

## Technologie AM i rapid prototyping

K. Adamczyk<sup>a</sup>, E. Dróżdź<sup>a</sup>, N. Łopata<sup>a</sup>, K. Pałka<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email:

**Streszczenie:** W artykule opisano znaczenie zastosowania technologii przyrostowych AM dla różnych gałęzi przemysłu, takich jak medycyna czy motoryzacja. Przedstawiono oraz porównano ze sobą najpowszechniej stosowane systemy szybkiego prototypowania (RP), w tym: stereolitografię SLA, osadzanie topionego materiału FDM oraz selektywne spiekanie laserowe SLS. Zastosowanie technik RP do szybkiego wytwarzania fizycznych prototypów oraz gotowych elementów, możliwe jest dzięki wykorzystaniu oprogramowania CAD, które służy do komputerowego wspomaganie projektowania.

**Abstract:** The meaning of applications of additive manufacturing for various industry, such as medicine or automotive, was described in this article. Most commonly used rapid prototyping systems such as: stereolithography SLA, Fused Deposition Modeling FDM and Selective Laser Sintering SLS, were presented and compared. Application of RP techniques for rapidly producing prototypes and ready components is possible thanks to using CAD software, which is used for computer-aided design.

**Słowa kluczowe:** Szybkie prototypowanie, technologie przyrostowe, druk 3D.

## 1. WSTĘP

Technologie przyrostowe AM (ang. *Additive Manufacturing*) są bardzo popularne w dzisiejszym świecie ze względu na możliwości produkcji prototypów i gotowych urządzeń. Przykładowymi zastosowaniami technologii AM są elementy zaworów respiratorów, przyłbice i gogle, czy np. części zamiennych do samochodu. Technologia AM sprawdza się przede wszystkim w szybkiej produkcji pojedynczych części, dlatego konstruktorzy często wykorzystują technologię AM do wytwarzania swoich projektów. Podstawą każdej z technologii AM jest proces szybkiego prototypowania RP (ang. *Rapid Prototyping*) składający się z koncepcji modelu 3D, eksportu modelu do programu typu CAD i procesu wytwarzania elementu z wykorzystaniem jednej z technologii AM. Do najbardziej popularnych technologii AM zaliczamy: SLA (ang. *Stereolithography*), FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) i SLS (ang. *Selective Laser Sintering*). Aktualnie najbardziej

rozpowszechnioną technologią AM jest technologia FDM. Technologia ta jest powszechnie wykorzystywana m.in. w przemyśle medycznym, samochodowym, a także w zastosowaniach konsumenckich. Różnorodność dostępnych materiałów – jak choćby ABS, PLA, PC, Nylon, TPU i bardziej zaawansowanych pod względem procesu produkcji kompozytów wykorzystujących cięte włókna szklane, węglowe czy domieszki mączki drewnianej – sprawia, że tą metodą można wykonywać modele o różnych właściwościach, kształtach, przeznaczeniu, zastosowaniu czy możliwościach aplikacyjnych. FDM jest również niewątpliwie najprostszą i najtańszą techniką przyrostową, która według przewidywań firmy Deloitte może osiągnąć wartość 20,5 mld dolarów w 2020 roku [1- 5].

W technologii addytywnej wytwarzane są nierzadko części końcowe bardziej złożonych mechanizmów. Na rynku polskim głównymi beneficjentami technologii przyrostowych są firmy z branży motoryzacyjnej, elektroniki użytkowej, przedmiotów użytku domowego czy lotnictwa oraz wojskowości, gdzie wytrzymałość i lekkość materiałów jest wyjątkowo istotna. Zastosowanie profesjonalnego i certyfikowanego sprzętu do wytwarzania produktów w technologii AM, odpowiedni dobór materiału w zależności od zastosowania zapewni odpowiedni zestaw cech i własności, które musi posiadać produkt końcowy. Przykładami polskich firm, które zajmują się wytwarzaniem maszyn technologii AM do profesjonalnego wytwarzania są 3D Gence czy Zortax. [1, 2, 6, 7]

## 2. TECHNOLOGIE PRZYROSTOWE AM I RAPID PROTOTYPING

**Technologie przyrostowe AM** (ang. *Additive Manufacturing*) to nazwa szeregu metod wytwarzania obiektów przestrzennych, bazująca na selektywnym dodawaniu kolejnych porcji materiału. Dodawanie materiału najczęściej odbywa się metodą warstwa po warstwie w kierunku narastania obiektu. Połączone ze sobą warstwy materiału tworzą produkt końcowy. Do technologii przyrostowych można zaliczyć szesnaście różnych technologii wytwarzania. Najpowszechniej stosowanymi metodami w technice są: FDM (ang. Fused Deposition Modeling), SLA (ang. Stereolithography), SLS (ang. Selective Laser Sintering), JP (ang. Jetted Photopolymer), 3DP (ang. Three Dimensional Printing) [1, 2].

Metody wytwarzania przyrostowego stają się coraz bardziej popularne ze względu na szereg cech, które odróżniają je od tradycyjnych, konwencjonalnych technik wytwarzania, takich jak obróbka kształtująca czy obróbka ubytkowa. Jako zalety technologii AM można wymienić wysoką dokładność wykonywania elementów czy wszechstronność metody. Dzięki zastosowaniu technologii przyrostowych nie ma konieczności stosowania dedykowanych narzędzi do konkretnego detalu o danym kształcie i wymiarze, ponieważ przy zastosowaniu technologii AM wszystkie detale są wytwarzane za pomocą tego samego narzędzia roboczego (w zależności od stosowanej metody – laser, głowica dozująca, wiązka elektronów, itd.). Niewątpliwą zaletą jest możliwość wytworzenia przedmiotów o zoptymalizowanych funkcjonalnie właściwościach, nawet takich o skomplikowanej konstrukcji wewnętrznej, bez konieczności wykonywania procesów pośrednich. Dodatkowo istnieje możliwość wytwarzania przedmiotów o dowolnych kształtach geometrycznych (nie istnieją ograniczenia wynikające z konieczności prawidłowego zamocowania obrabianego przedmiotu w urządzeniu obrabiającym czy problemy związane z podejściem narzędzia obrabiającego, jak w przypadku obróbki ubytkowej). Koszt wytworzenia obiektu nie zależy od jego cech geometrycznych, a jedynie od kubatury i czasu jego wytwarzania [8].

**Rapid prototyping** (co w języku polskim oznacza szybkie prototypowanie) to techniki szybkiego wytwarzania obiektów fizycznych, produktów lub ich części składowych, czy prototypów wizualnych, technicznych, funkcjonalnych, z pominięciem tradycyjnych technologii mechanicznych. Podstawą całego procesu wytwarzania jest model cyfrowy wykonany w środowisku CAD. Na podstawie modelu 3D powstaje obiekt rzeczywisty dzięki wykorzystaniu zdolności łączenia różnych materiałów takich jak: papier, metal, tworzywa sztuczne, ceramika czy kompozyt [1, 9].

Występuje wiele różnych metod wytwarzania fizycznych modeli, lecz ogólny zarys postępowania dla każdej z technik jest taki sam. W pierwszym etapie przygotowany jest model w środowisku CAD, przy zastosowaniu takich programów jak AutoCAD, SolidEdge, SolidWorks, itp. Dzięki wykonanej dokumentacji model jest precyzyjnie opisany za pomocą powierzchni i brył. Innym typem danych, dzięki którym możliwe jest wykonanie modelu jest chmura punktów. Taki typ danych otrzymuje się wykonując pomiary skanerem trójwymiarowym, rezonansem magnetycznym lub tomografem komputerowym. Następnym etapem jest zapis projektu w formacie STL (ang. Stereolithographic Language). Zastosowany format stosuje się w celu uproszczenia dalszego przetwarzania matematycznego. Plik jest złożony ze współrzędnych x, y, z każdego wierzchołka oraz wektora normalnego do powierzchni każdego z trójkątów. Kolejny etap to tzw. plasterkowanie, czyli z ang. „slicing”. Polega ono na rozbiciu modelu 3D na kolejne warstwy o określonej grubości, która zależy od dokładności urządzenia wytwarzającego, zastosowanej metody wytwarzania i oczekiwań względem jakości wytworzonego elementu. Geometria zostaje podzielona na warstwy o grubości około 0,1 - 0,2 mm w płaszczyźnie x/y. Dzięki temu możliwe jest stworzenie programu do sterowania w zależności od metody - wiązką elektronów, głowicą dozującą czy laserem - która nakłada kolejne warstwy tworzywa. W takim programie należy również określić parametry procesu obróbki. Do parametrów procesu należy prędkość nakładania warstw lub ruchu głowicy, grubość warstw, metody wypełniania, itp. Poprzez nakładanie kolejnych warstw, które odwzorowują przekrój danego elementu, zgodnie z ich kolejnością w osi z, otrzymywany jest model fizyczny. W zależności od stosowanej metody sposób odwzorowywania warstw się różni [1, 10, 11].

W metodach rapid prototyping stosuje się bardzo szeroką gamę materiałów. Ich dobór jest ściśle związany z aplikacją i wymaganiami właściwościami wytwarzanego prototypu/modelu. W celu wytworzenia modelu pogładowego często stosuje się tanie materiały takie jak: polimer PLA (poliaktyd) czy ABS (akrylonitryl-butadien-styren) [9, 10].

Na podstawie literatury stwierdza się, że najpowszechniej stosowane tworzywa do wytwarzania fizycznych modeli to między innymi: PLA (poliaktyd), ABS (akrylonitryl-butadien-styren), PC (poliwęglan), PVA (poli(alkohol winylowy)), Nylon, TPU (termoplastyczny elastomer poliuretanowy), PGA (poliglikolid), PDMS (poli(dimetylosiloksan), PCL (polikaprolaktton), Laywood (kompozyt powstały z połączenia tworzywa sztucznego i drewna – materiał drewnopodobny), Laybrick (kompozyt tworzywa sztucznego i gipsu), żywice, guma, metal, beton, papier, grafen (faza badań) [1, 11]

## 2.1. Osadzanie topionego materiału FDM

Technologia FDM polega na produkcji części warstwa po warstwie z wykorzystaniem drukarki 3D. Ilość materiału i pozycjonowanie głowicy jest kontrolowane za pomocą Gcode utworzonego w wyniku konwersji modelu STL w programie „slicing software”. Części drukowane są zazwyczaj z termoplastycznego drutu o średnicy 1,75 mm. Technologia FDM

zapewnia możliwość wytwarzania produktów o skomplikowanych kształtach skracając w ten sposób czas realizacji produkcji [12].

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie kosztów produkcji modeli z wykorzystaniem druku 3D i metody wtrysku [13].



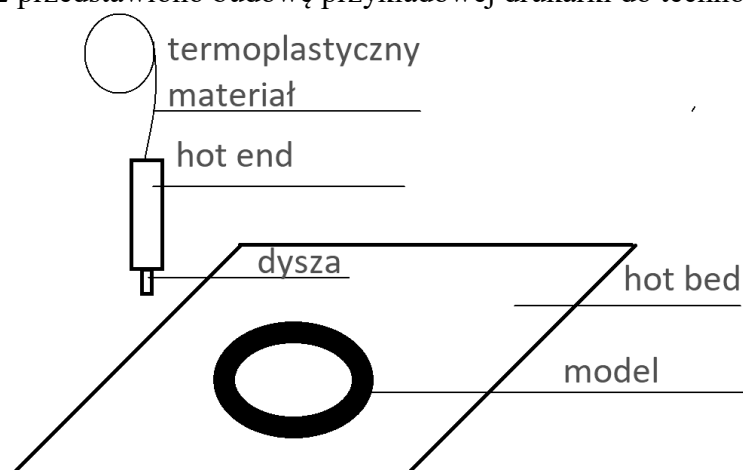
Rysunek 1. Porównanie kosztów wytwarzania modeli za pomocą metody druku 3D i metody wtryskowej [13]

Figure 1. Comparison of the costs of producing models using the 3D printing method and the injection method [13]

Koszty wykonania modelu za pomocą druku 3D są takie same niezależnie od liczby sztuk. Koszty modelu wyprodukowanego z wykorzystaniem technologii wtrysku na początku są bardzo wysokie ze względu na produkcję formy wtryskowej. Przy masowej produkcji modeli technologia wtrysku będzie korzystniejsza [13].

W technologii FDM materiał jest topiony w miejscu nazwanym hot end. Materiał podgrzany do temperatury topnienia przechodzi przez dyszę (najczęściej 0,4 mm) jest osadzany na tzn. hot bed [12]

Na rysunku 2 przedstawiono budowę przykładowej drukarki do technologii FDM [12].



Rysunek 2. Budowa drukarki do technologii FDM [12]

Figure 2. Construction of a printer for FDM technology [12]

Maszyny do technologii FDM charakteryzują się różną kinematyką [14]:

- układ kartezjański (głowica przemieszcza się w osiach x i z, a stół roboczy w osi y),
- układ H (głowica porusza się w osiach x i y, a stół roboczy w osi z),
- układ delta (głowica porusza się w osiach x, y i z, a stół roboczy nie wykonuje ruchu).

Technologia FDM pozwala na kontrolowanie własności modelowanego przedmiotu poprzez zmianę parametrów tj.: wysokości warstwy, wypełnienia oraz szybkości druku [15].

W tablicach 1 – 4 przedstawiono jak zmiana parametrów procesu wpływa na zmianę własności modelu wykonanego z PLA, przy czym kolor zielony oznacza własności najbardziej korzystne, a kolor czerwony własności najmniej korzystne [16].

Tablica 1. Zmiana własności mechanicznych modelu w zależności od wysokości warstwy i wypełnienia [16]

Table 1. Change of mechanical properties of the model depending on the layer height and infill [16]

		Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]						
		Wypełnienie [%]						
		10	30	50	70	80	90	100
Wysokość warstwy [mm]	0,1	8	12	17	25	29	33	39
	0,15	9	14	20	28	33	38	44
	0,2	10	15	21	30	35	40	46
	0,25	10	15	22	31	37	42	49
	0,3	10	15	22	31	36	42	48

Tablica 2. Zmiana kosztu wykonania modelu w zależności od wysokości warstwy i wypełnienia [16]

Table 2. Change of cost of the model depending on the layer height and infill [16]

		Koszt [centy]						
		Wypełnienie [%]						
		10	30	50	70	80	90	100
Wysokość warstwy [mm]	0,1	6	9	13	17	18	21	22
	0,15	6	10	14	18	19	21	23
	0,2	6	10	14	18	20	22	23
	0,25	6	10	14	18	20	22	23
	0,3	6	10	14	18	20	22	23

Tablica 3. Zmiana jakości modelu w zależności od wysokości warstwy i wypełnienia [16]

Table 3. Change of quality of the model depending on the layer height and infill [16]

		Jakość						
		Wypełnienie [%]						
		10	30	50	70	80	90	100
Wysokość warstwy [mm]	0,1	Bardzo wysoka						Niska
	0,15	Wysoka						
	0,2	Średnia						
	0,25	Niska						
	0,3	Bardzo niska						

Tablica 4. Zmiana szybkości wykonania modelu w zależności od wysokości warstwy i wypełnienia [16]

Table 4. Change of speed of execution of the model depending on the layer height and infill [16]

		Szybkość [min]						
		Wypełnienie [%]						
		10	30	50	70	80	90	100
Wysokość warstwy [mm]	0,1	21	35	47	61	68	74	80
	0,15	14	23	32	41	46	50	54
	0,2	10	18	24	31	35	38	41
	0,25	8	14	20	25	28	31	33
	0,3	7	12	16	21	24	26	28

Popularnym materiałem stosowanym w technologii FDM jest PLA. Jest on biodegradowalny, a podczas procesu druku nie wydziela tak szkodliwych oparów jak np. ABS. Do produkcji filamentu PLA wykorzystywana jest skrobia kukurydziana lub trzcina cukrowa. Cechy charakterystyczne procesu i wydruków z wykorzystaniem PLA [17]:

- materiał do druku prototypów,
- bardzo mały skurcz materiału,
- niska temperatura procesu wydruku w stosunku do innych materiałów (180 - 220°C),
- odkształcenia pod wpływem wysokich temperatur.

Innym materiałem wykorzystywanym w druku FDM jest ABS. Kopolimer akrylonitrylo butadieno-styrenowy jest wytwarzany z ropy naftowej, z tego powodu podczas procesu druku wydziela szkodliwe dla zdrowia opary. Materiał stosuje się ze względu na korzystne własności mechaniczne (twardość, odporność na uderzenia i ścieranie). ABS charakteryzuje się [18]:

- bardzo dużym skurczem materiału podczas druku,
- rozpuszczalnością w oparach acetonu,
- odpornością na działanie temperatury od 98 °C,
- najczęściej z ABS wytwarzane są części ruchome.

Materiałem, który po odpowiedniej certyfikacji może zostać dopuszczony do kontaktu z żywnością jest PETG. Jest wytwarzany z PET i glicerolu. Główną zaletą PETG jest elastyczność i brak szkodliwych oparów. Firma ONE PET wprowadziła na rynek filament PETG wyprodukowany z recyklingu butelek PET. Produkcja filamentu z butelek PET może doprowadzić do zmniejszenia wykorzystania ropy naftowej do produkcji filamentu PETG [17, 19].

Modele wykonane z PETG charakteryzują się [17]:

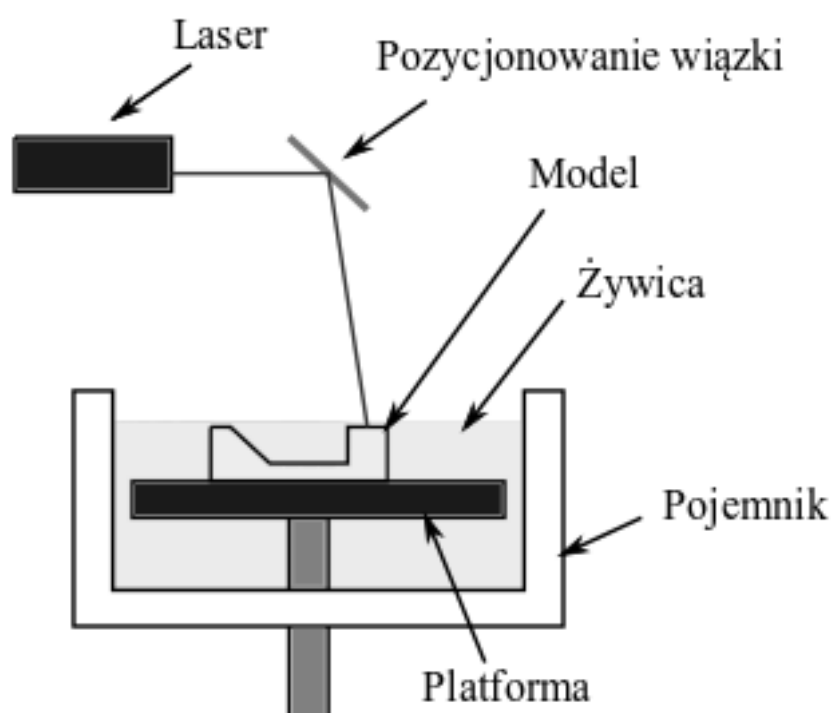
- niewielkim skurczem podczas druku,
- odpornością na uderzenia,
- wymogiem dobrania odpowiednich parametrów procesu.

## 2.2. Stereolitografia SLA

Stereolitografia (SLA) jest jedną z pierwszych zastosowanych w przemyśle technologii RP. Jest metodą technologii przyrostowych, polegającą na warstwowym wytwarzaniu obiektów 3D przez utwardzanie płynnego fotopolimeru wiązką światła. Elementy wytwarzane są na podstawie komputerowego modelu, wygenerowanego za pomocą systemu CAD

lub na podstawie danych uzyskanych z tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego [9, 20, 21].

Można wyróżnić dwa typy urządzeń stosowanych do stereolitografii, które różnią się konstrukcją. Składają się one z pojemnika wypełnionego płynną żywicą, ruchomej platformy oraz źródła wiązki światła (rysunek 3). Zależnie od budowy urządzenia, kolejne warstwy detalu utwardzane są od góry na powierzchni żywicy lub na dnie przezroczystego pojemnika. W pierwszym przypadku po każdym utwardzeniu warstwy podnoszony jest poziom płynu lub następuje obniżenie platformy, na której powstaje element, a następnie za pomocą zgarniacza wykonywane jest wyrównanie poziomu oraz ustalenie grubości żywicy. W drugim typie urządzenia platforma wraz z kolejnymi warstwami, utwardzonymi na dnie pojemnika, stopniowo się z niego wynurza [9, 20, 21].



Rysunek 3. Schemat działania urządzenia w metodzie SLA [9, 20]

Figure 3. Operation diagram of the device in the SLA method [9, 20]

Źródłem wiązki światła najczęściej jest laser małej mocy (ok. 100 mW), którego promień zapewnia dużą precyzję. Sterowanie wiązką lasera zależnie od rozwiązania odbywa się mechanicznie lub za pomocą galwanometru [20, 21].

Metoda stereolitografii wymaga oddzielenia modelu od platformy za pomocą podpór, które są pomagają również w podtrzymywaniu elementów wystających. Podpory tworzy się niemal takim samym sposobem jak model. Różnicą jest brak ruchu zgarniacza, co wpływa na dokładność wykonania, która nie musi być wysoka ze względu na usuwanie tych elementów po zakończeniu procesu. Podpory tworzone są w postaci pionowych prętów zwężanych przy powierzchni styku z modelem, aby ułatwić ich usunięcie [20, 21].

Ostatnim etapem wytwarzania elementu metodą SLA jest obróbka końcowa, podczas której następuje oczyszczanie z żywicy, usunięcie podpór oraz ewentualna obróbka wykańczająca [20].

Stereolitografia ograniczona jest do wytwarzania elementów jednokolorowych, ze względu na drukowanie detalu zanurzonego w płynnej żywicy. Cechuje się jednak wysoką precyzją oraz dokładnością wymiarową wydruku (20  $\mu\text{m}$ ). Pozwala również na wytworzenie struktur o bardziej skomplikowanej geometrii w porównaniu do metod FDM i SLS [9, 21].

W metodzie SLA jako materiał wykorzystuje się termoutwardzalne ciekłe żywice fotopolimerowe. Zaletą tej metody jest szeroki zakres materiałów możliwych do przetworzenia, o różnych właściwościach takich jak: przezroczystość, odporność na wysokie temperatury czy zwiększona elastyczność. Najczęściej stosowanymi żywicami w technologii SLA są: żywica standardowa, czysta żywica, żywica odlewnicza, żywice o podwyższonej wytrzymałości, żywice wysokotemperaturowe, żywice dentystyczne oraz żywice kauczukopodobne. Materiały termoutwardzalne są jednak bardziej kruche od materiałów termoplastycznych używanych w technologiach FDM i SLS, co eliminuje zastosowanie elementów z nich wytworzonych, jako modeli funkcjonalnych, poddawanych dużym obciążeniom [21, 22].

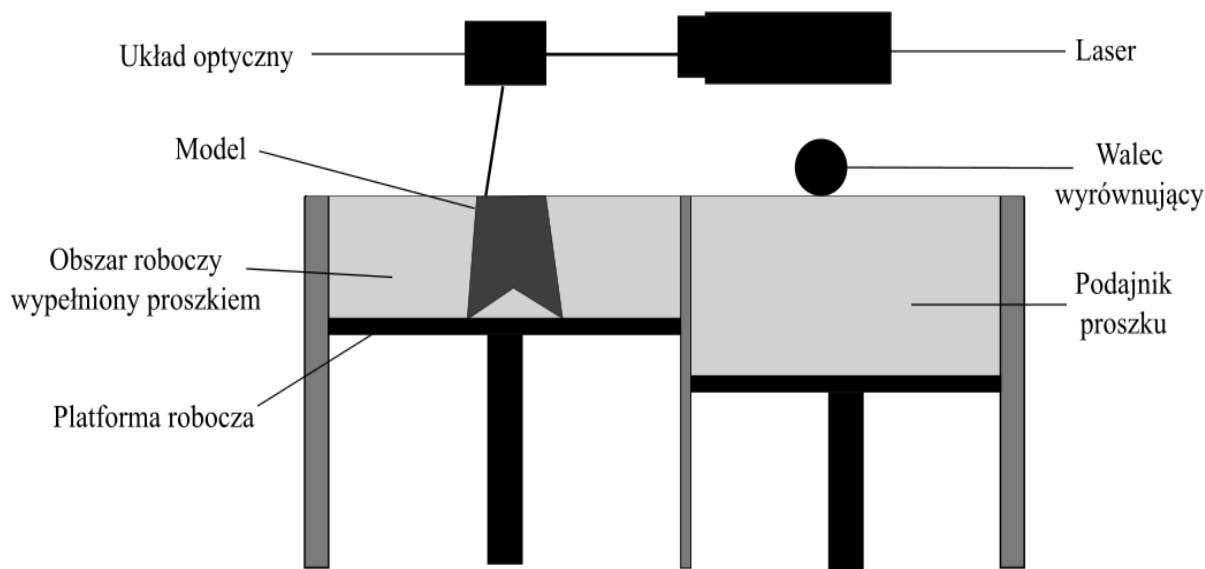
### **2.3. Selekttywne spiekanie laserowe**

Selekttywne spiekanie laserowe to proces polegający na łączeniu warstw proszku za pomocą sterowanej komputerowo wiązki laserowej. W tym celu stosuje się promieniowanie laserowe z zakresu podczerwieni, otrzymywane za pomocą lasera  $\text{CO}_2$  o długości fali 10,6  $\mu\text{m}$  lub lasera Nd:YAG o długości fali 1,06  $\mu\text{m}$ . Ze względu na termiczny, a nie chemiczny charakter procesu, moc lasera musi być większa niż w przypadku metody SLA (50 – 500 W). Spiekanie materiału odbywa się zazwyczaj w atmosferze gazów ochronnych. Zaletą metody SLS jest możliwość otrzymania modelu o dowolnej geometrii, bez konieczności stosowania materiału w stanie ciekłym [23 – 25].

Proces selektywnego spiekania laserowego rozpoczyna się od rozprowadzenia cienkiej warstwy proszku (0,02 – 0,2 mm) na platformie roboczej. Następnie specjalny wałek wyrównuje nasypywany proszek. W kolejnym etapie wiązka promieniowania laserowego zostaje przeprowadzona po powierzchni proszku według zaprogramowanej wcześniej w urządzeniu sterującym ścieżki, przy czym najpierw spiekany zostaje obrys przekroju wytwarzanego elementu, a następnie jego wnętrze. Po zakończeniu spiekania warstwy następuje obniżenie o zadaną wartość platformy roboczej i powtórzenie całego procesu. Spiekanie kolejnej warstwy proszku wywołuje nadtopienie poprzedniej warstwy i ich połączenie. Proces ten powtarza się aż do wytworzenia elementu w całości. Proszek, który wypełnia przestrzeń roboczą stanowi podparcie dla wytwarzanego modelu, dlatego nie ma potrzeby stosowania dodatkowych podpór. Proszek ten może również zostać powtórnie wykorzystany w następnym procesie [23, 24].

N rysunku przedstawiono schemat urządzenia do selektywnego spiekania laserowego [23].





Rysunek 4. Schemat urządzenia do selektywnego spiekania laserowego [23]

*Figure 4. Scheme of the device for selective laser sintering [23]*

Metoda SLS ulega podziałowi ze względu na rodzaj spiekania laserowego. Wyróżniamy [25]:

- spiekanie bezpośrednie DSLS,
- spiekanie niebezpośrednie ISLS.

W bezpośrednim selektywnym spiekaniu laserowym DSLS (Direct SLS), wiązka lasera działająca na proszek powoduje jego bezpośrednie spieczenie, bez konieczności przeprowadzania następnie obróbki cieplnej [25].

W metodzie niebezpośredniego selektywnego spiekania laserowego ISLS (Indirecter SLS) stosuje się proszek z metali trudnotopliwych pokryty materiałem niskotopliwym najczęściej polimerem. Wiązka promieniowania laserowego spieka zewnętrzną warstwę, lecz metaliczne wnętrze pozostaje niezmienione. Ze względu na niskie własności wytrzymałościowe oraz dużą porowatość otrzymany element poddaje się obróbce cieplnej. Obróbka termiczna składa się z dwóch etapów: usunięcia polimeru i infiltracji. W pierwszym etapie wysoka temperatura obróbki prowadzi do odparowania polimeru oraz utworzenia się połączeń między cząstkami metalu. Następnie przeprowadzona zostaje infiltracja, która polega na wypełnieniu metalem niskotopliwym porów powstałych po odparowaniu polimeru, bądź na dalszym spiekaniu w celu zminimalizowania występowania porów w modelu. W przypadku wypełnienia porów innym metalem, dzięki infiltracji możliwe jest uzyskanie kompozytu o określonych własnościach [25].

W metodzie SLS najczęściej stosowanymi materiałami są: tworzywa termoplastyczne, materiały ceramiczne, metale i stopy niskotopliwe, metale trudnotopliwe pokryte materiałami niskotopliwymi oraz kompozyty na osnowie polimerowej, np. PA z włóknem węglowym [23, 24].

### 3. PORÓWNANIE TECHNOLOGII AM

W tabelicy 5 przedstawiono porównanie technologii: FDM, SLA oraz SLS, z uwzględnieniem własności otrzymanych modeli, parametrów procesów, zalet i wad poszczególnych metod oraz kosztów wykorzystania tych technologii [26, 27].

Tablica 5. Porównanie metod FDM, SLA oraz SLS [26, 27]

Table 5. Comparison of FDM, SLA and SLS methods [26, 27]

<b>Technologia</b> <b>Właściwość</b>	<b>FDM</b>	<b>SLA</b>	<b>SLS</b>
<b>Maksymalny wymiar modelu</b>	1000 x 1000 x 1000 mm	1500 x 750 x 500 mm	750 x 550 x 550 mm
<b>Wysokość warstwy</b>	Max. 0,3 mm	0,05 – 0,015 mm	Max. 0,2 mm
<b>Rozdzielczość druku</b>	W zależności od głowicy drukującej, najczęściej 0,4 mm	Do 20 $\mu$ m	Do 75 $\mu$ m
<b>Jakość powierzchni</b>	Zależy od rozdzielczości druku, widać poszczególne warstwy	Powierzchnia gładka wysokiej jakości	Powierzchnia lekko chropowata
<b>Obróbka wykańczająca</b>	Usunięcie podpór	Usunięcie nieutwardzonej żywicy, naświetlenie lampą UV oraz usunięcie podpór	Usunięcie niespieczonego proszku i oczyszczenie modelu
<b>Materiały eksploatacyjne</b>	Tworzywa termoplastyczne	Żywice światłoutwardzalne	Sproszkowane tworzywa termoplastyczne, materiały ceramiczne, metale i ich stopy
<b>Wydajność procesu</b>	Produkcja jednostkowa i niskoseryjna	Produkcja jednostkowa i niskoseryjna	Produkcja krótkich serii elementów o złożonej geometrii
<b>Wymagania dotyczące obsługi i warunków pracy urządzenia</b>	Urządzenie nieskomplikowane w obsłudze, mogące pracować w środowisku biurowym	Urządzenie nieskomplikowane w obsłudze, mogące pracować w środowisku biurowym, wymagane stanowisko do naświetlania UV	Wymagane pomieszczenie techniczne ze specjalistycznym wyposażeniem, m.in. sprężarką, praca z materiałami pyłącymi

<b>Zalety</b>	Szybkość wydruku, możliwość produkcji prototypów, jak również elementów funkcjonalnych	Wydruk elementów z wysoką precyzją, umożliwiającą zastosowanie w branżach precyzyjnych, m.in. stomatologii czy jubilerstwie	Możliwość druku złożonych oraz skomplikowanych geometrii bez stosowania podpór
<b>Wady</b>	Niska rozdzielczość wydruku	Czułość na światło dzienne żywic światłoutwardzalnych	Długi czas procesu, chropowatość powierzchni
<b>Koszty urządzenia</b>	Od kilkuset złotych dla drukarek biurowych do kilkudziesięciu tysięcy złotych dla drukarek przemysłowych	Drukarki droższe niż w przypadku FDM, od kilku tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy złotych	Kilkadziesiąt tysięcy złotych
<b>Koszty materiału</b>	40 – 200 zł/kg	500 – 1000 zł/litr	Ok. 300 zł/litr w przypadku tworzyw termoplastycznych
<b>Koszty dodatkowego wyposażenia</b>	Myjka: 1300 zł Filtr HEPA: 1000 zł	Myjka + stanowisko do naświetlania UV: 5000 zł	Urządzenie do usuwania niespieczonego proszku + sprężarka: od kilku tysięcy złotych

#### 4. ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII AM

Technologie przyrostowe są stosowane do tworzenia rozwiązań dla różnych gałęzi przemysłu, takich jak: motoryzacja, medycyna, lotnictwo. Często wykonuje się części końcowe oraz części zamienne, jednak dominującym obszarem zastosowania technologii addytywnych jest sfera szybkiego prototypowania, obecna w każdej branży, która wymaga tworzenia fizycznych modeli. Technologia ta umożliwia łatwe i szybkie wykonywanie modeli fizycznych i prototypów technicznych, a nawet próbnych serii wyrobów rynkowych, co przekłada się na znaczne oszczędności czasu i kosztów związanych z opracowywaniem produktu i wprowadzaniem go na rynek [28, 29].

Podczas projektowania nowego produktu druk 3D pozwala na znacznie łatwiejsze wprowadzanie zmian w kolejnych prototypach, dzięki projektowaniu komputerowemu. Koszty wytwarzania nie zależą od stopnia skomplikowania geometrycznego detalu, ale od jego wymiarów. Dlatego ewentualne pomyłki w projektowaniu nie są aż tak kosztowne w porównaniu do wytwarzania prototypów technologiami tradycyjnymi, np. technologią ubytkową [28].

Rapid prototyping stosowany w budowie prototypów umożliwia weryfikację rozwiązań konstrukcyjnych, ich ocenę i analizę, badanie przepływów, badanie cech aerodynamicznych oraz dobór materiałów konstrukcyjnych. W budowie modeli fizycznych sprowadza się do poszukiwania nowych koncepcji projektowych, projektowania budowli i wzornictwa przemysłowego oraz prezentacji marketingowych [29].

Zaletą technologii przyrostowych jest to, że znoszą niemal wszystkie dotychczasowe ograniczenia związane z geometrią wytwarzanych elementów. Możliwe jest drukowanie części pustych w środku, struktur ażurowych czy organicznych kształtów. Prototypowanie pozwala także tworzyć kształty, które są bardzo trudne lub niemal niemożliwe do wykonania konwencjonalnymi metodami [28].

Druk przestrzenny często znajduje zastosowanie w produkcji małoseryjnej elementów i części, szczególnie wtedy, gdy wykorzystanie tradycyjnych metod wytwarzania za pomocą wtrysku okazuje się nieopłacalne lub znacznie podnosi cenę finalnego wyrobu. Dzięki technologii addytywnej można szybko i tanio wykonać niewielką serię narzędzi, komponentów i oprzyrządowania, która jest gotowa do zastosowania lub do sprzedaży, jako seria próbna w celu rozpoznania rynku. Dzięki tej technologii można produkować elementy, stanowiące istotny komponent wyrobu, które zostały wycofane ze sprzedaży. Części te mogą być wytwarzane w technologii druku wysokotemperaturowego, który cechuje się podwyższoną wytrzymałością termiczną i mechaniczną elementu. Zlecenie wykonania jednostkowej produkcji takich podzespołów na zewnątrz jest nieopłacalne pod względem kosztów, czasu oraz wymaga obsługi procesów logistycznych [28, 29].

Z produkcji małoseryjnej często korzystają branże maszynowa, narzędziowa czy linii produkcyjnych, ze względu na zapotrzebowanie elementów w niewielkiej ilości, często o nietypowych kształtach lub z konieczności zapewnienia posprzedażowej obsługi serwisowej w kolejnych latach. Technologie przyrostowe potrafią znacznie zredukować koszty produkcji małych serii, ze względu na pominięcie etapu przygotowania drogiego oprzyrządowania. Technologie te przechodzą bezpośrednio od modelu do wytworzenia gotowego elementu. Modele te można przechowywać tworząc wirtualny magazyn. Takie rozwiązanie, może zastąpić magazyny fizyczne, co pozwala uniknąć zamrożenia kapitału w postaci magazynowania detali. Technologie addytywne pozwalają również na zaoszczędzenie czasu, szczególnie ważnego w przypadkach, kiedy dany detal jest potrzebny natychmiast, aby utrzymać ciągłość działania linii produkcyjnych [29].

Przemysł lotniczy wykazuje coraz większe zainteresowanie technologiami druku 3D, ze względu na możliwość wytworzenia lekkich a zarazem trwałych materiałów. Waga jest tutaj szczególnie ważna, gdyż szacuje się, że obniżenie wagi samolotu o jeden kilogram wystarczy do tego, aby maszyna w ciągu całego życia wyemitowała o 25 ton dwutlenku węgla mniej. Innymi ważnymi cechami zastosowania tych technik jest przyspieszenie procesów produkcyjnych, oszczędności kosztów oraz zmniejszenie zużycia paliwa [30].

Ze względów bezpieczeństwa z technologii przyrostowych nie korzysta się w produkcji części krytycznych, narażonych na największe przeciążenia. Wykorzystuje się jednak między innymi do produkcji wsporników podtrzymujących instalacje w samolocie, ale również do widocznych dla pasażerów elementów kabiny takich jak panele wypełniające luki w rzędzie schowków ponad siedzeniami. W niektórych samolotach testowych zastosowano metalowe elementy wytworzone drukiem przestrzennym na wsporniki kabinowe i rury odpowietrzające. Testowane jest również wytwarzanie przyrostowe większych struktur, np. części skrzydeł [30].

Bardzo dużą zaletą technologii addytywnych jest możliwość uproszczenia złożonych części. Technologie te pozwalają na zredukowanie ilości komponentów, użytych do zbudowania detalu. W niektórych przypadkach można zastąpić części, wcześniej zbudowane z połączenia kilku komponentów, częściami składającymi się z jednego komponentu. Przykładem jest silnik odrzutowy LEAP (rysunek 5), w którym do zbudowania dyszy paliwowej, stosując tradycyjne metody produkcji, wykorzystuje się złożenie z 20 różnych części. Stosując produkcję addytywną udało się zintegrować wszystkie te części w pojedynczym elemencie, którego wytrzymałość wzrosła pięciokrotnie, a masa spadła o 25% [30].



Rysunek 5. Silnik odrzutowy LEAP [30]

*Figure 5. LEAP jet engine [30]*

Kolejnym zastosowaniem druku 3D jest personalizacja produktu. W przemyśle motoryzacyjnym z możliwości zastosowania personalizacji produktów końcowych korzysta m.in. marka BMW, która umożliwia właścicielom mini cooperów dostosowanie wyglądu samochodu do ich oczekiwań. Coraz częstszym zjawiskiem jest odchodzenie od produkcji seryjnej na rzecz produkcji zindywidualizowanej. Zainteresowanie produktami spersonalizowanymi zapewne będzie rosła, co przyciągnie uwagę firm projektujących przedmioty codziennego użytku, które sięgną po drukarki 3D [28, 29].

Innym obszarem zastosowania personalizacji produktów za pomocą technologii przyrostowych jest medycyna i nauki z nią powiązane. Możliwe jest tworzenie modeli dla potrzeb chirurgii rekonstrukcyjnej i implantologii. Dzięki tomografii komputerowej można wydrukować modele anatomiczne, co pozwala lekarzom przygotować się do skomplikowanych operacji, a kształt protezy jest dostosowywany do konkretnego pacjenta. Technologie addytywne w medycynie zajmują się również wytwarzaniem rusztowań do zasiedlenia komórkami pacjenta i regeneracji danej tkanki [9, 28].

#### **4.1. Przebieg procesu wytwarzania części zamiennych kasetki XRD z wykorzystaniem oprogramowania CAD i technologii FDM**

Technologie AM, a w szczególności technologia FDM, zapewniają uzyskanie elementów o dużej złożoności i skomplikowanych kształtach. Poniżej przedstawiono proces wytwarzania części zamiennych zamka w kasetce wykorzystywanej w prześwietlaniach XRD firmy FujiFilm

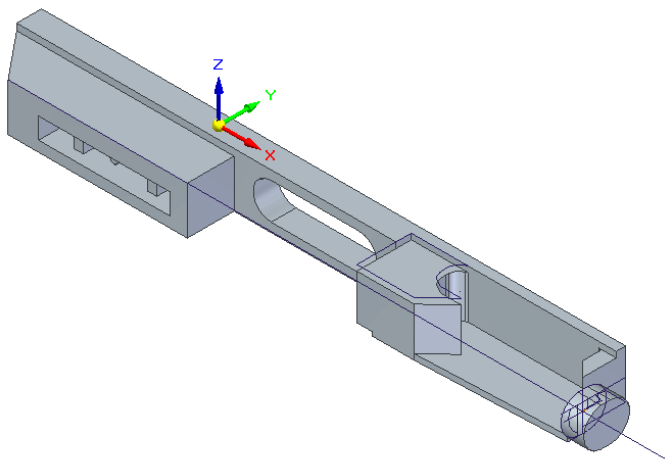
IP cassette type CC (rysunek 6). Zamek zapobiega otwieraniu się kasetki, jego brak uniemożliwia zarejestrowanie badania obrazowego XRD. Brak części zamiennych i wysoki koszt nowej kasetki pozwala na zastosowanie technologii FDM w celu przywrócenia pełnej funkcjonalności sprzętu.



Rysunek 6. FujiFilm IP cassette type CC

*Figure 6. FujiFilm IP cassette type CC*

Przebieg procesu wytwarzania części zamiennych zaczyna się od stworzenia modelu 3D w oprogramowaniu CAD. Model CAD wykonano w darmowym oprogramowaniu Solid Edge 2020 z licencją studencką i przedstawiono na rysunku 7.

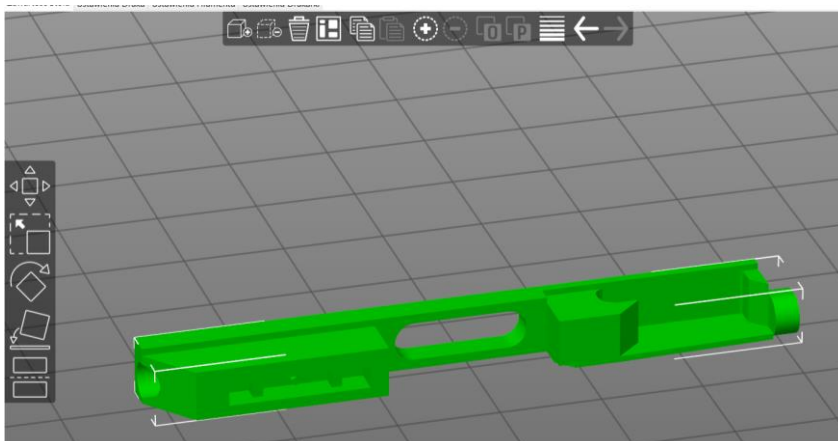


Rysunek 7. Model CAD zamka w kasetce.

*Figure 7. CAD model of the box lock*

Wykorzystując oprogramowanie Solid Edge model 3D wyeksportowano do formatu STL, pozwalającego na pracę z oprogramowaniem drukarki 3D. Dokładność formatu STL mieści się w granicach 0,02 mm i kątowno 10°.

Model STL importowano do oprogramowania Prusa Slicer, w którym został przekonwertowany na zrozumiały dla maszyny FDM kod GCODE. Na rysunku 8 przedstawiono model w oprogramowaniu Prusa Slicer.



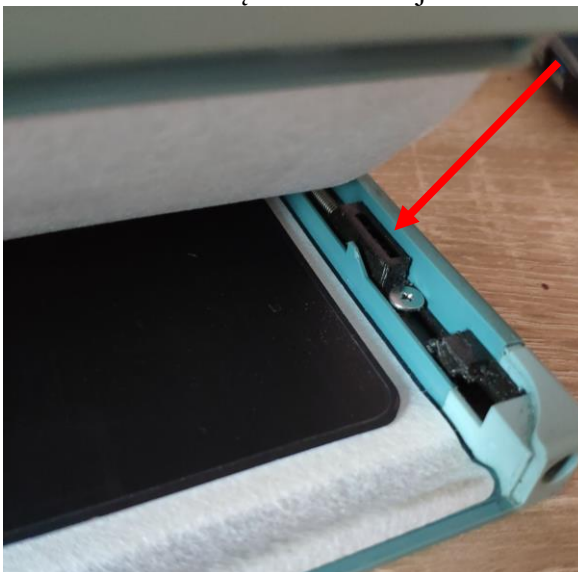
Rysunek 8. Model CAD zamka w oprogramowaniu Prusa Slicer  
*Figure 8. CAD model lock in Prusa Slicer*

Na tym etapie projektowania następuje dobór materiału na element. W tym przypadku do wydruku części dobrano materiał ABS z powodu wysokiej udarnoności w stosunku do innych materiałów stosowanych w technologii FDM.

Plik z danymi wysłano do drukarki firmy Creality model Ender 3. Parametry procesu wydruku:

- materiał ABS,
- temperatura hot end 240°C,
- temperatura stołu 90°C,
- zastosowano klej DIMAFIX,
- zastosowano komorę w celu ograniczenia skurczu abs podczas druku, co powodowałoby odklejenie modelu od stołu,
- średnica dyszy 0,4 mm,
- wysokość warstwy 0,08 mm.

Na rysunku 9 pokazano zastosowanie części zamiennej w kasetce.



Rysunek 9. Model zamontowany w kasetce  
*Figure 9. Model mounted in box*

## 5. PODSUMOWANIE

W powyższym artykule scharakteryzowano technologie przyrostowe AM. Stwierdzono, że są to bardzo popularne techniki do produkcji prototypów i gotowych urządzeń. Technologie AM są wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu, w tym medycynie, motoryzacji czy lotnictwie. Technologie te sprawdzają się przede wszystkim w produkcji jednostkowej lub niskoseryjnej. Koszty wytwarzanego modelu 3D w technologiach przyrostowych są takie same niezależnie od liczby wytworzonych sztuk. Dzięki możliwości stosowania różnorodnych materiałów można produkować modele o różnych właściwościach, przeznaczeniu czy zastosowaniu. Niewątpliwie zalety technologii przyrostowych to możliwość tworzenia modelu o dowolnych kształcie, na co nie pozwalają konwencjonalne metody oraz wysoka dokładność wykonywania elementów, dzięki czemu nie ma potrzeby stosowania dodatkowej obróbki wykańczającej. Koszty wytwarzania nie zależą od stopnia skomplikowania geometrycznego detalu, ale od jego wymiarów.

W pracy szczegółowo opisano techniki szybkiego prototypowania, czyli rapid prototyping. Podstawą RP jest stworzenie modelu cyfrowego w środowisku CAD, na którego podstawie powstaje obiekt rzeczywisty. Wykonany model zapisywany jest w formacie STL. Następnie realizowany jest etap „plasterkowania”, który polega na rozbiciu modelu 3D na kolejne warstwy. Dzięki temu możliwe jest stworzenie programu, który steruje urządzeniem służącym do nakładania kolejnych warstw materiału w celu utworzenia gotowego modelu. Projektowanie komputerowe pozwala na znacznie łatwiejsze wprowadzanie zmian w wytworzonych modelach, co obniża koszty produkcji oraz czas trwania wprowadzania produktu na rynek. Rapid prototyping stosowany w budowie prototypów umożliwia weryfikację rozwiązań konstrukcyjnych, ich ocenę i analizę, badanie przepływów, badanie cech aerodynamicznych oraz dobór materiałów konstrukcyjnych.

Sporządzono opis trzech najbardziej popularnych technologii AM: FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*), SLA (ang. *Stereolithography*) i SLS (ang. *Selective Laser Sintering*) oraz przedstawiono ich porównanie z uwzględnieniem własności otrzymanych modeli, parametrów procesów, zalet i wad poszczególnych metod oraz kosztów wykorzystania tych technologii. Na podstawie porównania można stwierdzić, że każda z przedstawionych technologii jest atrakcyjna. Wybór odpowiedniej technologii, przy wytwarzaniu modelu jest uzależniony od indywidualnych wymogów stawianych konkretnemu modelowi.

W przedstawionym artykule przedstawiono proces wytwarzania części zamiennej zamka w kasetce wykorzystywanej w prześwietleniach XRD firmy FujiFilm IP cassette type CC. Brak tej części w urządzeniu powodował nieprawidłowe działanie urządzenia.

Do wytworzenia brakującego elementu wykorzystano technologię FDM, czyli jedną z technologii AM. Przebieg wytwarzania części zaczął się od stworzenia modelu 3D w oprogramowaniu CAD. Stworzony model wyeksportowano do formatu STL, co pozwoliło na pracę z oprogramowaniem drukarki 3D. Następnie model STL został przekonwertowany na zrozumiały dla maszyny FDM kod GCODE. Jako materiał na wytwarzany element wybrano ABS ze względu na wysoką udarność w porównaniu do innych materiałów stosowanych w technologii FDM. Wytworzony element z powodzeniem został zamontowany w kasetce XRD i działa w sposób prawidłowy.



**LITERATURA**

1. L. Pilesa, M Reig, Reverse engineering applied to biomodelling and pathological bone manufacturing using FDM technology, *Procedia Manufacturing*, nr 41, str. 739 – 746, 2019;
2. K. Kun, Reconstruction and Development of a 3D Printer Using FDM Technology, *Procedia Engineering*, nr 149, str. 203 – 211, 2016;
3. [www.tech.wp.pl/koronawirus-we-wloszech-drukarki-3d-pomoga-walczyc-o-zycie-zarazonych-pacjentow-6489617963611777a](http://www.tech.wp.pl/koronawirus-we-wloszech-drukarki-3d-pomoga-walczyc-o-zycie-zarazonych-pacjentow-6489617963611777a);
4. [www.cyfrowa.rp.pl/technologie/45733-epidemia-ujawnia-potencjal-druku-3d](http://www.cyfrowa.rp.pl/technologie/45733-epidemia-ujawnia-potencjal-druku-3d);
5. [www.centrumdruku3d.pl/volkswagen-realizuje-projekty-drukowania-3d-zamiennych-czesci-samochodowych/](http://www.centrumdruku3d.pl/volkswagen-realizuje-projekty-drukowania-3d-zamiennych-czesci-samochodowych/);
6. [www.zortrax.com/pl/about-zortrax/](http://www.zortrax.com/pl/about-zortrax/);
7. [www.3dgence.com/pl/firma/](http://www.3dgence.com/pl/firma/);
8. K. Gruber, W. Stopyra, Technologie przyrostowe w zastosowaniach lotniczych, *Interdyscyplinarność Badań Naukowych 2017*, str. 60 – 65, 2017;
9. A. Laska-Leśniewicz, Wykorzystanie metod szybkiego prototypowania (rapid prototyping) w nowoczesnej medycynie, *Zeszyty Naukowe Towarzystwa Doktorantów Uniwersytetu Jagiellońskiego. Nauki Ścisłe*, nr 15, str. 39 – 48, 2017;
10. Chlebus E., *Techniki komputerowe CAX i inżynierii produkcji*, WNT, Warszawa, 2000;
11. M. Kordowska, W. Musiał, K. Stefanowicz, Wykorzystanie systemów rapid prototyping do modelowania części samochodowych, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, nr 6, str. 158 - 162, 2014,
12. D. Yadav, D. Chhabra, R. K. Garg, Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network, *Material Today Proceedings*, nr 21, str. 1583 - 1591, 2020;
13. [www.szefur.pl/druk-3d-praktyczne-zastosowania-oraz-potencjal-technologiei/](http://www.szefur.pl/druk-3d-praktyczne-zastosowania-oraz-potencjal-technologiei/);
14. [www.centrumdruku3d.pl/technologie-fdm-rozdzial-2-jak-dziala-drukarka-3d-i-na-co-zwracac-uwage-przy-jej-zakupie/](http://www.centrumdruku3d.pl/technologie-fdm-rozdzial-2-jak-dziala-drukarka-3d-i-na-co-zwracac-uwage-przy-jej-zakupie/);
15. W. Kajzer, D. Loncierz, Wpływ parametrów druku 3D w technologii FDM na własności mechaniczne i użytkowe obiektów wykonanych z PLA, *Aktualne Problemy Biomechaniki*, nr 10, str. 43 – 48, 2016;
16. [www.my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/#more-95](http://www.my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/#more-95);
17. [www.centrumdruku3d.pl/krok-10-abs-pla-nylon-i-inne-czyli-przeglad-filamentow-do-drukarek-3d/](http://www.centrumdruku3d.pl/krok-10-abs-pla-nylon-i-inne-czyli-przeglad-filamentow-do-drukarek-3d/);
18. [www.centrumdruku3d.pl/kompedium-materialow-do-druku-3d-abs/](http://www.centrumdruku3d.pl/kompedium-materialow-do-druku-3d-abs/);
19. [www.3dwpraktyce.pl/2019/02/one-pet-filament-100-pochodzacy-tworzywa-pochodzacego-recyklingu/](http://www.3dwpraktyce.pl/2019/02/one-pet-filament-100-pochodzacy-tworzywa-pochodzacego-recyklingu/);
20. [www.mech.pg.edu.pl/documents/176032/325240/metody\\_1b\\_ogolna.pdf](http://www.mech.pg.edu.pl/documents/176032/325240/metody_1b_ogolna.pdf);
21. J. Caban, M. Szala, J. Kęsik, Ł. Czuba, Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive, *Autobusy*, nr 6, str. 573 - 579, 2017;
22. [www.drukarki3d.pl/technologie/technologie-sla/](http://www.drukarki3d.pl/technologie/technologie-sla/);
23. E. Sasimowski, Przyrostowe metody wytwarzania elementów z tworzyw polimerowych, *Przetwórstwo Tworzyw*, nr 4, str. 349 – 354, 2015;
24. A. Ruszaj, M. Chuchro, D. Wyszynski, Zastosowanie technologii selektywnego spiekania laserowego (SLS) w inżynierii maszyn, *Inżynieria Maszyn*, nr 11, str. 38 – 47, 2006;

25. Ż. A. Mierzejewska, Technologia SLS – charakterystyka i zastosowanie selektywnego spiekania laserowego w inżynierii biomedycznej, *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, nr 1, str. 178 – 190, 2015;
26. [www.centrumdruku3d.pl/porownanie-technologii-fdm-vs-sla-vs-sls/](http://www.centrumdruku3d.pl/porownanie-technologii-fdm-vs-sla-vs-sls/);
27. [www.nano3d.pl/porownanie-technologii-druku-3d.php](http://www.nano3d.pl/porownanie-technologii-druku-3d.php);
28. [www.designnews.pl/menu-gorne/artukul/article/wytwarzanie-przyrostowe/](http://www.designnews.pl/menu-gorne/artukul/article/wytwarzanie-przyrostowe/);
29. [www.mech.pg.edu.pl/documents/176032/325240/metody\\_1b\\_ogolna.pdf](http://www.mech.pg.edu.pl/documents/176032/325240/metody_1b_ogolna.pdf);
30. [www.polskiprzemysl.com.pl/przemysl-lotniczy/drukowanie-3d-komponentow-lotniczych/?fbclid=IwAR12OQcXPLUldh3UWnMUxEqpbJ8nzxvZ6fhhI8z6Fpw\\_BxDnRK73dI\\_ki4](http://www.polskiprzemysl.com.pl/przemysl-lotniczy/drukowanie-3d-komponentow-lotniczych/?fbclid=IwAR12OQcXPLUldh3UWnMUxEqpbJ8nzxvZ6fhhI8z6Fpw_BxDnRK73dI_ki4).