

Analiza możliwości wykorzystania technik i narzędzi reverse engineering w zakresie przygotowania prototypu części zamiennych

Gabriela Tarasiuk

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 85608@student.pb.edu.pl

Łukasz Dragun 

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: l.dragun@pb.edu.pl

DOI: 10.24427/az-2025-0063

Streszczenie

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania technik i narzędzi reverse engineering. Szczególną uwagę objęto przygotowanie prototypu cyfrowego części zamiennych. Poprzez zastosowanie skanera 3D możliwe było szybkie odwzorowanie badanego elementu, który w następnym etapie mógł zostać wydrukowany. Dodatkowo wykorzystano metodę projektowania CAD przy użyciu oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2026, które pozwoliło na porównanie modelu wytworzonego poprzez skanowanie i projektowanie. Dane metody i narzędzia pozwoliły na szeroką analizę możliwości ich wykorzystania oraz zagrożeń z tym związanych. Przeprowadzony proces reverse engineering oraz wszelkie analizy zgromadzone w artykule udowodniły, że warto wykorzystywać reverse engineering jednakże bez świadomego doboru komponentów nie przyniosą one pożądanych efektów.

Słowa kluczowe

reverse engineering, prototyp cyfrowy, skan 3D, druk 3D, Przemysł 4.0

Wstęp

Dynamiczny rozwój technologii cyfrowych, w szczególności skanowania 3D oraz druku 3D, otworzył nowe możliwości w zakresie inżynierii odwrotnej, czyli

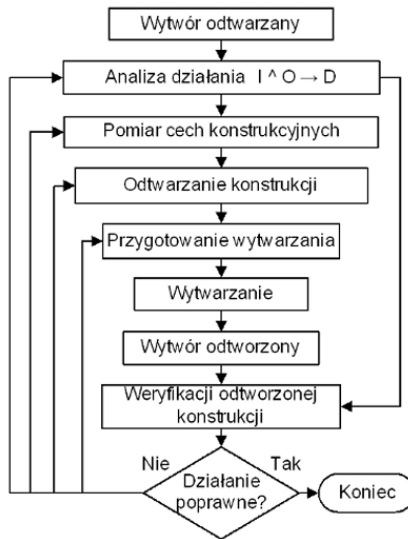
procesu, który umożliwia odtworzenie dokumentacji technicznej oraz modeli 3D na podstawie rzeczywistych obiektów. Techniki te zyskują coraz większe znaczenie w przemyśle, gdzie często zachodzi potrzeba szybkiego odtworzenia komponentów, dla których nie istnieje pełna dokumentacja techniczna lub konieczna jest ich modyfikacja.

Celem niniejszego artykułu jest ocena przydatności cyfrowej rekonstrukcji elementu technicznego o geometrii gwintowanej z wykorzystaniem strukturalnego skanowania 3D oraz druku 3D w technologii FDM. W szczególności analizie poddano dokładność odwzorowania skomplikowanych detali geometrycznych, takich jak profil gwintu oraz możliwość praktycznego zastosowania uzyskanego modelu w rzeczywistych warunkach.

W badaniu wykorzystano skaner strukturalny EinScan Pro 2X 2020 firmy Shining 3D, który umożliwia pozyskiwanie danych przestrzennych z dokładnością do 0,1 mm, oraz drukarkę 3D Raise3D pracującą z filamentem PLA. Proces rekonstrukcji obejmował etapy: skanowania, przetwarzania chmury punktów, generowania siatki trójkątów, przygotowania modelu do druku oraz wydrukowania i porównania elementu z oryginałem. Dodatkowo dokonano analizy dostępnych narzędzi CAD, które mogą wspierać tego rodzaju procesy w środowisku przemysłowym.

1. Przegląd literatury

Dzięki stałemu rozwojowi technologii komputerowej i technologii pomiaru danych rozwinąć się mogła również inżynieria odwrotna (ang. reverse engineering) [Guo i in., 2020, s. 121]. Reverse engineering to inaczej proces pozwalający nam zrozumieć działania systemu [Dang i in., 2014, s. 18]. To proces techniczny, podczas którego dokonujemy analizy i badań produktu i jego elementów tj. przepływ przetwarzania, struktura, specyfikacje wydajności funkcjonalnej itp. Dzięki temu możliwe jest wytworzenie produktów o podobnych funkcjach, lecz nie identycznych.



Rys. 1. Algorytm procesu reverse engineering

Źródło: opracowanie własne.

Główny cel reverse engineering to wyodrębnienie zasad projektowania produktów bezpośrednio z analizy wtedy, gdy dostęp do informacji produkcyjnych nie jest łatwy [Wu, 2020, s. 1704]. To niekonwencjonalne podejście pozwala na uzyskanie rozwiązań, gdy konwencjonalne metody zawodzą [Chowdary i Jaglal, 2023, s. 1522]. Najważniejszą przesłanką zastosowania reverse engineering jest dokładne pozyskiwanie danych. Dzięki temu możliwe jest przekształcenie obiektu w cyfrowy model 3D na komputerze. Wirtualne odwzorowanie produktu umożliwia inżynierom udoskonalenie go poprzez stosowanie różnych metod testowania i modelowania, a następnie wytworzenie obiektu metodą druku 3D w taki sposób, aby produkt zyskał wartość dodaną i wysoki poziom techniczny [Lv i in. 2018, s. 180]. W dalszym etapie uproszczenie, przyspieszenie oraz równoległe prowadzenie procesów produkcyjnych, poprzez integrację projektowania z narzędziami inżynierii odwrotnej i trójwymiarowej, sprzyja skutecznemu rozwojowi produktów [Telišková i in., 2018, s. 406].

Jednym z głównych, istotnych z punktu widzenia przemysłu zastosowań tej technologii jest ocena zużycia części. Możliwa jest ona dzięki porównaniu odtworzonego modelu części przed i po przepracowaniu określonej ilości cykli. Kolejnym istotnym zastosowaniem jest ocena poprawności zaprojektowanego procesu technologicznego, która umożliwia wykrycie procesu będącego przyczyną wybrakowania

danego elementu. Reverse engineering ma ponadto znaczące zastosowanie w odtwarzaniu dokumentacji technicznej istniejącej już części, które jest możliwe dzięki współczesnym systemom pomiarowym umożliwiającym bezpośredni transfer danych do programów typu CAD [Lulkiewicz i in., 2017, s. 214-215].

Zastosowanie reverse engineering znajduje potwierdzenie w wielu dziedzinach, przynosząc znaczące korzyści zarówno w procesach rekonstrukcji, jak i w rozwoju nowych rozwiązań. W literaturze podkreśla się różnorodne perspektywy wykorzystania tej metody. Wskazuje się, że może być ona z powodzeniem używana do odtwarzania komponentów turbinowych silników odrzutowych o złożonych kształtach, przy czym uzyskane modele cyfrowe służą nie tylko do odtworzenia geometrii, lecz także do dalszych analiz, badań i obliczeń, w tym modelowania zjawisk fizycznych. Podkreślana jest rola nowoczesnych systemów pomiarowych zintegrowanych z rozwiązaniami CAD/CAM/CAE, które wprowadzają nową jakość w praktykach reverse engineering [Ułanowicz i in., 2024].

Zwraca się również uwagę na procedury pozwalające na określanie ustawień obrabiarek wykańczających, dzięki którym możliwe jest odwzorowanie powierzchni zębów przekładni stożkowych o zębach spiralnych w sposób wiernie odzwierciedlający pierwotny zamiar projektanta. Rozwiązanie to otwiera nowe możliwości analizy istniejących przekładni, eliminując potrzebę przeszacowywania nacisków kontaktowych [Gonzalez-Perez i Fuentes-Aznar, 2022].

W badaniach nad wykorzystaniem technologii skanowania 3D wskazuje się, że reverse engineering w połączeniu z kontrolą jakości produkcji daje szerokie możliwości, choć rozwój precyzyjnych algorytmów rekonstrukcji powierzchni wciąż stanowi wyzwanie. Szczególną uwagę zwraca się na problemy związane z niedoskonałościami chmur punktów, takimi jak szum czy ubytki danych. Podkreśla się jednak, że metoda ta jest szczególnie przydatna w odniesieniu do komponentów o skomplikowanej geometrii, dla których pomiary ręczne są trudne lub niemożliwe. Wyniki studiów przypadków wskazują, że osiągnięta dokładność wymiarowa mieści się w granicach akceptowanych w literaturze [Hell i Lemu, 2021].

Podnoszona jest również kwestia korzyści płynących z wykorzystania reverse engineering w sytuacjach uszkodzenia części lub zakończenia jej produkcji przez oryginalnego producenta. Tworzenie parametrycznych modeli CAD na podstawie danych z uszkodzonych elementów umożliwia modyfikację projektów, wielokrotne iteracje oraz szybkie wytwarzanie. Integracja reverse engineering z metodami szybkiego prototypowania sprzyja skróceniu czasu projektowania oraz uzyskiwaniu wysokiej jakości efektów, co czyni tę metodę atrakcyjną w kontekście szybkiego rozwoju produktów [Chowdary i Jaglal, 2023].

W literaturze akcentuje się także praktyczne znaczenie reverse engineering i szybkiego prototypowania w procesie tworzenia części motoryzacyjnych. Skanowanie karoserii pojazdu pozwala na wygenerowanie chmury punktów, która następnie wykorzystywana jest w oprogramowaniu CAD do digitalizacji i modelowania, stanowiąc podstawę dla projektowania nowych rozwiązań w przemyśle samochodowym [Fabian i in., 2022].

W kontekście reverse engineering, która często zmierza do uzyskania cyfrowego modelu fizycznego obiektu w celu jego analizy, modyfikacji lub replikacji (np. poprzez druk 3D), występuje wiele powiązanych z nimi aspektów:

- Skanowanie 3D to jedna z metod pozyskania modelu cyfrowego, który następnie może być przygotowany do druku. Modele uzyskane w ten sposób, podobnie jak te stworzone w programach CAD lub pobrane z internetu, muszą zostać zaimportowane do oprogramowania typu slicer.
- Rekonstrukcja i tworzenie modeli CAD: Proces reverse engineering często obejmuje rekonstrukcję modelu cyfrowego na podstawie danych pozyskanych z fizycznego obiektu, często w oprogramowaniu CAD (ang. Computer Aided Design). Źródła wspominają o możliwości tworzenia własnych modeli 3D przy użyciu programów CAD. Wymieniane są narzędzia takie jak Tinkercad, Autodesk Fusion 360, a także OpenScad, DesignSpark Mechanical, Blender, Maya, 3DS Max, Autocad i 123D Design. Chociaż źródła skupiają się na tworzeniu modeli od podstaw lub ich modyfikacji, narzędzia CAD są również kluczowe w procesie rekonstrukcji modeli po pozyskaniu danych (np. ze skanowania 3D lub pomiarów) w ramach reverse engineering [Prusa, 2023].
- Narzędzia do cyfrowej manipulacji modelem (w oprogramowaniu typu slicer): Po pozyskaniu lub rekonstrukcji modelu cyfrowego, np. w ramach reverse engineering, kolejnym etapem przed drukiem 3D jest przygotowanie tego modelu [Prusa, 2023].
- Istotnym metodą w kontekście odwzorowywania geometrii wielu modeli okazać się może fotogrametria. To określanie wymiarów, kształtów i położenia obiektów poprzez rejestrację, interpretację, pomiary i przetwarzanie obrazów będących rzutami geometrycznymi przestrzeni. Do rzutowania służyć mogą fotografie analogowe lub cyfrowe [Runkiewicz, 2020, s. 49]. Bernasik i Mikrut za najistotniejsze zalety fotogrametrii uznają:
 - umożliwianie automatyzacji pomiaru obrazów;
 - stwarzanie szerokich możliwości przetwarzania obrazu, również w czasie rzeczywistym;

- ułatwianie prac związanych z rejestracją obrazu (kamery cyfrowe są lżejsze i niewielkie) i skracanie czasu pozyskiwania obrazu, ponieważ odpada fotograficzna obróbka negatywów;
- ułatwianie pomiarów obiektów w ruchu i pomiarów deformacji;
- umożliwianie nadzorowania procesów produkcyjnych i sterowania nimi;
- brak kosztów materiałów światłoczułych i ich obróbki laboratoryjnej [Bernasik i Mikrut, 2007, s. 7].

Oprogramowanie typu slicer, takie jak PrusaSlicer, jest kluczowym narzędziem w tym etapie. Pozwala ono na import modeli w różnych formatach (np. STL, OBJ, AMF, STEP, 3MF) i konwersję ich na kod G. W PrusaSlicer dostępne są narzędzia do manipulacji cyfrowymi modelami [Prusa, 2021], co może być częścią procesu przygotowania zrekonstruowanego obiektu do druku:

- Przesuwanie obiektu w przestrzeni XYZ.
- Skalowanie obiektu, zarówno równomierne, jak i wzdłuż poszczególnych osi.
- Obracanie obiektu, w tym funkcja "Place on Face" ułatwiająca pozycjonowanie płaskiej powierzchni na platformie.
- Cięcie cyfrowego modelu w celu podzielenia go na mniejsze, łatwiejsze do wydrukowania części.
- Dla drukarek SLA (np. Original Prusa SL1S SPEED), PrusaSlicer oferuje również narzędzia specyficzne, takie jak drażnienie i dodawanie otworów, co pozwala na zmniejszenie zużycia materiału i wagi obiektu.
- Generowanie podpór, niezbędnych do prawidłowego wydruku obiektów z nawisami. Narzędzia te służą do przygotowania istniejącego modelu cyfrowego do procesu wytwarzania przyrostowego, a nie do samego pozyskania modelu z fizycznego obiektu.

Istotnym elementem reverse engineering jest sam proces odwzorowania danego elementu, który następuje po jego zaprojektowaniu. Do odwzorowania modeli w rzeczywistości posłużyć mogą różne metody druku 3D. Jedną z najpopularniejszych metod jest stereolitografia, czyli metoda druku przy użyciu żywic fotopolimerowych. Metoda druku 3D SLA polega na warstwowym utwardzaniu ciekłej żywicy za pomocą lasera. Żywica znajduje się między powierzchnią roboczą a dnem zbiornika, a po utwardzeniu każdej warstwy stół roboczy unosi się o określoną wysokość. Proces ten jest powtarzany aż do utwardzenia wszystkich warstw, które tworzą model 3D. Każda warstwa stanowi przekrój obiektu w płaszczyźnie XY, a laser utwar-
dza jej obrys oraz zadane wypełnienie [Dyl i in., 2022, s. 20-21].

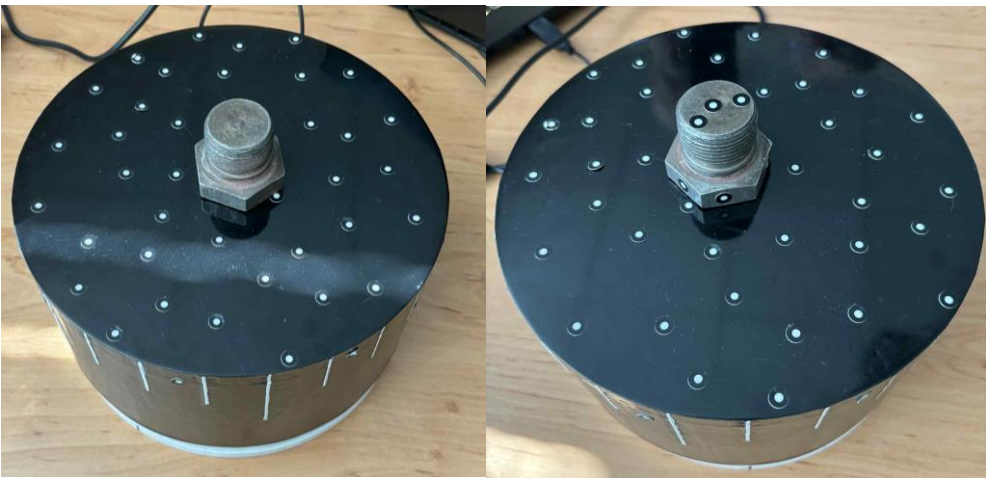
Tab. 1. Zestawienie najczęściej używanych materiałów stosowanych w technologii FDM

	ABSplus	PLA	PVA	PC	ASA	POM	PA (nylon)
Surowiec, materiał	Ropa naftowa	Skrobia kukurydziana, ziemniaczana, bu-raki cukrowe	Ropa naftowa	Kwas węglowy	Kauczuk akrylowy	Formaldehid	Kwasy dikarboksyłowe
Zalety	Twardy, odporny na pękanie, odporny chemicznie i termicznie, nie przewodzi prądu elektrycznego, odporny na promieniowanie UV, mniejsza podatność na skurcz w porównaniu do tradycyjnego ABSu	Nietoksyczny, nie jest łatwopalny, nie kurczy się podczas chłodzenia, dobra jakość wydruku	Nietoksyczny, biodegradowalny, odporny na działanie benzyny i olejów, łatwo rozpuszczalny w wodzie, wsoka wytrzymałość na rozciąganie	Wysokie właściwości optyczne, wysoka uderalność, dobre właściwości izolacyjne, mała skłonność do pękania, odporny na uderzenia i działanie wysokich temperatur	Dobra wytrzymałość na warunki atmosferyczne, wysoka odporność na promieniowanie UV, dobra adhezja, doskonała wytrzymałość mechaniczna i termiczna	Duża wytrzymałość mechaniczna, wysoka odporność na promieniowanie UV, twardy, niełatwliwy, odporny na ścieranie, odporny na większość substancji chemicznych	Duża wytrzymałość na zginanie i rozciąganie (ale tylko wtedy, gdy nie nasiąknie wilgocią), dobra uderalność (gdy wchłonie wilgoć), niski współczynnik tarcia, właściwości sprężyste, odporny na zmęczenie, uderzenia, wysokie temperatury
Wady	Łatwopalny, z tendencją do kurczenia się podczas chłodzenia (w szczególności zwykły ABS)	Wolny proces chłodzenia, mięknięcie w temperaturze 45-65°C, słaba wytrzymałość mechaniczna, niska uderalność	Duża higroskopijność	Duża higroskopijność, nieodporny na promieniowanie UV, wymaga wysokich temperatur wydruku	Toksyczny	Toksyczny, problem z przyklejeniem pierwszej warstwy do stołu roboczego, nieodporny na fibrologię kwasów	Duża higroskopijność, kruchość i mała uderalność (ale tylko wtedy, gdy nie nasiąknie wilgocią), mała wytrzymałość mechaniczna, gdy wchłonie wilgoć, słaba adhezja
Temperatura dyszy drukującej	215-250°C	185-235°C	180-200°C	280-305°C	240-260°C	220-230°C	235-260°C
Temperatura blatu roboczego	90-115°C	pokojsowa lub zalecana 60°C	50°C	85-95°C	90-110°C	110°C	pokojsowa lub zalecana 30-40°C
Pokrycie powierzchni blatu roboczego	Taśma kaptonowa	Niebieska taśma malar-ska, taśma kaptonowa, szklana płytka	Folia polipropylenowa	Taśma kaptonowa	Taśma kaptonowa		

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [Rabek, 2020, s. 31; Siemieniński i Budzik, 2015, s. 76; Wilczyński, 2018, s. 304; Mikulska i Kotliński, 2019, s. 21; Kaziunas i France, 2014, s. 94; Królikowski, 2012/2017, s. 46; Hryniewicka i Dragun, 2023; <http://3d.edu.pl/filament-abs-plus-co-to-jest-i-czy-plus-zmienia-cos-pozza-nazwa/>, 23.06.2025; <https://fiberlogy.com/pl/filamenty/absplus-2/>, 23.06.2025; <https://chem-distribution.nl/pl/services/alkohol-poliwinylowy-pva/>, 15.10.2021; <http://3d.edu.pl/tworzywo-poliweganowe-w-druku-3d/>, 23.06.2025; <https://centrum-druku3d.pl/abs-vs-asa-porownanie-materialow-do-druku-3d/>, 23.06.2025; <https://www.two-rzywa.pl/wiedzopedia/baza-tworzyw/10,akrylonitryl-styren-akryl-asa,polimer.html>, 23.06.2025; <https://zadar.pl/filament-pom-czyli-wytrzymalosc-d-n-tej-potegi-podniesiona>, 23.06.2025].

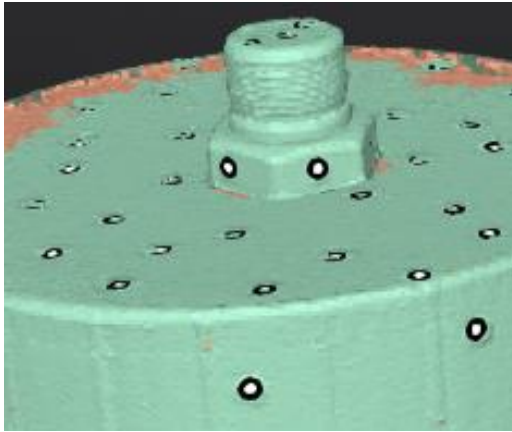
2. Metodyka badań

W celu przeprowadzenia procesu inżynierii odwrotnej przy użyciu cyfrowej rekonstrukcji elementu technicznego z geometrią gwintowaną zastosowano technikę skanowania 3D z użyciem skanera strukturalnego EinScan Pro 2X 2020 firmy Shining 3D z dokładnością do 0,1 mm. Urządzenie to, wykorzystuje technologię światła strukturalnego, co pozwala na szybkie i stosunkowo dokładne pozyskiwanie danych geometrycznych, a przez to czyni je przydatnym narzędziem w procesach inżynierii odwrotnej oraz prototypowania. W trybie ręcznego szybkiego skanowania, skaner ten przetwarza do 1,5 miliona punktów na sekundę.



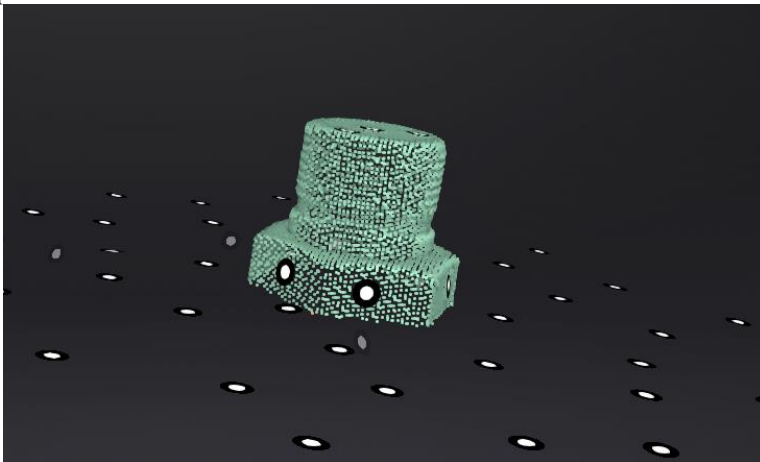
Rys. 2. Śruba ustabilizowana na miejscu roboczym (z lewej). Śruba z markerami (z prawej)
Źródło: opracowanie własne.

Skanowanie przeprowadzono w trybie ręcznym z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania Shining 3D, które umożliwia rejestrowanie danych w czasie rzeczywistym oraz ich wstępne przetwarzanie. Obiekt został wcześniej oczyszczony i ustabilizowany (rys. 1), co miało na celu zminimalizowanie zakłóceń pomiarowych. W trakcie akwizycji danych zwrócono szczególną uwagę na pokrycie wszystkich istotnych powierzchni, ze szczególnym uwzględnieniem części gwintowanej. Dodatkowo zastosowano markery (rys. 1), aby wskazać płaszczyzny i ułatwić odczytywanie danych przy użyciu skanera.



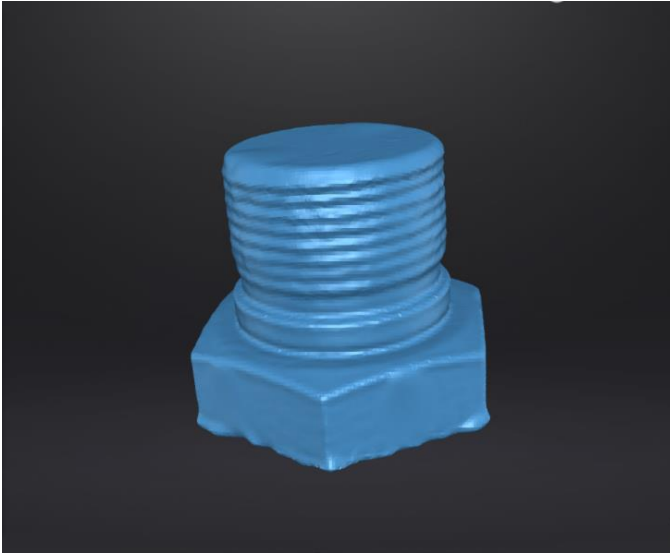
Rys. 3. Widok zeskanowanego elementu w oprogramowaniu Shining 3D
Źródło: opracowanie własne.

Pomimo zwiększenia gęstości siatki trójkątów podczas dalszego przetwarzania, należy zaznaczyć, że gwint został odwzorowany jedynie w sposób przybliżony i słabo zarysowany, co widoczne jest na rys. 2. Wynika to z ograniczeń rozdzielczości skanera EinScan Pro 2X 2020, który choć wystarczający do digitalizacji ogólnych kształtów, nie gwarantuje pełnej dokładności odwzorowania drobnych struktur geometrycznych, takich jak ostre profile gwintu metrycznego. Tego rodzaju ograniczenie należy mieć na uwadze w kontekście zastosowań wymagających wysokiej precyzji pasowania.



Rys. 4. Oczyszczona chmura punktów
Źródło: opracowanie własne.

Po zakończeniu skanowania przeprowadzono ręczne czyszczenie modelu w oprogramowaniu, polegające na usunięciu zbędnych artefaktów oraz punktów spoza obrysu obiektu. Z oczyszczonej chmury punktów (rys. 3) wygenerowano siatkę trójkątów (rys. 4), stanowiącą podstawę do dalszego przygotowania modelu do druku.



Rys. 5. Wygenerowana siatka trójkątów

Źródło: opracowanie własne.

W opcjach rekonstrukcji aktywowano funkcję „obiekt wodoszczelny”, która zapewniała uzyskanie zamkniętej, jednolitej bryły bez luk i nieciągłości powierzchni. Zwiększono również gęstość siatki w celu możliwie najwierniejszego odzwierciedlenia powierzchni, w tym gwintu - mimo że, jak wcześniej wspomniano, efekt odwzorowania pozostał ograniczony.

Kolejnym etapem inżynierii odwrotnej jest odtworzenie modelu w rzeczywistości. Gotowy model śruby został wyeksportowany do formatu kompatybilnego z oprogramowaniem do druku 3D - IdeaMaker 4.3.3. W programie tym dokonano precyzyjnego obrotu modelu względem osi współrzędnych, tak aby ustawić go w optymalnej pozycji do druku: zarówno pod względem mechanicznym (stabilność wydruku), jak i geometrycznym (zminimalizowanie ilości podpór, lepsze odwzorowanie warstw gwintowanych).



Rys. 6. Drukarka Raise 3D

Źródło: opracowanie własne.

Druk 3D przeprowadzono przy użyciu drukarki Raise3D, z wykorzystaniem standardowych ustawień dla filamentu PLA (rys. 5). Parametry druku zostały dobrane następująco: temperatura lewej i prawej dyszy - 215°C, temperatura stołu roboczego - 60°C. Czas realizacji wydruku wyniósł około 1 godziny i 20 minut. Szacowane zużycie materiału to 17,3 g, co odpowiada około 5,79 m filamentu. Przy obecnych kosztach materiału oznacza to wydatek rzędu 0,52 zł.

3. Wyniki badań

Po przeprowadzonym procesie odwzorowania oraz druku 3D badanego elementu nastąpiła weryfikacja zgodności oryginalnego elementu i stworzonego elementu w procesie inżynierii odwrotnej (rys. 7). Ze względu na mniejszą dokładność skanera oraz warunki otoczenia w jakich odbywał się proces skanowania (np. oświetlenie) element nie został precyzyjnie odwzorowany. Widoczny jest lekki zarys gwintu, natomiast nie spełniałby on swojej funkcji. Element został wytworzony wyłącznie w celach wizualizacji i analizy potencjału narzędzi inżynierii odwrotnej i nie powinien zostać dopuszczony do użytku.



Rys. 7. Element wydrukowany przy użyciu drukarki 3D (po lewej), oryginalny element (po prawej)
Źródło: opracowanie własne.

Zauważyć można znaczne różnice między elementem oryginalnym, a drukowanym. Gwint nie został wiarygodnie odwzorowany, co uniemożliwia praktyczne wykorzystanie wytworzonego elementu. Dodatkowo na spodzie śruby zauważalny jest biały filament, który został wykorzystany do wydrukowania podstawy, na której w dalszej kolejności drukowany był element. Na górnej części śruby widoczna jest nierówna powierzchnia tworząca wrażenie schodków.

4. Dyskusja wyników

Rozważono cztery programy umożliwiające projektowanie przestrzenne. W tabeli 2 przedstawiono roczne koszty licencji każdego z nich. Warto zaznaczyć, że Autodesk Inventor Professional oraz SolidWorks CAD 3D należą do najdroższych komercyjnych rozwiązań dostępnych na rynku. Wysoka cena licencji stanowi często istotną barierę dla firm planujących wdrożenie tych narzędzi.

Tab. 2. Koszt zakupu rocznej licencji i koszt jej ponowienia dla wybranych programów z rodziny CAD

	Autodesk Inventor Professional	Onshape	Fusion 360	SolidWorks CAD 3D
Koszt rocznej licencji	Około 13 000 zł	Około 8 500 zł	Nieco ponad 2 000 zł	Około 20 000 zł
Odnowienie licencji w kolejnych latach	Około 12 000 zł	Około 8 500 zł	Około 2 000 zł	Około 20 000 zł

Źródło: opracowanie własne na podstawie [<https://sklep.pccpolska.pl/pl/19-autodesk-inventor>, 25.06.2025; <https://sklep.pccpolska.pl/pl/33-fusion-360>, 25.06.2025; <https://www.onshape.com/en/pricing>, 25.06.2025; <https://solidexpert.com/programy/solidworks/#licencja>, 25.06.2025].

Program z rodziny CAD powinien zostać wyposażony w odpowiednie moduły programu. W tabeli 3 sporządzono zestawienie pożądanych cech oprogramowania, które może zostać wykorzystane w procesie prototypowania 3D.

Tab. 3. Zestawienie pożądanych cech przy druku 3D czterech programów z rodziny CAD

	Autodesk Inventor Profes- sional	Onshape	Fusion 360	SolidWorks CAD 3D
Edycja z poziomu programu kompute- rowego	+	-	+	+
Edycja z poziomu przeglądarki interne- towej	-	+	-	-
Usługa w chmurze	+	+	+	+
Funkcja CAM	+	-	+	+
Export do pliku STL	+	+	+	+
Edycja i naprawa skanów 3D modeli siatkowych	-	-	+	+
Edycja i praca z modelami 3D z innych systemów CAD	+	+	+	+
Edycja modeli dla drukarek (dzielenie, skalowanie, budowa podpór, wyzna- czanie ścieżki ekstrudera)	-	-	+	+

Źródło: opracowanie własne na podstawie Hryniewicka i Dragun, 2023; <https://sklep.pccpolska.pl/pl/19-autodesk-inventor>, 25.06.2025; <https://sklep.pccpolska.pl/pl/33-fusion-360>, 25.06.2025; <https://www.onshape.com/en/pricing>, 25.06.2025; <https://solidexpert.com/programy/solidworks/#licencja>, 25.06.2025; <http://3d.edu.pl/10-najlepszych-alternatyw-fusion-360-w-2019-roku/>, 25.06.2025; <https://skanery3d.eu/nawosci/skanowanie-3d-solidworks/>, 25.06.2025; <https://www.pccpolska.pl/branza-mechaniczna/autodesk-inventor-cam/>, 25.06.2025; <https://www.pccpolska.pl/edycja-bezposrednia-zmiana-geometrii-czesci-3d-bez-wzgledu-na-zrodlo-pochodzenia-modelu/>, 25.06.2025].

Symbole „+” i „-” w tabeli wskazują odpowiednio na obecność lub brak danej funkcjonalności w poszczególnych programach. Fusion 360 oraz SolidWorks CAD 3D oferują pełen zakres funkcji wspierających projektowanie modeli przeznaczonych do druku 3D. Jedynym ich ograniczeniem jest brak możliwości pracy w przeglądarce internetowej. Funkcjonalność tę zapewnia jedynie Onshape, co jednak nie wpływa bezpośrednio na jakość wydruku, a stanowi jedynie udogodnienie na etapie projektowania - szczególnie w przypadku pracy zdalnej. Dzięki temu użytkownik może korzystać z wielu urządzeń mobilnych bez konieczności instalowania oprogramowania CAD na każdym z nich.

Istotnym atutem wybranych rozwiązań jest możliwość edycji i naprawy siatkowych modeli pochodzących ze skanów 3D oraz modyfikacji modeli drukarek 3D. Niestety, funkcje te nie są dostępne w programach Autodesk Inventor Professional

i Onshape. Warto podkreślić, że skanery 3D odgrywają kluczową rolę w odwzorowywaniu skomplikowanych geometrii, natomiast możliwość dostosowania modelu do konkretnej drukarki 3D zwiększa precyzję i efektywność procesu druku.

Na podstawie danych zawartych w tabelach 2 i 3 można stwierdzić, że Fusion 360 stanowi jedną z optymalnych i bezpiecznych opcji dla przedsiębiorstw poszukujących oprogramowania kompatybilnego z technologią druku 3D.

Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują zarówno na potencjał, jak i ograniczenia wykorzystania technologii skanowania 3D oraz druku 3D w kontekście inżynierii odwrotnej elementów technicznych o złożonej geometrii, takich jak gwintowane komponenty mechaniczne.

Pomimo zastosowania nowoczesnego skanera strukturalnego EinScan Pro 2X 2020, który zapewnia stosunkowo wysoką jakość akwizycji danych geometrycznych, odwzorowanie drobnych detali, w szczególności profilu gwintu metrycznego, okazało się niewystarczające. Choć ogólna geometria obiektu została zarejestrowana poprawnie, a zastosowanie markerów i odpowiednie przygotowanie powierzchni przyczyniły się do zwiększenia stabilności procesu pomiarowego, istotne cechy funkcjonalne obiektu, takie jak krawędzie zarysu gwintu, uległy rozmyciu.

Dodatkowe przetwarzanie w oprogramowaniu Shining 3D, w tym ręczne czyszczenie chmury punktów oraz zagęszczenie siatki trójkątów, nie poprawiło znacząco precyzji odwzorowania wspomnianych struktur. Użycie opcji „obiekt wodoszczelny” pozwoliło co prawda na uzyskanie poprawnej, zamkniętej bryły geometrycznej, jednak nie zrekomensowało ograniczeń sprzętowych skanera, którego rozdzielczość nie pozwala na wiarygodne odtworzenie ostrych i wąskich elementów, charakterystycznych dla gwintu technicznego.

Proces druku 3D, przeprowadzony na drukarce Raise3D przy użyciu standardowego filamentu PLA, potwierdził ograniczenia modelu cyfrowego. Pomimo odpowiedniego ustawienia pozycji wydruku i optymalizacji orientacji modelu pod kątem minimalizacji podpór, końcowy produkt cechował się niską jakością funkcjonalną. Widoczna warstwowa struktura, efekt schodkowania na powierzchniach górnych oraz obecność podporowego filamentu u podstawy elementu świadczą o ograniczeniach technologii FDM w precyzyjnym odwzorowywaniu skomplikowanych powierzchni gwintowanych. Szczegółową analizę dotyczącą efektywności druku 3D przedstawiono w tabeli 4.

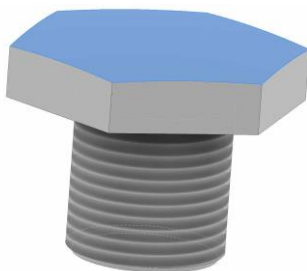
Tab. 4. Analiza SWOT druku 3D

Mocne strony	Słabe strony
Szybka wizualizacja koncepcji	Niska dokładność odwzorowania detali
Możliwość przeprowadzenia analizy kształtu i dopasowania	Problemy z jakością powierzchni

Niskie koszty produkcji jednostkowej prototypów	Brak możliwości praktycznego zastosowania
Elastyczność projektowania	Zależność od warunków otoczenia
Szanse	Zagrożenia
Rozwój technologii i precyzji druku	Błędne postrzeganie technologii jako gotowej do zastosowań końcowych
Wdrożenie w procesach edukacyjnych i projektowych	Niezgodność wymiarowa z wymaganiami technicznymi
Integracja z CAD i systemami inżynierii odwrotnej	Wysoka zależność od operatora i ustawień drukarki
Rozwój materiałów dedykowanych prototypowaniu	Trudności w kontroli jakości

Źródło: opracowanie własne.

Aby porównać metody projektowania przestrzennego skorzystano z oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2026. Zaprojektowany został ten sam element, którego wymiary odczytano za pomocą elektronicznej suwmiarki z dokładnością do 0,01mm. Fragment prototypu cyfrowego śruby został przedstawiony na rys. 8. Szczegółową analizę dotyczącą efektywności danej metody przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 8. Fragment prototypu cyfrowego śruby

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 5. Analiza SWOT metody projektowania CAD w Autodesk Inventor Professional 2026

Mocne strony	Słabe strony
Zaawansowane narzędzia projektowe	Wysoka krzywa uczenia się
Parametryczność i historia modelowania	Duże wymagania sprzętowe
Integracja z innymi produktami Autodesk (np. AutoCAD, Fusion 360)	Koszt licencji
Możliwość tworzenia złożów i ich analizy (kolidowanie, ruch, obciążenia)	Złożoność przy projektach o nietypowej geometrii
Szanse	Zagrożenia
Zastosowanie w przemyśle 4.0 i automatyzacji projektowania	Rosnąca konkurencja ze strony innych narzędzi CAD (np. SolidWorks, Fusion 360, FreeCAD)

Rozwój w kierunku chmury i pracy zdalnej	Uzależnienie od licencji subskrypcyjnej
Wykorzystanie w edukacji i certyfikacji zawodowej	Ryzyko błędów w złożonych projektach
Integracja z drukiem 3D i CAM	Problemy z kompatybilnością wersji

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowanie

Przeprowadzone opisane w artykule potwierdzają, że technologia skanowania 3D i druku 3D może być skutecznie wykorzystywana w procesie inżynierii odwrotnej, szczególnie w kontekście odtwarzania prostych kształtów elementów technicznych. Zastosowanie skanera EinScan Pro 2X 2020 umożliwiło sprawny transfer danych geometrycznych oraz stworzenie wstępnego modelu cyfrowego, jednak dokładność odwzorowania detali, tj. zarys gwintów metrycznych, okazała się niewystarczająca. Ograniczenia rozdzielczości skanera i technologii FDM użytej do wydruku 3D skutkowały zniekształceniem kluczowych cech geometrycznych, co wyklucza praktyczne zastosowanie tak wytworzonego elementu.

Z praktycznego punktu widzenia, system skanowania i druku 3D w obecnej konfiguracji może być użyteczny głównie do celów wizualizacji, wstępnej analizy konstrukcyjnej oraz tworzenia prototypów koncepcyjnych. Nie jest jednak odpowiedni do produkcji części wymagających wysokiej precyzji wymiarowej, takich jak elementy z gwintami funkcjonalnymi. Wskazuje to na konieczność stosowania bardziej zaawansowanych technologii skanowania (np. tomografia przemysłowa, skanery laserowe o wyższej rozdzielczości) oraz druku (np. SLA, SLS) do projektów wymagających odwzorowania drobnych i istotnych szczegółów konstrukcyjnych.

Dodatkowo, analiza wybranych programów CAD wykazała, że najlepszym kompromisem między funkcjonalnością a kosztem dla firm wdrażających inżynierię odwrotną i druk 3D może być oprogramowanie Fusion 360. Oferuje ono bogaty zestaw narzędzi, w tym możliwość edycji siatek trójkątów oraz integrację z procesem druku, przy relatywnie niskim koszcie licencji.

Wnioski te wskazują na rosnący potencjał inżynierii odwrotnej jako wsparcia dla procesów projektowania i prototypowania, jednak podkreślają także konieczność świadomego doboru narzędzi w zależności od wymaganej precyzji oraz końcowego zastosowania komponentu.

ORCID iD

Łukasz Dragun: <http://orcid.org/0000-0001-6768-6818>

Literatura

1. 3d.edu.pl, <http://3d.edu.pl/10-najlepszych-alternatyw-fusion-360-w-2019-roku/> [25.06.2025].
2. 3d.edu.pl, <http://3d.edu.pl/filament-abs-plus-co-to-jest-i-czy-plus-zmienia-cos-pozanazwa/> [23.06.2025].
3. 3d.edu.pl, <http://3d.edu.pl/tworzywo-poliweganowe-w-druku-3d/> [23.06.2025].
4. Bernasik J., Mikrut S. (2007), *Fotogrametria inżynieryjna*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków.
5. Centrumdruku3d.pl, <https://centrumdruku3d.pl/abs-vs-asa-porownanie-materialow-dodruku-3d/> [23.06.2025].
6. Chowdary B. V., Jaglal D. (2021), *3D CAD model reconstruction and fast prototyping of rotational parts: a reverse engineering approach*, Journal of Engineering, Design and Technology, Leeds.
7. Chowdary B., Jaglal D. (2023), *3D CAD model reconstruction and fast prototyping of rotational part: a reverse engineering approach*, Journal of Engineering, Design and Technology, Leeds.
8. Dang B., Gazet A., Bachaalany E., Josse S. (2014), *Practical Reverse Engineering*, John Wiley & Sons, Indianapolis.
9. Dyl T., Kosek K., Ziółkowski M. (2022), *Technologie wytwarzania przyrostowego*, Wydawnictwo Uniwersytet Morski w Gdyni.
10. Fabian M., Huňady R., Kupec F. (2022), *Reverse Engineering and Rapid Prototyping in the Process of Developing Prototypes of Automotive Parts*, Manufacturing Technology, Uście nad Łabą.
11. Fiberlogy.com, <https://fiberlogy.com/pl/filamenty/absplus-2/> [23.06.2025].
12. Gonzalez-Perez I., Fuentes-Anzar A. (2022), *Reverse engineering of spiral bevel gear drives reconstructed from point clouds*, Mechanism and Machine Theory.
13. Guo H., Guo X., Yue W., Yang Y. (2020), *Research on Rapid Mold Making Based on Reverse Engineering and 3D Printing Technology*, 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), Szanghaj.
14. Helle R. H., Lemu H. G. (2021), *A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control*, Materials Today: Proceedings, Amsterdam.
15. Hryniewicka G., Dragun Ł. (2023), *Analiza możliwości wykorzystania druku 3D do produkcji części zamiennych do podnośników płytkowych – studium przypadku przedsiębiorstwa X*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej Akademia Zarządzania, Białystok.
16. <https://sklep.pccpolska.pl/pl/19-autodesk-inventor> [25.06.2025].
17. <https://sklep.pccpolska.pl/pl/33-fusion-360> [25.06.2025].

18. <https://www.onshape.com/> [25.06.2025].
19. Hylewski D. (2013), *Inżynieria odwrotna z wykorzystaniem zaawansowanych technik wytwarzania*, XII Forum Inżynierskie ProCAX, Sosnowiec.
20. Kaziunas France A. (2014), *Świat druku 3D. Przewodnik*, Helion S.A. Gliwice.
21. Królikowski W. (2012/2017), *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, PWN, Warszawa.
22. Lulkiewicz J., Chruściński M., Szkudelski S., Ziółkiewicz S. (2017), *Wykorzystanie inżynierii odwrotnej do kontroli zmian wymiarowych w cyklu eksploatacyjnym części maszyn*, Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań.
23. Lv S., Zhu Y., Ni H., Wang X. (2018), *Teapot Three-dimensional Geometrical Model Reconstruction Based on Reverse Engineering and Rapid Prototyping Technology*, 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering, Huhhot.
24. Mikulska A., Kotliński J. (2019), *Badanie drukowanych części maszyn*, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.
25. Milewski J.O. (2017), *Additive Manufacturing of Metals*, Springer International Publication, Cham.
26. Onshape.com, <https://www.onshape.com/en/pricing> [25.06.2025].
27. Pccpolska.pl, <https://sklep.pccpolska.pl/pl/19-autodesk-inventor> [25.06.2025].
28. Pccpolska.pl, <https://sklep.pccpolska.pl/pl/33-fusion-360> [25.06.2025].
29. Pccpolska.pl, <https://www.pccpolska.pl/branza-mechaniczna/autodesk-inventor-cam/> [25.06.2025].
30. Pccpolska.pl, <https://www.pccpolska.pl/edycja-bezposrednia-zmiana-geometrii-czesci-3d-bez-wzgledu-na-zrodlo-pochodzenia-modelu/> [25.06.2025].
31. Prusa J. (2021), *3D Printing Handbook User manual for the original Prusa SLIS SPEED*, Prusa Research a.s., Praga.
32. Prusa J. (2022), *3D Printing Handbook User manual for the original Prusa MK3S*, Prusa Research a.s., Praga.
33. Prusa J. (2022), *3D Printing Handbook User manual for the original Prusa MK4*, Prusa Research a.s., Praga.
34. Rabek J. F. (2020), *Polimery i ich zastosowania interdyscyplinarne cz. 1*, PWN, Warszawa.
35. Rabek J. F. (2020), *Polimery i ich zastosowania interdyscyplinarne cz. 2*, PWN, Warszawa.
36. Runkiewicz L. (2020), *Diagnostyka obiektów budowlanych - zasady wykonywania ekspertyz*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
37. Siemiński P., Budzik G. (2015), *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
38. Skanery3d.eu, <https://skanery3d.eu/nowosci/skanowanie-3d-solidworks/> [25.06.2025].
39. Solidexpert.com, <https://solidexpert.com/programy/solidworks/#licencja> [25.06.2025].

40. Telišková M., Török J., Baron P., Pollák M., Kaščák J., Mezencevova V. (2018), *Implementation of Innovative Digitalization Methods in Reverse Engineering*, 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, Singapur.
41. Tworzywa.pl, <https://www.tworzywa.pl/wiedzopedia/baza-tworzyw/10,akrylonitryl-styren-akryl-asa,polimer.html> [23.06.2025].
42. Ulanowicz L., Szczepaniak P., Jastrzębski G. (2024), *Modelowanie geometrii palisady wieńców łopatkowych turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem inżynierii odwrotnej*, Warszawa.
43. Wilczyński K. (red.) (2018), *Przetwórstwo tworzyw polimerowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
44. Wu X. (2020), *The Reverse Design and NC Machining of Industrial Products Based on Reverse Engineering*, 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing.
45. Zadar.pl, <https://zadar.pl/filament-pom-czyli-wytrzymalosc-d-n-tej-potegi-podniesiona> [23.06.2025].

Analysis of the feasibility of using reverse engineering techniques and tools in the preparation of digital prototype of spare parts

Abstract

The aim of the paper is to present the potential of using reverse engineering techniques and tools. Particular attention was given to the preparation of a digital prototype of spare parts. By using a 3D scanner, it was possible to quickly reproduce the examined component, which could then be 3D printed in the next stage. Additionally, the CAD design method was applied using Autodesk Inventor Professional 2026, which enabled a comparison between the model created through scanning and the one designed manually. These methods and tools allowed for a comprehensive analysis of their applications and the risks associated with them. The reverse engineering process and the analyses presented in the article have demonstrated that reverse engineering is worth applying; however, without the conscious selection of components, it will not yield the desired results.

Key words

reverse engineering, digital prototype, 3D scanning, 3D printing, Industry 4.0