

Grzegorz BUDZIK ■ Joanna WOŹNIAK ■ Łukasz PRZESZŁOWSKI

# DRUK 3D

jako element

## PRZEMYSŁU PRZYSZŁOŚCI

Analiza rynku i tendencje rozwoju



OFICyna  
WYDAWNICZA  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Recenzenci

dr hab. inż. Jolanta KRÓLCZYK, prof. PO  
prof. dr hab. inż. Michał WIECZOROWSKI

Redaktor naczelny

Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej  
dr hab. inż. Lesław GNIEWEK, prof. PRz

Redaktor

Marzena TARAŁA

Skład i łamanie tekstu,  
projekt okładki

Joanna MIKUŁA

*druk 3D, Przemysł 4.0,  
inżynieria produkcji, inteligentne technologie*

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
Rzeszów 2022

Wszelkie prawa autorskie i wydawnicze zastrzeżone. Każda forma powielania oraz przenoszenia na inne nośniki bez pisemnej zgody Wydawcy jest traktowana jako naruszenie praw autorskich, z konsekwencjami przewidzianymi w *Ustawie z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych* (Dz.U. z 2019 r., poz. 1231 oraz Dz.U. z 2020 r. poz. 288). Autor i Wydawca dołożyli wszelkich starań, aby rzetelnie podać źródło zamieszczonych ilustracji oraz dotrzeć do właścicieli i dysponentów praw autorskich. Osoby, których nie udało się ustalić, są proszone o kontakt z Wydawnictwem.

e-ISBN 978-83-7934-624-0

p-ISBN 978-83-7934-610-3

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów  
<https://oficyna.prz.edu.pl>

Ark. wyd. 9,84. Ark. druk. 10,25. Wydrukowano w listopadzie 2022 r.  
Drukarnia Oficyny Wydawniczej PRz, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów  
Zam. nr 63/22

# SPIS TREŚCI

AKRONIMY .....	5
WSTĘP.....	7
1. TECHNOLOGIE PRZYROSTOWE WSPOMAGANE KOMPUTEROWO.....	11
1.1. Rozwój technologii wytwarzania przyrostowego .....	11
1.2. Istota wytwarzania przyrostowego.....	13
1.3. Klasyfikacja metod przyrostowych.....	16
2. OBSZARY ZASTOSOWANIA DRUKU 3D.....	29
2.1. Rynek druku 3D.....	29
2.2. Prototypy wytwarzane przyrostowo.....	33
2.3. Zakres zastosowań metod przyrostowych.....	35
3. KONTROLA JAKOŚCI WYDRUKÓW 3D .....	47
3.1. Wytyczne stosowane w kontroli jakości wydruków 3D .....	47
3.2. Przebieg kontroli jakości w procesach wytwarzania przyrostowego .....	49
3.3. Przegląd metod kontroli jakości modeli wytworzonych przyrostowo.....	52
3.4. Analiza możliwości powstania wad w procesie druku 3D .....	58
4. TECHNOLOGIE PRZYROSTOWE W ŁAŃCUCHU DOSTAW .....	63
4.1. Korzyści wynikające z zastosowania druku 3D .....	63
4.2. Zagrożenia wynikające z zastosowania druku 3D.....	67
4.3. Wpływ technologii przyrostowych na procesy logistyczne zachodzące w przedsiębiorstwie.....	70
4.4. Usługi druku 3D.....	72
4.5. Współpraca z agencją przemysłową.....	74
4.6. Współpraca z podwykonawcą.....	76
5. ADAPTACJA WYTWARZANIA PRZYROSTOWEGO W STRUKTURZE PRZEMYSŁU 4.0 .....	79
5.1. Przemysł 4.0.....	79
5.2. Narzędzia informatyczne wspomagające wybór metody wydruku .....	83
5.3. Narzędzia do zdalnego sterowania drukarką 3D .....	84
5.4. Zastosowanie robotów współpracujących w druku 3D.....	86
5.5. Narzędzia informatyczne wspomagające integrację procesów .....	88
5.6. Zintegrowane systemy wytwarzania przyrostowego.....	91

6. OPIS REALIZACJI PRZYKŁADOWEGO PROJEKTU .....	93
6.1. Opracowanie modelu 3D-CAD .....	93
6.2. Kontrola poprawności zaprojektowanego modelu 3D-CAD.....	95
6.3. Przygotowanie danych procesowych .....	95
6.4. Kontrola wytwarzania .....	98
6.5. Postprocessing.....	102
6.6. Kontrola wymiarowa i kształtowa wydruków 3D.....	104
7. BADANIE LOGISTYCZNEJ OBSŁUGI KLIENTA W BRANŻY DRUKU 3D	115
7.1. Przebieg badania .....	115
7.2. Przedstawienie wyników analizy .....	115
8. BADANIE POZIOMU WDROŻENIA KONCEPCJI PRZEMYSŁU 4.0 DLA TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH.....	123
8.1. Przebieg procesu badawczego.....	123
8.2. Charakterystyka respondentów .....	124
8.3. Działalność marketingowa .....	127
8.4. Projektowanie i modelowanie 3D-CAD.....	128
8.5. Wytwarzanie modeli/wyrobów metodami szybkiego prototypowania .....	130
8.6. Obróbka wykończeniowa .....	133
8.7. Kontrola jakości modeli/wydruków .....	136
8.8. Rozwój działalności .....	138
8.9. Analiza szans i zagrożeń wynikających z wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0.....	141
PODSUMOWANIE.....	147
LITERATURA.....	149
STRESZCZENIE .....	159
SUMMARY .....	161

## AKRONIMY

- 3DP** (Three Dimensional Printing) – drukowanie trójwymiarowe
- AM** (Additive Manufacturing) – wytwarzanie przyrostowe
- BJT** (Binder Jetting) – spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem
- CAD** (Computer Aided Design) – komputerowe wspomaganie projektowania
- CAM** (Computer Aided Manufacturing) – komputerowe wspomaganie wytwarzania
- DED** (Directed Energy Deposition) – ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału
- DLP** (Digital Light Processing) – utwardzanie żywic światłem UV
- DMLS** (Direct Metal Laser Sintering) – selektywne przetapianie laserowe proszków metalowych
- FDM** (Fused Deposition Modeling) – modelowanie tworzywem termoplastycznym
- FEM** (Finite Element Method) – metoda elementów skończonych
- FFF** (Fused Filament Fabrication) – przetwarzanie topionego włókna
- JiT** (Just in Time) – dokładnie na czas
- JM** (Jetting Modeling) – modelowanie strumieniowe
- LOM** (Laminated Object Manufacturing) – wytwarzanie obiektów laminowanych
- MEM** (Melted and Extruded Modeling) – modelowanie przez topienie i wytłaczanie
- MEX** (Material Extrusion) – wytłaczanie warstwowe materiału
- MJF** (Multi Jet Fusion) – spiekanie proszku poliamidowego za pomocą środków chemicznych oraz światła UV
- MJT** (Material Jetting Additive) – warstwowy nadruk płynnego materiału
- PBF** (Powder Bed Fusion) – selektywne spajanie sproszkowanego materiału
- RM** (Rapid Manufacturing) – szybkie wytwarzanie
- RP** (Rapid Prototyping) – szybkie prototypowanie
- RT** (Rapid Tooling) – szybkie wytwarzanie oprzyrządowania
- SHL** (Sheet Lamination) – laminacja warstwowa przekrojów
- SLA** (Stereolithography) – stereolitografia
- SLM** (Selective Laser Melting) – selektywne stapianie laserowe
- SLS** (Selective Laser Sintering) – selektywne spiekanie laserowe
- STL** (Stereolithography Language) – stereolitograficzny format plików
- VPP** (VAT Photopolymerization) – fotopolimeryzacja objętościowa



# WSTĘP

Technologie przyrostowe (AM – Additive Manufacturing), powszechnie znane również jako druk 3D (3DP – 3D Printing), są uznawane w przemyśle za jedno z najważniejszych technologii produkcji ostatnich kilkunastu lat. Cieszą się one coraz większą popularnością ze względu na korzyści, jakie dają podczas wytwarzania prototypów, prototypowych części maszyn oraz personalizowanych wyrobów gotowych. Wiąże się to głównie z potrzebą skrócenia czasu prototypowania i wytwarzania oraz z racjonalnym gospodarowaniem surowcami i środkami finansowymi. Dodatkowo istotna jest możliwość wytwarzania przedmiotów o geometrii, która dotąd była trudna lub niemożliwa do uzyskania tradycyjnymi metodami wytwarzania. Biorąc to pod uwagę, przedsiębiorstwa produkcyjne na całym świecie inwestują swe środki w zakupy i rozwój programów informatycznych, a także maszyn i urządzeń stosowanych w procesach wytwórczych oraz kontroli jakości produktów wytwarzanych przyrostowo. W celu usprawnienia zarządzania w obrębie całego łańcucha dostaw prowadzone są również prace nad wdrażaniem nowoczesnych technologii charakterystycznych dla koncepcji Przemysłu 4.0 (Industry 4.0).

Analizując literaturę przedmiotu oraz dostępne raporty (zarówno krajowe, jak i zagraniczne), można stwierdzić, że obecnie branża druku 3D znajduje się w fazie wzrostu. Ostatnie lata pokazują, że liczba badań nad technikami przyrostowymi z roku na rok ulega zwiększeniu. Widoczne są zmiany w jakości i różnorodności materiałów do druku przestrzennego, zwiększenie produktywności, a także poprawa jakości wytwarzanych elementów. Ponadto powstają kolejne normy w obrębie całego łańcucha wartości. Fakt ten sygnalizuje, że w dziedzinie tej rośnie zapotrzebowanie na usystematyzowanie zachodzących procesów.

Pomimo zaobserwowania znacznego postępu w branży druku 3D wydaje się, że nie osiągnęła ona jeszcze fazy powszechnego poziomu wdrożenia. Podczas spotkań branżowych zwraca się uwagę na fakt, że metody drukowania przestrzennego stale się rozwijają i stają się poważną alternatywą lub uzupełnieniem dotychczas stosowanych metod wytwórczych. Ważne jest również, że zainteresowanie technologiami przyrostowymi widać zarówno w przemyśle, jak i w obszarze klientów indywidualnych.

W literaturze przedmiotu problematyka zastosowania technologii przyrostowych w przedsiębiorstwie najczęściej jest zdominowana przez aspekty techniczne. Wciąż brakuje badań i analiz w ujęciu logistycznym czy rynkowym. Mając to na względzie, w niniejszej pracy autorzy, oprócz opisu poszczególnych technologii przyrostowych, stosowanych materiałów do druku przestrzennego i procesów kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo, poruszają rów-

niez kwestie zarządzania łańcuchem dostaw w branży druku 3D oraz dokonują analizy rynkowej na przykładzie rynku polskiego.

Rozdział pierwszy przedstawia historię i istotę wytwarzania przyrostowego oraz opisy poszczególnych technologii szybkiego prototypowania z punktu widzenia konstruktora i operatora maszyny. Na podstawie normy ISO/ASTM DIS 52900 opisano siedem podstawowych procesów wytwarzania przyrostowego, do których należą: fotopolimeryzacja objętościowa (VPP – VAT Photopolymerization), wytłaczanie warstwowe materiału (MEX – Material Extrusion), selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF – Powder Bed Fusion), ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału (DED – Directed Energy Deposition), warstwowy nadruk płynnego materiału (MJT – Material Jetting Additive), spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (BJT – Binder Jetting), a także laminacja warstwowa przekrojów (SHL – Sheet Lamination). W rozdziale tym scharakteryzowano również materiały wykorzystywane w procesach wytwórczych opartych na technologiach przyrostowych.

W rozdziale drugim opisano obszary zastosowania technologii przyrostowych. Na podstawie licznych raportów dokonano przeglądu rozwoju branży technologii przyrostowych zarówno w skali krajowej, jak i światowej. Przedstawiono autorski podział wyrobów wytwarzanych przyrostowo z uwagi na ich przeznaczenie, a także zakres zastosowań metod przyrostowych z wyszczególnieniem określonych branż.

Tematyka rozdziału trzeciego dotyczy kontroli jakości w druku 3D. Zamieszczono wytyczne stosowane w kontroli jakości druku 3D, opisano przebieg kontroli jakości w procesach wytwarzania przyrostowego, dokonano przeglądu metod kontroli jakości, wymieniono także możliwe problemy pojawiające się podczas procesu wydruku wraz z przykładowymi działaniami naprawczymi.

Rozdział czwarty został poświęcony analizie wpływu zastosowania technologii przyrostowych na zarządzanie łańcuchem dostaw. Przedstawiono główne korzyści i zagrożenia związane z wdrożeniem druku 3D w przedsiębiorstwie. Opiszano usługi druku 3D ze szczególnym uwzględnieniem platform do automatycznej wyceny modeli 3D. Zidentyfikowano również problemy prawne i organizacyjne w związku ze współpracą przedsiębiorstwa z agencją przemysłową i podwykonawcami.

W procesach wytwarzania opartych na technologiach przyrostowych można zaobserwować stale zwiększające się zastosowanie nowoczesnych urządzeń oraz narzędzi informatycznych charakterystycznych dla koncepcji Przemysłu 4.0. Problematyce tej poświęcony został rozdział piąty.

W rozdziale szóstym przedstawiono realizację projektu na przykładzie modelu badawczego, jakim był uchwyt lusterka samochodowego. Modele zostały wykonane za pomocą następujących metod: PolyJet, FDM, DLP, FFF oraz MEM. W trakcie procesu wytwórczego szczególną uwagę zwrócono na: kontrolę poprawności zaprojektowanego modelu 3D-CAD, kontrolę przygotowanych danych procesowych, kontrolę wizualną wyrobów (zarówno w trakcie procesów, jak i po



ich zakończeniu), a także kontrolę dokładności wymiarowej i kształtowej gotowych modeli 3D.

Rozdział siódmy dotyczy badania logistycznej obsługi klienta w branży druku 3D. Na podstawie zapytania ofertowego wysłanego do 80 przedsiębiorstw i instytucji naukowo-badawczych określono: możliwe formy złożenia zamówienia, szybkość reakcji usługodawcy, średni czas realizacji zamówienia, cenę modelu w poszczególnych metodach, koszty realizacji przy zamówieniu większej liczby sztuk, a także minimalną wielkość zamówienia.

W rozdziale ósmym przedstawiono analizę statystyczną wyników ankiety dotyczącej poziomu wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0 dla technologii przyrostowych. Poproszono 100 respondentów o odpowiedzi na pytania z zakresu: projektowania i modelowania 3D-CAD, wytwarzania modeli/wyrobów metodami szybkiego prototypowania, obróbki wykończeniowej, kontroli jakości modeli/wyrobów, kierunków rozwoju działalności, a także szans i zagrożeń, jakie niesie ze sobą wdrożenie koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwie.

Prezentowane zagadnienia oraz wyniki badań analiz rynkowych to efekt kilkuletnich prac realizowanych przez autorów na Politechnice Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza. Monografia będzie pomocna dla studentów i absolwentów uczelni technicznych oraz firm i instytucji naukowo-badawczych związanych z branżą druku 3D. Autorzy mają nadzieję, że chociaż w pewnym stopniu wypełni ona lukę w polskiej literaturze przedmiotu związanej z logistycznymi i rynkowymi aspektami zastosowania technologii przyrostowych oraz pozytywnie wpłynie na działalność przedsiębiorstw produkcyjnych i usługowych, ukazując możliwe kierunki ich dalszego rozwoju.



# 1. TECHNOLOGIE PRZYROSTOWE WSPOMAGANE KOMPUTEROWO

## 1.1. Rozwój technologii wytwarzania przyrostowego

Historia wytwarzania przyrostowego jest bogata w wiele wydarzeń. Jej początek rozpoczyna się w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, kiedy wszczęto pierwsze prace koncepcyjne nad tą technologią. Pomimo tego, za datę narodzin wytwarzania przyrostowego powszechnie uznaje się rok 1984. W tym czasie Charles Hull dokonał opisu procesu wydruku przestrzennego i dwa lata później opatentował go pod nazwą stereolitografia (SLA). W 1986 roku założył również firmę 3D Systems, która istnieje po dzień dzisiejszy i zajmuje się rozwojem technologii i produkcją drukarek 3D. Charles Hull to także twórca formatu pliku STL, który jest powszechnie używany do przekształcania i przygotowania modeli 3D w przyrostowych procesach wytwórczych [87].

Koniec lat osiemdziesiątych stanowi kolejny przełom w historii wytwarzania przyrostowego. W tym czasie S. Scott Crump opatentował technologię o nazwie Fused Deposition Modelling (FDM), czyli osadzanie warstwowe uplastycznionego materiału termoplastycznego. Na początku lat dziewięćdziesiątych została opracowana technika Selective Laser Sintering (SLS). Cechuje się wysoką dokładnością wymiarową i kształtową, polegającą na tym, że kolejne bardzo cienkie warstwy sproszkowanego materiału są nakładane za pomocą zgarniacza i spiekane przy użyciu wiązki skupionej energii emitowanej z lasera [81].

Kolejny postęp w branży technologii przyrostowych nastąpił w roku 2006. Jest to czas powstania pierwszej drukarki desktopowej, stworzonej przez Adriana Bowyer'a. Twórca tego pomysłu udowodnił, że wybrane elementy nowych drukarek 3D można wytworzyć za pomocą innej drukarki 3D (projekt RepRap). W roku 2009 firma Makerbot wprowadziła do dystrybucji pierwszą w historii drukarkę 3D do samodzielnego montażu [105].

Od 2013 roku drukarki 3D trafiają do masowej dystrybucji, przez co stają się dostępne dla prywatnych użytkowników. Ich zakup jest możliwy nie tylko w sieciach handlowych, ale również na popularnych platformach handlowych [15].

W 2014 roku nastąpił rozwój druku 3D w branży kosmicznej. W tym czasie Agencja Kosmiczna NASA ogłosiła, że drukarka 3D wydrukowała pierwszy obiekt na pokładzie ISS [26]. Z kolei w 2015 r. powstała pierwsza drukarka do szkła. Naukowcom z MIT udało się stworzyć pierwszą maszynę zdolną do wytłaczania szkła warstwa po warstwie. Sposób działania tej drukarki 3D jest zbliżony do procesu MEX [159].

W roku 2017 powstały takie firmy, jak Apis Cor i WinSun, które w swojej ofercie przedstawiły wielkogabarytowe drukarki 3D do wykonywania konstrukcji budowlanych z betonu. Ich użycie pozwala na budowanie szkieletów domów znacznie szybciej i taniej niż metodami tradycyjnymi. Wiele projektów budowlanych i architektonicznych związanych z drukowaniem 3D zostało ukończonych w latach 2016-2018. Zalicza się do nich: mosty, domy, skalowalne modele budynków użyteczności publicznej, a nawet drapaczy chmur [167].

Rok 2019 okazał się równie istotny, druk 3D został wykorzystany do produkcji elementów pociągów z materiałów polimerowych. Wybrane elementy certyfikowano i wprowadzono do eksploatacji m.in. w Wielkiej Brytanii. W Stanach Zjednoczonych technologie przyrostowe zastosowano do produkcji części dla sił powietrznych USA i marynarki wojennej. Tego samego roku drukarki 3D zyskały również rozgłos w obszarze zrównoważonego rozwoju. Przykład może stanowić chociażby firma 6K, która ogłosiła, że z recyklingu wyprodukowała proszki metali do użycia w technologiach przyrostowych [1].

W latach 2018-2021 20% firm ze światowej listy Top 100 Gartnera wykorzystuje drukowanie 3D do tworzenia niestandardowych produktów [171]. W ciągu najbliższych lat elementy odzieży, np. buty, być może nie będą tylko szyte, ale i drukowane na miarę. Przykładem są wirtualne sklepy Adidasa i Nike, w których klienci mogą personalizować nabyte produkty. Inny producent obuwia, firma Brooks, poszedł o krok dalej, pozwalając klientom nie tylko projektować wygląd własnego modelu, ale także dopasować go do anatomii stopy kupującego [163, 166].

W Polsce technologie przyrostowe liczą już sobie przeszło dwie dekady. Pierwsze artykuły polskojęzyczne są datowane na rok 1996, a publikowało je Wydawnictwo PLASTECH. Przemysłowe zastosowanie maszyn do szybkiego prototypowania rozpoczęło się w firmie ZELMER w Rzeszowie w roku 1998, od urządzenia stereolitograficznego produkcji 3D Systems oraz komory próżniowej do odlewania niskociśnieniowego. Również pod koniec ostatniej dekady XX w. Instytut Odlewnictwa w Krakowie wdrożył do prac badawczych system LOM. W 2001 roku kilka ośrodków akademickich, w tym Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska i Politechnika Wroclawska, rozpoczęło realizację prac badawczych z zastosowaniem przyrostowych urządzeń stereolitograficznych produkcji 3D Systems.

Wzrost dynamiki w zakresie aplikacji technologii przyrostowych można odnotować pod koniec pierwszej dekady XXI w., kiedy fundusze unijne pozwoliły na zakup i wdrożenie systemów addytywnych zarówno w ośrodkach badawczych, jak i w przemyśle. W połowie drugiej dekady XXI w. nastąpił bardzo dynamiczny rozwój rynku druku 3D, m.in. z powodu wygaśnięcia ochrony patentowej głównych rozwiązań w zakresie technik przyrostowych. Dzięki temu powstało wiele firm różnej wielkości oferujących drukarki 3D. Na rynku pojawiło się wiele tanich rozwiązań typu open-source, dzięki czemu cena domowych czy biurowych dru-

karek 3D spadła do poziomu średniej klasy komputerów klasy PC. Można zaryzykować stwierdzenie, że była to rewolucja przemysłowa przenosząca złożone systemy wytwarzania w ręce prywatnych użytkowników, hobbystów, artystów, począwszy od wieku szkolnego i w zasadzie bez ograniczeń wiekowych. Wykonanie prototypu o złożonej geometrii z materiału polimerowego nie wymagało już stosowania drogich przemysłowych systemów wytwarzania. W tym okresie nastąpił dynamiczny rozwój rozwiązań przemysłowych, szczególnie w zakresie technologii przyrostowego spajania proszków metali. Istotne było również wdrożenie systemów zautomatyzowanych i sieciowych, pozwalających na włączenie drukarek 3D do struktury Przemysłu 4.0. Pojawili się polscy producenci maszyn pracujących w systemie przyrostowym, którzy mają potencjał do konkurencji ze światowymi liderami branży.

Początek trzeciej dekady XXI w. naznaczony został przez pandemię wirusa COVID-19. Należy stwierdzić, że maszyny do wytwarzania przyrostowego spełniły ważne zadanie, szczególnie w pierwszych miesiącach pandemii, kiedy użytkownicy drukarek 3D z różnych środowisk włączyli się m.in. w produkcję środków ochrony osobistej przeciw zarażeniu się wirusem, takich jak przyłbice ochronne lub elementy doraźnych zabezpieczeń dla służb medycznych czy ratowniczych [16].

Drukarki 3D w chwili obecnej odgrywają coraz większą rolę w naszym życiu. Edukacja w obszarze druku 3D rozpoczyna się już w wieku szkolnym. Dla przykładu w mieście Rzeszowie, w ramach działań samorządu i URBAN LAB Rzeszów powstało Centrum Minecraft i druku 3D, które prowadzi kształcenie dzieci już od szkoły podstawowej. Wspólne działania pracowników naukowych Politechniki Rzeszowskiej, szczególnie Katedry Konstrukcji Maszyn, przedstawicieli przemysłu z Podkarpacia oraz miejskich władz samorządowych doprowadziły do integracji wielu środowisk w zakresie rozwoju nowoczesnych technologii i druku 3D. Liczne przedsiębiorstwa i instytucje działają wspólnie w ramach Krajowego Klastra INDUSTRY 4.0, mającego siedzibę na Politechnice Rzeszowskiej [162].

Warto zaznaczyć, że technologie przyrostowe są ważnym elementem struktury Przemysłu 4.0, integrującej nie tylko produkcyjne rozwiązania technologiczne, ale również systemy informatyczne w procesie rozwoju Smart Manufacturing i Smart City. Coraz więcej elementów procesu wytwarzania korzysta ze środowiska sieciowego, wykorzystując także rozwiązania z obszaru rzeczywistości wirtualnej i rozszerzonej [84].

## 1.2. Istota wytwarzania przyrostowego

Wytwarzanie przyrostowe polega na tworzeniu fizycznego kształtu detalu na podstawie wirtualnej geometrii 3D opracowanej programowo. Proces ten składa się z różnych etapów, które są realizowane w środowiskach programowych, na

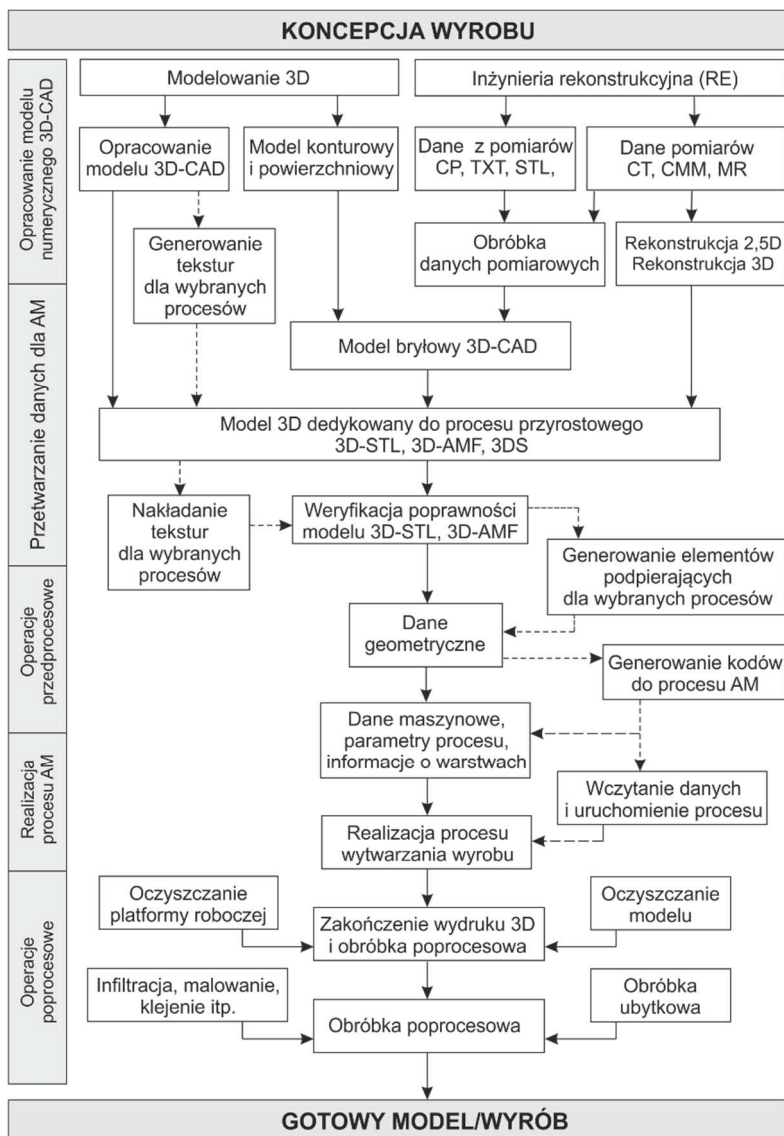
maszynach przyrostowych oraz po zakończeniu wytwarzania przyrostowego. Rysunek 1.1 jest schematem powstawania wyrobu z podziałem na poszczególne etapy wynikające ze specyfiki przygotowania danych dla technologii addytywnych. Obróbka numeryczna danych stanowi kluczowy etap w procesie druku 3D i w dużej mierze zależy od niej wykonanie poprawnego geometrycznie wyrobu. Sam proces przyrostowy budowy modelu właściwie nie wymaga ingerencji operatora, a wszystkie parametry technologiczne są ustawiane na etapie przygotowania danych numerycznych [170].

Wytwarzanie każdego wyrobu/prototypu zaczyna się w momencie powstania jego koncepcji, która może być wynikiem zapotrzebowania rynkowego lub wizją inżyniera konstruktora czy artysty [128]. W przypadku technologii przyrostowych koncepcja musi zostać przygotowana jako trójwymiarowy obiekt numeryczny z zastosowaniem oprogramowania 3D-CAD lub w wyniku digitalizacji opartej np. na skanowaniu 3D. Następnie należy przygotować geometrię w postaci numerycznej, możliwej do odczytania przez oprogramowanie sterujące urządzeniem przyrostowym. Jednym z najczęściej stosowanych opisów geometrii jest model przedstawiający powierzchnię bryły w postaci siatki trójkątów w formacie STL, który jest najczęściej stosowany w procesie druku 3D. Przy zastosowaniu oprogramowania 3D-CAD model STL jest uzyskiwany jako przekształcenie modelu bryłowego opracowanego w procesie modelowania CAD, natomiast w przypadku inżynierii rekonstrukcyjnej model numeryczny powstaje w wyniku przekształceń programowych danych pomiarowych, np. do postaci siatki trójkątów. Przekształcenia te są zależne od metody pomiarowej stosowanej do digitalizacji obiektów 3D [105].

Kolejny etap polega na weryfikacji i przeniesieniu plików do oprogramowania dedykowanego dla danej maszyny pracującej w technologii przyrostowej. Oprogramowanie to pozwala m.in. na: przygotowanie parametrów procesu wytwórczego odpowiedniego dla danej metody, ustawienie modelu w przestrzeni roboczej maszyny oraz oszacowanie czasu wydruku modelu 3D. Oprogramowanie dzieli geometrię modelu na warstwy, po czym – w zależności od metody – mogą być generowane konstrukcje podpierające i mocujące prototyp do platformy roboczej. Przygotowanie procesu obejmuje również generowanie ruchów nakładania materiału, lepiszcza lub ścieżek wiązki lasera. Czynności te, włącznie z przygotowaniem samego urządzenia, można zaliczyć do operacji przedprocesowych, nazywanych również w nomenklaturze druku 3D preprocessingiem [11].

Następny etap obejmuje czynności maszynowe związane wyłącznie z wytwarzaniem przyrostowym wyrobu. Czynności te w zasadzie przebiegają w środowisku maszynowym bez ingerencji operatora. Wyjątek mogą stanowić anomalie procesowe czy awarie sprzętowe. Drukarki 3D mogą być wyposażone w wewnętrzny komputer sterujący, który pozwala na bieżące monitorowanie procesu i odczyt informacji na temat jego przebiegu, np. numeru obecnie wykonywanej warstwy, liczby warstw do wykonania, rodzaju materiału oraz wagi modelu [105].

Monitorowanie procesu druku 3D może być realizowane również w sposób zdalny, z zastosowaniem odpowiednich aplikacji programowych [18].



Rys. 1.1. Schemat obróbki danych procesu przyrostowego

Po zakończeniu przyrostowego procesu budowy modelu należy przystąpić do operacji poprocesowych, nazywanych również w nomenklaturze druku 3D postprocessingiem. Etap ten w zależności od technologii przyrostowej może się

składać z różnych czynności. Ogólnie w ramach tego etapu należy wyjąć wyrób z przetrzeni roboczej drukarki 3D oraz oczyścić z konstrukcji mocujących i podpierających, czy również z niezwiązanego w procesie przyrostowym materiału. W zależności od założeń konstrukcyjnych i dokładności wymiarowej operacje poprocesowe mogą również obejmować elementy obróbki wykończeniowej.

Wytwarzanie przyrostowe jest często nazywane drukiem 3D. Fakt ten wynika z podobieństwa procesów i pracy niektórych maszyn w metodach przyrostowych do drukarek 2D i drukarek 2,5D. Przykład może stanowić chociażby metoda drukowania 3D Jetting System (JS), np. technologią PolyJet, w której nakładanie płynnej żywicy w płaszczyźnie roboczej jest realizowane przez głowice piezoelektryczne, o zasadzie działania takiej samej jak w drukarkach 2D. Stosowanie terminu „wytwarzanie przyrostowe” wymiennie z terminem „drukowanie 3D” stanowi zatem pewne uproszczenie. Termin ten jednak na trwałe już zagościł w wielu publikacjach o charakterze naukowym i przemysłowym, dlatego pomimo pewnych różnic, w niniejszej pracy określenia te są traktowane jako tożsame.

### 1.3. Klasyfikacja metod przyrostowych

#### 1.3.1. Wprowadzenie do procesów przyrostowych

Przyrostowe metody budowy obiektów są wzorowane na naturalnych procesach zachodzących w przyrodzie, mających swoją wielowiekową historię, szczególnie o odniesieniu do szeroko rozumianego budownictwa. Technologie stosowane do realizacji obiektów kubaturowych w większości opierały się i opierają na dokładaniu materiałów, niezależnie od tego, czy są to bloki kamienne, cegły, pustaki, drewno, beton itp. Przez wiele wieków to właśnie budownictwo było głównym obszarem stosowania analogowych technologii przyrostowych. W dziedzinie szeroko rozumianego przemysłu maszynowego za technologie przyrostowe można uznać odlewanie, w którym następuje przyrost płynnego materiału w objętości formy odlewniczej oraz spawanie i napawanie, w których następuje nakładanie uplastycznionego (lub płynnego) materiału jako spoiny czy wypełnienia. Przez wiele lat technologie te należały do grupy metod analogowych. Szczególnie odlewanie charakteryzuje się wielowiekową tradycją.

Postęp w zakresie metod numerycznych w drugiej połowie XX w. spowodował, że w latach osiemdziesiątych rozpoczęto prace nad sterowanymi komputerowo metodami wytwarzania fizycznych obiektów trójwymiarowych, budowanych na podstawie ich modelu numerycznego opracowanego z zastosowaniem systemów 3D-CAD.



Obecnie w zakresie wytwarzania przyrostowego wiele procesów i założeń zostało poddanych normalizacji. Jedną z podstawowych norm dla technologii AM jest ISO/ASTM DIS 52900: Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia, odnosząca się do głównych określeń i terminologii. Przedmiotowa norma wyszczególnia siedem podstawowych procesów wytwarzania przyrostowego, do których należą [150]:

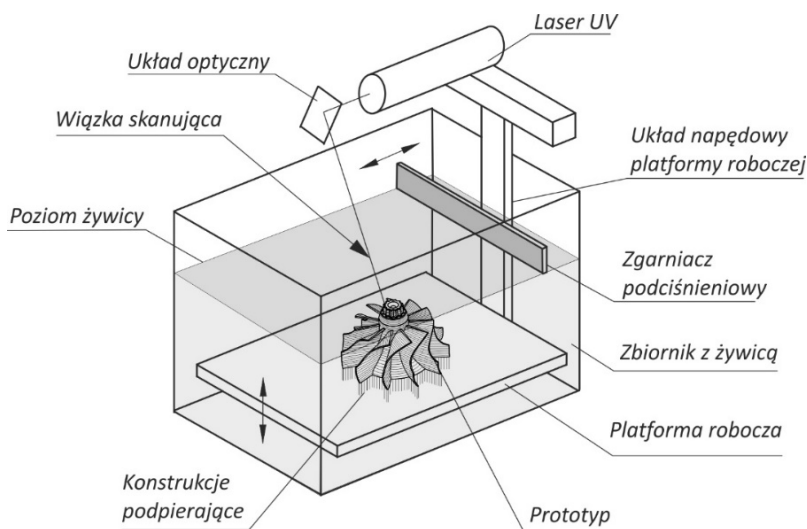
- fotopolimeryzacja objętościowa (VPP – VAT Photopolymerization), proces polegający na warstwowej fotopolimeryzacji realizowanej w określonej objętości z zastosowaniem skoncentrowanej wiązki światła ultrafioletowego,
- wytłaczanie warstwowe materiału (MEX – Material Extrusion), proces polegający na wytłaczaniu (ekstruzji) materiału termoplastycznego do postaci włókna (nitki), układanego warstwowo zgodnie z zadaną numerycznie ścieżką,
- selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF – Powder Bed Fusion), proces, w którym energia cieplna selektywnie stapia warstwy w obrębie objętości złoża proszkowego,
- ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału (DED – Directed Energy Deposition), proces, w którym skupiona energia stapia warstwowo materiał w trakcie jego osadzania (skoncentrowana energia cieplna emitowana jako wiązka lasera, wiązka elektronów lub łuk plazmowy),
- warstwowy nadruk płynnego materiału (MJT – Material Jetting Additive), proces, w którym płynny materiał jest nadrukowywany na podstawie kolejnych przekrojów modelu, zmiana stanu skupienia z płynnego na stały następuje najczęściej w wyniku zastygnięcia lub fotopolimeryzacji,
- spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (BJT – Binder Jetting), proces, w którym następuje spajanie sproszkowanego materiału poprzez nadruk płynnego spoiwa (kleju) z głowicy drukującej na podstawie przekroju warstwowego modelu,
- laminacja warstwowa przekrojów (SHL – Sheet Lamination), proces, w którym następuje wycinanie kolejnych przekrojów modelu z przyklejonych do siebie kolejno arkuszy materiału.

Wymienione metody stanowią podstawowy podział dla przyrostowych technik wytwarzania. Należy jednak pamiętać, że istnieje wiele wariantów dla wymienionych technologii w zależności od stosowanych materiałów, procesów i rozwiązań konstrukcyjnych maszyn addytywnych [145].

### 1.3.2. Fotopolimeryzacja objętościowa

Fotopolimeryzacja objętościowa to jeden z pierwszych procesów stosowanych do wytwarzania przyrostowego. Opiera się na metodzie stereolitografii (w skrócie oznaczanej jako SL oraz jako SLA). Technologia ta jako pierwsza

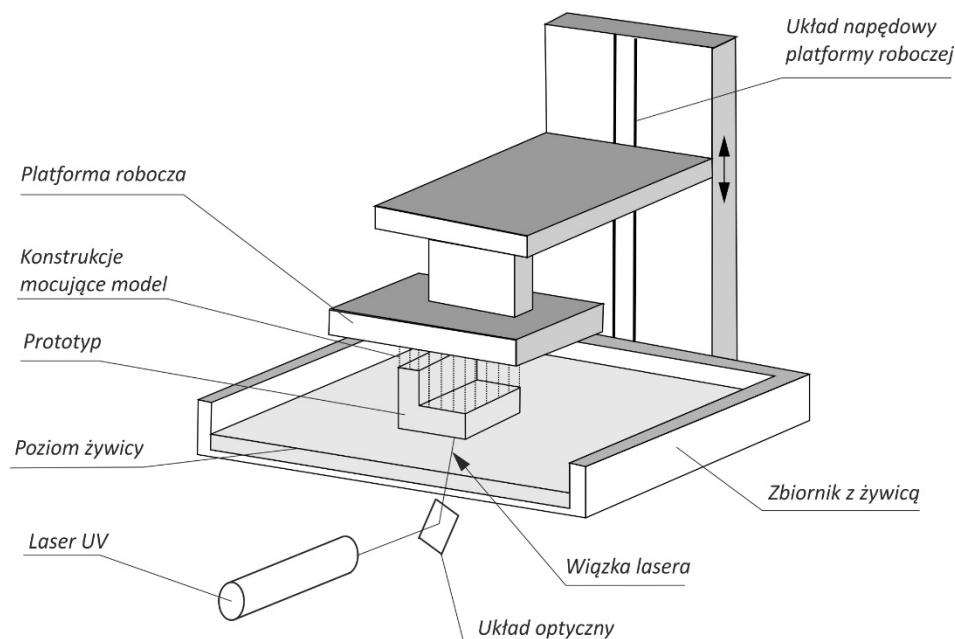
przeszła z etapu badawczego do etapu produktu komercyjnego. Stereolitografia została opatentowana w USA w 1986 r. przez firmę 3D Systems, której założycielem był Charles Hull. Proces stereolitografii wykorzystuje dodatki (fotoinicjatory) do płynnych żywic [166]. W trakcie naświetlenia żywicy wiązką lasera UV rozpoczyna się proces fotopolimeryzacji (utwardzania). Naświetlanie realizowane jest warstwa po warstwie, w każdym przekroju wynikającym z programowego podziału modelu trójwymiarowego na warstwy o określonej grubości, wzdłuż ścieżki skanowania. Parametry wiązki są tak dobrane, aby w danej warstwie nastąpiły jednocześnie fotopolimeryzacja oraz trwałe związanie warstwy skanowanej z poprzednią warstwą. Proces budowy modelu fizycznego rozpoczyna się od budowania konstrukcji podpierających, których zadaniem jest przymocowanie modelu do platformy roboczej oraz zabezpieczenie modelu przed odkształceniem podczas procesu przyrostowego. Schemat metody stereolitografii przedstawia rys. 1.2. Skanowanie wiązką lasera odbywa się na poziomie płynnej żywicy. W trakcie procesu model obniża się wraz z platformą roboczą i zanurza w zbiorniku z płynną żywicą. Po zakończeniu procesu platforma wysuwa się do góry na zewnątrz zbiornika. Przed rozpoczęciem kolejnego procesu należy uzupełnić żywicę o objętość zużyta do wykonania modelu i wypoziomować do poziomu startowego (zerowego).



Rys. 1.2. Schemat metody stereolitografii

Fotopolimeryzacja objętościowa może być również realizowana w tzw. konfiguracji odwrotnej, gdzie platforma robocza (a właściwie wieszak) pełni rolę układu mocującego i wyciągającego model ze zbiornika z płynną żywicą. W tym

przypadku objętość płynnej żywicy w zbiorniku jest jednak zdecydowanie mniejsza w porównaniu z tradycyjną stereolitografią i jest uzupełniana w sposób ciągły podczas procesu wytwarzania modelu. Zbiornik z żywicą ma przezroczyste dno, które pozwala na emisję światła ultrafioletowego jako ścieżki przejścia wiązki lasera lub emisji odwzorowania świetlnego UV przekroju danej warstwy z rzutnika światła [166]. Schemat tzw. odwróconej metody stereolitografii przedstawia rys. 1.3.



Rys. 1.3. Schemat tzw. odwróconej metody stereolitografii

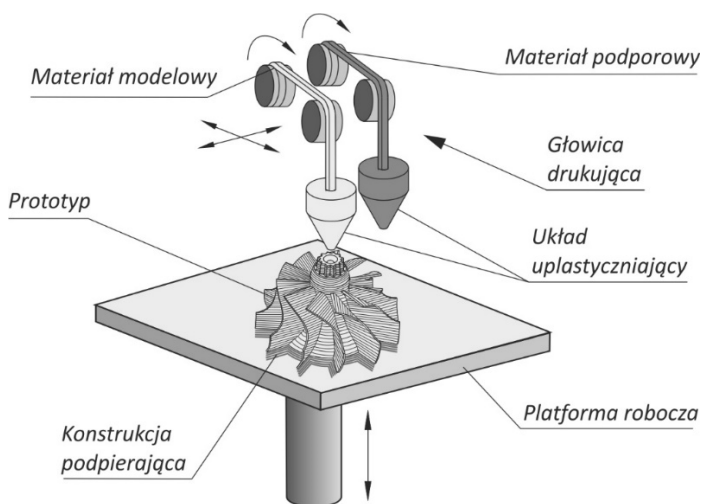
Proces fotopolimeryzacji objętościowej w układzie odwrotnym można również realizować z zastosowaniem emisji światła UV z rzutnika DLP. W takim przypadku fotopolimeryzacja nie zachodzi w układzie złożonym z lasera i układu optycznego skanującego warstwę utwardzaną, lecz w wyniku rzutu świetlnego przekrojów poszczególnych warstw modelu.

Metoda fotopolimeryzacji objętościowej pozwala na wytwarzanie wyrobów z żywicy charakteryzujących się różnymi właściwościami, dlatego znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach. Dzięki dużej precyzji metody możliwe jest wytwarzanie złożonych prototypów wizualnych, modeli koncepcyjnych, a także prototypów funkcjonalnych z materiałów o właściwościach przypominających polimery termoplastyczne. Można również wytwarzać modele odlewnicze dla technologii odlewania precyzyjnego z materiałów, które są relatywnie łatwo usuwalne z wnętrza

trza formy ceramicznej. Istnieje grupa materiałów stosownych w szeroko rozumianej inżynierii medycznej, np. na szablony operacyjne. Większość materiałów może być wykorzystywana do budowy modeli wzorcowych dla form silikonowych, ponieważ nie wchodzi w reakcję z silikonami formierskimi [11].

### 1.3.3. Wytłaczanie warstwowe materiału

Wytłaczanie warstwowe polega na wytwarzaniu modelu warstwami, z przetłaczaniem materiału termoplastycznego przez dyszę, która jest nagrzewana w celu uplastycznienia podawanego materiału. Dysza ma również mechanizm regulujący i odcinający. Jest umieszczona w głowicy, posiadającej możliwość przemieszczeń poziomych i pionowych. Celem jest ułożenie warstwy materiału w przestrzeni roboczej, zgodnie z zadaną geometrią warstwy, która stygnie natychmiast po wytłoczeniu z dyszy, wiążąc się z warstwą ułożoną wcześniej (rys. 1.4). Proces kontroli temperatury ma na celu zapewnienie wymaganej ilości ciepła do przetworzenia materiału. Model w trakcie procesu jest mocowany i stabilizowany przez konstrukcję podpierającą. Konstrukcja ta jest tworzona w trakcie budowy modelu z materiału modelowego lub materiału podporowego, w zależności od zastosowanej technologii [171]. Po zakończeniu procesu model oraz platformę roboczą należy oczyścić z konstrukcji podpierających w procesie obróbki mechanicznej lub chemicznej. Metoda wytłaczania warstwowego polimeru termoplastycznego jako metoda FDM została opatentowana w 1992 r. przez firmę Stratasys, a po wygaśnięciu ochrony patentowej proces został zastosowany w wielu technologiach wytwarzania przyrostowego, do których należą m.in.: FDM – Fused Deposition Modeling, FFF – Fused Filament Fabrication, MEM – Melted Extruded Modeling.



Rys. 1.4. Schemat metody wytłaczania warstwowego materiału

Metoda ta pozwala na przetwarzanie wielu rodzajów materiałów polimerowych i ich kompozytów w skali domowej i przemysłowej. Do takich materiałów zalicza się m.in. ABS i PC, które są stosowane zarówno do budowy modeli, jak i funkcjonalnych części maszyn czy wyrobów medycznych. Liczba materiałów używanych w metodzie MEX systematycznie się powiększa, również o wysoko-wytrzymałe kompozyty stosowane na wyroby poddawane znacznym obciążeniom mechanicznym i termicznym. Przykładem mogą tu być materiały ULTEM czy PEEK, pozwalające na wytwarzanie elementów pracujących w temperaturze dochodzącej do 260°C. Przetwarzanie tego typu materiałów wymaga jednak stosowania odpowiednich głowic przetłaczających oraz systemów precyzyjnej stabilizacji temperatury wewnątrz komory roboczej.

Zaletą metody wytłaczania warstwowego materiału termoplastycznego jest jej uniwersalność, pozwalająca na budowanie urządzeń typu desktop o relatywnie niskich kosztach zakupu i użytkowania oraz urządzeń przemysłowych przeznaczonych do produkcji wyrobów gotowych, w tym wyrobów o gabarytach przekraczających długość 1,5 m [163].

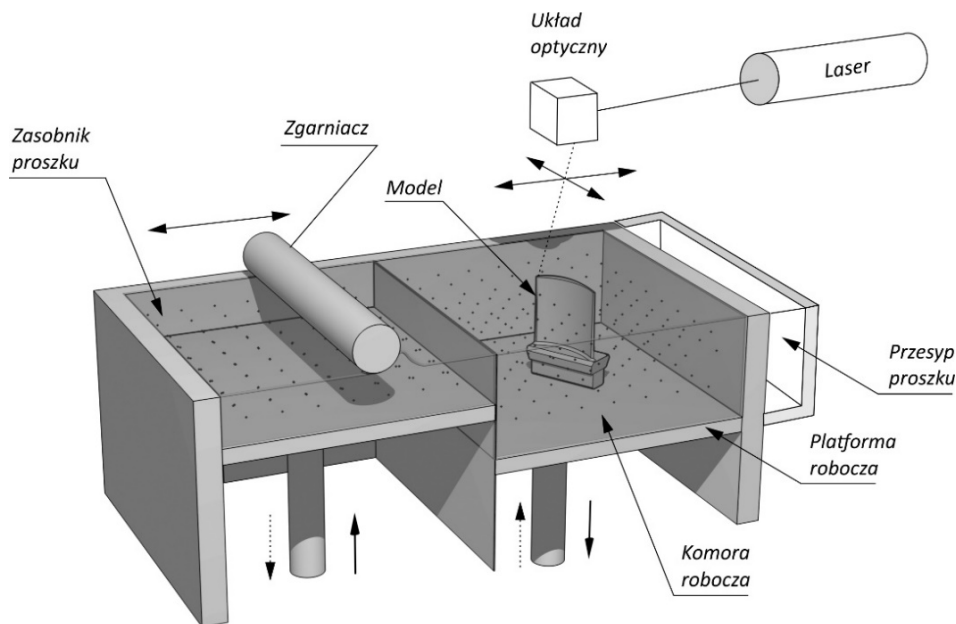
#### 1.3.4. Selekttywne spajanie sproszkowanego materiału

Selektywne spajanie sproszkowanego materiału polega na dostarczaniu skupionej energii do stapiania kolejnych warstw proszku według zadanych programowo przekrojów modelu w obrębie objętości złoza proszkowego (przestrzeni roboczej drukarki 3D). W metodzie tej wykorzystuje się sproszkowany materiał, rozprowadzany warstwami na platformie roboczej za pomocą zgarniacza. Promień lasera powoduje spieknięcie warstwy zgodnie z określonym konturem i wypełnieniem przekroju modelu. Po utwardzeniu następuje obniżenie platformy roboczej o grubość warstwy i ponowne rozprowadzenie proszku. Przy utwardzaniu kolejnej warstwy nadtapiana jest warstwa poprzednia, dzięki czemu powstaje jednolita bryła modelu (rys. 1.5). Po wykonaniu całego modelu następuje wysunięcie platformy roboczej i usunięcie proszku, który nie został poddany spiekaniu.

W przypadku spajania sproszkowanych materiałów polimerowych tworzony model jest podpierany przez proszek wypełniający przestrzeń roboczą, dlatego nie są wymagane oddzielne struktury podpierające. Przy spajaniu proszków metali wymagana jest konstrukcja podpierająca i mocująca model do platformy roboczej. Konstrukcja podpierająca jest po zakończeniu procesu odcinana od platformy roboczej wraz z modelami, które należy również oczyścić z materiału podporowego z zastosowaniem obróbki mechanicznej [169].

Metoda selektywnego spajania proszków została opatentowana w 1989 r. przez University of Texas (USA), a w chwili obecnej odnosi się do różnych materiałów, do których należą m.in. materiały polimerowe, materiały ceramiczne (proces SLS – Selective Laser Sintering), stopy metali (proces SLS, SLM – Selective Laser Melting, PBF – Powder Bed Fusion, DMLS – Direct Metal Laser Sin-

tering). Metoda ta pozwala na wytwarzanie modeli, prototypów, biżuterii, narzędzi technologicznych i funkcjonalnych części maszyn, co powoduje, że stanowi niezwykle uniwersalną technologię stosowaną w wielu gałęziach przemysłu.



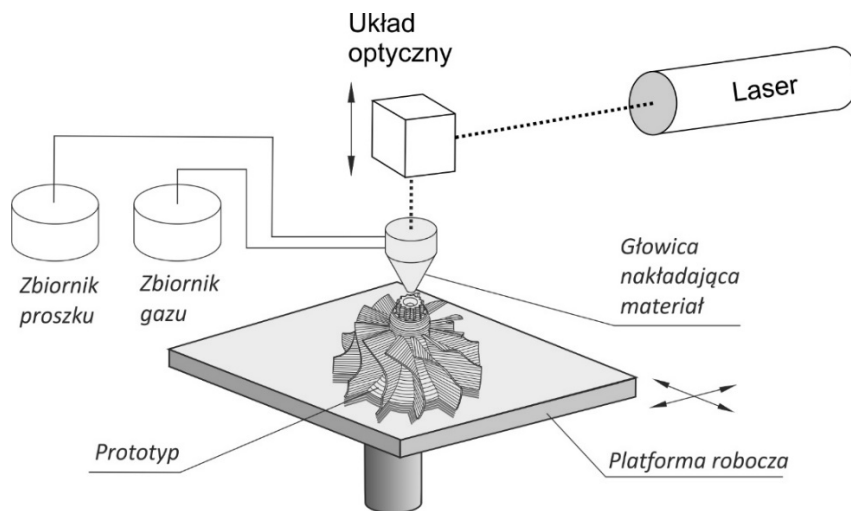
Rys. 1.5. Schemat metody selektywnego spajania proszków

Materiałem polimerowym, który jest najczęściej przetwarzany metodą selektywnego spajania sproszkowanego materiału, jest poliamid w różnych odmianach, m.in. z domieszkami mączki szklanej, włókna węglowego, aluminium czy substancji uniepalniających, pozwalających na zwiększenie odporności wyrobów na płomień. Produkowane są również maszyny przyrostowe typu desktop, pozwalające na przetwarzanie poliamidu oraz elastomeru charakteryzującego się wysoką elastycznością.

### 1.3.5. Ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału

Ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału polega na stapianiu warstwowym materiału w trakcie jego osadzania z zastosowaniem skupionej energii – skoncentrowanej energii cieplnej emitowanej jako wiązki lasera, wiązki elektronów lub łuku plazmowego. Wiązka laserowa wytworzona przez laser jest ogniskowana przez układ optyczny na wytwarzanym elemencie. Proszek metalowy jest dostarczany do specjalnej głowicy. Na jej wyjściu w wyniku oddziaływania energii skupionej wiązki lasera następuje przetopienie proszku oraz nadtopienie

powierzchni wyrobu. W ten sposób tworzy się powierzchnia (nowa warstwa materiału). Podczas procesu dostarczany jest gaz osłonowy, w celu ochrony nakładanego materiału przed zanieczyszczeniem podczas procesu spajania. Schemat ukierunkowanego stapiania dostarczanego sproszkowanego materiału przedstawia rys. 1.6.



Rys. 1.6. Schemat metody ukierunkowanego stapiania dostarczanego materiału

Opisana metoda należy do grupy technologii przyrostowych, pozwala na wytwarzanie wyrobów w całości lub nakładanie i uzupełnianie materiału na istniejących już częściach. Istnieje tutaj znaczne podobieństwo procesowe do metody napawania, stosowanej od wielu lat jako metoda naprawy części maszyn pochodząca z technologii spawalniczych. W procesie ukierunkowanego stapiania dostarczanego materiału (DED – Directed Energy Deposition) skupiona energia stapia warstwowo materiał w trakcie jego osadzania i jest emitowana jako wiązka lasera, wiązka elektronów lub łuk plazmowy [165].

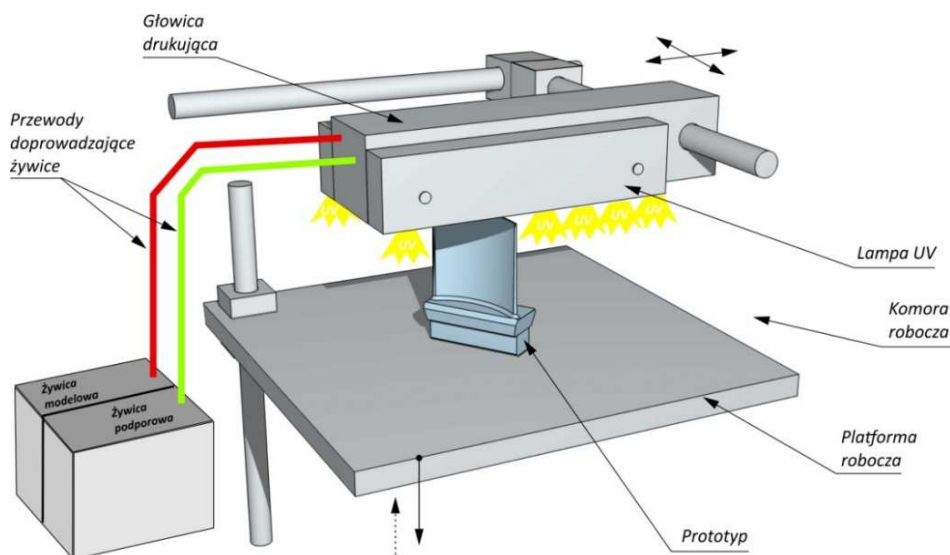
Jako materiał w metodzie ukierunkowanego stapiania stosowane są różne stopy metali w postaci proszku, dzięki czemu możliwe jest wytwarzanie wyrobów o dużej wytrzymałości. Biorąc jednak pod uwagę samą dokładność procesu, w przypadku dokładnych elementów przeznaczonych do montażu należy stosować obróbkę wykończeniową.

### 1.3.6. Warstwowy nadruk płynnego materiału

Warstwowy nadruk płynnego materiału polega na nadrukowywaniu płynnego materiału na podstawie kolejnych przekrojów modelu. Zmiana stanu skupie-

nia z płynnego na stały następuje najczęściej w wyniku zastygnięcia lub fotopolimeryzacji. W przypadku zastosowania żywicy płynny materiał jest dostarczany za pomocą przewodów ze zbiorników do głowicy drukującej, za pomocą której jest on nakładany warstwowo w płaszczyźnie roboczej.

Fotopolimeryzacja zachodzi w wyniku naświetlania nadrukowanej warstwy za pomocą światła UV emitowanego przez lampy zintegrowane z głowicą. Schemat warstwowego nadruku płynnego materiału przedstawia rys. 1.7. Model jest mocowany do platformy roboczej z zastosowaniem konstrukcji mocująco-podpierającej, która jest nakładana z głowicy drukującej przeznaczonej do przetwarzania materiału podporowego. Konstrukcja podpierająca otacza całą powierzchnię modelu, stabilizując go podczas procesu przyrostowego. Po zakończeniu procesu wydruku 3D konstrukcję podporową usuwa się, używając kąpieli w roztworach wodnych lub wodnej myjki ciśnieniowej, w zależności od zastosowanych materiałów [171].



Rys. 1.7. Schemat metody warstwowego nadruku płynnego materiału

Metoda warstwowego nadruku płynnego materiału umożliwia przetwarzanie wielu materiałów o różnych właściwościach. Możliwe jest również wytwarzanie kolorowych wydruków 3D przez mieszanie materiałów o różnych kolorach albo wytwarzanie modeli 3D z użyciem podczas jednego procesu materiałów o różnych właściwościach fizycznych.

Niektóre drukarki 3D pozwalają również na korzystanie z materiałów termoplastycznych, np. wosku, gdzie jest on roztopiany do płynnej postaci i dostarczany do głowicy drukującej, a następnie nakładany warstwowo w płaszczyźnie robo-



czej. W przypadku przetwarzania wosku model jest również mocowany z zastosowaniem konstrukcji podpierającej, którą należy usunąć w procesie postprocessingu.

Technologie MJT pozwalają na wytwarzanie precyzyjnych modeli o złożonych kształtach. Z tego powodu można je stosować m.in. do wykonywania modeli odlewniczych, do wytwarzania form skorupowych w technologii odlewania precyzyjnego (najczęściej z użyciem wosku modelowego). Doskonale nadają się również do wykonywania modeli przeznaczonych do wytwarzania silikonowych form odlewniczych. Należy jednak sprawdzić reaktywność niektórych materiałów do druku 3D z silikonami formierskimi.

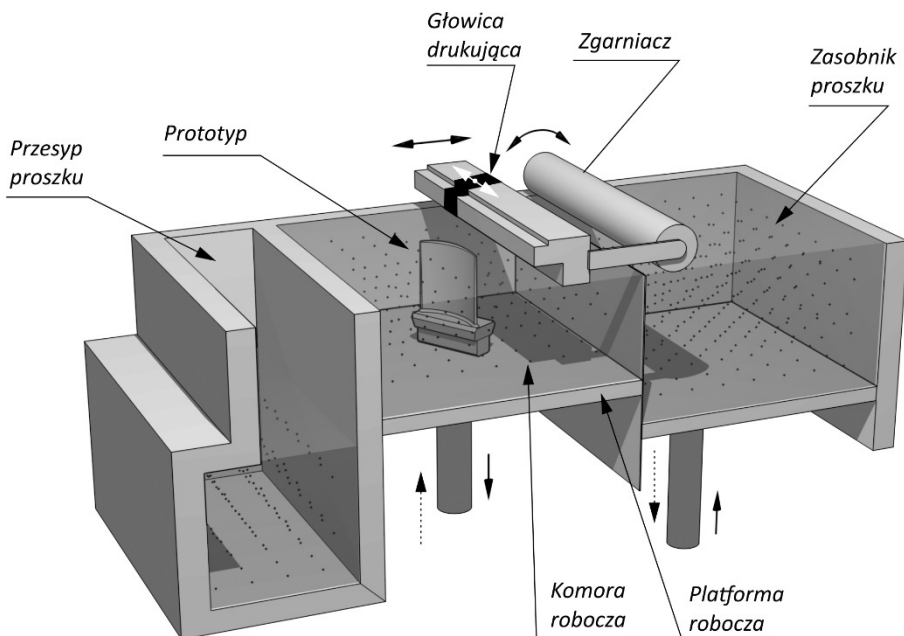
Znaczna część materiałów stosowanych w technologiach MJT charakteryzuje się niską odpornością termiczną, dlatego należy szczególnie zapoznać się z kartami materiałowymi w przypadku wytwarzania elementów maszyn, przy których eksploatacji mogą się pojawić ciągłe temperatury przekraczające 40 czy 50°C.

Technologia MJT pozwala również na stosowanie odpornych termicznie materiałów, co w powiązaniu z jej wysoką precyzją wytwarzania umożliwia wykonywanie w procesie Rapid Tooling narzędzi technologicznych typu formy odlewnicze do modeli woskowych czy formy wtryskowe do produkcji krótkich serii wyrobów z materiałów termoplastycznych.

### 1.3.7. Spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem

Spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem polega na nadruku płynnego spoiwa (kleju) z głowicy drukującej na podstawie obrazu przekroju warstwowego modelu, co powoduje spajanie sproszkowanego materiału. Ilość nakładanego spoiwa jest tak dobrana, aby skleić warstwę proszku oraz przykleić tę warstwę do warstwy poprzedniej. Dzięki temu po zakończeniu procesu otrzymywany jest trójwymiarowy model fizyczny. W procesie tym do spoiwa w zewnętrznym obrysie warstwy może być dodatkowo dodawany barwnik, dzięki któremu możliwe jest uzyskanie kolorowej tekstury na trójwymiarowym modelu fizycznym. Schemat metody spajania sproszkowanego materiału płynnym spoiwem przedstawiono na rys. 1.8.

Płynne spoiwo oraz barwniki są dostarczane do głowicy drukującej za pomocą przewodów połączonych ze zbiornikami. Nakładanie płynnego spoiwa oraz barwników opiera się na procesach druku stosowanych w drukarkach atramentowych, a niektóre drukarki 3D wykorzystują takie same głowice jak te stosowane w biurowych drukarkach atramentowych. Proszek do komory roboczej dostarczany jest za pomocą zgarniacza, który przesuwając warstwę proszku do klejenia z zasobnika. Nadmiar proszku zostaje przesypany przez zgarniacz do komory przesypowej. W procesie tym nie są wykonywane konstrukcje podpierające. Model jest budowany w zbiorniku z proszkiem, a rolę podparcia pełni niezwiązany proszek otaczający prototyp. Po zakończeniu procesu prototyp należy oczyścić z niezwiązanego proszku, np. za pomocą sprężonego powietrza [166].



Rys. 1.8. Schemat metody spajania sproszkowanego materiału płynnym spoiwem

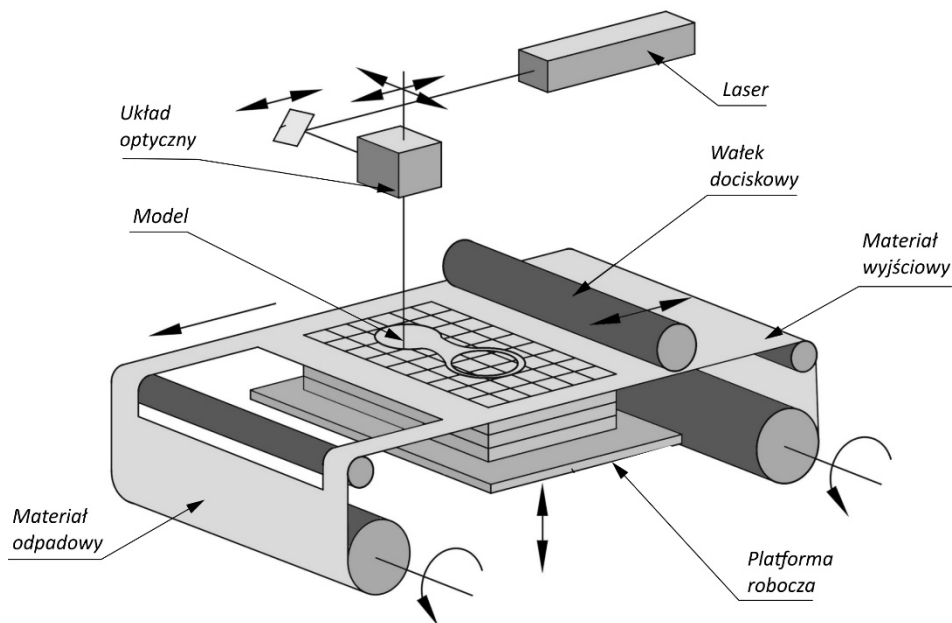
Opisana technologia pozwala na wytwarzanie modeli koncepcyjnych i modeli teksturowanych. W tym przypadku w celu wzmocnienia wytrzymałości modeli stosuje się ich infiltrację, np. żywicami epoksydowymi, jako element post-processingu. Należy zaznaczyć, że jest to jedna z niewielu metod druku 3D, która pozwala na nakładanie fotorealistycznych tekstur na obiekty trójwymiarowe w czasie jednego procesu przyrostowego. Wymaga to oczywiście wcześniejszego przygotowania tekstury na siatce obiektu 3D i jej programowego nałożenia przed rozpoczęciem procesu budowy modelu fizycznego.

Technologia ta pozwala na wytwarzanie form odlewniczych, które mogą być stosowane bezpośrednio do procesu odlewania, po wcześniejszym oczyszczeniu formy i jej gniazda z niezwiązanego proszku. Należy stosować odpowiednie proszki i spoiwa, mające odporność termiczną dostosowaną do temperatury płynnego stopu, z którego będzie wykonywany odlew.

### 1.3.8. Laminacja warstwowa przekrojów

Laminacja warstwowa przekrojów polega na wycinaniu kolejnych przekrojów modelu z przyklejonych do siebie kolejno arkuszy materiału. Materiał może być dostarczany w postaci rozwijanej z rolki, z której w przestrzeni roboczej jest wycinany arkusz oraz przekrój warstwy modelu. Przed wycięciem przekroju arkusz jest przyklejany do poprzedniego. Przekrój może być wycinany za pomocą

lasera lub noża w płaszczyźnie roboczej. Wykonywane są również nacięcia technologiczne, pozwalające po zakończeniu procesu wydobyć prototyp z prostopadłościenną bryłę. Nacięte części znajdujące się poza objętością samego modelu stanowią materiał odpadowy. W związku z tym należy dążyć do optymalnego wykorzystania objętości przestrzeni roboczej, tak aby powstawało jak najmniej odpadów technologicznych. Schemat metody laminacji warstwowej przekrojów przedstawia rys. 1.9.



Rys. 1.9. Schemat metody laminacji warstwowej przekrojów

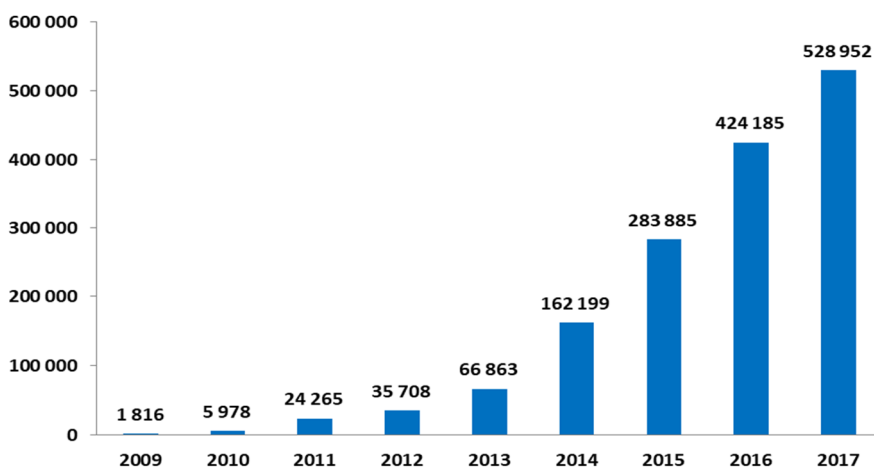
W przedmiotowym procesie można stosować różne materiały, m.in. papier, folie polimerowe czy folie metalowe. Niektóre metody pozwalają na wytwarzanie teksturowanych modeli. W takim przypadku przed procesem przyrostowym na arkusze papieru są nadrukowywane kolorowe obwiednie, stanowiące po warstwowym połączeniu kolorową teksturę odpowiadającą kolorystyce modelu numerycznego. W początkowej fazie istnienia tej technologii używano jej do wytwarzania papierowych modeli odlewniczych, które stosowano do wytwarzania form skorupowych w trakcie odlewania precyzyjnego. Obecnie metoda ta nie jest powszechnie wykorzystywana w warunkach przemysłowych [124].



## 2. OBSZARY ZASTOSOWANIA DRUKU 3D

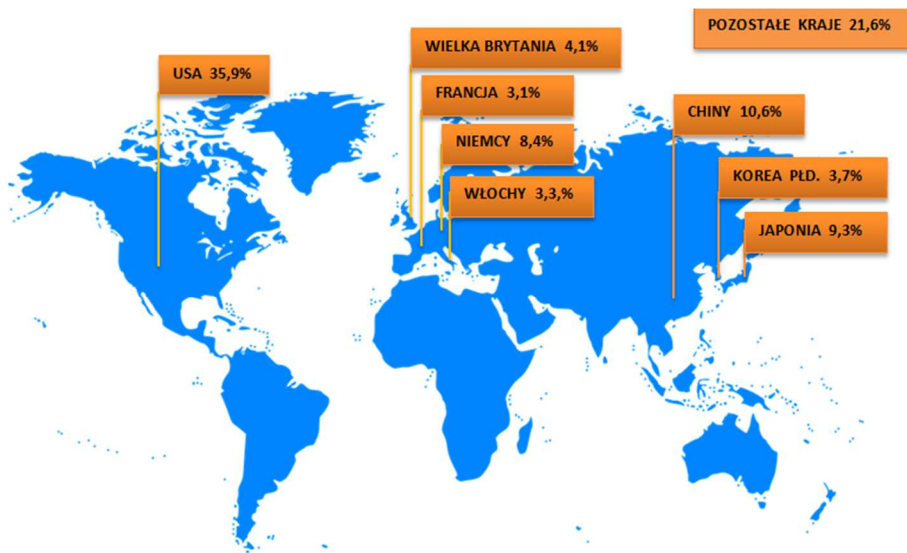
### 2.1. Rynek druku 3D

Analizując liczne raporty dotyczące technologii przyrostowych, można stwierdzić, że w ostatnich latach sprzedaż drukarek 3D na świecie rosła w szybkim tempie. Terry Wohlers w swoim Raporcie [125] wydanym w 2018 r. podaje, że w roku 2015 liczba sprzedanych maszyn na świecie wyniosła 283 885 sztuk, w roku 2016 – już 424 185 sztuk, a w 2017 – 528 952 sztuki (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Liczba sprzedanych drukarek 3D na świecie wg Raportu Wohlersa [125]

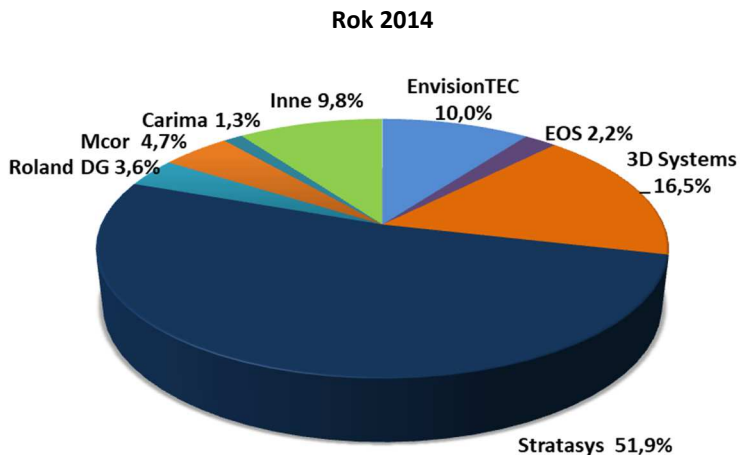
Na rysunku 2.2 przedstawiono udział procentowy przemysłowych systemów technologii wytwarzania przyrostowego instalowanych przez państwa od roku 1988 do końca 2017. Krajem o największej procentowej wartości zaimplementowanych systemów są Stany Zjednoczone (35,9%), co wynika z faktu, że w kraju tym występuje największa liczba producentów tego typu maszyn. Na kolejnych miejscach uplasowały się: Chiny (10,6%), Japonia (9,3%), Niemcy (8,4%), Wielka Brytania (4,1%), Korea (3,7%), Włochy (3,3%) oraz Francja (3,1%) [125].



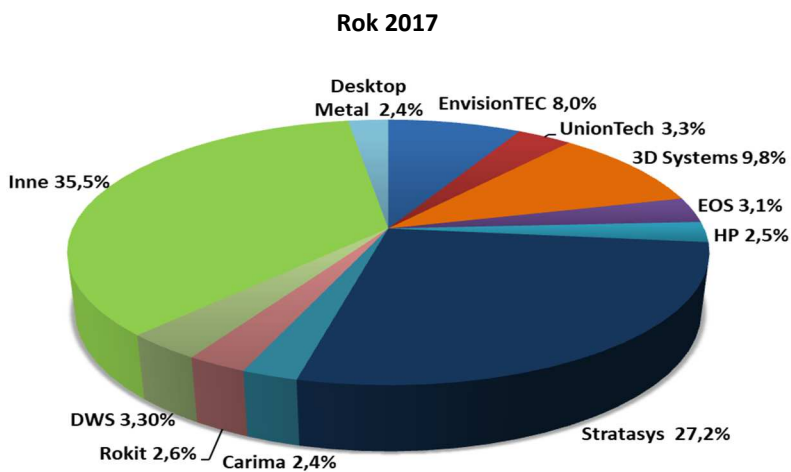
Rys. 2.2. Procentowy udział rządów do druku 3D dla wybranych krajów do roku 2017

Jak podaje Wohlers Report 2018, największy udział w rynku przemysłowych drukarek 3D w 2017 r. miały firmy Stratasys (27,2%), 3D Systems (9,8%) oraz EnvisionTEC (8,0%). Porównując Wohlers Report 2018 oraz Wohlers Report 2015 (rys. 2.3-2.4), można również zaobserwować, że rynek producentów drukarek 3D z roku na rok staje się coraz bardziej rozdrobniony, a liczba producentów tego typu maszyn jest coraz większa [124, 125].

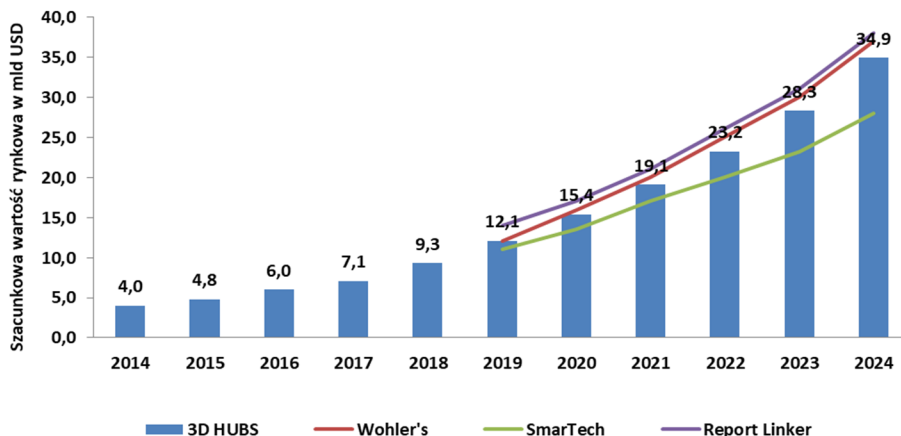
W raporcie firmy 3D HUBS w 2019 r. globalny rynek druku 3D oszacowano średnio na poziomie 12,1 mld USD, odnotowując 25% wzrost rok do roku od 2014 r. Analitycy spodziewają się, że przez kolejne pięć lat rynek będzie rosł średnio na poziomie 24% skumulowanego rocznego wskaźnika wzrostu, osiągając 35,0 mld USD do 2024 r. i podwajając się w przybliżeniu co trzy lata (rys. 2.5). Oczywiście wpływ na ten stan będą mieć zarówno zmienne czynniki zewnętrzne (tj. polityka państw, stan gospodarki, zachowania klientów), jak i wewnętrzne (np. stopień przystosowania do produkcji seryjnej, rozwój materiałów i systemów, czy też redukcja kosztów całkowitych) [1].



Rys. 2.3. Procentowy udział producentów przemysłowych drukarek 3D - rok 2014 [128]



Rys. 2.4. Procentowy udział producentów przemysłowych drukarek 3D - rok 2017 [128]



Rys. 2.5. Prognoza rozwoju rynku druku 3D w świetle badań firmy 3D HUBS [1]

Według raportu firmy 3D HUBS w 2019 r. startupy prowadzące działalność w zakresie druku 3D zebrały ponad 1,1 mld USD. Inwestycje w branżę technologiczną przyrostowych są scentralizowane głównie w Stanach Zjednoczonych, jednak wzrost przyznanych funduszy można zaobserwować również w Chinach i wybranych krajach europejskich. Ważne jest, że projekty finansowane są zarówno przez prywatnych inwestorów, jak i programy, np. Unii Europejskiej [1, 168].

Analizując polski rynek, również zauważa się silną dynamikę wzrostu. Rodzime startupy, m.in. producenci drukarek Zortrax, ZMorph, Omni3D, HBot 3D, Ubot3D, czy 3Novatica to marki, które zyskują coraz większą popularność nie tylko w Polsce, ale również w skali międzynarodowej [172]. Podobna sytuacja występuje w przypadku producentów tzw. filamentów, czyli materiałów wykorzystywanych do druku. Znanymi markami są chociażby Fiberlogy, PRI-MAT3D i AEMCA.

Wzrost sprzedaży maszyn i materiałów do druku 3D jest zauważalny na popularnych platformach handlowych. Przykładowo, w serwisie aukcyjnym Allegro powstała kategoria drukarki 3D i, jak podaje raport PRINTELIZE w 2013 r., liczba aukcji w poszczególnych segmentach przedstawiała się następująco [90]:

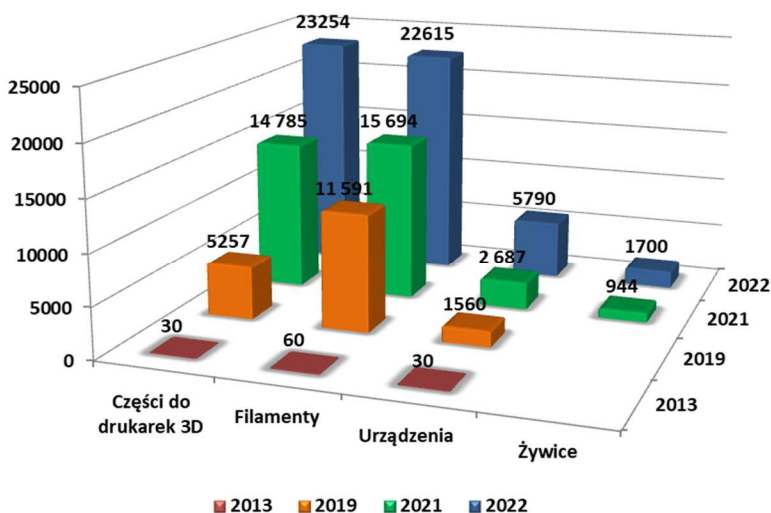
- części do drukarek 3D – 30 aukcji,
- filamenty – 60 aukcji,
- urządzenia – 30 aukcji.

Z kolei analizując aktualne dane, oferta z marca 2022 r. to [155]:

- części do drukarek 3D – 23 254 aukcji (wzrost x 775 w porównaniu z 2013 r.),
- filamenty – 22 615 aukcji (wzrost x 377 w porównaniu z 2013 r.),
- urządzenia – 5 790 aukcji (wzrost x 193 w porównaniu z 2013 r.),
- żywice – 944 aukcji (nowa kategoria od 2021 r.).



Analizę zaprezentowano graficznie na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Liczba aukcji w poszczególnych kategoriach na portalu allegro.pl

Warto zwrócić uwagę, że rzeczywiste wartości liczbowe sprzedanych drukarek w roku 2013 były relatywnie niskie, zatem osiągnięcie wysokich wzrostów było również stosunkowo proste. Analizując dane z lat 2019-2022, można jednak wnioskować, że rynek druku 3D staje się coraz bardziej dynamiczny. Fakt ten jest spowodowany m.in. zwiększoną popularnością drukarek desktopowych, które ze względu na swoją cenę przyciągają coraz szersze grono użytkowników.

## 2.2. Prototypy wytwarzane przyrostowo

Do niedawna druk 3D był wykorzystywany głównie jako technologia uzupełniająca w procesie wytwórczym (Rapid Modeling i Rapid Prototyping). Prototypy wytwarzane przyrostowo służyły do wizualizacji wyrobów, weryfikacji ich funkcjonalności, realizacji wstępnych badań, czy też w charakterze demonstratorów [7, 105]. Odchodzenie od produkcji masowej spowodowało jednak dynamiczny rozwój technologii przyrostowych. Metody szybkiego prototypowania przestały być stosowane jedynie na etapie projektowo-konstrukcyjnym. Obecnie służą również do wytwarzania pełnowartościowych wyrobów gotowych i narzędzi (Rapid Manufacturing i Rapid Tooling) [9, 24, 116].

Podział wyrobów wytwarzanych przyrostowo z uwagi na ich przeznaczenie może być następujący [18]:

**1. Modele wytwarzane w celach poglądowych**, do których zaliczono:

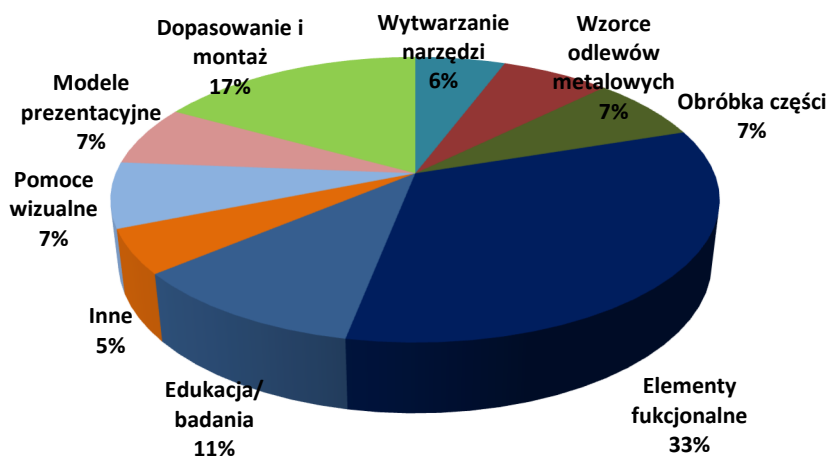
- **prototyp koncepcyjny** – przedstawiający w sposób uproszczony założenia konstrukcyjne i funkcjonalne wyrobu. Do jego wytworzenia można stosować dowolne techniki wytwarzania w celu zaprezentowania ogólnej koncepcji w sposób relatywnie szybki i tani. Podstawą do jego wykonania może być szkic wyrobu wykonany np. przez artystę plastyka,
- **prototyp numeryczny** – opracowany w środowisku programowym model lub zespół przeznaczony do wizualizacji, symulacji kinematycznych, symulacji obciążeń, przygotowania danych do produkcji oraz weryfikacji opartej na systemach wspomaganych komputerowo,
- **prototyp wizualny** – przedstawiający gabaryty rzeczywiste lub w założonej skali, cechy geometryczne oraz kolorystykę lub/i fakturę powierzchni wyrobu,
- **prototyp ergonomiczny** – określający warunki funkcjonowania wyrobu w rzeczywistym środowisku w odniesieniu do jego przyszłych użytkowników, z uwzględnieniem ergonomicznych założeń technicznych.

**2. Modele bezpośrednio związane z procesem produkcyjnym**, które dzielą się na:

- **prototyp technologiczny** – którego zadaniem jest opracowanie i weryfikacja założeń technologicznych dla procesu produkcyjnego wyrobu. Prototypy technologiczne mogą być opracowywane dla różnych etapów procesu technologicznego i dla tych etapów dedykowane,
- **prototyp konstrukcyjny** – przeznaczony do kompleksowej oceny rozwiązania konstrukcyjnego, z uwzględnieniem docelowej funkcjonalności oraz założeń procesu technologicznego. Charakteryzuje się wysokim stopniem uszczegółowienia,
- **prototyp funkcjonalny** – pozwala przeprowadzić ocenę zasadniczych funkcji wyrobu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, z uwzględnieniem procesów eksploatacyjnych w konfiguracji uproszczonej. Do jego wykonania można użyć materiałów o właściwościach zbliżonych do materiałów stosowanych w wyrobie finalnym,
- **prototyp techniczny** – charakteryzuje się wszelkimi cechami funkcjonalnymi i wizualnymi gotowego wyrobu, pozwalającymi na testowanie go w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Do jego wykonania stosuje się materiały, z których docelowo będzie wykonany jako gotowy wyrób. Pozwala na przygotowanie procesu technologicznego docelowego dla warunków produkcyjnych.

### 2.3. Zakres zastosowań metod przyrostowych

Według raportu międzynarodowej firmy konsultingowej Wohlers Associates w 2017 r. głównymi obszarami wykorzystania druku 3D były: produkcja elementów funkcjonalnych, dopasowanie i montaż oraz prace edukacyjne i badawcze [125]. Wyniki wraz z udziałem procentowym przedstawiono na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Zakres zastosowań metod przyrostowych z ich procentowym udziałem [125]

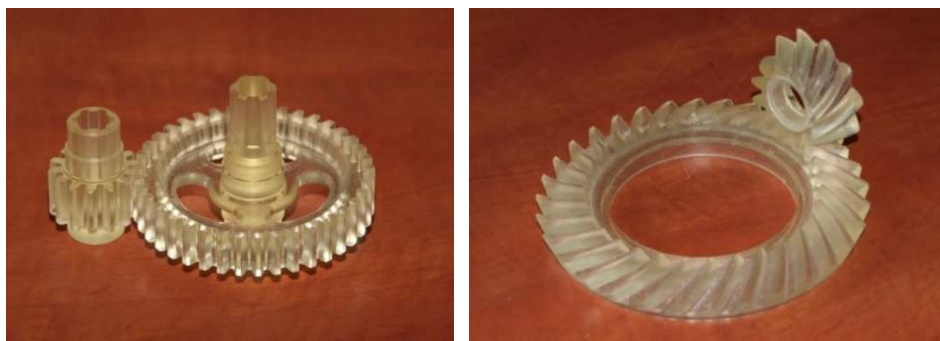
Analizując sektor małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP), można zaobserwować wzrost zainteresowania i świadomości korzyści płynących z zastosowania technologii przyrostowych. Przykładowo, według badania firmy Siemens 2020, liczba wdrożeń druku 3D w polskich przedsiębiorstwach stale wzrasta. W 2018 roku kształtowała się na poziomie 14,5%, z kolei w roku 2020 było to już 18,3%. Wzrost wdrożeń technologii przyrostowych jest spowodowany m.in. możliwością ich szerokich zastosowań w wielu branżach [68].

W przemyśle elektromaszynowym [17, 104], lotniczym [61, 96, 113], kosmicznym [32, 34, 73], motoryzacyjnym [22, 35, 57] czy militarnym [1, 13, 54] druk 3D odgrywa bardzo ważną rolę. Produkcja z wykorzystaniem technologii przyrostowych jest relatywnie szybsza i tańsza w porównaniu z metodami tradycyjnymi. Ponadto łatwiejsze staje się wyprodukowanie pojedynczego, spersonalizowanego wyrobu charakteryzującego się skomplikowaną i złożoną geometrią [36, 76]. Przez zastosowanie odpowiednich materiałów i technologii możliwe jest również zwiększenie wytrzymałości wytwarzanych elementów oraz osiągnięcie redukcja ich wagi [97]. Dzięki temu obniża się masa własna maszyny, co pozwala m.in. na zmniejszenie zużycia paliwa i tym samym redukcję emisji spalin do środowiska. W Laboratorium Systemów Szybkiego Prototypowania Politechniki

Rzeszowskiej badaniem zostały objęte chociażby takie elementy, jak łopatki silników lotniczych (rys. 2.8) czy koła zębate (rys. 2.9).



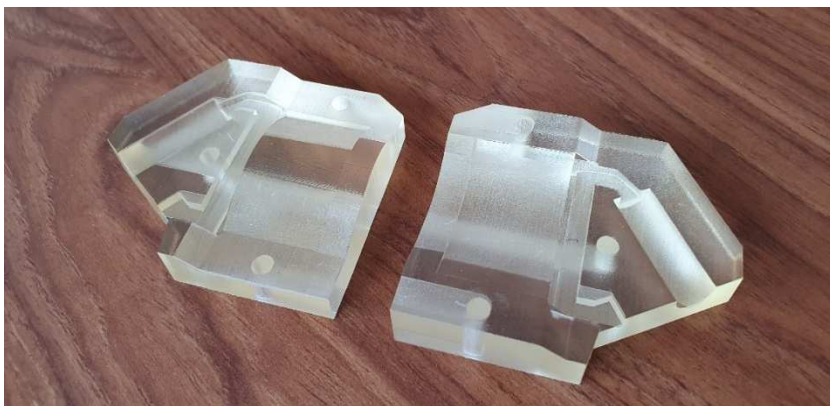
Rys. 2.8. Łopaska silnika lotniczego wykonana metodą DMLS



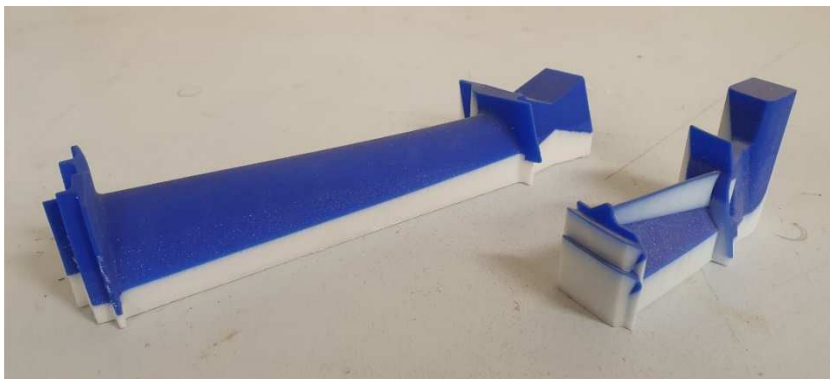
Rys. 2.9. Koła zębate wykonane metodą SLA

Druk 3D znajduje swoje zastosowanie również w przemyśle odlewniczym. Do tej pory tradycyjne metody wytwarzania form były kosztowne, czasochłonne oraz niekiedy mało precyzyjne. Wykorzystanie technologii przyrostowych pozwala na obniżenie kosztów wytwarzania, przez skrócenie procesu przygotowania formy (np. dzięki pominięciu obróbki CNC), a przy tym na zachowanie bardzo dużej precyzji. Druk 3D może służyć nie tylko do prototypowania form przed uruchomieniem masowej produkcji, ale również do tworzenia modeli do form odlewniczych [11, 37, 119]. Rysunek 2.10 przedstawia formę odlewniczą łopatki silnika lotniczego wykonaną metodą PolyJet. Z kolei na rys. 2.11 zaprezentowano

model woskowy łopatki silnika lotniczego do wytworzenia ceramicznej formy odlewniczej. Formę odlewniczą koła zębatego zaprezentowano na rys. 2.12.

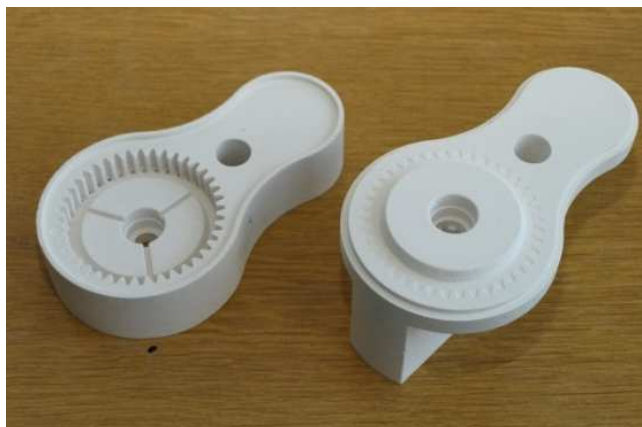


Rys. 2.10. Forma odlewnicza łopatki silnika lotniczego wykonana metodą PolyJet



Rys. 2.11. Model woskowy łopatki silnika lotniczego wykonany metodą ProJet

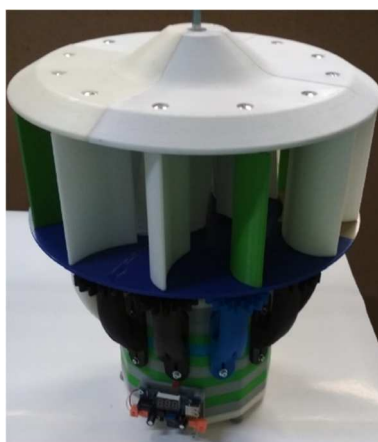
Możliwość produkcji wielokolorowych i zgodnych z rzeczywistością wydruków 3D rewolucjonizuje również branżę wzornictwa przemysłowego. Technologie przyrostowe są doceniane przez projektantów głównie za możliwość wytworzenia w stosunkowo krótkim czasie modeli 3D, które mogą być na bieżąco weryfikowane pod względem ich funkcjonalności, ergonomiczności oraz aspektów wizualnych. Daje to możliwość modyfikacji modelu, aż do powstania pożądanego i zgodnego z oczekiwaniami finalnego obiektu [30, 95]. Dzięki temu prostszy staje się wybór konkretnego rozwiązania, co w znacznym stopniu sprzyja procesom decyzyjnym. Na rysunku 2.13 zamieszczono przykładowe kolorowe wydruki 3D. Modele wykonane w celu zbadania ich funkcjonalności przedstawiają rys. 2.14 [52] i 2.15.



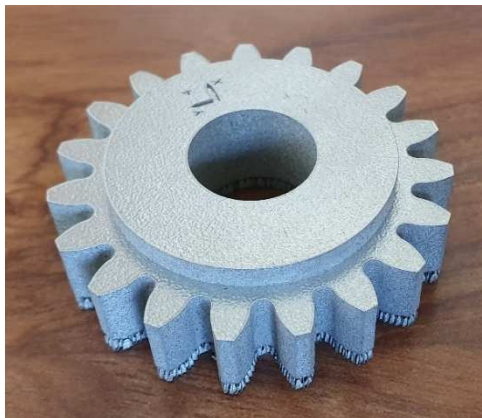
Rys. 2.12. Forma odlewnicza koła zębatego wykonana metodą 3DP



Rys. 2.13. Kolorowe modele wizualne wykonane metodą 3DP (CJP)



Rys. 2.14. Prototyp turbiny wiatrowej wykonany metodą FFF [52]



Rys. 2.15. Prototyp koła zębatego wykonany metodą DLMS

W budownictwie druk 3D ma coraz szersze obszary zastosowań. Początkowo służył głównie do tworzenia makiet domów, wieżowców i innych budynków przeznaczonych na targi czy wystawy (rys. 2.16). Obecnie opracowanie nowych, większych drukarek 3D, nowych technologii i materiałów do druku umożliwia wyprodukowanie nie tylko elementów konstrukcyjnych, ale również pełnoformatowych budynków o różnorodnym metrażu. Przy wykorzystaniu drukarki 3D powstały m.in. w pełni funkcjonalne domy, wieżowce czy mosty [45, 58, 63].



Rys. 2.16. Makietka budynku wykonana metodą 3DP

Wykorzystanie technologii przyrostowych otwiera przed firmami nowe, szerokie możliwości również w działalności marketingowej. Produkcja oryginalnych gadżetów reklamowych, takich jak: wizytówki 3D, breloki z logotypem i maskotki firmowe, to jedno z wielu przykładów zastosowania druku 3D w celach

promocyjnych. Gadżety 3D mogą być wręczane na targach, konferencjach i innych spotkaniach branżowych, a także dołączane jako gratyfy do zakupów. Tego typu rozwiązania wzbudzają zainteresowanie potencjalnych odbiorców oraz wpływają na kreowanie wizerunku marki w otoczeniu. Przykłady wydruków 3D stosowanych w działaniach marketingowych przedstawiono na rys. 2.17 i 2.18.



Rys. 2.17. Przykładowe wydruki 3D do celów marketingowych



Rys. 2.18. Modele reklamowe samolotu wykonane metodą PolyJet

W przemyśle medycznym druk 3D ma swoje zastosowanie m.in. w relatywnie szybkiej i taniej produkcji personalizowanych protez i implantów. Możliwe staje się dopasowanie protezy do rozmiarów ciała danego człowieka, co jest szczególnie istotne w przypadku dzieci, które szybko z nich wyrastają. Przykład może stanowić prototypowy system AutoMedPrint rozwijany na Politechnice Poznańskiej, który pozwala na szybkie, automatyczne projektowanie i wytwarzanie protez oraz ortez kończyn przeznaczonych głównie dla dzieci. Przez zastosowanie prostej sztucznej inteligencji w postaci autogenerujących modeli 3D możliwe stało się projektowanie i wytwarzanie protez bez konieczności angażowania do

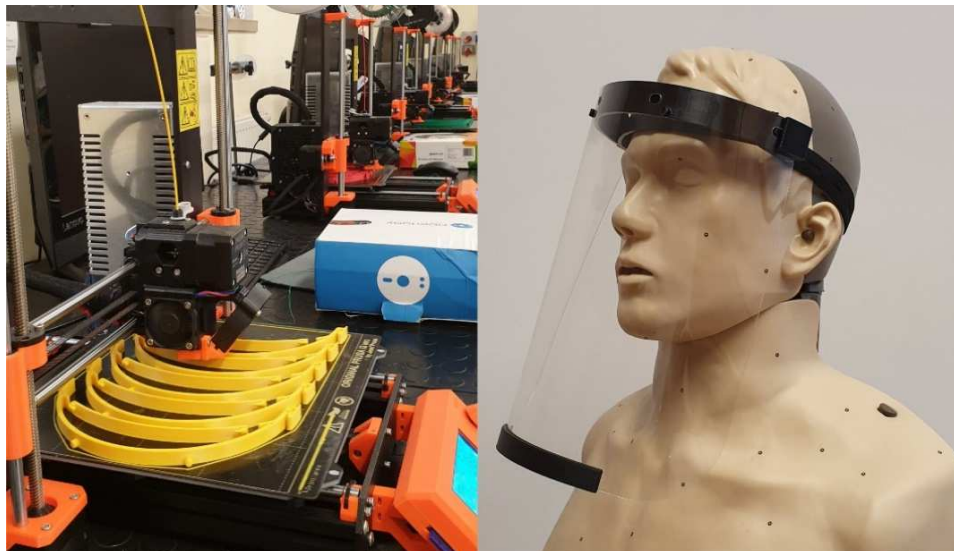


tego wykwalifikowanych inżynierów. Jak podają autorzy projektu, koszt jednej protezy nie przekracza kilkuset złotych [160]. Inne zastosowanie technologii przyrostowych w medycynie to np. produkcja narzędzi chirurgicznych, modeli wizualnych, aparatów słuchowych czy przygotowanie leków w specjalnie dobranych dla pacjentów dawkach [100, 103, 117, 118]. W ostatnich latach trwają również prace nad tzw. biodrukami, które polegają na wytwarzaniu tkanek lub narządów z żywych komórek za pomocą drukarki 3D. Biodruk może mieć zarówno funkcję pośrednią (polegającą na wytwarzaniu rusztowań i szkieletów, które następnie są zasiedlane komórkami), jak i bezpośrednią (dającą możliwość druku z materiału biologicznego z żywymi komórkami) [30]. Przykładowe modele dla branży medycznej wykonane w Laboratorium Systemów Szybkiego Prototypowania PRz zostały zaprezentowane na rys. 2.19.



Rys. 2.19. Modele medyczne wykonane metodami przyrostowymi

Zastosowanie technologii przyrostowych sprawdza się również w sytuacjach kryzysowych. Druk 3D zyskał szeroki rozgłos w dobie pandemii [59, 64, 108]. Produkcja wybranych elementów przyłbic ochronnych, wytwarzanie środków ochrony osobistej przeznaczonych m.in. dla służb ratowniczych stały się szybsze, tańsze i łatwiejsze. Włączenie wybranego personelu medycznego do prac nad projektem pozwoliło również na stałe udoskonalanie konstrukcji. Prototypy przyłbic wykonane w Laboratorium Systemów Szybkiego Prototypowania PRz zostały przekazane m.in. do wybranych ośrodków służb ratowniczych na terenie całego województwa podkarpackiego [16]. Proces wydruku 3D pasa czołowego do przyłbicy ochronnej zaprezentowano na rys. 2.20.

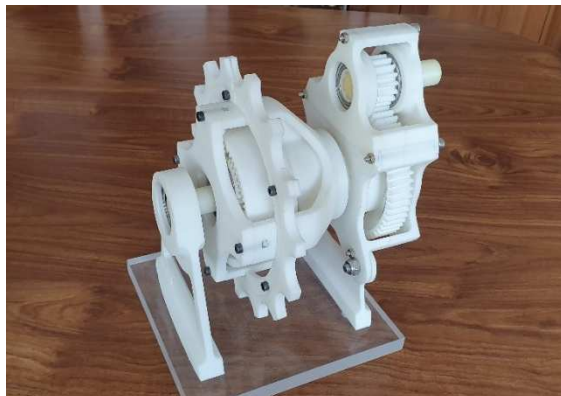


Rys. 2.20. Proces wydruku 3D pasa czołowego do przyłbicy ochronnej

Technologie przyrostowe odgrywają również bardzo ważną rolę w dydaktyce. Włączenie druku 3D w procesy edukacyjne może w istotny sposób wpłynąć na ich jakość. Produkcja modeli wizualnych, jak i ruchomych sprzyja wzrostowi efektywności procesów nauczania w szkołach i na uczelniach wyższych [2, 25]. Przykład może stanowić wydruk 3D przekładni końcowej napędu gaśienicowego, który pozwala lepiej zrozumieć zasady funkcjonowania i odzwierciedla jej poszczególne elementy (rys. 2.21). Z kolei modele badawcze wydrukowane dla branży medycznej sprzyjają procesom edukacyjnym, np. przez umożliwienie chirurgom trenowania operacji przed jej przeprowadzeniem. Model anatomiczny czaszki przeznaczony do celów edukacyjnych przedstawia rys. 2.22.

W tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, że zakup drukarek 3D na uczelniach wyższych umożliwia studentom kierunków technicznych tworzenie własnych projektów oraz sprawdzenie ich pod względem funkcjonalności. Ważne jest również, że pozyskanie wiedzy i umiejętności dotyczących zastosowania technologii przyrostowych zwiększa szanse absolwentów na rynku pracy – w Polsce wciąż brakuje specjalistów z zakresu druku 3D [5, 67, 82].

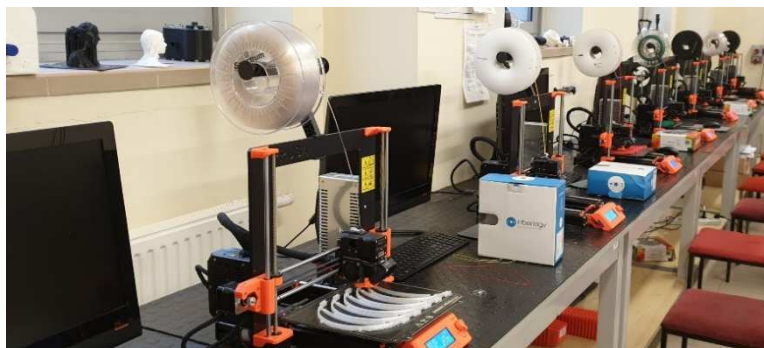
W 2001 roku na Politechnice Rzeszowskiej rozpoczęto prace naukowe związane z drukiem 3D. Został wtedy zainstalowany system wytwarzania przyrostowego – urządzenie stereolitograficzne SLA 250 firmy 3D Systems. Zapoczątkowało to utworzenie Laboratorium Systemów Szybkiego Prototypowania w Katedrze Konstrukcji Maszyn oraz pracowni dydaktycznych dla studentów i doktorantów (rys. 2.23).



Rys. 2.21. Model przekładni końcowej napędu gąsienicowego wykonany metodą FFF

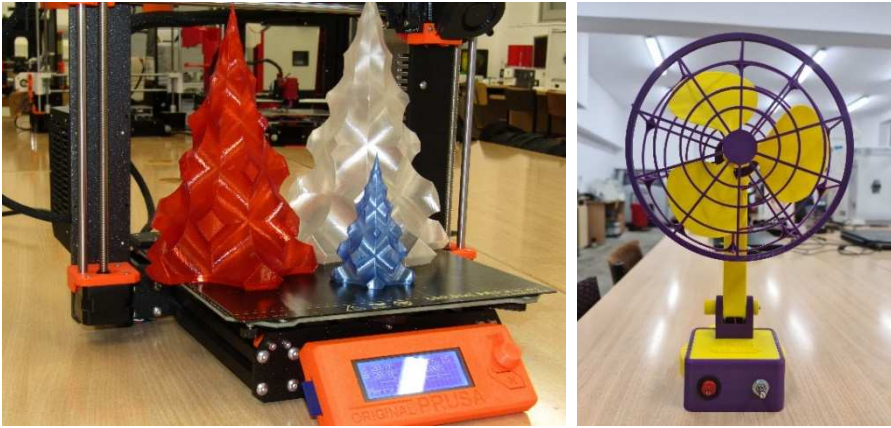


Rys. 2.22. Model fragmentu uszkodzonej czaszki oraz model wypełnienia kostnego wykonane metodą 3DP



Rys. 2.23. Laboratorium Systemów Szybkiego Prototypowania w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej

W 2016 roku z inicjatywy studentów powstało Studenckie Koło Naukowe Szybkiego Prototypowania i Wzornictwa Przemysłowego Politechniki Rzeszowskiej. Członkowie koła przez dostęp do profesjonalnych drukarek 3D, skanerów 3D, narzędzi, sprzętu i oprogramowania do modelowania CAD mają możliwość realizacji własnych projektów i poszerzania wiedzy z zakresu druku 3D. Przykładowe prace członków koła przedstawia rys. 2.24.



Rys. 2.24. Przykładowe prace Studenckiego Koła Naukowego Szybkiego Prototypowania i Wzornictwa Przemysłowego Politechniki Rzeszowskiej

W 2020 roku zespół badawczy opracował również mobilne rozwiązanie druku 3D do pracy w warunkach polowych [13]. System składa się ze specjalnie skonfigurowanej drukarki 3D, ogniwa solarnego i akumulatora (rys. 2.25). Całość



Rys. 2.25. Mobilny system druku 3D

na czas transportu jest umieszczona w skrzyni posiadającej atesty wojskowe. Rozłożenie systemu i uruchomienie procesu jest bardzo szybkie. Uniwersalność systemu powoduje, że może pracować w różnych warunkach terenowych oraz w mobilnych warszatach technicznych, np. dla przemysłu energetycznego lub wojska.

W miarę upływu czasu techniki druku 3D znajdują kolejne obszary zastosowań. Przykład stanowi chociażby branża morska [138], spożywcza [91, 132, 133] czy modowa [115], która również korzysta z szerokich możliwości zastosowania technologii addytywnych. Można zatem uznać, że wytwarzanie przyrostowe na dobre zagościło w naszej rzeczywistości, wychodząc naprzeciw badaniom naukowym, edukacji i potrzebom przemysłu.



## 3. KONTROLA JAKOŚCI WYDRUKÓW 3D

### 3.1. Wytyczne stosowane w kontroli jakości wydruków 3D

W miarę rozwoju branży 3D na świecie pojawiają się wciąż nowe marki producentów maszyn, a także firm świadczących usługi w zakresie druku 3D. Powstała więc potrzeba uporządkowania i usystematyzowania procesów oraz określenia pewnych standardów jakości w obrębie całego łańcucha dostaw [94].

Międzynarodowa działalność normalizacyjna związana z drukiem 3D została zapoczątkowana pod koniec 2011 r. Utworzono wówczas Komitet Techniczny ISO/TC 261 *Additive Manufacturing*, którego sekretariat jest prowadzony przez niemiecką jednostkę normalizacyjną DIN. W tym czasie Komitet Techniczny 207 ds. Obróbki Ubytkowej i Przyrostowej oraz Charakterystyki Warstwy Wierzchniej podjął działania, których celem było otrzymanie zgody od PKN na włączenie tematyki wytwarzania przyrostowego do swojego zakresu tematycznego. Strona polska zadeklarowała członkostwo czynne (P), które funkcjonuje do chwili obecnej. ISO/TC 261 prawie od początku istnienia nawiązał ścisłą współpracę z ASTM F42 *Additive Manufacturing Technologies*, tworząc łączne grupy (JG), których efektem pracy jest wiele norm z serii ISO/ASTM. W wybranych opracowaniach wersji roboczych biorą udział polscy eksperci związani z PKN/KT 207. W 2016 roku, po pozytywnym zaopiniowaniu przez PKN/KT 207, utworzono europejski Komitet Techniczny, a Rada Techniczna CEN powołała CEN/TC 438 *Additive Manufacturing*, z sekretariatem we francuskiej jednostce normalizacyjnej AFNOR. Zakres działania CEN/TC 438 jest tożsamy z ISO/TC 261. Oba komitety współpracują ze sobą w łączonych grupach roboczych [89].

Publikacje i opracowywane projekty z dziedziny wytwarzania przyrostowego dotyczą przede wszystkim: zasad ogólnych i terminologii, kategoryzacji procesów, charakterystyk i metod badań, komputerowego opisu procesów (za pomocą ustalonego standardowego zapisu informacji i danych w postaci pliku), a także oceny dokładności geometrycznej procesów wytwarzania przyrostowego.

Dalej wymieniono ważniejsze publikacje z dziedziny druku 3D.

- **PN/EN ISO/ASTM 52900:2017-06. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia.** Obejmuje terminy i definicje związane z technologiami wytwarzania przyrostowego, gdzie fizyczne struktury (geometrie) budowane są przez dodawanie kolejnych warstw materiału [150].
- **PN/EN ISO/ASTM 52901:2019-01. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Wymagania dla kupowanych części wyprodukowanych w procesach wytwarzania przyrostowego AM.** Stanowi podstawowy dokument przy nabywaniu części wykonanych przy użyciu technologii

przyrostowych, spełniających minimalne wymagania odbiorcze. W przypadku bardziej rygorystycznych wymagań dodatkowych zaleca się ich określenie podczas składania zamówienia [151].

- **PN/EN ISO 17296-2:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 2. Przegląd kategorii procesów i materiał wstępny.** Przedstawia podstawy procesu wytwarzania przyrostowego, a także przegląd istniejących kategorii procesów. Opisuje również, w jaki sposób w różnych kategoriach procesów należy korzystać z odmiennych rodzajów materiałów do kształtowania geometrii danego wyrobu [147].
- **PN/EN ISO 17296-3:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 3. Główne cechy i odpowiednie metody badań.** Norma jest skierowana przede wszystkim do producentów maszyn i ich użytkowników, dostawców materiałów wstępnych i części oraz do odbiorców i klientów. Zawiera zasadnicze wymagania, które powinny zostać wykorzystane do badania części produkowanych przy użyciu technologii wytwarzania przyrostowego [148].
- **PN/EN ISO 17296-4:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 4. Przegląd przetwarzania danych.** Norma zawiera podstawowe zagadnienia związane z wymianą danych. Opisuje również podstawowe terminy i definicje wykorzystywane przy wymianie informacji związanych z opisem geometrii części (wyrobów) wytwarzanych techniką przyrostową [149].
- **ISO/ASTM 52902:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Próbki wzorcowe – Ocena dokładności geometrycznej systemów wytwarzania przyrostowego.** Norma zawiera ogólny opis wzorcowych geometrii próbek wraz z pomiarami ilościowymi i jakościowymi, które należy wykonać na próbce (-ach) testowej (-ych) w celu oceny wydajności systemów wytwarzania przyrostowego (AM) [140].
- **ISO/ASTM TR 52912:2020. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Wytwarzanie przyrostowe z podziałem na grupy funkcjonalne.** Celem dokumentu jest przedstawienie koncepcyjnego zrozumienia FGAM (Functionally Graded Additive Manufacturing) [146].
- **ISO/ASTM 52911-1:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Część 1. Stapianie proszków metali za pomocą lasera.** Norma określa cechy laserowego stapiania metali w złożu proszkowym PBF-LB/M i zawiera szczegółowe zalecenia projektowe [141].
- **ISO/ASTM 52911-2:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Część 2. Stapianie proszków polimerów za pomocą lasera.** Dokument ten określa cechy laserowego stapiania polimerów w złożu proszkowym (LB-PBF / P) i zawiera szczegółowe zalecenia projektowe [142].
- **PN/EN ISO/ASTM 52902:2021. Wytwarzanie przyrostowe – Próbki wzorcowe – Wytyczne do oceny dokładności geometrycznej systemów wytwarzania przyrostowego.** Norma obejmuje ogólny opis geometrii



próbek wzorcowych, a także badań ilościowych i jakościowych, które są wykorzystywane do oceny jakości i dokładności systemów wytwarzania przyrostowego [152].

W ciągu ostatnich lat CEN/TC 438 podjął współpracę z ISO/TC 44/SC 14 *Welding and brazing in aerospace* oraz ISO/TC 61/SC *Thermoplastic materials*, tworząc łączone grupy robocze (JWG). Efektem prac są opublikowane w 2020 r. normy ISO/ASTM 52941 dotyczące wytwarzania przyrostowego w technologii Laser Beam Powder Bed Fusion (LB-PBF) do zastosowania w lotnictwie. Normy te przedstawiają się następująco:

- **ISO/ASTM 52941-20. Wytwarzanie przyrostowe – Wydajność i niezawodność systemu – Testy akceptacyjne maszyn operujących w technologii Laser Beam Powder Bed Fusion dla materiałów metalowych do zastosowań lotniczych** [143],
- **ISO/ASTM 52942-20. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady kwalifikacji – Kwalifikowanie operatorów maszyn i urządzeń operujących w technologii Powder Bed Fusion dla metali i elementów wytwarzanych przyrostowo do zastosowań lotniczych** [144].

Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna stale pracuje nad kolejnymi normami związanymi z drukiem 3D. Można więc przypuszczać, że branża ta w ciągu najbliższych lat otrzyma jasne i przejrzyste zasady, które będą obowiązywać w ramach całego łańcucha wartości.

### 3.2. Przebieg kontroli jakości w procesach wytwarzania przyrostowego

Norma ISO 9000 definiuje kontrolę jakości jako zmierzenie, zbadanie, oszacowanie lub sprawdzenie jednej lub kilku właściwości obiektu oraz porównanie wyników z wymaganiami, w celu stwierdzenia, czy w odniesieniu do każdej z tych właściwości osiągnięto zgodność [154]. Metodyka kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo, w zależności od etapu procesu technologicznego, obejmuje różny zakres czynności sprawdzających.

W związku z powyższym przebieg kontroli jakości w procesach wytwarzania przyrostowego można podzielić na trzy główne fazy [18]:

- **Faza 1. Kontrola danych numerycznych** (kontrola poprawności danych numerycznych modelu 3D-CAD, kontrola danych procesowych przeznaczonych bezpośrednio do wydruku 3D, analiza konstrukcji podporowych, analiza warstw, analiza ścieżek przejścia w kolejnych warstwach),
- **Faza 2. Kontrola procesu wytwarzania** (kontrola wizualna przestrzeni roboczej, kontrola wizualna poprawności budowy modelu w trakcie procesu przyrostowego, kontrola przepływu danych, kontrola wizualna prototypu bezpośrednio po zakończeniu jego budowy),

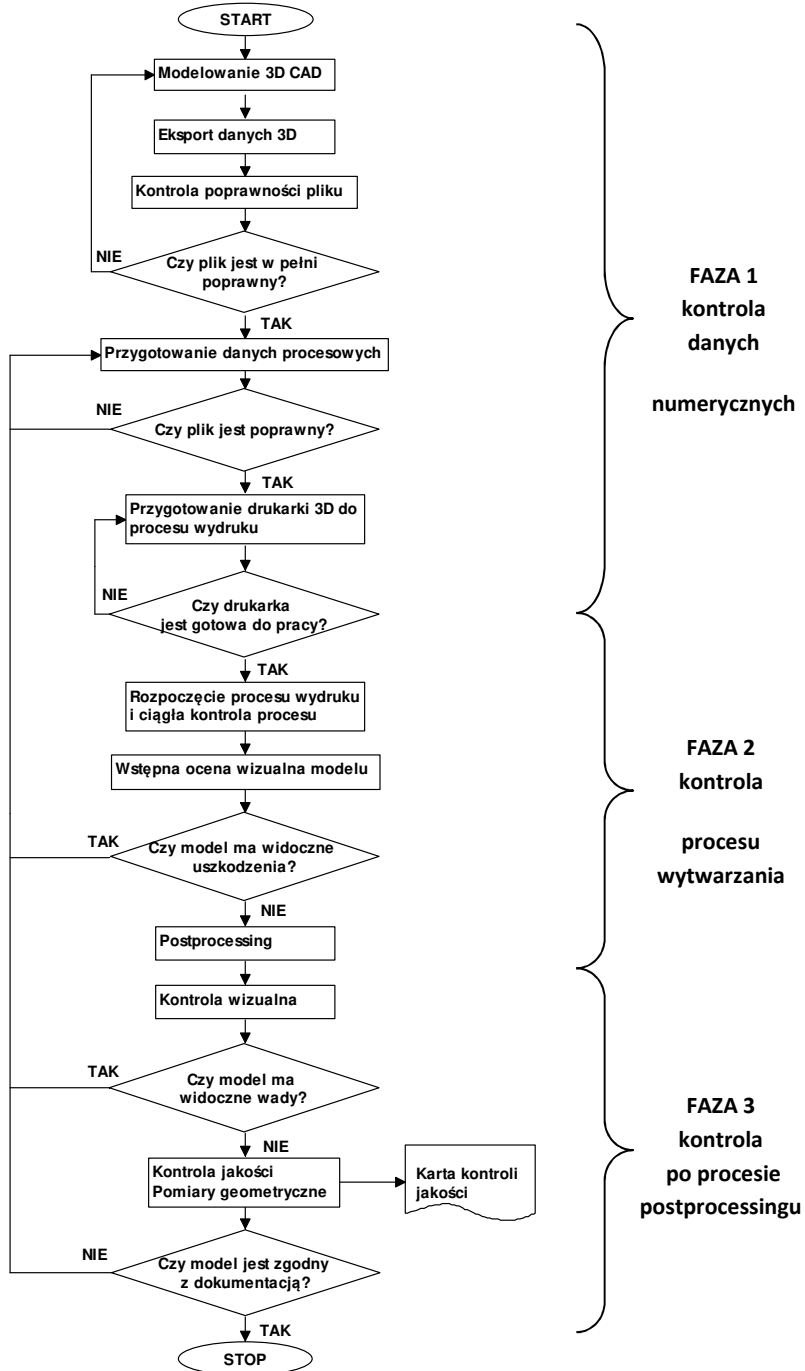
- **Faza 3. Kontrola po procesie postprocessingu** (kontrola wizualna wyrobu, kontrola dokładności wymiarowej i kształtowej, kontrola struktury geometrycznej powierzchni, kontrola struktury wewnętrznej materiału).

W zależności od przeznaczenia modele wytworzone za pomocą druku 3D mogą przechodzić różne procesy kontroli. W przypadku tworzenia prototypów poglądowych zwykle ich przeznaczenie polega na wizualizacji danego wyrobu, zatem ich cechy funkcjonalne nie są tak istotne. Wytworzony obiekt zostaje wówczas poddany kontroli danych, kontroli wytwarzania, a następnie przeprowadzana jest jedynie kontrola wizualna. Z kolei w przypadku wytwarzania modeli bezpośrednio związanych z procesem produkcyjnym po wytworzeniu fizycznego obiektu, kontrola wizualna stanowi pierwszy etap weryfikacji zgodności jakościowej i decyduje o kolejnych czynnościach [18]. W sytuacji gdy model ma uszkodzenia widoczne „niewzbrojonym okiem”, traktowany jest zwykle jako wyrób niezgodny – dokonuje się wówczas analizy powstałych błędów i proces wydruku musi się rozpocząć na nowo. Jeśli takich uszkodzeń nie odnotowano, należy dokonać dodatkowych czynności związanych z weryfikacją jakości, przez zastosowanie: narzędzi pomiarowych, sprawdzianów, skanowania zautomatyzowanego, skanerów ręcznych, tomografii, czy też innych współrzędnościowych systemów pomiarowych. Przebieg kontroli jakości wydruków 3D może być zatem odmienny i wysoce zindywidualizowany.

W tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, że podczas dobierania sposobów oceny jakościowej ważne jest, aby każdorazowo brać pod uwagę następujące aspekty [51]:

- koszty przeprowadzenia kontroli jakości,
- czas przeprowadzenia kontroli jakości,
- dostępną aparaturę i narzędzia,
- wiedzę specjalistyczną niezbędną do przeprowadzenia określonych procesów oraz interpretacji wyników,
- wymagania klienta.

Przykładowo, badania wyrobów z zastosowaniem tomografii komputerowej pozwalają uzyskać kompleksowe wyniki określające zarówno dokładność geometryczną wyrobu powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych, jak również struktury materiału wyrobu. Tego typu badania są jednak kosztowne, czasochłonne i wymagają specjalistycznej aparatury oraz wiedzy kontrolera, dlatego stosuje się je dla określonej grupy wyrobów, np. łopatek silników lotniczych. Rysunek 3.1 przedstawia przykładowy algorytm procesu kontroli jakości dla modeli bezpośrednio związanych z procesem produkcyjnym.



Rys. 3.1. Algorytm procesu kontroli jakości dla modeli bezpośrednio związanych z procesem produkcyjnym

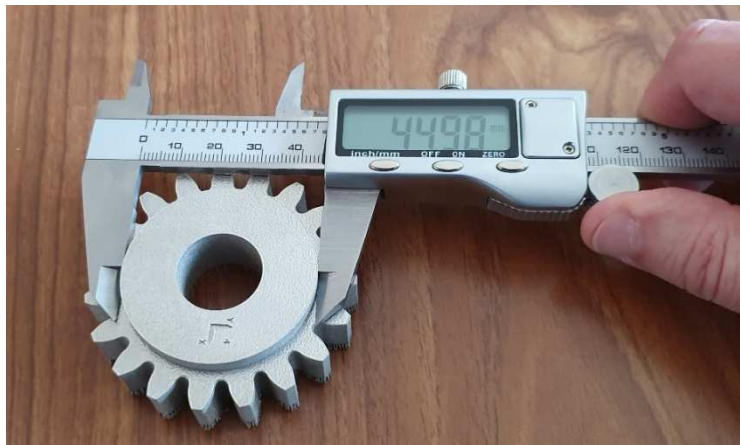
### 3.3. Przegląd metod kontroli jakości modeli wytworzonych przyrostowo

Kontrola jakości jest jednym z kluczowych elementów procesu produkcyjnego niezależnie od liczby wytworzonych wyrobów. Wybrane sposoby oceny jakościowej wydruków 3D to przede wszystkim: kontrola wizualna wydruku, kontrola wymiarów modelu za pomocą narzędzi pomiarowych, kontrola modelu/wyrobu gotowego za pomocą sprawdzianów, kontrola przy użyciu stykowych metod pomiarowych (tj. współrzędnościowe systemy pomiarowe z końcówką stykową), kontrola przy użyciu bezstykowych metod pomiarowych (tj. skanowanie laserowe, skanowanie optyczne, tomografia komputerowa).

**Kontrola wizualna** – stanowi najbardziej ekonomiczny sposób oceny jakościowej. Nie wymaga stosowania kosztownego sprzętu oraz nie prowadzi do zniszczenia ocenianego obiektu. Ze względu na prostotę jest najczęściej stosowaną techniką nieniszczącą, którą można szybko przeprowadzić. Pomimo swoich licznych zalet kontrola wizualna posiada również wady wynikające głównie z braku możliwości przedstawienia otrzymanych wyników w jednostkach układu SI. Należy również pamiętać, że jest to przede wszystkim ocena subiektywna, która zależy od predyspozycji i wiedzy danego pracownika, dlatego nie gwarantuje poprawnej oceny [65, 75, 131].

**Kontrola za pomocą narzędzi** – pozwala na weryfikację wymiarową modelu. Do popularnych narzędzi pomiarowych można zaliczyć m.in. [69]:

- suwmiarkę – jest jednym z podstawowych warsztatowych przyrządów pomiarowych, służy do szybkiego pomiaru wytwarzanych elementów. Za jej pomocą można zmierzyć wymiary zewnętrzne i wewnętrzne oraz głębokości. Zakresy pomiarowe suwmiarek zawierają się w przedziale od 0 do 150 mm lub nawet do 3000 m. Na rynku są dostępne suwmiarki zarówno z odczytem zegarowym, jak i elektronicznym, których rozdzielczość wynosi nawet 0,01 mm. Dokumentem, który określa charakterystyki konstrukcyjne oraz wymagania metrologiczne względem przyrządów suwmiarkowych jest norma ISO 13385-1:2019. Rysunek 3.2 przedstawia pomiar z zastosowaniem suwmiarki elektronicznej,
- mikrometr – należy do często spotykanych urządzeń pomiarowych w praktyce warsztatowej, ma szerokie zastosowanie w budowie maszyn. Z powodzeniem może być wykorzystywany do pomiarów średnic i długości wałków, parametrów gwintów i kół zębatych, grubości blach. Ich zaletą jest łatwa obsługa oraz pewność wskazań. Typy mikrometrów i ich wykonanie opisuje norma PN-80/M-53202. Pomiar z zastosowaniem mikrometru przedstawia rys. 3.3.



Rys. 3.2. Pomiar z zastosowaniem suwmiarki



Rys. 3.3. Pomiar z zastosowaniem mikrometru

- mikroskop pomiarowy – stanowi optyczne urządzenie pomiarowe, które służy do bezdotykowego pomiaru długości przedmiotów w układzie współrzędnych prostokątnych oraz kątów. Na rysunku 3.4 przedstawiono pomiar mikroskopem wyposażonym w tor wizyjny podłączony do komputera.



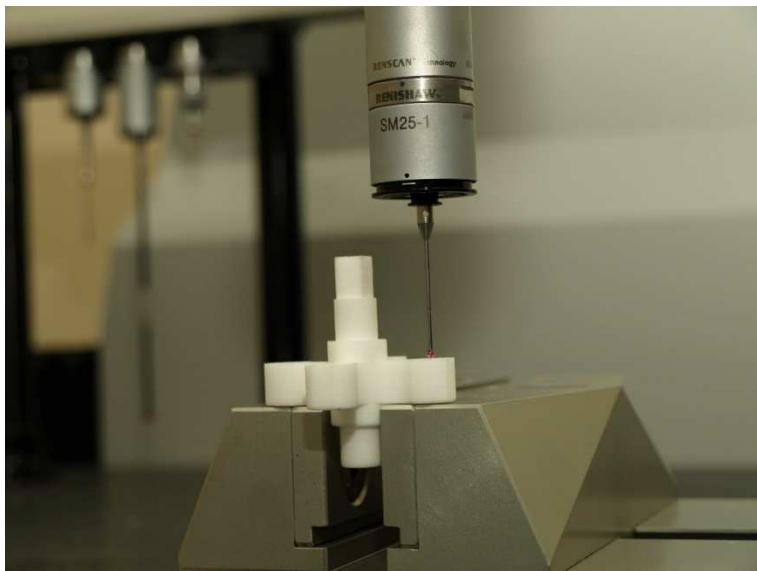
Rys. 3.4. Mikroskop stereoskopowy z torem wizyjnym

**Kontrola za pomocą sprawdzianów** – daje możliwość weryfikacji wydruków 3D, nie niszcząc przy tym ocenianych obiektów. Jest to inspekcja, która pozwala na ocenę modelu jako „dobry” lub „zły”, nie pozwala natomiast na pomiar z przypisaniem wartości wielkości mierzonej. Wykorzystanie sprawdzianów daje możliwość znacznego przyspieszenia procesu kontroli jakości. Sprawdziany są najczęściej stosowane w produkcji seryjnej, przy weryfikacji modeli, które posiadają specyficzne otwory [131]. Na rysunku 3.5 przedstawiono kontrolę jakości nakrętki wykonaną sprawdzianem gwintowym.



Rys. 3.5. Kontrola jakości nakrętki wykonana sprawdzianem gwintowym

**Kontrola przy użyciu stykowych współrzędnościowych metod pomiarowych** – współcześnie wytwarzane obiekty mają bardzo złożoną geometrię 3D. Tradycyjne narzędzia pomiarowe opierały się na pomiarze bezpośrednim jednego wymiaru, co powodowało trudności w pomiarach modeli o skomplikowanych kształtach oraz znacznie wydłużało czas procesu kontroli jakości. Fakt ten wpłynął na rozwój nowej dziedziny – współrzędnościowej techniki pomiarowej. Według definicji zawartej w normie ISO 10360-1 współrzędnościowa maszyna pomiarowa jest urządzeniem, którego zespoły realizujące pomiar przemieszczają się w określonych współrzędnych, z tym że co najmniej jeden z nich realizuje przesuw. Kierunki przesuwu wyznaczają osie układu kartezjańskiego X, Y, Z i definiują przestrzenny układ współrzędnych maszyny [153]. Przesunięcia wzdłuż osi są wskazywane przez wzorce długości i przesyłane do komputera i elektronicznych zespołów sterujących [11]. Pomimo swoich zalet współrzędnościowa maszyna pomiarowa posiada jednak wiele ograniczeń, m.in. wydłużony czas pomiaru, brak możliwości lub znacznie utrudniony pomiar obiektów o skomplikowanych kształtach (zwłaszcza wewnętrznych) lub bardzo małych gabarytach, konieczność dostosowania końcówek pomiarowych do badanych kształtów, a także ryzyko ich uszkodzenia, jak również uszkodzenia powierzchni przedmiotowego obiektu [93]. Na rysunku 3.6 przedstawiono pomiar współrzędnościową maszyną pomiarową CMM koła zębatego wykonanego metodą SLS.



Rys. 3.6. Pomiar współrzędnościową maszyną pomiarową CMM koła zębatego wykonanego metodą SLS

**Kontrola przy użyciu bezstykowych metod pomiarowych** – pomiary metodami bezstykowymi charakteryzują się przede wszystkim brakiem bezpośredniego kontaktu aparatury (układu pomiarowego, głowicy) z analizowaną powierzchnią, co nie prowadzi do zniszczenia ocenianego obiektu. Do podstawowych zalet pomiaru bezstykowego zalicza się to, że daje on możliwość przeprowadzenia analizy przedmiotów o dowolnych gabarytach i kształtach, zachowując przy tym względnie krótki czas pomiaru [71, 72]. Do bezstykowych metod pomiarowych zalicza się:

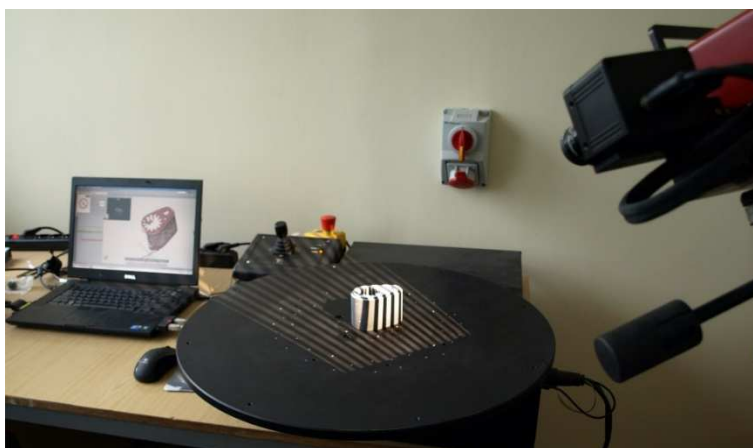
- **skanowanie laserowe (triangulacja laserowa)** – daje możliwość przeprowadzenia pomiarów elementów o złożonych kształtach. Proces ten może być realizowany za pomocą głowic skanujących zamocowanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej lub na ramieniu pomiarowym, a także z zastosowaniem samopozycjonującego się laserowego skanera ręcznego [14, 33, 41]. Tego typu urządzenia pozwalają na przekształcanie obiektów geometrycznych w trójwymiarową postać cyfrową w procesie digitalizacji. Samopozycjonujące się skanery zazwyczaj działają jako dwa współdziałające procesy – triangulacji laserowej oraz detekcji markerów. Proces triangulacji jest realizowany dzięki zastosowaniu dwóch par mierzących w prostopadłych kierunkach w układzie krzyżowym. Dane, które zostały uzyskane z pomiarów triangulacyjnych, są łączone w jeden obiekt w trybie z użyciem procesu detekcji markerów. Przed rozpoczęciem procesu skanowania model (lub specjalną podstawę, na której jest on umieszczony) należy wcześniej okleić markerami, pamiętając przy tym, aby umieścić je nieregularnie. Dzięki markerom skaner rozpoznaje swoją orientację względem przedmiotu. Przez wykorzystanie skanera ręcznego operator ma możliwość swobodnego przemieszczania urządzenia wokół mierzonego obiektu. Stanowi to ogromną zaletę, ponieważ względne położenie obiektu i skanera może być dowolne. Ponadto takie rozwiązanie eliminuje konieczność wykonywania kilku chmur punktów z różnych ustawień skanera i późniejsze ich łączenie [11]. Pomiar z zastosowaniem skanera ręcznego przedstawia rys. 3.7,
- **skanowanie optyczne** – pomiary optyczne oparte na emisji światła strukturalnego polegają na analizie ugięcia serii obrazów prążkowych rzutowanych na obiekt (rys. 3.8). Prążki na powierzchni płaskiej są względem siebie równoległe. Na powierzchni krzywoliniowej ulegają ugięciu wynikającemu z ukształtowania obiektu. Ugięcie jest rejestrowane przez kamerę i przetwarzane przez algorytmy uwzględniające parametry układu optycznego systemu. Uzyskana chmura punktów o współrzędnych (x, y, z) jest komputerowym odwzorowaniem powierzchni skanowanego obiektu [33]. Oprogramowanie systemów skanujących pozwala na: łączenie obrazów skanowanych w celu uzyskania całej powierzchni pomiarowej, usuwanie szumów pomiarowych, uzupełnianie brakujących elemen-



tów powierzchni oraz wykonanie gotowego modelu 3D-CAD. Oprogramowanie umożliwia m.in. zapis zbioru punktów w postaci modelu STL, wczytanie modelu 3D-CAD skanowanego obiektu oraz wykonanie analizy dokładności mierzonego detalu,



Rys. 3.7. Pomiar uchwytu lusterka samochodowego z zastosowaniem skanera CREAFORM



Rys. 3.8. Pomiar formy odlewniczej wydrukowanej metodą 3DP skanerem ATOS firmy GOM

- **tomografię komputerową (CT – Computer Tomography)** – dostarcza danych opisujących struktury wewnętrzne i zewnętrzne obiektów w postaci przekrojów poprzecznych (warstw o niezerowej grubości). Wiązka promieniowania przechodzi przez badany obiekt, a detektory umieszczone po przeciwnej stronie obiektu rejestrują intensywność wiązki po

przejsięciu. Każdy obiekt pochłania pewną część promieniowania, natomiast każda warstwa, jako przekrój poprzeczny badanego obiektu, składa się z pojedynczych elementów trójwymiarowych (vokseli). Rozdzielczość przestrzenna obrazowania CT zależy od względnej różnicy pomiędzy liczbą pikseli matrycy obrazu oraz od wielkości badanego obiektu. Tomografia może być z powodzeniem używana do kontroli wyrobów w odniesieniu do ich struktury wewnętrznej, jak również do analizy wymiarowej i kształtowej. Wymaga to zastosowania odpowiedniego metrologicznego oprogramowania (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Tomograf komputerowy

### 3.4. Analiza możliwości powstania wad w procesie druku 3D

W każdym procesie technologicznym istnieje ryzyko popełnienia błędów. Ich przyczyna może być związana zarówno z samym procesem, materiałem wykorzystanym do produkcji, awarią maszyny, jak i błędem ludzkim. Braki produkcyjne są niejako wkalkulowane w działalność przedsiębiorstw. Kontrola jakości na każdym etapie produkcji i przepływu materiału niewątpliwie niesie ze sobą zysk w postaci redukcji strat powstałych w wyniku wadliwej produkcji.

Technologie przyrostowe nie są również wolne od możliwości powstawania braków czy wad. Można tu wyróżnić określone miejsca procesu technologicznego, które na każdym etapie produkcji mogą generować problemy i zagrożenia. W celu usystematyzowania analizy proces produkcyjny z zastosowaniem technik

przyrostowych został podzielony na trzy etapy: operacje przed procesem przyrostowym (preprocessing), proces addytywny budowy obiektu (processing) oraz operacje poprocesowe (postprocessing).

**Preprocessing** to odpowiednie opracowanie danych numerycznych w postaci modelu 3D-CAD/3D-AM, ustawienie parametrów zapisu i transferu plików do drukarki 3D oraz przygotowanie materiałów eksploatacyjnych i maszyny do pracy, co warunkuje przeprowadzenie procesu wydruku 3D w sposób prawidłowy. Dalej wymieniono najczęstsze zagrożenia związane z przygotowanym preprocessingiem.

- **Błędne wymiary modelu numerycznego obiektu** – przystępując do procesu szybkiego prototypowania, należy przeprowadzić kontrolę wymiarów modelu numerycznego obiektu. Wstępna weryfikacja modelu po przeprowadzeniu obróbki danych może zostać zrealizowana za pomocą programu, w którym opracowany został model 3D-CAD. Lepszą praktyką w tym przypadku będzie zastosowanie innego programu pozwalającego na analizę wymiarową i kształtową modelu numerycznego.
- **Niepoprawnie zaprojektowany model** – przed przystąpieniem do procesu druku 3D należy przeprowadzić kontrolę poprawności zaprojektowanych modeli. Do tego celu można użyć programów, które analizują strukturę modelu i pozwalają wyszukać błędy.
- **Błędne ustawienie parametrów wydruku** – parametry wydruku muszą korelować z materiałem wykorzystywanym do druku 3D, co może powodować potrzebę ręcznego ustawienia parametrów, np. temperatury, w procesie wytłaczania warstwowego materiałów termoplastycznych. Konieczne jest zatem sprawdzenie, jaka temperatura jest wymagana dla dyszy, a jaka dla platformy roboczej.
- **Kalibracja urządzenia** – w niektórych procesach przyrostowych wymagana jest kalibracja urządzenia. Warto zwrócić uwagę na to, że maszyna po wielu godzinach pracy może się rozregulować. Ważne jest również, aby kalibrację wykonywać zgodnie z zaleceniami producenta, opierając się na określonych parametrach.
- **Przygotowanie platformy roboczej** – przed przystąpieniem do wydruku 3D każdorazowo należy sprawdzić, czy platforma nie jest zabrudzona oraz czy nie znajdują się na niej ciała obce. W zależności od procesu może zachodzić potrzeba nałożenia warstwy adhezyjnej, wyrównania poziomu, czy np. wstępnego naniesienia materiału modelowego lub podporowego.
- **Przechowywanie materiału w odpowiednich warunkach** – materiał wykorzystywany do druku 3D nie może być zanieczyszczony (przez pyły, kurz, wilgoć). Skutkować to może częściowym bądź całkowitym zablokowaniem procesu lub wadami w strukturze wyrobu. Materiały eksploatacyjne powinny być przechowywane zgodnie z zaleceniami producenta, jeżeli jest to konieczne – w komorach lub pomieszczeniach klimatyzowanych.

- **Brak uwzględnienia podpór przy ustawianiu parametrów wydruku** – podpory to elementy drukowane przez drukarkę 3D w celu utrzymania stabilności i integralności modelu podczas procesu. Dodanie elementów podporowych wspomaga proces druku 3D detalu oraz zmniejsza prawdopodobieństwo powstania wyrobu niezgodnego. W zależności od procesu podpory mogą być generowane w pełni automatycznie, półautomatycznie lub ręcznie. Podpory mają istotny wpływ na stabilność procesu przyrostowego, a zatem również dokładność wyrobów.

**Processing** dotyczy procesu warstwowej budowy modelu, począwszy od jego uruchomienia, aż do zakończenia wydruku ostatniej warstwy. W większości technologii przyrostowych jest to proces bezobsługowy, wykonywany automatycznie przez maszynę na podstawie przygotowanych danych procesowych. Na tym etapie mogą występować błędy jak na każdym etapie produkcji. Proces kontroli wydruku powinien być zatem stale monitorowany lub w zależności od czasu, jaki jest przypisany dla wytworzenia modelu, może się odbywać w założonych odstępach czasowych. Zwiększa to prawdopodobieństwo powstania wyrobu zgodnego z założeniami konstruktora oraz nie dopuszcza do uszkodzenia maszyny. Dalej wymieniono przykładowe błędy podczas realizacji wydruku 3D.

- **Zacięcie się systemu podawania materiału** – w zależności od procesu przyrostowego mogą powstawać różne przerwy w dostawie materiału. Dla systemów MEX może to być zacięcie filamentu, np. w sytuacji, gdy materiał nie jest dobrze nawinięty na szpulę, może się zablokować, zapętlić i w konsekwencji doprowadzić do powstania wyrobu niezgodnego. Bezpośrednią tego przyczyną jest zwykle złe zabezpieczenie i przygotowanie materiału. Dla technologii MJT może nastąpić przeciek na drodze zbiornik z żywicą–głowica drukująca, a w przypadku uszkodzonej głowicy płynna żywica może się wylewać na model. Przy zastosowaniu technologii opartych na spajaniu proszków może nastąpić nieciągłość warstwy w wyniku wadliwego zasypania zbiornika podawczego.
- **Zacięcie systemu napędowego głowic drukujących** – głowice drukujące są napędzane z zastosowaniem różnych układów mechanicznych. Z tego względu istotne jest wykonywanie przeglądów układów mechanicznych odpowiedzialnych za prawidłowy przebieg procesu wydruku 3D. Zacięcie układów mechanicznych może następować w wyniku różnych zjawisk eksploatacyjnych, np. zużycia podzespołów, zablokowania układu, uszkodzenia silnika, urwania pasków napędowych.
- **Błędna budowa konstrukcji podporowej modelu** – w niektórych przypadkach zdarza się, że modele są bardzo skomplikowane, a ich wydruk wymaga zaprojektowania specjalnych, dedykowanych podpór. Nieprawidłowa ingerencja w kształt podpory może spowodować np. jej uszkodzenie lub odkształcenie, a w momencie złamania się podpory najczęściej proces wydruku musi zostać rozpoczęty na nowo.

- **Rozdzielanie warstw** – rozdzielanie warstw ma miejsce w momencie, gdy proces ich łączenia nie przebiega prawidłowo, co jest zależne od danego procesu przyrostowego. Przykładowo dla technologii MEX możliwe jest nakładanie warstw w podwyższonej względem parametrów nominalnych temperaturze, aby utworzyć silne wiązanie wytłaczanego materiału. W przypadku procesu opartego na nadruku lepiszcza na kolejne warstwy proszku przyczyną rozwarstwienia może być niedrożność głowicy podającej lepiszcze. Przyczyny rozwarstwienia należy analizować zarówno w odniesieniu do samego procesu, jak również stanu technicznego drukarki 3D.
- **Przesunięcie wydruku** – przesunięcia modelu w jednym lub kilku kierunkach to kolejne zagrożenie, które może mieć wiele przyczyn, począwszy od błędnych danych numerycznych, skończywszy na niewłaściwym stanie technicznym urządzenia. W procesie MEX, w sytuacji gdy przesunięcia nie występują w formie schodków, najczęstszym powodem jest zahaczenie głowicy o wystający element wydruku. Kolejną przyczyną powstania tego błędu może się okazać zbyt duża prędkość głowicy. W takim przypadku zalecane jest zmniejszenie prędkości od kilkunastu do nawet kilkudziesięciu procent i obserwowanie, czy zjawisko ustępuje. Przyczyną powstawania przesunięć może być również oddziaływanie mechaniczne zgarniacza proszku (dla procesu SLS) czy żywicy (dla procesu SLA).
- **Odształcenia modelu podczas wydruku** – w zależności od technologii i samego urządzenia przyczyn odształceń procesowych jest wiele. Dla procesów MEX problem ten może się pojawiać po błędnej kalibracji stołu roboczego lub zmiennych warunków termicznych podczas procesu. Przeprowadzanie procesu kalibracji nie jest konieczne przy każdorazowym uruchamianiu drukarki. W przypadku procesów selektywnego spiekania proszków przyczyną odształceń mogą być naprężenia termiczne wynikające z oddziaływania skupionej wiązki energii na sproszkowany materiał.
- **Brak wystarczającej ilości materiału** – przygotowanie procesu wydruku powinno bezwzględnie obejmować sprawdzenie ilości materiału potrzebnego do wydruku, szczególnie jeżeli planujemy ten proces jako bezobsługowy. W wielu systemach wydruku 3D istnieje możliwość uzupełnienia materiału podczas procesu, jednak może to powodować wady w strukturze wyrobu lub uszkodzenia wydruku. Z tego względu należy minimalizować możliwość powstawania tego typu sytuacji.
- **Zanik zasilania w trakcie druku 3D** – w tym przypadku bardzo często wydruk musi zostać uruchomiony od początku. Niektóre urządzenia mają możliwość wznowienia wydruku, jednak mogą powstać w tym momencie wady wyrobu. W celu uniknięcia tego typu sytuacji należy drukarkę 3D zabezpieczyć w odpowiedni system zasilania.

**Postprocessing** – obejmuje operacje, które mają na celu uzyskanie gotowego wyrobu po zakończeniu procesu wydruku 3D. W zależności od projektu wyrobu postprocessing może obejmować tylko podstawowe operacje związane z wyciągnięciem wyrobu z przestrzeni roboczej drukarki 3D i oczyszczenie z materiału podporowego. Operacje poprocesowe mogą stanowić zasadniczą część procesu produkcyjnego, jeżeli wydruk 3D traktuje się jako półwyrob. Odpowiednio zaprojektowany proces technologiczny może spowodować znaczne zmniejszenie nakładu pracy na operacje poprocesowe. Podczas wykonywania bezpośrednich operacji poprocesowych mogą się pojawić błędy o różnych przyczynach. Do najczęściej spotykanych należą:

- **uszkodzenie modelu/stołu roboczego w trakcie usuwania wydruku z platformy roboczej** – należy pamiętać o tym, że skończony wydruk musi zostać usunięty z platformy roboczej w taki sposób, aby nie uszkodzić w żadnym stopniu stołu oraz modelu. Usuwanie modelu z platformy roboczej powinno nastąpić dopiero po całkowitym zakończeniu procesu, do którego może być również konieczne ostygnięcie przestrzeni roboczej lub jej wygrzanie i wychłodzenie. Odnosi się to do specyfiki danej technologii i maszyny przyrostowej. Nie wolno zapominać, że np. w momencie zakończenia druku temperatura komory roboczej i modelu (w zależności od procesu) może być nadal stosunkowo wysoka i istnieje ryzyko poparzenia. Usuwanie modelu z platformy może się odbyć z zastosowaniem operacji manualnych i przy użyciu odpowiednich narzędzi, z wykorzystaniem obróbki mechanicznej lub zautomatyzowanych procesów,
- **uszkodzenia modelu w trakcie usuwania podpór** – przeważająca część prac w trakcie postprocessingu polega na usunięciu konstrukcji podporowych z modeli 3D i jest wykonywana za pomocą narzędzi ślusarskich czy środków chemicznych. W takim przypadku niezbędne są odpowiednia wiedza oraz umiejętności i doświadczenie osoby wykonującej postprocessing. Warto również nadmienić, że coraz częściej na rynku pojawiają się zintegrowane gniazda obróbcze dające możliwość przeprowadzenia złożonych operacji w procesie postprocessingu.

Przedstawione zostały tutaj możliwości powstawania wad, błędów czy uszkodzeń w ujęciu ogólnym. Każda technologia przyrostowa, a także każde urządzenie do druku ma swoją specyfikę, którą należy brać pod uwagę zarówno w samym procesie wytwarzania, jak również w procesie projektowania wyrobu. Wiele procesów przyrostowych podlega obecnie normowaniu w celu ujednoczenia kontroli jakości wyrobów, szczególnie w odniesieniu do odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle samochodowym czy lotniczym. Wytwarzanie przyrostowe stanowi zatem szerokie zagadnienie, które z punktu widzenia produkcji przemysłowej wymaga dalszych prac nad jego rozwojem, normowaniem i kontrolą.

## 4. TECHNOLOGIE PRZYROSTOWE W ŁAŃCUCHU DOSTAW

### 4.1. Korzyści wynikające z zastosowania druku 3D

W literaturze przedmiotu można doszukać się wielu definicji łańcucha dostaw. Jedna z nich mówi o tym, że łańcuch dostaw to fizyczna sieć, która rozpoczyna się u dostawcy, kończy zaś u ostatecznego klienta. Obejmuje ona aspekty związane z rozwojem produktu, zakupami, produkcją, fizyczną dystrybucją i usługami posprzedażowymi, jak również dostawami realizowanymi przez zewnętrznych oferentów [111].

Zastosowanie druku 3D w przedsiębiorstwie produkcyjnym może się w znacznym stopniu przyczynić do zmian w funkcjonowaniu całego łańcucha dostaw. Kluczowe korzyści zostały zaprezentowane na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Korzyści wynikające z zastosowania druku 3D

Na podstawie rys. 4.1 można wnioskować, że korzyści wynikające z wdrożenia wytwarzania przyrostowego w przedsiębiorstwie są związane przede wszystkim:

- **ze skróceniem łańcucha dostaw i czasu dostaw** – w tradycyjnym podejściu łańcuchy dostaw są z reguły bardzo długie i zbudowane z wielu szczebli. Dotyczy to zarówno strony zaopatrzenia, jak i dystrybucji. W poszczególnych ogniwach, jak i na ich styku utrzymywane są zapasy produktów, które generują koszty i zamrażają ogromny kapitał obrotowy. Jak podają K. Rutkowski oraz B. Ocicka, koszty łańcucha dostaw w firmach produkcyjnych to z reguły 60-90% wszystkich kosztów – mogą stanowić nawet ponad 80% udziału w ich przychodach [97]. Procesy związane z poszukiwaniem podwykonawców, organizowaniem przetargów, negocjowaniem umów z dostawcami są często czasochłonne. Wdrożenie technologii przyrostowych pozwala ograniczyć współpracę z firmami zewnętrznymi, co skutkuje redukcją formalności do minimum, a przy tym oszczędza czas i pieniądze. Zastosowanie druku 3D może więc prowadzić do zmniejszenia i zwężenia zewnętrznego łańcucha przez redukcję liczby ogniw włączonych w proces tworzenia wartości produktów. Dzięki temu stanie się on bardziej uproszczony i przejrzysty oraz dojdzie do zatarcia się granic między projektowaniem, produkcją i dystrybucją [78]. Dodatkowo wykorzystanie technologii przyrostowych w przedsiębiorstwie może doprowadzić do przejścia od scentralizowanych do zdecentralizowanych łańcuchów dostaw. Firmy produkcyjne mogą zorganizować zakupy niezbędnych surowców bezpośrednio, wydrukować produkt i wysłać go do końcowego klienta [79]. Nastąpi wówczas przejście z rozbudowanych wieloszczeblowych struktur odległych geograficznie dostawców (przetwórców i dostawców komponentów), co w konsekwencji zredukuje koszty transakcyjne i logistyczne. Ponadto lokalna produkcja to dla firm swoiste zabezpieczenie, które w dobie pandemii stało się coraz trudniejsze do osiągnięcia,
- **ze skróceniem czasu projektowania i wprowadzania produktów na rynek (time-to-market)** – druk 3D pozwala na wytwarzanie prototypów w krótkim czasie i przetestowanie ich w warunkach rzeczywistych. W ten sposób inżynierowie mogą na bieżąco dokonywać zmian w projekcie, aż do momentu uzyskania pożądanego rezultatu. W literaturze przedmiotu techniki przyrostowe są wymienione również jako sposób kreowania popytu charakteryzującego się niskim ryzykiem [80]. Przy produkowaniu małych partii produktu oraz obserwacji reakcji z rynku możliwe jest określenie faktycznego zapotrzebowania. W przypadku gdy produkt zostanie pozytywnie przyjęty, możliwe jest uruchomienie produkcji masowej tradycyjnymi metodami. Pozwoli to na zaspokojenie potrzeb klientów na większą skalę,



- **z możliwością bezpośredniego zastosowania druku 3D do wytwarzania prototypu/wyrobów gotowych** – specyfika produkcji z wykorzystaniem druku 3D sprawia, że wytwarzanie prototypu/wyrobu gotowego może zostać ograniczone do jednej maszyny pracującej samodzielnie w technologii przyrostowej [6]. Drukarka 3D może kontynuować proces produkcji dopóty, dopóki ma do dyspozycji materiał odpowiadający procesowi wydruku oraz produkowany element nie przekracza przestrzeni roboczej maszyny. Dzięki wykorzystaniu odpowiednich technologii i materiałów możliwe jest również łączenie elementów. Jedną z zalet zastosowania druku 3D w przedsiębiorstwie produkcyjnym jest to, że istnieje możliwość wydrukowania pojedynczego elementu, bez uruchomienia całej linii produkcyjnej. Fakt ten powoduje, że w produkcji z wykorzystaniem technologii przyrostowych nie występują typowe wąskie gardła, które mogłyby zmniejszać efektywność całej linii przez zakłócanie płynności przepływu materiałów i powodować gromadzenie zapasów robót w toku oraz przestoje w pracy zasobów [128],
- **ze zmniejszeniem liczby operacji produkcyjnych dla pozycji/części** – w produkcji tradycyjnej zespół maszyn jest w stanie wytwarzać w szybkim tempie serię wyrobów i istnieje bezpośredni związek między złożonością a kosztami produkcji. Z kolei w procesach przyrostowych zespół elementów może zostać wykonany jako jedna część, co znacznie redukuje koszty (m.in. przez oszczędność czasu, materiałów dla elementów łączących oraz ograniczenie kosztów montażu). W związku z tym im bardziej skomplikowana część, tym opłacalność wytwarzania w metodach przyrostowych jest wyższa [21]. Tego typu rozwiązania są szczególnie potrzebne np. w branży lotniczej. Przykład może stanowić firma GE Aviation, która zajmuje się projektowaniem i produkcją silników lotniczych LEAP. Wykorzystuje ona drukowanie przestrzenne do produkcji dyszy paliwowych w silnikach lotniczych. Jak podaje firma, jedna dysza produkowana w sposób tradycyjny składa się z dwudziestu różnych części. Z kolei drukowanie dyszy z proszków metali zmniejsza wymagania montażowe, integrując liczbę części wymaganych w montażu w jedną część [120],
- **z możliwością redukcji masy i objętości elementów** – przez zastosowanie odpowiednich materiałów do druku 3D oraz możliwości drukowania części zawierających puste wewnętrzne przestrzenie możliwe staje się wyprodukowanie lżejszych i bardziej wytrzymałych elementów. Szczególnie istotne jest to w przypadku wytwarzania części do samolotów, helikopterów, samochodów, statków morskich czy pojazdów kosmicznych. Jako przykład ponownie można wskazać wykorzystanie technologii przyrostowych przez firmę GE Aviation. Wyprodukowane za pomocą druku 3D dysze paliwowe w silnikach lotniczych są o 25% lżejsze i pięciokrot-

nie bardziej wytrzymałe od dysz wyprodukowanych tradycyjnymi metodami [120],

- **ze zmniejszeniem strat związanych z oczekiwaniem na części i/lub narzędzia** – w każdym przedsiębiorstwie produkcyjnym zdarzają się sytuacje, których nie da się przewidzieć. Tego typu zdarzenia często wiążą się z awariami prowadzącymi do zatrzymania produkcji. W takim przypadku firmy są narażone na ogromne straty finansowe, które pogłębiają się z każdym dniem przestoju, co często jest spowodowane oczekiwaniem na dostarczenie narzędzi i/lub części zamiennych do maszyn czy innych urządzeń. W sytuacji gdy przedsiębiorstwo posiada drukarkę 3D, możliwa jest własna produkcja specyficznych elementów, części do linii produkcyjnych oraz personalizowanych narzędzi dla pracowników, niekiedy trudnych, czasochłonnych bądź niemożliwych do wytworzenia tradycyjnymi metodami [44, 50]. Druk 3D ma zatem ogromne znaczenie w kontekście idei predykcyjnego utrzymania ruchu,
- **ze zmniejszeniem powierzchni magazynowych** – stosowanie druku 3D pozwala na wytworzenie danego elementu w stosunkowo krótkim czasie. W związku z tym tradycyjne magazyny części zamiennych mogą być zastąpione magazynami cyfrowymi, które będą gromadzić bazy plików. W takim przypadku dane elementy zostaną wytworzone dopiero w momencie zgłoszenia zapotrzebowania przez klienta. W konsekwencji może to doprowadzić nie tylko do likwidacji magazynów, ale również zmniejszenia powierzchni hal produkcyjnych, w celu przejścia do systemu produkcji „na żądanie” [80],
- **z możliwością produkcji wyrobów/prototypów/narzędzi zgodnych z indywidualnymi potrzebami klienta** – druk 3D usprawnia produkcję „na żądanie”, co umożliwia skuteczniejsze dostosowanie popytu do podaży. Przez jego zastosowanie możliwe jest wytworzenie zindywidualizowanego produktu, po konkurencyjnej cenie i w szybkim czasie. Jest to szczególnie pożądane w branżach, w których klienci cenią różnorodność i możliwości indywidualizacji wyrobów, przez co cykle życia produktów są krótkie, a czas ich dostawy jest krytyczny [77]. Możliwość dopasowania zindywidualizowanych ofert do wszystkich klientów oraz włączenia ich w procesy projektowe i produkcyjne czyni łańcuch dostaw niezwykle elastycznym. Klienci będą w stanie sami projektować produkty, wprowadzać ewentualne modyfikacje do standardowych projektów i je personalizować [23]. Jest to niezwykle ważne ze względu na to, że w ciągu najbliższych lat wzrośnie znaczenie segmentu młodych konsumentów z pokolenia Z. Stanowią oni dużą grupę potencjalnych i atrakcyjnych nabywców, charakteryzujących się wysokim stopniem wykształcenia i zorientowania na najnowsze technologie, ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń mobilnych. Grupa ta posiada wygórowane oczekiwania, związane m.in. z wygodą w procesie nabywania produktów, natychmiasto-

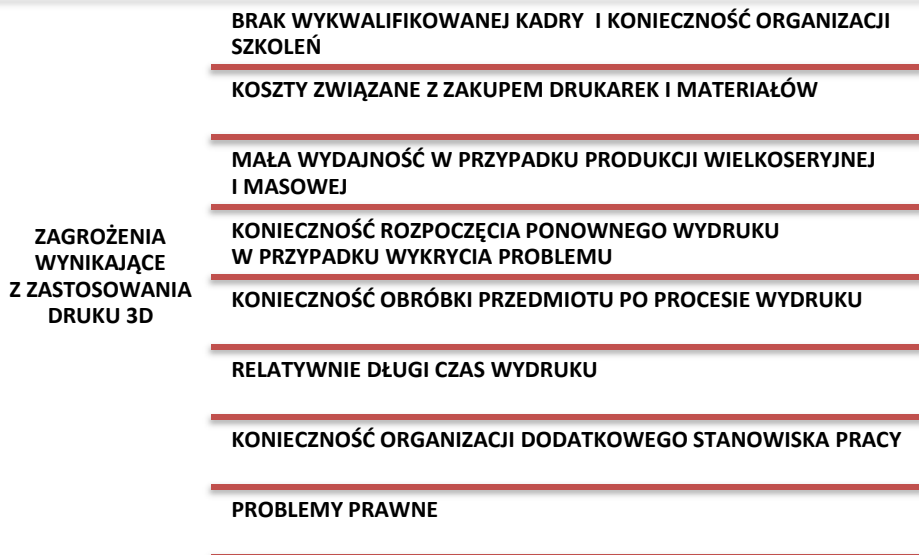
wym dostępem do zindywidualizowanych produktów, szybką realizacją zamówienia oraz niższym poziomem cen zakupu [56]. Istnieje ryzyko, że firmy, które nie dostosują się do tych wymagań, mogą szybko stracić swoje udziały w rynku,

- **z redukcją odpadów w procesie produkcji i zmniejszeniem negatywnego wpływu na środowisko naturalne** – technologie wytwarzania przyrostowego są zaliczane do ekologicznych, ponieważ w porównaniu z produkcją tradycyjną wykazują się relatywnie mniejszym zużyciem energii i generują znacznie mniej odpadów. Ponadto przez możliwość produkcji lżejszych środków transportu zmniejsza się nie tylko ilość zużytych materiałów, ale również paliw, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie wydzielania gazów spalinowych [40, 55]. Nie bez znaczenia jest również fakt, że ograniczenie fizycznego ruchu produktów (przez transport samochodowy, lotniczy czy morski) także doprowadza do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Produkcja lokalna z wykorzystaniem technologii addytywnych może się zatem przyczynić do wdrożenia zasad zrównoważonego rozwoju, które są tak ważne dla ochrony środowiska naturalnego,
- **z możliwością wytwarzania narzędzi do przetwórstwa tworzyw polimerowych** – przedsiębiorcy, by ściśle kontrolować jakość całego procesu drukowania i ograniczyć koszty, coraz częściej decydują się na zakup bądź projektowanie własnych linii do wytwarzania materiału. Ponadto w trosce o środowisko naturalne producenci pracują nad rozwiązaniami pozwalającymi przetworzyć odpady plastikowe w materiały do druku 3D. Filamenty są z powodzeniem wykonywane z tworzyw sztucznych wydobytych z dna oceanu, butelek plastikowych, a także starych wydruków i resztek materiałów pozostałych po procesie produkcyjnym [39]. Filamenty w 100% pochodzące z tworzyw pozyskanych z recyklingu w pełni wpisują się w ideę zrównoważonego rozwoju oraz zmniejszają oddziaływanie tworzyw sztucznych na otaczające środowisko.

Wszystkie wymienione aspekty z perspektywy czasu wpływają na redukcję kosztów całkowitych w przedsiębiorstwie, co stanowi główną zaletę zastosowania druku 3D w przedsiębiorstwie produkcyjnym [6]. Ponadto, jak już wcześniej wspomniano, wykorzystanie technologii przyrostowych w znacznym stopniu przyczynia się do wdrożenia popularnej w ostatnich latach koncepcji zrównoważonego rozwoju.

## 4.2. Zagrożenia wynikające z zastosowania druku 3D

Literatura przedmiotu ukazuje, że pomimo licznych zalet nie jest łatwo menedżerom zaakceptować przyjęcie technologii wytwarzania przyrostowego w swoich przedsiębiorstwach. Na rysunku 4.2 przedstawiono zagrożenia, jakie mogą wynikać w związku z wdrożeniem druku 3D w firmach.



Rys. 4.2. Zagrożenia wynikające z zastosowania druku 3D

Głównymi barierami przyjęcia produkcji addytywnej w przedsiębiorstwie są:

- **brak wykwalifikowanej kadry i potrzeba organizacji szkoleń** – w przypadku konieczności wytworzenia niewielkich elementów o skomplikowanych kształtach wymagane są duża wiedza, doświadczenie i umiejętności (zwłaszcza w kwestii przygotowania trójwymiarowego modelu). Wiąże się to często z potrzebą przeszkolenia pracowników lub pozyskaniem nowych specjalistów, co generuje dodatkowe koszty dla przedsiębiorstwa,
- **koszt związany z zakupem drukarek 3D i materiałów wykorzystywanych do druku** – na niekorzyść zastosowania druku 3D w przedsiębiorstwie wpływa dość wysoka cena urządzeń. Niekiedy bardzo drogie bywają również materiały wykorzystywane do druku 3D oraz urządzenia stosowane w postprocessingu [136]. Przykład mogą stanowić chociażby żywice fotoutwardzalne, czy też proszki ze stopów metali szlachetnych, których cena przekracza często możliwości finansowe przedsiębiorstw,
- **mała wydajność w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej** – specyfika pracy drukarek 3D powoduje, że w większości przypadków koszty związane z wydrukiem jednego elementu będą stałe (lub zbliżone), niezależnie od liczby wyprodukowanych elementów tego samego rodzaju. Z kolei w tradycyjnych procesach produkcyjnych im większa liczba wyprodukowanych części, tym (z reguły) koszty jednostkowe są niższe. Zastosowanie druku 3D w produkcji wielkoseryjnej lub masowej zwykle okazuje się więc nieopłacalne [6],

- **konieczność rozpoczęcia ponownego wydruku w przypadku wykrycia problemu** – w większości przypadków, przy zaniku zasilania w czasie druku 3D, i/lub gdy model zostanie oceniony jako niezgodny (np. z powodu zacięcia się filamentu na rolce, przesunięcia wydruku, rozdzielenia się warstw, zapchania rurki dyszy ekstrudera), należy dokonać analizy powstałych błędów, po czym proces wydruku musi się rozpocząć na nowo. Fakt ten generuje dodatkowy czas oraz nowe koszty związane z realizacją zamówienia,
- **konieczność zastosowania postprocessingu** – obróbka wykańczająca wydruków 3D może być procesem złożonym oraz czasochłonnym. Wydruk skomplikowanych geometrii często wymaga rozbudowanych i specyficznych wewnętrznych struktur podporowych, których usunięcie jest trudne. Niezbędne jest spore doświadczenie operatora maszyny oraz użycie odpowiednich narzędzi lub urządzeń do postprocessingu [105]. Obecnie producenci drukarek 3D oferują gotowe rozwiązania, które pozwalają m.in. na: wygładzanie powierzchni wydruków 3D, usuwanie nadmiaru żywic, usuwanie rozpuszczalnych struktur podporowych przy minimalnym wkładzie operatora [161, 165]. Niekiedy w procesach postprocessingu wymagana jest również dodatkowa obróbka, np. przez szlifowanie, toczenie, frezowanie, lakierowanie czy łączenie w zespoły, co generuje dodatkowe koszty i wydłuża czas otrzymania gotowego modelu,
- **relatywnie długi czas wydruku** – metody szybkiego prototypowania charakteryzują się relatywnie długim czasem wydruku, który przy przedmiotach o większych rozmiarach może trwać nawet ponad 24 h. Wiąże się to z koniecznością nieprzerywanej pracy maszyny oraz przeprowadzania kontroli pracy, która w zależności od metody, elementu i czasu wydruku powinna się odbywać co kilka godzin [18],
- **konieczność organizacji dodatkowego stanowiska pracy** – podczas wydruku drukarki 3D mogą powodować hałas i wytwarzanie sporej ilości ciepła, co powoduje nagrzewanie się pomieszczeń i urządzeń, które się w nim znajdują. Ponadto w trakcie druku 3D, przy zastosowaniu np. materiału ABS, wydzielany jest zapach charakterystyczny dla topionego tworzywa sztucznego, co w konsekwencji powoduje wydzielanie się szkodliwych oparów. Dłuższy kontakt z oparami może mieć zatem wpływ na komfort pracy i zdrowie użytkownika. W związku z tym drukarki 3D powinny znajdować się w wydzielonym pomieszczeniu, ponieważ nie nadają się do pracy w warunkach biurowych,
- **problemy prawne** – wraz z gwałtownym rozwojem technologii przyrostowych zaczęto zwracać uwagę na problemy prawne i organizacyjne związane z ich zastosowaniem. Dyskusje są związane przede wszystkim z trzema obszarami: własności intelektualnej, odpowiedzialności za produkty oraz bezpieczeństwa danych. Dużym zagrożeniem jest zastosowanie druku 3D do produkcji broni palnej, która w rękach zorganizowanych

grup przestępczych może się okazać ogromnym zagrożeniem. Przykładowo, w 2013 r. projekt pistoletu był ogólnie dostępny w Internecie. Świadczy to o tym, że przepisy prawa nie nadążają za rozwojem innowacji [10]. Warto również zwrócić uwagę, że problemy prawne i organizacyjne w branży druku 3D mogą obejmować przedsiębiorstwa, które w procesie realizacji zamówienia współpracują z agencją przemysłową, czy też korzystają z usług podwykonawców. W takim przypadku najważniejsze jest doprecyzowanie kwestii prawnych oraz świadomość praw i obowiązków z nich wynikających. Niezwykle istotne jest również zdefiniowanie i zorganizowanie procesów logistycznych, które będą związane z przepływem materiałów do produkcji i wyrobów gotowych, informacji, środków finansowych oraz usług we wszystkich ogniwach łańcucha dostaw.

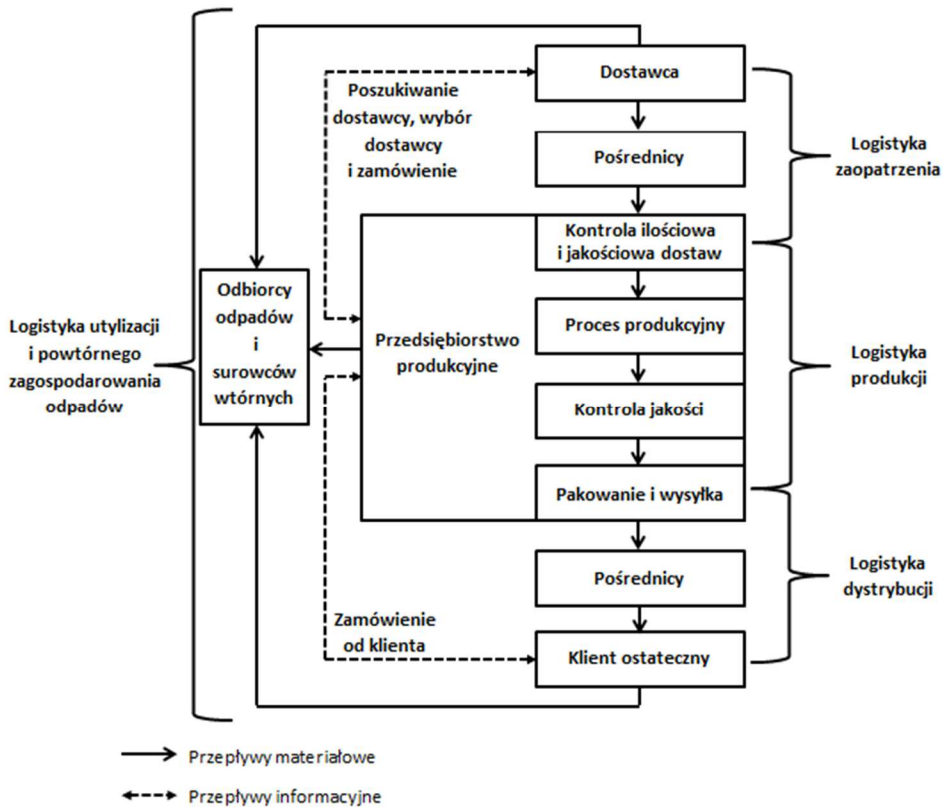
### 4.3. Wpływ technologii przyrostowych na procesy logistyczne zachodzące w przedsiębiorstwie

Obecnie cykl życia produktu ulega ciągłemu skracaniu i wymusza na przedsiębiorstwach redukcję czasu jego projektowania i wprowadzania na rynek. Dodatkowo konieczność indywidualizacji wyrobów gotowych powoduje, że niezbędny jest wzrost różnorodności ich wariantów [106, 135, 137, 139]. W zarządzaniu produkcją wyraźnie zarysowuje się zatem konieczność zastąpienia ekonomii skali ekonomią różnorodności. Organizacja procesów logistycznych zachodzących w przedsiębiorstwie odgrywa więc decydującą rolę w szybkości i efektywności reakcji na zmiany [38, 60].

Zgodnie z literaturą przedmiotu, omawiając procesy logistyczne zachodzące w przedsiębiorstwie należy wziąć pod uwagę dostawców, miejsca realizacji produkcji, klientów, odbiorców odpadów i surowców wtórnych, a także ewentualnych pośredników [49]. Na podstawie analizy działalności branży druku 3D można wysnuć wnioski, że przedsiębiorstwa korzystają głównie z systemu pull, gdzie czynności związane z realizacją procesu wytwórczego rozpoczynają się w momencie złożenia zamówienia przez klienta [6, 86]. Produkcja typu pull ma na celu „wyszczuplenie” procesu produkcyjnego, przez redukcję kosztów związanych m.in. z nadmiernym magazynowaniem zapasów [27].

Rysunek 4.3 przedstawia przykładowy przepływ usług, informacji, materiałów, wyrobów gotowych, odpadów i surowców wtórnych w świetle założeń systemu typu pull. Na jego podstawie można wnioskować, że wszystkie czynności związane z opracowaniem planów zamówień oraz zakupami są przypisane do logistyki zaopatrzenia. Wszelkie działania i operacje, w których surowiec zostaje przekształcony w wyrób gotowy, to procesy obejmujące logistykę produkcji. Logistykę dystrybucji obejmują czynności związane z przepływem towarów z przedsiębiorstwa produkcyjnego (bezpośrednio lub z udziałem pośredników) do klienta

ostatecznego. Z kolei przepływ odpadów i surowców wtórnych do określonej grupy odbiorców to zadania związane z logistyką utylizacji i powtórnego zagospodarowania odpadów (recyklingu).



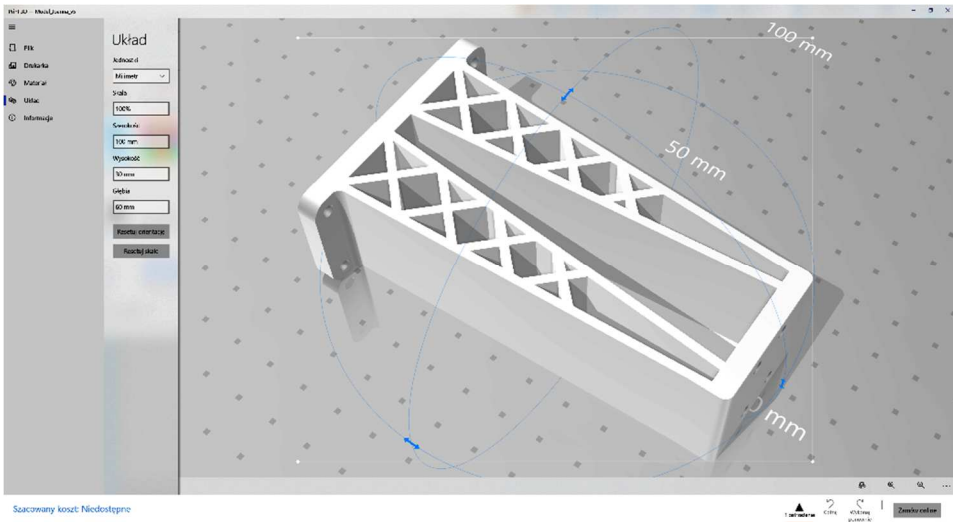
Rys. 4.3. Procesy logistyczne w przedsiębiorstwie w świetle założeń systemu *pull*

Liczne grono badaczy i przedstawiciele świata przemysłu stwierdzają, że druk 3D sprawdza się przede wszystkim w sytuacjach, gdzie kluczowa jest kustomizacja produktu [68, 95, 102]. Implementacja produkcji addytywnej zdecydowanie zmniejsza poziom zapasów, dlatego w pełni może być wykorzystywana w systemie Just in Time (dokładnie na czas). Łańcuch dostaw oparty na tych systemach pozwala klientowi najpierw zapytać, czy firma produkuje to, czego chce. Dopiero wówczas proces produkcyjny zostaje uruchomiony. Drukowanie przestrzenne prowadzi zatem do otrzymania pożądaných efektów zwłaszcza tam, gdzie właściwości produktu są ściśle zależne od woli klienta. Do takich typów produkcji zalicza się: projektowanie na zamówienie (ETO – Engineering to Order) oraz produkcję na zamówienie (MTO – Make to Order) [114]. Można więc

zaryzykować stwierdzeniem, że obecnie technologie przyrostowe nie są odpowiednie do zastosowania we wszystkich przypadkach.

#### 4.4. Usługi druku 3D

W miarę upływu czasu druk 3D zyskuje swoją popularność nie tylko w sektorze przemysłowym, ale również w obszarze klientów indywidualnych. Powstało wiele serwisów z gotowymi, często darmowymi, projektami w formacie STL (np. thingiverse.com, youmagine.com, myminifactory.com). Serwisy te skupiają często pasjonatów druku 3D, którzy za swoją pracę nie oczekują korzyści finansowych. Ponadto w ofertach firm z branży szybkiego prototypowania na stronach internetowych przedsiębiorstw pojawiła się możliwość zamawiania już zaprojektowanych modeli. Zadaniem klienta jest wówczas jedynie akceptacja modelu lub dobór precyzyjnych cech, takich jak materiał bądź kolor. W takim przypadku zadania nabywcy są uproszczone, ponieważ nie potrzebuje on oprogramowania do modelowania, czy też modyfikacji plików STL. Narodziła się zatem potrzeba stworzenia narzędzi, które w łatwy sposób umożliwią jedynie podgląd pliku, bez konieczności instalacji nowych programów i zajmowania dodatkowego miejsca na dysku komputera. Przykład takiego rozwiązania może stanowić narzędzie Print 3D, należące do firmy Microsoft Corporation, które umożliwia podgląd pliku w formacie STL i zlecenie jego wydruku bez konieczności instalacji dodatkowych aplikacji (rys. 4.4).

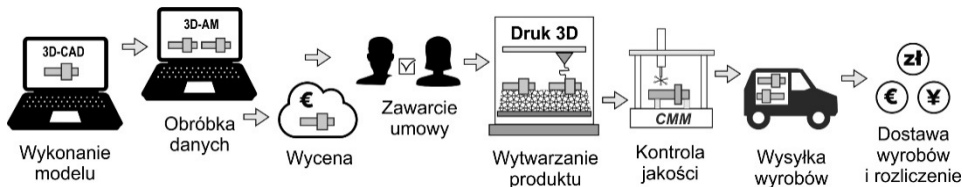


Rys. 4.4. Przykładowy model badawczy przedstawiony w programie Print 3D



Minimalnymi wymaganiami do obsługi Print 3D jest posiadanie systemu operacyjnego Windows 10 w wersji 15063.0 (lub nowszej) bądź Xbox One. Posiadając plik w formacie .STL na dysku komputera, wystarczy kliknąć przycisk *Otwórz*. Narzędzie uruchamia się wówczas automatycznie, a na ekranie pojawia się podgląd modelu. Narzędzie to daje możliwość zlecenia wydruku danego modelu urządzeniom podłączonym do komputera, jak i posiadającym łączność wi-fi. W przypadku wykorzystywania starszych rozwiązań wymagana jest ciągła komunikacja drukarki 3D z komputerem. Dane mogą być również przenoszone za pośrednictwem nośników typu USB flash driver.

Ważne jest, że narzędzie Print 3D jest również połączone z platformą *i.materialise.com*, należąca do belgijskiej firmy Materialise [157], której jeden z oddziałów znajduje się w Polsce. Platforma ta daje możliwość wstępnej weryfikacji pliku 3D-CAD oraz przeprowadzenia automatycznej wyceny i wstępnej symulacji dotyczącej terminu realizacji zamówienia. Wprowadzenie takiego rozwiązania znacznie ułatwia zadanie producentom, jak również zwiększa satysfakcję potencjalnych klientów, którzy otrzymują niezbędne dla nich informacje niemal natychmiast po przesłaniu pliku 3D-CAD. Schemat realizacji zamówienia z wykorzystaniem platformy do automatycznej wyceny przedstawia rys. 4.5. Proces zamówienia i wyceny modelu na platformie *i.materialise.com* zaprezentowano na rys. 4.6.



Rys. 4.5. Schemat realizacji zamówienia z wykorzystaniem platformy do automatycznej wyceny modeli 3D-CAD

W tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, że coraz większa liczba producentów druku 3D wprowadza na swoich stronach internetowych platformy do automatycznej wyceny. Analiza rynku usług druku 3D w Polsce w 2019 r. na badanej grupie 80 przedsiębiorstw ukazuje, że zaledwie 8% firm na swoich stronach internetowych posiadało platformy do automatycznej wyceny. Z kolei badania przeprowadzone w kwietniu 2021 r. na badanej grupie 78 przedsiębiorstw (z uwzględnieniem dwóch nowo powstałych firm oraz likwidacji czterech biorących udział w badaniu z 2019 r.) wykazały, że liczba wprowadzonych platform zwiększyła się do 14% (rys. 4.7).

1 Oferta — 2 Adres dostawy i adres do faktury — 3 Szczegóły wyceny — 4 Potwierdzenie zamówienia

Numer wyceny: 1358313 Podaj numer referencyjny zamówienia **PRZESLIJ PLIK 3D**

---

1 Model\_badawczy.stl

Wym.: 100.00 x 60.00 x 30.00 mm  
Objętość: 54.12 cm<sup>3</sup>

Wybierz technologię: FDM

Wybierz materiał: ABS - white

Wybierz wykończenie: Normalne

Wydrukuj tę część szybciej

licz: 1

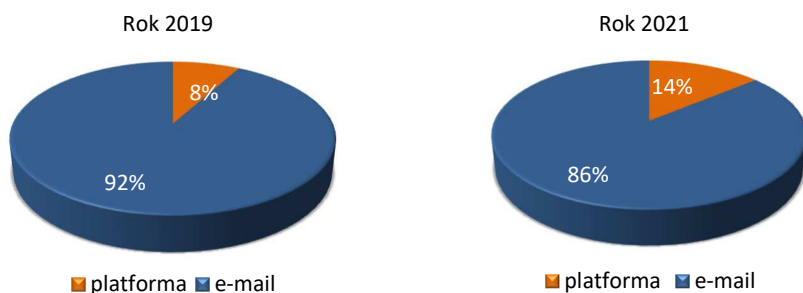
Cena jednostkowa: 901.81 PLN  
Podsuma: 901.81 PLN

Zachowaj orientację modelu  Nie wydrżaj

**Standardowy czas realizacji: 5 dni rob.**  
Części zostaną wysłane 23 lutego 2021

Cena części	901.81 PLN
Online Discount	-90.18 PLN
<b>Łączna cena</b>	<b>811.63 PLN</b>

Rys. 4.6. Widok platformy i.materialise.pl – wycena modelu



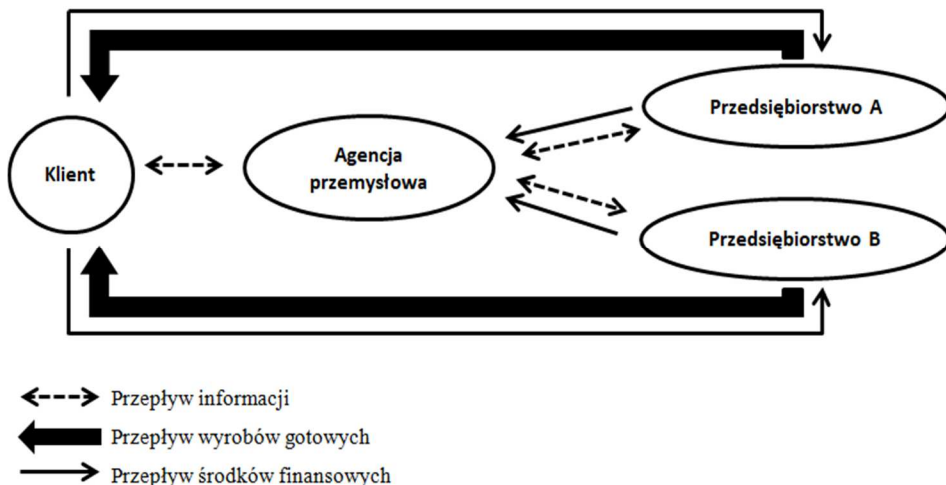
Rys. 4.7. Forma złożenia zapytania ofertowego w badanej grupie w 2019 i 2021 r.

Analizując dane przedstawione na rys. 4.7, można wysnuć wniosek, że w miarę upływu czasu przedsiębiorstwa dostrzegają korzyści, jakie daje wdrożenie tego typu rozwiązań. Po pierwsze, platformy ułatwiają zadanie producentom, ponieważ wspierają działania związane z przepływem informacji na linii klient–producent. Po drugie, zwiększa się satysfakcję potencjalnych nabywców, którzy otrzymują niezbędne dla nich informacje niemal natychmiast po przesłaniu pliku 3D-CAD.

## 4.5. Współpraca z agencją przemysłową

Agencja przemysłowa jest niezależnym sprzedawcą, autoryzowanym umową kontraktową do reprezentowania jednego lub kilku producentów w zakresie sprze-

daży towarów na ustalonym terytorium [135]. Tego typu rozwiązanie tworzy zatem konstrukcję opartą na dwóch umowach cywilnoprawnych: umowie agencyjnej zawartej pomiędzy agencją przemysłową a przedsiębiorstwem X oraz umowie o świadczenie usług zawartej bezpośrednio pomiędzy klientem a przedsiębiorstwem X (rys. 4.8).



Rys. 4.8. Schemat przepływu informacji, wyrobów gotowych i środków finansowych pomiędzy klientem, agencją przemysłową i przedsiębiorstwem produkcyjnym

Rozwiązanie zaprezentowane na rys. 4.8 może zapewnić wiele korzyści dla wszystkich podmiotów w nim uczestniczących, mianowicie:

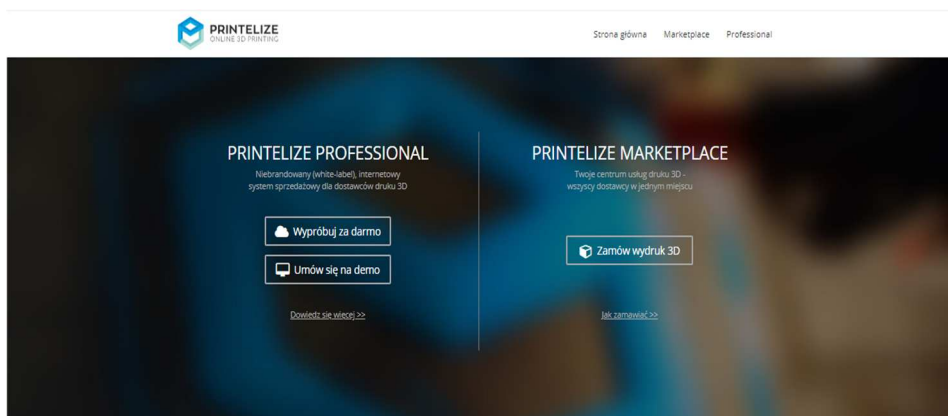
- z punktu widzenia wykonawcy (przedsiębiorstwa X) współpraca z agencją przemysłową pozwala na dotarcie do szerokiego grona potencjalnych klientów. Ewentualne roszczenia wobec agencji przemysłowej ograniczają się wyłącznie do kwestii wynikających z obowiązku lojalności i starannego jej działania,
- z punktu widzenia agencji przemysłowej jej zobowiązania wobec przedsiębiorców polegają wyłącznie na rzetelnym przedstawianiu ich ofert potencjalnym klientom – agencja przemysłowa nie ponosi bowiem odpowiedzialności za wykonanie przez przedsiębiorcę zobowiązania wobec klienta,
- z punktu widzenia klienta korzystanie z agencji przemysłowej pozwala na wybór najkorzystniejszej oferty spośród wielu przedsiębiorców. Ewentualne roszczenia z tytułu nienależytego wykonania umowy przysługują mu wyłącznie w stosunku do przedsiębiorcy, z którym klient zawarł umowę.

Wykonawca ponosi zatem finansową odpowiedzialność w zakresie dostarczenia klientowi ściśle określonego produktu w odpowiednim czasie, miejscu, w odpowiedniej ilości, jakości i po ustalonych kosztach [126].

Na rynku istnieją internetowe systemy sprzedażowe, które powstały z myślą o firmach oferujących usługi druku 3D. Stanowią one miejsce, w którym spotykają się zlecający wydruk 3D z przyjmującymi zamówienia. Zastosowanie tego narzędzia upraszcza:

- wyszukiwanie dostawców usług (z możliwością ich kategoryzacji),
- procedurę wyceny zamówienia,
- porównanie cen u określonych dostawców,
- proces zamawiania,
- przepływ informacji.

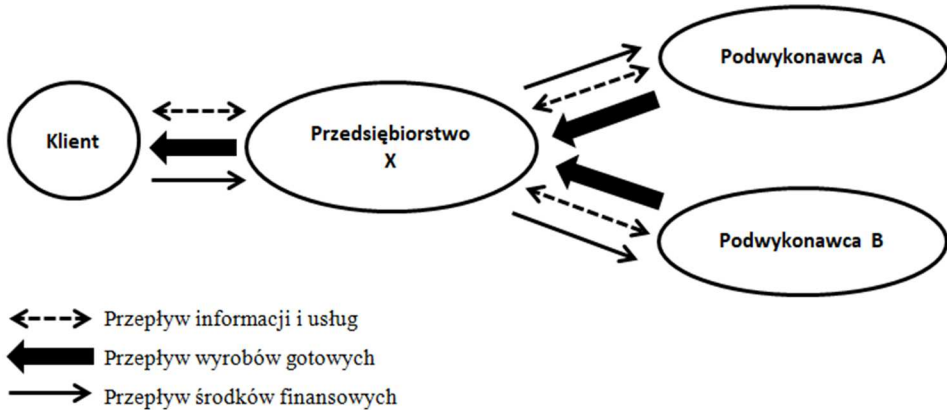
Przykład może stanowić globalna platforma *printelize.com*, która biorąc pod uwagę lokalizację klienta i wymagania co do modelu, wyszukuje i porównuje ceny u dostawców, a także wspiera działania związane z automatyzacją procesów zamówień [158]. Okno platformy zaprezentowano na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Widok platformy *printelize.com* [155]

## 4.6. Współpraca z podwykonawcą

Według Słownika języka polskiego PWN podwykonawca to firma lub osoba, który świadczy pracę na zlecenie głównego wykonawcy. W przypadku korzystania przedsiębiorstw z usług podwykonawców (rys. 4.10) realizacja zamówienia opiera się zatem na dwóch umowach cywilnoprawnych. Pierwsza z nich – umowa o świadczenie usług – zostaje zawarta pomiędzy klientem a przedsiębiorstwem X, kolejne tożsame – pomiędzy przedsiębiorstwem X a wybranymi podwykonawcami.

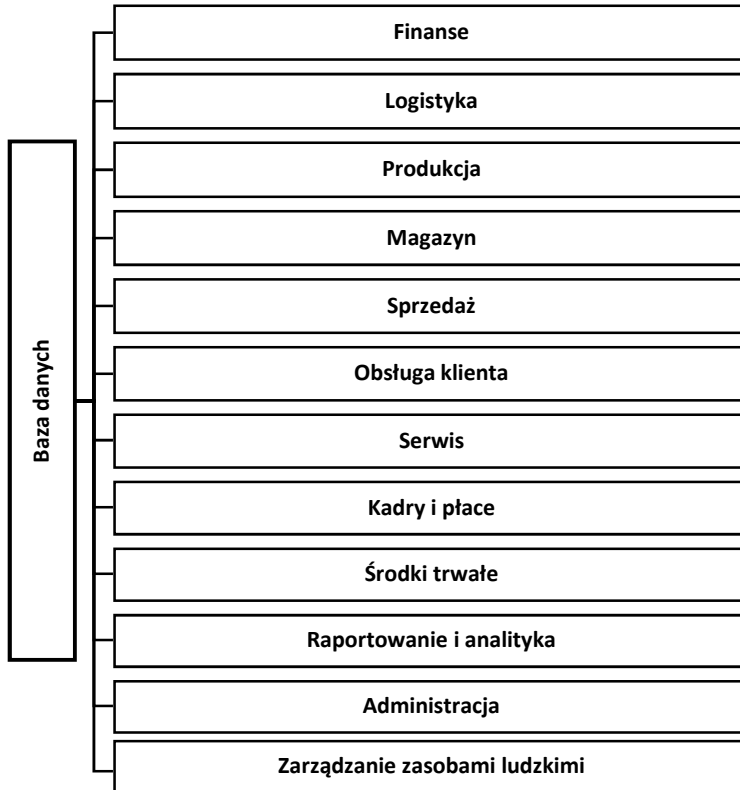


Rys. 4.10. Schemat przepływu informacji, wyrobów gotowych i środków finansowych pomiędzy klientem, przedsiębiorstwem i podwykonawcami

W ocenie sytuacji prawnej poszczególnych podmiotów kluczowe jest określenie odpowiedzialności za wykonanie umowy oraz skutków niewykonania zobowiązań przez przedsiębiorstwo X oraz podwykonawców.

Na podstawie informacji przedstawionych na rys. 4.10 można wnioskować, że oprócz kwestii prawnych zagrożeniem wynikającym z tego typu działalności przedsiębiorstw może się okazać problem z przepływem informacji oraz materiałów i/lub wyrobów gotowych w obrębie całego łańcucha dostaw. W tym miejscu warto również zwrócić uwagę na fakt, że ustalając termin realizacji zamówienia, zawsze należy uwzględnić czas na ewentualne naprawy błędów bądź ponowne uruchomienie produkcji w przypadku uzyskania wyrobu niezgodnego z oczekiwaniami klienta. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko utraty zamówień, które często są konsekwencją nieterminowości dostaw, a co za tym idzie – niedotrzymania warunków umowy.

W sytuacji gdy przedsiębiorstwo korzysta z usług podwykonawców, zarządzanie ryzykiem jest zatem kluczowe i wymaga kontroli na każdym etapie realizacji projektu. Ten trudny model biznesowy wymaga wdrożenia systemu wspomagającego zarządzanie. Na rynku dostępne są systemy klasy ERP, które umożliwiają obsługę całego cyklu życia projektu. Kierownicy, jak i zarząd firmy mogą monitorować cały łańcuch dostaw oraz bieżące koszty realizowanych przedsięwzięć, co w znacznym stopniu wspomaga procesy kontrolne i decyzyjne. Przykład poszczególnych modułów w ramach systemu ERP zaprezentowano na rys. 4.11.



Rys. 4.11. Przykładowe moduły w ramach systemu ERP

Na podstawie rys. 4.11 można zauważyć, że system ERP stanowi oprogramowanie modułowe, gdzie niezależne od siebie aplikacje (zaliczane do klasy Zintegrowanych Systemów Informatycznych), integrują procesy we wszystkich obszarach funkcjonalnych przedsiębiorstwa. Kompletny system ERP (ze wszystkimi modułami) jest popularny w średnich i dużych przedsiębiorstwach [135]. Stanowi on wsparcie w zakresie zarządzania zasobami, monitorowania przebiegu procesów, a także rozliczania operacji gospodarczych i oceny kondycji finansowej przedsiębiorstwa.

## 5. ADAPTACJA WYTWARZANIA PRZYROSTOWEGO W STRUKTURZE PRZEMYSŁU 4.0

### 5.1. Przemysł 4.0

Przemysł 4.0 (Industry 4.0) to stosunkowo nowe pojęcie w sektorze produkcyjnym. Stanowi czwarty etap rewolucji przemysłowej i polega na połączeniu świata fizycznego ze światem wirtualnym w czasie rzeczywistym. Koncepcja ta została zaproponowana po raz pierwszy w Hanowerze w roku 2011, w celu rozwoju niemieckiej gospodarki [102]. Struktura Przemysłu 4.0 obejmuje wiele obszarów nauki i przemysłu, do których należą m.in.: robotyzacja i automatyzacja, systemy teleinformatyczne, odnawialne źródła energii, inżynieria mechaniczna, systemy transportowe (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Integracja obszarów wykorzystywanych w strukturze Przemysłu 4.0

Głównym hasłem w ramach koncepcji Przemysłu 4.0 jest „digitalizacja”. Jak podaje słownik języka polskiego PWN, słowo „digitalizacja” oznacza „nadawanie postaci cyfrowej danym pisanym i drukowanym, zawartym na nośnikach magnetycznych lub innych”. Według raportu PwC Przemysł 4.0 należy rozumieć jako zaawansowaną transformację cyfrową łańcuchów wartości, produktów i usług oraz modeli biznesowych [92].

Digitalizacja i integracja łańcuchów wartości pionowych (wewnętrznych) i poziomych (zewnętrznych) ma zwiększyć produktywność, skrócić czas wdrażania nowych produktów oraz dostosować procesy do potrzeb klientów. Zakłada zintegrowane planowanie operacyjne, które obejmuje swoim zasięgiem cały łańcuch wartości, począwszy od zakupu i opracowania produktu, przez produkcję, logistykę, na usługach posprzedażowych kończąc [19, 62]. Środowisko Przemysłu 4.0 wspiera te procesy, gwarantując dostęp właściwie do każdej informacji, w dowolnym czasie i z dowolnego miejsca w czasie rzeczywistym [8, 109].

Digitalizacja wyrobu/usługi jest związana z rozszerzeniem oferty przedsiębiorstwa tak, aby w wyższym stopniu zaspokajać potrzeby nabywców [31]. Przykładami mogą być identyfikacja i możliwość śledzenia produktu, a także zintegrowane planowanie i realizacja zadań w czasie rzeczywistym [28].

Digitalizacja produkcji i procesów z nią związanych pozwala na wdrażanie nowych modeli biznesowych, np. tych znanych z e-biznesu [123]. Przykładem popularnego modelu jest „produkt jako usługa” (ang. product as a service). Pozwala on na redukcję kosztów inwestycyjnych, zastępując je operacyjnymi – abonentem, leasingiem itp. Przykładowo, firmy zamiast kupować roboty przemysłowe i maszyny technologiczne, mogą je wynajmować, a zamiast inwestować w drukarki 3D – korzystać z coraz szerzej dostępnych usług druku addytywnego.

W świetle założeń niemieckiego rządu końcowym etapem Przemysłu 4.0 powinna się stać nowoczesna fabryka, czyli Smart Factory [107]. Do najważniejszych technologii ją tworzących zalicza się:

- **Przemysłowy Internet Rzeczy (IIoT – Industrial Internet of Things)** – rozumiany jako ogół technologii umożliwiających podłączenie niemal każdego urządzenia do Internetu oraz zdalny dostęp i możliwość zarządzania nim z dowolnego miejsca posiadającego dostęp do Internetu. Przykładem aplikacji technologii IIoT są zintegrowane sieci monitorowania, które składają się z setek bezprzewodowych czujników. Ich wdrożenie jest szybsze, prostsze i tańsze w porównaniu z ich przewodowymi odpowiednikami [3, 139],
- **systemy cyberfizyczne (CPS – Cyber-Physical Systems)** – czyli zintegrowane systemy informacyjno-techniczne. Są to inteligentne i kompletne struktury obejmujące maszyny, które w sposób autonomiczny podejmują decyzje i mają możliwość globalnej komunikacji z zespołami z całego świata. Warunkiem wejścia maszyny w skład systemów cyberfizycznych jest jej wysoki stopień automatyzacji i informatyzacji, a także



stosowanie zaawansowanych algorytmów z dziedziny sztucznej inteligencji [134],

- **chmury danych** – nowoczesne technologie IT służące do przetwarzania i przechowywania danych, które są dostarczane przez usługodawcę na zasadzie outsourcingu. Dane są magazynowane w wirtualnej przestrzeni, czyli na serwerach poza lokalną siecią (w tzw. chmurze). Chmury pozwalają na korzystanie z zasobów w dowolnym momencie i miejscu [112]. Najbardziej popularny podział to chmury: prywatne, publiczne i hybrydowe,
- **Big Data** – zbiór dużej ilości danych, cechujących się różnorodnością, złożonością, których przetwarzanie i analiza są trudne, ale wartościowe. Tego typu dane wymagają odpowiedniej infrastruktury. Wprowadzenie i stosowanie Big Data nie tylko redukuje koszty przechowywania danych, ale również pozwala menadżerom na dostęp do kluczowych analiz łączących wiele obszarów [47, 48],
- **technologie addytywne (przyrostowe)** (Additive Manufacturing) – należące do grupy nowoczesnych technologii wytwarzania prototypu lub produktu. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod wytwórczych polegają na warstwowym dodawaniu materiału budulcowego na podstawie modelu 3D-CAD (uwzględniając odpowiednią obróbkę danych) [121],
- **cyberbezpieczeństwo** (Cybersecurity) – zespół różnego rodzaju procesów i technik, które mają zapewnić ochronę sieciom informatycznym, zasobom cyfrowym oraz urządzeniom sieciowym. Dynamiczny rozwój urządzeń z dostępem do Internetu oraz rozpowszechnienie przetwarzania i przekazywania danych powodują, że konieczne staje się zastosowanie systemów zabezpieczających dane. Wdrażanie środków bezpieczeństwa w celu minimalizacji zagrożeń cybernetycznych zewnętrznych oraz wewnątrz organizacji może być związane np. z ich kodowaniem [4, 43],
- **technologie wirtualnej rzeczywistości** (Virtual Reality) – trójwymiarowy, stworzony komputerowo obraz prezentujący przedmioty, obiekty lub zdarzenia. Przemysłowe zastosowanie tej technologii obejmuje chociażby szkolenia pracowników. Przez symulowanie niebezpiecznych sytuacji, warunków, czy też trudnych w obsłudze maszyn pozwala na naukę bez ponoszenia dodatkowych kosztów (związanych np. z uszkodzeniem sprzętu czy powstaniem wypadków przy pracy). Technologie wirtualnej rzeczywistości są stosowane również przez projektantów (dzięki temu praca nad danym prototypem jest możliwa bez konieczności jego wyprodukowania), a także do prezentowania cyfrowych bliźniaków [20],
- **technologie rozszerzonej rzeczywistości** (AR – Augmented Reality) – polegające na projektowaniu wszelkich informacji cyfrowych na ekranie dowolnego urządzenia. Wskutek tego prawdziwy świat jest uzupełniany sztucznymi elementami i nowymi informacjami. Technologie te dają

wsparcie inżynierom i technikom podczas ich pracy. Techniki rozszerzonej rzeczywistości mogą znaleźć swoje zastosowanie np. w szkoleniach pracowników produkcji, w planowaniu layoutu hali produkcyjnej, czy też efektywniejszej prezentacji parametrów maszyn [18, 85],

- **roboty współpracujące** (Collaborative Robots, Cobots) – nową generację robotów, które posiadają funkcję współpracy z ludźmi bez konieczności wygrodzeń ochronnych. Maszyny są łatwe we wdrażaniu (nie wymagają obsługi specjalistów podczas programowania), przez co stały się jednym z największych trendów technologicznych w robotyce w ciągu ostatnich lat [74, 110],
- **roboty mobilne** (AGV – Automated Guided Vehicles) – stosowane w intralogistyce zakładowej bezzałogowe, autonomiczne pojazdy służące do przewozu towarów wzdłuż określonej trasy lub ścieżki. Trasa ta jest wyznaczana za pomocą taśmy magnetycznej lub innej metody nawigacji. Roboty mobilne poruszają się samodzielnie za pomocą napędu elektrycznego, zasilanego akumulatorowo, a decyzje dotyczące wyboru ścieżki podejmują na podstawie aktualnych danych w czasie rzeczywistym [88],
- **sztuczną inteligencję** (Artificial Intelligence) – zbiór technologii pozwalających na uczenie się maszyn, a także rozwiązywanie przez nie złożonych problemów [112]. Wykorzystanie sztucznej inteligencji umożliwia bowiem szybkie i sprawne podejmowanie decyzji na podstawie uzyskanych danych i przesłanek z bazy wiedzy stworzonej i rozwijanej podczas codziennych zadań [122],
- **cyfrowe bliźniaki** (Digital Twins) – ideę związaną z koncepcją wirtualnego, cyfrowego odpowiednika fizycznego produktu. Jego rolą jest odwzorowanie głównych cech obiektu fizycznego lub procesu umożliwiającego symulację, predykcję i optymalizację w obszarach obsługi systemów, projektowania produktów i systemów wytwarzania oraz procesów [20],
- **interfejsy mobilne** – urządzenia przenośne, które zapewniają możliwość wglądu w informacje produkcyjne, sterowanie maszynami oraz systemami. Wykorzystywane są w nowoczesnym utrzymaniu ruchu [129],
- **RFID** (Radio-Frequency Identification) – systemy, które można uznać za część inteligentnej logistyki. Umożliwiają one bezprzewodową identyfikację i lokalizację wszystkich materiałów w obrębie całego łańcucha dostaw [129],
- **geolokalizację** – czyli określanie położenia geograficznego z wykorzystaniem np. GPS lub adresu IP.

Wdrożenie oraz utrzymanie koncepcji i technologii związanych z Przemysłem 4.0 będzie wyzwaniem dla nowoczesnych inżynierów [122]. Potrzebne są do tego kompetencje zarówno z zakresu automatyki, jak i informatyki. W związku

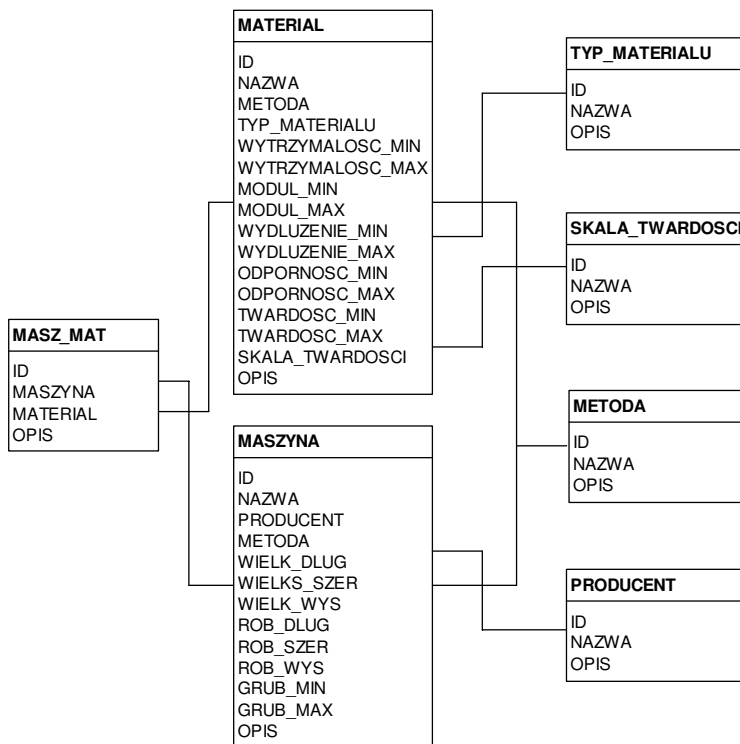
z tym konieczne wydaje się kształcenie wszechstronnych inżynierów – ITmatyków, którzy będą w stanie sprostać zadaniom powierzonym im w nowoczesnych fabrykach. Niezbędny jest zatem ciągły rozwój kompetencji, a także budowanie programów rozwoju kadry inżynierskiej [92].

Według informacji zawartych w licznych raportach polscy przedsiębiorcy optymistycznie odnoszą się do wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0. Poddając analizie sektor małych i średnich przedsiębiorstw (sektor MŚP), zauważa się wzrost zainteresowania i świadomość korzyści, jakie daje cyfryzacja. Przykładowo według badań firmy SIEMENS z roku 2020 liczba wdrożeń koncepcji Przemysłu 4.0 w Polsce stale wzrasta. W 2018 roku kształtowała się ona na poziomie 4,5%, z kolei w 2020 r. było to już 7,2%. Kolejną ważną informacją wynikającą z badań jest ponaddwukrotny wzrost zainteresowania wprowadzeniem koncepcji Przemysłu 4.0 w firmie (w 2018 r. – 11%, w 2020 r. – 25,5%). Badania przeprowadzone w grupie ankietowanych wśród przedsiębiorstw produkcyjnych sektora MŚP w 2020 r. wskazały, że wdrożenia wprowadzane w firmach w ramach idei Przemysłu 4.0 obejmowały najczęściej zagadnienia związane z optymalizacją produkcji na podstawie analityki danych, czy też predictive maintenance. Wśród nich ważną rolę odegrał również druk 3D, którego wdrożenie deklarowało 18,3% firm. Fakt ten był spowodowany głównie dynamicznym rozwojem wytwarzania przyrostowego w ciągu ostatnich lat [67, 68].

## 5.2. Narzędzia informatyczne wspomagające wybór metody wydruku

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych powoduje wzrost możliwych wariantów metod wydruku modeli 3D. Dobór określonej technologii zależy chociażby od użytego materiału, czasu wydruku, założonej jakości i dokładności oraz możliwości finansowych danego zleceniodawcy. Na wybór określonej technologii wydruku 3D ma zatem wpływ wiele powiązanych ze sobą czynników [98, 99].

Przez zastosowanie systemu do wspomagania decyzji, zawierającego w swojej bazie danych podstawową wiedzę związaną z danymi technologiami szybkiego prototypowania, a także informacje geometryczne o prototypie, proces ten staje się szybszy i łatwiejszy. System wspomagający decyzję umożliwia bowiem szybką selekcję technologii i urządzeń, na których drukowanie może zostać zrealizowane. Konstrukcja tego typu bazy może przedstawiać się w sposób zaprezentowany na schemacie (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Schemat systemu wsparcia decyzji wyboru techniki druku 3D [98]

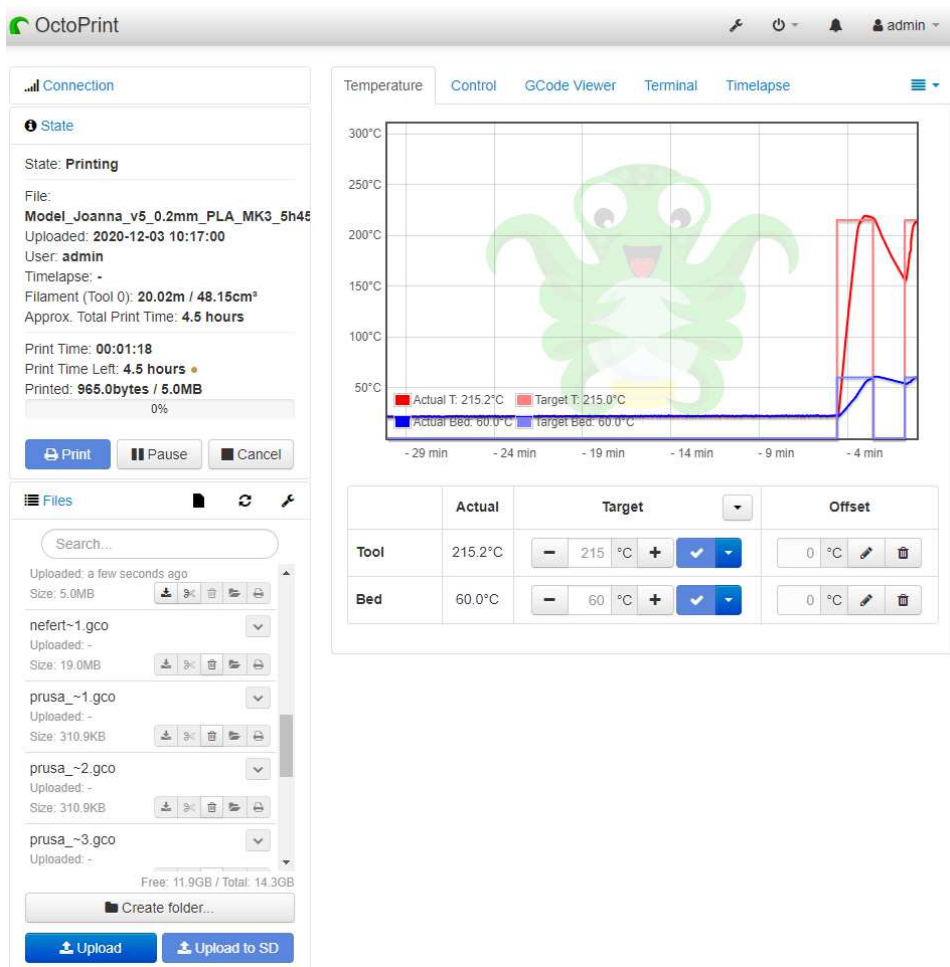
Założenia systemu decyzyjnego mogą się opierać na różnych platformach programowych, począwszy od najprostszych baz danych, a skończywszy na zastosowaniu sztucznej inteligencji. Każdy proces decyzyjny wymaga jednak utworzenia odpowiedniej bazy danych zawierającej określony wykaz urządzeń, które są do dyspozycji, z uwzględnieniem szczegółowych informacji dotyczących baz materiałowych, wielkości przestrzeni roboczych, dokładności geometrycznej danej maszyny, kosztów realizacji, wytrzymałości stosowanych materiałów, czy nawet możliwości wytwarzania obiektów teksturowanych. Możliwości systemu decyzyjnego są zależne od zgromadzonych w tym systemie informacji. Należy jednak pamiętać, że żaden system decyzyjny nie będzie dawał gwarancji idealnego doboru technologii druku 3D do danego wyrobu, może jednak w znacznej mierze przyspieszyć procesy podejmowania decyzji w zależności od założonych na wstępie kryteriów.

### 5.3. Narzędzia do zdalnego sterowania drukarką 3D

Wraz z nadejściem Czwartej Rewolucji Przemysłowej oraz z powodu zagrożenia epidemicznego jednym ze światowych trendów w zarządzaniu produkcją

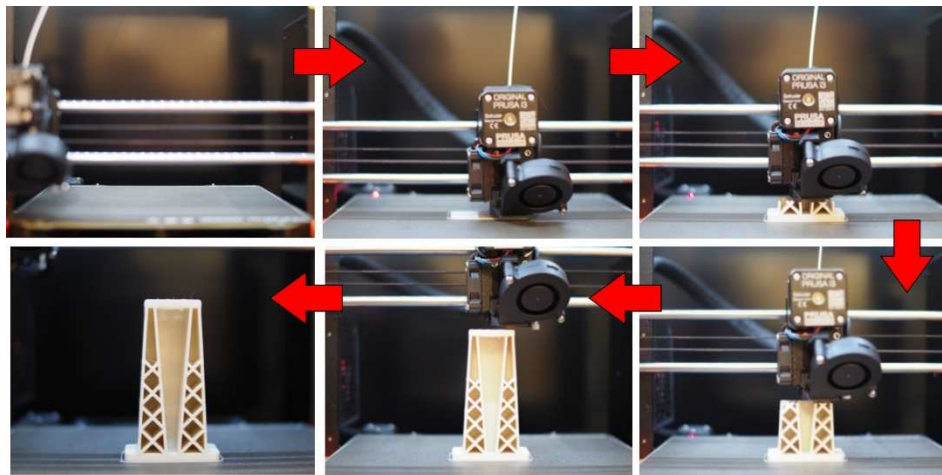
i zasobami stało się stosowanie systemów informatycznych umożliwiających pracę i monitorowanie procesu produkcyjnego online. Obecnie producenci drukarek 3D oraz usług IT opracowują rozwiązania pozwalające na zlecenie i monitorowanie procesów produkcyjnych w sposób zdalny, co w znacznym stopniu przyczynia się do zwiększenia wydajności produkcji [12, 83].

Na rynku istnieją gotowe narzędzia, które pozwalają na kontrolę i sterowanie drukarką 3D zdalnie, z dowolnego miejsca z dostępem do Internetu. Przykład stanowi narzędzie Octo-Print, które wraz z wykorzystaniem kamery daje możliwość kontroli i sterowania procesem wydruku za pomocą smartfona w czasie rzeczywistym [164]. Interfejs oprogramowania przedstawia rys. 5.3.



Rys. 5.3. Interfejs oprogramowania Octo-Print

Narzędzie Octo-Print zostało wdrożone w Laboratorium Systemów Szybkiego Prototypowania Politechniki Rzeszowskiej. Operator drukarki 3D ma zatem możliwość monitorowania procesu produkcyjnego w sposób zdalny. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko powstania wyrobu niezgodnego oraz uszkodzenia maszyny w momencie nieobecności operatora w Laboratorium. Poszczególne etapy procesu produkcyjnego kontrolowane z zastosowaniem narzędzia Octo-Print zostały zaprezentowane na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Kontrola procesu z wykorzystaniem narzędzia Octo-Print

## 5.4. Zastosowanie robotów współpracujących w druku 3D

Założenia Przemysłu 4.0 w dużej mierze skupiają się na pełnej automatyzacji procesów produkcyjnych, co w przypadku druku 3D było początkowo trudne do osiągnięcia. Obecnie, wraz z rozwojem robotyzacji, branża druku 3D dostrzega korzyści płynące z wdrożenia robotów współpracujących w swoich komórkach produkcyjnych. Wiele przedsiębiorstw dąży do tego, aby wytwarzanie wyrobów metodami szybkiego prototypowania było automatyczne i odbywało się przy niskiej ingerencji pracowników.

Przykład zastosowania robotów współpracujących do usprawnienia wytwarzania wyrobów metodami szybkiego prototypowania może stanowić firma Voodoo Manufacturing, która stanowi cyfrową fabrykę posiadającą ponad 200 drukarek 3D. Przez zastosowanie niskobudżetowego ramienia robota współpracującego UR10 Universal Robots firma zapewniła ciągłość produkcji przez całą dobę bez ingerencji człowieka. Bezprzewodowo monitorowane ramię robota odpowiada za załadunek i rozładunek płyt roboczych, a następnie układanie gotowych wydruków na przenośniku taśmowym. Firma przeprowadziła badania dla

komórki produkcyjnej składającej się z zestawu 9 drukarek. Dzięki funkcjonowaniu linii produkcyjnej przez całą dobę udało się zwiększyć wydajność produkcyjną trzykrotnie. Ponadto roboty UR są klasyfikowane jako „współpracujące” ze względu na wbudowane systemy, które powodują, że ramię robota automatycznie przestaje działać, jeśli napotka obiekt lub osoby na swojej trasie. Stanowi to dodatkowy atut dla przedsiębiorstwa, ponieważ funkcja ta umożliwia ludziom i robotom pracę obok siebie bez ogrodzenia, co jest zwykle wymagane w przypadku tradycyjnych robotów przemysłowych.

W Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej realizowane są prace nad wdrażaniem robotów współpracujących do linii produkcyjnej. Celem badań jest integracja drukarek 3D z robotami współpracującymi typu UR3 – Universal Robot, co zapewni ciągłość produkcji przez całą dobę bez ingerencji człowieka. Rysunek 5.5 przedstawia robota współpracującego z drukarkami 3D oraz zintegrowanym magazynem platform roboczych do drukarek.



Rys. 5.5. Robot współpracujący z drukarkami 3D oraz magazynem platform

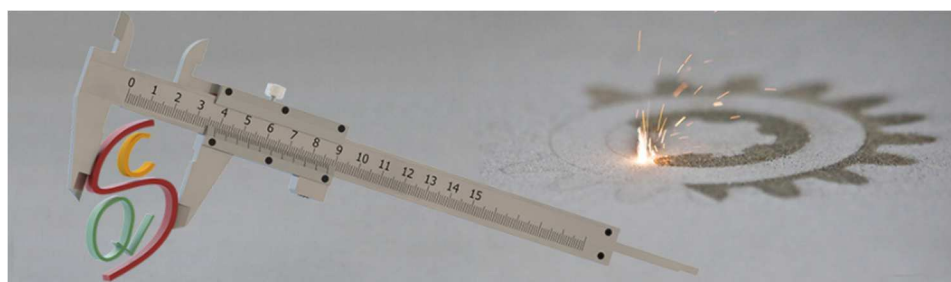
Rozwiązanie to umożliwia prowadzenie produkcji ciągłej w określonym horyzoncie czasowym. Dzięki zastosowaniu magazynu platform po zakończeniu procesu druku 3D, robot wyposażony w specjalnie zaprojektowany chwytak ściąga platformę ze stołu roboczego drukarki 3D, odstawia platformę do magazynu, z którego pobiera czystą platformę, instaluje ją na stole roboczym drukarki i uruchamia kolejny proces wydruku. Operacje mogą być powtarzane do momentu wy-

korzystania zasobów magazynu. System ten został zaprojektowany przez pracowników naukowych Politechniki Rzeszowskiej przy współpracy z firmą AERO PROXIMO, a jego rozwiązania techniczne zostały zgłoszone do ochrony patentowej. Dodatkowo system może być rozszerzony o tor jezdny dla robota i system skanowania optycznego, co pozwala na zwiększenie jego wydajności i funkcjonalności o realizację kontroli jakości z wykorzystaniem pomiarów bezstykowych i systemu transferu danych czy zdalnego monitoringu.

## 5.5. Narzędzia informatyczne wspomagające integrację procesów

W dobie Czwartej Rewolucji Przemysłowej niezwykle istotne jest stosowanie nowoczesnych systemów informatycznych, które pozwalają na integrację procesów wytwórczych. Przykładowo, obieg danych w chmurze niesie ze sobą wiele korzyści, m.in. dzięki możliwości otrzymania informacji w czasie rzeczywistym, co pozwala na usprawnienie prac w obrębie całego przedsiębiorstwa.

Przykład zastosowania nowoczesnych systemów informatycznych w branży druku 3D może stanowić platforma do kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo – SMART CLOUD QUALITIES (AM-SCQ), opracowana na Politechnice Rzeszowskiej [127]. Jej widok został przedstawiony na rys. 5.6.



**Procedura kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo  
SMART CLOUD QUALITIES (AM-SCQ)**

THINK VIEW

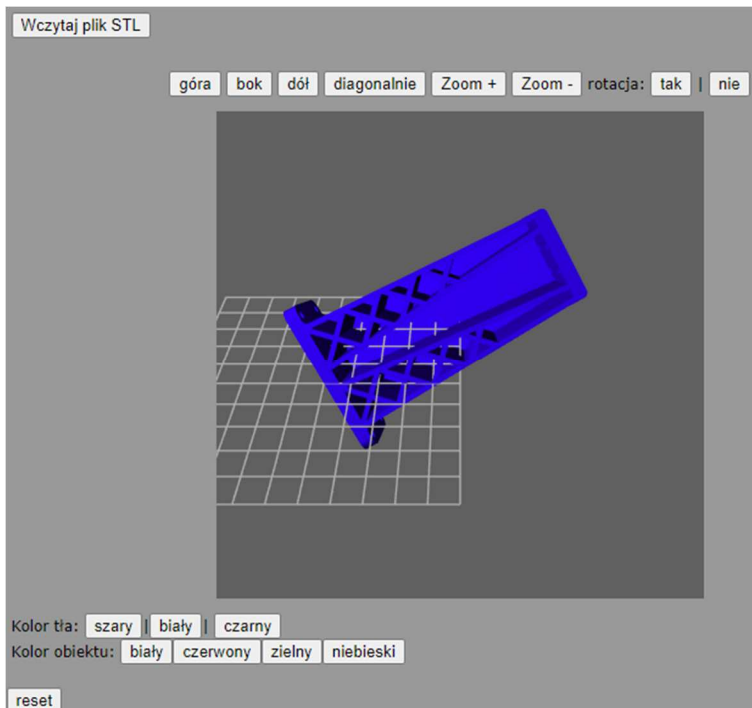
numer produktu	<input type="text"/>	projektant	<input type="text"/>
nazwa produktu	<input type="text"/>	data produkcji	dd.mm.rrrr <input type="text"/>
wykonawca	<input type="text"/>	data kontroli	dd.mm.rrrr <input type="text"/>
zamawiający	<input type="text"/>	uwagi	<input type="text"/>

- 0 - Parametry procesu
- 1 - Wstępna ocena wizualna
- 2 - Dokumentacja fotograficzna
- 3 - Kontrola za pomocą narzędzi
- 4 - Skaner ręczny
- 5 - Skanowanie zautomatyzowane
- 6 - Tomografia
- 7 - WMPa
- 8 - Kwalifikacja
- Generowanie raportu

Rys. 5.6. Widok platformy SMART CLOUD QUALITIES



Platforma SMART CLOUD QUALITIES (AM-SCQ) to nowoczesne rozwiązanie, które zawiera procedurę kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo. Pozwala na utworzenie raportu składającego się z zestawu kart. Platforma daje również możliwość podglądu modelu zapisanego w formacie STL, co zostało przedstawione na rys. 5.7.




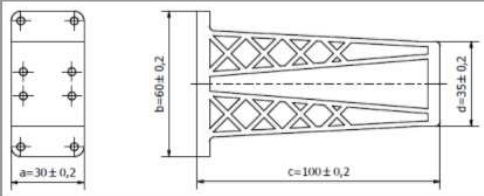
Rys. 5.7. Podgląd modelu w formacie STL za pomocą platformy SMART CLOUD QUALITIES

Przystępując do wypełnienia raportu, w pierwszej kolejności należy sprecyzować podstawowe informacje dotyczące: zamówienia, metody wydruku, urządzenia i materiału wykorzystanego do procesu wydruku, a także parametrów procesu.

Następnie użytkownik może wypełnić kartę kontroli jakości, która została podzielona na 7 głównych etapów: Wstępną ocenę wizualną, Dokumentację fotograficzną, Kontrolę za pomocą narzędzi, Kontrolę za pomocą skanera ręcznego, Kontrolę za pomocą skanera zautomatyzowanego, Kontrolę za pomocą tomografu oraz Kontrolę za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Dla każdego etapu przygotowano oddzielną kartę. W każdym z nich zostały podane informacje dotyczące przeprowadzenia danego procesu oraz wskazanych środków ochrony BHP. Użytkownik samodzielnie dobiera metody kontroli jakości

według własnych potrzeb. Nie jest zatem konieczne wypełnienie wszystkich kart. Po wypełnieniu karty należy dokonać kwalifikacji modelu (model zgodny/model niezgodny). Konieczne jest również podanie nazwiska osoby, która zatwierdziła dany etap [130]. Przykład wypełnionej karty dotyczącej kontroli za pomocą narzędzi przedstawia rys. 5.8.

Kontrola przy pomocy narzędzia: Suwmiarka

Wczytaj widok

Opis procesu

kolejność	Opis czynności
1.	a = 29,89
2.	b = 60,00
3.	c = 100,13
4.	d = 35,03
5.	
6.	

stwierdzono:  Model zgodny  Model niezgodny

Zatwierdził:

Joanna Woźniak

Rys. 5.8. Wypełnienie przykładowej karty kontroli

Ostatnia część raportu dotyczy ostatecznej kwalifikacji modelu oraz podania ewentualnych uwag dla klienta. Po wypełnieniu pożądaných parametrów możliwe jest wygenerowanie raportu do pliku pdf.

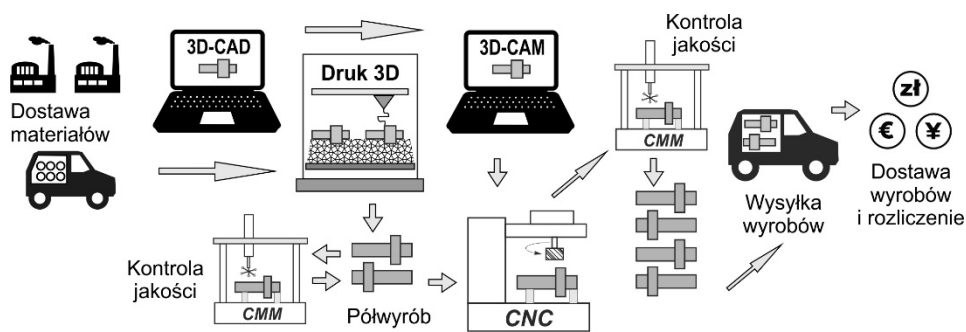
Zaletą platformy jest integracja sieciowo rozproszonych składników procesów kontroli jakości wyrobów wytwarzanych przyrostowo. Stanowi ona gotowy wzór formularza możliwy do użycia w chmurze wewnątrzzakładowej. Platforma ułatwia zadanie kontrolerom, którzy otrzymują wskazówki dotyczące przeprowadzenia poszczególnych procesów, pozwalając przy tym na pewną swobodę w wyborze sposobów weryfikacji jakości modeli 3D. W tym miejscu zasadne jest także przedstawienie podziału odpowiedzialności poszczególnych osób i komórek na każdym etapie realizacji kontroli jakości. Przypisanie pracownikowi realizacji danego procesu zwiększa jego poziom odpowiedzialności za wykonanie powie-

rzonych mu zadań. Ponadto otrzymanie w pełni profesjonalnego raportu kontroli jakości wpływa na zwiększenie satysfakcji klienta oraz wzrost jego lojalności.

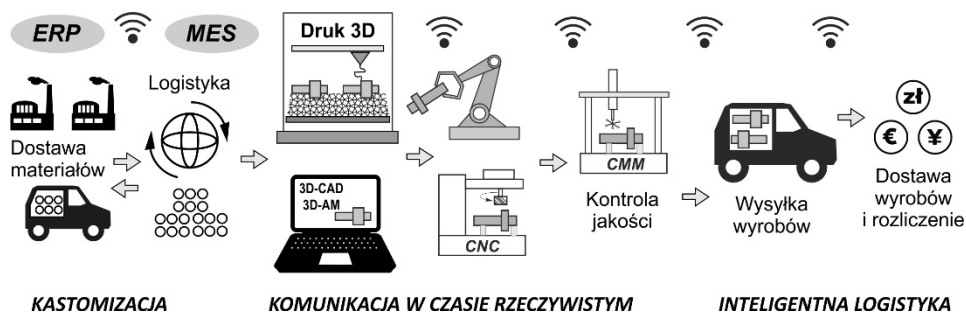
## 5.6. Zintegrowane systemy wytwarzania przyrostowego

Coraz większa liczba przedsiębiorstw realizujących usługi druku 3D odchodzi od produkcji tradycyjnej, gdzie wszystkie czynności związane z realizacją procesu wytwórczego są w całości wykonywane przez człowieka. W świetle założeń koncepcji Smart Factory przedsiębiorstwa produkcyjne powinny wdrożyć nowoczesne technologie charakterystyczne dla Czwartej Rewolucji Przemysłowej. Zalicza się do nich chociażby: Internet of Things, Big Data, systemy cyberfizyczne, chmury obliczeniowe, roboty współpracujące i roboty mobilne oraz systemy RFID i GPS.

Tradycyjny łańcuch dostaw (rys. 5.9) w nowoczesnych fabrykach powinien zostać zastąpiony systemem opartym na strukturze Przemysłu 4.0 (rys. 5.10).



Rys. 5.9. Tradycyjny łańcuch dostaw w branży druku 3D



Rys. 5.10. Łańcuch dostaw w branży druku 3D zgodny z koncepcją Przemysłu 4.0

Obecnie wielu producentów drukarek 3D dąży do stworzenia w pełni zautomatyzowanych linii produkcyjnych, zgodnych z koncepcją Przemysłu 4.0. Przykład może stanowić firma 3D Systems, której propozycją jest platforma o nazwie FIGURE 4. Platforma ta składa się z kombinacji kilku drukarek 3D wspomaganych ramionami robotów, które przenoszą gotowe części na stanowisko przetwarzania końcowego, gdzie zachodzi dodatkowe utwardzanie światłem UV. Firma zademonstrowała również moduł do kontroli jakości, gdzie ramię robota obraca gotową część przed skanerem, który z kolei dopasowuje ją do modelu 3D w celu sprawdzenia dokładności i zgodności. W serii produkcyjnej proces dostawy materiału jest również zautomatyzowany. Ważne jest, że platforma została skonfigurowana pod kątem wszystkich wymagań dotyczących środowiska fabrycznego, w tym powstających systemów gromadzenia danych w ramach Przemysłu 4.0. Firma 3D Systems wprowadziła również w swojej ofercie DMP 8500 Factory, które jest pierwszym prawdziwie skalowalnym, zautomatyzowanym i w pełni zintegrowanym rozwiązaniem do produkcji części metalowych za pomocą technologii addytywnych. Rozwiązanie to składa się z kilku modułów, w tym: modułów drukarki do wytwarzania części, wymiennych modułów drukowania (RPM) do transportu proszku do drukarek i gotowych części z drukarek, modułów zarządzania proszkiem do odpylania części na platformach roboczych przed recyklingiem niewykorzystanego proszku oraz modułów transportowych, które przenoszą RPM między drukarką a modułami proszkowymi.

Kolejny przykład zastosowania koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwach z branży szybkiego prototypowania stanowi firma Stratasys. Wprowadziła ona system ciągłego drukowania przestrzennego – Continuous Build 3D Demonstrator. Proces produkcyjny jest nadzorowany przez centralny system osadzony w chmurze. Każde z urządzeń przyrostowych pracujących w technologii FDM prowadzi niezależny proces wydruku 3D, który wymaga minimalnej ingerencji operatora. Po wytworzeniu rzeczywistego obiektu drukarka 3D automatycznie wysuwa model do przymocowanego pojemnika i natychmiast rozpoczyna kolejny proces drukowania. System ten pozwala więc na zapewnienie ciągłości produkcji i redukcję czasu oczekiwania na wytworzenie gotowego elementu. Firma Stratasys oprócz Demonstratora oferuje również rozwiązania, które są w pełni przystosowane do pracy w środowisku produkcyjnym opierającym się na dużych systemach robotów. Robotic Composite 3D Demonstrator to ramię robota, który posiada głowicę drukującą 3D. W przeciwieństwie do tradycyjnych drukarek 3D, gdzie liczba osi ruchu jest ograniczona do trzech, robot oferuje ich osiem. Materiały wykorzystywane do produkcji opierają się na kompozytach polimerowych wzmocnionych włóknem węglowym. Tego typu wysokowytrzymałe materiały mogą mieć wiele zastosowań, m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, elektromaszynowym czy obronnym.

## 6. OPIS REALIZACJI PRZYKŁADOWEGO PROJEKTU

### 6.1. Opracowanie modelu 3D-CAD

Modelem 3D-CAD, który posłużył do analizy, jest uchwyt lusterka samochodowego. Zamierzeniem autorów było, aby element obrany w pracy miał na tyle uniwersalny charakter, by mógł zostać wykorzystany w praktyce przez przedsiębiorstwa z branży automotive.

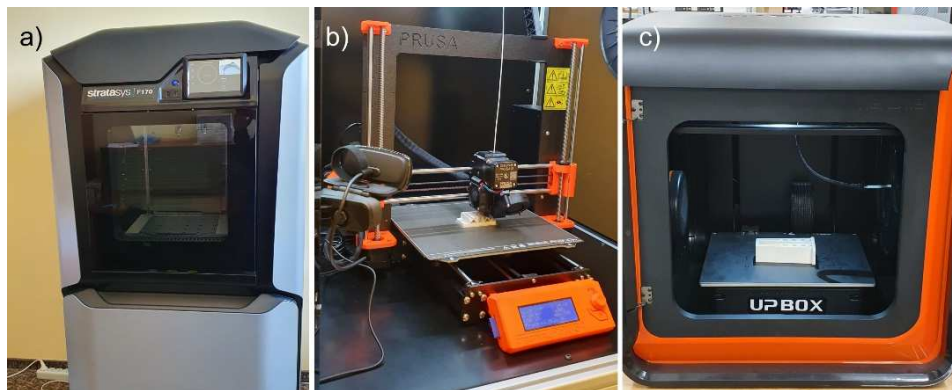
Proces wytwarzania elementu wykonanego w metodach przyrostowych rozpoczęto od zamodelowania wirtualnej geometrii obiektu w systemie 3D-CAD oraz zapisania go do pliku w formacie .STL. Do tego celu wykorzystano program Autodesk Inventor Professional 2019. Model opracowany w programie przedstawia rys. 6.1.



Rys. 6.1. Model 3D-CAD uchwytu lusterka samochodowego

Model badawczy powstał w laboratorium Katedry Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej. W procesie wytwarzania do badań wykorzystano następujące drukarki 3D: Object Eden 260V, drukarkę 3D STRATASYS F170, EnvisionTEC Vida, Prusa i3 MK3 oraz drukarkę UP BOX + (rys. 6.2 i 6.3).

Zestawienie i opis poszczególnych modeli badawczych zamieszczono w tab. 6.1.



Rys. 6.2. Drukarki 3D wykorzystujące proces wytłaczania polimeru termoplastycznego: a) urządzenie FDM – F170 Stratasys, b) urządzenie FFF – PRUSA, c) urządzenie MEM – UP BOX



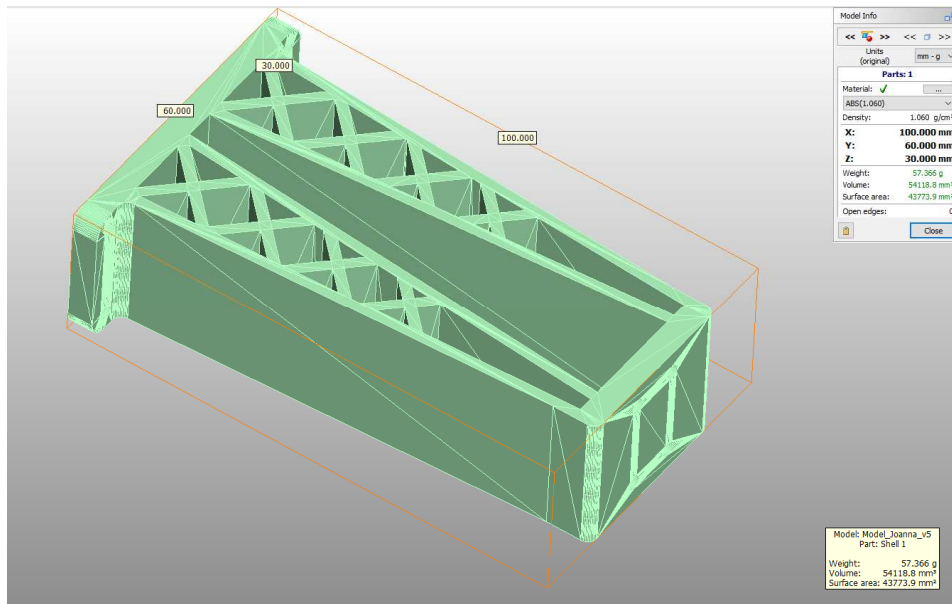
Rys. 6.3. Urządzenia wykorzystujące fotopolimeryzację: a) urządzenie DLP, b) urządzenia PolyJet

Tabela 6.1. Modele badawcze – opisy i oznaczenia

Lp.	Opis	Oznaczenie
1	Uchwyt lusterka samochodowego wykonany metodą PolyJet – materiał RGD 720	MB1
2	Uchwyt lusterka samochodowego wykonany metodą FDM – materiał ABS M30	MB2
3	Uchwyt lusterka samochodowego wykonany metodą DLP – materiał E-Partial	MB3
4	Uchwyt lusterka samochodowego wykonany metodą FFF – materiał PLA	MB4
5	Uchwyt lusterka samochodowego wykonany metodą MEM – materiał ABS	MB5

## 6.2. Kontrola poprawności zaprojektowanego modelu 3D-CAD

Przystępując do procesu szybkiego prototypowania, należy przeprowadzić kontrolę wymiarów zaprojektowanego obiektu (sprawdzić, czy model nie został przeskalowany). W związku z tym kolejny krok stanowi wstępna weryfikacja modelu po przeprowadzeniu obróbki danych. Proces ten został zrealizowany za pomocą programu 3D-Tool (rys. 6.4).

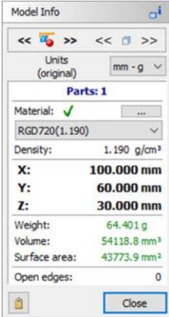

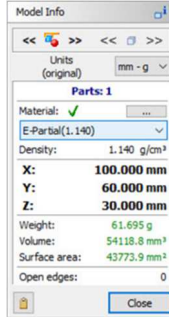
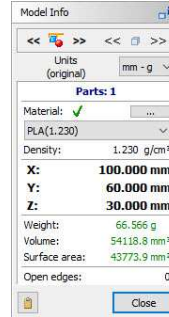
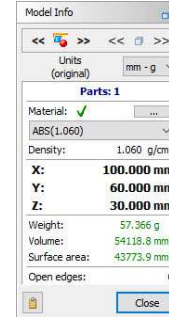


Rys. 6.4. Wstępna weryfikacja modelu uchwyty lusterka samochodowego po przeprowadzeniu obróbki danych

## 6.3. Przygotowanie danych procesowych

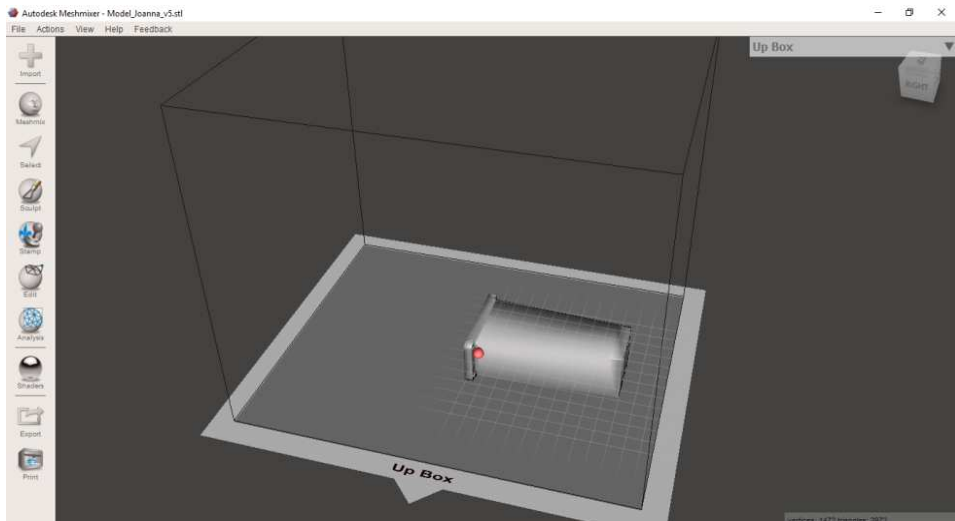
Następny etap stanowił dobór metod oraz materiałów do druku. Do wykonania modelu 3D w technologiach przyrostowych zostały wykorzystane następujące metody: PolyJet, FDM, DLP, FFF, a także MEM. Dobór metod wynikał z faktu posiadania przez Katedrę Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej drukarek 3D pracujących w tych technologiach. Warto również zaznaczyć, że metody te są często wykorzystywane do tworzenia prototypów, co dodatkowo wpłynęło na podjęcie ostatecznej decyzji.

Materiały wykorzystane do druku to kolejno: żywica fotopolimerowa RGD 720 termoplast ABS M30, żywica fotopolimerowa E-Partial, termoplast PLA i ABS. Dobór materiałów do druku wraz z informacjami na temat wagi modelu, gęstości i powierzchni przedstawiono na rys. 6.5.

MB1	MB2	MB3	MB4	MB5
 <p>Model Info</p> <p>Units (original) mm - g</p> <p>Parts: 1</p> <p>Material: RGD720(1.190)</p> <p>Density: 1.190 g/cm<sup>3</sup></p> <p>X: 100.000 mm</p> <p>Y: 60.000 mm</p> <p>Z: 30.000 mm</p> <p>Weight: 64.401 g</p> <p>Volume: 54118.8 mm<sup>3</sup></p> <p>Surface area: 43773.9 mm<sup>2</sup></p> <p>Open edges: 0</p>	 <p>Model Info</p> <p>Units (original) mm - g</p> <p>Parts: 1</p> <p>Material: ABS M30(1.070)</p> <p>Density: 1.070 g/cm<sup>3</sup></p> <p>X: 100.000 mm</p> <p>Y: 60.000 mm</p> <p>Z: 30.000 mm</p> <p>Weight: 57.907 g</p> <p>Volume: 54118.8 mm<sup>3</sup></p> <p>Surface area: 43773.9 mm<sup>2</sup></p> <p>Open edges: 0</p>	 <p>Model Info</p> <p>Units (original) mm - g</p> <p>Parts: 1</p> <p>Material: E-Partial(1.140)</p> <p>Density: 1.140 g/cm<sup>3</sup></p> <p>X: 100.000 mm</p> <p>Y: 60.000 mm</p> <p>Z: 30.000 mm</p> <p>Weight: 61.695 g</p> <p>Volume: 54118.8 mm<sup>3</sup></p> <p>Surface area: 43773.9 mm<sup>2</sup></p> <p>Open edges: 0</p>	 <p>Model Info</p> <p>Units (original) mm - g</p> <p>Parts: 1</p> <p>Material: PLA(1.230)</p> <p>Density: 1.230 g/cm<sup>3</sup></p> <p>X: 100.000 mm</p> <p>Y: 60.000 mm</p> <p>Z: 30.000 mm</p> <p>Weight: 66.566 g</p> <p>Volume: 54118.8 mm<sup>3</sup></p> <p>Surface area: 43773.9 mm<sup>2</sup></p> <p>Open edges: 0</p>	 <p>Model Info</p> <p>Units (original) mm - g</p> <p>Parts: 1</p> <p>Material: ABS(1.060)</p> <p>Density: 1.060 g/cm<sup>3</sup></p> <p>X: 100.000 mm</p> <p>Y: 60.000 mm</p> <p>Z: 30.000 mm</p> <p>Weight: 57.366 g</p> <p>Volume: 54118.8 mm<sup>3</sup></p> <p>Surface area: 43773.9 mm<sup>2</sup></p> <p>Open edges: 0</p>

Rys. 6.5. Materiały wykorzystane do wydruku poszczególnych modeli zaprezentowane w programie 3D-TOOL

Przed przystąpieniem do druku 3D należy przeprowadzić kontrolę poprawności zaprojektowanych modeli. Służą do tego programy, które wyszukują błędy oraz pozwalają na ich poprawę. Takie możliwości daje m.in. program Autodesk Meshmixer, którego interfejs został zaprezentowany na rys. 6.6.

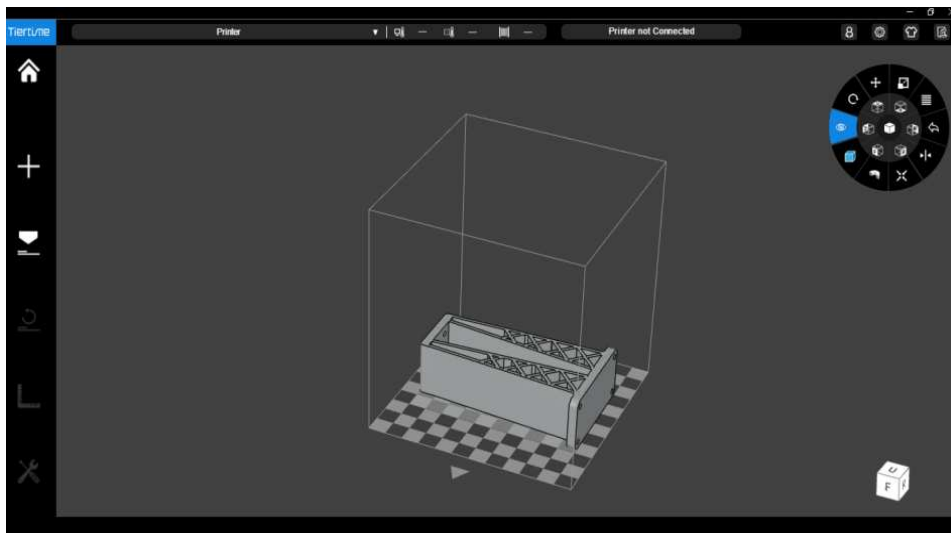


Rys. 6.6. Okno programowe Autodesk Meshmixer

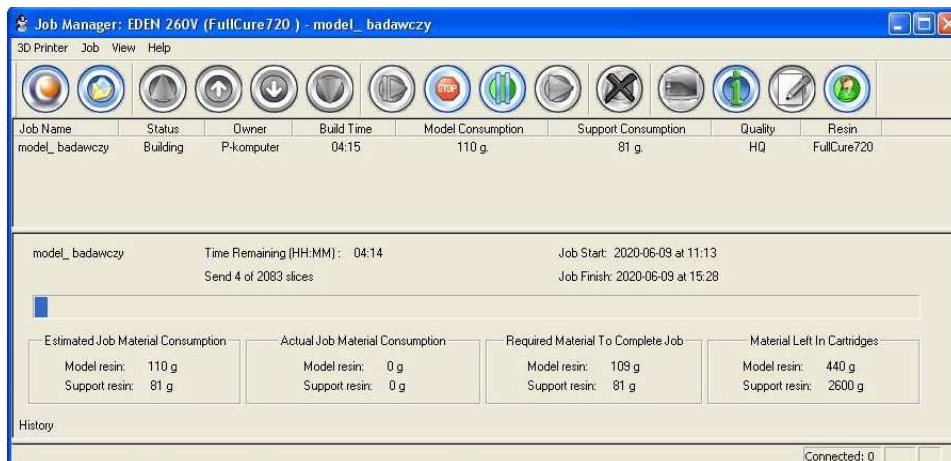
Kolejne czynności polegają na przeniesieniu zweryfikowanych plików do oprogramowania przeznaczonego dla wybranego procesu wytwarzania przyrostowego. Oprogramowanie to pozwala na przygotowanie parametrów procesu wy-



twórczego odpowiednich dla danej metody, ustawienie modelu w przestrzeni roboczej maszyny oraz oszacowanie czasu wydruku 3D. Na rysunku 6.7 został przedstawiony model w wirtualnej przestrzeni roboczej drukarki 3D pracującej w technologii MEM.

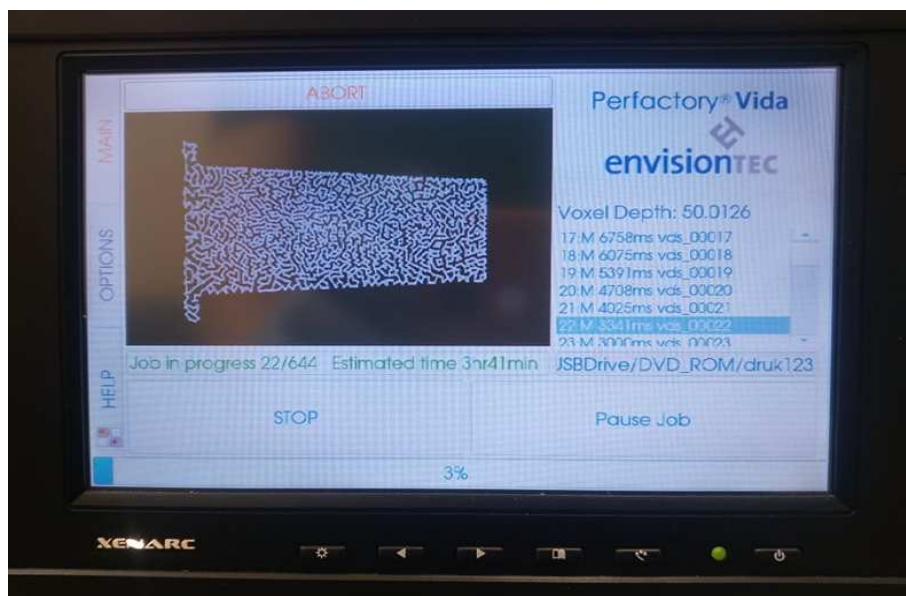


Rys. 6.7. Model uchwytu lusterka samochodowego przedstawiony w wirtualnej przestrzeni roboczej drukarki



Rys. 6.8. Interfejs oprogramowania sterującego maszyną PolyJet

W dalszej części procesu należy ustawić parametry drukarki oraz podzielić geometrię na warstwy. Na rynku istnieją drukarki 3D wyposażone w wewnętrzny komputer sterujący, na którego ekranie na bieżąco są podawane informacje na temat przebiegu procesu wykonywanego modelu, takie jak chociażby: numer obecnie wykonywanej warstwy, liczba warstw do wykonania, rodzaj materiału oraz waga modelu. Przykłady wybranych interfejsów metod PolyJet i DLP sterujących procesem pokazano na rys. 6.8 oraz 6.9.



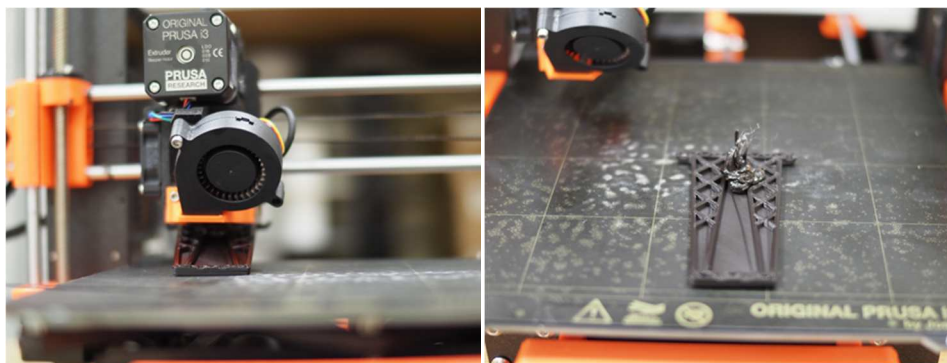
Rys. 6.9. Interfejs oprogramowania sterującego maszyną DLP

## 6.4. Kontrola wytwarzania

Z zasady badanie wizualne powinno być przeprowadzone jako pierwsze w kolejności wykonywanych badań jakościowych i powinno się odbywać już w trakcie trwania procesu. Na tym etapie możliwe jest wychwycenie błędów dotyczących procesu wytwarzania. Można wyróżnić dwie główne przyczyny, przez które operator musi przerwać proces lub zmodyfikować wybrane ustawienia urządzenia przyrostowego. Pierwszą z przyczyn jest nieodpowiednie przygotowanie drukarki 3D, drugą są źle przygotowane dane do procesu. Źle przygotowanie drukarki 3D może polegać np. na niewłaściwym wypoziomowaniu platformy roboczej urządzenia lub niedokładnym jej oczyszczeniu po poprzednim procesie. Z kolei źle przygotowane dane wynikają np. z nieodpowiednio przeprowadzonej obróbki danych podczas tessalacji (nieciągłość siatki trójkątów, odwrócenie wektora normalnego, trójkąty swobodne), gdzie może to skutkować m.in.

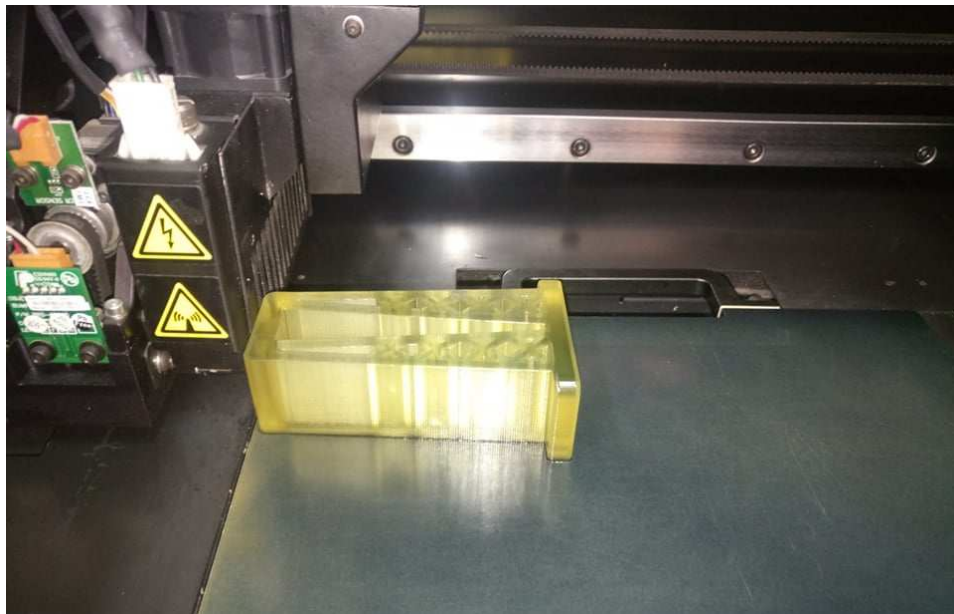
przerwaniem ciągłości modelu 3D. Dodatkowo na kolejnym etapie podczas generowania poleceń dla urządzenia w postaci g-code występujące błędy mogą spowodować zatrzymanie procesu lub nieprawidłowości podczas nakładania kolejnej warstwy materiału. Często też to, co generuje program dedykowany dla urządzenia oraz procesu, operator jest w stanie zweryfikować podczas próby wykonania detalu. Tam, gdzie program nie wykazuje żadnych błędów, urządzenie przyrostowe nie jest w stanie wykonać odpowiednich geometrii, np. cienkich ścianek poniżej wybranej wartości.

Przykład, w którym wydruk 3D został sklasyfikowany jako wadliwy na etapie wytwarzania, przedstawia rys. 6.10. Główną przyczyną powstania wyrobu niezgodnego było odklejenie się modelu od stołu roboczego, co skutkowało przerwaniem procesu przez operatora.

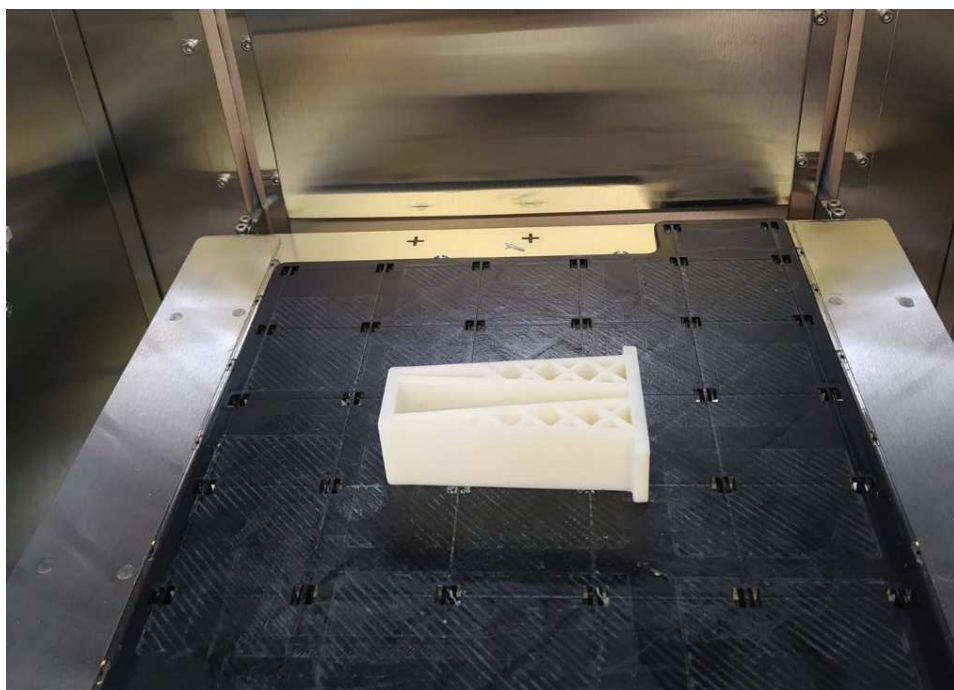


Rys. 6.10. Przykład odklejenia się wydruku 3D od platformy roboczej

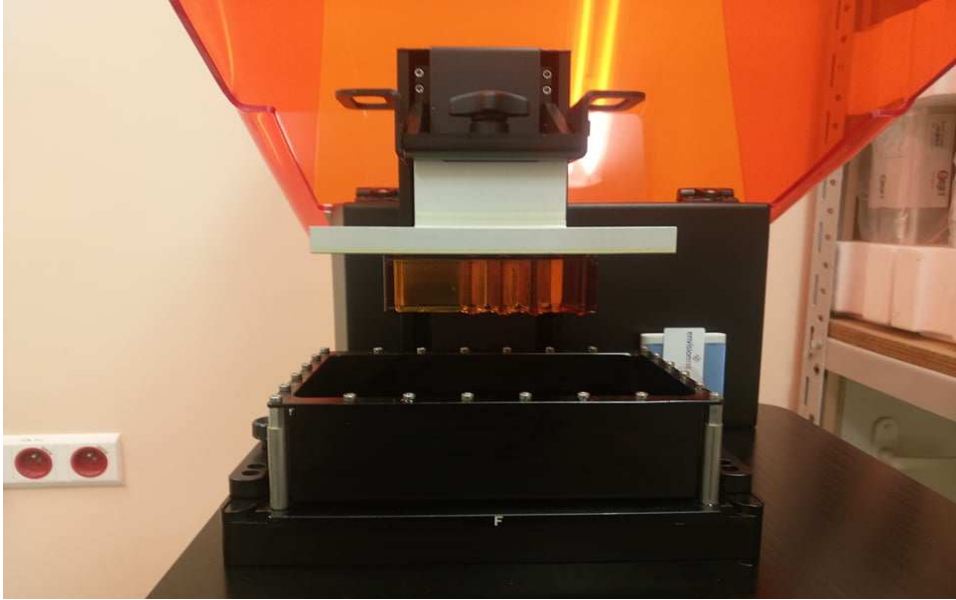
Dbłość o odpowiednie przygotowanie urządzenia oraz doświadczenie operatora pozwalają uniknąć błędów podczas wytwarzania prototypów i prototypowych części maszyn w metodach przyrostowych. Specyfika wybranej metody addytywnej warunkuje to, w jaki sposób przygotować urządzenie do druku 3D. Przestrzenie robocze są różne, a ich przygotowanie może zależeć od wielu czynników. Przykłady przestrzeni wytwórczej wybranych urządzeń pokazano na rys. 6.11-6.15. Dodatkowo na rys. 6.13 pokazano przestrzeń roboczą z układem odwróconym. Jest to związane z położeniem projektora odpowiadającego za naświetlanie i utwardzanie kolejnych warstw, znajdującego się pod zbiornikiem z fotonopolimerem.



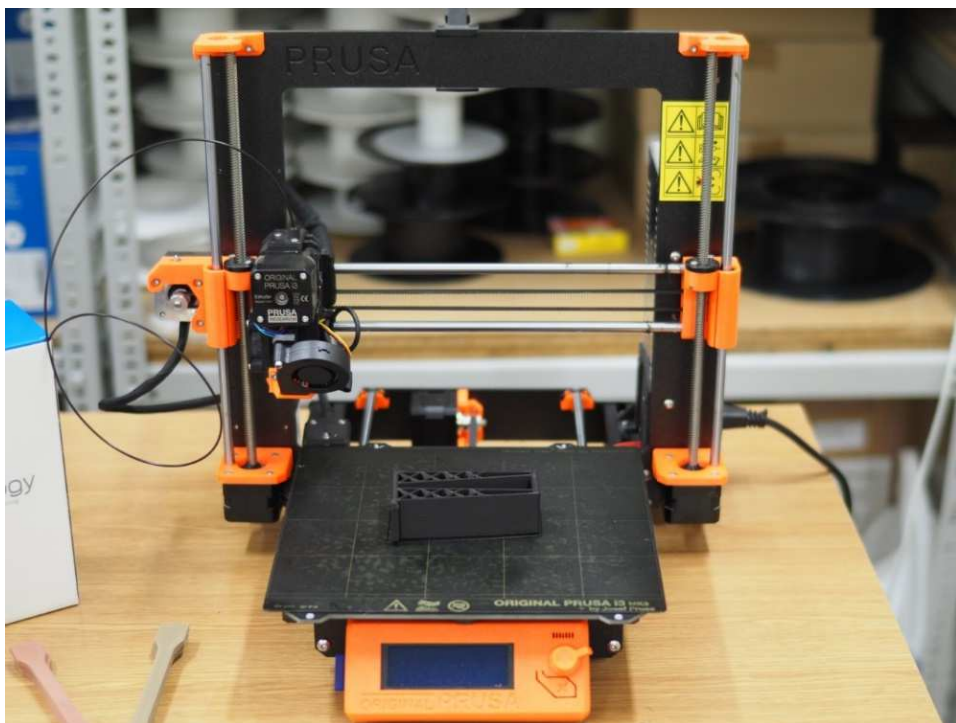
Rys. 6.11. Model badawczy w przestrzeni roboczej drukarki 3D pracującej w metodzie PolyJet



Rys. 6.12. Model badawczy w przestrzeni roboczej drukarki 3D pracującej w metodzie FDM



Rys. 6.13. Model badawczy w przestrzeni roboczej drukarki 3D pracującej w metodzie DLP



Rys. 6.14. Model badawczy w przestrzeni roboczej drukarki 3D pracującej w metodzie FFF



Rys. 6.15. Model badawczy w przestrzeni roboczej drukarki 3D pracującej w metodzie MEM

## 6.5. Postprocessing

Ostatni etap procesu wytwórczego stanowi postprocessing, czyli obróbka wykańczająca. Jako pierwszy przykład pokazano postprocessing dla modelu 3D wykonanego metodą PolyJet (rys. 6.16). W tym przypadku postprocessing można

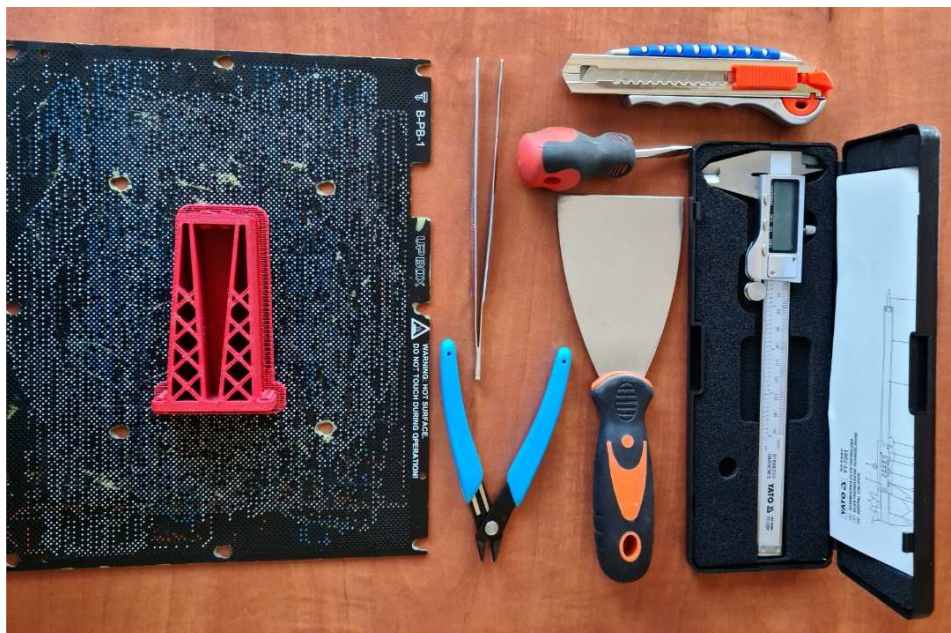


Rys. 6.16. Postprocessing modelu wykonanego metodą PolyJet:  
a) usunięcie z przestrzeni roboczej, b) usunięcie struktur podpierających

podzielić na dwa etapy: usunięcie (odcięcie) modelu z przestrzeni roboczej maszyny (rys. 6.16a) oraz usunięcie strumieniem wody pod ciśnieniem struktur podpierających (rys. 6.16b). Proces płukania modelu został wykonany za pomocą myjki ciśnieniowej Powerblast strumieniem wody pod ciśnieniem 12 MPa.

Kolejny przykład postprocessingu pokazano na modelu wykonanym w metodzie przyrostowej MEM (Melted and Extruded Modeling). W metodzie tej, jeśli nie występuje podwójny układ ekstruzji, nie ma możliwości wytwarzania podpór z innego materiału niż materiał modelowy. Na rysunku 6.17a przedstawiono podstawowe narzędzia ręczne potrzebne do mechanicznego usunięcia struktury podpierającej. Takimi narzędziami mogą być m.in. szpachelka, pęseta czy nóż introligatorski. Tego typu narzędzia często przy odpowiednim zamodelowaniu suportów pozwalają na ich całkowite usunięcie. Na rysunku 6.17b pokazano sposób odcinania modelu ze strukturą podpierającą od platformy roboczej w postaci płyty perforowanej przy użyciu szpachelki. Często, aby uniknąć pomyłki podczas wyznaczania granicy między modelem a podporą, można posiłkować się modelem 3D-CAD oraz suwmiarką, znając wybrane wymiary nominalne elementu.

a)



Rys. 6.17. Postprocessing modelu wykonanego metodą MEM: a) model wspornika na płycie perforowanej oraz podstawowe narzędzia ręczne

b)



Rys. 6.17 (cd.). Postprocessing modelu wykonanego metodą MEM: b) odcięcie modelu wspomnika wraz ze strukturą podpierającą od platformy roboczej w postaci płytki perforowanej

## 6.6. Kontrola wymiarowa i kształtowa wydruków 3D

### 6.6.1. Kontrola wizualna

Modele badawcze zostały sprawdzone pod względem niedoskonałości widocznych nieuzbrojonym okiem. Mianem badania wizualnego w pracy ocenie podlegały następujące cechy modelu: ogólne odwzorowanie modelu, zniekształcenia powierzchni, stan powierzchni, „efekt pajęczyny”, przesunięcia warstw, powstałe wyrwania.

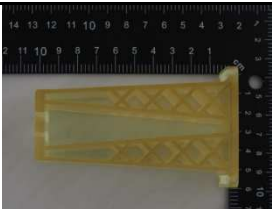
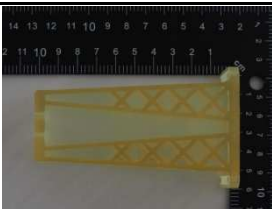
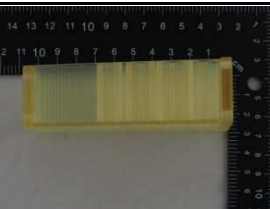
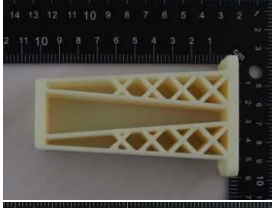
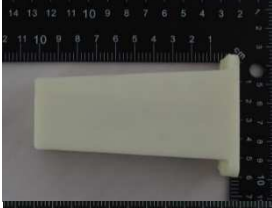

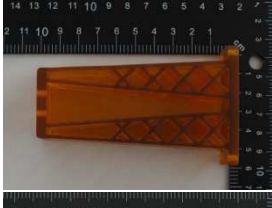

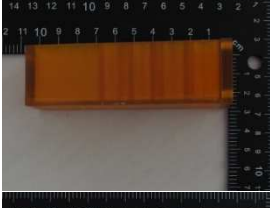

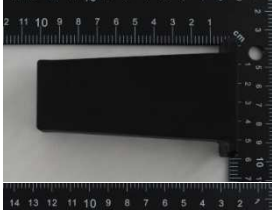

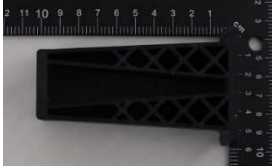


W tablicy 6.1 przedstawiono dokumentację fotograficzną kontroli wizualnej. Wstępna ocena wizualna pięciu modeli 3D nie wykazała niedoskonałości i uszkodzeń skutkujących ich dyskwalifikacją.

### 6.6.2. Kontrola za pomocą suwmiarki

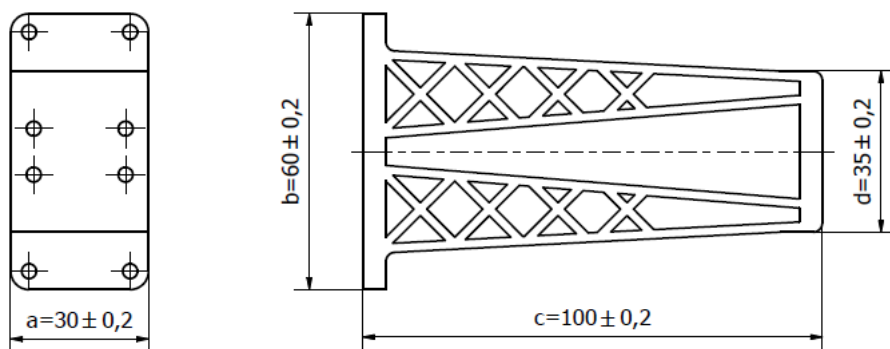
Kolejny etap badania jakości stanowiła kontrola wymiarowa modelu. Kontrola została przeprowadzona za pomocą suwmiarki elektronicznej, której błąd graniczny dopuszczalny E (MPE) wynosi 0,02 mm. Zestawienie wyników pomiarów zaprezentowano w tabl. 6.2.



Tablica 6.1. Dokumentacja fotograficzna kontroli wizualnej

Model	Widok z góry	Widok z dołu	Widok z boku
MB1			
MB2			
MB3			
MB4			
MB5			

Tablica 6.2. Wyniki kontroli wymiarowej



Model	Nazwa	Wartość mierzona	Jednostka	Tolerancja	Rzeczywisty (średnia z 3 pomiarów)	Odchyłka	Zgodność
RM1	Wymiar a	30,00	mm	0,20	29,89	-0,11	OK
RM1	Wymiar b	60,00	mm	0,20	60,00	0,00	OK
RM1	Wymiar c	100,00	mm	0,20	100,13	0,13	OK
RM1	Wymiar d	35,00	mm	0,20	35,03	0,03	OK
RM2	Wymiar a	30,00	mm	0,20	30,28	0,28 ↑	NOK
RM2	Wymiar b	60,00	mm	0,20	60,13	0,13	OK
RM2	Wymiar c	100,00	mm	0,20	100,18	0,18	OK
RM2	Wymiar d	35,00	mm	0,20	35,12	0,12	OK
RM3	Wymiar a	30,00	mm	0,20	29,85	-0,15	OK
RM3	Wymiar b	60,00	mm	0,20	59,78	-0,22 ↓	NOK
RM3	Wymiar c	100,00	mm	0,20	99,73	-0,27 ↓	NOK
RM3	Wymiar d	35,00	mm	0,20	34,90	-0,10	OK
RM4	Wymiar a	30,00	mm	0,20	29,96	-0,04	OK
RM4	Wymiar b	60,00	mm	0,20	59,80	-0,20	OK
RM4	Wymiar c	100,00	mm	0,20	99,76	-0,24 ↓	NOK
RM4	Wymiar d	35,00	mm	0,20	34,93	-0,07	OK
RM5	Wymiar a	30,00	mm	0,20	30,15	0,15	OK
RM5	Wymiar b	60,00	mm	0,20	60,04	0,04	OK
RM5	Wymiar c	100,00	mm	0,20	99,72	-0,28 ↓	NOK
RM5	Wymiar d	35,00	mm	0,20	34,83	-0,17	OK

Nota: znak ↑ oznacza, że mierzona wartość jest powyżej zakresu tolerancji, znak ↓ oznacza, że mierzona wartość jest poniżej zakresu tolerancji.

Z analizy zebranego materiału badawczego wynika, że najdokładniejszą z wybranych metod druku 3D jest metoda PolyJet. Z kolei największe odchylenia od wartości mierzonej uzyskano przy zastosowaniu metody DLP.

### 6.6.3. Kontrola za pomocą bezstykowego systemu optycznego

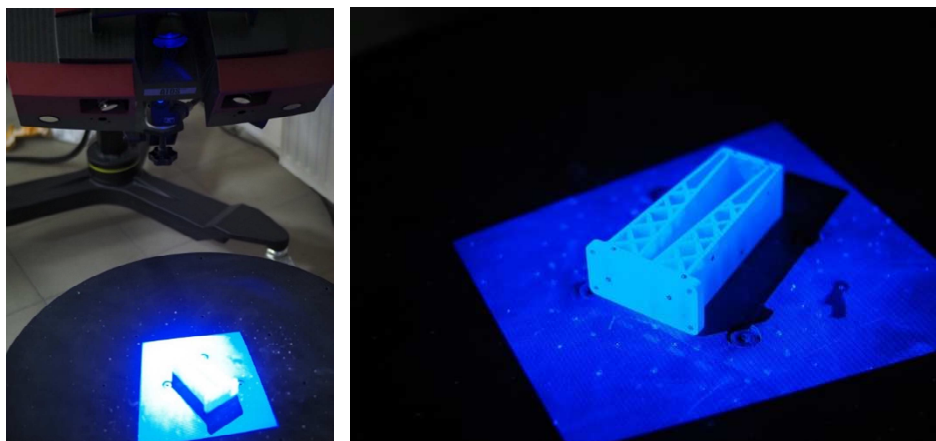
Analizy dokładności odwzorowania kształtu geometrycznego wytworzonych modeli badawczych dokonano za pomocą bezstykowego systemu optycznego opartego na współrzędnościowym skanerze optycznym – ATOS Triple Scan II Blue Light firmy GOM. Do analizy danych wykorzystano oprogramowanie skanera ATOS Professional V7. Przez zastosowanie światła niebieskiego skaner ATOS umożliwia pomiar niemal niezależnie od natężenia światła dziennego lub sztucznego (białego). Ponadto pozwala on na znaczne skrócenie czasu pomiaru, m.in. dzięki zastosowaniu stołu obrotowego zintegrowanego z systemem pomiarowym ATOS. Wprowadzenie automatyzacji pozwoliło na znaczne przyspieszenie procesu pomiarowego, wynikające z częściowego wyeliminowania konieczności manualnej zmiany położenia skanowanego obiektu.

Opracowanie metodyki bezstykowych pomiarów było wynikiem wielu prób, które umożliwiły określenie właściwego podejścia do procesu pomiarowego. Przyjęto strategię polegającą na wykonaniu dwóch niezależnych serii pomiarowych, prowadzonych w dwóch położeniach detalu względem stołu pomiarowego. Proces pomiaru został tak skonfigurowany, że każda z dwóch serii była prowadzona dla położenia części ułożonej w danej płaszczyźnie stołu oraz płaszczyźnie obróconej o 180 stopni. Wymagało to rozmieszczenia punktów referencyjnych tak, aby co najmniej trzy z nich były widoczne w obu seriach pomiarowych. Dzięki temu możliwe stało się programowe złożenie danych pomiarowych uzyskanych w obu seriach pomiarowych, a tym samym uzyskanie informacji o całej mierzonej geometrii. Pozwoliło to na znaczne skrócenie czasu trwania procesu digitalizacji, a na podstawie oględzin geometrii skanowanego modelu dobrano odpowiednią liczbę kroków podziału pełnego obrotu stołu pomiarowego dla pojedynczej serii pomiarowej.

Na rysunku 6.18 zaprezentowano proces przygotowania modeli 3D do skanowania. Rysunek 6.19 przedstawia skanowanie modelu badawczego za pomocą systemu optycznego ATOS Triple Scan II Blue Light.



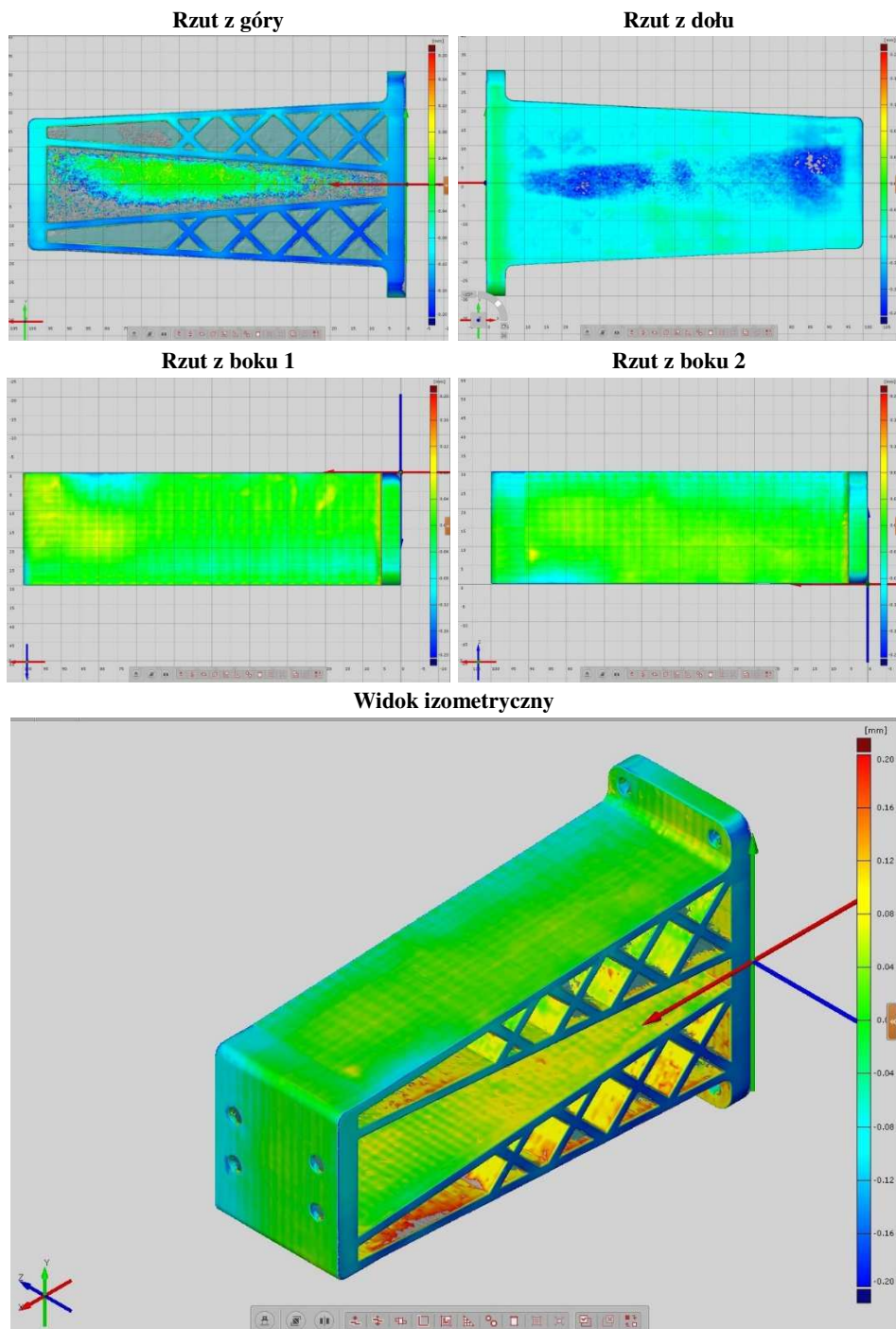
Rys. 6.18. Przygotowanie prototypu do skanowania 3D



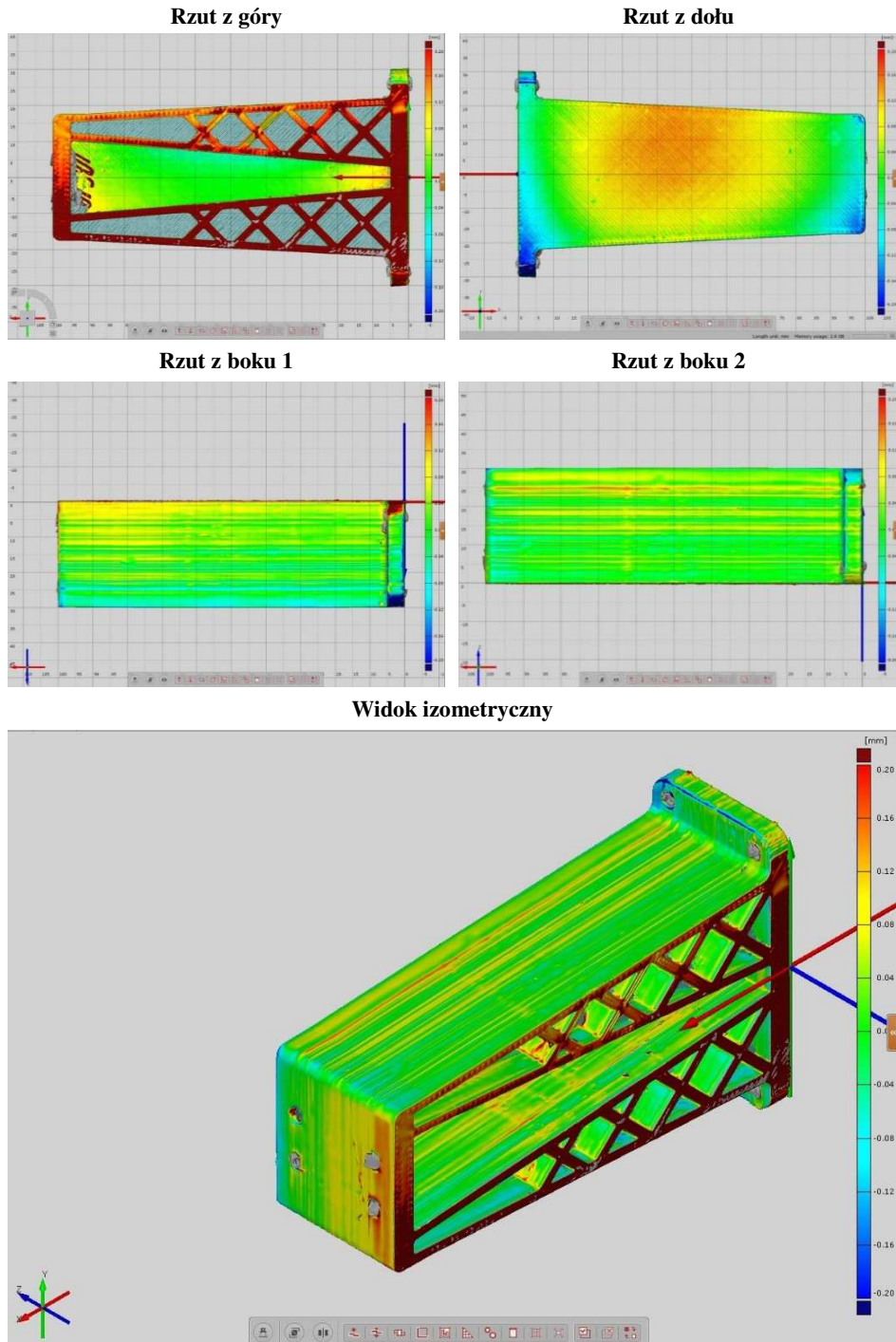
Rys. 6.19. Skanowanie modelu badawczego za pomocą systemu optycznego ATOS Triple Scan II Blue Light

Przez zastosowanie programu GOM Inspect V8 wykonane zostały trójwymiarowe mapy odchyłek powierzchni modeli rzeczywistych w stosunku do zaprojektowanego modelu. Do stworzenia map zastosowano dwa pliki: pierwszym jest plik w formacie STL, który został wyeksportowany z oprogramowania typu CAD, drugi zaś to trójwymiarowe siatki odzwierciedlające rzeczywistą geometrię poszczególnych modeli badawczych, które otrzymano w wyniku odwzorowania modeli z użyciem optycznego skanera 3D.

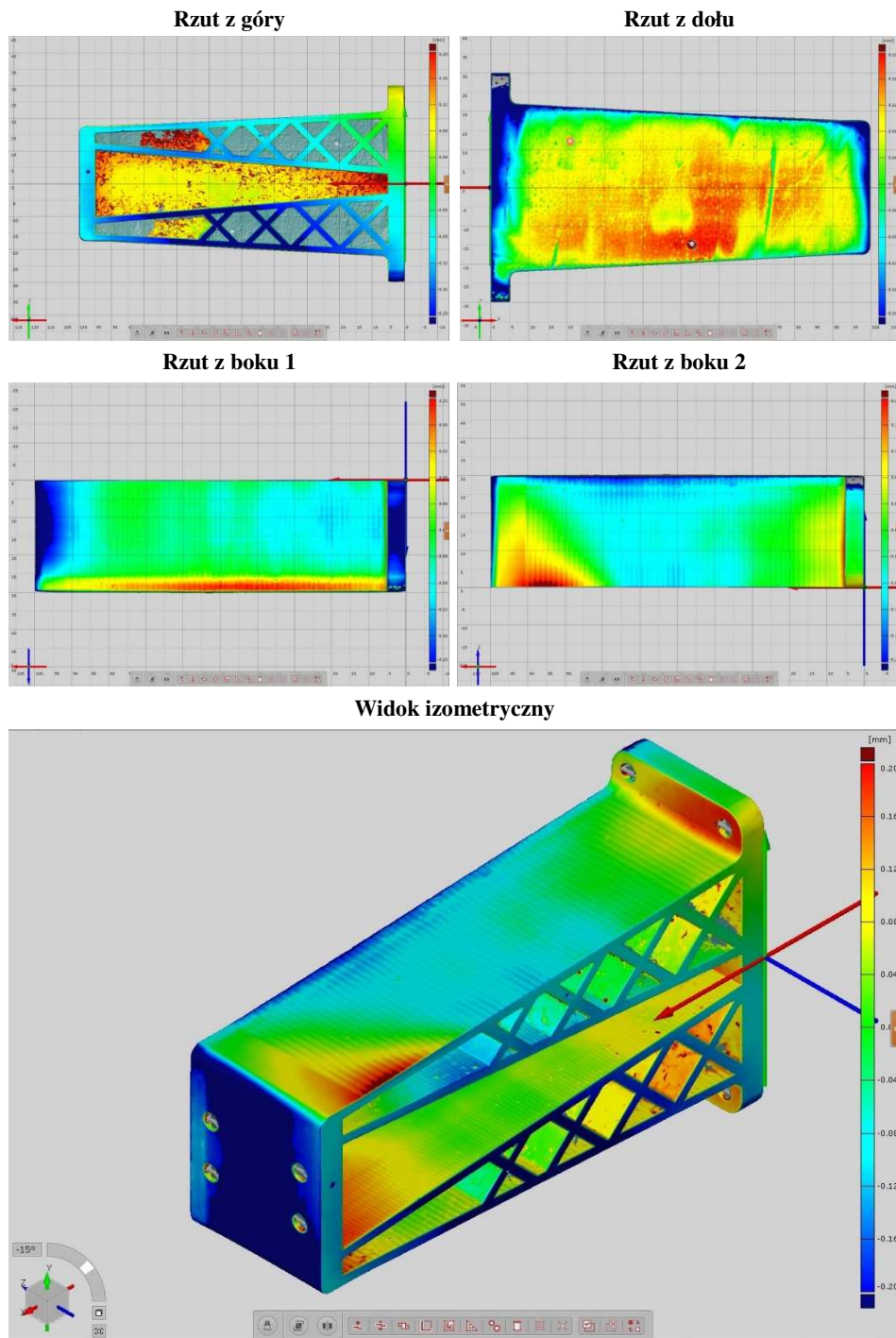
W celu określenia dokładności geometrii rzeczywistej wykonano analizy przedstawione w postaci kolorowych map odchyłek. Wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowano na rys. 6.20-6.24.



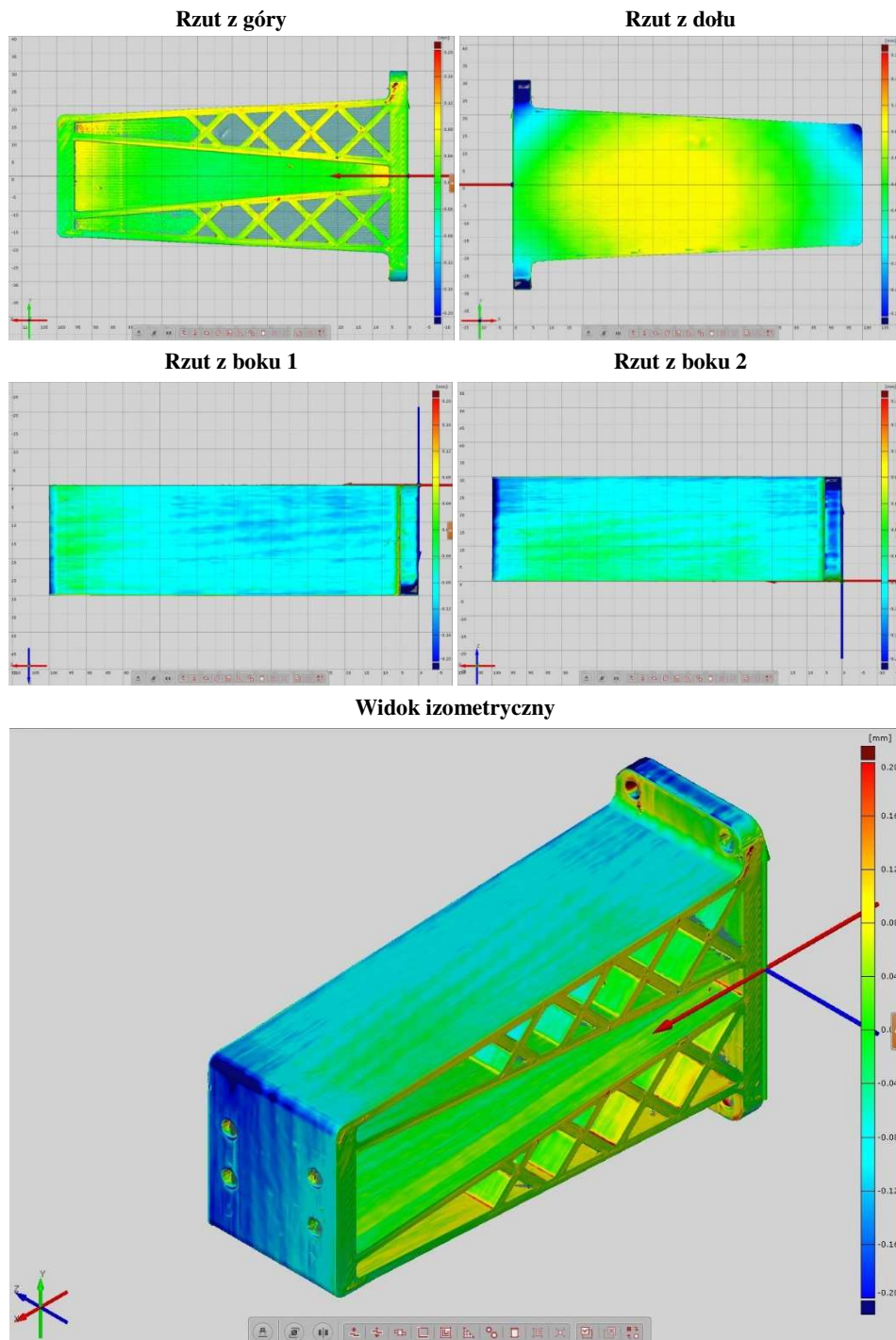
Rys. 6.20. Mapa odchyłek dokładności wykonania modelu MB1



Rys. 6.21. Mapa odchyłek dokładności wykonania modelu MB2

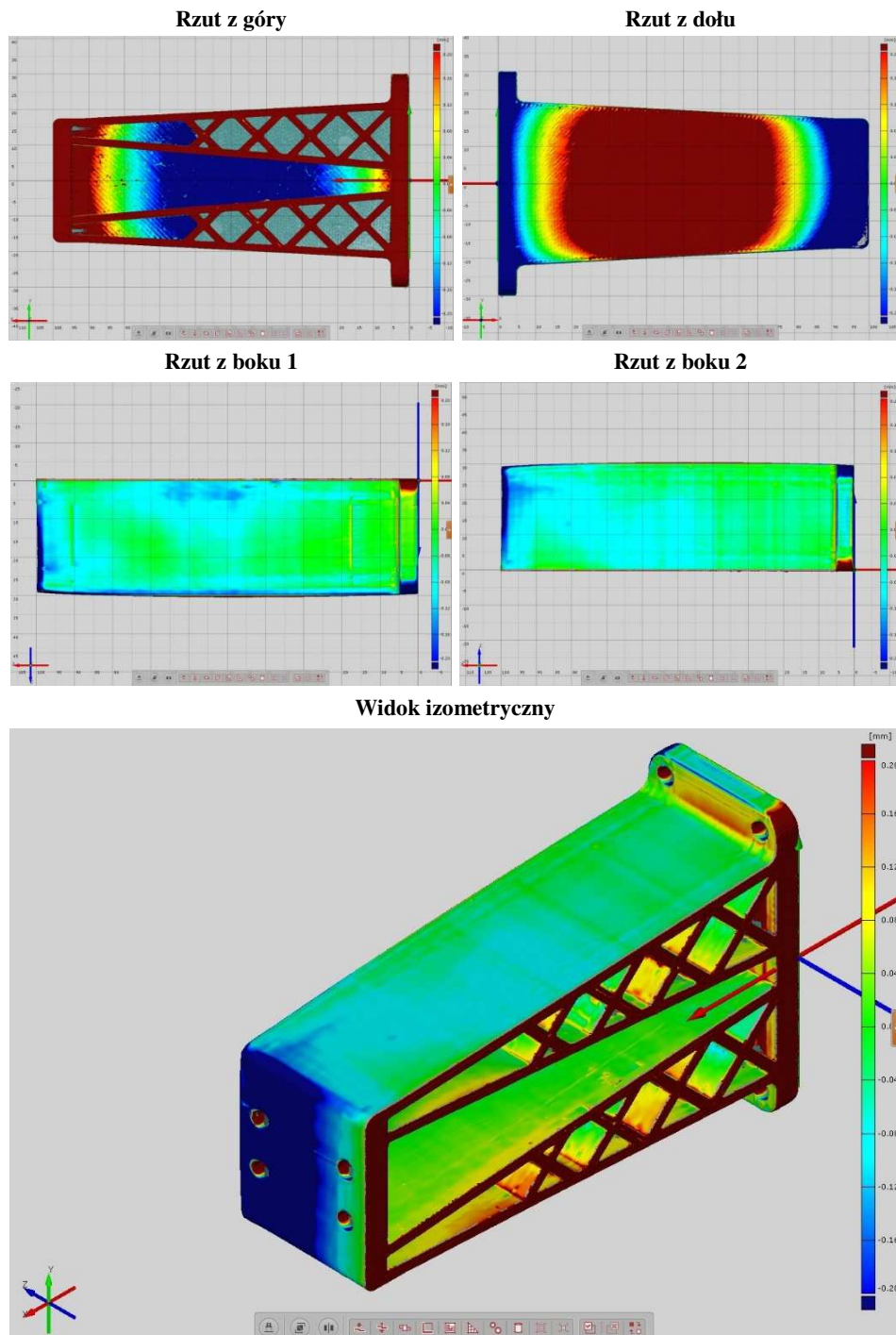


Rys. 6.22. Mapa odchyłek dokładności wykonania modelu MB3



Rys. 6.23. Mapa odchyłek dokładności wykonania modelu MB4





Rys. 6.24. Mapa odchyłek dokładności wykonania modelu MB5

Zamieszczone wyniki badań analizy geometrycznej modeli uchwytu lusterka samochodowego pokazują niedoskonałości, które nie zostały zidentyfikowane we wcześniejszych etapach kontroli jakości. Z uwagi na objętość pracy przedstawiono wyniki w czterech rzutach oraz widok izometryczny z podziałem dla każdej z wybranych metod. Ze względu na ograniczenia techniczne skanera 3D oraz specyfikę struktury modelu nie udało się w pełni odwzorować jego geometrii widocznej w rzucie z góry. Biorąc jednak pod uwagę przeznaczenie modelu, można wysnuć wnioski, że metoda pomiarowa z użyciem systemu optycznego GOM pozwala na określenie map odchyłek modeli wytwarzanych technologiami przyrostowymi względem modelu wzorcowego zapisanego w formacie STL.

Rezultaty badań wskazują, że metodą cechującą się największą dokładnością jest PolyJet. Technologia ta stanowi jednak najdroższą spośród opisywanych w pracy, dlatego wybierając metodę wydruku 3D każdorazowo należy rozważyć ekonomiczną zasadność jej zastosowania. Systemy przyrostowe FDM – Stratasys charakteryzują się wysoką dokładnością, a szczególnie powtarzalnością wymiarów, co jest istotne z punktu widzenia produkcyjnego. Z przytoczonych danych wynika również, że dobrym stosunkiem ceny do jakości charakteryzuje się metoda FFF. Drukarka Prusa i3 MK3 z powodu swojej ceny oraz prostoty w obsłudze jest popularna zarówno wśród klientów indywidualnych, jak i instytucjonalnych. Obserwacja modelu badawczego w przypadku metody MEM pokazuje widoczne nierówności powierzchni i znaczne odchylenia od wymiarów nominalnych.

Reasumując, podczas wyboru technologii druku 3D należy się kierować przeznaczeniem wytwarzanego obiektu oraz aspektami ekonomicznymi, natomiast jeżeli wymagana jest wysoka dokładność modelu, pozostałe kryteria doboru metody druku 3D mogą mieć mniejsze znaczenie.

## **7. BADANIE LOGISTYCZNEJ OBSŁUGI KLIENTA W BRANŻY DRUKU 3D**

### **7.1. Przebieg badania**

Badanie logistycznej obsługi klienta w branży druku 3D zostało przeprowadzone w latach 2019/2020 na grupie 80 przedsiębiorstw i instytucji badawczych oferujących usługi szybkiego prototypowania [127]. Przedsiębiorstwa zostały wytypowane na podstawie własnej analizy rynku. Za przedmiot zamówienia obrano model badawczy przedstawiony w rozdziale 6.

Zapytanie ofertowe zostało przesłane drogą elektroniczną. Poproszono w nim o podanie informacji dotyczących:

- czasu realizacji zamówienia,
- ceny jednostkowej modelu wydrukowanego 3 metodami przyrostowymi,
- kosztów wyprodukowania 10 sztuk dla każdej metody,
- minimalnej wielkości zamówienia.

Podczas badania wzięto pod uwagę następujące parametry:

- możliwe formy złożenia zamówienia,
- szybkość reakcji usługodawcy,
- średni czas realizacji zamówienia,
- cenę modelu w poszczególnych metodach,
- koszty realizacji przy zamówieniu większej liczby sztuk,
- minimalną wielkość zamówienia.

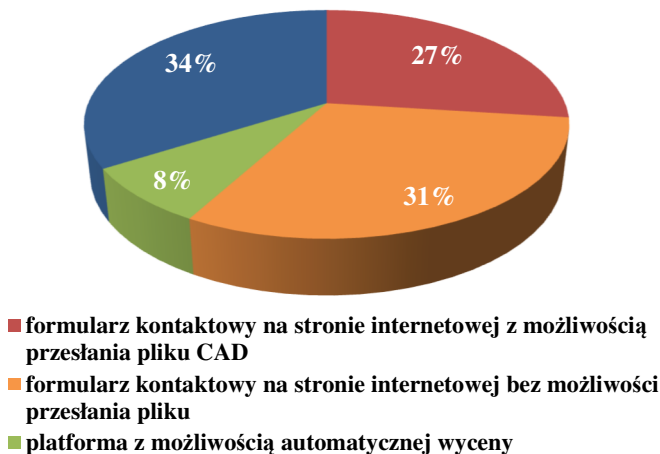
Analizę danych przeprowadzono w programie STATISTICA 13. W badaniu korzystano głównie z tabel licznosci. W celu określenia zależności między cechami jakościowymi wykorzystano test niezależności chi-kwadrat Pearsona, natomiast w przypadku analizy zależności cech jakościowych i ilościowych – test ANOVA Kruskala–Wallisa [53].

### **7.2. Przedstawienie wyników analizy**

Specyfika procesu wytwarzania i usług wytwórczych w ramach koncepcji Przemysłu 4.0 sprawia, że istotnym aspektem dla odbiorców staje się forma złożenia zamówienia, szybkość reakcji producenta oraz czas realizacji zamówienia.

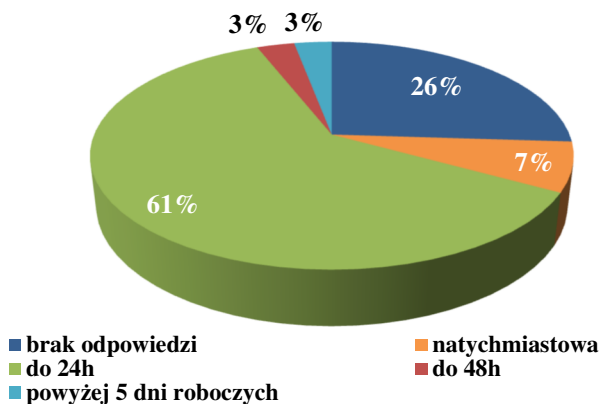
Jak wynika z przeprowadzonych badań zaprezentowanych na rys. 7.1, 8% firm do usprawnienia procesu zamawiania modeli/wyrobów wykorzystuje platformę z możliwością automatycznej wyceny prototypu. W przypadku 27% przedsiębiorstw istnieje możliwość złożenia zapytania ofertowego i przesłania pliku

3D-CAD obiektu bezpośrednio na stronie internetowej. Z kolei 31% firm posiada formularz kontaktowy, jednak bez możliwości przesłania pliku 3D-CAD. W przeprowadzonej grupie badawczej do 34% firm należało wysłać wiadomość z własnej skrzynki e-mailowej.



Rys. 7.1. Forma złożenia zapytania ofertowego

Dane zamieszczone na rys. 7.2 wskazują, że w przypadku 61% badanych przedsiębiorstw odpowiedź na zapytanie ofertowe pojawiła się po upływie maksymalnie 24 godzin. Informacje w przeciągu 48 godzin otrzymano od 3% podmiotów. Również 3% firm odpowiedziało na wiadomość w czasie dłuższym niż 5 dni roboczych. W przypadku korzystania z platform do automatycznej wyceny

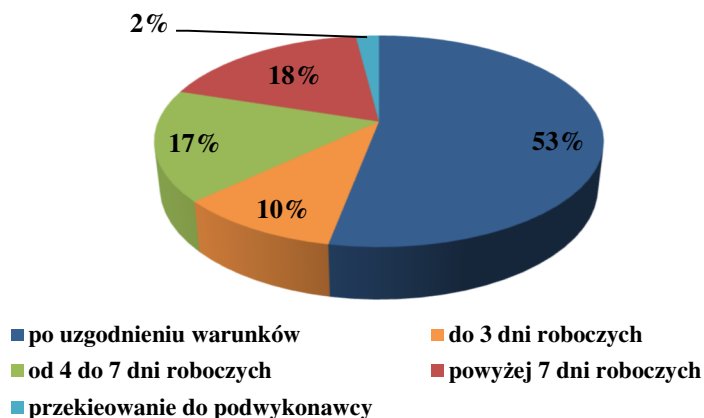


Rys. 7.2. Szybkość reakcji usługodawcy

na stronach internetowych przedsiębiorstw informacje otrzymano bezpośrednio po przesłaniu pliku 3D-CAD i doborze odpowiednich parametrów do wytworzenia prototypu. Ten sposób złożenia zamówienia był możliwy u 8% badanych firm. Na zapytanie ofertowe nie odpowiadano w 26% przypadków.

Pośród 59 przedsiębiorstw, które odpowiedziały na zapytanie ofertowe, 56% zadeklarowało podanie informacji dotyczących czasu realizacji zamówienia dopiero po sprecyzowaniu warunków realizacji projektu, dotyczących m.in. materiału czy koloru modelu. Średni czas wysyłki bezpośrednio w mailu zwrotnym podało 42% przedstawicieli. Z kolei 2% przedsiębiorstw nie przedstawiło chęci realizacji zamówienia, lecz zaproponowało przekierowanie do swojego podwykonawcy (rys. 7.3).

Z przeprowadzonych badań wynika, że co dziesiąte przedsiębiorstwo zaofiarowało wysłanie modeli do 3 dni roboczych. Czas realizacji wydruku modeli na poziomie 4-7 dni roboczych określiło 17% podmiotów. W 18% przypadków średni czas wysyłki podano na poziomie powyżej 7 dni roboczych.



Rys. 7.3. Średni czas do wysyłki

W dalszej części badania wzięto pod uwagę cenę netto wyrobu/modelu (bez uwzględnienia kosztów wysyłki) oraz wysokość kosztu jednostkowego przy zamówieniu większej liczby sztuk. W zapytaniu ofertowym poproszono o dokonanie wyceny dla 1 sztuki, a także 10 sztuk modelu wykonanego poszczególnymi metodami.

W tabeli 7.1 zamieszczono:

- porównanie cen wyrobu przy zamówieniu 1 sztuki oraz po realizacji zamówienia na poziomie 10 sztuk,
- minimalne i maksymalne koszty wydruku modelu w zależności od zastosowanego materiału,
- wartości odchylenia standardowego,

- wartości współczynnika zmienności,
- średnie obniżenie kosztu jednostkowego (rabat cenowy) ujęte w skali procentowej.

Tabela 7.1. Porównanie cen netto wydruku modelu przy zamówieniu jednej sztuki oraz 10 sztuk

-	ABS N = 51		POLIAMID N = 30		FOTOPOLIMER N = 23	
	cena 1 szt.	cena 1 szt. po rabacie	cena 1 szt.	cena 1 szt. po rabacie	cena 1 szt.	cena 1 szt. po rabacie
<b>Średnia</b>	162,56 zł	139,77 zł	225,93 zł	167,78 zł	510,20 zł	425,46 zł
<b>Min.</b>	38,19 zł	25,00 zł	69,30 zł	61,67 zł	120,00 zł	108,00 zł
<b>Max.</b>	744,47 zł	622,44 zł	634,58 zł	525,16 zł	1275,00 zł	1200,00zł
<b>Odch. std.</b>	129,44	115,37	146,03	112,68	286,35	278,09
<b>Wsp. zmn.</b>	79,63%	82,54%	64,64%	67,16%	56,12%	65,36%
<b>Średni rabat [%]</b>	17%		19%		23%	

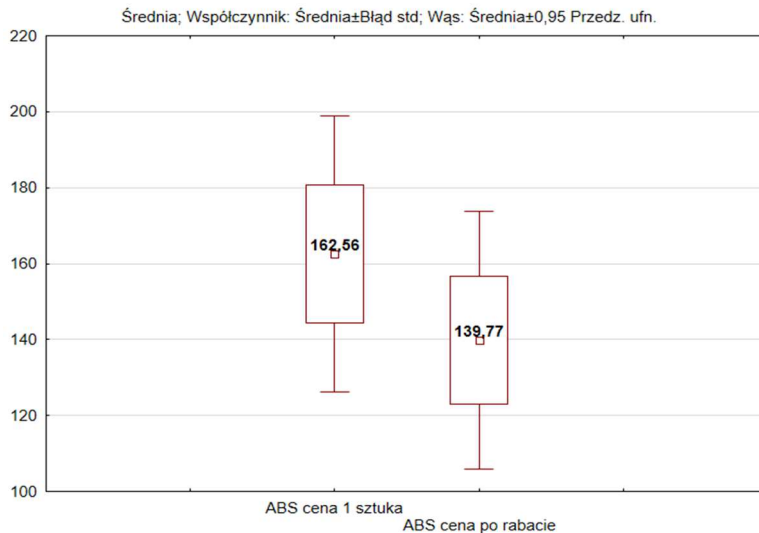
Spośród 59 firm wydruk 3D modelu z materiału ABS zadeklarowało 51 przedsiębiorstw. Średnia cena dla tego wariantu to 162,56 zł (rys. 7.4). Odchylenie standardowe jest równe 129,44 zł, co oznacza, że ceny różnią się przeciętnie o 162,56 zł od średniej ceny. Najniższa podana cena wyniosła 38,19 zł, a najwyższa ukształtowała się na poziomie 744,17 zł.

Przy cenach modelu dotyczących zamówienia 10 sztuk w większości przypadków przedsiębiorstwa zaproponowały rabat, który średnio kształtował się na poziomie 17%. Najniższa podana cena wyniosła wówczas 25,00 zł/szt., najwyższa zaś to 622,44 zł/szt. Średnia cena po rabacie ukształtowała się na poziomie 139,77 zł. Współczynnik zmienności wyniósł kolejno 79,63% dla wyceny 1 sztuki oraz 82,54% przy realizacji 10 sztuk. Wyniki uzyskane w tym badaniu świadczą o silnym zróżnicowaniu cen.

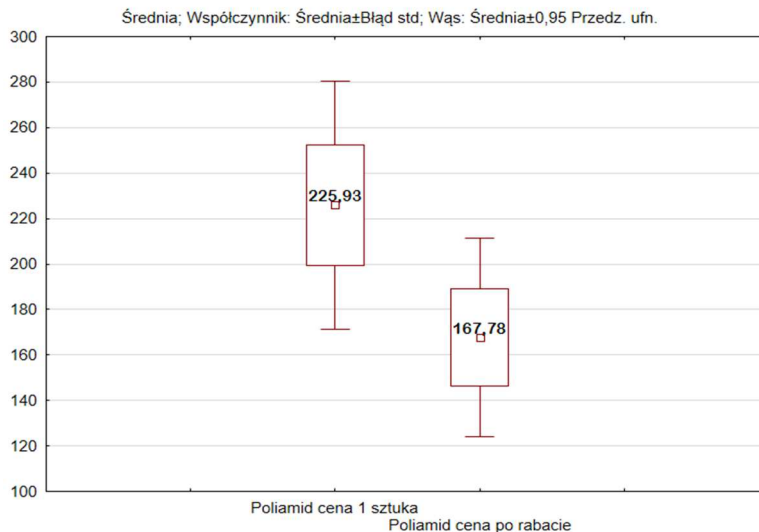
Kolejny aspekt, jaki przebadano w pracy, to kształtowanie się cen modelu wytworzonego z poliamidu. Wydruk modelu z wykorzystaniem tego materiału zaferowało 30 badanych podmiotów. Przy zamówieniu 1 sztuki średni koszt realizacji usługi wyniósł 225,93 zł (rys. 7.5). Odchylenie standardowe w tym przypadku wyniosło 146,03 zł. Najwyższa podana cena kształtowała się na poziomie 634,58 zł, najniższa zaś to 69,30 zł.

Biorąc pod uwagę ceny modelu przy zamówieniu 10 sztuk, należy zaznaczyć, że przedsiębiorstwa w większości przypadków proponowały rabat, który wynosił średnio 19%. Najniższy podany koszt jednostkowy wyniósł wówczas 61,67 zł/szt., a najwyższy to 525,16 zł/szt. Średnia cena po rabacie ukształtowała się na poziomie 167,78 zł. Współczynnik zmienności wyniósł kolejno 64,64% dla wyceny 1 sztuki oraz 67,16% przy realizacji 10 sztuk. Wyniki te świadczą o sil-

nym zróżnicowaniu kosztów, a zarazem cen wydruku 3D. Jest on jednak niższy w porównaniu z kosztami poniesionymi na wydruk modelu wykonanego z materiału ABS.



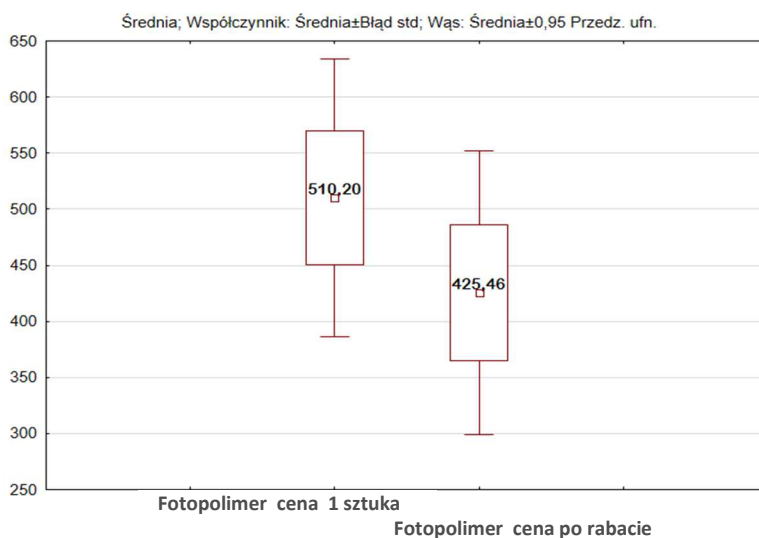
Rys. 7.4. Kształtowanie cen modelu wykonanego z materiału ABS przy zamówieniu 1 sztuki oraz po rabacie



Rys. 7.5. Kształtowanie cen modelu wykonanego z poliamidu przy zamówieniu 1 sztuki oraz po rabacie

Ostatnim materiałem, jaki wzięto pod uwagę w badaniu, jest fotopolimer. Wydruk modelu w tym przypadku zadeklarowały 23 przedsiębiorstwa. Średni koszt wydruku 3D to 510,20 zł/szt. (rys. 7.6). Odchylenie standardowe wyniosło 286,35 zł. Najwyższy koszt realizacji usługi został odnotowany na poziomie 1275,00 zł, najniższy zaś – 120,00 zł.

Po uwzględnieniu rabatu, który średnio wynosił 23%, najniższa podana cena to 108,00 zł/szt., najwyższa zaś to 1200,00 zł/szt. Średnia cena po rabacie ukształtowała się na poziomie 425,46 zł. Współczynnik zmienności wyniósł kolejno 56,12% dla wyceny 1 sztuki oraz 65,36% przy realizacji 10 sztuk. Wynik ten ponownie świadczy o silnym zróżnicowaniu cen, które jest jednak najmniejsze spośród badanych zmiennych.



Rys. 7.6. Kształtowanie cen modelu wykonanego z fotopolimeru przy zamówieniu 1 sztuki oraz po rabacie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że najniższy koszt wytworzenia modelu występuje w przypadku materiału ABS. Na kolejnym miejscu znajduje się model wykonany z poliamidu, a najdroższy wariant to wydruk z fotopolimeru. Analizując rabaty przy zamówieniu większej liczby sztuk, zauważa się, że najbardziej znaczące zmniejszenie kosztów występuje w przypadku fotopolimeru. Wynika to głównie ze specyfiki procesów związanych z wykorzystywaniem modeli na zasadzie fotopolimeryzacji żywicy.

W dalszej części badania sprawdzono, czy forma złożenia zamówienia ma wpływ na cenę wydruku 3D modelu. Do realizacji tego celu użyto testu ANOVA rang Kruskala–Wallisa. Wprowadzono następujące hipotezy badawcze:



- $H_0$  – forma złożenia zamówienia nie ma wpływu na cenę wydruku modelu,
- $H_1$  – forma złożenia zamówienia ma wpływ na cenę wydruku modelu.

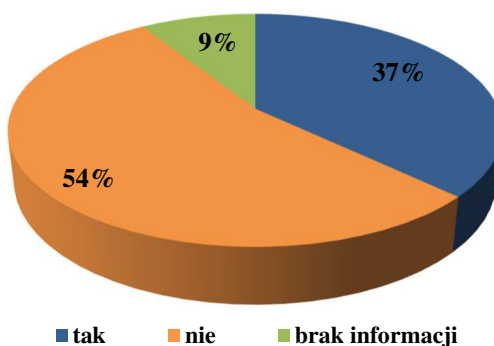
Aby ułatwić analizę, forma złożenia zamówienia ponownie została pogrupowana na dwa warianty: platformę online oraz wiadomość e-mail. Wyniki zaprezentowano w tab. 7.2.

Opisane wyniki o poziomie prawdopodobieństwa testowego  $p$  oraz przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  pozwalają na przyjęcie hipotezy zerowej ( $\alpha < p$ ). Najprawdopodobniej nie istnieje zależność pomiędzy ceną modelu w poszczególnych wariantach a formą złożenia zamówienia przez klienta.

Tabela 7.2. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa

-	N ważnych		p
	platforma online	wiadomość e-mail	
ABS	5	46	0,3031
POLIAMID	5	26	0,2592
ŻYWICA	3	20	0,3151

Ostatni aspekt, jaki został przebadany w pracy, to minimalna wielkość zamówienia. Wyniki analizy przedstawiono na rys. 7.7. Wśród 59 firm, które odpowiedziały na zapytanie ofertowe, 37% potwierdziło, że w ich ofercie występuje minimalna wartość realizacji usługi. Nieco więcej niż połowa (54%) przedsiębiorstw zadeklarowała, że wykona każde, nawet najmniejsze zamówienie. W 9% przypadków nie uzyskano odpowiedzi na to pytanie.



Rys. 7.7. Deklaracja posiadania minimalnej wielkości zamówienia

W odpowiedzi na zapytanie ofertowe przedstawiciele firm ponownie zwracali uwagę na to, że minimalna wielkość zamówienia w dużym stopniu zależy od wyboru metody wydruku. Wielokrotnie wyrażali chęć realizacji usługi, zwracali jednak uwagę, że przy tak małej liczbie sztuk jest to nieopłacalne. Przykładowo, realizując usługę w metodzie SLS, wykonuje się prace związane z preprocesingiem polegające głównie na przygotowaniu maszyny i materiału. Z przekazanych informacji wynika, że koszty z tym związane wahały się w granicach 10-500 zł netto. W przypadku zamówienia niewielkiej liczby sztuk prace te są zatem nieopłacalne lub mało opłacalne. Nie dziwi więc fakt, że przedstawiciel jednej z badanych firm zadeklarował, że realizacja usługi rozpoczyna się od kwoty 1000 zł, w przeciwnym razie oferta przekierowywana jest do podwykonawcy.

## 8. BADANIE POZIOMU WDROŻENIA KONCEPCJI PRZEMYSŁU 4.0 DLA TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH

### 8.1. Przebieg procesu badawczego

Na przełomie 2019 i 2020 r. do grupy badawczej wytypowano 148 przedsiębiorstw i instytucji naukowo-badawczych wykorzystujących technologie przyrostowe. Ostatecznie odpowiedź otrzymano od 100 respondentów [125]. Przedsiębiorstwa zostały wytypowane na podstawie własnej analizy rynku. Jako narzędzie badawcze wykorzystano kwestionariusz ankietowy udostępniony głównie za pomocą metody PAPI (Paper and Pencil Interview). Polegał on na bezpośrednim przeprowadzaniu wywiadów z respondentami z wykorzystaniem kwestionariusza papierowego, a także metody CAWI (Computer Aided Web Interview), czyli na udostępnieniu ankiety w formie elektronicznej. Ankieta została skierowana w głównej mierze do kadry zarządzającej w przedsiębiorstwach.

Respondenci zostali poproszeni o odpowiedź na pytania z zakresu:

- projektowania i modelowania 3D-CAD,
- wytwarzania modeli/wyrobów metodami szybkiego prototypowania,
- obróbki wykończeniowej,
- kontroli jakości modeli/wyrobów,
- kierunków rozwoju działalności,
- szans i zagrożeń, jakie niesie ze sobą wdrożenie koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwie.

Ankieta zawierała pytania zamknięte, półotwarte i otwarte. W kwestionariuszu wykorzystano także metryczkę, w której poproszono o sprecyzowanie informacji dotyczących: lokalizacji firmy, zasięgu terytorialnego prowadzonej działalności, branży, wielkości firmy oraz lat funkcjonowania na rynku. Dodatkowo zawarto pytanie dotyczące działalności marketingowej przedsiębiorstwa.

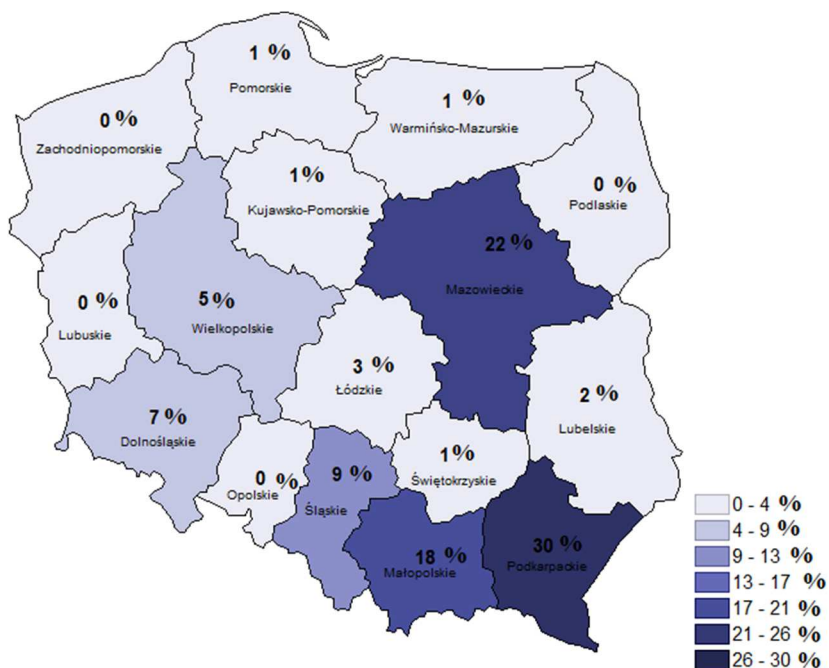
Do analizy danych użyto programu STATISTICA 13. W analizie statystycznej wykorzystano przede wszystkim tabele licznosci, które ukazały zarówno zestawienie liczbowe, jak i procentowe poszczególnych odpowiedzi. W celu określenia zależności między cechami jakościowymi wykorzystano test niezależności chi-kwadrat Pearsona. Badania przeprowadzono na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Przyjmuje się, że: gdy  $p < .05$ , wówczas występuje mała istotność statystyczna; gdy  $p < .01$  – występuje średnia istotność statystyczna; gdy  $p < .001$  – występuje duża istotność statystyczna [53].

Wszystkie opracowane wyniki zostały przedstawione w ujęciu graficznym. Odpowiedzi na pytania otwarte dotyczące posiadanych drukarek 3D, stosowanych

metod obróbki wykończeniowej, kierunków rozwoju działalności oraz szans i zagrożeń wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwie zostały skategoryzowane i przedstawione graficznie w kolejności najczęściej występujących.

## 8.2. Charakterystyka respondentów

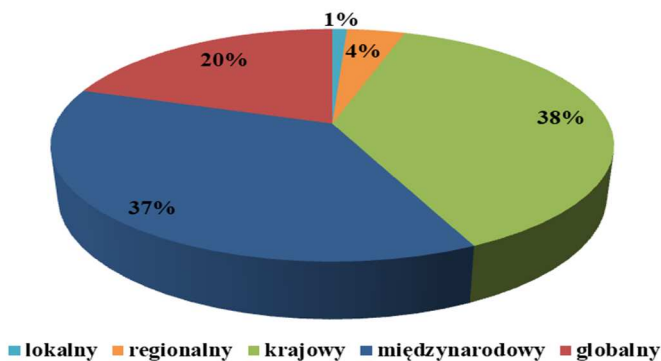
Na podstawie zebranego materiału badawczego przeprowadzono analizę lokalizacji podmiotów wybranych do grupy badawczej. Z rysunku 8.1 wynika, że największa grupa wytypowanych przedsiębiorstw ma swoją siedzibę w województwie podkarpackim (30%), a następnie mazowieckim (22%) i małopolskim (18%). W dalszej kolejności wyższa koncentracja firm występuje w województwach: śląskim (9%), dolnośląskim (7%) i wielkopolskim (5%). Pozostała grupa regionów nie przekracza 5% całkowitej liczby badanych podmiotów.



Rys. 8.1. Lokalizacja przedsiębiorstwa

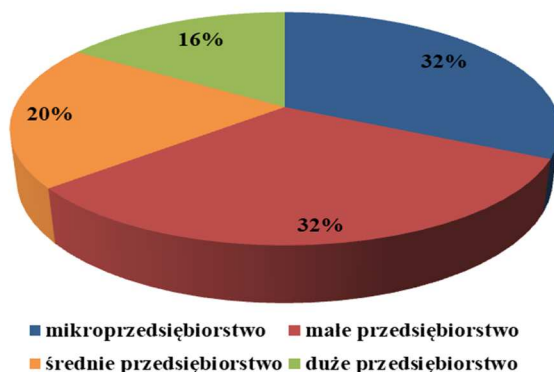
W dalszej części badania wzięto pod uwagę zasięg terytorialny prowadzonej działalności (rys. 8.2). Przedsiębiorstwa oferujące swoje usługi o zasięgu krajowym stanowią 38% badanych podmiotów. Z kolei 37% respondentów zadeklarowało prowadzenie swojej działalności w charakterze międzynarodowym. Zasięg

globalny potwierdził co piąty ankietowany. Zaledwie 4% przedsiębiorstw prowadzi działalność regionalną, natomiast 1% – lokalną.



Rys. 8.2. Zasięg terytorialny prowadzonej działalności

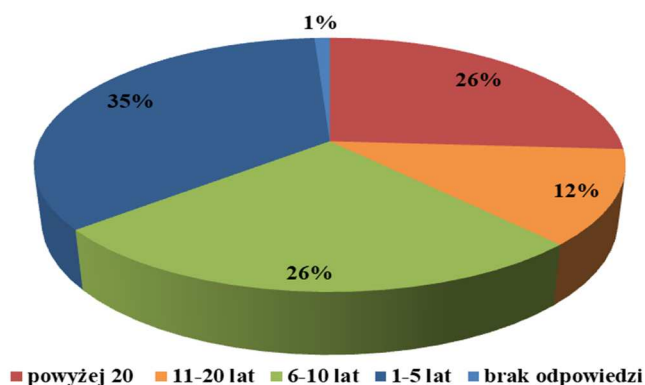
Kolejne pytanie ankiety dotyczyło wielkości przedsiębiorstwa (rys. 8.3). Z analizy zebranego materiału wynika, że blisko 1/3 respondentów (32%) pracuje w mikroprzedsiębiorstwie (zatrudnienie w tym przypadku wynosi mniej niż 10 pracowników oraz roczny obrót nie przekracza 2 mln euro). Także 32% respondentów deklaruje przynależność do małego przedsiębiorstwa (założeniem było zatrudnienie, które wynosi mniej niż 50 pracowników i roczny obrót oraz/lub całkowity bilans roczny nie przekracza 10 mln euro). Co piąty ankietowany (20%) to osoba ze średnich przedsiębiorstw (gdzie zatrudnienie kształtuje się na poziomie mniejszym niż 250 pracowników oraz roczny obrót nie przekracza 50 mln euro lub całkowity bilans roczny nie przekracza 43 mln euro). Z kolei 16% respondentów to przedstawiciele dużych przedsiębiorstw (zatrudnienie wynosi 250 osób bądź jest większe, a roczny obrót przekracza 50 mln euro lub całkowity bilans roczny przekracza 43 mln euro). W tym miejscu warto zwrócić uwagę na



Rys. 8.3. Wielkość przedsiębiorstwa

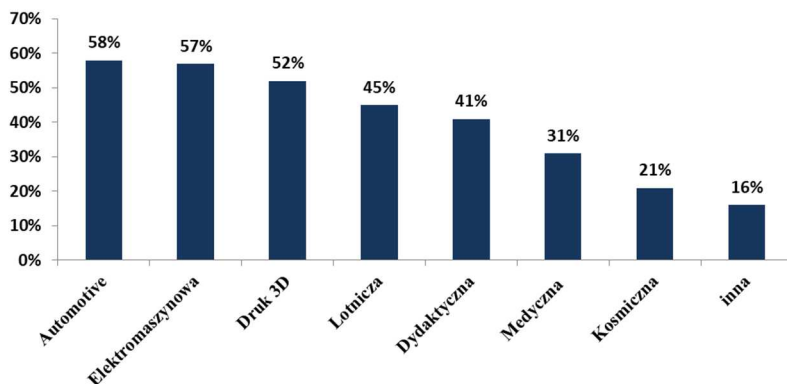
fakt, że znaczna liczba dużych przedsiębiorstw wynika z różnej interpretacji pytania dotyczącego wielkości przedsiębiorstwa. W przypadku firm z kapitałem zagranicznym, których oddział znajduje się w Polsce, część respondentów sygnalizowała, że brała pod uwagę nie wielkość ich oddziału, ale całego przedsiębiorstwa.

Strukturę respondentów w zależności od lat działalności na rynku przedstawia rys. 8.4. Badania wskazują, że wśród badanych przeważająca część to firmy młode – ponad 1/3 respondentów (35%) zadeklarowała, że ich firma istnieje od 1 roku do 5 lat. Z kolei co czwarty ankietowany wskazał, że firma działa na rynku 6-10 lat, a 12% respondentów określiło wiek firmy na 11-20 lat. Co czwarta firma uczestniczy w rynku od ponad 20 lat. Brak odpowiedzi na to pytanie wystąpiło w 1% przypadków.



Rys. 8.4. Lata działalności na rynku

Kolejne pytanie w ankiecie dotyczyło branży, w jakiej działa firma (rys. 8.5). W tym przypadku respondenci mogli wybrać kilka odpowiedzi lub przedstawić własną. Jak wynika z badań, większość ankietowanych deklaruje udział w branży automotive (58%), elektromaszynowej (57%) oraz druku 3D (52%). Na kolejnych miejscach znalazła się: branża lotnicza (45%), dydaktyczna (41%), medyczna (31%) i kosmiczna (21%). Inne obszary działalności przedsiębiorstw wymienione w ankiecie to: przemysł chemiczny (3%), wzornictwo przemysłowe (2%), automatyka i robotyka (2%), rolnictwo (2%), a także m.in.: branża wojskowa, kolejowa, artystyczna, meblowa, AGD, gdzie wynik kształtował się na poziomie 1%.

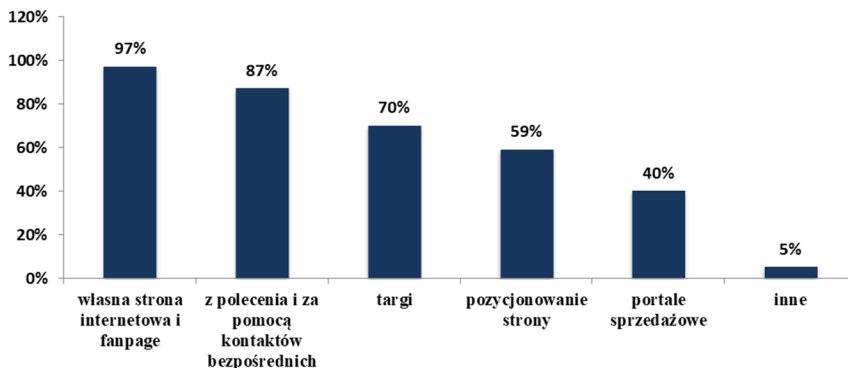


Rys. 8.5. Działalność w branży

### 8.3. Działalność marketingowa

Ogromna różnorodność produktów oraz szeroki wachlarz możliwości ich pozyskania w znacznym stopniu stymulują wzrost oczekiwań klientów [137]. Konieczne staje się więc poszukiwanie przez przedsiębiorstwa takich działań marketingowych, które pozwolą na kształtowanie świadomości o danej marce, wzbudzą zainteresowanie oraz zachęcą do zakupu towaru lub skorzystania z usługi. Stąd też w ankiecie pojawiło się pytanie półotwarte dotyczące działalności marketingowej prowadzonej przez przedsiębiorstwo. Respondenci ponownie mogli wybrać kilka odpowiedzi lub przedstawić własny pomysł na promocję swojej firmy.

Jak wynika z badań przedstawionych na rys. 8.6, najczęstszą formą promocji przedsiębiorstw jest prowadzenie strony internetowej i fanpage'u (97%) oraz rekomendacje i kontakt bezpośredni (87%). Kolejnym sposobem prezentacji oferty

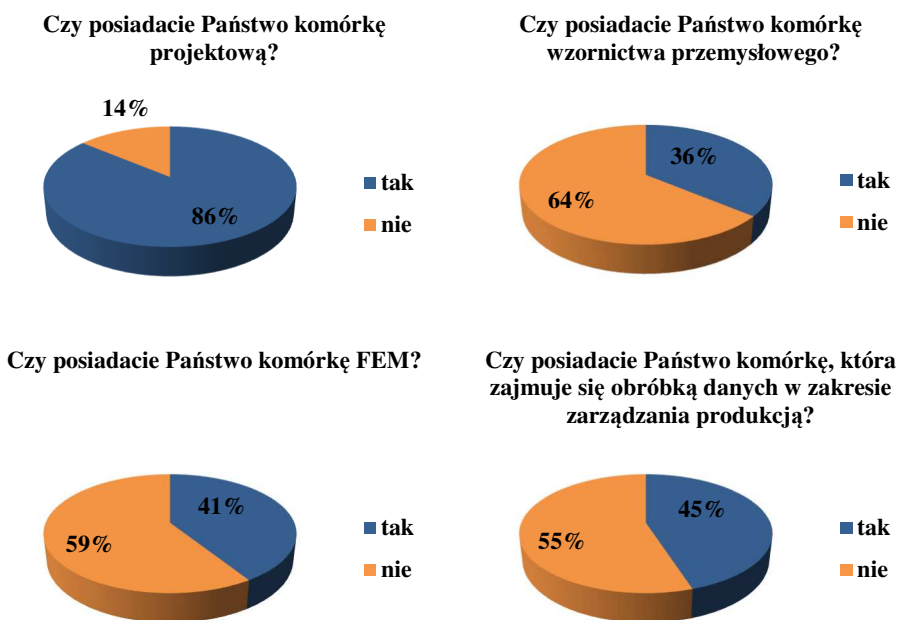


Rys. 8.6. Działalność marketingowa

jest udział w targach (70%), pozycjonowanie strony internetowej (59%), a także działalność na portalach sprzedażowych (40%). Inne działania marketingowe prowadzone przez firmy to: reklama w czasopiśmie i magazynach, udział w konferencjach i spotkaniach branżowych, reklamy internetowe, chat online, telemarketing i AdWords.

## 8.4. Projektowanie i modelowanie 3D-CAD

W każdym procesie wytwarzania wyrobu pierwsza faza stanowi techniczne przygotowanie produkcji, które polega na powstaniu pełnej dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej. Głównym zadaniem komórki projektowej jest zatem opracowanie koncepcji produktu. Komórka wzornictwa przemysłowego nadaje mu postać geometryczną, uwzględniając jego funkcjonalność i ergonomię. Komórka FEM dokonuje analizy wytrzymałościowej konstrukcji za pomocą symulacji komputerowej. Z kolei komórka do obróbki danych w zakresie zarządzania produkcją integruje wszystkie działania inżynierskie związane z projektowaniem i wytwarzaniem wyrobu. W związku z tym w ankiecie pojawiły się pytania dotyczące posiadania wybranych komórek w zakresie inżynierii produkcji. Wyniki przedstawiono graficznie na rys. 8.7.



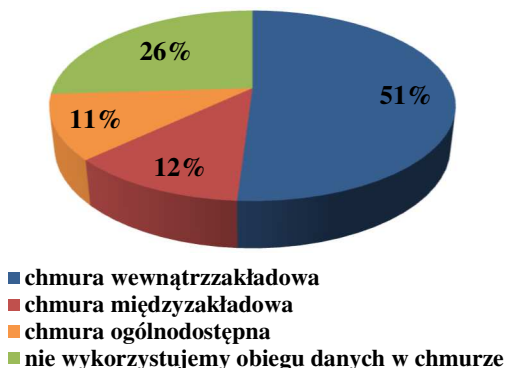
Rys. 8.7. Deklaracja posiadania komórek w zakresie inżynierii produkcji



Z analizy zebranego materiału wynika, że w badanej grupie 86% przedsiębiorstw posiada w swojej strukturze komórkę projektową. Komórka wzornictwa przemysłowego istnieje jedynie u 36% podmiotów. Posiadanie komórki FEM deklaruje 41% ankietowanych. Na pytanie dotyczące posiadania komórki do obróbki danych w zakresie zarządzania produkcją odpowiedzi twierdzącej udzieliło 45% respondentów.

W dobie Czwartej Rewolucji Przemysłowej korzystanie z nowoczesnych rozwiązań informatycznych do zarządzania produkcją powinno stać się standardem. Producenci oprogramowania wprowadzili liczne udogodnienia dla przedsiębiorstw, oferując m.in. technologię przetwarzania danych w chmurze. Użytkowanie jej daje wiele korzyści, np. zmniejszenie kosztów oraz dostęp do informacji z dowolnego sprzętu podłączonego do Internetu. Mimo to część organizacji wciąż wstrzymuje się z wykorzystaniem chmur obliczeniowych w obawie o bezpieczeństwo danych. W ankiecie pojawiło się zatem pytanie dotyczące wykorzystania Cloud Computing w przedsiębiorstwie.

Z analizy danych przedstawionych na rys. 8.8 wynika, że nieco ponad połowa respondentów (51%) deklaruje wykorzystywanie chmur wewnętrzzakładowych. Chmury międzyzakładowe użytkuje 12% ankietowanych, a 11% posługuje się chmurami ogólnodostępnymi. Z kolei co czwarty badany wskazał, że w jego przedsiębiorstwie nie jest wykorzystywany obieg danych w chmurze.

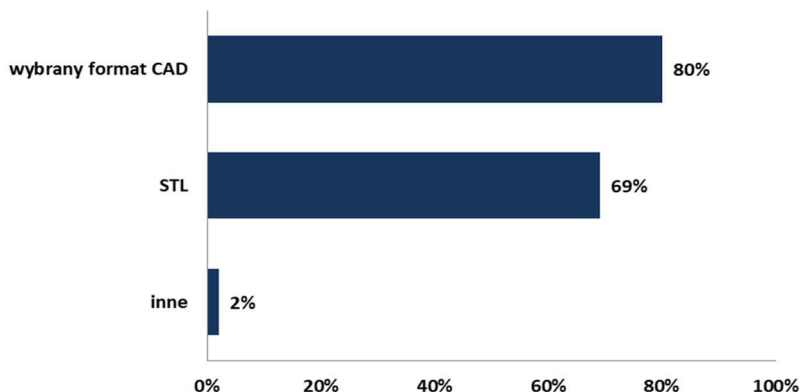


Rys. 8.8. Deklaracja posiadania chmur obliczeniowych w zakresie inżynierii produkcji

Na etapie obróbki danych związanych z drukiem 3D należy zapisać uzyskane dane w odpowiednim formacie pliku. Format ten powinien być obsługiwany przez oprogramowanie dedykowane dla urządzenia przyrostowego pracującego w wybranej metodzie addytywnej. Najbardziej powszechnym formatem z dotychczas stosowanych jest STL, jednak na rynku istnieje szeroka gama innych rozwiązań.

Przy pytaniu dotyczącym korzystania z wybranych formatów do przesyłania danych na zewnątrz (rys. 8.9) 80% ankietowanych deklaroowało posługiwanie się

wybrany formatem CAD. Wśród najczęściej wymienianych rozwiązań pojawiły się: STEP, DXF, OBJ oraz IGES. Z kolei 69% respondentów deklaruje korzystanie z formatu STL. Zaledwie 2% badanych stosuje inne możliwości.

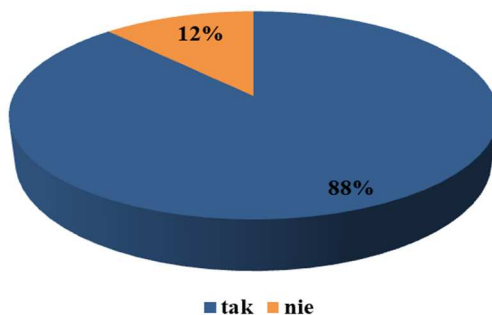


Rys. 8.9. Korzystanie z wybranych formatów pliku

## 8.5. Wytwarzanie modeli/wyrobów metodami szybkiego prototypowania

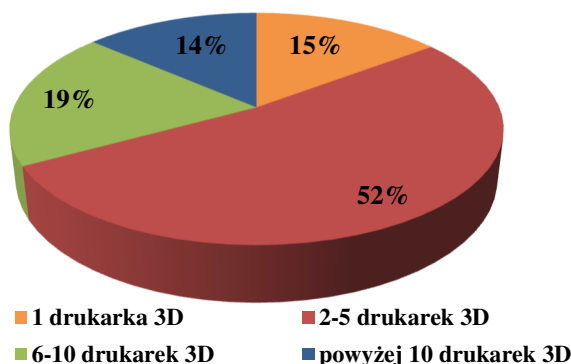
Na podstawie zebranego materiału badawczego dokonano weryfikacji pochodzenia wykorzystywanych w przedsiębiorstwach modeli wytworzonych za pomocą metod przyrostowych.

W trakcie badania wśród 100 przedsiębiorstw zweryfikowano 88% firm, które wykonują modele 3D za pomocą własnych maszyn. Jedynie 12% respondentów nie posiada w swojej firmie możliwości wytwarzania prototypów/wyrobów gotowych w metodach przyrostowych (rys. 8.10).



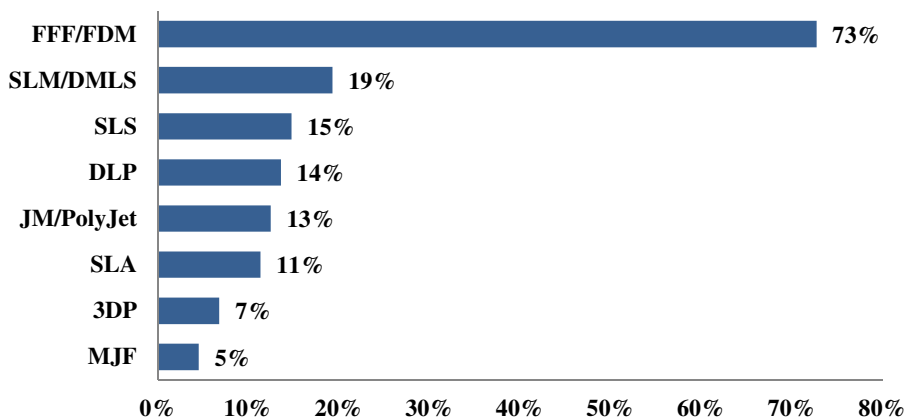
Rys. 8.10. Deklaracja wytwarzania modeli 3D we własnym zakresie

Jak wynika z rys. 8.11 wśród firm deklarujących posiadanie drukarek 3D 15% ma do dyspozycji 1 drukarkę, a u 52% przedsiębiorstw wielkość parku maszynowego waha się w granicach 2-5 sztuk. Co piąty respondent (19%) deklaruje korzystanie z własnych 6-10 maszyn, a 14% ankietowanych wskazało posiadanie powyżej 10 drukarek 3D. Największa liczba deklarowanych przez przedsiębiorstwo drukarek 3D to 180 sztuk.



Rys. 8.11. Liczba posiadanych drukarek 3D

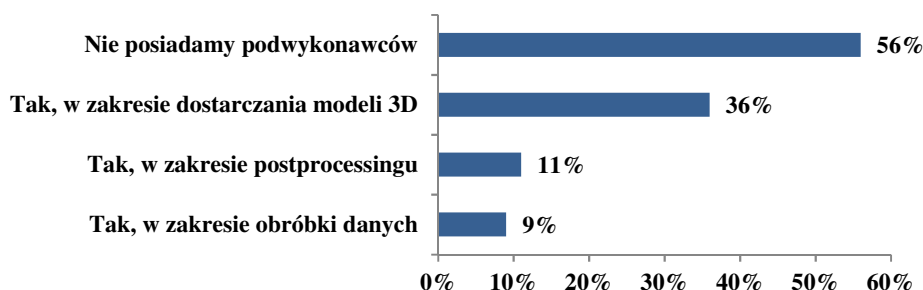
W dalszej części badania dokonano weryfikacji najczęściej stosowanych metod przyrostowych. Spośród 88 firm 14 nie sprecyzowało, jakie drukarki 3D posiada we własnym zakresie. Z kolei, jak wynika z rys. 8.12, najczęściej stosowaną technologią druku 3D wśród badanych przedsiębiorstw jest metoda FFF/FDM. Wśród 74 ankietowanych 73% wskazało właśnie tę metodę. Wyniki te nie zaskakują. Jak już wcześniej wspomniano, metoda ta ze względu na stosunkowo proste



Rys. 8.12. Technologie druku 3D wykorzystywane w przedsiębiorstwach

rozwiązania techniczne oraz niski koszt realizacji wydruków jest jedną z najbardziej popularnych. Na kolejnym miejscu pojawia się metoda SLM/DMLS, którą przedstawiło 19% respondentów. Trzecią z kolei najczęściej stosowaną technologią jest SLS – odpowiedź ta padła w 15% przypadków. Technologia DLP została odnotowana u 14% ankietowanych, a JM/PolyJet u 13% respondentów. Z kolei zastosowanie technologii SLA deklaruje 11% przedstawicieli. Najbardziej stosowanymi metodami druku 3D wśród badanych przedsiębiorstw są metody: 3DP oraz MJF. Takiej odpowiedzi udzieliło odpowiednio 7 oraz 5% respondentów.

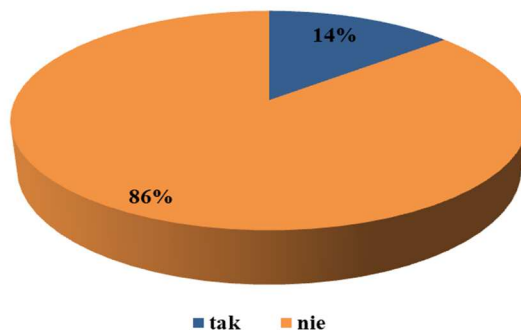
Kolejne pytanie w ankiecie dotyczyło posiadanych przez przedsiębiorstwo podwykonawców oraz zakresu ich wsparcia. Respondenci mogli wybrać dowolną liczbę odpowiedzi lub przedstawić własne. Jak wynika z badań, 56% ankietowanych przedsiębiorstw nie korzysta z usług firm zewnętrznych w zakresie technologii przyrostowych. Modele 3D zamawia od podwykonawcy 36% podmiotów, 11% zleca czynności związane z postprocessingiem, a 9% potrzebuje wsparcia w zakresie obróbki danych. Wyniki przedstawiono na rys. 8.13.



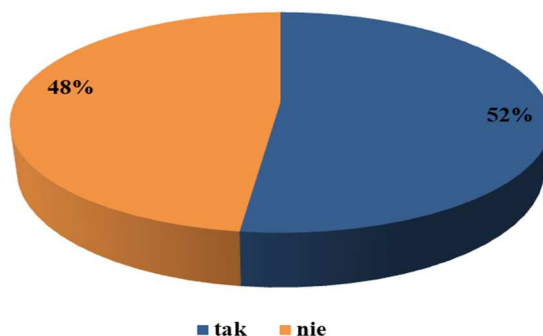
Rys. 8.13. Deklaracja posiadania podwykonawców oraz zakres ich wsparcia

Jedną z możliwości stosowania outsourcingu w zakresie druku 3D jest korzystanie z usług firm, które ułatwiają formę złożenia zamówienia, wykorzystując platformy do automatycznej wyceny i zamawiania modeli. Takie możliwości dają m.in. firmy: Materialise, 3D Hubs, IGUS, 3Dream, Cubic Inch, czy Ajmaker. Stąd też w ankiecie pojawiło się pytanie dotyczące korzystania przez przedsiębiorstwo z tego typu platform. Jak wynika z przeprowadzonych badań, 86% respondentów podało odpowiedź przeczącą. Jedynie 14% ankietowanych korzysta z tej formy wyceny i zamawiania modeli (rys. 8.14).

Technologie przyrostowe dają możliwość formowania niemal dowolnych struktur w procesie wytwarzania. Najprostsza sytuacja występuje w momencie, gdy komputer wyposażony w oprogramowanie 3D-CAD jest połączony bezpośrednio z drukarką 3D. Z kolei założeniem koncepcji Przemysłu 4.0 jest cyfrowy przepływ informacji, np. w ramach chmur danych. W ankiecie pojawiło się zatem pytanie dotyczące wykorzystywania obiegu danych w sieci powiązanych z modułami 3D-CAD. Rysunek 8.15 przedstawia wyniki przeprowadzonych badań.



Rys. 8.14. Deklaracja korzystania z platform do automatycznej wyceny modeli 3D



Rys. 8.15. Deklaracja stosowania obiegu danych w sieci powiązanych z modułami 3D-CAD

Wśród 100 ankietowanych nieco ponad połowa (52%) podała odpowiedź twierdzącą, z kolei 48% respondentów deklarowało brak korzystania z Internetu do przepływu informacji w podanym zakresie.

## 8.6. Obróbka wykończeniowa

Niekiedy wydruk 3D wymaga dodatkowych operacji nazywanych postprocessingiem. Można wyróżnić kilka podstawowych zabiegów pozwalających na poprawę wybranych cech modelu (podniesienie walorów estetycznych, poprawa funkcjonalności, przygotowanie do łączenia w zespoły z innymi modelami, podwyższenie ich trwałości). Do zabiegów tych należą:

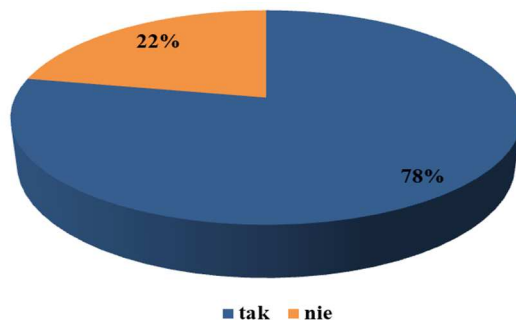
- usuwanie podpór (supportów) i innych elementów technicznych, których zadaniem jest wspomaganie procesu druku detalu (podpory to elementy

drukowane przez drukarkę 3D w celu utrzymania stabilności i integralności modelu podczas procesu),

- obróbka ubytkowa w postaci: polerowania, szlifowania, frezowania, toczenia, cięcia czy wiercenia,
- łączenie w zespoły lub łączenie związane z ograniczeniami przestrzeni roboczej,
- malowanie/lakierowanie,
- wygrzewanie, piaskowanie, klejenie, szpachlowanie.

W związku z tym w ankiecie pojawiło się pytanie odnośnie do wykonywania obróbki wykończeniowej modeli 3D przez przedsiębiorstwa. Wyniki przedstawiono na rys. 8.16.

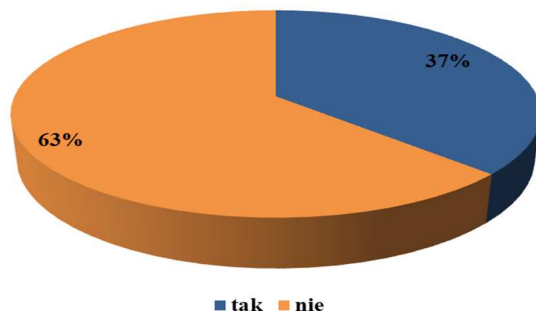
Jak wynika z przeprowadzonych badań, 78% przedsiębiorstw dokonuje post-processingu na modelach wykonanych w metodach przyrostowych. Z kolei w 22% firm obróbka wykończeniowa nie jest stosowana.



Rys. 8.16. Deklaracja stosowania obróbki wykończeniowej wydruków 3D

Przeważająca część prac w trakcie postprocessingu modeli 3D jest wykonywana za pomocą narzędzi i materiałów, takich jak: nożyki stolarskie, kombinerki, pęsety, szczypce czy papier ścierny o różnej ziarnistości. Coraz częściej jednak na rynku pojawiają się zintegrowane gniazda obróbcze, dające możliwość przeprowadzenia kompletnych operacji w procesie postprocessingu. Dodatkowe urządzenia dostarczane opcjonalnie z maszyną przyrostową proponują w swojej ofercie firmy Zortrax i Stratasys. Posiadają one maszyny do wygładzania powierzchni wydruków 3D, usuwania nadmiaru żywicy czy usuwania rozpuszczalnych struktur podporowych. W kwestionariuszu ankietowym pojawiło się zatem pytanie odnośnie do stosowania zautomatyzowanych systemów do postprocessingu.

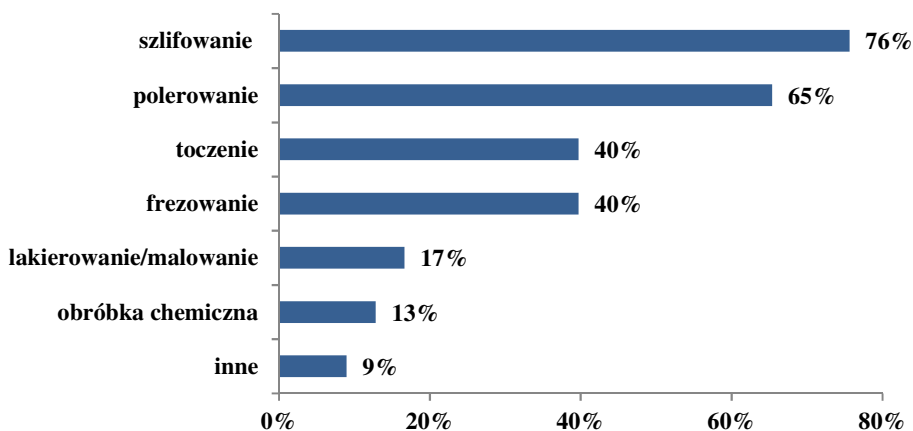
Analizując rys. 8.17, można zauważyć, że większość ankietowanych korzysta z tradycyjnych metod obróbki. Jedynie 37% respondentów deklaruje stosowanie zautomatyzowanej obróbki wykończeniowej.



Rys. 8.17. Deklaracja stosowania zautomatyzowanej obróbki wykończeniowej

W dalszej części ankiety poproszono respondentów o sprecyzowanie, jakie rodzaje obróbki wykończeniowej stosują. Odpowiedzi na to pytanie otwarte zostały skategoryzowane, a wyniki można prześledzić na rys. 8.18.

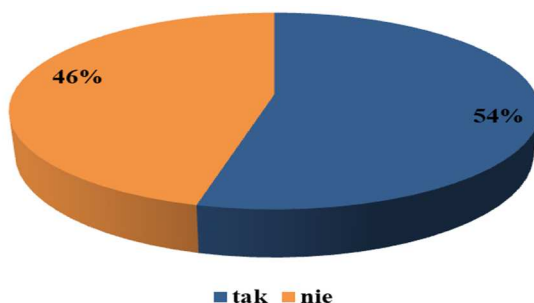
Wśród 78 firm deklarujących stosowanie obróbki wykończeniowej największą część respondentów deklaruje wykorzystanie szlifowania oraz polerowania. Wyniki w tym przypadku kształtowały się na poziomie odpowiednio 76 oraz 65% odpowiedzi. Na kolejnych miejscach znalazły się procesy związane z toczeniem i frezowaniem. Takiej odpowiedzi udzieliło 40% respondentów. Czynności związane z lakierowaniem/malowaniem przedstawiło 17% ankietowanych, a 13% wskazało na procesy chemiczne. Inne sposoby obróbki wykończeniowej deklarowane w ankietach to: wygładzanie, piaskowanie, klejenie, szpachlowanie.



Rys. 8.18. Deklaracja korzystania z określonych obróbek wykończeniowych

## 8.7. Kontrola jakości modeli/wydruków

W każdym procesie technologicznym istnieje ryzyko popełnienia błędu. Przyczyna może być związana zarówno z materiałem wykorzystanym do produkcji, awarią maszyny, jak i błędem ludzkim. Braki produkcyjne są niejako wkalkulowane w działalność przedsiębiorstw. Kontrola jakości na każdym etapie przepływu materiału niewątpliwie niesie ze sobą zysk w postaci redukcji strat powstałych w wyniku wadliwej produkcji. W związku z tym w ankiecie pojawiło się pytanie dotyczące posiadania przez przedsiębiorstwo komórki kontroli jakości. Wyniki zostały przedstawione na rys. 8.19.



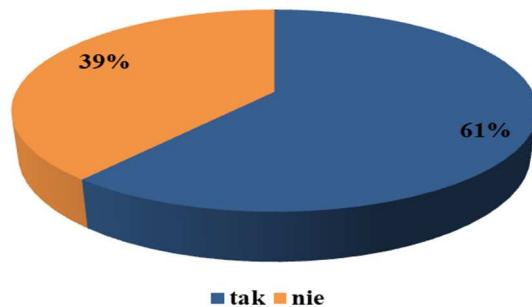
Rys. 8.19. Deklaracja posiadania komórki kontroli jakości

Jak wynika z przeprowadzonych badań, spośród 100 przedsiębiorstw jedynie 54% firm posiada komórkę kontroli jakości. W pozostałych 46% przypadków padła odpowiedź przecząca. W tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, że część firm nie posiada w swojej strukturze organizacyjnej oddzielnej sekcji kontroli jakości. W takim przypadku weryfikacja zgodności jakościowej może się odbywać po procesie technologicznym, a osobami odpowiedzialnymi za przeprowadzenie tych czynności są operatorzy maszyn. Dzięki temu produkcja wyrobu jest poddawana kontroli po każdym etapie (lub wybranych etapach), a produkty niezgodne ze specyfikacjami są odrzucane lub przekazywane do poprawy.

Kolejne pytanie w ankiecie dotyczyło kontroli jakości modeli/wyrobów gotowych wytworzonych metodami szybkiego prototypowania. Na podstawie rys. 8.20 można zauważyć, że 61% badanych przedsiębiorstw dokonuje weryfikacji jakości wydruków po przyjęciu ich od podwykonawcy, a 39% firm takich czynności nie przewiduje.

W celu sprecyzowania informacji dotyczących sposobu przeprowadzania kontroli jakości wydruków w ankiecie pojawiło się dodatkowe pytanie otwarte. Wyniki przeprowadzonej analizy zostały przedstawione w tab. 8.1.





Rys. 8.20. Kontrola jakości modeli/wyrobów 3D

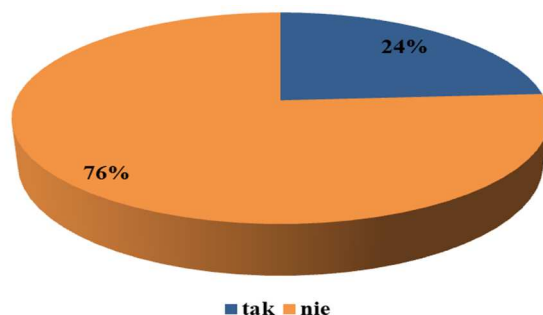
Tabela 8.1. Deklarowane sposoby kontroli jakości wydruków 3D

Sposób kontroli	Liczba odpowiedzi <i>n</i> = 61	Liczba odpowiedzi [%]
Weryfikacja wizualna	22	36
Weryfikacja wizualna, skanowanie zautomatyzowane	15	25
Weryfikacja wizualna, kontrola za pomocą narzędzi	10	16
Weryfikacja wizualna, skanowanie zautomatyzowane, tomografia	3	5
Weryfikacja wizualna, WMP	3	5
Weryfikacja wizualna, kontrola za pomocą narzędzi, skanowanie zautomatyzowane	2	3
Weryfikacja wizualna, skanowanie ręczne	1	2
Weryfikacja wizualna, kontrola za pomocą narzędzi, WMP	1	2
Weryfikacja wizualna, kontrola za pomocą narzędzi, sprawdziany	1	2
Weryfikacja wizualna, sprawdziany, skanowanie zautomatyzowane	1	2
Weryfikacja wizualna, skanowanie zautomatyzowane, WMP	1	2
Weryfikacja wizualna, kontrola za pomocą narzędzi, skanowanie zautomatyzowane, WMP	1	2

Spośród 61 firm 36% korzysta wyłącznie z wizualnej weryfikacji jakości wydruków. W przypadku skomplikowanych modeli oraz wyrobów gotowych warto jest zastosować dodatkowe czynności związane z weryfikacją ich jakości. Oprócz wstępnej kontroli wizualnej 64% przedsiębiorstw preferuje dodatkowe sposoby kontroli jakości wyrobów. Przykładem może być skanowanie zautomatyzowane, które wykorzystuje 39% badanych firm. Co czwarte przedsiębiorstwo korzysta z narzędzi, spośród których można wymienić m.in. suwmiarke, mikrometr czy mikroskop warsztatowy. W kontroli jakości modeli 3D wytwarzanych seryjnie preferuje się również korzystanie ze sprawdzianów – 4% badanych przedsię-

biorstw wskazało właśnie tę metodę. Inne sposoby kontroli jakości wydruków przedstawione w ankietach to: współrzędnościowe systemy pomiarowe (11%), tomografy (5%) oraz skanery ręczne (2%).

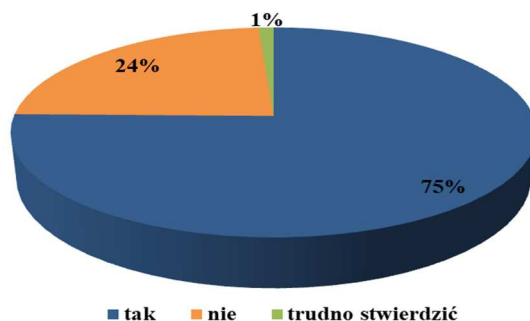
W dalszej części badania dokonano weryfikacji wykorzystania aplikacji w chmurze do analizy danych pomiarowych. Dane zawarte na rys. 8.21 skłaniają do stwierdzenia, że 76% ankietowanych nie korzysta z możliwości Cloud Computing. Jedynie 24% respondentów deklaruje użycie tej technologii do oceny i analizy jakości modeli/wyrobów gotowych.



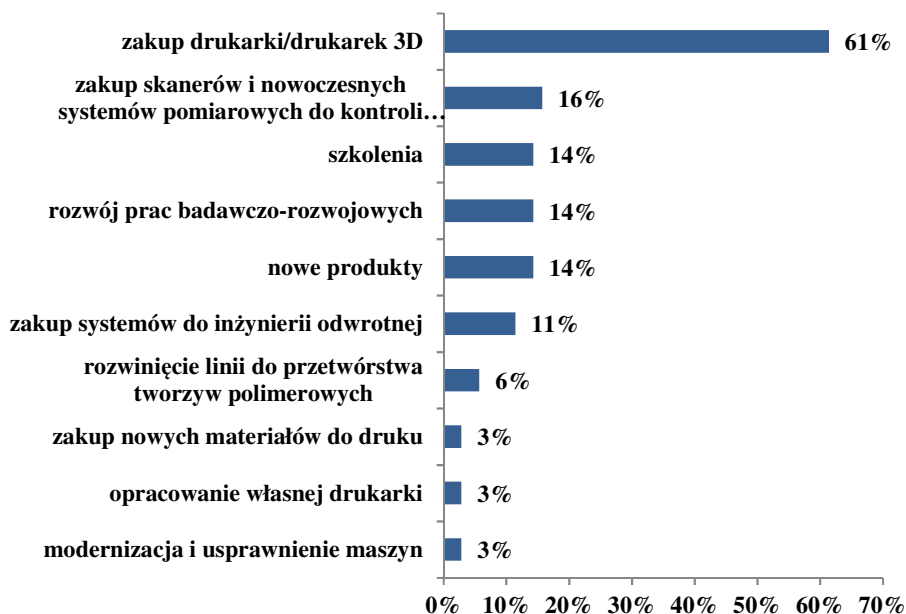
Rys. 8.21. Deklaracja korzystania z aplikacji w chmurze przy analizie danych pomiarowych

## 8.8. Rozwój działalności

Spośród 100 respondentów 93 udzieliło odpowiedzi na pytanie dotyczące rozwoju przedsiębiorstwa w najbliższym czasie. Wśród nich 75% potwierdza chęć rozwoju, a 1% ankietowanych nie jest w stanie tego określić. Odpowiedź przecząca pojawiła się u 24% badanych (rys. 8.22).



Rys. 8.22. Rozwój działalności przedsiębiorstwa



Rys. 8.23. Kierunki rozwoju przedsiębiorstw

W dalszej części badania zweryfikowano kierunki rozwoju przedsiębiorstw wykorzystujących technologie przyrostowe. Odpowiedzi respondentów przedstawia rys. 8.23. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, największa liczba przedsiębiorstw planujących rozwój ma zamiar zakupić dodatkowe urządzenia do druku 3D. Ten kierunek został wskazany w 61% przypadków. Kolejny aspekt to zakup skanerów i nowoczesnych systemów pomiarowych do kontroli jakości wydruków – taka odpowiedź padła u 16% ankietowanych. Z kolei 14% respondentów zadeklarowało chęć uczestnictwa w szkoleniach. Również 14% przedstawicieli upatruje zwiększenia swojej pozycji na rynku przez rozwój działań badawczo-rozwojowych oraz wprowadzenie nowych produktów. Pomysł zakupu systemów do inżynierii odwrótej pojawił się w 11% przypadków. Inne kierunki rozwoju przedsiębiorstw to: rozwińnięcie linii do przetwórstwa tworzyw polimerowych (6%), zakup nowych materiałów do druku (3%), opracowanie własnej drukarki (3%) oraz modernizacja i usprawnienie maszyn (3%).

W dalszej części badania postanowiono zweryfikować, czy istnieje zależność pomiędzy chęcią rozwoju a:

- wielkością firmy,
- zasięgiem prowadzonej działalności,
- latami działalności przedsiębiorstwa,
- branżą.

Badania przeprowadzono na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Do analizy wykorzystano test niezależności chi-kwadrat Pearsona.

Wprowadzono następujące hipotezy badawcze:

- $H_0$  – chęć rozwoju przedsiębiorstwa nie wiąże się z jego wielkością/zasięgiem terytorialnym prowadzonej działalności/latami działalności/branżą,
- $H_1$  – chęć rozwoju przedsiębiorstwa wiąże się z jego wielkością/zasięgiem terytorialnym prowadzonej działalności/latami działalności/branżą.

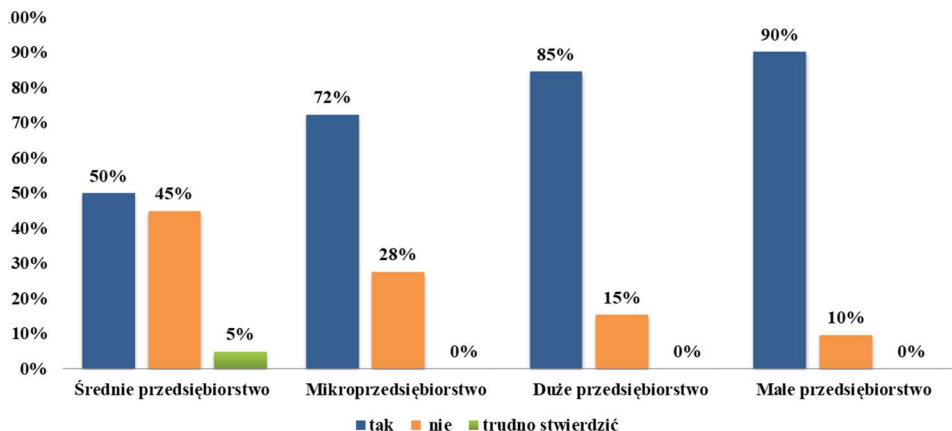
W tabeli 8.2 zestawiono wyniki przeprowadzonej analizy.

Tabela 8.2. Wyniki badań dotyczących wpływu określonych parametrów na chęć rozwoju przedsiębiorstwa

Parametr	<i>p</i>
Wielkość firmy	<b>0,03656</b>
Zasięg prowadzonej działalności	<b>0,23119</b>
Lata działalności	<b>0,89064</b>
Branża Automotive	<b>0,58588</b>
Branża elektromaszynowa	<b>0,88380</b>
Branża druku 3D	<b>0,59259</b>
Branża lotnicza	<b>0,57999</b>
Branża dydaktyczna	<b>0,52549</b>
Branża medyczna	<b>0,93550</b>
Branża kosmiczna	<b>0,90101</b>

Jak wynika z przeprowadzonych badań, na chęć rozwoju przedsiębiorstwa ma prawdopodobnie wpływ wielkość firmy:  $\alpha > p$  ( $p = 0,03656$ ). W pozostałych przypadkach zależność nie występuje:  $\alpha < p$ .

Z danych zawartych na rys. 8.24 wynika, że skłonność do rozwoju przedsiębiorstwa w największym stopniu występuje wśród małych przedsiębiorstw. Aż 90% respondentów deklarujących przynależność do tej grupy wskazało zamiar rozszerzenia działalności. Spośród grupy dużych przedsiębiorstw 85% zamierza w najbliższym czasie wdrożyć plany rozwojowe. W przypadku sektora mikroprzedsiębiorstw wdrożenie działań doskonalących deklaruje 72% ankietowanych. Z kolei plany rozwojowe w grupie średnich przedsiębiorstw posiada jedynie 50% badanych.



Rys. 8.24. Deklaracja chęci rozwoju przedsiębiorstwa z podziałem na wielkość firm

## 8.9. Analiza szans i zagrożeń wynikających z wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0

W ostatniej części kwestionariusza, w pytaniach otwartych, poproszono respondentów o przedstawienie ich opinii dotyczących szans i zagrożeń, jakie niesie ze sobą wdrożenie koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwie. Podczas analizy wyników odpowiedzi ankietowanych zostały skategoryzowane według podobieństwa, a następnie przedstawione w ujęciu graficznym, z podaniem liczby analogicznych komentarzy [130].

Rysunek 8.25 jest zestawieniem wyników zbiorczych analizy dotyczących szans uzyskanych w związku z wdrożeniem technologii charakterystycznych dla Czwartej Rewolucji Przemysłowej. Odpowiedź otrzymano od 28 respondentów. Wśród korzyści ankietowani wymienili: automatyzację procesów, wzrost wydajności, minimalizację czasów przestoju (54% badanych), wysoką jakość produktów (29%), szybki dostęp do danych i możliwość ich analizy (29%), ulepszenie planowania i monitorowania procesów wytwórczych (25%), zwiększenie szybkości reakcji na problemy (14%), przyśpieszenie prac związanych z wdrożeniem nowego produktu i pozyskiwaniem części zamiennych (14%), zwiększenie elastyczności produkcji (11%) oraz zwiększenie konkurencyjności (7%).



Rys. 8.25. Szanse wynikające z wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0

Jak wynika z przeprowadzonych badań, najczęściej pojawiającą się odpowiedzią dotyczącą szans, jakie daje wdrożenie Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwie jest automatyzacja procesów, która z kolei przyczynia się do wzrostu produktywności i minimalizacji czasów przestojów. Wprawdzie automatyzacja zakładu produkcyjnego wiąże się z drogimi inwestycjami ze względu na koszt zakupu robotów przemysłowych wraz z niezbędną dla nich infrastrukturą i oprogramowaniem sterującym, to jednak daje możliwość lepszego wykorzystania posiadanych zasobów i skrócenia czasu produkcji. Warto jest więc przygotować bilans kosztów i potencjalnych zysków, aby być w pełni świadomym wprowadzanych zmian i konsekwencji z nimi związanych. Dodatkowo, wskutek automatyzacji procesów produkcyjnych minimalizuje się ryzyko powstania błędu, co wpływa na redukcję liczby wytwarzanych detali wadliwych. Wszystkie te czynniki wpływają na zmniejszenie kosztów, a także wzrost jakości produktów, co stanowi ogromną szansę dla przedsiębiorstw [46, 70].

Kolejne korzyści, jakie zostały przedstawione w ankietach, to szybki dostęp do danych oraz możliwość ich łatwej analizy. Zastosowanie Internetu Rzeczy, chmur obliczeniowych czy Big Data ułatwia widoczność informacji produkcyjnych oraz umożliwia śledzenie bieżącego stanu pracy maszyn. Łatwiejsze staje się również zarządzanie wytwarzaniem rozproszonych geograficznie oddziałów produkcyjnych [48, 134]. Fakt ten przyczynia się do lepszego planowania i monitorowania procesów wytwórczych, co również zostało dostrzeżone przez ankietowanych.

Jedną z możliwości zastosowania Internetu Rzeczy jest gromadzenie danych dotyczących stanu wyposażenia i przebiegu procesów produkcyjnych. Porównując archiwalne odczyty parametrów maszyn z danymi bieżącymi, można z wy-

przedzeniem przewidzieć zbliżające się awarie oraz ich źródło. Idea predykcyjnego utrzymania ruchu stanowi więc dodatkową zaletę ze względu na uniknięcie kosztów napraw oraz przestojów produkcyjnych [47].

Czwarta Rewolucja Przemysłowa daje również szansę skrócenia czasu projektowania i wprowadzania produktów na rynek (time-to-market). Takie możliwości zapewnia m.in. wykorzystanie druku 3D, który pozwala na wytwarzanie prototypów w krótkim czasie i przetestowanie ich w warunkach rzeczywistych. W ten sposób inżynierowie mogą na bieżąco dokonywać zmian w projekcie, aż do momentu uzyskania pożądanego rezultatu. Ponadto zastosowanie technologii przyrostowych pozwala w stosunkowo prosty sposób pozyskiwać części zamienne, co stanowi dodatkowy atut dla przedsiębiorstw [42].

Ankietowani zwrócili również uwagę na fakt, że zgodnie z ideą Przemysłu 4.0 następuje personalizacja produkcji. Zadaniem firm będzie wytworzenie zindywidualizowanego produktu, po konkurencyjnej cenie i z szybkim czasem realizacji. Przez zastosowanie automatyzacji producent nie poniesie wysokich kosztów związanych z przezbrajaniem maszyn, ponieważ wszystkie czynności będą się odbywać bez udziału człowieka. Dostosowanie się do wymagań rynku jest więc warunkiem koniecznym dla konkurencyjności przedsiębiorstwa.

Na pytanie dotyczące zagrożeń związanych z wdrożeniem koncepcji Przemysłu 4.0 odpowiedź uzyskano od 28 respondentów. Wyniki przedstawiono graficznie na rys. 8.26.



Rys. 8.26. Zagrożenia wynikające z wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0

Obawy związane z Czwartą Rewolucją Przemysłową najczęściej były związane z brakiem dostatecznej wiedzy (18% badanych), koniecznością przeszkolenia pracowników, powstaniem nowych zawodów oraz likwidacją miejsc pracy (18%), bezpieczeństwem danych i stałą ich kontrolą (18%), zależnością od systemów IT i ryzykiem awarii serwerów (14%), wysokimi kosztami wdrożenia (11%), długim okresem wdrażania i nakładów pracy z tym związanych (11%), brakiem konsekwencji przy wdrażaniu oraz popełnianymi błędami (7%), a także wzrostem konkurencji dla sektora MŚP (7%).

Z analizy zebranego materiału wynika, że do największych zagrożeń według respondentów można zaliczyć brak dostatecznej wiedzy wśród kadry zarządzającej i pracowników. Ankietowani obawiają się, że zarówno na stopniu menadżerskim, jak i pracowniczym kompetencje niezbędne do przeprowadzenia firmy przez proces transformacji cyfrowej są niewystarczające. Wątpliwości te wydają się być uzasadnione. Jak opisano w Raporcie SIEMENS 2019 i 2020, system edukacyjny może być nadal niedostosowany do opisywanych wymogów innowacyjnego przemysłu. Pomimo zwiększenia świadomości na temat koncepcji Przemysłu 4.0 w Polsce wciąż brakuje miejsc posiadających odpowiednią ofertę kształcenia w tym zakresie [67, 68].

Implementacja Przemysłu 4.0 może doprowadzić do zmian na rynku pracy. W kontekście kompetencji zawodowych inżynierów rodzi się potrzeba posiadania umiejętności interdyscyplinarnych łączących swoim zakresem chociażby: automatykę, mechanikę, robotykę, programowanie czy IT. Dodatkowo wzrost umiędzynarodowienia wymusza na inżynierach nie tylko znajomość środowiska wybranego oprogramowania, ale również sprawne porozumiewanie się w językach obcych [5, 156]. Konieczne stanie się zatem nie tylko przeszkolenie obecnych pracowników, ale również pozyskanie nowych. Sytuacja taka może skutkować bezrobociem tych osób, które nie dostosują się do wprowadzanych zmian i nie będą skłonne zwiększać swoich umiejętności [66]. Ponadto wśród społeczeństwa rośnie obawa, że masowa robotyzacja doprowadzi do likwidacji miejsc pracy. Szczególnie zagrożone będą zawody, które charakteryzują się wykonywaniem powtarzalnych czynności.

Kolejne zagrożenia, jakie zostały przedstawione, to możliwość stania się ofiarą cyberataków, a także zależność od systemów IT i ryzyko awarii serwerów. Podłączenie całej fabryki do Internetu może się wiązać z poważnymi konsekwencjami. Wyzwaniem staje się więc odpowiednie zabezpieczenie danych, a także zminimalizowanie ryzyka ich utraty i ingerencji osób niepożądanych. Przedsiębiorstwa będą zmuszone do inwestycji w produkty o bezpiecznej architekturze, a także do zatrudnienia wysoko wykwalifikowanych pracowników odpowiedzialnych za poziom bezpieczeństwa danych [3].

W ankietach została również poruszona kwestia długiego okresu wdrażania koncepcji Przemysłu 4.0, a także dużych nakładów pracy z tym związanych i poniesionych kosztów. Internet rzeczy, sztuczna inteligencja czy automatyzacja i robotyzacja to aspekty kluczowe w implementacji Przemysłu 4.0. Inwestycje



w transformacje cyfrowe są wysoce kosztowne i wymuszają na przedsiębiorstwach zmianę modeli biznesowych, na co potrzebny jest czas. Ponadto przejście z poziomu Przemysłu 3.0 do 4.0 to proces niezwykle złożony. Jest on obciążony wysokim ryzykiem, dlatego musi być realizowany konsekwentnie i odbywać się etapami [29, 43]. Błędy podczas implementacji mogą rzutować na firmę w ogromnym stopniu, na co również zwrócili uwagę respondenci.

Wśród ankietowanych pojawiła się także obawa, że Czwarta Rewolucja Przemysłowa stanie się zagrożeniem dla sektora MŚP. Wielkie korporacje chętnie będą wdrażać nowoczesne technologie, podczas gdy małych i średnich przedsiębiorstw może nie będzie na to stać [101]. Istnieje więc ryzyko, że firmy, które nie dostosują się do zmian, szybko stracą swoje udziały w rynku.



## PODSUMOWANIE

Monografia jest próbą syntezy i analizy technologii przyrostowych w nowoczesnych systemach produkcyjnych opartych na inteligentnych rozwiązaniach wykorzystujących komputerowe wspomaganie projektowania i wytwarzania CAx oraz informatyczne struktury sieciowe. W pierwszej części opracowania zawarte są podstawowe informacje dotyczące technologii przyrostowych i druku 3D. Wyróżniono podstawowe procesy przyrostowe, opierając się na aktualnych normach, także w odniesieniu do rozwoju tych technologii na przestrzeni kilkudziesięciu lat, jak również w kontekście rynku krajowego. Jak można zauważyć, w druku 3D korzysta się z siedmiu podstawowych procesów przyrostowych, które są podstawą do tworzenia maszyn i urządzeń przetwarzających materiały z różnej postaci wyjściowej do postaci wyrobów. Procesy te w większości nie podlegają już ochronie patentowej, stąd na rynku znajduje się wielu producentów drukarek 3D o różnych zastosowaniach, zróżnicowanych cenach i gabarytach. Skala zastosowań jest niemal nieograniczona i można tu wyróżnić indywidualnych użytkowników oraz m.in. branże: samochodową, lotniczą, elektromaszynową, medycyną, obronną, artystyczną czy kosmiczną. Ze względu na to drukarki 3D spotyka się obecnie niemal wszędzie, począwszy od gospodarstw domowych, przez instytucje publiczne, po uczelnie i przedsiębiorstwa. Technologie przyrostowe pozwalają na wytwarzanie makroobiektów, zabawek, pomocy dydaktycznych, prototypów i wyrobów przemysłowych, elementów konstrukcji budowlanych. Są również planowane do budowy statków i baz kosmicznych. Istotne jest zatem prowadzenie badań zarówno w obszarze rozwoju samej technologii, jak też jej miejsca we współczesnych i przyszłych systemach produkcyjnych.

Na rynku krajowym technologie przyrostowe funkcjonują niewiele ponad dwadzieścia lat. Biorąc to pod uwagę, można się już starać przeprowadzić pewną analizę rynku zarówno badawczego, jak i przemysłowego. Przedmiotem opracowania były również badania ankietowe mające na celu zdiagnozowanie obecnej sytuacji rynkowej druku 3D w Polsce oraz określenie możliwych trendów rozwoju. Dotyczyło to szczególnie rozwiązań stosowanych obecnie w strukturze Przemysłu 4.0, jak również kontekstu przemysłu przyszłości. Można stwierdzić, że stale zwiększa się zainteresowanie technologiami druku 3D i wdrażania ich w praktyce przemysłowej. W wielu przypadkach brakuje jednak wiedzy na ten temat, a informacje są często pozyskiwane ze źródeł internetowych o charakterze hobbystyczno-modelarskim. Istnieje zatem potrzeba rozwoju badań nad technologiami przyrostowym, jak również budowy bazy wiedzy o charakterze wiarygodnym i profesjonalnym. Takie podejście umożliwi zdobycie kompleksowych informacji dotyczących technologii przyrostowych i możliwości ich wdrożenia w określonych warunkach przemysłowych.

Technologie przyrostowe mają także olbrzymi potencjał związany z przetwarzaniem danych numerycznych do postaci finalnego wyrobu z zastosowaniem informatycznych systemów sieciowych. Mogą stanowić istotny element procesów związanych z rozwojem obszarów rzeczywistości wirtualnej i rzeczywistości rozszerzonej. Zespoły badawcze, w skład których wchodzi naukowcy z kilku wydziałów Politechniki Rzeszowskiej, realizują prace związane z wirtualizacją procesów dla technologii druku 3D. Dotyczą one m.in. projektowania interaktywnych trenerów i bliźniaków cyfrowych dla określonych maszyn i systemów przyrostowych.

Biorąc pod uwagę cechy technologii addytywnych, do których należą: niemal nieograniczone możliwości wytwarzania wyrobów, elastyczność produkcyjna, szerokie spektrum zastosowań, możliwość przetwarzania niezwykle szerokiej gamy materiałów, relatywnie małe zużycie energii, generowanie małej ilości odpadów w porównaniu z technologiami tradycyjnymi i in., należy stwierdzić, że druk 3D stanowi istotny element przemysłu przyszłości.

Prowadzone są obecnie prace w kierunku normowania procesów przyrostowych w odniesieniu do samych procesów druku 3D oraz do określonych zastosowań. W dalszym ciągu istnieje jednak potrzeba realizacji badań dotyczących metodyki kontroli jakości wyrobów wytwarzanych addytywnie w odniesieniu do ich projektowania i samej eksploatacji. Zastosowanie nowoczesnych narzędzi numerycznych, sieciowych, automatyzacji i robotyzacji pozwala wprowadzić technologie przyrostowe na kolejny etap rozwoju.

## LITERATURA

- [1] 3D HUBS, 3D printing trends 2020. Industry highlights and market trends. 3D Hubs Manufacturing LLC, 2020.
- [2] Abouhashem Y., Dayal M., Savanah S., Štrkalj G., The application of 3D printing in anatomy education. *MedicalEducation Online*, 20. 29847, 2015.
- [3] Ali I., Sabir S., Ullah Z., Internet of Things security, device authentication and access control: a review. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 2016, 14(8), 456.
- [4] Aouad S., Maizate A., Zakari A., Cyber security and the Internet of Things: vulnerabilities, threats, intruders and attacks. *Revue Méditerranéenne des Télécommunications = Mediterranean Telecommunication Journal*, CNRST-IMIST, 2019, 9(2), 03233370.
- [5] ASTOR WHITEPAPER, Inżynierowie Przemysłu 4.0 (Nie)gotowi do zmian? [https://www.astor.com.pl/images/Industry\\_4-0\\_Przemysl\\_4-0/ASTOR\\_Inzynierowie\\_4.0\\_whitepaper.pdf](https://www.astor.com.pl/images/Industry_4-0_Przemysl_4-0/ASTOR_Inzynierowie_4.0_whitepaper.pdf), 2017 (dostęp: 25.10.2021).
- [6] Attaran M., The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 2017, 60, 677-688.
- [7] Badiru A.B., Valencia V.V., Liu D., Additive Manufacturing Handbook book. Product Development for the Defense Industry. CRC Press, 2017.
- [8] Bieńkowski M., Innowacyjne rozwiązania dla przemysłu 4.0. *Automatyka*, 2018, 5, 26-34.
- [9] Bitonti F., 3D Printing Design: Additive manufacturing and the materials revolution. Bloomsbury Visual Arts, 2019.
- [10] Bogue R., 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation*, 2013, 33(4), 307-311.
- [11] Budzik G., Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [12] Budzik G., Przeszlowski Ł., Kontrola procesu wytwarzania przyrostowego oparta na systemach zdalnie sterowanych. *Przegląd Mechaniczny*, 2021, 1, 28-31.
- [13] Budzik G., Przeszlowski Ł., Mobilny system druku 3D do pracy w warunkach polowych. *Przegląd Mechaniczny*, 2021, 1, 32-34.
- [14] Budzik G., Dziubek T., Zaborniak M., Analiza dokładności geometrycznej prototypów kół zębatach z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej. [W:] G. Budzik (red.), Określenie chwilowego śladu styku przekładni zębatach z zastosowaniem metod szybkiego prototypowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011, 131-148.
- [15] Budzik G., Przeszlowski Ł., Woźniak J., Badanie zdolności produkcyjnej w branży szybkiego prototypowania. *Przegląd Mechaniczny*, 2019, 2, 20-22.
- [16] Budzik G., Przeszlowski Ł., Wydrzyński D., Pyziak L., Kochmański Ł., Zastosowanie technologii przyrostowych do wytwarzania przyłbic ochronnych. *Przegląd Mechaniczny*, 2020, 11, 24-27.

- [17] Budzik G., Magniszewski M., Przeszlowski Ł., Oleksy M., Oliwa R., Bernaczek J., Torsional strength testing of machine elements manufacture by incremental technology from polymeric materials. *Polimery*, 2018, 63(11-12), 830-832.
- [18] Budzik G., Woźniak J., Paszkiewicz A., Przeszlowski Ł., Dziubek T., Dębski M., Methodology for the Quality Control Process of Additive Manufacturing Products Made of Polymer Materials. *Materials*, 2021, 14(9), 2202.
- [19] Bujak A., Rewolucja przemysłowa – 4.0 i jej wpływ na logistykę XXI wieku. *Autobusy*, 2017, 6, 1338-1344.
- [20] Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Pietrus P., Cygan R., Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins. *Applied Sciences*, 2020, 10(2), 486.
- [21] Butler A., Speed and Precision. *Aviation Week & Space Technology*, 2015, 177 (7), 55-56.
- [22] Caban J., Szala M., Kęsik J., Czuba Ł., Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive. *Autobusy*, 2017, 6, 573-579.
- [23] Campbell T.A., Ivanova O.S., Additive manufacturing as a disruptive technology: Implications of three-dimensional printing. *Technology & Innovation*, 2013, 15(1), 67-79.
- [24] Chlebus E., Boratyński T., Dybała B., Frankiewicz M., Kolinka P., *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [25] Chong S., Pan G.-T., Chin J., Show P.L., Yang T.C.K., Huang C.-M., Integration of 3D Printing and Industry 4.0 into Engineering Teaching. *Sustainability*, 2018, 10, 3960.
- [26] Clinton R.G. Jr., Morgan K., Additive Manufacturing at NASA Marshall Space Flight Center: In-space and For-space Initiatives. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160000460/downloads/20160000460.pdf>, 2015 (dostęp: 26.10.2021).
- [27] Cybulska D., Kij A., Ligaj M., Organizowanie i monitorowanie przepływu zasobów i informacji w procesie produkcji. WSiP, Warszawa 2014.
- [28] Dalenogare L.S., Benitez G.B., Ayala N.F., Frank A.G., The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 2018, 204, 383-394.
- [29] Deloitte, [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4364\\_Industry4-0\\_Are-you-ready/4364\\_Industry4-0\\_Are-you-ready\\_Report.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4364_Industry4-0_Are-you-ready/4364_Industry4-0_Are-you-ready_Report.pdf), 2017 (dostęp: 08.10.2021).
- [30] Dodziuk H., DRUK 3D/AM. Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
- [31] Druszcz P., Digitalizacja produktów bankowych jako cel strategiczny uczestników polskiego sektora bankowego. *Ruch Prawniczy, Ekonomiczny i Socjologiczny*, 2017, 79(1), 237-250.
- [32] Dunn J.J., Hutchison D., Kemmer A., Ellsworth A.Z., Snyder M., White W.B., Blair B., 3D Printing in Space: Enabling New Markets and Accelerating the Growth of Orbital Infrastructure. *Engineering, Space Manufacturing 14: Critical Technologies for Space Settlement – Space Studies Institute*, October, 29-31, 2010.
- [33] Dziubek T., Oleksy M., Zastosowanie systemu optycznego ATOS II w technikach szybkiego prototypowania modeli kół zębatych otrzymanywanych na bazie żywicy epoksydowej. *Polimery*, 2017, 62(1), 44-51.

- [34] Efstathiadis A., Koidis C., Tzetzis D., Kyratsis P., Comparative study and analysis on the mechanical properties of 3D printed surgical instrument for in-space applications. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2018, 16 (4), 26-32.
- [35] Elakkad A.S., 3D Technology in the Automotive Industry. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2019, 8(11), 248-251.
- [36] Fidali M., Szybki dostęp do części, czyli technologie przyrostowe w służbie utrzymania ruchu. *Utrzymanie Ruchu*, 2018, 4, 64-68.
- [37] Fijolek A., Ryba J., Żak P., Lelito J., Zastosowanie technologii druku 3D do wykonania rdzenia formy odlewniczej oraz jego kontrola wymiarowa z wykorzystaniem skanera 3D. *Prace Instytutu Odlewnictwa*, 2018, 58(2), 111-124.
- [38] Gajewska T., Zimon D., Kaczor G., Madzik P., The impact of the level of customer satisfaction on the quality of e-commerce services. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2019, 69, 666-684.
- [39] Garrido J., Silva D., Portela B., Lekube B., Integrated User-Oriented Service for 3D Printing Environments with Recycled Material from Maritime Plastic Waste. *Applied Sciences*, 2021, 11(9), 3787.
- [40] Gebler M., UiterkampSchoot A.J.M., Visser C., A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 2014, 74, 158-167.
- [41] Grzelka M., Chajda J., Budzik G., Wieczorowski M., Staniek R., Gapiński B., Koteras R., Krasicki P., Marciniak L., Optical coordinate scanners applied for the inspection of large scale housings produced in foundry technology. *Archives of Foundry Engineering*, 2010, 10(1), 255-260.
- [42] Handal R., An implementation framework for additive manufacturing in supply chains. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, 2017, 10(2), 18-31.
- [43] Herrmann F., The Smart Factory and its Risks. *Systems*, 2018, 6(4), 38.
- [44] Holmström J., Partanen J., Tuomi J., Walter M., Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2010, 21(6), 687-697.
- [45] Hossain M.A., Zhumabekova A., Paul S.C., Kim J.R., A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market. *Sustainability*, 2020, 12(20), 8492.
- [46] Ibarra D., Ganzarain J., Igartua J.I., Business model innovation through Industry 4.0: a review. *Procedia Manufacturing*, 2018, 22, 4-10.
- [47] Jamrozik W., BIG DATA w służbie predykcji. *Utrzymanie Ruchu*, 2018, 4, 36-39.
- [48] Kache F., Seuring S., Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 2017, 37(1), 10-36.
- [49] Kauf S., Placzek E., Sadowski A., Szołtysek J., Twaróg S., *Vademecum Logistyki*. Difin, Warszawa 2016.
- [50] Khajavi S.H., Partanen J., Holmström J., Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 2014, 65(1), 50-63.
- [51] Khosravani M.R., Reinicke T., On the Use of X-ray Computed Tomography in Assessment of 3D-Printed Components. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, 39, 75.
- [52] Koperwas M., Analiza wpływu geometrii turbiny wiatrowej na bazie prototypu wykonanego w metodzie przyrostowej. Praca dyplomowa, promotor: dr inż. Łukasz Przeszłowski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Rzeszów 2018.

- [53] Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A., Statystyka, Difin, Warszawa 2011.
- [54] Kowalewski J., Całka R., Użyteczność metody 3DP techniki szybkiego prototypowania w procesie dostosowywania broni małokalibrowej do oddawania strzałów symulowanych. *Problemy Techniki Uzbrojenia*, 2010, 39(113), 53-62.
- [55] Kubáč L., Kodym O., The Impact of 3D Printing Technology on Supply Chain. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 134, 00027.
- [56] Kuczerska D., Smolağ K., Oferty pracy a oczekiwania potencjalnych pracowników z pokolenia Y i Z. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Zarządzanie*, 2018, 31, 134-144.
- [57] Leal R., Barreiros F.M., Alves L., Romeiro F., Vasco J.C., Santos M., Marto C., Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92, 1671-1676.
- [58] Lim J.H., Zhang X., Ting G.H.A., Pham Q.-C., Stress-cognizant 3D printing of free-form concrete structures. *Journal of Building Engineering*, 2021, 39, 102221.
- [59] Longhitano G.A., Nunes G.B., Candido G. Lopes da Silva J.V., The role of 3D printing during COVID-19 pandemic: a review. *Progress in Additive Manufacturing*, 2021, 6, 19-37.
- [60] Lysenko-Ryba K., Zimou D., Customer Behavioral Reactions to Negative Experiences during the Product Return. *Sustainability*, 2021, 2(13), 448.
- [61] Magerramova L., Vasilyev B., Kinzburskiy V., Novel Designs of Turbine Blades for Additive Manufacturing. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Seoul, South Korea, June 13-17, 2016.
- [62] Malaka J., Integracja systemów automatyki podstawą systemów zarządzania produkcją. *Utrzymanie Ruchu*, 2018, 4, 19-22.
- [63] Marchment T., Sanjayan J., Reinforcement method for 3D concrete printing using paste-coated bar penetrations. *Automation in Construction*, 2021, 127, 103694.
- [64] Mathew E., Gilmore B.F., Larraneta E., Lamprou D.A., Antimicrobial 3D Printed Objects in the Fight Against Pandemics. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2021, 8(1), 79-86.
- [65] Matzkanin G.A., Selecting a nondestructive testing method: Visual inspection. *AMMTIAC Quarterly*, 2006, 1(3), 7-10.
- [66] McKelvey M., Saemundsson R.J., The grey zones of technological innovation: negative unintended consequences as a counterbalance to novelty. *Industry and Innovation*, 2021, 28(1), 79-101.
- [67] Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii/Siemens, Raport Smart Industry Polska 2019. Siemens Polska, Warszawa 2019.
- [68] Ministerstwo Rozwoju, Pracy i Technologii/Siemens, Raport Smart Industry Polska 2020. Siemens Polska, Warszawa 2020.
- [69] Mitutoyo. Kompendium metrologii w zakresie precyzyjnych przyrządów pomiarowych, [https://www.mitutoyo.pl/application/files/1215/5888/6942/Mitutoyo\\_kompendium\\_metrologii\\_2013\\_WWW\\_opt\\_2.pdf](https://www.mitutoyo.pl/application/files/1215/5888/6942/Mitutoyo_kompendium_metrologii_2013_WWW_opt_2.pdf) (dostęp: 06.05.2021).
- [70] Moeuf A., Lamouri S., Pellerin R., Tamayo-Giraldo S., Tobon-Valencia E., Eburdy R., Identification of Critical Success Factors, Risks and Opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(5), 1384-1400.
- [71] Morek R., Pomiary bezstykowe, cz. I. *STAL. Metale & Nowe Technologie*, 2012, 3-4, 48-50.



- [72] Morek R., Pomiar bezstykowy, cz. II. *STAL. Metale & Nowe Technologie*, 2012, 5-6, 136-138.
- [73] Moses R.W., Bushnell D., Frontier In-Situ Resource Utilization for Enabling Sustained Human Presence on Mars. NASA. Work of the US Gov., 2016.
- [74] Muszyńska M., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Burghardt A., The use of VR to analyze the profitability of the construction of a robotized station. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 2020, 44(1), 32-37.
- [75] Nęcki Ł., Kontrola jakości procesu produkcji z wykorzystaniem metody wizualnej. Studium przypadku. *Zeszyty Naukowe. Quality. Production. Improvement*, 2016, 4(1), 40-53.
- [76] Ngo D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143(1), 172-196.
- [77] Niaki M.K., Nonino F., Additive manufacturing management: A review and future research agenda. *International Journal of Production Research*, 2016, 55(5), 1-21.
- [78] Ocicka B., Cyfrowa (r)ewolucja w zarządzaniu łańcuchem dostaw. *Studia Ekonomiczne*, 2017, 337, 94-108.
- [79] Oettmeier K., Hofmann E., Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2016, 27(7), 944-968.
- [80] Özceylan E., Çetinkaya C., Demirel N., Sabırlıoğlu O., Impacts of Additive Manufacturing on Supply Chain Flow: A Simulation Approach in Healthcare Industry. *Logistics*, 2018, 2(1), 1.
- [81] Paoletti I., Ceccon L., The Evolution of 3D Printing in AEC: From Experimental to Consolidated Techniques. [W:] D. Cvetković, 3D Printing. IntechOpen, 2018.
- [82] Pasternak A., Analiza możliwości wykonania funkcjonalnej pompy zębatej o zazębieniu zewnętrznym metodą MEM. Praca dyplomowa, promotor: dr inż. Łukasz Przeszłowski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Rzeszów 2018.
- [83] Paszkiewicz A., Bolanowski M., Budzik G., Przeszłowski Ł., Oleksy M., Process of Creating an Integrated Design and Manufacturing Environment as Part of the Structure of Industry 4.0. *Processes*, 2020, 8, 1019.
- [84] Paszkiewicz A., Budzik G., Bolanowski M., Woźniak J., Przytuła M., Kielbicki M., Poliński P., Kochmański Ł., Incremental processing of polymer materials using the INDUSTRY 4.0 network structure. *Polimery*, 2021, 66(7-8), 418-425.
- [85] Paszkiewicz A., Salach M., Dymora P., Bolanowski M., Budzik G., Kubiak P., Methodology of Implementing Virtual Reality in Education for Industry 4.0. *Sustainability*, 2021, 13, 5049.
- [86] Patalas-Maliszewska J., Topczak M., A new management approach based on Additive Manufacturing technologies and Industry 4.0 requirements. *Advances in Production Engineering & Management*, 2021, 16(1), 125-135.
- [87] Pîrjan A., Petroșanu D.M., The impact of 3D printing technology on the society and economy. *Journal of Information Systems & Operations Management*, 2013, 7(2), 360-370.
- [88] Płaczek E., Osieczko K., Zastosowanie robotów AGV w intralogistyce, *Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie*, 2020, 1(30), 165-176.

- [89] Polski Komitet Normalizacyjny, Wiadomości PKN, 5, [https://pkn.pl/sites/default/files/sites/default/files/imce/files/wiadomosci\\_pkn/w5\\_2019.pdf](https://pkn.pl/sites/default/files/sites/default/files/imce/files/wiadomosci_pkn/w5_2019.pdf), 2019 (dostęp: 06.05.2021).
- [90] PRINTELIZE, Badanie rynku druku 3D w Polsce. <https://printelize.com/pl/T/BadanieRynkuDruku3DwPolsce3>, 2015 (dostęp: 09.02.2021).
- [91] Ramachandraiah K., Potential Development of Sustainable 3D-Printed Meat Analogues: A Review. *Sustainability*, 2021, 13, 938.
- [92] Raport PwC., Przemysł 4.0 czyli wyzwania współczesnej produkcji, <https://www.pwc.pl/pl/pdf/przemysl-4-0-raport.pdf>, 2017 (dostęp: 02.07.2021).
- [93] Ratajczyk E., Woźniak A., *Współrzędnościowe systemy pomiarowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [94] Rayna T., Striukova L., From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 2016, 102, 214-224.
- [95] Redwood B., Schöffner F., Garret B., *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 3D Hubs, The Netherlands* 2017.
- [96] Rokicki P., Budzik G., Kubiak K., Dziubek T., Zaborniak M., Kozik B., Bernaczek J., Przeszlowski Ł., Nowotnik A., The assessment of geometric accuracy of aircraft engine blades with the use of an optical coordinate scanner. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2016, 88(3), 374-381.
- [97] Rutkowski K., Ocicka B., Rozwój druku 3D i jego wpływ na zarządzanie łańcuchem dostaw. *Gospodarka Materialowa i Logistyka*, 2017, 12, 2-11.
- [98] Rzucidło A., Budzik G., Przeszlowski Ł., Decision support system in Rapid Prototyping technology, [W:] G. Setlak, K. Markov (red.), *Transaction on Business and Engineering Intelligent Applications*, 2014 (11-116), ITHEA, Rzeszów 2014.
- [99] Rzucidło A., Budzik G., Przeszlowski Ł., The problem of correct technology selection in Rapid Prototyping, [W:] G. Setlak, K. Markov (red.), *Transaction on Business and Engineering Intelligent Applications*, 2014 (117-124), ITHEA, Rzeszów 2014.
- [100] Salmi M., Additive Manufacturing Processes in Medical Applications. *Materials*, 2021, 14(1), 191.
- [101] Sari T., Güleş H.K., Yiğital B., Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry. *Advances in Production Engineering & Management*, 2020, 15(1), 57-68.
- [102] Schwab K., *The Fourth Industrial Revolution*. Random House Lcc Us., USA 2016.
- [103] Seidenstuecker M., Schilling P., Ritschl L., Lange S., Schmal H., Bernstein A., Esslinger S., Inverse 3D Printing with Variations of the Strand Width of the Resulting Scaffolds for Bone Replacement. *Materials*, 2021, 14(8), 1964.
- [104] Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R., An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 2019, 35, 1286-1296.
- [105] Siemiński P., Budzik G., *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2015.
- [106] Stadnicka D., *Wybrane metody i narzędzia doskonalenia procesów w praktyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016.
- [107] Stadnicka D., Zielecki W., Sęp J., *Koncepcja Przemysł 4.0 – ocena możliwości wdrożenia na przykładzie wybranego przedsiębiorstwa*. [W:] R. Knosala (red.),

- Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, Opole 2017, 472-483.
- [108] Sztorch B., Brząkański D., Jałbrzykowski M., Przekop R.E., Processing Technologies for Crisis Response on the Example of COVID-19 Pandemic – Injection Molding and FFF Case Study. *Processes*, 2021, 9(5), 791.
- [109] Szulewski P., Integracja informatyczna kluczowym aspektem środowiska wytwórczego w Przemysle 4.0. *Mechanik*, 2018, 8-9, 630-636.
- [110] Szybicki D., Burghardt A., Kurc K., Gierlak P., Device for Contact Measurement of Turbine Blade Geometry in Robotic Grinding Process. *Sensors*, 2020, 20, 7053.
- [111] Szymonik A., Funkcjonowanie łańcucha dostaw w sytuacjach zagrożeń. *Logistyka*, 2014, 6, 10522-10531.
- [112] Śledziwska K., Włoch R., Gospodarka cyfrowa. Jak nowe technologie zmieniają świat. WUW, Warszawa 2020.
- [113] Śliwa R. E., Budzik G., Bernaczek J., Dziubek T., The rapid prototyping of aircraft wheel hub model with the use of techniques JS, SLA, FDM. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2011, 18(3), 439-443.
- [114] Śliwczyński B., Koliński A., Andrzejczyk P., Organizacja i monitorowanie procesów produkcyjnych. Biblioteka Logistyka, Poznań 2014.
- [115] Teixeira R., Coelho C., Oliveira J., Gomes J., Pinto V.V., Ferreira M.J., Nóbrega J.M., Silva A.F.D., Carneiro O.S., Towards Customized Footwear with Improved Comfort. *Materials*, 2021, 14(7), 1738.
- [116] Thomas P.A., Aahlada P.K., Kiran N.S., Ivvala J., A Review on Transition in the Manufacturing of Mechanical Components From Conventional Techniques to Rapid Casting Using Rapid Prototyping. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2), 11990-12002.
- [117] Turek P., Automatic the process of designing and manufacturing polymeric models of anatomical structures of mandible with Industry 4.0 convention. *Polimery*, 2019, 64, 522-529.
- [118] Turek P., Budzik G., Oleksy M., Bulanda K., Polymer materials used in medicine processed by additive techniques. *Polimery*, 2020, 65(7-8), 510-515.
- [119] Turek P., Budzik G., Sęp J., Oleksy M., Józwick J., Przeszlowski Ł., Paszkiewicz A., Kochmański Ł., Żelechowski D., An Analysis of the Casting Polymer Mold Wear Manufactured Using PolyJet Method Based on the Measurement of the Surface Topography. *Polymers*, 2020, 12, 3029.
- [120] Wagner S.M., Walton R.O., Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry. *Production Planning & Control*, 2016, 27(13), 1124-1130.
- [121] Weißenfels C., Additive Manufacturing Processes. [W:] C. Weißenfels (red.), Simulation of Additive Manufacturing using Meshfree Methods. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, 2022, 97, Springer, Cham.
- [122] Wieczorowski M., Wyzwania metrologii w kontekście przemysłu przyszłości. *STAL. Metale & Nowe Technologie*, 2021, 3-4, 66-74.
- [123] Wiśniewski A.K., Klasyfikacja modeli biznesu. *Przedsiębiorstwo we współczesnej gospodarce – teoria i praktyka*, 2018, 2, 33-50.
- [124] Wohlers Report., 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. WohlersAssociates, USA, 2015.
- [125] Wohlers Report, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, USA, 2018.

- [126] Woźniak J., Ocena przydatności metod SERVQUAL i CSI w kontekście badania logistycznej obsługi klienta. *Przedsiębiorstwo we współczesnej gospodarce – teoria i praktyka*, 2017, 21, 237-249.
- [127] Woźniak J., Doskonalenie sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego. Praca doktorska, promotor: G. Budzik, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2020.
- [128] Woźniak J., Budzik G., Przeszlowski Ł., Supply Chain Management in the 3D Printing Industry as Exemplified by a Selected Organisation. [W:] K. Sandhu, S. Singh, C. Prakash, K. Subburaj, S. Ramakrishna (red.), Sustainability for 3D Printing. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham., 2022, 179-194.
- [129] Woźniak J., Budzik G., Zimon D., Industry 4.0 – identyfikacja technologii, które zmieniły przemysł oraz ich znaczenie w zarządzaniu logistycznym. *Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, 2018, 19(5), 3, 359-372.
- [130] Woźniak J., Budzik G., Przeszlowski Ł., Chudy-Laskowska K., Directions of the development of the 3D printing industry as exemplified by the Polish market. *Management and Production Engineering Review*, 2021, 12(2), 98-106.
- [131] Woźniak J., Budzik G., Przeszlowski Ł., Fudali P., Dziubek T., Paszkiewicz A., Analysis of the quality of products manufactured with the application of additive manufacturing technologies with the possibility of applying the Industry 4.0 conception. *International Journal for Quality Research*, 2022, 16(3), 831-850.
- [132] Zeleny P., Ruzicka V., The design of the 3D printer for use in gastronomy. *MM Science Journal*, 2017, 2, 1744-1747.
- [133] Zheng Z., Zhang M., Liu Z. (2021). Investigation on evaluating the printable height and dimensional stability of food extrusion-based 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 306, 110636.
- [134] Zhong R.Y., Xu X., Klotz E., Newman S.T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616-630.
- [135] Zielecki W. (red.), Logistyka w przedsiębiorstwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010.
- [136] Zijm H., Knofius N., van der Heijden M., Additive Manufacturing and its Impact on the Supply Chain. [W:] H. Zijm, M. Klumpp, A. Regattieri, S. Heragu (red.), Operations, Logistics and Supply Chain Management. Lecture Notes in Logistics. Springer, Cham., 2019.
- [137] Zimon G., Pacana A., Zimon D., Inżynierskie metody i narzędzia doskonalenia procesów logistycznych w przedsiębiorstwie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019.
- [138] Ziolkowski M., Dyl T., Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review. *Machines*, 2020, 8, 84.
- [139] Życzyński N., Gazda A., Woźniak J., It support for the goods reallocation process in textiles-based fashion retail. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2019, 6(138), 15-19.

## Normy

- [140] ISO/ASTM 52902:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Próbki wzorcowe – Ocena dokładności geometrycznej systemów wytwarzania przyrostowego.

- [141] ISO/ASTM 52911-1:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Część 1: Stاپanie proszków metali za pomocą lasera.
- [142] ISO/ASTM 52911-2:2019. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Część 2: Stاپanie proszków polimerów za pomocą lasera.
- [143] ISO/ASTM 52941-20. Wytwarzanie przyrostowe – Wydajność i niezawodność systemu – Testy akceptacyjne maszyn operujących w technologii Laser Beam Powder Bed Fusion dla materiałów metalowych do zastosowań lotniczych.
- [144] ISO/ASTM 52942-20. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady kwalifikacji – Kwalifikowanie operatorów maszyn i urządzeń operujących w technologii Powder Bed Fusion dla metali i elementów wytwarzanych przyrostowo do zastosowań lotniczych.
- [145] ISO/ASTM DIS 52900. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia.
- [146] ISO/ASTM TR 52912:2020. Wytwarzanie przyrostowe – Projektowanie – Wytwarzanie przyrostowe z podziałem na grupy funkcjonalne.
- [147] PN/EN ISO 17296-2:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 2.: Przegląd kategorii procesów i materiał wstępny.
- [148] PN/EN ISO 17296-3:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 3.: Główne cechy i odpowiednie metody badań.
- [149] PN/EN ISO 17296-4:2016-10. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Część 4.: Przegląd przetwarzania danych.
- [150] PN/EN ISO/ASTM 52900:2017-06. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia.
- [151] PN/EN ISO/ASTM 52901:2019-01. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Wymagania dla kupowanych części wyprodukowanych w procesach wytwarzania przyrostowego AM.
- [152] PN/EN ISO/ASTM 52902:2021. Wytwarzanie przyrostowe – Próbki wzorcowe – Wytyczne do oceny dokładności geometrycznej systemów wytwarzania przyrostowego.
- [153] PN-EN ISO 10360-1:2003. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 1: Terminologia.
- [154] PN-EN ISO 9000:2015. Systemy zarządzania jakością – Podstawy i terminologia.

### **Źródła internetowe**

- [155] <http://allegro.pl>.
- [156] <http://astor.com.pl>.
- [157] <http://i.materialise.com>.
- [158] <http://printelize.com>.
- [159] <https://3dprint.com/90748/g3dp-glass-3d-print/>.
- [160] <https://automedprint.put.poznan.pl/>.
- [161] <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/the-future-at-nike-3d-printing-customized-shoes-at-home/>.
- [162] <https://industry40.edu.pl/>.
- [163] <https://prosolutions.pl/>.
- [164] <https://octoprint.org/>.
- [165] <https://www.3dnatives.com/>.

- [166] <https://www.3dsystems.com/>.
- [167] <https://www.apis-cor.com/dubai-project>.
- [168] <https://www.economist.com/briefing/2011/02/10/the-printed-world>.
- [169] <https://www.eos.info/en>.
- [170] <https://www.materialise.com/en/cases/adidas-futurecraft-ultimate-3d-printed-personalized-shoe>.
- [171] <https://www.stratasys.com/>.
- [172] <https://zortrax.com/pl/>.

## **DRUK 3D JAKO ELEMENT PRZEMYSŁU PRZYSZŁOŚCI. ANALIZA RYNKU I TENDENCJE ROZWOJU**

### **S t r e s z c z e n i e**

Tematyka opracowania dotyczy technologii przyrostowych i druku 3D w odniesieniu do aspektów technicznych, organizacyjnych i rynkowych jako elementu przemysłu przyszłości. W pracy przedstawiono charakterystykę przyrostowych metod wytwarzania, ich aplikacji oraz norm dotyczących pojęć podstawowych i wybranych zagadnień. Opisano również techniczne aspekty przygotowania i przetwarzania danych dla procesu druku 3D, wytwarzania wyrobów oraz kontroli ich jakości.

Analizie poddano również wpływ zastosowania technologii przyrostowych na zarządzanie łańcuchem dostaw. Wymieniono główne korzyści i zagrożenia związane z wdrożeniem druku 3D w przedsiębiorstwie. Opisano usługi druku 3D, ze szczególnym uwzględnieniem platform do automatycznej wyceny modeli 3D. Zidentyfikowano również problemy prawne i organizacyjne związane z możliwą współpracą przedsiębiorstwa z agencją przemysłową i podwykonawcami.

Monografia przedstawia również miejsce technologii przyrostowych w inteligentnych systemach produkcyjnych opartych na strukturze Przemysłu 4.0, w aspekcie wykorzystania i wdrażania urządzeń oraz narzędzi informatycznych i struktur sieciowych.

Opisane są również badania logistycznej obsługi klienta w branży druku 3D. Na podstawie zapytania ofertowego wysłanego do 80 przedsiębiorstw i instytucji naukowo-badawczych zbadano: możliwe formy złożenia zamówienia, szybkość reakcji usługodawcy, średni czas realizacji zamówienia, cenę modelu w poszczególnych metodach druku 3D, koszty realizacji przy zamówieniu większej liczby sztuk, a także minimalną wielkość zamówienia.

W końcowej części pracy przedstawiono analizę statystyczną wyników ankiet dotyczących poziomu wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0 dla technologii przyrostowych. Respondenci zostali poproszeni o odpowiedź na pytania z zakresu: projektowania i modelowania 3D-CAD, wytwarzania modeli/wyrobów metodami szybkiego prototypowania, obróbki wykończeniowej, kontroli jakości modeli/wyrobów, kierunków rozwoju działalności, a także szans i zagrożeń, jakie niesie ze sobą wdrożenie koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwie.





## **3D PRINTING AS PART OF THE INDUSTRY OF THE FUTURE. MARKET ANALYSIS AND DEVELOPMENT TRENDS**

### **S u m m a r y**

The subject of the study concerns additive technologies and 3D printing in relation to technical, organizational and market aspects as an element of the industry of the future. The paper presents the characteristics of additive manufacturing methods, their applications and standards concerning basic concepts and selected issues. The technical aspects of data preparation and processing for the 3D printing process, product manufacturing and quality control are also described.

The impact of the use of additive technologies on supply chain management was also analyzed. The main benefits and risks associated with the implementation of 3D printing in the enterprise are presented. 3D printing services are described, with particular emphasis on platforms for automatic valuation of 3D models. Legal and organizational problems related to the possible cooperation of the company with an industrial agency and subcontractors were also identified.

The monograph also presents the place of additive technologies in intelligent production systems based on the Industry 4.0 structure, in terms of the use and implementation of devices and IT tools and network structures.

Research on logistic customer service in the 3D printing industry is also described. On the basis of the inquiry sent to 80 enterprises and scientific-research institutions, the following were examined: possible forms of placing an order, service provider's response speed, average order completion time, model price in individual 3D printing methods, implementation costs when ordering a larger number of pieces, as well as the minimum order quantity.

The final part of the work presents a statistical analysis of the results of surveys on the level of implementation of the Industry 4.0 concept for additive technologies. Respondents were asked to answer questions in the field of: 3D-CAD design and modelling, production of models/products using rapid prototyping methods, finishing, quality control of models/products, directions of business development, as well as opportunities and threats resulting from the implementation of the Industrial 4.0 in the enterprise.