy - znacznie mniejszy ciężar do przemieszczania podczas ruchu co skutkuje szybszą i cichszą pracą ekstrudera oraz lepszą jakością wydruku; - Większe pole robocze - system Bowden charakteryzuje się większym polem druku niż w systemie Direct (nie zawierają w zestawie drukującym silnika) co w efekcie pozwala na zwiększenie obszaru roboczego drukarki (przy tych samych gabarytach); - Ekstrudery typu Bowden, są zwykle bardziej kompaktowe - zajmują mniej miejsca niż ekstrudery typu Direct.	- Konieczność stosowania mocniejszych silników do napędu ekstrudera - ekstruder typu Bowden, musi przepchnąć filament przez długą rurkę a towarzyszą temu pewne opory tarcia; - Mogą występować problemy z retrakcją (wycofywaniem filamentu) – jest wywołane większym tarciem występującym w stosunkowo długiej rurce w której przemieszcza się filament do głowicy drukującej; - Są niezalecane do druku z filamentów bardziej elastycznych (np. z TPU) czy bardziej „ciernych” (np. z dodatkami) – mają one tendencje w długiej rurce w której przemieszcza się filament aby wyginać się czy mocno trzeć o nią co często prowadzi do zaburzeń podczas podawania materiału

		drukarskiego i zaburzenia całego procesu druku.
Wade'a (DirectDraw)	- Łatwa i szybsza ekstruzja - silnik ekstrudera z mniejszymi oporami wytłacza filament; - Możliwość stosowania napędu ekstrudera o mniejszej mocy (niż w przypadku systemu Bowdena) – mniejsze opory przy podawaniu filamentu do głowicy drukującej; - Możliwość stosowania szerszej gamy filamentów – oprócz klasycznych filamentów również bardziej "miękkie" mające tendencje do wyginania czy charakteryzujące się większym tarcie (np. z niektórymi dodatkami).	- Konieczność stosowania bardziej solidnej konstrukcji na której mocujemy głowicę drukującą – masa głowicy drukującej wraz ekstruderem i silnikiem jest większa niż przy systemie Bowdena; - Mniejsza precyzja druku przy słabszej konstrukcji drukarki – zwiększona masa głowicy drukującej z napędem zwiększa szanse na powstawanie drgań i niestabilności prędkości druku.

Grubość filamentu i średnica wylotowa dysz

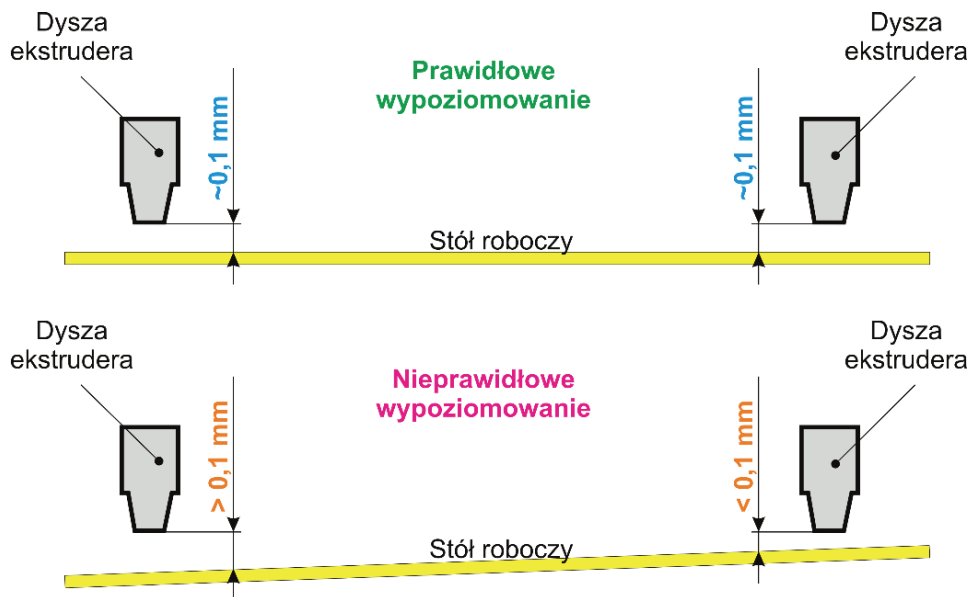
Filament w większości popularnych drukarek stosowany ma średnicę 2,85 mm (inni producenci stosują oznaczenie 3 mm) i 1,75 mm (ten drugi jest obecnie bardziej popularny). Pierwszy wariant jest znacznie rzadziej stosowany, choć pozwala na uzyskiwanie większej prędkości druku jednak zazwyczaj przy jego mniejszej dokładności (Andronov i in., 2023).

Nieregularna średnica filamentu wpływa na natężenie przepływu podczas wytłaczania tworzywa, co powoduje słabą jakość powierzchni, zacięcia ekstrudera, nieregularne szczeliny pomiędzy poszczególnymi wytłoczeniami i ewentualnie nadmierne nakładanie się surowca na siebie, co w ostatecznym rozrachunku sprowadza się do powstawania elementów słabej jakości lub wręcz nieudanym wydrukiem. Przykładowo dla filamentów o średnicy dyszy 1,75 najczęściej stosowane są dysze z otworem 0,4 jednak stosowane są także z otworem w przedziale 0,1 ÷ 1,0 mm (Cardona i in., 2016).

Poziomowanie stołu roboczego

Przy druku 3D istotnym elementem jest konieczność właściwego wypoziomowania stołu roboczego. Termin ten jest popularny jednak należy go uściślić. Prawidłowe wypoziomowanie stołu jest bardzo istotne podczas druku 3D metodą FDM/FFF. Stół musi być prawidłowo wypoziomowany względem płaszczyzn X i Y. Zapewni to prawidłową przyczepność elementu do platformy drukarskiej podczas druku. Zwykle przyjmuje się, że odległość dyszy od platformy na całej jej powierzchni powinna wynosić ok. $0,25 \div 0,5$ średnicy dyszy drukującej i jest to grubością warstwy nakładanego materiału). Źle wypoziomowany stół może doprowadzić do sytuacji, że jedna strona stołu drukarskiego jest bliżej dyszy, podczas gdy druga strona jest zbyt od niej oddalona. W efekcie wydruk nie będzie dobrze przylegał do stołu roboczego (zbyt duża odległość dyszy drukarskiej od stołu w jakimś miejscu). W przypadku zbyt małej odległości dyszy od stołu drukarskiego może to doprowadzić np. do „zatkania” dyszy drukującej lub spowoduje wypływanie materiału drukarskiego na boki (Ngo i in., 2018; Chiniwar i in., 2022; Ali i in., 2023).

W celu wyeliminowania tego problemu konieczne jest częste (nawet każdorazowo przed drukiem) mechaniczne skorygowanie wzajemnej równoległości. Innym rozwiązaniem często stosowanym jest zastosowanie automatycznych systemów korygujących programowo (po wcześniejszym pomiarze błędów równoległości stołu względem płaszczyzny elementu drukującego oraz nierówności samej płaszczyzny (stołu roboczego)). Stosowane są tzw. czujniki do auto poziomowania. Przykładem mogą być mechaniczne czujniki np. *BLtouch*, czy indukcyjne ewentualnie naciskowe (tensometryczne). Obecnie chyba największą popularnością cieszą się czujniki mechaniczne (np. *BLtouch*) coraz częściej fabrycznie montowane w urządzeniach posiadających oprogramowanie drukarki korygujące wszelkie nieprawidłowości równoległości (wypoziomowania) i nierówności stołu roboczego (np. stół roboczy posiadający wklęsnięcia czy wypukłości w niektórych miejscach). Czujnik poziomowania przed drukiem w celu wprowadzenia poprawek do toru poruszania się głowicy drukarskiej musi przeanalizować w wielu punktach rzeczywistą odległość od wylotu dyszy drukarki. Dokładność korekty zależy w dużej mierze od ilości wprowadzonych punktów pomiarowych. Jednak należy pamiętać, że wydłuży to czas całego wydruku (Rudi i in., 2019; Chiniwar i in., 2022; Ali i in., 2023).



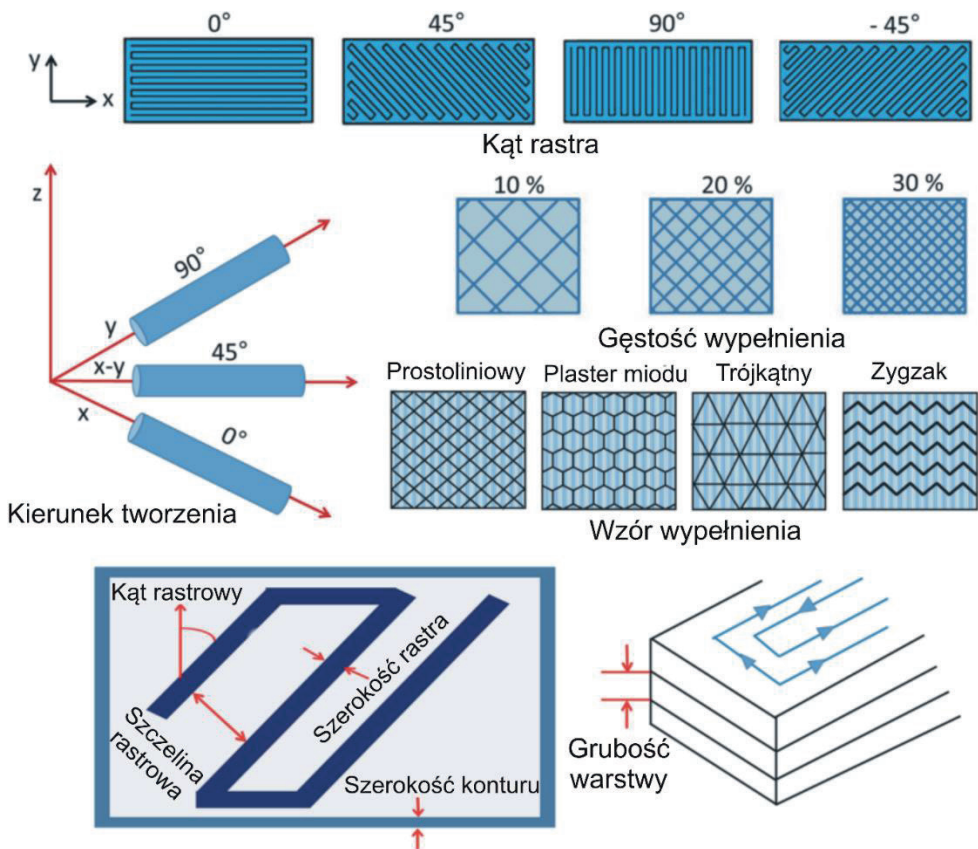
Rys. 36. Różnica w poziomowaniu stołu na przykładzie dyszy o średnicy 0,2 mm (opracowanie własne)

3.2. Wpływ parametrów druku 3D na jakość wytworzonego elementu

Na drukowane elementy i ich parametry wytrzymałościowe ma wpływ wiele czynników. Oczywiście istotny wpływ ma sam materiał (jego rodzaj, stabilność wymiarowa, czystość

czy w wielu wypadkach wilgotność). Ważna jest także często estetyka powierzchni (jej chropowatość i tekstura). By zapewnić lepsze walory estetyczne drukowanego elementu może wystąpić konieczność przeprowadzenia obróbki mechanicznej powierzchni (takiej jak szlifowanie, polerowanie itp.). Powoduje to wydłużenie czasu wytwarzania przedmiotu i zwiększa jego koszt (Nazan i in., 2017; Wu, 2018; Goh i in., 2020; Tri i in., 2020; Hanon i in., 2021; Valvez i in., 2022; Andronov i in., 2023).

Na właściwości mechaniczne elementów wydrukowanych w technologii FDM/FFF ma wpływ wiele czynników. Po pierwsze jest to materiał z którego drukujemy, ale również wiele innych czynników takich jak geometria prowadzenia wydruku (rys. 37), dokładność (grubość i szerokość ścieżki drukowania), szybkość druku, chłodzenie druku i temperatura druku (tłoczenia) ma także bardzo istotne znaczenie (Alafaghani i in., 2017; Shanmugam i in., 2021).



Rys. 37. Parametry geometrii druku w technologii FDM/FFF (na podstawie Shanmugam i in., 2021)

3.2.1. Temperatura

Temperatura drukowania jest jednym z najważniejszych parametrów w procesie druku 3D w technologii FDM/FFF. Oczywiście temperatura druku jest zależna od wykorzystywanego do druku materiału, a w związku z tym występuje pewien zakres temperatur zalecanych do stosowanych podczas procesu. Zbyt wysoka temperatura może doprowadzić do nadmiernego upłynnienia materiału co w efekcie prowadzić może do powstawania deformacji wymiarowych przedmiotu i pogorszenia jego estetyki. Wysoka temperatura może także doprowadzić do przyspieszenia (czy nawet powstania) procesów degradacji termicznej materiału drukarskiego. Dla odmiany zbyt niska temperatura może spowodować, że proces drukowania nie będzie przebiegał sprawnie. Nie nastąpi właściwe stapianie się kolejnych partii materiału ze sobą – w efekcie uzyskamy pogorszenie właściwości mechanicznych drukowanego przedmiotu. Przy stabilnej temperaturze stopiony materiał drukarski (filament) będzie miał jednolity kształt. Dzięki temu produkt wydrukowany w 3D będzie charakteryzował się lepszymi cechami mechanicznymi. Ustawienia temperatury wpływają również na zużycie energii (im wyższa temperatura druku tym większe nakłady energetyczne są wymagane) (Rinanto i in., 2018; Alsoufi i in., 2019; Saad i in., 2019; Yang i in., 2019; Dey i in., 2020; Yadav i in., 2020; Kristiawan i in., 2021).

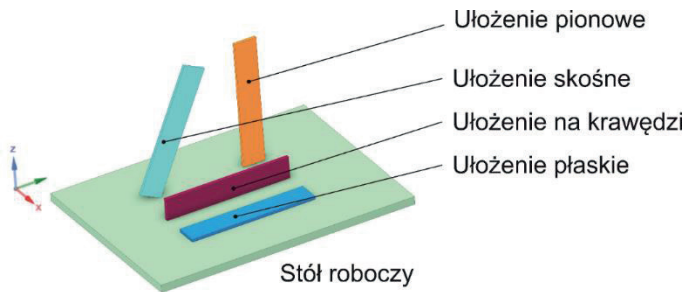
3.2.2. Szybkość druku

Szybkość drukowania wpływa również na jakość i wytrzymałość drukowanego elementu. Im większa prędkość drukowania, tym krótszy będzie czas jego wytworzenia jednak często uzyskuje się detale o gorszej jakości powierzchni. Szybkość drukowania należy dostosować tak, aby nie była ani za wysoka, ani za mała. Jest to powiązane prędkością podawania surowca (filamentu) przez ekstruder do zespołu grzewczego i dyszy. Dopasowuje się ją do temperatury dyszy i średnicy otworu dyszy oraz grubości nakładanej warstwy. Zmniejszenie prędkości druku daje tworzywu więcej czasu na połączenie ze stołem i innymi warstwami przez co uzyskujemy lepsze ich połączenie. Jeśli druk prowadzony jest zbyt szybko przy danej temperaturze, filament może nie przylegać prawidłowo do stołu, ponieważ tworzywo zbyt szybko zastygnie nie zapewniając odpowiedniego przylegania do niego, a w efekcie odpadnięcie elementu podczas jego wytwarzania. Można uogólnić – zwiększenie prędkości druku w technologii FDM/FFF skutkuje spadkiem parametrów wytrzymałościowych wytwarzanego przedmiotu (przy zachowaniu niezmiennych innych parametrów procesu), pogorszeniem jego walorów estetycznych (w związku z tym koniecznością zastosowania dodatkowej obróbki mechanicznej po druku) ale skraca czas druku i nakłady energetyczne konieczne do jego przeprowadzenie (czyli także obniża koszt) (Radhwan i in., 2019; Saad i in., 2019; Yadav i in., 2020).

3.2.3. Kierunek druku oraz geometria druku

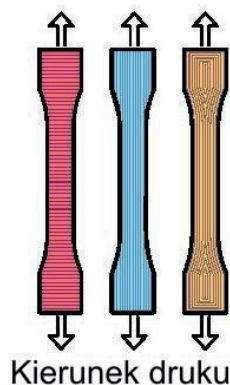
Również ułożenie drukowanego przedmiotu względem platformy roboczej ma wpływ na parametry mechaniczne drukowanego elementu (rys. 38). Możliwe jest stosowanie ułożenia

płaskiego, na krawędzi, pionowo oraz skośnie (bardzo rzadko stosowany wariant). W praktyce najczęściej stosuje się ułożenie płaskie.

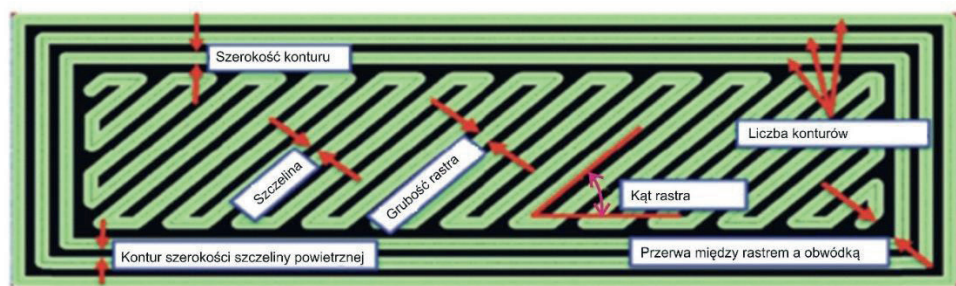


Rys. 38. Orientacja ułożenia przedmiotu podczas druku w technologii FDM/FFF (opracowanie własne)

Kolejnym aspektem podczas drukowania jest kierunek druku (ułożenie włókien). Początkowo stosowano ułożenie poziome, pionowe i równoległe do krawędzi (rys. 39). Ułożenie włókien oczywiście będzie miało wpływ na kierunkowe właściwości mechaniczne (w zależności od kierunku przyłożenia wytrzymałość znacząco się różniła). Obecnie popularnym rozwiązaniem jest naprzemienne układanie włókien w kolejnych warstwach drukowanego materiału (zmniejsza to różnice w wytrzymałości próbki w zależności od kierunku przyłożenia siły obciążającej). Obecnie najbardziej popularną techniką stosowaną podczas druku 3D w technologii FDM/FFF jest stosowanie równoległej obwódki, a w części centralnej skośnego ułożenia rastra (rys. 40) - oczywiście w kolejnych warstwach kąt rastra najczęściej ulega zmianie o 90° . Parametry takiej geometrii również mają wpływ na właściwości mechaniczne próbki, nie jest to jednak wpływ znaczący (Chacón i in., 2017; Abouzaid i in., 2019; Dwiya i in., 2019; Calignano i in., 2020; Hanon inni, 2020, Pandžić i in., 2023; Farashi i Vafae, 2022).

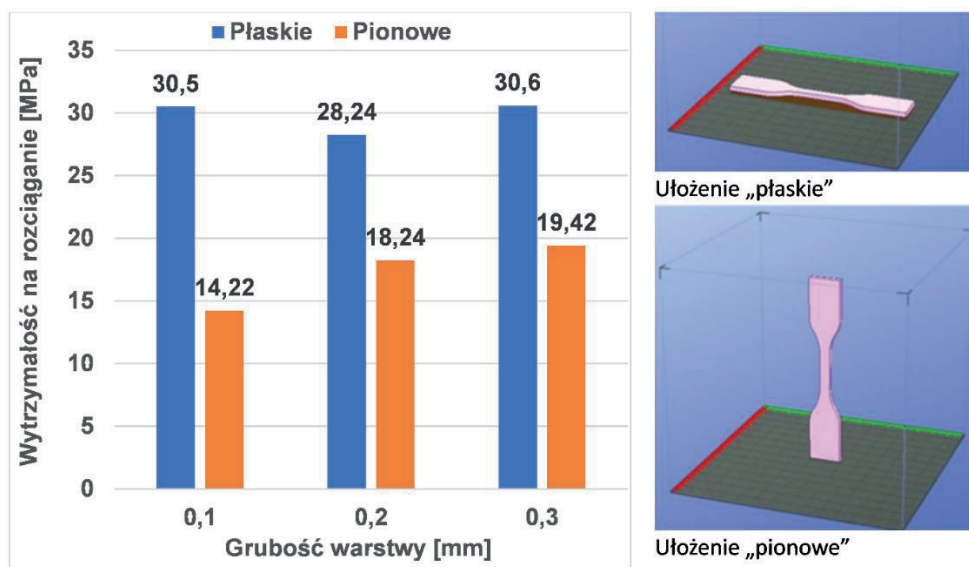


Rys. 39. Orientacja kierunku podczas druku przedmiotu w technologii FDM/FFF (na podstawie Chacón i in., 2017)



Rys. 40. Parametry ścieżki druku w technologii FDM/FFF (na podstawie Abouzaid i in., 2019)

Przykładowe zestawienie wytrzymałości na rozciąganie próbek wytworzonych z tworzywa ABS o różnej grubości warstwy przedstawiono na rys. 41.

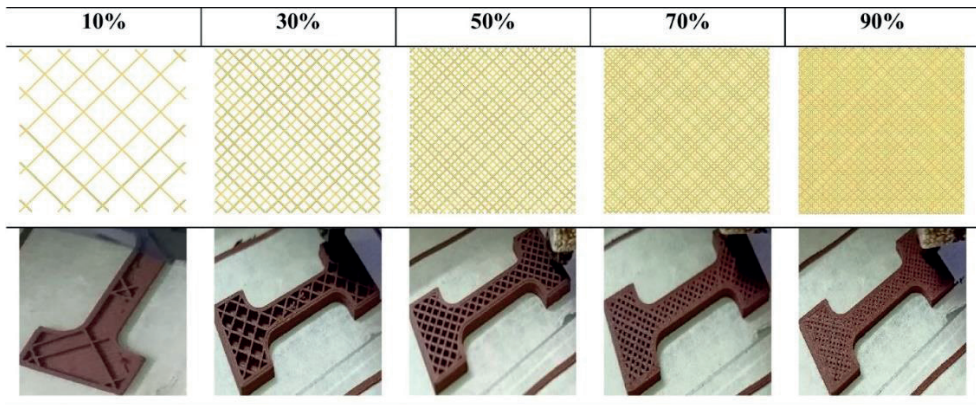


Rys. 41. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie próbek wytworzonych z tworzywa ABS o różnej grubości warstwy (na podstawie Dwiya i in., 2019)

3.2.4. Procent wypełnienia

Wypełnienie jest jednym z czynników wpływających na właściwości mechaniczne produktów wydrukowanych w technologii 3D. Procent wypełnienia 100% oznacza utworzenie obiektu w pełni wypełnionego, natomiast procent wypełnienia 0% oznacza że drukowane są jedynie zewnętrzne ściany bryły. Zwykle nie stosuje się niższego wypełnienia od 10%. Aby

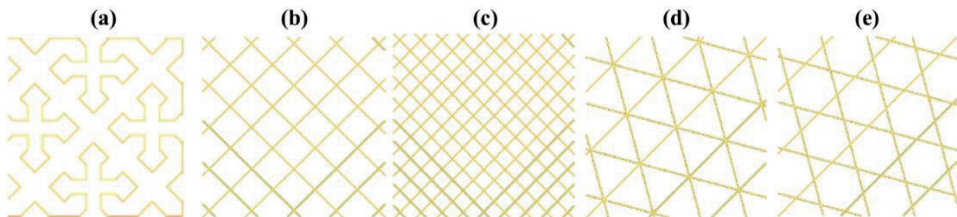
stworzyć przedmiot, możemy wybrać, w jakim stopniu zostanie wykorzystany procent wypełnienia. Im większy procent wypełnienia, tym więcej czasu zajmuje proces drukowania, zostanie zużyte więcej materiału i oczywiście wydrukowany element będzie miał większą masę. I odwrotnie im mniejszy procent wypełnienia, tym szybszy czas przetwarzania, tym mniej użytego materiału i lżejszy produkt. Procent wypełnienia wpływa również na poziom wytrzymałości produktów do druku 3D. Wyniki wielu badań wykazują, że wraz ze spadkiem gęstości wypełnienia wytrzymałość mechaniczna drukowanych części maleje (Rinanto i in., 2018; Alsoufi i in., 2019; Radhwan i in., 2019; Sharma i in., 2019; Wankhede i in., 2019; Zaman i in., 2019; Dey i in., 2020; Yadav i in., 2020; Bembenek i in., 2022; Birosz i in., 2022; Pandzic i Hodzic, 2022; Galvez i in., 2023).



Rys. 42. Przykład procentowego wypełnienia próbki wykonanej metodą FDM (Hamoud i in., 2024)

3.2.5. Wzór wypełnienia

Wzór wypełnienia jest bezpośrednio powiązany z procentem wypełnienia, stosuje się go, gdy wykorzystujemy mniejsze niż stuprocentowe wypełnienie. Istnieje kilka rodzajów wzorów wypełnień, wśród popularniejszych są kwadraty lub romby, siatki, plastry miodu, wypełnienia liniowe, trójkątne oraz inne. Zastosowany wzór wypełnienia wpływa na wytrzymałość produktu uzyskanego w wyniku druku 3D.



Rys. 43. Przykładowe geometrie wypełnienia wzorem (a) krzyż, (b) siatka, (c) linia, (d) trójkąt (e) trójkąt i sześciokąt (Hamoud i in., 2024)

Rozmiar wzoru wypełnienia zależy od procentu wypełnienia. Im większy procent wypełnienia, tym mniejszy będzie wzór wypełnienia. W przeciwieństwie do tego, jeśli procent wypełnienia zmniejszy się, rozmiar tego wzoru wypełnienia będzie większy. Pod względem poprawienia właściwości mechanicznych zazwyczaj nieznacznie lepsze uzyskuje się gdy stosuje się wzór plastra miodu (Alsoufi i in., 2019; Zaman i in., 2019; Camposeco-Negreta, 2020; Hanon i in., 2020; Eryildiz, 2021; Birosz i in., 2022).

3.2.6. Grubość warstwy

Grubość warstwy może bezpośrednio wpływać na czas obróbki, a także poziom gładkości powierzchni. Zwykle stosuje się grubość warstwy w przedziale $0,25 \div 0,5$ średnicy dyszy drukującej. Im grubsza warstwa, tym szybszy proces druku, ale uzyskana powierzchnia będzie bardziej chropowata. Natomiast im cieńsza warstwa, tym dłuższy proces, ale uzyskana powierzchnia będzie gładziej (Nancharaiiah i in., 2010; Mohamed i in., 2016; Chohan i Singh, 2017; Radhwan i in., 2019; Saad i in., 2019; Sharma i in., 2019; Wankhede i in., 2019; Yang i in., 2019; Dey i in., 2020; Camposeco-Negreta, 2020; Bembenek i in., 2022). Zaobserwowano także wpływ grubości warstwy na właściwości wytrzymałościowe wytwarzanych elementów. Ogólnie można przyjąć im cieńsza warstwa tym większa wytrzymałość wytwarzanych próbek na rozciąganie czy zginanie (Mohamed i in., 2016; Rankouhi i in., 2016; Alafaghani i in., 2017; Rodríguez-Panes i in., 2018; Jatti i in., 2019; Samykano i in., 2019; Sharma i in., 2019; Vicente i in., 2019; Syrlybayev i in., 2021; Shergill i in., 2023). Większość drukarek ma regulowaną grubość warstwy w zakresie od 0,1 do nawet 1 mm. Zwykle, aby zmniejszyć czas druku, proces druku 3D odbywa się przy zastosowaniu grubszej warstwy (często powyżej 0,2mm). Należy pamiętać że stosowanie większych grubości warstwy by uzyskać lepszą jakość powierzchni zazwyczaj wymusza konieczność stosowania po zakończeniu druku dodatkowej obróbki wykańczającej (zwykle ręcznej) za pomocą środków chemicznych lub mechanicznie (np. szlifowania). Tego typu zabiegi dodatkowe oczywiście zwiększają czas konieczny do wytworzenia przedmiotu i jego koszt. Jeszcze większe nakłady pracy po druku mogą wymagać przedmioty, które posiadają kształty o wysokim stopniu złożoności w takim przypadku proces obróbki powierzchni będzie trwał dłużej i będzie droższy.

3.3. Materiały wykorzystywane do druku FDM/FFF

Podczas druku 3D w technologii FDM/FFF wykorzystuje się szeroką gamę materiałów termoplastycznych, w tym ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren), PLA (kwas polimlekowy), PET-G (politereftalan etylenu) i inne. Wybór filamentu zależy od pożądanych właściwości drukowanego przedmiotu, takich jak wytrzymałość, elastyczność, odporność na ciepło czy biodegradowalność.

W celu wzmocnienia właściwości mechanicznych produktów wytwarzanych tą metodą stosuje się domieszki do materiałów właściwych uzyskując swojego rodzaju kompozyty. Innym rozwiązaniem także poprawiającym część właściwości mechanicznych jest stosowanie mieszanin tworzyw. Materiał kompozytowy stosowany do drukowania 3D metodą FDM możemy podzielić na dwie grupy (Heidari-Rarani i in., 2019):

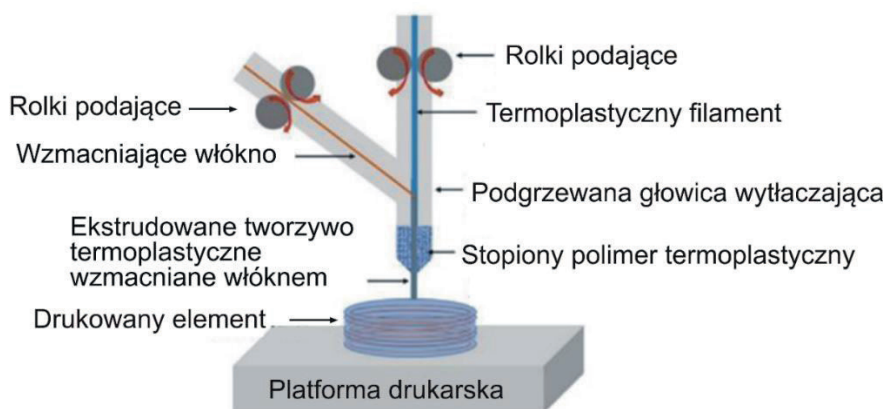
- 1) kompozyty z tworzyw termoplastycznych wzmocnianych krótkimi włóknami (SFRC), (Mu i in., 2023)

- 2) kompozyty z tworzyw termoplastycznych wzmocnionych ciągłymi (długimi) włóknami (CFRT).

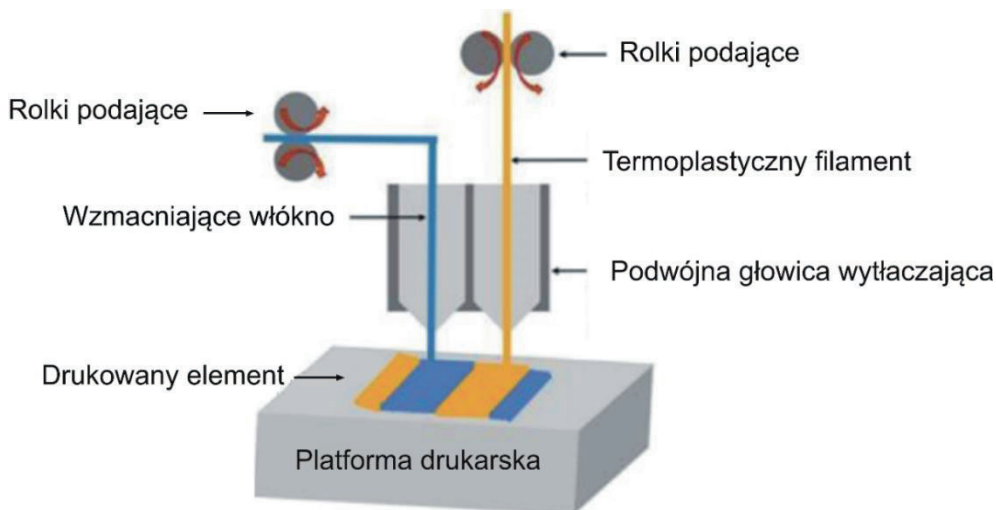
W przypadku kompozytów wzmocnionych krótkimi włóknami (SFRC) stosuje się najczęściej filament (wcześniej przygotowany materiał jako mieszanina tych dwóch substancji, z której wytwarza się właściwy filament do druku), w którym są zawarte niewielkie cząstki (np. krótkie włókna materiałów) i z niego prowadzony jest np. klasyczny druk poprzez termo wytłaczanie (Marciniak, 2023). Metoda ta jest także często stosowana przy wydruku inną metodą - poprzez wytłaczanie past np. wytłaczanie pasty betonowej wzmocnionej włóknami konstrukcyjnymi (np. włókna szklane) (Panda i in., 2017; Plückelmann i in., 2017).

W przypadku kompozytów wzmocnionych włóknami ciągłymi (CFRC) kompozyt można drukować metodą:

- współ-wytłaczania - filament z żywicy termoplastycznej i włókna są oddzielnie dostarczane do głowicy drukarki FDM. Filament termoplastyczny zostaje stopiony wewnątrz nagrzanej dyszy, a gdy włókno wzmocniające przechodzi przez dyszę, zostaje obtoczone roztopionym materiałem termoplastycznym. Gdy włókno wzmocniające zostanie obtoczone materiałem termoplastycznym zostanie wytłoczone przez dyszę drukarską i następnie osadzone jest na platformie drukarskiej zestawiając się z nią lub z warstwą wcześniej nałożoną (Ochi, 2015; Nakagawa i in., 2017).
- podwójnego wytłaczania - w metodzie tej włókna wzmocniające i filament z żywicy termoplastycznej są oddzielnie wytłaczane przez dwie dysze na płytę drukującą i tam się spajają. Drukowanie tą metodą zazwyczaj powoduje uzyskanie niezbyt gładkiej powierzchni wymagającej dodatkowej obróbki mechanicznej (Melenka i in., 2016; Dickson i in., 2018; Justo i in., 2018).



Rys. 44. Zasada druku FDM kompozytów z tworzyw termoplastycznych wzmocnionych ciągłymi długimi włóknami (CFRT) - koekstruzja (na podstawie Wickramasinghe i in., 2020).



Rys. 45. Zasada druku FDM kompozytów z tworzyw termoplastycznych wzmacnianych ciągłymi długimi włóknami (CFRT)- z podwójnym wytłaczaniem (na podstawie Wickramasinghe i in., 2020).

3.3.1. ABS (Akrylonitrylo-Butadieno-Styren):

ABS jest również bardzo powszechnie stosowanym materiałem wykorzystywanym do druku 3D w technologii FDM. Cieszy się dużą popularnością jako filament ze względu na jego trwałość przy stosunkowo niskiej cenie. Za sprawą swoich właściwości ABS zyskał dużą popularność w przemyśle – służy m.in. do produkcji wszelkiego rodzaju obudów, przycisków, uchwyty i innych.

ABS cechuje dość wysoka twardość, odporność na uderzenia i ścieranie oraz dobra tolerancja wysokich temperatur. Nie jest jednak odporny na UV – przykładowo elementy z niego wytworzone ulegają stopniowej degradacji w wyniku ekspozycji na słońce.

ABS może nastręczać problemów ze względu na duży skurcz materiału mogący doprowadzić do deformacji próbek czy ich odklejania od platformy drukarskiej podczas druku 3D. Aby temu zapobiec stosuje się dość wysoką temperaturę wytłaczania i podgrzewanie stołu roboczego. Dobrym rozwiązaniem, zapewniającym wysoką jakość wydruków z ABS są drukarki 3D z zabudowaną komorą roboczą, gdzie utrzymuje się względnie stałą, wysoką temperaturę, co pozytywnie wpływa na zachowanie się materiału podczas druku (Lay i in., 2019; Ozsoy i in., 2021).

Cechy charakterystyczne ABS:

- wysoka elastyczność materiału w porównaniu np. z PLA,
- dobrze sprawdza się w przygotowywaniu części ruchomych,
- lepsza odporność temperaturowa niż w przypadku PLA,
- rozpuszczalny w acetonie,
- łatwy w obróbce i wierceniu,

- można wygładzać za pomocą oparów acetonu,
- problematyczny podczas procesu druku,
- wysoki skurecz materiału (mogący doprowadzić do odrywania elementów z platformy drukarskiej czy ich deformacji podczas druku, jest szczególnie odczuwalne podczas druku elementów o większych gabarytach),
- nie jest odporny na promieniowanie UV,
- filamenty wydzielają drażniący zapach podczas druku.

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z ABS kształtowały się w zakresie od 50 do 170 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

Typowe parametry druku 3D

- Temperatura druku 3D: $240 \div 265^{\circ}\text{C}$;
- Zalecany podgrzewany stół roboczy: $90 \div 110^{\circ}\text{C}$;
- Zalecane stosowanie komory drukarskiej termostaticznej;
- Wymagane stosowanie środków polepszających adhezyjność materiału do stołu roboczego.

ABS SPECJALNY

Producenci materiałów starają się uwypuklać zalety ABS, niwelując jednocześnie trudności z drukiem 3D tego materiału, tworząc nowe warianty klasycznego filamentu. Bazą dla tych materiałów jest ABS, jednak dzięki optymalizacji składu i procesu wytwórczego producenci proponują filament o podwyższonej wytrzymałości lub innych właściwościach mechanicznych. często także materiał charakteryzuje się niższym, skurczem niż „czysty” ABS (np. nie ma konieczności drukowania w komorze termostaticznej).

ABS można stosować m.in. do tworzenia prototypów funkcjonalnych, części finalnych czy produktów konsumenckich.

Typowe parametry druku 3D

- Temperatura druku 3D: $250 \div 270^{\circ}\text{C}$;
- Zalecany podgrzewany stół roboczy: $90 \div 110^{\circ}\text{C}$.

Dostępny również jest ABS elektrostatyczny - materiał przewodzący prąd. Znajduje zastosowanie np. w produkcji elementów do ochrony antystaticznej.

3.3.2. ASA (Akrylonitryl-Styren-Akrylan)

ASA, jest tworzywem termoplastycznym o podobnej strukturze molekularnej, co wcześniej omawiany ABS. W porównaniu z ABS, ASA jest odporne na promieniowanie UV i zachowuje swój wygląd i odporność, nawet po długiej ekspozycji na działanie promieni słonecznych i wody. Tworzywo to możemy znaleźć w wielu popularnych produktach, takich jak np. części samochodowe (osłony zderzaków i obudowy lusterek bocznych), rynny i rury spustowe oraz meble ogrodowe (Kumar i in., 2021; Pandzic i Hodzic, 2022).

Cechy charakterystyczne ASA:

- odporność na promienie UV,
- wysoka elastyczność w porównaniu np. z PLA,
- wysoka trwałość koloru,
- odporność na temperatury nawet do 94°C ,

- możliwość obróbki gotowego modelu (podobnie jak tworzywa ABS,
- niska emisja zapachów w porównaniu z ABS.

Typowe parametry druku 3D

- Temperatura druku 3D: $255 \div 270^{\circ}\text{C}$;
- Zalecany podgrzewany stół roboczy: $90 \div 110^{\circ}\text{C}$.

3.3.3. PLA (Polilaktyd)

Jeden z dwóch najpopularniejszych materiałów do druku 3D w technologii FDM.

Kwas polimlekowy (PLA) to odnawialny, biokompatybilny i biodegradowalny polimer termoplastyczny wytwarzany głównie z naturalnych składników takich jak skrobia kukurydziana czy trzcina cukrowa, dzięki czemu zasłużył sobie na miano zielonego plastiku. PLA, ma dobrą przetwarzalność i właściwości mechaniczne. Może być stosowany jako substytut polimerów na bazie ropy naftowej. PLA jest polimerem hydrofobowym o słabej elastyczności, ulegający stopniowej biodegradacji (co często jest uznawane za wadę) i słabej stabilności termicznej (Patra i Pattanayak, 2015; Deshmukh i in., 2017; Shimpi, 2018; Lay i in., 2019; Ozsoy i in., 2021; Pandzic i Hodzic, 2022; Bembenek i in., 2022).

Materiał nie wydziela tak szkodliwych oparów podczas procesu drukowania jak inne tworzywa sztuczne, dlatego może być stosowany w pomieszczeniach w których przebywają ludzie np. podczas zajęć edukacyjnych w szkołach.

Jego cechy charakterystyczne to:

- idealny do wydruków o charakterze pokazowym, prototypów – również w dużych rozmiarach,
- stosunkowo niewielki skurcz materiału – podgrzewany stół nie jest koniecznością,
- stosunkowo niska temperatura druku ($180 \div 230^{\circ}\text{C}$),
- jest nierozpuszczalny w większości typowych rozpuszczalników takich jak woda, aceton itp.,
- niestety jest podatny na odkształcenia pod wpływem wysokich temperatur (w zasadzie już powyżej 56°C),
- ograniczona elastyczność (jest kruchy, ma tendencję do pękania, słabo odporny na uderzenie mechaniczne),
- problematyczny w obróbce po wydruku, która generuje wysoką temperaturę (np. długotrwałe wiercenie czy szlifowanie).

Typowe parametry druku 3D

- Temperatura druku 3D – $180 \div 230^{\circ}\text{C}$;
- Nie wymagany podgrzewany stół roboczy (ewentualnie $50 \div 70^{\circ}\text{C}$);
- Nie wymagana komora termostatyczna.

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z PLA kształtowały się w zakresie od 45 do 180 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

PLA SPECJALNY

Ulepszona wersja standardowego tworzywa do druku 3D, pozwalająca na tworzenie wydruków 3D o lepszej jakości charakteryzujących się lepszymi parametrami mechanicznymi i łatwiejszym drukiem w porównaniu do klasycznego PLA.

Materiał często stosowany jest przy tworzeniu np. makiet architektonicznych, modeli koncepcyjnych oraz innych części. Tworzywo można poddawać dodatkowej obróbce (podobnie jak PLA). Cechy materiału i parametry druku zbliżone do klasycznego PLA.

3.3.4. PET-G

PET-G (Politereftalan etylenu) łączy najbardziej pożądane cechy ABS i PLA. Materiał charakteryzuje się bardzo dobrą przyczepnością warstw, jest bardziej wytrzymały na rozciąganie niż ABS i elastyczny niż PLA.

Materiał można szlifować i wiercić w nim otwory. Jest odporny na działanie chemikaliów, w tym rozpuszczalników oraz względnie odporny na działanie promieniowania ultrafioletowego i wilgoci. Maksymalna temperatura użytkowa przedmiotów wykonanych z PET-G to około 70°C – wystawione na wyższe temperatury mogą zacząć mięknąć i odkształcać się.

Podczas druku 3D cechuje się niewielkim skurczem materiału, więc chociaż wskazane jest używanie podgrzewanego stołu, aby zapobiec odklejaniu się wydruków, możliwe jest drukowanie na urządzeniu niewyposażonym w zamkniętą komorę roboczą. Wśród innych zalet często wymienia się też bardzo dobrą dokładność wymiarową wydruków (Bembenek i in., 2022; Pandzic i Hodzic 2022).

Jego cechy charakterystyczne to:

- dobre właściwości wytrzymałościowe – odporny na uderzenia,
- niewielki skurcz materiału podczas druku (wymaga jednak podgrzewanego stołu),
- elastyczny,
- nierozpuszczalny,
- umiarkowanie trudny w użyciu – wymaga dobrania odpowiednich parametrów druku.

Główne zastosowania PET-G to druk pojemników, uchwytów, zasuwek, prototypów, elementów dekoracyjnych np. wazonów.

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – 220 ÷ 250°C;
- Zalecany podgrzewany stół roboczy (70 ÷ 80°C);
- Zalecany dodatkowy środek adhezyjny;

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z PET-G kształtowały się w zakresie od 55 do 280 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

3.3.5. Poliamid

Znany również jako nylon, jest popularnym polimerem syntetycznym o wielu zastosowaniach (m.in. żyłki wędkarskie). Charakterystyczną cechą materiałów na bazie poliamidu jest wysoka wytrzymałość połączona z odpornością chemiczną i termiczną, dodatkowo materiały te mogą być łatwo poddawane dalszej obróbce mechanicznej. Występują różne rodzaje poliamidu. W druku 3D najpopularniejsze to PA6, PA12.

Poliamid nadaje się do tworzenia wysoko obciążonych elementów konstrukcyjnych takich jak narzędzia, zawiasy, klamry, przekładnie, prototypy funkcjonalne czy części mechaniczne (Kutz, 2011; Lay i in., 2019; Gong i in., 2022).

Jego cechy charakterystyczne to:

- lekki i wytrzymały,
- dobra jakość wykończenia powierzchni,
- elastyczny i odporny na ścieranie,
- odpowiedni do wytwarzania detali dobrze znoszących obciążenia mechaniczne (np. koła zębate, łożyska),
- charakteryzuje się niewielkim skurczem,
- nierozpuszczalny w większości popularnych rozpuszczalników,
- wydziela opary w procesie druku 3D (praca w środowisku zamkniętym z wymaga stosowania odpowiednich filtrów powietrza do urządzenia lub wyciągów),
- umiarkowanie trudny w użyciu – wymaga jednak dobrania odpowiednich parametrów druku,
- surowiec niestety chętnie pochłania wilgoć z powietrza (najlepiej przechowywać go w hermetycznych pojemnikach z pochłaniaczem wilgoci).

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – $220 \div 290^{\circ}\text{C}$ (w zależności od rodzaju);
- Zalecany podgrzewany stół roboczy - $60 \div 90^{\circ}\text{C}$ (w zależności od rodzaju);
- Zalecany dodatkowy środek adhezyjny;
- Zalecane stosowanie wyciągu lub filtra powietrza w obszarze podczas druku 3D;
- Zalecane suszenie po zakończeniu druku.

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z poliamidu kształtowały się w zakresie od 240 do 300 PLN za 1 kg (dane na rok 2024).

3.3.6. Polipropylen (PP)

Elastyczny materiał o dużej odporności chemicznej. Charakteryzuje się również dobrą odpornością zmęczeniową oraz doskonałymi właściwościami dielektrycznymi. Materiał niestety posiada niską adhezyjność do stołu roboczego (zalecane jest stosowanie dodatkowych środków adhezyjnych) prze co ma tendencję do odklejania się od platformy drukarskiej podczas druku. Materiał trudny w druku w technologii FDM (Shulga i in., 2020).

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – $220 \div 250^{\circ}\text{C}$;
- Nie jest wymagany podgrzewany stół roboczy, (jeśli jednak je stosujemy jest to zwykle max 80°C);
- Zalecany dodatkowy środek adhezyjny.

3.3.7. HIPS

Tworzywo używane powszechnie do produkcji opakowań przystosowanych do kontaktu z żywnością, składnikami podstawowymi są polistyren oraz polibutadien. Nazywany jest wysokoudarowym polistyrenem. Materiał może być stosowany przy wydrukach dwugłowicowych jako materiał podporowy (np. zalecany przy druku złożonych modeli z ABS), Materiał zapewnia wysoką jakość wykończenia powierzchni i stabilność wymiarową (niski skurcz termiczny).

Tworzywo jest lekkie, charakteryzuje się znakomitą odpornością na pękanie i wysoką udurowalnością, posiada wysoką sztywność (posiada właściwości mechaniczne zbliżone do ABS). Wykazuje się bardzo dobrą odpornością na działanie rozcieńczonych związków zasadowych oraz węglowodorów alifatycznych, jest odporny na działanie wody. Charakteryzuje się umiarkowaną odpornością na działanie tłuszczów, olejów oraz rozcieńczonych kwasów. Niestety jest słabo odporny na wpływ alkoholi. Elementy drukowane 3D z HIPS można poddawać obróbce mechanicznej po druku takim jak klejenie, szlifowanie czy malowanie (Neimat i in., 2020).

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – $230 \div 260^{\circ}\text{C}$;
- Zalecany podgrzewany stół roboczy – $80 \div 100^{\circ}\text{C}$;
- Zalecana zamknięta komora robocza.

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z HIPS kształtowały się w zakresie od 70 do 100 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

3.3.8. FLEX (TPU - termoplastyczny poliuretan)

TPU jest materiałem, który jest bardzo elastyczny o dobrych cechach mechanicznych (dobra wytrzymałość, wysoka odporność na tarcie oraz podwyższona odporność na działanie temperatury). Materiał charakteryzuje się niskim skurczem termicznym i wysoką spójnością. Niestety materiał dość mocno higroskopijny (konieczność wstępnego suszenia przed drukiem i przechowywania w hermetycznych pojemnikach). Jest to materiał dość trudny do druku (ze względu na swoją elastyczność występują problemy z podawaniem surowca do ekstrudera) (Rodríguez-Parada i in., 2021).

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – $210 \div 240^{\circ}\text{C}$;
- Nie jest wymagane podgrzewanie stołu roboczego (jeśli stosujemy – temperatura $20 \div 80^{\circ}\text{C}$);
- Zalecany stosowanie niskich prędkości druku (w porównaniu do stosowanych przy innych tworzywach).

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z TPU kształtowały się w zakresie od 90 do 200 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

3.3.9. Poliwęglan (PC)

Poliwęglan (PC) to rodzaj polimeru składający się z estrów kwasu węglowego. Poliwęglan jest tworzywem o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych. Ma doskonałą przejrzystość. PC jest wytrzymały, sztywny, ma dobrą udarność, stabilność wymiarową i odporność na ciepło (odporny do 135°C), umiarkowanie elastyczny, nie przewodzi prądu. Niestety jest podatny na wypaczenia, posiada dość wysoki skurcz i jest higroskopijny. Materiał trudny do druku w technologii FDM. Stosowany jest głównie w butelkach, foliach szklarniowych, płytach CD i DVD oraz okularach ochronnych (Asif i in., 2019; Piland i in., 2019; Shimpi, 2018).

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – 270 ÷ 300°C;
- Wymagany podgrzewany stół roboczy – 120 ÷ 140°C;
- Zalecane stosowanie niskich prędkości druku (w porównaniu do stosowanych przy innych tworzywach);
- Zalecane suszenie po druku;
- Zalecane stosowanie komory termostatycznej przy druku.

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z PC mieszczą się w zakresie od 80 do 300 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

3.3.10. PEEK/ PEAK

PEEK – półkryształiczny polimer z rodziny poliaryloeteroketonów (PEAK). Wykazuje bardzo dobrą odporność termiczną (nawet do 350°C) oraz chemiczną. Do zalet należy dodać to, że opary uwalniane podczas druku nie wykazują dużej toksyczności. Jest jednym z najbardziej wytrzymałych mechanicznie i termicznie materiałów stosowanych do druku w technologii FDM. Jest to materiał odporny na większość syntetycznych i naturalnych rozpuszczalników, posiada wysoką wytrzymałość dielektryczną i dobrą przewodność cieplną (jak na tworzywa). Niestety jest materiałem charakteryzującym się wysokim skurczem termicznym i dość wysoką higroskopijnością i w związku z tym jest dość trudnym materiałem do druku 3D w technologii FDM.

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – 360 ÷ 410°C;
- Wymagany podgrzewany stół roboczy – 90 ÷ 120°C;
- Wymagane stosowanie komory termostatycznej przy druku.

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z PEEK kształtowały się w zakresie od 300 do 1300 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

3.3.11. Filamenty podporowe (PVA, BVOH)

Materiały podporowe to rozpuszczalne filamenty (w wodzie lub innym rozpuszczalniku), które służą do druku 3D elementów podporowych. Używa się ich do druku 3D z wykorzystaniem urządzeń o co najmniej dwóch głowicach drukujących przestrzennie.

Podpory to pionowe struktury o bardzo cienkich ściankach, na których opierają się fragmenty modelu. Są stosunkowo proste do usunięcia – o ile zostały zaplanowane w miejscu, gdzie jest do nich dostęp i nie są za małe.

W przypadku druku wyjątkowo złożonego geometrycznie modelu warto rozważyć druk 3D podpór z wykorzystaniem materiału rozpuszczalnego (np. wodzie lub innym rozpuszczalniku który nie będzie reagował z materiałem drukarskim właściwym).

W świecie urządzeń klasy desktopowej materiałem podporowym jest PVA lub BVOH. Jest to przezroczysty termoplast, który po dłuższej ekspozycji na wodę o określonych parametrach termicznych całkowicie się w niej rozpuszcza (w zależności od objętości może to trwać od kilkunastu minut do nawet kilkunastu godzin).

Ceny filamentu o średnicy 1,75mm z PVA kształtowały się w zakresie od 100 do 240 PLN za 1 kg (dane za rok 2024).

3.3.12. Inne tworzywa stosowane przy druku 3D w technologii FDM

Stosowane są oczywiście także inne tworzywa przy druku 3D w technologii FDM. Nie zostały omówione powyżej ze względu na ograniczenia objętościowe pracy i ich mniejszą popularność. Zaliczyć do nich można: POM, PMMA, PEI, TPE, i inne.

3.3.13. Tworzywa zmodyfikowane

Są to tworzywa których skład uległ zmianie w stosunku do materiału bazowego poprzez zastosowanie dodatków mających zmienić lub poprawić ich cechy ogólnoużytkowe. Istnieje także szeroka grupa tworzyw będąca mieszaniną kilku polimerów, rozwiązanie to także się stosuje by zmienić w określonym kierunku cechy tych materiałów. Procentowy udział poszczególnych składników bywa różny i w większości przypadków jest objęty tajemnicą handlową. Wariantów tego typu modyfikacji i dodatków jest bardzo dużo i wciąż powstają nowe. Poniżej przedstawione zostały kilka z nich.

PLA soft

Zmodyfikowane PLA cechujące się większą elastycznością. Swoimi właściwościami przypomina twardą gumę.

W porównaniu do klasycznej wersji PLA, specjalne wersje PLA pozwalają na osiągnięcie estetycznego wykończenia detali.

Typowe parametry druku 3D:

- Temperatura druku 3D – $180 \div 220^{\circ}\text{C}$;
- Zalecany podgrzewany stół roboczy – $80 \div 100^{\circ}\text{C}$;
- Zalecany dodatkowy środek adhezyjny.

PC/ABS

Jest to mieszanka poliwęglanu i ABS. Mieszanka charakteryzuje się wysoką udarnością zarówno w niskich, jak i wysokich temperaturach.

TPE/TPU

Jest to elastomer termoplastyczny. Materiał o wysokiej elastyczności przypominający swoimi właściwościami gumę. Cechuje się dużą wytrzymałością mechaniczną na rozciąganie, zgniatanie, ścieranie oraz odpornością na działanie olejów.

Filamenty dekoracyjne

Materiały do druku 3D nie zawsze muszą wyróżniać się szczególnymi właściwościami mechanicznymi, fizycznymi czy chemicznymi. Wielu użytkowników od filamentu wymaga jedynie atrakcyjnego, nietuzinkowego wyglądu imitującego inny materiał np. kamień, drewno itp. Poniżej przedstawiono kilka przykładów.

Kompozyt PLA i drewna

Jest to mieszanina tworzywa PLA i sproszkowanej mączki drzewnej. Zależnie od zastosowanej temperatury druku i ilości wypełniacza można uzyskać jaśniejszy lub ciemniejszy kolor, istnieje możliwość nadania charakterystycznych słoń.

Kompozyt PLA i kredy lub innych skał

Jest to mieszanina tworzywa PLA i sproszkowanej kredy (lub innych sproszkowanych skał). Może być wykorzystany do tworzenia modeli architektonicznych (symulacja kamieni).

Kompozyty proszków metalicznych i PLA

Jest to mieszanina tworzywa PLA i sproszkowanych metali (np. miedzi, aluminium itp.

3.4. Najczęstsze błędy druku

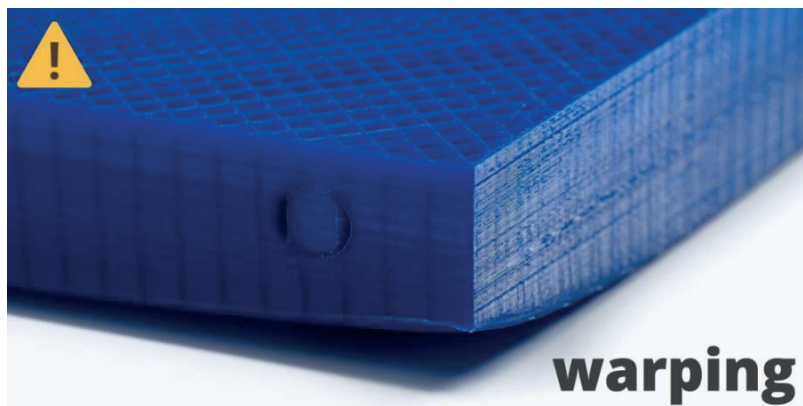
Błędy związane z drukiem 3D w technologii FDM/FFF mogą występować z wielu przyczyn. Poniżej przedstawiono najczęstsze błędy i problemy:

1. Błędy początkowe (przed fazą druku):
 - a. błędy konwersji pliku wsadowego – niewłaściwe parametry, zła skala, zła jednostka, błędy przy konwertowaniu pliku,
 - b. błędy podziału modelowego pliku na warstwy.
2. Błędy podczas drukowania:
 - a. błąd ustawienia parametrów przetwarzania (drukowania):
 - błędy związane z prędkością druku,
 - błędy związane z temperaturą druku,
 - problemy z zatykaniem się dyszy wylączarki czy niewłaściwym przepływem filamentu,
 - b. błędy mechaniczne:
 - wibracje drukarki (podczas druku),
 - błędy przy wylączaniu i osadzaniu na platformie materiału drukarskiego,
 - niewłaściwa kalibracja drukarki – niewłaściwa ilość wylączanego materiału, złe wypoziomowanie,
 - przesunięcie wydruku kolejnych warstw w wyniku np. napotkanego oporu podczas przesuwania głowicy drukarskiej lub stołu roboczego,
 - c. brak lub utrata przyczepności elementu do stołu roboczego podczas druku.

3. Błędy po zakończeniu drukowania:
 - a. niewłaściwe oddzielanie wydrukowanego elementu od stołu drukarskiego (platformy roboczej) – pęknięcia czy złamania elementu,
 - b. błędy spowodowane deformacją podczas usuwania konstrukcji podporowych (jeśli występowały),
 - c. błędy w procesie obróbki powierzchni – mechanicznej chemicznej czy innej (jeśli była stosowana),
4. Zaburzenia zewnętrzne:
 - a. deformacja materiału spowodowana przez układ chłodzenia,
 - b. błędy w przygotowaniu filamentu – surowiec zbyt wilgotny, zdeformowany itp.

Poniżej przedstawione zostaną występujące najczęstsze praktyczne problemy w druku 3D w technologii FDM/FFF wynikające z błędów.

Deformacja (*warping*) – w wydruku naroża drukowanego elementu wyginają się do góry. Może to być skutkiem zbyt dużej odległości dyszy od podłoża (ewentualnie niewłaściwego wypoziomowania stołu roboczego) lub niewystarczającą przyczepnością wytłaczanego plastiku do powierzchni stołu roboczego, ewentualnie wysokim skurczem termicznym materiału drukarskiego. Można to rozwiązać za pomocą dodatkowych środków adhezyjnych rozprowadzanych na stole roboczym przed wydrukiem. Podobny efekt uzyskuje się także gdy drukowany materiał podczas stygnięcia silnie się kurczy (skurcz termiczny). W takich przypadkach zaleca się użycie podgrzewanego stołu oraz zamkniętej termostatycznej komory drukarskiej (minimalizuje się w ten sposób wielkość skurczu podczas druku).



Rys. 46. Deformacja elementów podczas druku 3D w technologii FDM/FFF – odklejanie się od podłoża fragmentów elementu ([https://wikifactory.com/...](https://wikifactory.com/))

Pękanie, rozwarstwienie (*cracking*)

Jest to problem, który skutkuje pękaniem czy rozwarstwianiem kolejnych warstw drukowanego elementu. Problem ten może występować z jednej lub dwóch przyczyn. Pierwszą jest słaba przyczepność między warstwami - warstwy nie przylegają do siebie prawidłowo. Jest to zazwyczaj spowodowane zbyt niską temperaturą drukowania (materiał z poszczególnych warstw za szybko stygnie i nie zdąży się zespolić z niższą warstwą a tylko nałoży się

na nią). Można to rozwiązać, zwiększając temperaturę drukowania lub/i zmniejszając prędkość wentylatora nadmuchu chłodzącego przedmiot. Drugą przyczyną to kurczenie termiczne - warstwy dobrze się spajają ze sobą jednak na skutek stygnięcia wydruku i silnego skurczu termicznego (warstwy dolne szybciej stygną i kurczą się w stosunku do warstw świeżo nałożonych) co może spowodować rozdzielanie się niektórych warstw na skutek tych naprężeń. Problem występuje szczególnie przy druku z materiałów charakteryzujących się wysokimi wartościami skurczu termicznego (np. ABS i podobne). W takim przypadku dobrym rozwiązaniem jest stosowanie zamkniętej komory termostatycznej gdzie panuje podwyższona temperatura (a przynajmniej tylko zamkniętej komory, która zwiększy stabilizację temperaturową w przestrzeni druku).

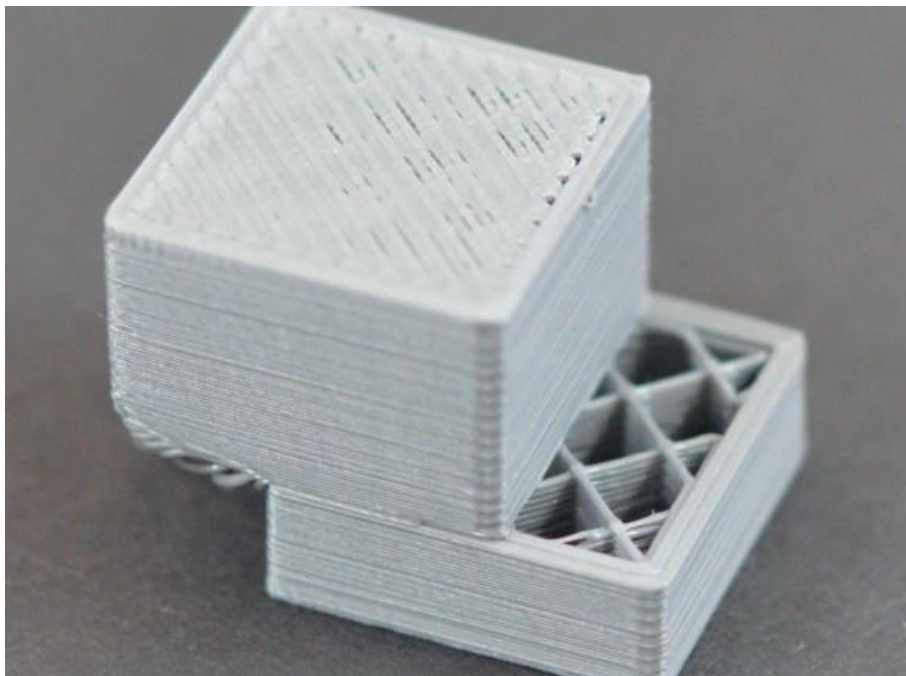


Rys. 47. Pękanie elementów (rozwarstwianie) podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)

Przesunięcie warstw

Przesunięcie warstw to problem, który występuje w postaci przemieszczenia na pewną odległość w osi X lub Y (lub obu na raz) wydruku od pewnej warstwy względem ich prawidłowej pozycji. Najczęstszymi przyczynami przesunięcia warstw są:

- Zbyt wysoka temperatura silników krokowych zapewniających ruch w osi X i Y lub sterownikach tych silników. Może wystąpić gdy drukarka pracuje dłużej pod obciążeniem lub w przestrzeni gdzie panuje wysoka temperatura (np. w komorach termostatycznych w których jest wysoka temperatura). By tego uniknąć stosuje się np. dedykowane wentylatory chłodzące lub radiatory do każdego silnika;
- Problem może być także związany z brakiem mocy w silnikach – np. zastosowane są silniki o zbyt małej mocy. Rozwiązaniem jest zastosowanie większego napięcia sterującego silnikami lub ich wymiana na silniki o większej mocy;
- Problem może być także wywołany awarią mechaniczną - może się zdarzyć, że np. któryś z zębów paska napędowego ulegnie uszkodzeniu lub na wałkach zgromadzą się zanieczyszczenia, które mogą spowodować zablokowanie (utrudnienie) ruchu głowicy drukarskiej.



Rys. 48. Przesunięcie warstw podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)

Drżenie lub niestabilność osi Z

Efektom tego problemu jest niespójne wyrównanie powierzchni wydruku. Ten problem wynika głównie z wad konstrukcyjnych maszyny (szczególnie związanych z ruchem w osi Z). Może być spowodowany np. przechylonym lub krzywym elementem ruchu osi Z, co skutkuje nadmiernymi luzami w mechanizmie tej osi. Rozwiązaniem jest regulacja takich luzów ewentualnie naprawa czy wręcz wymiana wadliwych elementów).



Rys. 49. Nierówna powierzchnia elementu występująca podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)

Nitkowanie

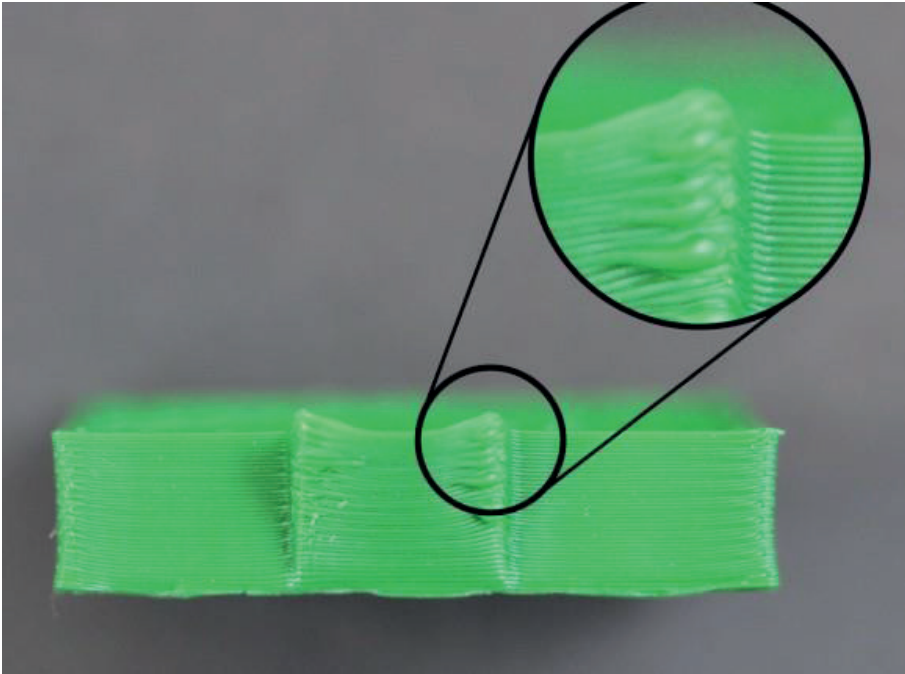
Efektom tego błędu są cienkie nitki materiału drukarskiego na drukowanym elemencie. Występuje gdy filament wypływa z dyszy podczas ruchu jałowego ekstrudera (czyli przechodzenia do kolejnego punktu bez wytłaczania materiału drukarskiego) pozostawiając pomiędzy nimi cienką nitkę materiału drukarskiego. Najczęstszym powodem jest zbyt wysoka temperatura dyszy ekstrudera lub niewłaściwe ustawienie (lub jego brak) tzw. retrakcji (zaprogramowanego cofnięcia filamentu podczas przemieszczania się głowicy drukarskiej podczas ruchu jałowego). Problem ten częściej występuje przy niektórych tworzywach – np. PET-G. Wyliminować błąd można odpowiednio ustawiając temperaturę ekstrudera i wartość retrakcji oraz jej prędkość.



Rys. 50. Nitkowanie występujące podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)

Przegrzanie materiału (zapadanie się materiału)

Wydruki są zdeformowane – wygląda to jakby środkowe warstwy zapadły się pod wpływem własnego ciężaru. Spowodowane jest to zastosowaniem zbyt wysokiej temperatury druku – materiał wytłaczany przez dyszę nie ma czasu na ostygnięcie (zestalenie), a na niego nakładane są kolejne warstwy materiału drukarskiego – co powoduje, że materiał się odkształca (zapadając lub zwisając na krawędziach wydruku). Problem eliminowany jest poprzez obniżenie temperatury druku i zwiększenie nawiewu zimnego powietrza (czy w ogóle jego stosowanie) przyspieszającego stygnięcie materiału (zastosowanie wentylatorów nadmuchujących strumieniem powietrza na wydruk).



Rys. 51. Błędy związane z przegrzaniem materiału drukarskiego występujące podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)

Tzw. „stopa słonia”

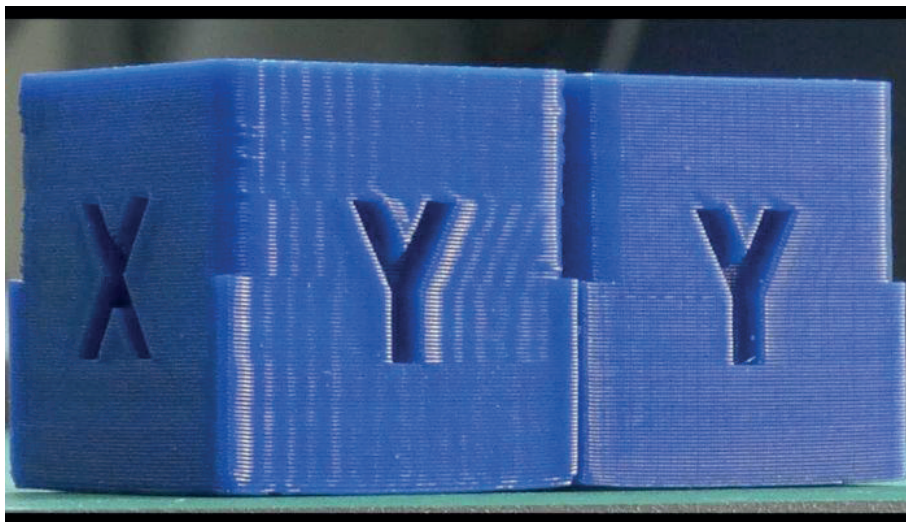
Stopa słonia to wada polegająca na rozszerzeniu w płaszczyźnie poziomej podstawy elementu (pierwszych warstw drukowanego przedmiotu). Najczęściej spowodowana jest zastosowaniem zbyt wysokiej temperatury stołu drukarskiego gdy dodatkowo dysza drukarska jest zbyt blisko stołu. Rozwiązaniem tego problemu jest oczywiście obniżenie temperatury podłoża i ewentualnie ustawienie odpowiedniego ustawienia wysokości dyszy drukarskiej nad podłożem.



Rys. 52. „Stopa słonia” występująca podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)

Tzw. „Ghosting”

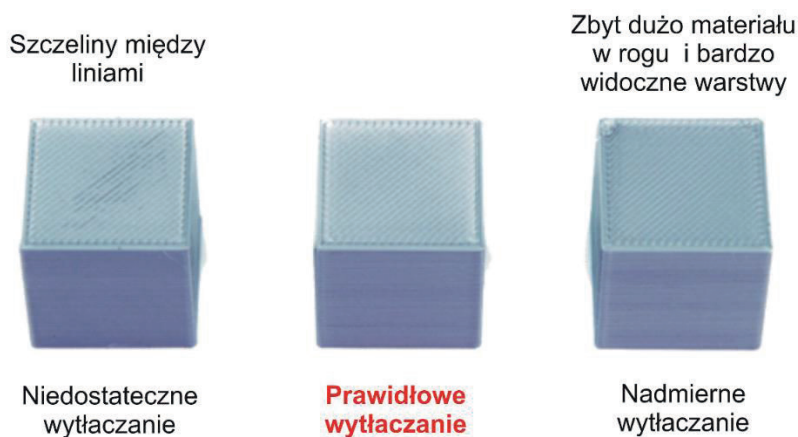
Ghosting (czasami nazywany także echem) – jest to subtelna nieprawidłowość powierzchni drukowanego elementu. Zazwyczaj składa się z małych linii, które powtarzają się na powierzchni modelu. Ten błąd zazwyczaj spowodowany jest bezwładnością wytłaczarki, gdy występują nagłe zmiany kierunku ruchu głowicy. Luzy w mechanizmie drukarki mogą doprowadzić do powstawania tego typu nieprawidłowości. Najlepszym rozwiązaniem jest zazwyczaj zmniejszenie prędkości druku i skorygowanie działania podzespołów mechanicznych drukarki (ewentualnie usunięcie lub zmniejszenie występujących luzów).



Rys. 53. „Ghosting” – wada występująca podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://www.3dnatives.com/...>)

Nieodpowiednia ekstruzja

Problem ten występuje gdy wytłaczane jest za dużo lub za mało materiału drukarskiego. Przy nadmiernej ilości materiału powstają zgrubienia (nadmiar materiału wypływa obok głowicy drukarskiej). Są one najczęściej spowodowane nieprawidłową kalibracją ekstrudera (osi E), niewłaściwego ustawienia rozmiaru dyszy lub szerokości ścieżki, zbyt dużego przepływu materiału. Usunięcie tego problemu – to odpowiednia kalibracja ekstrudera i odpowiednie ustawienie przepływu. W drugim przypadku - niedostateczna ilość materiału może spowodować ubytki w druku (niedokładne wypełnienia) ewentualnie niektóre linie filamentu nie stykają się ze sobą. Problem ten może być spowodowany zbyt niską temperaturą druku (występuje gorszy przepływ przez ekstruder materiału drukarskiego bo uległ on zbyt niskiemu upłynnieniu), ustawienie w paramentach druku niewłaściwej średnicy i szerokości ścieżki wydruku, częściowo niedrożne dysza głowicy drukującej, niewłaściwa kalibracja ekstrudera. Podobnie jak w poprzednim przypadku usunięcie tych problemów – to odpowiednia kalibracja ekstrudera i odpowiedniego ustawienia przepływu oraz ustawienie odpowiedniej temperatury druku, a także właściwa konfiguracja parametrów drukarki.

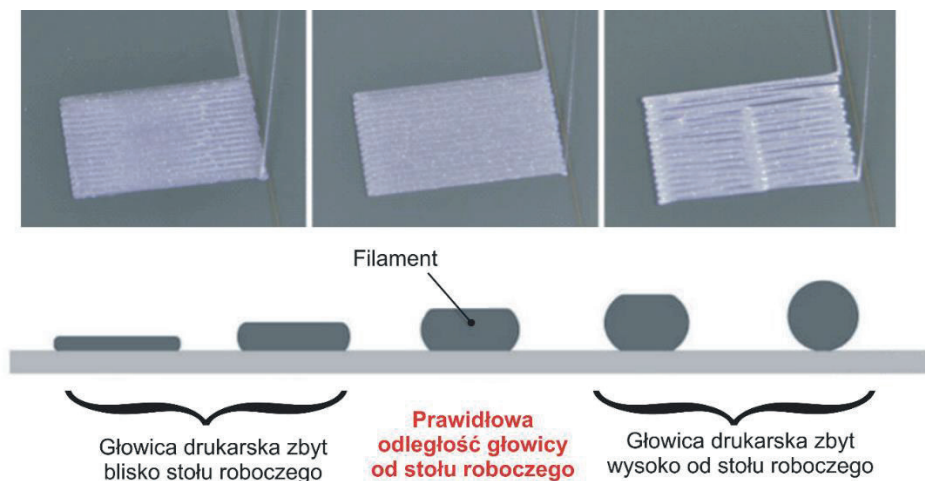


Rys. 54. Przykłady niewłaściwej ekstruzji (wytłaczania) występującej podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (na podstawie <https://help.prusa3d.com/...>)

Nieodpowiednia odległość stołu drukarskiego od dyszy ekstrudera w pierwszej warstwie

Pierwsza warstwa wydruku 3D odgrywa kluczową rolę wpływając na jakość wydruku końcowego. Jest to problem konfiguracji drukarki powiązany z poziomowaniem drukarki (szerzej zostało to omówione w podrozdziale 3.1.1). Jeśli dysza wytłaczarki jest przy pierwszej warstwie ustawiona zbyt blisko powierzchni, to wytłaczane tworzywo nie będzie miało wystarczającej przestrzeni by zostało wytłoczone przez ekstruder (w skrajnych przypadkach może doprowadzić nawet do jej zatkania). W przypadku gdy głowica jest za wysoko od platformy drukarskiej materiał drukarski ma gorszy kontakt z nią i siła przylegania do niej jest za mała. Może to doprowadzić do odpadania materiału od platformy drukarskiej co uniemożliwi dalszy prawidłowy druk kolejnych warstw. Problem ten jest eliminowany przez wła-

ściwą konfigurację i ustawienie początkowej odległości wylotu dyszy ekstrudera od platformy drukarskiej (ustawienie kalibracji osi Z), ewentualnie właściwe skonfigurowanie czujnika poziomowania (jeżeli jest zastosowany).

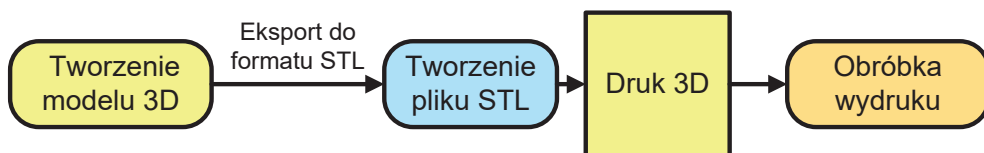


Rys. 55. Przykłady ustawień pierwszej warstwy występującej podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (na podstawie [https://help.prusa3d.com/...](https://help.prusa3d.com/))

Błędy drukarskie powinny zostać wyeliminowane, ich wystąpienie uniemożliwia dalszy wydruk lub może doprowadzić do znacznego pogorszenia jakości wydruku czy nawet dyskwalifikacji tak wydrukowanego elementu. Takie nieprawidłowe wydruki zużywają materiał, doprowadzają do marnotrawstwa energii i zajmują niepotrzebnie czas. Czas drukowania w technologii FDM/FFF może sięgać nawet kilkudziesięciu godzin (w przypadku złożonych i dużych obiektów). Przy wystąpieniu problemu powinno się zatrzymać wydruk, wyeliminować problem i ponownie uruchomić wydruk. Dalszy druk wadliwego elementu jest marnotrawstwem i w związku z tym wykrywanie takich błędów powinno nastąpić w początkowej fazie druku. W tym celu można stosować systemy nadzoru czy wykrywania defektów. Stosowane są kamery wideo (nawet np. kamera internetowa może pełnić tę funkcję) skierowane na drukarkę lub drukowany przedmiot. Do wykrywania błędów stosowane są także skanery laserowe, termografia, wykorzystywane mogą być także komputerowe analizatory obrazu. Dzięki wczesnemu wykrywaniu błędów w druku i zapobieganiu ich powstawaniu zmniejszane jest marnotrawstwo materiałów i energii, ograniczane też jest wykorzystanie zasobów drukarskich (Baumann i Roller, 2016; Baś i in., 2019; Hsiang i in., 2020; Mourtzis i in., 2021; Brion i Pattinson, 2022; Tamir i in., 2022)

4. TWORZENIE I OBRÓBKA MODELI PRZESTRZENNYCH DO DRUKU 3D W TECHNOLOGII FDM/FFF

Aby poprawnie przygotować do druku model 3D, nie trzeba decydować się na żadne konkretne oprogramowanie. Można skorzystać z dowolnego, dostępnego na rynku programu do modelowania (Jandyal, 2022).



Rys. 56. Etapy tworzenia modelu 3D i jego późniejszej obróbki w technologii FDM/FFF (opracowanie własne)

4.1. Przykłady programów do tworzenia i obróbka modeli przestrzennych do druku 3D

Tak naprawdę nie ma większego znaczenia czy wykorzystamy bardzo prosty Tinkercad, który działa w przeglądarce Internetowej, darmową wersję Sketchupa lub Blendera czy nieco bardziej profesjonalne narzędzia takie jak Rihno, Solidworks, czy Autodesk Inventor, Autodesk Fusion 360. W tej grupie są zarówno programy „darmowe” jak i komercyjne. Autor osobiście (wersja darmowa) poleca DesignSpark (obecnie wersja darmowa niestety jest okrojona o wiele przydatnych funkcji) i Autodesk Fusion 360 i Autodesk Inventor (wersje komercyjne).

Jedynym warunkiem, który musi spełniać oprogramowanie do tworzenia modeli 3D, na które się zdecydujemy, to możliwość eksportu modelu do formatu .stl (lub .obj). Istnieją także konwertery Internetowe pozwalające łatwo zmieniać formaty plików modeli przestrzennych, jednak należy pamiętać, że przeznaczone są do obiektów o niezbyt wysokim stopniu złożenia i czasami otrzymany plik po konwersji może być obciążony błędami.

Oczywiście przygotowane w ten sposób modele 3D da się także wykorzystać w innych technologiach druku 3D.

4.2. Podstawowe zasady przygotowania modelu 3D do druku w technologii FDM/FFF

W przypadku modelowania 3D, oprogramowanie to jedynie narzędzie. Podczas przygotowywania modelu 3D do wydruku w tej technologii, kluczowe znaczenie mają zasady, które pozwolą na przygotowanie modelu, który następnie bez problemu będzie można wydrukować. Przy druku 3D w technologii FDM/FFF warto stosować kilka zasad.

- Odpowiednia grubość ścianki.

Aspekt ten powiązany jest częściowo ze średnicą wylotu dyszy z ekstrudera. Ogólnie dla popularnych dysz z zakresy średnicy $0,2 \div 0,8\text{mm}$ przyjmuje się że ścianki nie powinny być cieńsze niż 1 mm

- Odpowiedni format modelu 3D.

Aby móc wydrukować model, powinien być on zapisany w formacie .stl (ewentualnie .obj). Jeśli program w którym przygotowujemy jest projekt, nie daje możliwości bezpośredniego zapisu do formatu .stl, to na pewno jest jakaś nakładka (*plugin*), która to umożliwi. W przypadku prostych modeli możemy skorzystać z konwerterów online.

- Odpowiednia skala.

Podczas konwersji modeli do pliku .stl, niektóre programy gubią skalę, przez co zdarza się, że modele, po otwarciu na innym urządzeniu, lub w innym programie są większe lub mniejsze. Wymaga to wtedy korekty skali modelu.

- Ewentualne zastosowanie podpór.

Trzeba pamiętać, że części modelu, które „wiszą w powietrzu”, są niemożliwe do wydrukowania w technologii (FDM/FFF). Drukarka w technologii FDM/FFF funkcjonuje, nakładając na siebie kolejne warstwy tworzywa opierające się na warstwach wcześniej ułożonych. W związku z tym przy modelach w których części „wiszą” w powietrzu konieczne jest zastosowanie podpór. Istnieje co prawda niewielka możliwość drukowania elementów „wiszących” jest ona jednak uzależniona od materiału, stopnia „zwisu” i konfiguracji parametrów druku. Zastosowanie podpór (*supportu*) może wpłynąć na jakość wydruku, wymusza konieczność ich późniejszego usunięcia i może doprowadzić do powstania uszkodzeń mechanicznych modelu w trakcie ich usuwania. Przy bardziej złożonych elementach zawierających większą ilość „wystających” części zasadne może być podzielenie modelu na kilka części, które przy końcowej obróbce zostaną połączone (np. sklejone, skręcane).

- Forma przestrzenna bryły.

W tym przypadku projektując model 3D, należy pamiętać, że drukowany model musi być jednolitą bryłą i wszystkie jego powierzchnie muszą być zamknięte. W przypadku druku 3D w technologii FDM/FFF (i także kilku innych) musimy pamiętać że bryły w swoim wnętrzu nie mogą posiadać „pustych przestrzeni”. Przykładowo wydrukowanie piłeczki do ping-ponga w tej technologii jest niemożliwe. Konieczne byłoby zastosowanie wewnątrz podpór, ale w takim przypadku mielibyśmy do czynienia z niefunkcyjnym przedmiotem. W takim przypadku (podobnie jak we wcześniej omawianym konieczne by było podzielenie modelu na kilka części które przy końcowej obróbce zostaną połączone (np. sklejone lub skręcane).

4.3. Możliwość uzyskania modeli 3D z innych źródeł

Jeśli model, którym dysponujecie, nie nadaje się do druku, warto poszukać zamiennika czy gotowego modelu. Gotowe modele 3D (w różnych formatach) są dostępne w wielu lokalizacjach w Internecie. Poniżej podano przykładowe lokalizacje z dostępnymi gotowymi modelami 3D:

- www.thingiverse.com;
- www.myminifactory.com;
- www.yeggi.com;
- www.instructables.com;
- www.prusaprinters.org;
- cults3d.com/en;

- library.zortrax.com;
- 3d-gallery.xyzprinting.com/en-US/gallery/;
- fab365.net;
- grabcad.com/library.

Dodatkowo wielu twórców oprogramowania do modelowania i tworzenia w 3D udostępnia gotowe modele. Także wielu producentów różnych podzespołów często udostępnia takie modele. Udostępnione modele mogą być dostępne całkowicie za darmo lub nawet do zastosowań komercyjnych (często w tym przypadku konieczne jest poniesienie pewnych kosztów).

W tym przypadku pozyskane modele 3D możemy także wykorzystać w innych technologiach druku 3D.

4.4. Oprogramowanie do obróbki modeli przestrzennych przed drukiem 3D w technologii FDM/FFF

Gdy posiadamy gotowy model 3D (przygotowaliśmy go lub pobraliśmy go z jednej z dostępnych bibliotek) najczęściej zapisujemy (lub konwertujemy) w formacie .stl. Kolejnym krokiem będzie „pocięcie” takiego modelu na warstwy i zaplanowanie ruchu zespołu drukującego i odpowiedniego podawania materiału drukarskiego, czas na finalne przygotowanie do druku, czyli pocięcie modelu na warstwy i przygotowanie g-code i następnie wykonanie wydruku.

Slicer

Na rynku jest przynajmniej kilkanaście programów, za pomocą których „potniemy” model 3D na warstwy i ustawimy parametry druku. Niektórzy producenci drukarek 3D oprócz samego urządzenia, tworzą cały „ekosystem”, w tym oprogramowanie do przygotowania modelu do druku 3D. Jednym z bardziej popularnych programów „tnących” jest np. Cura 3D.

Działanie slicera polega na przerobieniu modelu 3D z formatu .stl na format, który będzie bezpośrednio przyjęty przez drukarkę 3D.

Na tym etapie dobieramy wszystkie kluczowe dla procesu druku 3D ustawienia drukarki: wysokość warstwy, gęstość wypełnienia, szybkość druku, rodzaj podpór (jeśli będą występować), temperatura ekstrudera, stołu i wiele innych.

Wszystkie ustawienia muszą być dobrane pod wydruk konkretnego modelu 3D na konkretnej drukarce 3D i do konkretnego materiału.

G-code

G-code jest wynikiem cięcia modelu 3D na warstwy. G-code to nic innego jak zapis „ścieżki” po której będzie podążał ekstruder drukarki 3D, nakładając przy odpowiednich parametrach na siebie kolejne warstwy modelu.

Poniżej znajduje się tabela z najbardziej istotnymi kodami G-code. Każdy kod składa się z symbolu (G1, G28, M190) oraz listy parametrów oddzielonych spacjami. Każdy parametr zawiera literę (opisującą jego znaczenie) oraz wartość.

Tabela 3. Przykłady głównych poleceń w kodzie G-code

Kod	Przykłady	Znaczenie
G1 X? Y? Z? E? F?	G1 X10 Y20 E40	Ustawienie poszczególnych osi drukarki 3D (osie X,Y,Z) oraz przewinięcie filamentu do wskazanej pozycji (oś E) z prędkością F. Dowolne z parametrów osi X,Y,Z czy E oraz prędkość F można tutaj pominąć. Prędkość jest wyrażona w mm/min – inaczej niż w slicerach, gdzie podaje się ją w mm/s.
G28	G28	Powrót do pozycji “0” (<i>auto home</i>).
G92 E0	G92 E0	Zresetowanie licznika zużycia filamentu (ogólnie kod służy do nadpisania bieżącej pozycji silników podanymi wartościami, bez wykonywania jakichkolwiek ruchów).
M1 S?	M1 S30	Wstrzymanie pracy na S=30 sekund.
M140 S?	M140 S80	Ustawienie temperatury stołu na S=80°C i kontynuacja pracy.
M190 S?	M190 S80	Ustawienie temperatury stołu na S=80°C i wstrzymanie pracy aż temperatura zostanie osiągnięta.
M104 S?	M140 S190	Ustawienie temperatury dyszy na S=190°C i kontynuacja pracy.
M109 S?	M109 S190	Ustawienie temperatury dyszy na S=190°C i wstrzymanie pracy aż temperatura zostanie osiągnięta.
M300 S? P?	M300 S300 P1000	Wydanie dźwięku o częstotliwości S=300 Hz i czasie trwania P=1000 ms.
	M117 Hello World	Wyświetlenie tekstu “ <i>Hello World</i> ” na panelu LCD drukarki 3D. Działa jedynie dla drukarek 3D z oprogramowaniem Marlin.

Należy pamiętać, że kodów jest znacznie więcej i są uzależnione od oprogramowania systemowego drukarki (nie wszystkie kody funkcjonują w każdej drukarce 3D w technologii FDM/FFF. Pełną listę parametrów można znaleźć pod adresem: <http://reprap.org/wiki/G-code>.

4.5. Obróbka modelu po zakończeniu druku

Dokładność i wydajność mechaniczna części wydrukowanych w technologii 3D zależy od technologii, typu drukarki oraz wybranego materiału a także parametrów samego druku.

W wielu technologiach addytywnego wytwarzania dużym problemem są tzw. linie warstw. Związane jest to z tym, że druk 3D polega na osadzaniu materiału w kolejnych warstwach, co powoduje powstanie efektu schodkowego na powierzchni części, wówczas często

w takim przypadku jest wymagana obróbka końcowa w celu zminimalizowania widoczności tych linii.

Techniki poprodukcyjne w technologii 3D to techniki, procedury lub czynności stosowane w celu modyfikacji i ulepszenia części drukowanych w tej technologii. Do takich technik poprodukcyjnych zaliczamy usuwanie podpór lub zbędnego materiału, wypełnianie szczelin, piaskowanie, śrutowanie, szlifowanie lub polerowanie, obróbka chemiczna, galwaniczna, wygładzanie, obróbka cieplna oraz malowanie. Dodatkowa obróbka poprodukcyjna zazwyczaj jest czasochłonna i przez to stosunkowo droga, ale pomaga w rozwiązaniu wielu problemów. Ponieważ na produktach zaraz po wytworzeniu często zostają np. szorstkie powierzchnie, czy inne nieprawidłowości to należy wykonać czynności poprodukcyjne, takie jak szlifowanie i polerowanie (mechaniczne czy chemiczne), aby uzyskać wymagane wykończenie.

Czynności poprodukcyjne obejmują wszystkie procesy wykonywane po wyjęciu części z drukarki 3D. Obróbki ogólnie przyjęto dzielić na dwie kategorie:

- Podstawowe.

Procesy podstawowe obejmują niezbędne kroki, które muszą zostać wykonane na wszystkich częściach drukowanych w technologii 3D, aby nadawały się do wykorzystania w konkretnym zastosowaniu. Do tej grupy czynności zaliczamy czynności które obejmują zazwyczaj usuwanie podpór, a także czyszczenie itp.

- Wtórne.

Proces wtórny obejmuje opcjonalne wykańczanie części, które poprawia właściwości, funkcje, a nawet estetykę części. Do czynności wtórnych poprodukcyjnych zaliczamy takie, które nie są konieczne/niezbędne, ale zależą od potrzeb i celów użytkownika, takie jak malowanie i wygładzanie, itp.

Uzyskanie przykładowo odpowiedniej zwilżalności powłoki, jej połysk czy zwiększenie odporności na zarysowania lub zwiększenie odporności chemicznej (np. na pewne związki) zwiększenie odporności na ciepło lub ekranowanie termiczne, ekranowanie elektromagnetyczne i inne można uzyskać za pomocą metod fizycznych lub chemicznych poprzez nałożenie kolejnej warstwy materiału lub powłoki (np. malowanie). Jako obróbkę poprodukcyjną przy przedmiotach uzyskanych metodami druku 3D też można zastosować znaną z klasycznych technologii metodę tzw. „Tumblingu”. Metoda ta polega na oczyszczaniu i polerowaniu przedmiotów w mechanicznej obróbce wibro-ścierniej (przedmiot i materiał ścierny-poler-ski) znajdują się w pojemniku poddanym działaniu drgań) lub obróbce rotacyjno-ścierniej (przedmiot i materiał ścierny-poler-ski znajdują się w obracającym bębnie) (Albright, 2018; Chen, 2019; Dizon i in., 2021; Malagutti i in., 2022; Khosravani i in., 2023; Kantaros i in., 2024).

4.6. Możliwości wykorzystania AI do optymalizacji druku 3D

W ostatnim okresie coraz częściej i powszechniej wykorzystuje się sztuczną inteligencję (AI) zarówno do generowania modeli przestrzennych na podstawie np. zdjęć czy filmów czy optymalizacji samego procesu druku 3D czy jego nadzoru (Paraskevoudis i in., 2020; Talaat i Hassan, 2021; Sani i in., 2024).

Równie szeroko rozpowszechnione jest wykorzystanie sztucznej inteligencji do wykrywania wad podczas druku i kontroli gotowych elementów wytwarzanych metodami przyrostowymi. Najczęściej wykorzystywane są systemy analizy obrazu wspomagane przez AI oraz

zestawy czujników pracujące w czasie rzeczywistym. Są one w stanie wykrywać nieprawidłowości kształtu (i ewentualnie korygować parametry druku by je wyeliminować, czy przerwać cały proces aby nie marnotrawić materiału i energii). Stosuje się także np. termografię do wykrywania błędów wypełnienia poszczególnych warstw, nadmiernego czy niepełnego wytłaczania materiału drukarskiego. (Paraskevoudis i in., 2020; Sani i in., 2024).

Sztuczna inteligencja może być używana do optymalizacji procesu druku 3D. Można to osiągnąć np. poprzez analizę danych zebranych w trakcie całego procesu drukowania za pomocą czujników, następnie stosując algorytmy sztucznej inteligencji, które są w stanie rozpoznać wzorce lub trendy, można je wykorzystać do poprawy ustawień parametrów drukowania (Sani i in., 2024).

Wykorzystanie sztucznej inteligencji w druku 3D z pewnością będzie wciąż poszerzane i rozwijane. Najpewniej nie zastąpi człowieka w tym procesie jednak może wspomóc i pozwoli uprościć wiele zabiegów z tym związanych czy zastąpić człowieka w monitorowaniu szczególnie żmudnych procedur i kontroli wielu czasochłonnych zabiegów (np. wykrywaniu błędów, korekcie modeli uzyskiwanych po skanowaniu 3D itp.).

5. PODSUMOWANIE

W ciągu ostatnich trzech dekad technologia wytwarzania addytywnego (AM) znacznie się rozwinęła i jest obecnie wykorzystywana w wielu sektorach gospodarki.

Oczekuje się, że w najbliższym czasie druk 3D będzie się dalej dynamicznie rozwijał i rewolucjonizował możliwości produkcyjne, obsługując szeroki zakres potrzeb społecznych. Kluczowymi czynnikami napędzającymi technologię druku 3D będą postęp w technologii drukarek, rozwój nowych i zróżnicowanych materiałów do drukowania oraz redukcja kosztów.

Obecnie ze względów także ekonomicznych coraz bardziej zwiększa się zakres produkcji przemysłowej wykorzystującej druk 3D. Spowodowane jest to możliwością znacznego ograniczenia często bardzo dużych nakładów finansowych związanych z zakupem narzędzi związanych z technikami produkcyjnymi (np. wtryskarek przy klasycznych metodach formowania wtryskowego jak i samych form). W klasycznych metodach wtryskowych stosowanych często przy produkcji z tworzyw termoformowanych nawet drobna modyfikacja przedmiotu wiąże się z kosztowną koniecznością zmian form (jej zaprojektowania i wytworzenia). Przy druku 3D nie mamy do czynienia z tym problemem. Zmiany możemy przeprowadzić szybko i bezproblemowo.

Należy pamiętać, że druk 3D odgrywa olbrzymią rolę w ponownym wykorzystaniu wyrzucanych tworzyw sztucznych (recykling). Obecnie staje się to globalnym wyzwaniem mającym na celu zmniejszenie ilości powstających odpadów z tworzyw sztucznych i ich wpływu zarówno na zdrowie ludzi, jak i środowisko naturalne. Dodatkowo coraz powszechniej są prowadzone badania nad stosowaniem dodatków surowców odpadowych, które mogą być wykorzystane jako dodatek do materiałów z których będą wytwarzane przedmioty w technologii druku 3D.

Nie do pominięcia jest także sztuczna inteligencja (AI) w aspekcie przyszłości druku 3D. AI staje się zauważalnie coraz bardziej użyteczna w produkcji cyfrowej. Zaczyna „sama” projektować elementy przestrzenne, a sterowanie i nadzorowanie druku 3D nie stanowi dla niej żadnego problemu (choć należy pamiętać że AI w chwili obecnej nie myśli i nie tworzy samodzielnie, służy jedynie do optymalizacji). AI poza samą optymalizacją różnych aspektów procesu produkcyjnego powinna być w stanie również doskonale dobierać materiały do wybranej metody wytwarzania (może nawet je projektować) oraz kontrolować i zarządzać całym procesem. Wykorzystując analizę danych, algorytmy uczenia maszynowego i monitorowania w czasie rzeczywistym. AI może zwiększyć wydajność, zmniejszyć ilość odpadów i umożliwić wytwarzanie bardziej dostosowanych i innowacyjnych produktów.

Technologia druku 3D doskonale wpisuje się w trend czwartej rewolucji przemysłowej, pozwalając w niektórych zastosowaniach na zastąpienie tradycyjnych metod wytwórczych. Jako rodząca się technologia, druk 3D nieustannie ewoluuje, a szybkość drukowania i rozdzielczość są udoskonalane bardzo dynamicznie.

6. BIBLIOGRAFIA

- 3D Printing | Encyclopedia MDPI. <https://encyclopedia.pub/entry/3310> - dostęp czerwiec 2024.
- Abdallah S., Ali S., Pervaiz S. (2023): Performance optimization of 3D printed polyamide 12 via Multi Jet Fusion: A Taguchi grey relational analysis (TGRA). *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. Volume 6, Issue 1. p. 72-81. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2022.05.004.
- Abouzaid K., Chouaf A., Chergui M., Othmani M. (2019): Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113–133. DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
- Adikari A. G. (2018): New 3d printable polymeric materials for fused filament fabrication (FFF). The University of Texas at Dallas DOI: 10.13140/RG.2.2.31264.43526.
- Agunbiade A., Song L., Agunbiade O., Ofoedu C., Chacha J., Duguma H., Hossaini S., M., Rasaq W., Shorstkii I., Osuji C., Owuamanam C., Okpala C., Korzeniowska M., Guiné R. (2022): Potentials of 3D extrusion-based printing in resolving food processing challenges: A perspective review. *Journal of Food Process Engineering*. 10.1111/jfpe.13996.
- Akhila P.P., Aaliya B., Navaf M., Sudheer K.P., Mir S.A., Sunooj K.V. (2023): 3D Food Printing. In: Shah, M.A., Valiyapeediyekkal Sunooj, K., Mir, S.A. (eds) *Cereal-Based Food Products*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-40308-8_14.
- Alafaghani A., Qattawi A., Ablat Muhammad A. (2017): Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling. *Open Journal of Applied Sciences*. 7. 291-318. 10.4236/ojapps.2017.76024.
- Alafaghani A., Qattawi A., Alrawi B., Guzman A. (2017): Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manuf.*, 10, p. 791-803.
- Alami A.H., Olabi A.G., Ayoub M., Aljaghoub H., Alasad S., Abdelkareem M.A. (2023): 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. *Buildings*, 13 (4), p. 924.
- Albright B. (2018): Post-Processing 3D Printed Prototypes Getting to the Finished Part. Dostępne online: <https://www.digitalengineering247.com/article/post-processing-3d-printed-prototypes/> - dostęp sierpnia 2024.
- Ali M.H., Sagynbayev N., Mussabayev A., Shehab E. (2023): Autonomous Print-Bed Calibration Technique for Large-Scale FDM 3D Printer. 299-303. DOI: 10.1109/ICSPC59664.2023.10420391.
- Alomarah A., Ruan D., Masood S., Gao Z. (2019): Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure. *Smart Materials and Structures*. 28. 10.1088/1361-665X/ab0dd6.
- Alsoufi M.S., Alhazmi M.W., Suker D.K., Alghamdi T.A., Sabbagh R.A., Felemban M.A., Bazuhair F.K. (2019): Experimental Characterization of the Influence of Nozzle Temperature in FDM 3D Printed Pure PLA and Advanced PLA+. *American Journal of Mechanical Engineering*. Experimental Characterization of the Influence of Nozzle Temperature in FDM 3D Printed Pure PLA and Advanced PLA+. *American Journal of Mechanical Engineering*. 7. p. 45-60. 10.12691/ajme-7-2-1.
- Ambrosi A., Puma M. (2016): 3D-Printing Technologies for Electrochemical Applications. *Chem. Soc. Rev.* 2016, 45, p. 2740-2755.
- Andronov V., Beránek L., Krůta V., Hlavůňková L., Jeníková Z. (2023): Overview and Comparison of PLA Filaments Commercially Available in Europe for FFF Technology. *Polymers*, 15, 3065. DOI: 10.3390/polym15143065.
- Asif A.K.M.A.H., Rahman M., Sarker P., Hasan Z. (2019): Hydrogel fibre: future material of interest for biomedical applications. *J.Text Sci. Technol.* 5, p. 92–107
- Bahni I., Rivette M., Rechia A., Siadat A., Elmesbahi A. (2018): Additive manufacturing technology: The status, applications, and prospects. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97, p. 147–161.
- Baş H., Eleveli S., Yapıcı F. (2019) Fault tree analysis for fused filament fabrication type three-dimensional printers. *J. Fail. Anal. Prev.* 19, p. 1389–1400.

- Baumann F., Roller D. (2016): Vision based error detection for 3D printing processes. MATEC Web of Conferences. 59. 06003. 10.1051/mateconf/20165906003.
- Belgiu G., Cărauşu C., Şerban D., Turc C.G. (2017): Product management of making large pieces through rapid prototyping Polyjet® technology. IOP Conf Ser Mater Sci Eng; 227: 012015, DOI: 10.1088/1757-899x/227/1/012015.
- Bembenek M., Kowalski L., Koson-Schan A. (2022): Research on the Influence of Processing Parameters on the Specific Tensile Strength of FDM Additive Manufactured PET-G and PLA Materials, *Polymers*, 14, 2446, DOI:10.3390/polym14122446.
- Bikas H., Stavropoulos P., Chrysosolouris G. (2016): Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol* 83: p. 389 – 405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- Bingwen D. (2021): Analysis on the Value of 3D Printing in Jewelry Design Based on Artificial Intelligence. *Journal of Physics: Conference Series*. 1744. 042132. DOI: 10.1088/1742-6596/1744/4/042132.
- Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M., (2022): Effect of FDM infill patterns on mechanical properties, *Polymer Testing*, Volume 113, , 107654, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107654.
- Bos F. P., Menna C., Pradena M., Kreiger E., Leal da Silva W., Rehman A. U., Weger D., Chaves Figueiredo S., Wolfs R. J. M., Zhang Y., Ferrara L., Mechtcherine V. (2022): The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research*, 156, Article 106746. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106746.
- Brion D. A. J., Pattinson S. W. (2022): Generalisable 3D Printing Error Detection and Correction via Multi-Head Neural Networks. *Nat Commun* 13, 4654. DOI: 10.1038/s41467-022-31985-y.
- Buswell R.A., Silva W.R., Jones S., Dirrenberger J. (2018): 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 112. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- Calignano F., Lorusso M., Roppolo I., Minetola P.I. (2020): Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing. *Machines*. 8. 52. DOI: 10.3390/machines8030052.
- Calignano F., Manfredi D., Ambrosio E.P., Biamino S., Lombardi M., Atzeni E., Salmi A., Minetola P., Iuliano L. Fino (2017): Overview on additive manufacturing technologies. *Proc. IEEE*, 105, p. 593–612.
- Camposco-Negrete C. (2020): Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity, and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach, *Progress in Additive Manufacturing*. DOI: 10.1007/s40964-020-00115-9.
- Cardona C., Curdes A., Isaacs A. (2016): Effects of Filament Diameter Tolerances in Fused Filament Fabrication. *IU Journal of Undergraduate Research*. 2. p. 44-47. DOI: 10.14434/ijur.v2i1.20917.
- Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J. (2017): Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater Des.*;124:143–57. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- Chen A. (2019): 4 Vital Things on Post-Processing 3D Printed Parts. Dostępne online: <https://www.cmac.com.au/blog/4-vital-things-post-processing-3d-printed-parts> - dostęp sierpień 2024.
- Childs E., Latchman A., Lamont A., Hubbard J., Sochol R. (2020): Additive assembly for polyjet-based multi-material 3D printed micro-fluidics. *J Microelectromech Syst*; 29(5): p. 1094–1096, DOI: 10.1109/jmems.2020.300385822 *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*.
- Chiniwar D.S., Alva H., Varada V.R., Balichakra M., Hiremath S. (2022): Investigation of automatic bed levelling system for fused deposition modelling 3D printer machine. *Int. J. Mod. Manuf. Technol.* XIV, p. 23–32.
- Chohan J. S., Singh R. (2017): Pre and post-processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: A state of the art review and future applications, *Rapid Prototyping Journal*. DOI: 10.1108/RPJ-05-2015-0059.

- Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S. (2010): *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd edition. Singapore: World Scientific Publishing
- Dall'Ava L., Hothi H., Di Laura A., Henckel J., Hart, A. (2019): 3D Printed Acetabular Cups for Total Hip Arthroplasty: A Review Article. *Metals*, 9, 729. DOI: 10.3390/met9070729.
- Dankar I., Haddarah A., Omar F.E.L., Sepulcre F., Pujolà M. (2018): 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends Food Sci Technol*, 75, p. 231-242, DOI: 10.1016/J.TIFS.2018.03.018.
- Deshmukh K., Ahamed M.B., Deshmukh R.R., Pasha S.K.K., Bhagat P.R., Chidambaram K. (2017): Biopolymer composites with high dielectric performance: interface engineering. *Biopolym. Compos. Electron*. DOI: 10.1016/B978-0-12-809261-3.00003-6.
- Dey A., Hoffman D., Yodo N. (2020): Optimizing multiple process parameters in fused deposition modeling with particle swarm optimization, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. DOI: 10.1007/s12008-019-00637-9.
- Dickson A.N., Barry J.N., McDonnell K.A., Dowling D.P. (2017): Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre-reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 16, p. 146–152.
- Dizon J.R.C., Gache C.C.L., Cascolan H.M.S., Cancino L.T., Advincula R.C. (2021): Post-Processing of 3D-Printed Polymers. *Technologies*, 9, 61. DOI: 10.3390/technologies9030061.
- Dvorak K., Dvorakova J., Zarybnicka L. (2021): Horak, Z. Influence of 3D Printing Topology by DMLS Method on Crack Propagation. *Materials* 2021, 14, 7483. DOI: 10.3390/ma14237483.
- Dwiyati S.T., Kholil A., Riyadi R., Putra S.E. (2019): Influence of layer thickness and 3D printing direction on tensile properties of ABS material. Published under licence by IOP Publishing Ltd. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1402, Issue 6. DOI DOI: 10.1088/1742-6596/1402/6/066014.
- Eryildiz M. (2021): The effects of infill patterns on the mechanical properties of 3D printed PLA parts fabricated by FDM. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 7. p. 1-8. DOI: 10.23939/ujmems2021.01-02.001.
- Espera A., Dizon J., Chen Q., Advincula R. (2019): 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing*. 4. DOI: 10.1007/s40964-019-00077-7.
- Evans B (2012): 3D models from the cloud. *Practical 3D printers: the science and art of 3D printing*. Springer, New York. DOI: 10.1007/978-1-4302-4393-9.
- Farashi S., Vafae F. (2022): Effect of Printing Parameters on the Tensile Strength of FDM 3D Samples: A Meta-Analysis Focusing on Layer Thickness and Sample Orientation. *Progress in Additive Manufacturing*, 7, p. 565–582, DOI:10.1007/s40964-021-00247-6.
- Finnes T. (2015) "High Definition 3D Printing – Comparing SLA and FDM Printing Technologies," *The Journal of Undergraduate Research: Vol. 13, Article 3*.
- Ford S., Despeisse M. (2016): Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *J. Clean. Prod.*, 137, p. 1573–1587.
- Freeman T., Foster K., Troxler C., Irvin C., Aday A., Boetcher S., Mahvi A., Smith M., Odukumaiya A. (2023): Advanced Materials and Additive Manufacturing for Phase Change Thermal Energy Storage and Management: A Review. *Advanced Energy Materials*. 13. DOI: 10.1002/aenm.202204208.
- Galvez G.M., Olivar K.A.M., Tolentino F.R.G., Danao L.A.M., Abuan B.E. (2023): Finite Element Analysis of Different Infill Patterns for 3D Printed Tidal Turbine Blade. *Sustainability*, 15, 713. DOI: 10.3390/su15010713.
- Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., Wang C.C., Shin Y.C., Zhang S., Zavattieri P.D. (2015): The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Comput. Aided Des. Appl.*, 69, p. 65–89.
- Gaynor A., Meisel N., Williams C., Guest J. (2014): Multiple-material topology optimization of compliant mechanisms created via polyjet three-dimensional printing. *J Manuf Eng* 2014;136(6): 061015, DOI: 10.1115/1.4028439.

- Gebisa A.W., Lemu H.G. (2019): Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile Property of ULTEM 9085, *Procedia Manufacturing*, Volume 30, p. 331-338, DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.047.
- Giganto S., Zapico P., Fernández-Abia A.I., Martínez-Pellitero S. (2019): Analysis of Geometric and Dimensional Stability Over Time of Printed Parts by CJP Additive Technique.
- Godoi F. C., Prakash S., Bhandari B. R. (2016): 3D-printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, p. 44 – 54.
- Goh G. D., Yap Y. L., Tan H. K. J., Sing S. L., Goh G. L., Yeong W. Y. (2020): Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45:2, p. 113-133, DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
- Gomes P.C., Piñeiro O.G., Alves A.C., Carneiro O.S. (2022): On the Reuse of SLS Polyamide 12 Powder. *Materials*, 15, 5486. DOI: 10.3390/ma15165486.
- Gong H.J., Runzi M., Wang Z.Z., Wu L.J. (2022): Impact of moisture absorption on 3D printing nylon filament (J). *Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manuf. Conf. 2022*; p. 16-22.
- Greiner S., Wudy K., Lanzl L., Drummer D. (2017): Selective laser sintering of polymer blends: bulk properties and process behavior. *Polym Test* 2017;64: p. 136–44.
- Haghiashiani G., Qiu K., Zhingre Sanchez J.D., Fuenning Z.J., Nair P., Ahlberg S.E., Iaizzo P.A., McAlpine M.C. (2020): 3D printed patient-specific aortic root models with internal sensors for minimally invasive applications. *Sci Adv.* 28;6(35):eabb4641. DOI: 10.1126/sciadv.abb4641. PMID: 32923641; PMCID: PMC7455187.
- Hamoud M., Elshalakany A.B., Gamil M., Hussien M. (2024): Investigating the influence of 3D printing parameters on the mechanical characteristics of FDM fabricated (PLA/Cu) composite material. *Int J Adv Manuf Technol* 134, 3769–3785. DOI: 10.1007/s00170-024-14313-0.
- Hanon M., Zsidai L., Ma Q. (2021): Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. *Materials Today: Proceedings.* 42. p. 3089-3096. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.1246.
- Hanon M.M., Alshammas Y., Zsidai L. (2020): Effect of print orientation and bronze existence on tribological and mechanical properties of 3D-printed bronze/PLA composite. *Int J Adv Manuf Technol* 108, p. 553–570 (2020). DOI: 10.1007/s00170-020-05391-x.
- Hanon M.M., Marczis R., Zsidai L. (2020): Influence of the 3D printing process settings on tensile strength of PLA and HT-PLA. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering.* 65. p. 38–46. DOI: 10.3311/PPme.13683.
- Hehr A., Dapino M.J. (2015): Interfacial shear strength estimates of NiTi-Al matrix composites fabricated via ultrasonic additive manufacturing. *Compos B Eng* 77: p. 199–208. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.005.
- Heidari-Rarani M., Rafiee-Afarani M., Zahedi A.M. (2019): Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B Engineering.* 107147. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107147.
- Heinl P., Müller L., Körner C., Singer R. F., Müller F. A. Cellular. (2008): Ti–6Al–4V Structures with Interconnected Macro Porosity for Bone Implants Fabricated by Selective Electron Beam Melting. *Acta Biomater.* 4, p. 1536-1544.
- Hsiang Loh G., Pei E., Gonzalez-Gutierrez J., Monzón M. (2020): An Overview of Material Extrusion Troubleshooting. *Appl. Sci.*, 10, 4776. DOI: 10.3390/app10144776.
- Hull C.W. (1986): Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Google Patents.
- Idà E., Nanetti F., Mottola G. (2022): An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM 3D Printer. *Machines*, 10, 542. DOI: 10.3390/machines10070542.
- ISO/ASTM 52900. (2015): Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary. (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> – dostęp grudzień 2023).

- Jadhav A., Jadhav V.S. (2022): A review on 3D printing: An additive manufacturing technology, *Materials Today: Proceedings*, Volume 62, Part 4, p. 2094-2099, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.558.
- Jandyal A., Chaturvedi I, Wazir I, Raina A., Irfan M. Haq U. (2022): 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0, *Sustainable Operations and Computers*, Volume 3, p. 33-42, DOI: 10.1016/j.susoc.2021.09.004.
- Jatti V., Jatti S., Patel A., Jatti V. (2019): A study on effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties. *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 8 (11) (2019), p. 689-693.
- Jiang T., Yan B., Jiang M., Xu B., Xu Y., Yu Y., Ma T. (2022): Wang, H. Enhanced Adhesion—Efficient Demolding Integration DLP 3D Printing Device. *Appl. Sci.* 12, 7373. DOI: 10.3390/app12157373.
- Joseph T.M., Kallingal A., Suresh A.M., Mahapatra D.K., Hasanin M.S., Haponiuk J., Thomas S. (2023): 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *Int J Adv Manuf Technol* 125, 1015–1035 (2023). DOI: 10.1007/s00170-022-10795-y.
- Justo J., Távora L., García-Guzmán L., París F. (2018): Characterization of 3D printed long fibre-reinforced composites. *Compos. Struct.*, 185, 537–548.
- Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H.M., Shrestha P.L., Bastola A.K. (2021): 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers*, 13, 3101. DOI: 10.3390/polym13183101.
- Kampker A., Triebs J., Kawollek S., Ayvaz P., Hohenstein S. (2019): Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP*. 81. 815-819. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.205.
- Kantaros A., Ganetsos T., Petrescu F.I.T., Ungureanu L.M., Munteanu I.S. (2024): Post-Production Finishing Processes Utilized in 3D Printing Technologies. *Processes*, 12, 595. DOI: 10.3390/pr12030595.
- Kechagias J.D., Maropoulos S. (2021): An investigation of sloped surface roughness of direct polyjet 3D printing. In: *Proceedings of the Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering—INDE*, Noida, India, 5 November 2021, 2015, p. 150–153. <http://universitypress.org.uk/library/2015/zakynthos/bypaper/CIMC/CIMC-26.pdf> - dostęp lipiec 2024.
- Kewuyemi Y.O., Kesa H., Meijboom R., Alimi O. A., Adebo O. A. (2023): Comparison of nutritional quality, phenolic compounds, and antioxidant activity of conventional and 3D printed biscuits from wholegrain and multigrain flours. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 83, 103243.
- Kewuyemi Y.O., Kesa H., Meijboom R., Alimi O.A., Adebo O.A. (2022): 3D food printing improves color profile and structural properties of the derived novel whole-grain sourdough and malt biscuits. *Scientific Reports*, 12, 12347.
- Khosravani M.R., Ayatollahi M.R., Reinicke T., (2023): Effects of post-processing techniques on the mechanical characterization of additively manufactured parts, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 107, p. 98-114, DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.10.018.
- Kopec J., Pekarcikova M., Kliment, M. (2023): 3D printing methods used in engineering. *Acta Technologica*. 9. 31-34. DOI: 10.22306/atec.v9i1.165.
- Kristiawan R., Bayu I., Fitrian A., Dody U., Arifin Z. (2021): A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, p. 639-649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063.
- Kruth J.P., Mercelis P., Vaerenbergh J.V., Froyen L., Rombouts M. (2005): Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp. J.*, 11, 26–36.
- Kumar S.R., Sridhar S., Venkatraman R., Venkatesan M. (2021): Polymer additive manufacturing of ASA structure: influence of printing parameters on mechanical properties *Mater. Today: Proc.*, 39, p. 1316-1319.
- Kutz M. (2011): *Applied plastics engineering handbook*. vol. na. 1st ed. William Andrew is an imprint of Elsevier. DOI: 10.1016/C2014-0-04118-4.
- Lay M., Thajudin N., Abdul Hamid Z., Rusli A., Abdullah M., Shuib R. (2019): Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling

- and injection molding. *Composites Part B: Engineering*. 176. 107341. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107341.
- Layani M., Wang X., Magdassi S. (2018): Novel materials for 3D printing by photopolymerization, *Advanced Materials*. 30, article e1706344.
- Le-Bail A., Maniglia B. C., Le-Bail P. (2020): Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing. *Current Opinion in Food Science*, 35, 54 – 64.
- Li C., Cabrera D., Sancho F., Sánchez R., Long, J., Valente de Oliveira J. (2019): Fusing convolutional generative adversarial encoders for 3D printer fault detection with only normal signals. DOI: 10.13140/RG.2.2.22993.89446.
- Li Q., Guan X., Cui M., Zhu Z., Chen K., Wen H., Jia D., Hou J., Xu W., Yang X., Pan W. (2018): Preparation and investigation of novel gastro-floating tablets with 3D extrusion-based printing. *Int J Pharm*. 15;535(1-2):325-332. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.10.037. Epub 2017 Oct 16. PMID: 29051121.
- Liu Z., Zhang M. (2019): 3D food printing technologies and factors affecting printing precision. In *Fundamentals of 3D food printing and applications* (p. 19 – 40). Academic Press.
- Luongo A. Falster V., Doest M., Ribo, M., Eiriksson E., Pedersen D., Frisvad J. (2019): Microstructure Control in 3D Printing with Digital Light Processing. *Computer Graphics Forum*. 39. DOI: 10.1111/cgf.13807.
- Malagutti L., Ronconi G., Zanelli M., Mollica F., Mazzanti V. (2022): Metoda postprodukcji w celu poprawy właściwości mechanicznych części drukowanych w 3D z topionego włókna. *Processes*, 10 , 2399. DOI: 10.3390/pr10112399
- Manapat J.Z., Chen Q., Ye P., Advincula R.C. (2017): Advincula, and Engineering. 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromol. Mater. Eng.*, 302, 1600553.
- Marciniak M. (2023): The 3D Printing in Military Applications: FDM Technology, Materials, and Implications. *Advances in Military Technology*. 18. 241-257. DOI: 10.3849/aimt.01846.
- Martinez D.W., Espino M.T., Cascolan H.M., Crisostomo J.L., Dizon J.R.C. (2022): A Comprehensive Review on the Application of 3D Printing in the Aerospace Industry. *Key Eng Mater*, 913, p. 27-34.
- Melchels FP, Feijen J, Grijpma DW. (2010): A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*. 31(24):6121-30. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
- Melenka G.W., Cheung B.K., Schofield J.S., Dawson M.R., Carey J.P. (2016): Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Compos. Struct.*, 153, 866–875.
- Mercado F., Rojas Arciniegas A. (2020): Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 109. DOI: 10.1007/s00170-020-05663-6.
- Mohamed O. A., Masood S. H., Bhowmik J. L. (2016): Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23–24), 10052–10073. DOI: 10.1016/j.apm.2016.06.055.
- Montez M., Willis, Rendler K., Marshall H., Rubio C., Rajak E., Rahman D., Hafizur M., Pradeep P. (2022): Fused deposition modeling (FDM): processes, material properties, and applications. DOI: 10.1016/B978-0-12-821328-5.00005-6.
- Mourtzis D., Toghiani T., Angelopoulos J., Stavropoulos P. (2021): A Digital Twin architecture for monitoring and optimization of Fused Deposition Modeling processes, *Procedia CIRP*, Volume 103, p. 97-102, DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.015.
- Mu Q., Wang L., Dunn C. K., Kuang X., Duan F., Zhang Z., Qi H. J., Wang T. (2017): Digital Light Processing 3D Printing of Conductive Complex Structures. *Addit. Manuf.* 18, 74-83.
- Mu R., Mei S., Wang X., Chen X., Zhao Q., Qing L., Chen J., Fan C.: (2023): Mechanical properties of a 3D-printed SFRC beam with steel fiber distribution adaptive to tensile stress, *Materials Letters*, Volume 349, 134776, DOI: 10.1016/j.matlet.2023.134776.

- Najmon J.C., Raeisi S., Tovar A. (2019): Additive Manufacturing for the Aerospace Industry (eds Froes, F. & Boyer, R.) Ch. 2 Elsevier.
- Nakagawa Y., Mori K.I., Maeno T. (2017): 3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 91, 2811–2817.
- Nancharaiyah T., Rnga Raju D., Ramachandra Raju V. (2010): An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *International Journal on Emerging Technologies*.
- Nazan M., Ramli F., Alkahari M. R., Sudin M.N., Abdullah M. (2017): Process parameter optimization of 3D printer using Response Surface Method. *ARNP journal of engineering and applied sciences*. 12.
- Neimat M., Babu K., Selvakumar S., Radhakrishnan S.: (2020): Experimental Investigation on the Effect of Fused Deposition Modelling Parameters for HIPS Material by Experimental Design and MRO Techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 988. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/988/1/012051.
- Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. (2018): Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, Volume 143, p. 172-196, DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- Niaki M.K., Torabi S.A., Nonino F. (2019): Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *J. Clean. Prod.*, 222, 381–392.
- Nickels L. (2016): Additive manufacturing: A user's guide. *Metal Powder Report*, 71(2), 100–105. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.02.045.
- Ochi S. (2015): Flexural properties of long bamboo fiber/PLA composites. *Open J. Compos. Mater.*, 5, 70.
- Ozsoy K., Erçetin A., Çevik Z.A. (2021): Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing. *European Journal of Science and Technology*. 802-809. DOI: 10.31590/ejosat.983317.
- Panda B., Chandra Paul S., Jen Tan M. (2017): Anisotropic Mechanical Performance of 3D Printed Fiber Reinforced Sustainable Construction Material. *Materials Letters* 209: 146–149. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.07.123.
- Pandzic A., Hodzic D. (2022): Tensile Mechanical Properties Comparison of PETG, ASA and PLA-Strongman FDM Printed Materials With and Without Infill Structure, *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium*, p.0221-0230, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-36-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria, DOI:10.2507/33rd.daaam.proceedings.031.
- Pandžić A., Kadric E., Kolesar S. (2023): Investigating the influence of printing orientation and filament drying on tensile and flexural strength of FDM-printed carbon fiber-reinforced polyamide composites. *Proceedings of the 34th International DAAAM Symposium 2023*. DOI: 10.2507/34th.daaam.proceedings.020.
- Paraskevoudis K., Karayannis P., Koumoulos E. P. (2020): Real-Time 3D Printing Remote Defect Detection (Stringing) with Computer Vision and Artificial Intelligence. *Processes*, 8(11), 1464. DOI: 10.3390/pr8111464.
- Park J., Tari M., Hahn, H. (2000): Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*. 6. 36-50. 10.1108/13552540010309868.
- Patpatiya P., Chaudhary K., Shastri A, Sharma S. (2022): A review on polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 236(14):7899-7926. DOI: 10.1177/095544062221079506.
- Patra A.K., Pattanayak A.K. (2015): Novel varieties of denim fabrics. *Denim Manuf. Finish. Appl.*, p. 483–506. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-85709-843-6.00016-0.
- Patterson A.E., Messimer S.L., Farrington P.A. (2017): Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies*, 5, 15. DOI: 10.3390/technologies5020015.

- Payami G., Strandlie A., Green P., (2021): The Influence of Wedge Angle, Feedstock Color, and Infill Density on the Color Difference of FDM Objects. *Journal of Imaging Science and Technology*. 65. DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2021.65.5.050408.
- Peko I., Gjeldum N., Bilic B. (2018): Application of AHP, fuzzy AHP and PROMETHEE method in solving additive manufacturing process selection problem. *Tehnicki Vjesnik*. 25. DOI: 10.17559/TV-20170124092906.
- Peng T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C., Chen, G. (2018): Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Addit. Manuf.*, 21, 694–704.
- Piland S.G., Gould T.E., Jesunathadas M., Wiggins J.S., Mcnair O., Caswell S.V. (2019): Protective helmets in sports. *Mater. Sport. Equip.*, Els, p. 71–121. DOI: 10.1016/B978-0-08-102582-6.00003-4
- Pitayachaval P., Sanklong N., Thongrak A. (2018): A review of 3D food printing technology. In *MATEC web of conferences* (Vol. 213, 01012). EDP Sciences.
- Placone J.K. Engle, A.J. (2018): Recent advances in extrusion-based 3D printing for biomedical applications. *Adv. Healthc. Mater.* 7, 1701161.
- Plückelmann S., Song F., Breitenbücher R. (2017): Hybrid Concrete Elements with Splitting Fiber Reinforcement under Two-Dimensional Partial-Area Loading. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, edited by M. Luković, and D. A. Hordijk, 347–355. Cham: Springer International Publishing.
- Prakoso A.T., Basri H., Adanta D., Yani I., Ammarullah M. I., Akbar I., Ghazal F. A., Syahrom A., Kamarul T. (2023): The effect of tortuosity on permeability of porous scaffold Biomedicines, 11 (2), p. 427.
- Radhwan H., Shayfull Z., Farizuan M.R., Effendi M.S.M., Irfan A.R. (2019): Optimization parameter effects on the quality surface finish of the three-dimensional printing (3D-printing) fused deposition modeling (FDM) using RSM, in *AIP Conference Proceedings*. DOI: 10.1063/1.5118163.
- Raghav A. (2018): 3D Food Printing: A Revolution in Food Technology. *Acta Scientific Nutritional Health*. Volume 2 Issue 2. P. 11-12.
- Raja V., Moses J.A., Anandharamakrishnan C. (2023): Effect of 3D printing conditions and post-printing fermentation on pearl millet fortified idli. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103, 2401–2412.
- Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F., Letcher T. (2016): Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *J. Fail. Anal. Prev.*, 16 (3), p. 467-481.
- Rayna T., Striukova T. (2016): From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 102, 214-224, DOI: 10.1016/j.techfore.2015.07.023.
- Ráž K., Chval Z., Thomann S. (2023): Minimizing Deformations during HP MJF 3D Printing. *Materials*, 16, 7389. DOI: 10.3390/ma16237389.
- Richardson M. (2012): Designer/Maker: The Rise of Additive Manufacturing, Domestic-Scale Production and the Possible Implications for the Automotive Industry. *Computer-Aided Design and Applications*. PACE. 33-48. DOI: 10.3722/cadaps.2012.PACE.33-48.
- Rinanto A., Nugroho A., Prasetyo H., Pujiyanto E. (2018): Simultaneous Optimization of tensile strength, Energy Consumption and Processing Time on FDM Process Using Taguchi and PCR-TOPSIS, in *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology, ICST*. DOI: DOI: 10.1109/ICSTC.2018.8528667.
- Rodrigues Carneiro L. R., Tavares J. J.-P. Z. de S. (2021): Design and implementation of 3D printer for Mechanical Engineering Courses. *International Journal for Innovation Education and Research*, 9(3), 293–312. DOI: 10.31686/ijer.vol9.iss3.3001.
- Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho A. (2018): The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: a comparative analysis. *Materials*, 11 (8), p. 1333.

- Rodríguez-Parada L., de la Rosa S., Mayuet P.F. (2021): Influence of 3D-Printed TPU Properties for the Design of Elastic Products. *Polymers*, 13, 2519. DOI: 10.3390/polym13152519.
- Rudi A.K., Adesta E., Hilmy I. (2019). Hardware improvement of FDM 3D printer: Issue of bed leveling failures. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 8. 603-614.
- Saad M. S., Nor A.M., Baharudin M.E., Zakaria M.Z., Fozi A. (2019): Optimization of surface roughness in FDM 3D printer using response surface methodology, particle swarm optimization, and symbiotic organism search algorithms, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-019-04568-3.
- Sani A.R., Zolfagharian A., Kouzani A.Z. (2024): Artificial Intelligence-Augmented Additive Manufacturing: Insights on Closed-Loop 3D Printing. *Adv. Intell. Syst.*, 6: 2400102. DOI: 10.1002/aisy.202400102.
- Samykan M., Selvamani S., Kadirgama K., Ngui W., Kanagaraj G., Sudhakar K. (2019): Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102 (9–12), p. 2779-2796.
- Sarabia-Vallejos M.A., Rodríguez-Umanzor F.E., González-Henríquez C.M., Rodríguez-Hernández J. (2022): Innovation in Additive Manufacturing Using Polymers: A Survey on the Technological and Material Developments. *Polymers*, 14, 1351. DOI: 10.3390/polym14071351.
- Sayel M. Fayyad, Mohammad Abuzalatah, Mohannad Rawashdeh, A.M. Maqableh, Zaid Abulghanam. (2023): Control, Design and Analysis of Delta 3D Printer. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 11(4s), p. 444–457.
- Scott Crump S., (1989): Patent US 5,121,329. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. Google Patents.
- Severseike L., Lee V., Bakken Ch., Brandon T., Bhatia V. (2019): Polyjet 3D printing of tissue-mimicking materials: How well can 3D printed synthetic myocardium replicate mechanical properties of organic myocardium. *bioRxiv* 2019. Accessed 31 October. DOI: 10.1101/825794.
- Shanmugam V., Das O., Babu K., Marimuthu U., Veerasimman A., Johnson D.J., Neisiany R.E., Hedenqvist M.S., Ramakrishna S., Berto F. (2021): Fatigue behavior of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *Int. J. Fatigue*, 143, 106007.
- Sharma M., Sharma V., Kala P. (2019): Optimization of process variables to improve the mechanical properties of FDM structures. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1240, Article 012061 DOI: 10.1088/1742-6596/1240/1/012061.
- Shergill K., Chen Y., Bull S., (2023): What controls layer thickness effects on the mechanical properties of additive manufactured polymers, *Surface and Coatings Technology*, Volume 475, 130131, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130131.
- Shimpi N.G. (2018): Biodegradable and biocompatible polymer composites. vol. na. Duxford, CB22 4QH, United Kingdom 50: Matthew Deans. DOI: 10.1016/C2015-0-05524-1.
- Shulga E., Karamov R., S. Sergeichev I., D. Konev S., I. Shurygina .L, S. Akhatov I., D. Shandakov S., G. Nasibulin A. (2020): Fused Filament Fabricated Polypropylene Composite Reinforced by Aligned Glass Fibers. *Materials*. 13. 3442. DOI: 10.3390/ma13163442.
- Singh A.P., Pervaiz S. (2021): Current Status and Prospects of Multi-Jet Fusion (MJF) Based 3D Printing Technology. 10.1115/IMECE2021-73547.
- Standard A., (2012): F2792, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, Pa, USA: ASTM International.
- Stansbury J. W., Idacavage M. J. (2016): 3D Printing with Polymers: Challenges Among Expanding Options and Opportunities. *Dent. Mater. J.* p. 54-64.
- Stansbury J.W., Idacavage M.J. (2016): 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities *Dent. Mater.*, 32 (1), p. 54-64.
- Sun J., Zhou W., Huang D., Fuh J. Y., Hong G. S. (2015): An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food & Bioprocess Technology*, 8, p. 1605 – 1615.

- Swetha S., Sahiti T., Priya G., Harshitha K., Anil A. (2024): Review on digital light processing (DLP) and effect of printing parameters on quality of print. *Interactions*. 245. DOI: 10.1007/s10751-024-02018-5.
- Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. (2021): Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts. A Critical Review. *Polymers*, 13, 1587. DOI: 10.3390/polym13101587.
- Szmidt A., Rębosz-Kurdek A. (2017): Sposoby doskonalenia druku 3D w technologii FDM/FFF New approaches of improving FDM/FFF printing technology. *Mechanik*. 3, p. 258-261, DOI: 10.17814/mechanik.2017.3.46.
- Talaat F.M., Hassan E. (2021): Artificial Intelligence in 3D Printing. In: Hassanien, A.E., Darwish, A., Abd El-Kader, S.M., Alboaneen, D.A. (eds) *Enabling Machine Learning Applications in Data Science. Algorithms for Intelligent Systems*. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-33-6129-4_6.
- Tamir T.S., Xiong G., Fang Q., Xisong D., Zhen S. (2022): A feedback-based print quality improving strategy for FDM 3D printing: an optimal design approach. *Int J Adv Manuf Technol* 120, p. 2777–2791. DOI: 10.1007/s00170-021-08332-4.
- Tan C., Toh W.Y., Wong G., Li L. (2018): Extrusion-based 3D food printing – Materials and machines. *International Journal of Bioprinting*, 4, 143.
- Tomar R.P., Ulu F.I., Kelkar A., Mohan R. (2019): Investigation of process induced variations in PolyJet printing with digital polypropylene via homogeneous 3D tensile test coupon. In: *ASME2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Salt Lake City, UT, 11–14.
- Tran P., Peng C. (2020): Triply periodic minimal surfaces sandwich structures subjected to shock impact. *J. Sandw. Struct. Mater.*
- Tri W., Mastriswadi H., Ismianti I. (2020): 3D print parameter optimization: A literature review. *Proceeding of the LPPM UPN “veteran” yogyakarta conference series 2020 – engineering and science series*, 1, LPPM UPN, p. 146-151.
- Tuazon B.J., Custodio N.A.V., Basuel R.B., Delos Reyes L.A., Dizon J.R.C. (2022): 3D Printing Technology and Materials for Automotive Application: A Mini-Review. *Key Eng Mater*, 913, p. 3-16.
- Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B. (2022): Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts. *Polymers (Basel)*. 24;14(13):2564. DOI: 10.3390/polym14132564. PMID: 35808611; PMCID: PMC9269443.
- Vanderploeg A., Lee S. E., Mamp M. (2016): The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10(2), 170–179. DOI: 10.1080/17543266.2016.1223355.
- Vaz V., Kumar L. (2021): 3D Printing as a Promising Tool in Personalized Medicine. *AAPS PharmSciTech*. 22. DOI: 10.1208/s12249-020-01905-8.
- Vicente C., Martins T., Leite M., Ribeiro A., Reis L. (2019): Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts. *Polym. Adv. Technol.*, 31 (3), p. 501-507.
- Wah Y.L., Hoo C.L., Wong Y.M., Tai J.J. (2018): Development of a PID Controlled Arduino-Based Stabiliser. *MATEC Web of Conferences*. 152. 02020. DOI: 10.1051/mateconf/201815202020.
- Waheed S., Cabot J., Macdonald N., Lewis T., Guijt R., Paull B., Breadmore, M. (2016): 3D printed microfluidic devices: Enablers and Barriers. *Lab on a Chip*. 16. DOI: 10.1039/C6LC00284F.
- Wang J., Goyanes A., Gaisford S., Basit A. (2016): Stereolithographic (SLA) 3D Printing of Oral Modified-Release Dosage Forms. *International Journal of Pharmaceutics*. 503. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.03.016.
- Wankhede V., Jagetiya D., Joshi A., Chaudhar R. (2019): Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis, in *Materials Today: Proceedings*. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.078.

- Wendel B., Rietzel D., Kühnlein F., Feulner R., Hülder G., Schmachtenberg E. (2008): "Additive processing of polymers," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 293, p. 799–809, 2008.
- Wickramasinghe S., Do T., Tra P. (2020): FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers*, 12, 1529. DOI: 10.3390/polym12071529.
- Wilson A., Anukiruthika T., Moses J. A., Anandharamakrishnan C. (2023): Preparation of fiber-enriched chicken meat constructs using 3D printing. *Journal of Culinary Science & Technology*, 21, p. 127 – 138.
- Wu J. (2018): Study on optimization of 3D printing parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 392. 062050. DOI: 10.1088/1757-899X/392/6/062050.
- Yadav A., Chatterjee Dr. S. J., Singh S. (2024): A Review: History of 3D Printing. Volume. 9 Issue.11, November-2024 *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, 1787-1791, DOI: 10.5281/zenodo.14280886
- Yadav D., Chhabra D., Garg R.K. Ahlawat A., Phogat A. (2020): Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network, in *Materials Today: Proceedings*. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.225.
- Yang B., James M. N. (2018): Fatigue Crack Growth Rate Curve Based on the CJP Model and Its Application Method. *Journal of Mechanical Engineering*. 54. 76. DOI: 10.3901/JME.2018.18.076.
- Yang L. Shujuan L. Yan L., Mingshun Y., Qilong Y. (2019): Experimental Investigations for Optimizing the Extrusion Parameters on FDM PLA Printed Parts, *Journal of Materials Engineering and Performance*. DOI: 10.1007/s11665-018-3784-x.
- Zaman U. K., Boesch E., Siadat A., Rivette M., Baqai A. (2019): Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on the strength of built parts using Taguchi's design of experiments, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-018-3014-6.

Strony Internetowe:

- <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/> - dostęp wrzesień 2023,
- https://botland.com.pl/drukarki-3d-creality-seria-k1/23141-drukarka-3d-creality-k1-max-6971636403128.html?cd=20568226517&ad=&kd=&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAv8SsBhC7ARIsALIkVT22ZDs_WTW1CokiTlfAqSN-NAlrAbA0RQxd--srNNhpbN91I5dWNP1AaAjtWEALw_wcB - dostęp grudzień 2023,
- https://botland.com.pl/pokrowce-obudowy-i-ramy/18672-pokrowiec-do-drukarki-3d-duzy-700x750x900mm-5904422360870.html?cd=19822718347&ad=&kd=&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAv8SsBhC7ARIsALIkVT0jBohkA454axW3aqwKcqCJTEJ-PIZcPpPZg38LFqCzxwpNaKA5B9ioaAiJ9EALw_wcB - dostęp grudzień 2023,
- <https://drukarki3d.pl/technologie/technologie-sla> - dostęp wrzesień 2023,
- <https://grabcad.com/library/> - dostęp grudzień 2024,
- https://help.prusa3d.com/article/extrusion-multiplier-calibration_2257 - dostęp sierpień 2024,
- https://help.prusa3d.com/pl/article/problemy-pierwszej-warstwy_1804 - dostęp sierpień 2024,
- <https://twotrees3d.com/fdm-vs-sla-vs-sls-3d-printing/> - dostęp wrzesień 2023,
- <https://wikifactory.com/+bitfab/stories/fdm-3d-printing-common-problems-and-how-to-solve-them> - dostęp sierpień 2024,
- <https://wikifactory.com/+bitfab/stories/fdm-3d-printing-common-problems-and-how-to-solve-them> - dostęp sierpień 2024,
- <https://www.3dnatives.com/en/ghosting-3d-printing-03012023/> - dostęp sierpień 2024,
- www.backer.pl/pl/aktualnosci/szczegoly/proces-druku-3d - dostęp wrzesień 2023,
- <https://3designers.pl/uslugi-druku-3d/> - dostęp wrzesień 2023,
- <https://cults3d.com/en> - dostęp wrzesień 2023,
- <https://fab365.net/> - dostęp wrzesień 2023,

<https://get3d.pl/2021/07/05/podgrzewana-komora-robocza-czy-to-istotny-element-drukarki-3d/>
 - dostęp grudzień 2024,
<https://grabcad.com/library> - dostęp wrzesień 2023,
<https://library.zortrax.com/> - dostęp wrzesień 2023,
www.addtec3dm.com/add-n-go-3d-printing - dostęp wrzesień 2023,
www.instructables.com - dostęp wrzesień 2023,
www.myminiactory.com - dostęp wrzesień 2023,
www.prusaprinters.org - dostęp wrzesień 2023,
www.thingiverse.com - dostęp wrzesień 2023,
www.yeggi.com - dostęp wrzesień 2023,
<https://www.naturalmachines.com/foodini> - dostęp listopad 2023,
<https://reprap.org/wiki/G-code> - dostęp sierpień 2024,
<https://3d-gallery.xyzprinting.com/en-US/home> - dostęp sierpień 2023,
<https://all3dp.com/2/3d-printer-gantry-simply-explained> - dostęp wrzesień 2023,
https://store.creality.com/eu/products/ender-3-3d-printer?spm=..index.flashsale_index_1.1 - dostęp
 wrzesień 2023,
<https://stuffnellymakes.wordpress.com/2020/06/20/my-first-3d-printer/> - dostęp wrzesień 2024
<https://www.3dnatives.com/en/3dnatives-lab-testing-the-s7-3d-printer-from-ultimaker-090220234/> -
 dostęp czerwiec 2024.

WYBRANE ASPEKTY DRUKU ADDYTYWNEGO 3D

Streszczenie. W ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem cieszy się tzw. druk 3D. W pracy przedstawiono wybrane aspekty związane z drukiem 3D. Przedstawione zostały wybrane metody wytwarzania addytywnego. Znaczna część pracy skupia się na jednej z bardziej popularnych metod wytwarzania przyrostowego jakim jest metoda FDM (metoda wytłaczania termicznego termoplastów). Przedstawione zostały aspekty techniczne konstrukcji drukarek 3D stosowane w tej metodzie. Przedstawione zostały popularne materiały stosowane w technologii druku metodą FDM i aspekty technologiczne ich stosowania.

Słowa kluczowe: druk 3D, wytwarzanie addytywne, produkcja cyfrowa, FDM.

SELECTED ASPECTS OF 3D ADDITIVE PRINTING

Abstract. Abstract: In recent years, the so-called 3D printing has attracted increasing interest. The paper presents selected aspects related to 3D printing. Selected additive manufacturing methods have been presented. A significant part of the paper focuses on one of the most popular additive manufacturing methods, which is the FDM method (thermoplastic thermal extrusion method). Technical aspects of the construction of 3D printers used in this method have been presented. Popular materials used in FDM printing technology and technological aspects of their use have been presented.

Key words: 3D printing, additive manufacturing, digital fabrication, FDM.

SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 1. Typowe etapy druku 3D (opracowanie własne)
- Rys. 2. Zasada druku metodą FDM/FFF (na podstawie Bikasi i in., 2016)
- Rys. 3. Druk SLA (na podstawie Vaz i Kumar 2021)
- Rys. 4. Zasada druku 3D metodą DLP (na podstawie Mu i in., 2017)
- Rys. 5. Zasada druku 3D metodą *PolyJet* (na podstawie Espera i in., 2019)
- Rys. 6. Zasada druku 3D metodą CJP: 1 – sproszkowany materiał, 2 - platforma na której drukowany jest element, 3 - wałek wyrównujący i usuwający nadmiar materiału z którego drukowany jest element (na podstawie <https://www.addtec3dm.com/...>)
- Rys. 7. Zasada druku 3D metodą *Binder Jetting* (na podstawie Waheed i in., 2016)
- Rys. 8. Zasada druku 3D metodą SLS (na podstawie Gomes i in., 2022)
- Rys. 9. Zasada druku 3D metodą SLM (na podstawie Ambrosi i Pumera, 2016)
- Rys. 10. Zasada druku 3D metodą EBM (na podstawie Dall’Ava i in., 2019)
- Rys. 11. Zasada druku z proszków polimerowych sklejanych klejem aktywowanym promieniami UV – MJF (na podstawie <https://www.backer.pl/...>)
- Rys. 12. Zasada druku w przykładowej drukarce 3D opartej na wytłaczaniu materiału oddziaływaniem mechanicznym (np. wkręcanie śruby) (Li i in., 2018)
- Rys. 13. Zasada druku w przykładowej drukarce 3D opartej na wytłaczaniu materiału w wyniku oddziaływania sprężonego powietrza na tłok – (na podstawie Vaz i Kumar, 2021)
- Rys. 14. Zasada druku 3D metodą LOM (na podstawie Hehr i Dapino, 2015)
- Rys. 15. Zasada druku 3D żywności metodą wytłaczania: a) wytłaczanie strzykawkowe, b) wytłaczanie ślimakowe, c) wytłaczanie pneumatyczne (na podstawie Tan i in., 2018)
- Rys. 16. Przykład drukarka oparta na zasadzie ekstruzji przeznaczona do druku żywności - DigitalFoodLab (<https://www.naturalmachines.com/...>)
- Rys. 17. Mechanizm sklejania spoiwa podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (na podstawie Green, 2021)
- Rys. 18. Główne systemy ruchu w drukarkach 3D FDM/FFF (na podstawie <https://all3dp.com/...>)
- Rys. 19. Zasada druku 3D w przykładowej kartezyjańskiej drukarce (Rodrigues Carneiro i Tavares, 2021)
- Rys. 20. Schemat drukarki z kartezyjańską architekturą układu pozycjonowania głowicy (a) - schemat drukarki z kartezyjańską architekturą głowicy XZ. (b) - schemat drukarki z kartezyjańską architekturą głowicy XY. Prostopadłościany prostokątne są złączami pryzmatycznymi (P), gdzie indeks dolny (x , y lub z) oznacza oś ruchu – (na podstawie Ida i in., 2022)
- Rys. 21. Przykład popularnej drukarki 3D W systemie Kartezyjańskim firmy CREALITY (<https://store.creality.com/...>)
- Rys. 22. Przykład popularnej drukarki 3D W systemie Krzyżowym - UltiMaker S7 (<https://www.3dnatives.com/...>)
- Rys. 23. Drukarki 3D oparte na CoreXY i H-Bot. MA i MB oraz M1 i M2 – silniki napędowe (na podstawie <https://stuffnellymakes.wordpress.com/...>)
- Rys. 24. Zasada działania drukarki 3D typu Delta (Sayel i in., 2023)
- Rys. 25. Zasada działania drukarki 3D typu SCARA (Kampker i in., 2019)
- Rys. 26. Zasada działania drukarki 3D typu Polar (Kampker i in., 2019)
- Rys. 27. Przykładowa drukarka 3D systemu Polar (firmy POLAR3D) (<https://3dprint.com/...>)
- Rys. 28. Przykład zastosowania pasków zębatych w drukarce 3D do poruszania głowicy drukarskiej w osi X-Y dla kinematyki H-Bot. 1-pasek zębaty, 2- przesuwny element montażowy głowicy drukarskiej z łożyskiem liniowym, 3-prowadnica, 4-silniki krokowe, 5-przesuwny element z łożyskami liniowymi i rolkami zębatymi, 6-podstawa łożysk liniowych z rolkami zębatymi, 7-rama (na podstawie <https://grabcad.com/library/...>)
- Rys. 29. Porównanie dwóch typowych profili pasków zębatych stosowanych w drukarkach 3D (na podstawie Evans, 2012)

- Rys. 30. Wykorzystanie śruby pociągowej do przesuwu elementów drukarki 3D. 1-silnik krokowy, 2-śruba pociągowa (gwintowana), 3-przesuwna nakrętka do której montowany jest element przeznaczony, 4-sprzęgło, 5-łożyska podporowe (na podstawie <https://grabcad.com/library/...>)
- Rys. 31. Przykładowa drukarka 3D z zamkniętą komorą druku (<https://botland.com.pl/...>)
- Rys. 32. Przykładowa obudowa drukarki 3D (<https://botland.com.pl/...>)
- Rys. 33. Przykładowy rozkład temperatur drukowanego elementu w technologii FDM (po lewej – druk w podgrzewanej komorze zamkniętej, po prawej – druk bez zamkniętej komory osłonowej) (<https://get3d.pl/2021/07/05/podgrzewana-komora-robocza-czy-to-istotny-element-drukarki-3d/>)
- Rys. 34. Schemat działania drukarki z ekstruderem Bowdena (Szmidt i Rębosz-Kurdek, 2017)
- Rys. 35. Schemat działania drukarki z ekstruderem Wade’a (Szmidt i Rębosz-Kurdek, 2017)
- Rys. 36. Różnica w poziomowaniu stołu na przykładzie dyszy o średnicy 0,2 mm (opracowanie własne)
- Rys. 37. Parametry geometrii druku w technologii FDM/FFF (na podstawie Shanmugam i in., 2021)
- Rys. 38. Orientacja ułożenia przedmiotu podczas druku w technologii FDM/FFF (opracowanie własne)
- Rys. 39. Orientacja kierunku podczas druku przedmiotu w technologii FDM/FFF (na podstawie Chacón i in., 2017)
- Rys. 40. Parametry ścieżki druku w technologii FDM/FFF (na podstawie Abouzaid i in., 2019)
- Rys. 41. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie próbek wytworzonych z tworzywa ABS o różnej grubości warstwy (na podstawie Dwiyati i in., 2019)
- Rys. 42. Przykład procentowego wypełnienia próbki wykonanej metodą FDM (Hamoud i in., 2024)
- Rys. 43. Przykładowe geometrie wypełnienia wzorem (a) krzyż, (b) siatka, (c) linia, (d) trójkąt (e) trójkąt i sześciokąt (Hamoud i in., 2024)
- Rys. 44. Zasada druku FDM kompozytów z tworzyw termoplastycznych wzmocnianych ciągłymi długimi włóknami (CFRT) - koekstruzja (na podstawie Wickramasinghe i in., 2020).
- Rys. 45. Zasada druku FDM kompozytów z tworzyw termoplastycznych wzmocnianych ciągłymi długimi włóknami (CFRT)- z podwójnym wytłaczaniem (na podstawie Wickramasinghe i in., 2020).
- Rys. 46. Deformacja elementów podczas druku 3D w technologii FDM/FFF – odklejanie od podłoża fragmentów elementu (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 47. Pękanie elementów (rozwarstwianie) podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 48. Przesunięcie warstw podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 49. Nierówna powierzchnia elementu występująca podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 50. Nitkowanie występujące podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 51. Błędy związane z przegrzaniem materiału drukarskiego występujące podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 52. „Stopa słonia” występująca podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://wikifactory.com/...>)
- Rys. 53. „Ghosting” – wada występująca podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (<https://www.3dnatives.com/...>)
- Rys. 54. Przykłady niewłaściwej ekstruzji (wytłaczania) występującej podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (na podstawie <https://help.prusa3d.com/...>)
- Rys. 55. Przykłady ustawień pierwszej warstwy występującej podczas druku 3D w technologii FDM/FFF (na podstawie <https://help.prusa3d.com/...>)
- Rys. 56. Etapy tworzenia modelu 3D i jego późniejszej obróbki w technologii FDM/FFF (opracowanie własne)

SPIS TABEL

Tab. 1. Zestawienie cech związanych z konfiguracją drukarek SLA (<https://drukarki3d.pl/technologie/technologia-sla>)

Tab. 2. Zestawienie wad i zalet systemu podawania filamentu systemem Bowdena i Wade'aem (opracowanie własne)

Tab. 3. Przykłady głównych poleceń w kodzie G-kode

