



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Kierunek studiów:
Mechanika i Budowa Maszyn

Tomasz Kozior

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Druk 3D i Skanowanie 3D

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

*Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23*



Spis treści

1. Druk 3D i Skanowanie 3D w aspekcie Mechaniki i Budowy Maszyn.....	3
2. Nowoczesne prototypowanie.....	4
3. Technologia Material Extrusion Druku 3D	6
3.1. Materiały stosowane w technologii MEX	8
3.1.1. FDM/FFF	10
3.1.2. Roboty drukujące z granulatu	16
3.2. Parametry technologiczne druku 3D	17
4. Druk 3D wielkogabarytowy	21
5. Skanowanie 3D	23
6. Podsumowanie.....	39
7. Literatura.....	40



Utwór objęty licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Druk 3D i Skanowanie 3D w aspekcie Mechaniki i Budowy Maszyn

Niekonwencjonalne technologie wytwarzania wpisują się w realia trwającej obecnie rewolucji przemysłowej 4.0. Do takich technologii zaliczyć można znane od lat 80tych XX wieku systemy druku 3D oraz inżynierię odwrotną – skanowanie 3D. Aby dostosować jakość kształcenia do potrzeb współczesnej gospodarki opracowany został nowy przedmiot łączący obie technologie produkcyjne pod nazwą „Druk 3D i Skanowanie 3D”. Takie połączenie dwóch technologii nie jest przypadkowe. W dzisiejszych czasach inżynier kierunków technicznych w szczególności *Mechanika i Budowa Maszyn* musi bardzo dobrze znać proces prototypowania, wytwarzania krótkich serii produkcyjnych, szybkiej inspekcji metrologicznej w zakresie dokładności wymiarowo-kształtowej oraz możliwości odtworzenia modeli 3D bazując na skanach 3D.

Inżynier Kierunku Mechanika i Budowa Maszyn zna proces technologiczny i umie dobierać odpowiednie parametry procesu druku 3D oraz skanowania 3D w celu projektowania i wytwarzania nie tylko prototypów, ale również w celu właściwego opracowania procesu technologicznego, doboru drukarki 3D, materiałów, parametrów technologicznych, sposobu obróbki wykończeniowej z uwzględnieniem norm stosowanych w obszarze *Druku 3D i Skanowania 3D*.

Dodatkowe materiały opracowane w ramach nowo powstałego przedmiotu zawierają treści, które rozszerzają merytorycznie omawiany zakres tematyki w obszarze wykładu, ale i również stanowią doskonałe uzupełnienie prowadzonych z tego przedmiotu zajęć laboratoryjnych. Zakres tematyczny opracowanych materiałów dotyczy głównie technologii MEX (FDM/FFF) i obejmuje:

- szczegółowy zakres stosowanych materiałów,
- obszar wiedzy ogólnej,
- rozszerzoną analizę parametrów technologicznych druku 3D w aspekcie jakości,
- ekonomiczność w procesie prototypowania,
- druk wielkogabarytowy.

W obszarze skanowania 3D dodatkowe materiały obejmują:

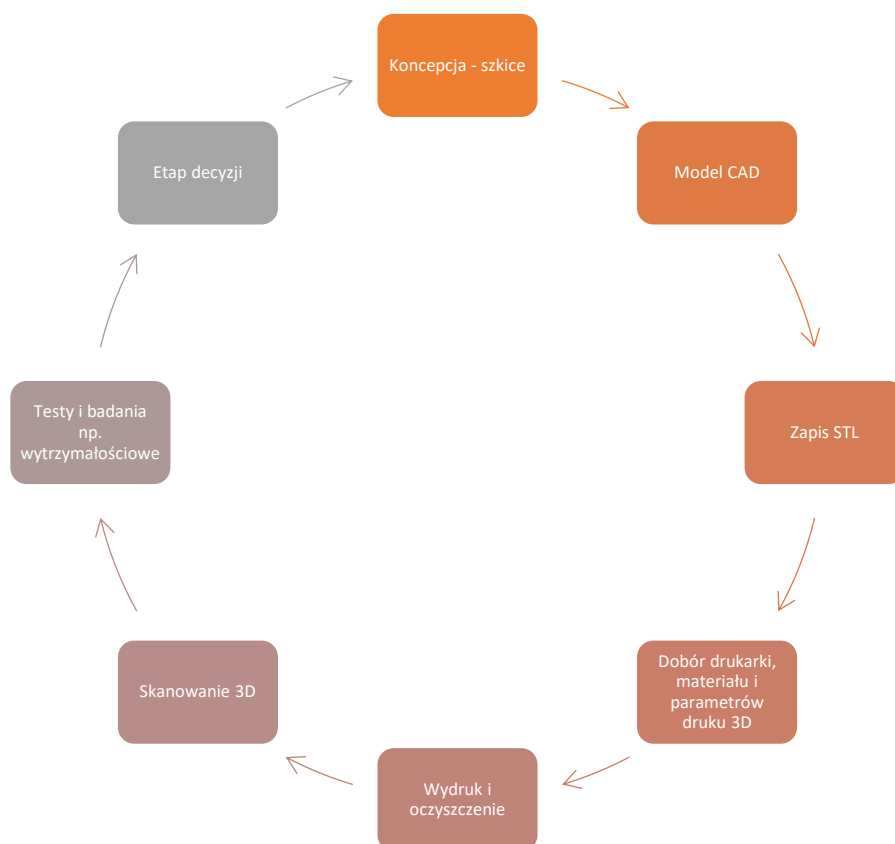


- pracę z plikami cyfrowymi w obszarze transformacji plików STL i CAD,
- omówienie systemów skanowania 3D,
- rozszerzoną analizę parametrów skanowania.

2. Nowoczesne prototypowanie

Termin *Prototypowanie* jest pojęciem stosunkowo szerokim i w tym przypadku warto zwrócić uwagę na fakt, że technologie druku 3D i skanowania 3D wpisują się w ramy rozwoju tego zagadnienia. W zależności od rodzaju prototypu, jego przeznaczenia oraz roli jaką ma spełniać można proces prototypowania podzielić na kilka etapów. W przypadku prototypowania nowego produktu wchodzącego obecnie na rynek, wymagającego przeprowadzenia badań na realnie wykonanym obiekcie można przyjąć pewien schemat postępowania dla procesu prototypowania, co zostało przedstawione poniżej na rysunku 1.

[Tekst alternatywny. Rysunek płaski. Na rysunku przedstawiono schemat postępowania dla procesu prototypowania z zaznaczeniem obszarów pracy z plikami 3D, STL, drukarką 3D i skanerem 3D.]



Rys. 1. Schemat postępowania dla procesu prototypowania z wykorzystaniem druku 3D i skanera 3D.

Jak można zauważyć na rysunku 1 proces prototypowania rozpoczynamy od koncepcji i wykonania wstępnych ręcznych szkiców, które następnie przekształcamy w procesie projektowania przestrzennego 3D w model cyfrowy – CAD (ang. computer aided design). W dalszej części model CAD zapisujemy jako plik STL (ang. stereolithography), który przechowuje dane cyfrowe o powierzchni obiektu w postaci siatki trójkątów. W kolejnym etapie wybieramy technologię druku 3D i dobieramy parametry technologiczne. Ten etap wyboru technologii zazwyczaj polega na wyborze w początkowej fazie prototypowania taniego systemu (np. FDM/FFF) i materiału (np. PLA), który umożliwi wyeliminowanie największej ilości błędów projektowych z naszego projektu za jak najmniejsze pieniądze (Liker et al., 2018), co wpisuje się w realia procesu LEAN manufacturing (Liker et al., 2019). Kolejnym etapem jest wydruk modeli i jego oczyszczenie z materiału wspierającego. W dalszej części następuje proces



skanowania 3D, który umożliwi ocenę dokładności wykonanego drukiem 3D modelu. Jednocześnie rozpoczynają się badania na przykład wytrzymałościowe wykonanego prototypu. Po tak przeprowadzonej wstępnej koncepcji jeżeli od modelu wymagamy zwiększonej wytrzymałości i dokładności możemy ponowić proces, a więc wykonać niemal wszystkie etapy przedstawione na rysunku raz jeszcze jednak z zastosowaniem innej metody druku 3D i materiału bądź ze zmienionymi parametrami technologicznymi, które wpływają na zwiększenie np. właściwości mechanicznych prototypu. Taki etap zmiany technologii można powtarzać nawet kilkakrotnie, i co warto podkreślić w wielu przedsiębiorstwach posiadających systemu druku 3D z proszków metali, niemal zawsze występuje ekonomiczny system druku 3D FDM/FFF wykorzystywany na wczesnych etapach projektowania.

W przypadku wytwarzania finalnych/gotowych modeli z wykorzystaniem druku 3D warto zauważyć, że wiele z nich jest poddanych obciążeniom ciągłym w czasie. Takie oddziaływanie może wpływać na zmniejszenie naprężeń bądź odkształcenie modeli po pewnym czasie. Zjawiska te zaliczane są do dziedziny nauki zwanej reologią. Informacje na ten temat dla znanych materiałów stosowanych w druku 3D przedstawione zostały w publikacji *Wybrane właściwości fizyczne materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi* – autor Jerzy Bochnia (Bochnia, 2018). W przypadku projektowania elementów, które będą poddane obciążeniom ciągłym w czasie wiedza na temat zjawisk reologicznych determinuje wybór materiału, dobór orientacji modelu na platformie i szereg parametrów technologicznych. Informacje o *Smart manufacturing* oraz nowoczesnym projektowaniu z uwzględnieniem ekonomicznego procesu prototypowania można znaleźć w publikacjach (Liker et al., 2018; Tarantino, 2022).

3. Technologia Material Extrusion Druku 3D

Istnieje bardzo wiele technologii druku 3D różniących się między sobą. Przedmiot „Druk 3D i Skanowanie 3D” jako pierwszy kontakt studentów z technologiami druku 3D głównie skupia swoją uwagę na technologii osadzania





termoplastycznego tworzywa. Technologia ta występuje w środowisku przemysłowym i naukowym pod kilkoma nazwami, takimi jak:

- a) MEX – Material Extrusion
- b) FDM – Fused Deposition Modeling
- c) FFF – Fused Filament Fabrication

Wszystkie powyższe nazwy zostały szczegółowo przedstawione w normie PN-EN ISO/ASTM 52900 (*ISO/ASTM 52900:2021, Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*, 2021), Wytwarzanie Przyrostowe, Zasady Ogólne, Podstawy i Słownictwo. Norma ta dostępna jest w bibliotece Politechniki Świętokrzyskiej i swoim obszarem obejmuje klasyfikację technologii druku 3D, ujednoliciła słownictwo dotyczące plików cyfrowych oraz właściwości wytwarzanych technologiami druku 3D modeli. To właśnie w tej normie wyjaśniono wprowadzenie nowej nazwy – MEX (ang. material extrusion) w celu ujednolicenia nazewnictwa dla każdej technologii której idea polega na procesie wytłaczania tworzywa sztucznego. Pozostałe nazwy FDM, oraz FFF dalej funkcjonują i są powszechnie stosowane ze względu na wieloletnie ich użycie w branży druku 3D. W przedstawionych materiałach opisując technologię osadzania termoplastycznego tworzywa będą posługiwał się zamiennie nazwą FDM/FFF/MEX.

Wprowadzając w tematykę druku 3D warto zwrócić uwagę na fakt, że druk 3D w przypadku technologii MEX w stosunku do tak zwanych konwencjonalnych metod wytwarzania jest technologią bardzo ekonomiczną. Technologie MEX możemy porównywać najczęściej do metody formowania wtryskowego, ze względu na fakt, że w obu metodach stosowane są bardzo często te same materiały. Do takich materiałów z całą pewnością zaliczyć można ABS, czyli terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy. W dalszej części pracy formowanie wtryskowe będziemy nazywać skrótowo – FW. W przypadku obu metod FW oraz MEX możemy w bardzo prosty sposób tworzyć nowe materiały poprzez wprowadzenie do znanych materiałów dodatków. Skupiając się na technologii druku 3D – MEX bardzo często stosowane są takie dodatki jak włókno węglowe, włókno szklane, dodatki miedzi, dodatki pochodzenia naturalnego jak i syntetycznego etc. W przypadku druku 3D – MEX podstawowym materiałem jest PLA - polilaktyd (polikwas mlekowy). Poniżej przedstawiono opis wybranych materiałów stosowanych w druku 3D w technologii MEX. Przeprowadzono podział na technologię FDM/FFF oraz Roboty drukujące ze



względu na fakt innej postaci materiału w stanie wejściowym w wymienionych procesach druku 3D.

3.1. Materiały stosowane w technologii MEX

Warto zwrócić uwagę szczególnie rozpoczynając pracę z systemami druku 3D – FDM/FFF, że producenci materiałów/dostawcy bardzo często nie podają wielu użytecznych danych, które są pomocne w pracy inżyniera. W związku z tym utrudnione jest odpowiednie projektowanie modeli w oparciu o dostarczone właściwości użytkowanych materiałów. Podawanie wytrzymałości dla różnych kierunków druku nie obejmuje wartości pośrednich. W związku z tym można przyjąć że pomimo ponad 40 letniej obecności druku 3D na rynku technologie te są dalej w fazie prototypowej ze względu na stosowane materiały oraz opracowywane nowe. Materiał w technologii FDM/FFF najczęściej dostarczany jest w formie tzw. filamentu nawiniętego na szpulę. Średnica filamentu najczęściej wynosi 1,75 mm, jednak w wybranych drukarkach zazwyczaj o zwiększonych komorach roboczych zdarzają się materiały o średnicy filamentu wynoszącej 2,5 mm. Poniżej na zdjęciu 2 przedstawiono widok filamentu wraz z figurką wykonaną drukiem 3D.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono filament nawinięty na szpulę oraz przykładową wykonaną drukiem 3D figurkę przedstawiającą lwa.]



Rys. 2. Filament nawinięty na szpulę wraz z przykładowym wykonanym modelem firmy Prusa (Prusa company, 2022).



W przypadku materiałów stosowanych w technologii MEX jednak z wykorzystaniem robotów drukujących materiał występuje w formie granulatu/pelletu. Ten typ technologii MEX oraz materiału w formie granulatu/pelletu jest znacznie rzadziej stosowany i dotyczy głównie wielkogabarytowego procesu druku 3D. Do kategorii technologii MEX zaliczamy każdy system taki jak FDM, FFF, czy Roboty, gdzie materiał jest wytłaczany przez dyszę, jednak biorąc pod uwagę sposób łączenia warstw występuje podział na dwie kategorie:

- MEX/TRB – czyli łączenie przez reakcję temperaturową,
- MEX/CRB - czyli łączenie przez reakcję chemiczną.

Poniżej na rysunku 3 przedstawiono materiał modelowy stosowany w robotach bazujących na wytwarzaniu z wykorzystaniem granulatu/pelletu (pellet extruder).

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono materiał do drukarki 3D działającej na zasadzie robota drukującego wykorzystującego materiał w formie granulatu/pelletu.]



Rys. 3. Materiał w formie granulatu/pelletu.

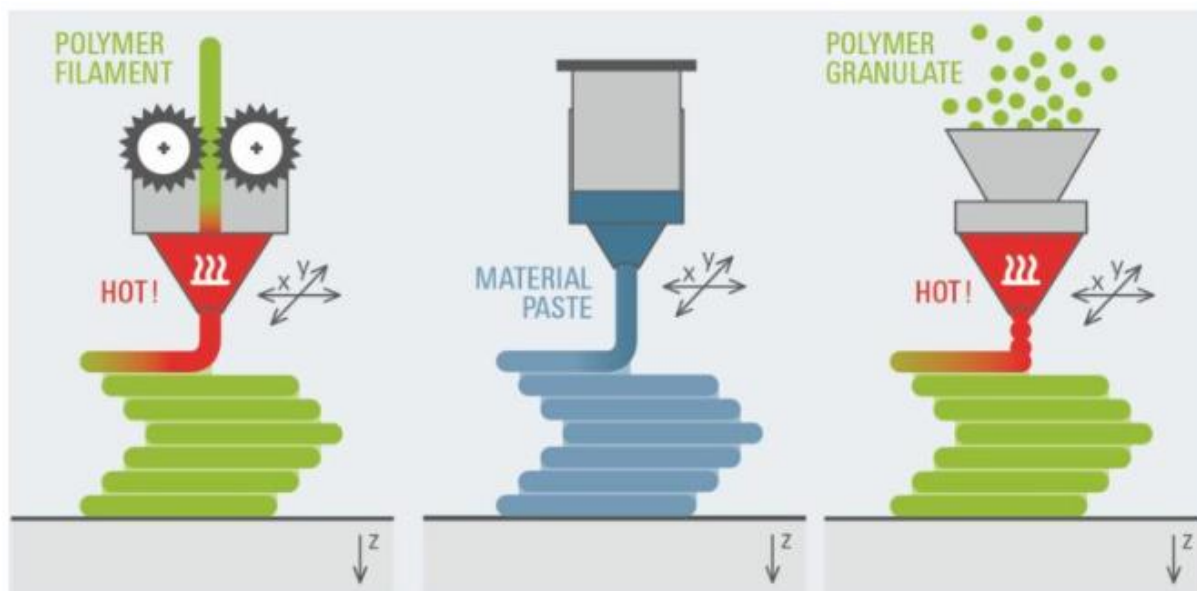


3.1.1. FDM/FFF

Technologia FDM/FFF polega na warstwowej budowie modeli z wykorzystaniem termoplastycznych materiałów, które pod wpływem temperatury są podatne na proces formowania, co pozwala układać kolejne warstwy i łączyć je ze sobą. Na rysunku 4 przedstawiono schemat procesu druku 3D z wykorzystaniem technologii MEX. Warto zwrócić uwagę na fakt, że konstrukcja drukarek w tych technologiach może się różnić. Poniżej przedstawiono najbardziej typowy schemat, gdzie głowice przemieszczają się w kierunku osi X i Y, a stół wzdłuż pionowej osi Z. Warto również podkreślić, iż schemat ten przedstawia konstrukcje drukarki 3D wyposażonej w jedną głowicę drukującą. Takie rozwiązanie umożliwia wytwarzanie modeli z materiału modelowego i struktur podporowych również z wykorzystaniem tego samego materiału, co utrudnia jego późniejsze usunięcie. Wariant z dwoma głowicami osobnymi dla materiału modelowego i wspierającego jest znacznie korzystniejszy. Konstrukcja z dwoma głowicami umożliwia łatwiejsze usuwanie materiału wspierającego, ze względu na fakt, że może on być na przykład rozpuszczalny bądź kruchy i w ten sposób łatwo usuwany po zakończeniu druku 3D.

Ogólna zasada budowy modeli w technologii FDM/FFF polega na budowaniu kolejnych warstw odpowiadających przekrojowi poprzecznemu budowanego modelu, następnie obniżeniu platformy roboczej, bądź podniesieniu poziomu głowic drukujących o zadaną wartość, a następnie układaniu kolejnej warstwy odpowiadającej przekrojowi poprzecznemu budowanego modelu. Ten proces jest powtarzany aż do zakończenia budowy modelu.

[Tekst alternatywny. Rysunek dwuwymiarowy. Na wykresie znajduje się schemat druku 3D, dla trzech form materiału, od lewej filament, w środku pasta i z prawej strony pellet.]



Rys. 4. Schemat druku 3D FDM/FFF dla filament (z lewej strony), pasta (w środku), pellet (z prawej strony) MEX (Wohlers Associates - The Seven AM Processes, 2025).

Podczas pierwszego kontaktu z technologiami druku 3D podczas zajęć laboratoryjnych studenci poznają głównie materiał PLA, poniżej przedstawiono opis rzadziej stosowanych materiałów, ale znacznie bardziej zaawansowanych i mających duży potencjał wykorzystania w praktyce przemysłowej, w tym jeden w przemyśle medycznym.

PLA

Przechodząc do materiałów stosowanych w druku 3D opis należy rozpocząć od wspomnianego PLA. Polilaktyd (polikwas mlekowy), jest biodegradowalnym termoplastycznym poliestrem, który wytwarzany jest z surowców odnawialnych, takich jak mączka kukurydziana. PLA jest materiałem o dobrych właściwościach mechanicznych, przedstawionych poniżej. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe orientacje podczas druku 3D modeli próbek dla których poniżej podano wybrane właściwości materiału PLA dla wybranego producenta (Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic) (Prusa company, 2022):

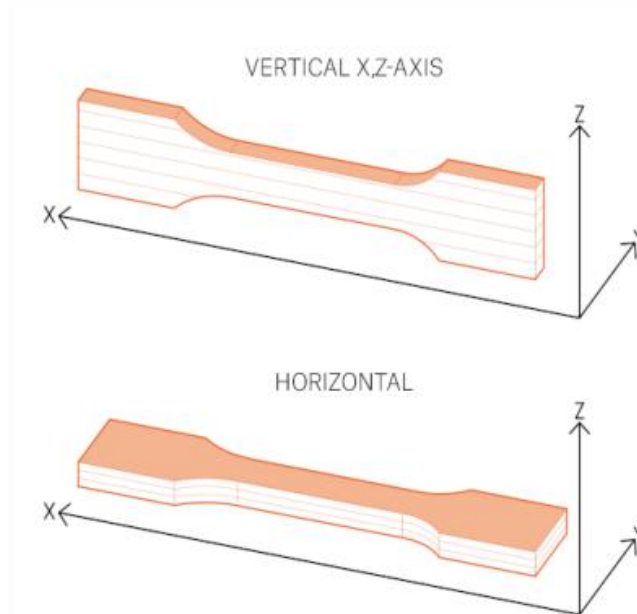


- gęstość - $1,24 \text{ g/cm}^3$,
- twardość – 81 (Shore D),
- wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poziomym – $51 \pm 3 \text{ MPa}$,
- wytrzymałość na rozciąganie w kierunku pionowym XZ – $59 \pm 2 \text{ MPa}$,
- Moduł Younga w kierunku poziomym – $2,3 \text{ GPa}$,
- Moduł Younga w kierunku pionowym – $2,4 \text{ GPa}$.

Przedstawione dane dotyczą wytwarzania z zachowaniem parametrów podanych w karcie charakterystyki firmy Prusa (Prusa company, 2022). Zaletą stosowania materiałów na bazie PLA jest stosunkowo niska temperatura dyszy wynosząca zazwyczaj około $190\text{-}230 \text{ }^\circ\text{C}$, co pozwala na wykorzystanie tego materiału w niemal każdej drukarce 3D. Ponadto materiał ten nie wymaga stosowania podgrzewanej komory roboczej oraz podgrzewanego stołu jak to ma miejsce w bardziej zaawansowanych materiałach.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono dwa typy próbek w kształcie „wiosełek”, jedna usytuowana dłuższą krawędzią wzdłuż osi X

oraz szerokością wzdłuż osi Z, a druga usytuowana dłuższą krawędzią wzdłuż osi X oraz szerokością wzdłuż osi Y.]



Rys. 5. Orientacje modeli na platformie drukarki 3D dla których producent podaje właściwości materiału (Prusa company, 2022).

Materiał PLA jest materiałem ekonomicznym i bazując na ofertach sprzedaży zamieszczanych na oficjalnych stronach internetowych producentów materiałów można stwierdzić, że koszt materiału na dzień 1 stycznia 2025 wynosi od około 50 do 300 złotych za kilogram. Cena w dużej mierze zależy od jakości materiału oraz dodatków jakie wprowadzane są wraz z materiałem bazowym - PLA. Warto zwrócić uwagę, że producent materiału często podaje właściwości mechaniczne jedynie dla wybranych kierunków druku 3D, bez uwzględnienia wariantów pośrednich, z pominięciem właściwości reologicznych.

PLACTIVE

Kolejnym materiałem na bazie materiału PLA, który warto omówić, a który ze względu na swoje właściwości jest niezwykle interesujący to PLACTIVE (COPPER 3D Company, n.d.). Główną różnicą pomiędzy znanym materiałem PLA, a



PLACTIVE jest wprowadzenie dodatku nano miedzi, którego zadaniem jest działanie przeciwdrobnoustrojowe, co według producenta pozwala na eliminację ponad 99,99% grzybów, wirusów, bakterii i szeroką gamę mikroorganizmów. Takie właściwości determinują nowe możliwości wykorzystania technologii FDM/FFF, szczególnie do produkcji elementów takich jak: protezy pooperacyjne (ortezy), opatrunki na rany i sprzęt chirurgiczny. Według producenta właściwości przeciwdrobnoustrojowe potwierdzone zostały przez dwa laboratoria mikrobiologiczne zarówno w Chile jak i USA. Ponadto PLACTIVE™ to materiał biokompatybilny, certyfikowany jako niecytotoksyczny i dopuszczony do kontaktu ze skórą zgodnie z międzynarodową normą ISO 10993.

Jak podaje producent materiał ten charakteryzuje się gęstością identyczną jak dla opisanego wcześniej czystego PLA oraz wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 53 MPa. Warto zwrócić uwagę, że sam producent nie podaje danych w zależności od kierunku wydruku, co oznacza, że inżynier chcąc wykonać model o przewidywalnej wytrzymałości musi samodzielnie przeprowadzić wstępne testy wytrzymałościowe.

Ostatnimi czasy następuje bardzo dynamiczny rozwój nowych obszarów przemysłowych takich jak biomechatronika czy inżynieria biomedyczna, gdzie druk 3D z wykorzystaniem materiałów biomedycznych ma bardzo duże zastosowanie szczególnie w aspekcie wytwarzania protez, ortez czy implantów. Poniżej na rysunku 6 przedstawiono przykładowy element wykonany właśnie z materiału PLACTIVE, jak widać z wykorzystaniem technologii druku 3D w aspekcie medycznym istnieje możliwość redukcji masy, zastosowania modeli o strukturze komórkowej oraz co najważniejsze wytwarzania modeli o geometrii idealnie dostosowanej do ciała pacjenta, na podstawie obrazowania czyli na przykład rezonansu magnetycznego czy tomografii komputerowej.



[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono przykładową ortezę medyczną o strukturze komórkowej wykonaną z materiału PLACTIVE.]



Rys. 6. Przykładowy wydruk ortozy z materiału PLACTIVE (COPPER 3D Company, n.d.).

ABS

Kolejnym interesującym materiałem w formie filamentu stosowanym w druku 3D FDM/FFF jest ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene - terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy). Materiał ten (ABS Extrafill) jak podaje jeden z producentów (Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.) charakteryzuje się gęstością znacznie mniejszą od PLA, która wynosi 1.04 g/cm^3 . Właściwości mechaniczne takie jak wytrzymałość na rozciąganie są nieznacznie gorsze, jednak już pozostałe cechy jakościowe znacznie lepsze takie jak: dobra odporność na kwasy, zasady, oleje, tłuszcze i związki węglowodorowe. ABS jest materiałem, który wymaga stosowania podgrzewanego stołu, gdzie dla wskazanego materiału wartość ta jest rekomendowana na poziomie $80\text{-}105^\circ\text{C}$ oraz zalecane jest zastosowanie zamkniętej podgrzewanej komory. Temperatura dyszy drukującej również charakteryzuje się wyższą wartością w stosunku do PLA i wynosi około $220\text{-}240^\circ\text{C}$. Wydruki z ABS mogą być poddawane dalszej obróbce wykończeniowej poprzez na przykład chemiczną obróbkę acetonem, co poprawia jakość powierzchni i umożliwia łączenie modeli.

Istnieje wielu producentów zarówno drukarek 3D jak i filamentów, w Politechnice Świętokrzyskiej obecnie w obszarze dydaktycznym stosowane są drukarki 3D firmy Makerbot oraz Prusa w związku z czym zachęamy do zapoznania się z pełną ofertą dostępnych materiałów, gdzie również przedstawiono parametry technologiczne



druku 3D oraz szereg właściwości, przykładowe dane dla firmy Prusa (Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic) znaleźć można na stronie internetowej producenta (Prusa Company, 2024).

Ćwiczenie do samodzielnego wykonania: Aby poszerzyć swoją wiedzę wykorzystując dostępne na stronach internetowych producentów drukarek 3D karty charakterystyki porównaj dla kilku wybranych materiałów dwa parametry wytrzymałościowe: wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł Younga. Ćwiczenie wykonaj dla kilku materiałów. Jednocześnie porównaj temperatury rekomendowane do druku dla tych materiałów, będziesz wtedy w stanie ocenić dla jakich drukarek możesz stosować dany materiał i jakie właściwości będą charakteryzować wykonany model.

3.1.2. Roboty drukujące z granulatu

Na rysunku 7 przedstawiono robot drukujący firmy CEAD, który bazuje na materiałach w postaci granulatu/pelletu. Takie rozwiązanie w druku 3D pozwala na wykonywanie obiektów o wymiarach przekraczających 1 m^3 . Ponadto w łatwy sposób istnieje możliwość usunięcia modeli z platformy. Niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest wyjątkowo duża szybkość druku 3D ze względu na zastosowanie dyszy o dużej średnicy (kilku milimetrów) co jednak niekorzystnie wpływa na dokładność procesu wytwarzania i jakość powierzchni. Maszyny te zbliżone są w aspekcie sterowania do obrabiarek sterowanych numerycznie ze względu na wykorzystanie tożsamego oprogramowania - Control system CNC control, Siemens sinumerik, a także użycie zaawansowanego panelu sterowniczego. Ponadto wiele rozwiązań zaczerpniętych jest z obszaru Robotyki, co podnosi możliwości technologiczne wytwarzania.



[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok wielkogabarytowej drukarki 3D – Robota drukującego, przy czym jest to widok zewnętrzny z otwartą komorą.]



Rys. 7. Wielkogabarytowa firmy CEAD Group (CEAD Company, 2022).

3.2. Parametry technologiczne druku 3D

Analizując parametry technologiczne druku 3D warto zwrócić uwagę na wymagania jakościowe stawiane modelom wytwarzanym z zastosowaniem tych technologii. Bez wątpienia determinuje to wybór parametrów technologicznych oraz ich wartość. W przypadku druku 3D i technologii FDM/FFF producenci materiałów najczęściej podają parametry takie jak:

- temperatura dyszy drukującej,
- temperatura stołu roboczego,
- grubość budowanej warstwy.



Dla tak przedstawionych parametrów technologicznych podawane są wartości wybranych parametrów wytrzymałościowych. W bardzo niewielu przypadkach producenci podają wartość dokładności wymiarowej, czy jakość technologicznej warstwy wierzchniej poprzez parametry na przykład chropowatości.

W przypadku technologii FDM/FFF występuje jednak znacznie większa liczba parametrów technologicznych. Na rysunku 8 przedstawiono interfejs z programu Makerbot Print wykorzystywanego podczas zajęć laboratoryjnych w Politechnice Świętokrzyskiej. Wiele cennych informacji na temat technologii druku 3D – FDM/FFF i parametrów technologicznych zamieszczono w publikacji (Bochnia et al., 2024). Jak można zauważyć oprogramowanie posiada znacznie większy zakres możliwości sterowania procesem technologicznym poprzez możliwość doboru „rzadziej” omawianych parametrów technologicznych druku 3D. Do najważniejszych z nich, które warto omówić zaliczyć można:

- RAFT („tratwa”), a więc wydruk z materiałem pod całym modelem, lub w wybranych miejscach. Ten parametr ma zasadniczy wpływ na przebieg procesu technologicznego oraz zużycie materiału. Ponadto Raft zabezpiecza model przez uszkodzeniem wynikającym z małej powierzchni styku modeli podczas druku 3D jak i minimalizuje deformacje powstające podczas procesu wytwarzania. Ze względu na termiczny charakter procesu deformacje w druku FDM/FFF zdarzają się nad wyraz często.

- SHELLS, a więc ściany wytwarzanego modelu. W przypadku wytwarzania modeli typu SOLID, a więc z wnętrzem modelu wypełnionym w całości SHELLS ma mniejszy wpływ, w przypadku druku jednak modeli o częściowym wypełnieniu wnętrza, a więc ze zmianą parametru INFILL (Infill Density) liczba SHELLS, a więc ilość ścian bocznych modeli ma bezpośredni wpływ na wybrane cechy jakości wytwarzanych modeli. Shell – 2, dla wypełnienia infill częściowego oznacza, że obiekt będzie w środku wypełniony jedynie częściowo, a skorupa modelu będzie składała się z dwóch ścian o jednakowej grubości. Ilość ścianek – Shell number ma wpływ na zużycie materiału modelowego, czas wydruku i aspekty wytrzymałości, co ma niezwykle duży wpływ na jakość wytwarzanych modeli i spełnienie kryteriów jakościowych.

- FLOORS i ROOFS, te parametry odpowiadają za grubość skorupy odpowiednio w dolnej i górnej części modelu. Sterowanie tymi parametrami ma podobny wpływ jak

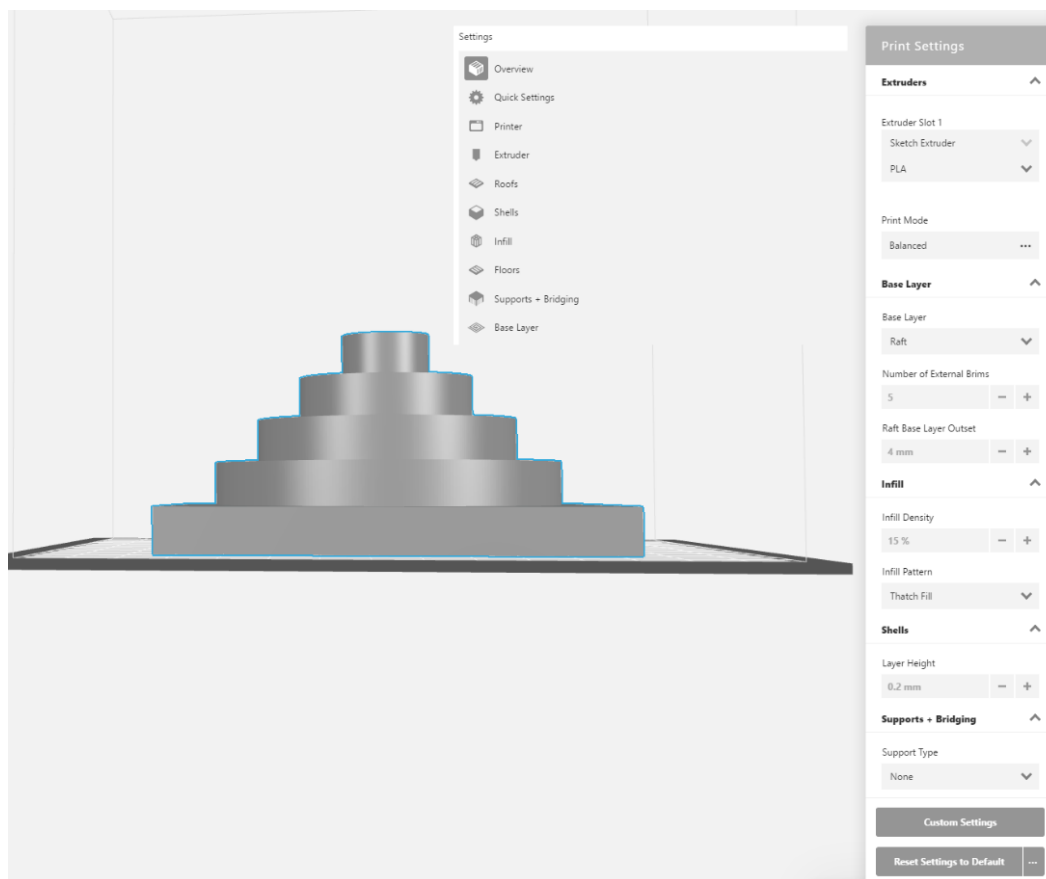


SHELLS z tym, że odpowiadają za grubość skorupy w podstawie i w górnej części modelu.

- SUPPORTS and BRIDGING, parametry te są kluczowe w aspekcie wytwarzania modeli które wymagają zastosowania materiału wspierającego. W ramach kontroli tego parametru istnieje możliwość sterowania kątem materiału wspierającego, który decyduje o pojawieniu się wsparcia bądź jego braku. W obszarze tego parametru istnieje również możliwość wybrania modelu wspierającego o określonym typie struktury. Warto zauważyć, że sam parametr dotyczący materiału wspierającego należy uwzględniać kompleksowo z możliwościami technologicznymi jego późniejszego usunięcia. Jest to o tyle ważne, że w ostatnich latach pojawiają się na rynku materiały wspierające, które po wydruku można w łatwy sposób usunąć (materiały rozpuszczalne) co jest niewątpliwie zaletą i eliminuje konieczność ręcznego bądź mechanicznego usuwania go.



[Tekst alternatywny. Rysunek 2D. Na rysunku przedstawiono widok oprogramowania drukarki 3D z przedstawieniem przykładowych parametrów technologicznych.]



Rys. 8. Widok parametrów technologicznych oprogramowania drukarki 3D.

Ćwiczenie do samodzielnego wykonania: Pobierz darmowe oprogramowanie 3D na przykład Makerbot Print lub PrusaSlicer (Prusa company, 2025). Następnie dowolny model STL, umieść na wirtualnej platformie drukarki 3D. Modele możesz pobrać ze strony internetowej Laboratorium Niekonwencjonalnych Technologii Wytwarzania (Kozior, 2025) (Druk 3D i Skanowanie 3D) Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn. W dalszej kolejności przeprowadź symulacje druku 3D zmieniając wartości opisanych powyżej parametrów oraz zapisz czas wydruku, zużycie materiału oraz uwagi dotyczące miejsca występowania materiału wspierającego. Przeprowadzając analizę wyznacz takie parametry technologiczne, które pozwalają

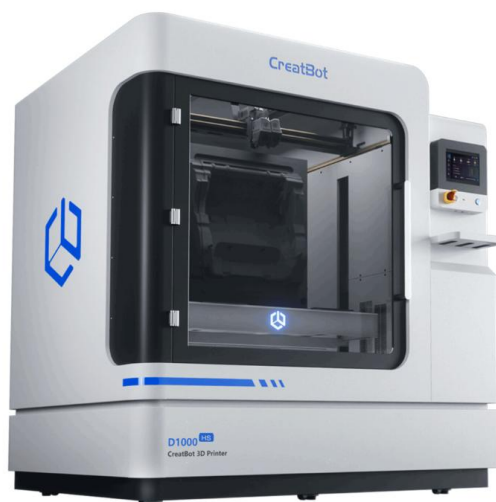


na minimalizację zużycia materiału, zmniejszenie czasu wykonania oraz które mogą wpływać korzystnie na jakość powierzchni.

4. Druk 3D wielkogabarytowy

Pojęcie wielkogabarytowego druk 3D funkcjonuje w branży przyrostowej od wielu lat. Nie ma jednak stałego rozgraniczenia który system druku 3D możemy uznać za wielkogabarytowy. Bazując jednak na większości obecnych na rynku systemach druku 3D można przyjąć, że większość drukarek uznanych za wielkogabarytowe posiada przestrzeń robocze o wymiarach powyżej 500x500x500 mm³. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono widok dwóch drukarek 3D, przy czym na rysunku 9 widać drukarkę realizującą technologię FDM/FFF, która wykorzystuje materiał w postaci filamentu – firmy CreatBot, a na rysunku 10 wielkoformatowy druk 3D przy wykorzystaniu robota drukującego – firmy CEAD Group.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok wielkogabarytowej drukarki 3D - FDM/FFF, przy czym jest to widok zewnętrzny z zamkniętą komorą, maszyna przypomina obrabiarkę CNC wyposażoną w pulpit sterowniczy]



Rys. 9. Widok drukarki 3D realizującej technologię FDM/FFF (Creabot D1000 printer, 2025).



[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok fragmentu wielkogabarytowej drukarki 3D – Robota drukującego, przy czym jest to widok zewnętrzny z otwartą komorą, maszyna wykonuje/drukuje model]



Rys. 10. Wielkogabarytowa drukarka 3D/robot drukujący firmy CEAD Group (CEAD Group - 3D printer, 2025).

Porównując dwa różne rozwiązania wchodzące w skład tak zwanego wielkoformatowego druku 3D możemy powiedzieć, że pomimo tożsamyh materiałów są to całkowicie różne rozwiązania. Wybór danego systemu uwarunkowany jest przede wszystkim takimi aspektami jak: możliwość adaptacji pomieszczenia, oczekiwana dokładność wytwarzania, niezbędne pole robocze, koszty, obsługa, oczekiwana jakość wytwarzanych modeli oraz wiele innych.

Ćwiczenie do samodzielnego wykonania: Aby poszerzyć swoją wiedzę dotyczącą wielkogabarytowego druku 3D wyszukaj maszyny stosowane w technologii MEX oraz porównaj wielkość komór dla technologii FDM/FFF oraz robotów drukujących. Jednocześnie porównaj dokładność wydruku deklarowaną przez producentów.



5. Skanowanie 3D

Proces skanowania 3D, a więc technologii zaliczanej do inżynierii odwrotnej jest niewątpliwie jedną z najszybszych metod pozwalających na uzyskanie informacji cyfrowej o kształcie i wymiarach obiektu. W przypadku zastosowania skanerów „przemysłowych” takich jak ATOS II firmy GOM mamy możliwość skanowania bardzo dużych obiektów umieszczonych na obrotowym stole. Zaletą stosowania przemysłowych skanerów jakim jest optyczny skaner ATOS II jest możliwość przeprowadzenia inspekcji wymiarowej z wykorzystaniem oprogramowania skanera. Dwie kamery urządzenia rejestrują przebieg prążków przemieszczających się po powierzchni skanowanego przedmiotu. W takim przypadku dla każdego piksela kamery oprogramowanie skanera oblicza współrzędne punktu. Skaner pozwala na rejestrację do 1,4 mln punktów podczas pojedynczego pomiaru (Bochnia, 2019).

W przypadku skanerów wykorzystywanych podczas zajęć dydaktycznych czyli Shining 3D EinScan SE mamy możliwość nauki procesu skanowania z zachowaniem wszystkich procedur i kroków stosowanych w dużych skanerach przemysłowych.

Warto zwrócić uwagę, że proces skanowania, tak jak każdy proces technologiczny charakteryzuje się określonymi parametrami pracy/pomiaru i dokładnością oraz pewnymi wadami.

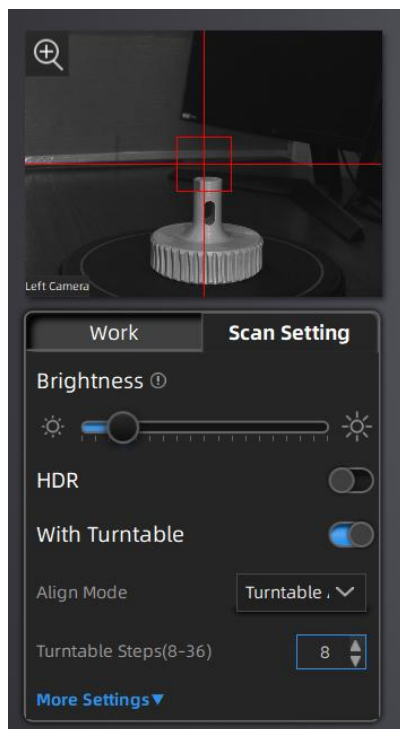
W związku z czym poniżej przedstawiono procedurę skanowania 3D modelu koła zębatego jako elementu odpowiadającego typowemu modelowi 3D dla kierunku Mechanika i Budowa Maszyn. Podczas skanowania zwrócono uwagę na dwa parametry procesu skanowania. Pierwszy z nich jest to podział obrotu stołu na określoną ilość części oraz drugi parametr to kierunek skanowania (usytuowanie modeli na platformie). Poniżej przedstawiono trzy skanowania, które kolejno po sobie były łączono tworząc obiekt i aproksymując go. Następnie przeprowadzono procedurę tworzenia siatki i zapisano plik STL (stereolitography). Przeprowadzono proces łączenia dwóch pierwszy skanów (group 1 i group 2), zapisując plik STL, a następnie obrócono model o zadany kąt (położenie boczne) wykonując proces skanowania i połączono wszystkie trzy (group 1, 2 i 3) oraz utworzono plik STL. Do przeprowadzenia procesu skanowania wykorzystano oprogramowanie EXScan S_v3.1.4.3 możliwe do darmowego pobrania ze strony producenta (*EinScan SE - EXScan_S software*, 2025).



Na rysunku 11 przedstawiono widok ustawień skanowania/parametrów. Kluczowym parametrem jest podział obrotu na części. Im mniejszy jest krok, a więc im podział na więcej części tym uzyskujemy więcej obrazów powierzchni zwiększając szanse pozyskania większej ilości punktów pomiarowych, co wydłuża jednocześnie czas skanowania. W przypadku pierwszego typu skanowania dla group 1 wybrano podział na 8 części (Turntable Steps - 8). Na tym samym rysunku w tle przedstawiono jest widok skanowanego modelu na stoliku skanera. Jak widać model leży płaską powierzchnią koła zębatego na stole. Pozostałe parametry skanowania takie jak Brightness (jasność) dla wszystkich trzech skanowań pozostały na niezmiennym poziomie. Ponadto na rysunku 12 przedstawiono widok pojedynczego skanu dla group 1.

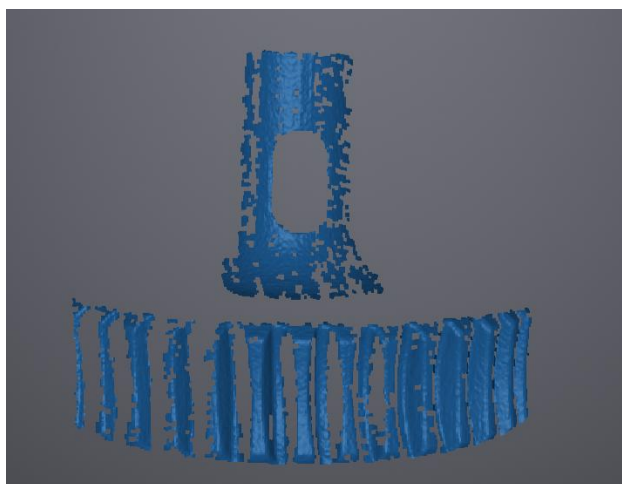


[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok okna skanowania gdzie przedstawiono parametry pomiaru: podział okręgu na części oraz poziom jasności.]



Rys. 11. Ustawienia/parametry skanowania w oprogramowaniu.

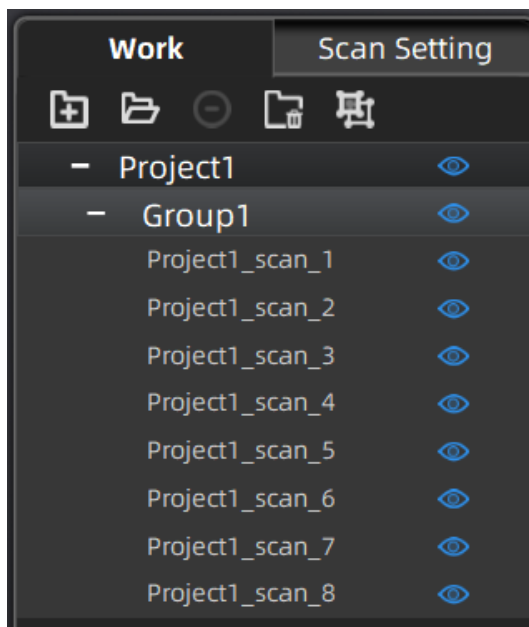
[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok pojedynczego skanu dla group 1.]



Rys. 12. Widok pojedynczego skanu dla group 1.

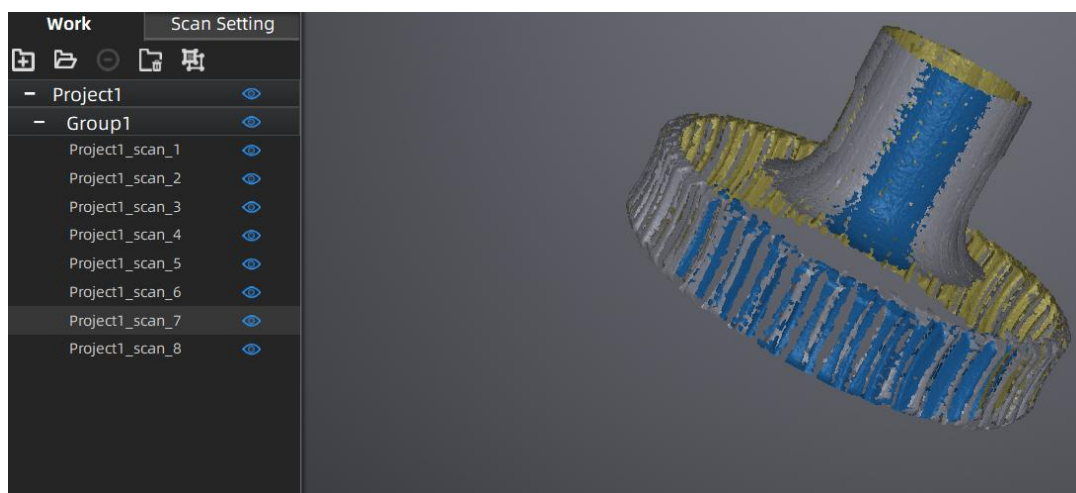
Na rysunku 13 przedstawiono widok group 1 ze wszystkimi aktywnymi pojedynczymi skanami dla pierwszego wariantu czyli podziału okręgu na 8 części. Na rysunku 14 przedstawiono widok nałożonych pojedynczych kroków skanowania dla group 1.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok wszystkich aktywnych skanów dla group 1.]



Rys. 13. Widok wszystkich aktywnych skanów dla group 1.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono obraz nałożonych pojedynczych kroków skanowania dla group 1, model z nałożonymi na siebie 8 skanami.]



Rys. 14. Widok nałożonych pojedynczych kroków skanowania dla group 1.

Jak widać na rysunku 14 ten tryb skanowania oraz usytuowanie modelu na stole uniemożliwiło uzyskanie danych z płaskich powierzchni koła zębatego.

W dalszej części wybierając *global optimization* oraz *mesh* przechodzimy do tworzenia siatki modelu. Dla wszystkich dalszych zapisów zawsze wybierany był tryb *Watertight* oraz dalej tryb *High Detail*. Tryb *High Detail* determinuje rozmiar powstałego pliku, gdzie tryb ten potrafi mieć ponad 10 krotnie większy rozmiar w porównaniu do *Low Detail* (rysunek 15). Widok powstałego modelu w kilku rzutach przedstawiono na rysunku 16.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono trzy tryby zapisu obrazujące dokładność siatki w zależności od wybranego wariantu.]

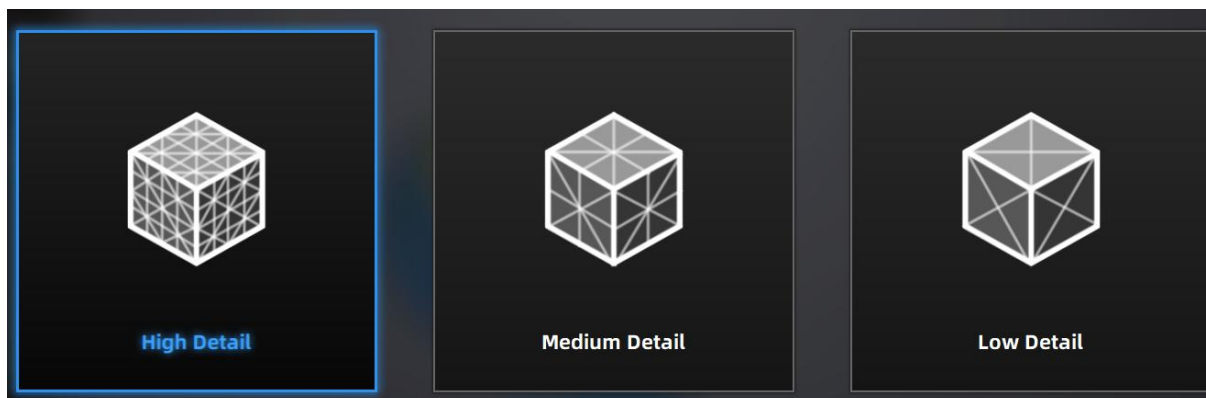


Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



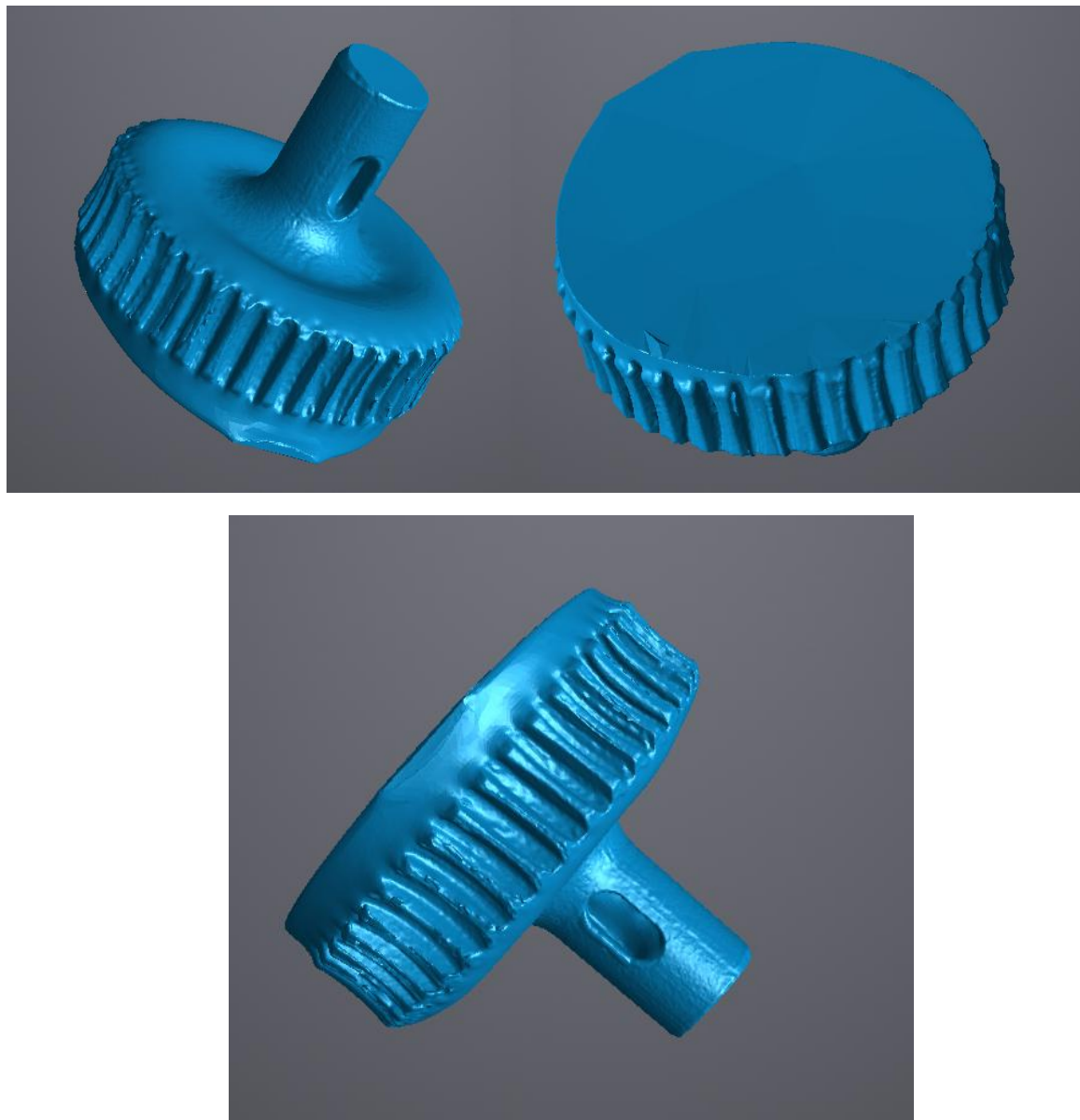
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Rys. 15. Widok trybów zapisu siatki modelu.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono trzy widoki przedstawiające obiekt po skanowaniu wraz z jego uzupełnieniem siatki.]



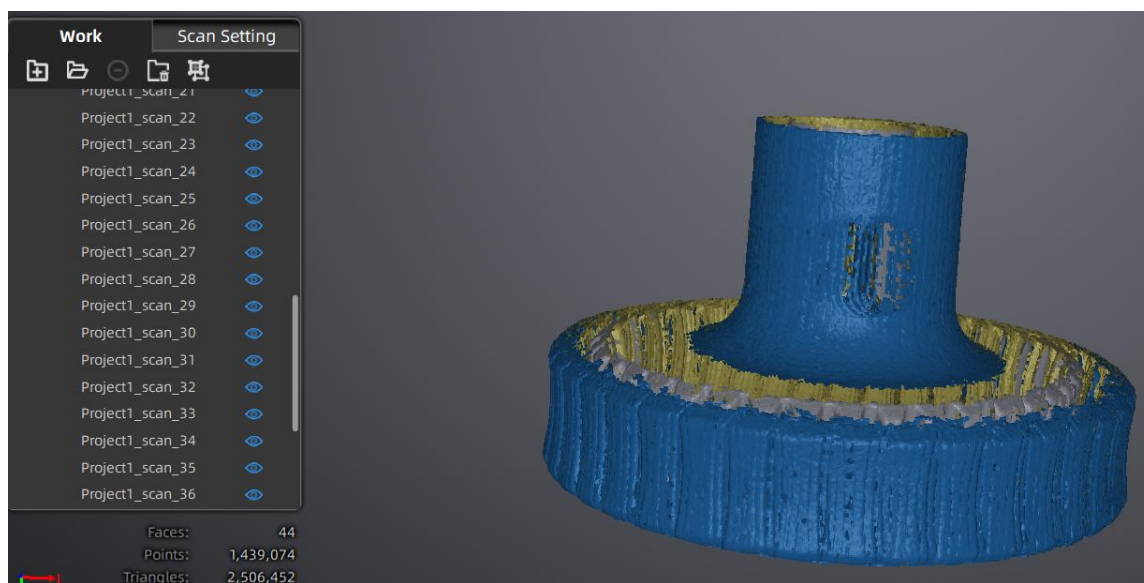
Rys. 16. Finalny model siatki po procedurze łączenia wszystkich 8 kroków skanowania.

Na rysunku 16 widać wyraźnie, że tak wykonany skan nie odtworzył zarówno rowka wpustowego, który powinien być przelotowy, jak i nie był w sposób właściwy

odtworzyć powierzchni płaskich. Tak zapisany model charakteryzował się 1337282 liczbą trójkątów. Pomimo tak dużej liczby trójkątów jakość odwzorowania jest niezadowalająca, co również widać na niskiej jakości odwzorowaniu ewolwenty koła zębatego.

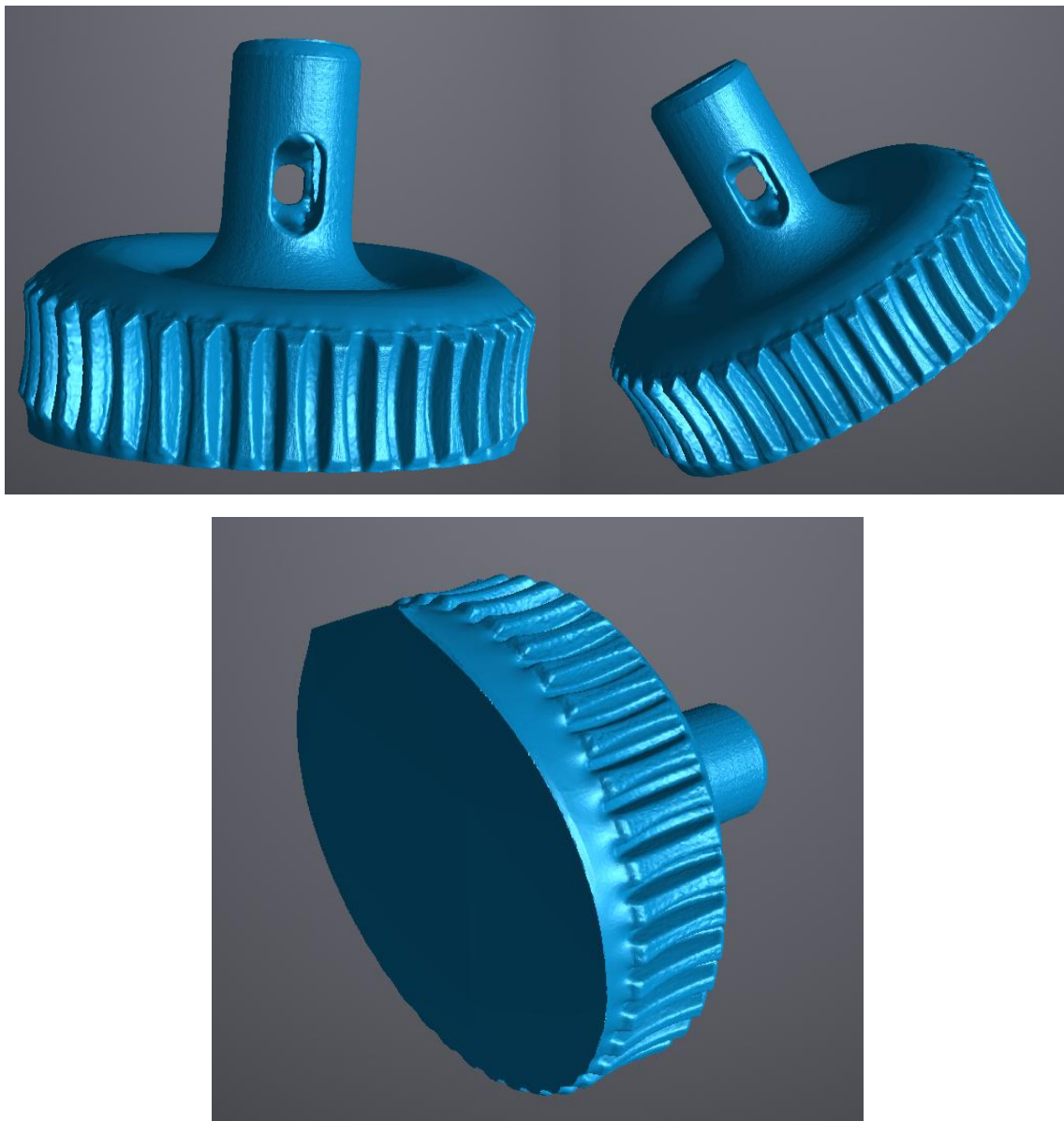
W dalszej części przeprowadzono skanowanie i identyczne procedury ze zmianą podziału obrotu stołu na 36 części (Turntable Steps - 36). Dla tak przeprowadzonego kroku skanowania co 10° , na rysunku 17 przedstawiono widok group 2, a na rysunku 18 model po uzupełnieniu siatki, gdzie wyraźnie widać podobny problem z uzupełnieniem powierzchni płaskich oraz powierzchni stykającej się ze stolikiem skanera. Warto zauważyć wyraźnie lepsze odwzorowanie ewolwenty koła zębatego. Tak utworzony model składał się z 2500000 trójkątów.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono obraz nałożonych pojedynczych kroków skanowania dla group 2, model z nałożonymi na siebie 36 skanami]



Rys. 17. Widok nałożonych pojedynczych kroków skanowania dla group 2.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono trzy widoki przedstawiające obiekt po skanowaniu wraz z jego uzupełnieniem siatki.]



Rys. 18. Finalny model siatki po procedurze łączenia wszystkich 36 kroków skanowania.

Na rysunku 19 przedstawiono powstałe modele STL, odpowiednio w górnej części dla skanowania z zachowaniem podziału obrotu na 8 części i w dole z podziałem na 36 części podczas skanowania.

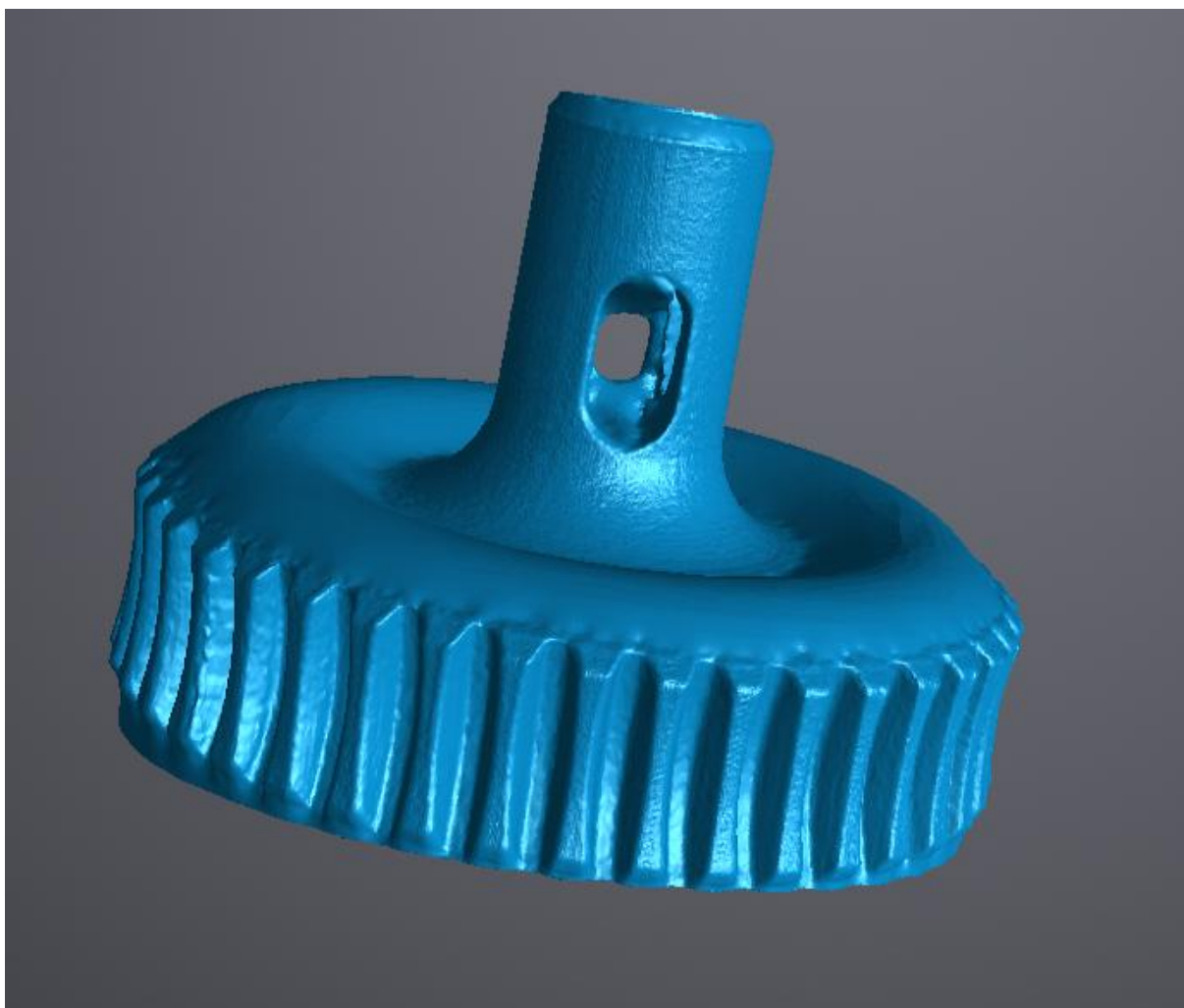
[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono dwa widoki plików STL, w górnej części widać model wykonany z podziałem obrotu stołu na 8 części gdzie powstały znaczne defekty, deformacje w obszarze rowka wpustowego, a w dolnej części widać model uzyskany po skanowaniu wykonanym z podziałem obrotu na 36 części, gdzie udało się odwzorować przelotowy rowek wpustowy oraz ewolwenta koła zębatego jest znacznie wyraźniej zarysowana.]



Rys. 19. Widok plików STL: w części górnej dla group 1, w części dolnej dla group 2.

W kolejnym kroku przeprowadziliśmy proces łączenia group 1 i group 2 czego finalny efekt przedstawiono na rysunku 20.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok modelu koła zębatego po połączeniu group 1 i 2. Widok przedstawia koło zębate z wyraźnie zarysowaną ewolwentą i cechami geometrycznymi głównie pozyskanymi przy podziale podczas skanowania na 36 części.]

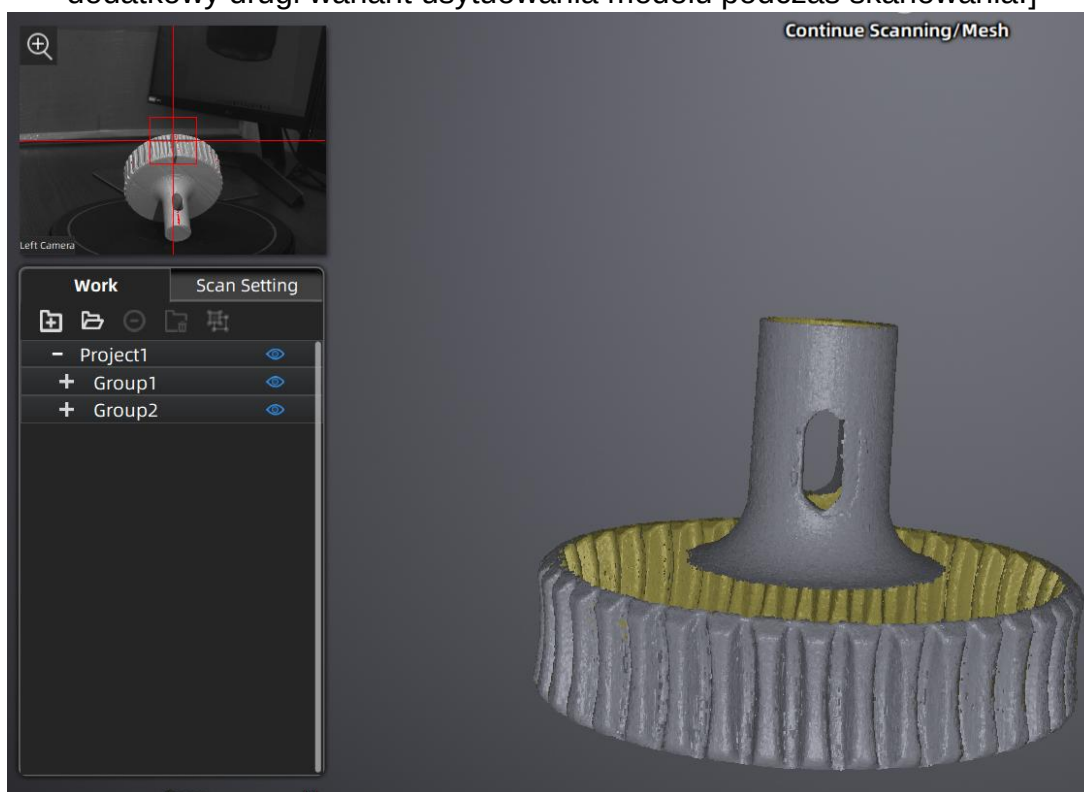


Rys. 20. Widok modelu po połączeniu group 1 i 2.

Ostatnim krokiem było utworzenie group 3, a więc dla group 1 i 2 dodatkowo przeprowadzono skanowanie w położeniu bocznym przedstawionym na rysunku 21.

Dla trzeciego skanowania zastosowano podział podczas skanowania na 36 części z zachowaniem pozostałych parametrów zapisu.

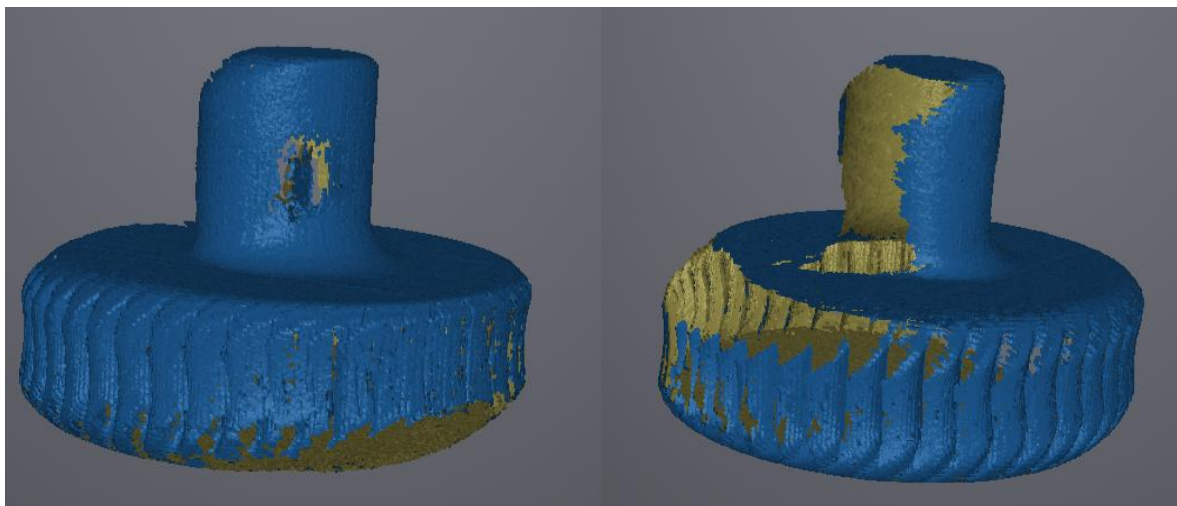
[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok modelu koła zębatego po połączeniu group 1 i 2 oraz w górnym lewym rogu dodatkowy drugi wariant usytuowania modelu podczas skanowania.]



Rys. 21. Widok modelu po połączeniu group 1 i 2 wraz z dodatkowym obrazem położenia bocznego.



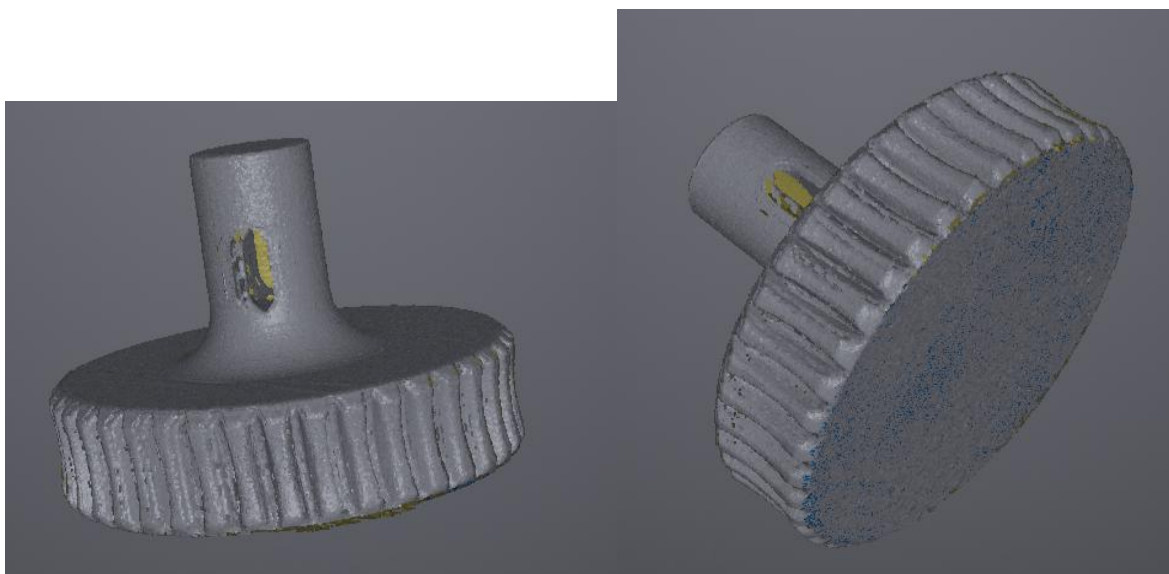
[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono dwa widoki przedstawiające obiekt po skanowaniu w tym przypadku bez jego uzupełnieniem siatki.]



Rys. 22. Widok modelu dla wszystkich 36 kroków skanowania.

Następnie przeprowadzono proces budowy modelu i uzupełnienia czego efekt widoczny jest na rysunku 23.

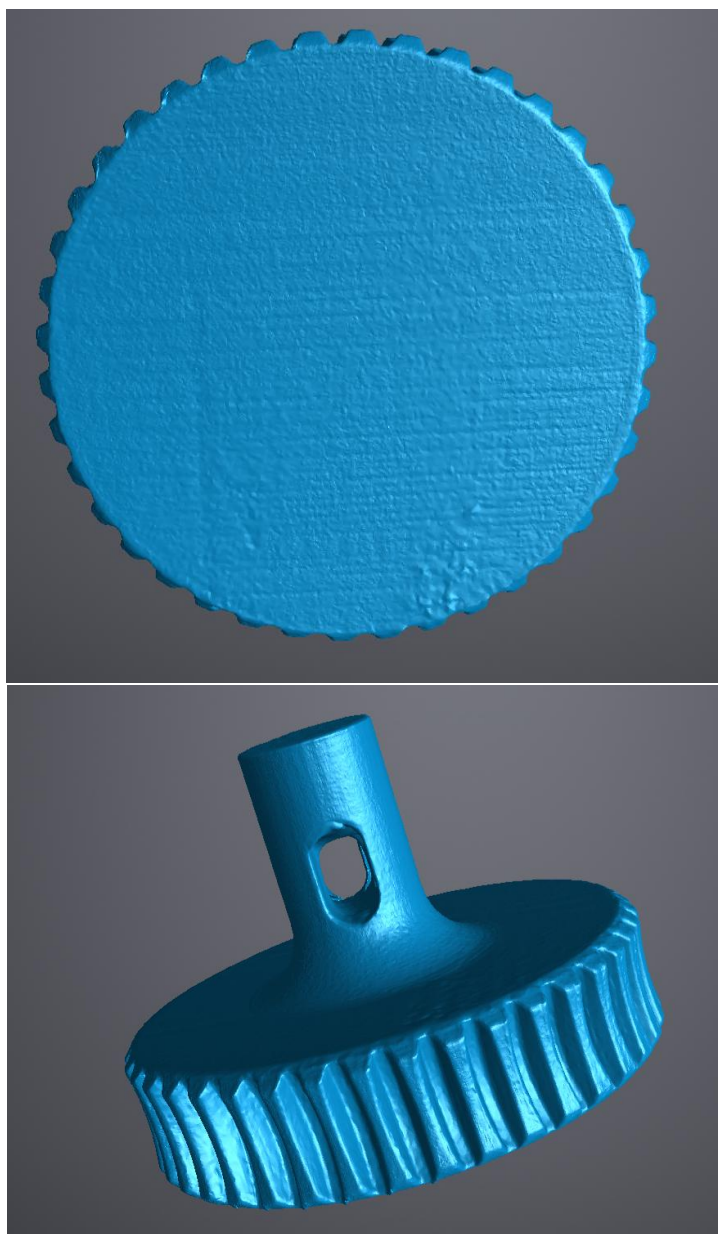
[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono widok obiektu po skanowaniu i procedurze wypełnienia.]



Rys. 23. Widok modelu dla wszystkich 36 kroków skanowania, po procedurze wypełnienia.

Ostatnim etapem było połączenie wszystkich powstałych trzech group w jeden finalny model tak jak to miało miejsce wcześniej w przypadku group 1 i 2, czego efekty były wcześniej przedstawione na rysunku 20. Obecny finalny model przedstawiony został na rysunku 24.

[Tekst alternatywny. Rysunek przestrzenny. Na rysunku przedstawiono dwa widoki przedstawiające obiekt po połączeniu wszystkich trzech group. Model charakteryzuje się wysoką dokładnością odwzorowania.]



Rys. 24. Widok modelu połączonego ze wszystkich trzech group.

Analiza procesu skanowania:

Analizując przeprowadzony proces skanowania widać wyraźnie, że modele w wielu przypadkach posiadają szereg wad. Trzy tryby skanowania zrealizowane w ramach jednego projektu pokazały, że dodatkowa orientacja modelu podczas skanowania



zapewniła wystarczającą jakość skanowania. Dla dwóch pierwszych wariantów (group 1 i group 2) powierzchnie płaskie do których skaner podczas skanowania nie miał wystarczającego dostępu zostały odwzorowane w niewłaściwy sposób. Pomimo zwiększenia liczby kroków czyli podziału obrotu stołu skanera z 8 do 36 nie udało się uzyskać zadowalających wyników. Widać, że powierzchnie płaskie, które znajdowały się w kontakcie z obrotowym stołem skanera, bądź były niemal równoległe ze stołem stanowiły duże wyzwanie podczas procesu skanowania. Obie równoległe powierzchnie niemal nie posiadały żadnych punktów zmierzonych, a aproksymacja oprogramowania była bardzo niedokładna. W obu przypadkach (group 1 i group 2) w dolnej części próbki oprogramowanie skanera uzupełniło powierzchnie dokładając dodatkową cechę geometryczną nieobecną na rzeczywistym skanowanym modelu. Dodatkowy skan (group 3) zrealizowany w ramach tego samego projektu jednak ze zmienioną orientacją na platformie stołu skanera pozwolił uzupełnić braki i umożliwił właściwe odtworzenie geometrii modelu. Trzeci skan wykonany z podziałem obrotu stołu podczas skanowania na 36 części był nie jako odpowiedzialny głównie za powierzchnie równoległe próbki, a w mniejszym stopniu za zarys ewolwenty koła zębatego.

Zapis STL nie jest jedynym możliwym do realizacji jednak to właśnie ten format zapisu jest możliwy do wykorzystania w procesie prototypowania z zastosowaniem technologii druku 3D. Wyraźnie widać, że zwiększenie podziału obrotu stołu skanera korzystnie wpływa na jakość skanowania, wydłużając niestety cały proces. Warto zwrócić uwagę, że skaner posiada wiele różnych parametrów technologicznych procesu pomiaru. Ważne z punktu widzenia dalszej obróbki plików oraz inspekcji wymiarowej jest możliwość generowania tak zwanych plików tekstowych ASC. Taki format zapisu otwiera drogę do dalszej pracy z plikami, ich edycji oraz procesu inspekcji.



6. Podsumowanie

Jak można zauważyć proces technologiczny druku 3D i skanowania 3D jest niezwykle złożony i jedynie duże zaangażowanie studenta umożliwi pełne poznanie obu technologii. W przypadku jednak druku 3D przedstawione materiały dotyczą głównie technologii FDM/FFF/MEX, a proces skanowania takich urządzeń, które są na wyposażeniu Laboratorium. Warto zwrócić uwagę, że w przypadku druku 3D istnieje bardzo wiele technologii w sposób znaczny różniących się zarówno sposobem budowania modeli jak użytymi materiałami. W tym obszarze rekomendowane jest, aby student we własnym zakresie poszerzał swoją wiedzę na temat technologii proszkowych druku 3D (ang. Powder Bed Fusion), żywicznych takich jak PJM czy Stereolitografia oraz na bazie materiałów ceramicznych. Niezwykle istotne jest, aby w przypadku technologii żywicznych i na bazie proszków dogłębnie zapoznać się z kartami charakterystyki danych materiałów oraz przepisami bezpieczeństwa. Kwestia bezpieczeństwa dla technologii na bazie metali czy żywic jest o tyle istotna, że znana technologii FDM/FFF jest stosunkowo bezpieczna o niskim ryzyku wypadku, ale już pozostałe technologie tak bezpieczne nie są i wymagają stosowania bardzo zaawansowanych środków ochrony osobistej.

W przypadku skanowania 3D warto zauważyć, że sam proces skanowania staje się obecnie tak samo popularny jak druk 3D, a wiedza dotycząca procedury postępowania z plikami, skanerami, kontrola jakości poprzez inspekcję wymiarową wymaga dużej praktyki osoby pracującej ze skanerem.

Podsumowując nowoczesny proces prototypowania bardzo często wykorzystuje zarówno druk 3D jak i skaner 3D, a inżynier kierunku mechanika i budowa maszyn powinien mieć pełną wiedzę nie tylko o stosowanych narzędziach ale i o parametrach technologicznych, które wpływają na jakość wydruku oraz otrzymanego poprzez skanowanie 3D modelu cyfrowego.



7. Literatura

- Bochnia, J. (2018). *Wybrane właściwości fizyczne materiałów kształtowanych technologiami przyrostowymi*. Kielce: Politechnika Świętokrzyska.
- Bochnia, J. (2019). Zastosowanie skanowania 3D w inżynierii odwrotnej. *Mechanik*, 194–196.
- Bochnia, J., & Kozior, T. (2024). *Podstawy szybkiego prototypowania. Druk 3D. Technologia FDM/FFF*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- CEAD Company. (2022). *CEAD printing Robot brochure*. Retrieved from https://ceadgroup.com/wp-content/uploads/2022/10/brochure_flexbot_CEAD.pdf
- CEAD Group - 3D printer. (2025). Retrieved from <https://ceadgroup.com/large-format-3d-printing-with-pipg/>
- COPPER 3D Company. (n.d.). *PLACTIVE material - sheet data*. Retrieved from https://copper3d.com/booklet/booklet__plactive2.pdf
- Creabot D1000 printer. (2025). Retrieved from <https://www.creatbot.com/en/creatbot-d1000.html>
- EinScan SE - EXScan_S software. (2025). Retrieved from <https://support.einscan.com/en/support/solutions/articles/60000998873-the-latest-software-for-einscan-se-sp-se-v2-sp-v2>
- ISO/ASTM 52900:2021, *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. (2021).
- Kozior, T. (2025). *Laboratorium Niekonwencjonalnych Technologii Wytwarzania, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska*. Retrieved from <https://wmibm.tu.kielce.pl/wmibm/badania-i-nauka/laboratorium-niekonwencjonalnych-technologii-wytwarzania/>
- Liker, J. K., & L. Convis, G. (2019). *The Toyota Way to Lean Leadership*. In McGraw Hill.
- Liker, J. K., & Morgan, J. M. (2018). *Designing the Future*. McGraw Hill Book Co.
- Prusa company. (2022). *PLA material - sheet data*. Retrieved from https://prusament.com/wp-content/uploads/2022/10/PLA_Prusament_TDS_2021_10_EN.pdf
- Prusa company. (2025). *Prusa slicer*. Retrieved from https://www.prusa3d.com/pl/strona/prusaslicer_424/
- Prusa Company. (2024). *Prusament Portfolio*. Retrieved from <https://www.prusa3d.com/downloads/press/prusament-portofolio-june-2024.pdf>
- Tarantino, A. (2022). SMART MANUFACTURING: The Lean Six Sigma Way. In SMART MANUFACTURING: The Lean Six Sigma Way. doi: 10.1002/9781119846642
- Wohlers Associates - The Seven AM Processes. (2025). Retrieved from <https://wohlersassociates.com/terminology-and-definitions/the-seven-am-processes/>