

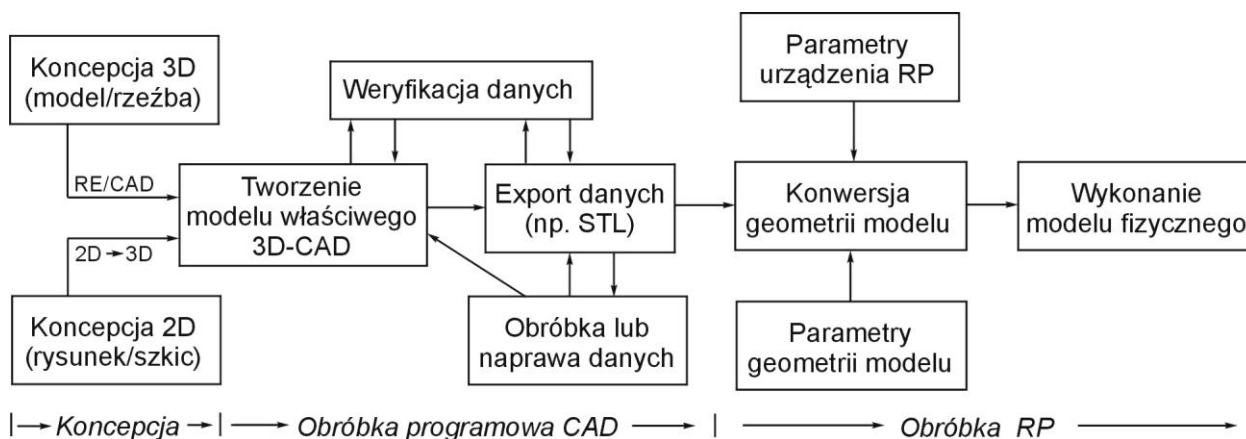
BUDZIK Grzegorz<sup>1</sup>  
KOZIK Bogdan<sup>2</sup>

## Analiza procesu obróbki i transferu danych w procesie szybkiego prototypowania kół zębatach przekładni lotniczej

### WSTĘP

Prototypy kół zębatach wykonywane przyrostowymi lub ubytkowymi technikami szybkiego prototypowania (ang. Rapid Prototyping – RP) powstają w oparciu o model numeryczny 3D-CAD. Formy zapisu, eksportu i transferu danych mają istotny wpływ na jakość i dokładność geometryczną wyrobu finalnego [1-3].

W zależności od techniki szybkiego prototypowania wymagana jest odpowiednia obróbka programowa danych numerycznych. Wykonanie modelu fizycznego (prototypu) możliwe jest na podstawie geometrycznego modelu 3D-CAD. Obróbka numeryczna rozpoczyna się w środowisku programu CAD, w którym model jest zapisywany w pierwotnej postaci i z którego model eksportowany jest do odpowiedniego formatu systemu RP [1]. Schemat ogólny przepływu danych w procesie szybkiego prototypowania przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat przepływu danych w procesie szybkiego prototypowania [1]

Istnieją również możliwości wykonania prototypu na podstawie danych wprost z procesu tzw. inżynierii odwrotnej (ang. Reverse Engineering – RE). Należy jednak pamiętać, że dane tego typu mogą być mniej dokładne niż przygotowane bezpośrednio w programach 3D-CAD [2]. Programy dedykowane do urządzeń RP weryfikują poprawność modeli przed uruchomieniem procesu przyrostowego. Dalsza obróbka pliku polega na zadaniu odpowiednich parametrów pracy urządzenia (grubości warstwy dla systemów addytywnych oraz/lub określenia ścieżki narzędzia czy głowicy dla systemów przyrostowych i ubytkowych).

Przygotowanie danych numerycznych ma zasadniczy wpływ na dokładność modelu otrzymanego w procesie szybkiego prototypowania. Parametry geometryczne eksportowanych danych z systemów CAD powinny być zawsze wyższe niż dokładność urządzenia szybkiego prototypowania. Dzięki temu w procesie budowy modelu urządzenie RP nie powiela się błędów programowych [7-11].

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, WBMiL, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 8, tel: + 48 17 865 1986, gbudzik@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Rzeszowska, WBMiL, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 8, tel: + 48 17 865 1986, bogkozik@prz.edu.pl

## 1. FORMATY DANYCH W PROCESIE SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA

W systemach szybkiego prototypowania można spotkać różne formaty zapisu plików modeli cyfrowych 3D-CAD. Do najpopularniejszych formatów 3D-CAD/RP należą [2-5]:

- Format STL (ang. Stereolithography Language) – został wprowadzony przez firmę 3D Systems dla metody stereolitografii. Powierzchnia modelu 3D zostaje odwzorowana przez siatki trójkątów. Format STL pozwala w prosty sposób przetransformować model 3D CAD, następnie poddać go dalszej obróbce i podziałowi na warstwy. Rozpowszechnienie tego formatu spowodowało, że stał się standardem w pozostałych technologiach RP/RT i jest również wykorzystywany w technikach RE.
- Format SLC (ang. Sliced Layer Countour) – opracowany przez 3D Systems. Model reprezentowany jest przez kontury opisujące kolejne przekroje następujących po sobie warstw. Kontury otrzywane są z matematycznego opisu modelu CAD. Zasadniczą wadą formatu SLC jest brak możliwości skalowania modelu w środowisku CAD.
- Format CLI (ang. Common Layer Interface) – opracowany w ramach projektu Brite-EuRam finansowanego przez Unię Europejską i jest stosowany przez firmę EOS. Pracą nad tym formatem zajmuje się EARP (ang. European Action on Rapid Prototyping). Wirtualny model trójwymiarowy składa się z warstw opisywanych zamkniętymi poliliniami w płaszczyźnie XY, budowanymi wzdłuż osi Z. Format przeznaczony jest głównie do opisu danych pochodzących z medycznych urządzeń skanujących.
- Format HPGL (ang. Hewlett Packard Graphic Language) – opracowany przez Hewlett Packard. System ten jest oparty na warstwowej reprezentacji modelu trójwymiarowego w płaszczyźnie XY, które to warstwy nakładane są na siebie wzdłuż osi Z.

W procesie transferu i obróbki danych na drodze 3D-CAD/3D-RP stosowane są również uniwersalne formaty CAD m.in. STEP, IGES czasami 3DS. Dodatkowo program MagiscRP umożliwia wczytanie plików w większości formatów stosowanych w systemach CAD – w zależności od zainstalowanych translatorów, jednak najczęściej stosuje się w praktyce formaty STEP i IGES [6]:

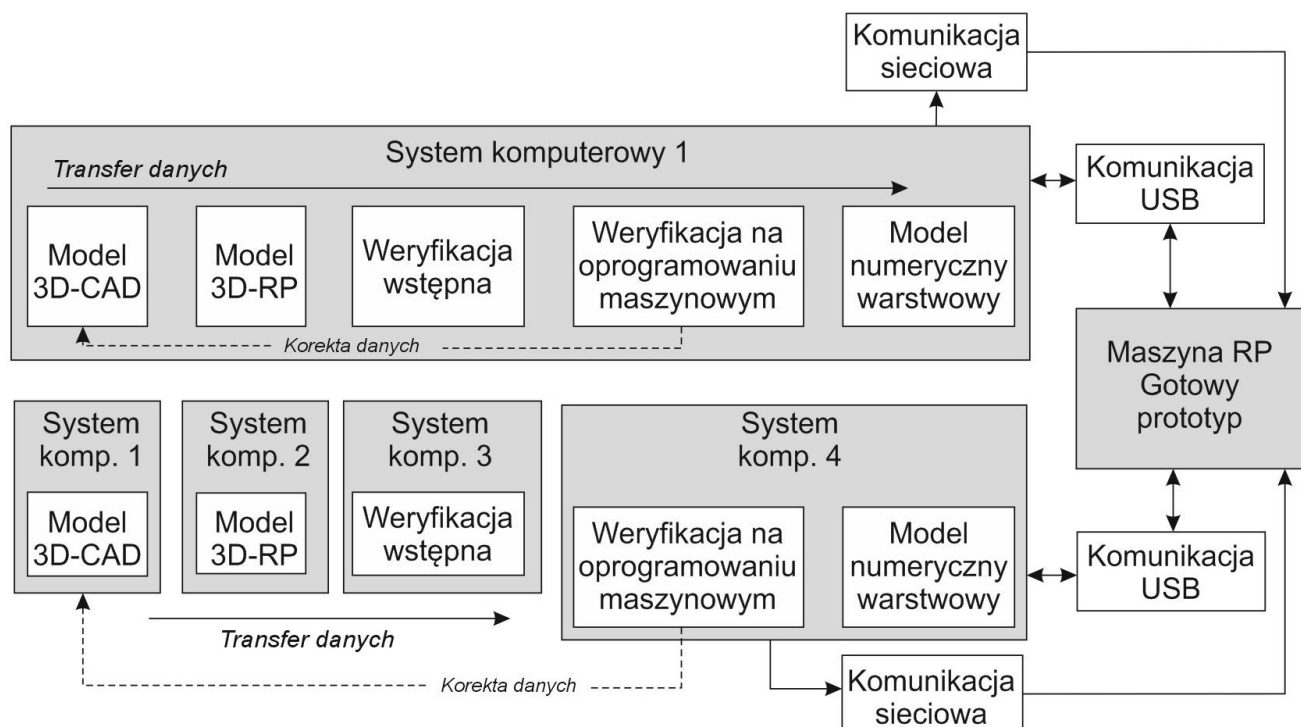
- Format IGES (ang. Initial Graphic Exchange Specification) – określa podstawowe elementy geometryczne (punkt, linia, łuk, powierzchnia itp.), symbole (tekst, elementy wymiarowania i kreskowania), elementy strukturalne (mecierze transformacji, atrybuty, topologię elementów graficznych itp.). Rozpowszechnienie tego formatu spowodowało, że jest również wykorzystywany w technikach CMM/RE.
- Format STEP (ang. Structured for the Exchange of Product Model Data) – definiuje strukturę opisu modelu opartą na danych geometrycznych, topologicznych, technologicznych i materiałowych. Specyfikacja standardu STEP określająca odwzorowanie obiektu zawarta jest w normie ISO 10303.

Analizując możliwości zastosowania formatów IGES i STEP w procesie przetwarzania danych 3D-CAD/3D-RP należy zauważyć, że stosowanie formatu STEP pozwala w większości wypadków na dokładne odwzorowanie geometrii 3D modelu CAD, natomiast w formacie IGES często pojawiają się błędy odwzorowania w postaci m.in. wadliwych lub zgubionych powierzchni modelu. W przypadku kół zębatach wady takie mogą pojawiać się na powierzchni przejścia zęba.

## 2. TRANSFER DANYCH W PROCESIE SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA

Transfer danych w procesie szybkiego prototypowania w ogólnym przypadku oparty jest o schemat przedstawiony na rysunku 1. Należy brać jednak pod uwagę specyfikę procesu odnoszącą się do określonych obiektów i ich miejsca na kolejnych etapach produkcji. Modyfikacje przepływu danych będą zależne od rodzaju prototypu (np. prototyp funkcjonalny, prototyp wizualny, prototyp technologicznych czy prototyp użytkowy). Na transfer danych ma również wpływ sam wytwarzany obiekt np. dla kół zębatach przekładni lotniczych w procesie transferu danych priorytetem będzie dokładność geometryczna odwzorowania modelu. Dla modelu wizualnego czy artystycznego z obszaru wzornictwa przemysłowego priorytetem może być np. kolorystyka modelu.

W procesie transferu danych istotna jest również dyspozycyjność oprogramowania do modelowania 3D-CAD, obróbki danych numerycznych, oprogramowania sterującego maszynami RP i oczywiście dostępność lub jej brak określonej technologii wytwarzania. W takim przypadku transfer danych można opisać o schemat przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat transferu danych w procesie szybkiego prototypowania

Analizując schemat transferu danych w odniesieniu do procesu prototypowania koła zębatego przekładni lotniczej, generalnie można wyróżnić dwie drogi przepływu danych. W pierwszym przypadku kiedy przedsiębiorstwo lub jednostka naukowa dysponuje technologią szybkiego prototypowania z grupy Rapid Manufacturing, która daje możliwość szybkiego wytwarzania gotowych wyrobów w procesie przyrostowym oraz dysponuje pełną gamą oprogramowania do modelowania 3D-CAD i obróbki danych, wytworzenie prototypu koła zębatego może być tu zrealizowane w ramach jednego działu. Inny schemat przepływu danych będzie realizowany jeżeli jednostka dysponuje tylko oprogramowaniem do modelowania 3D-CAD. W takim przypadku wytworzenie prototypu koła zębatego musi być zrealizowane jako zlecenie zewnętrzne. Odpowiedzialność za przygotowanie i obróbkę danych spoczywa na wszystkich podmiotach zaangażowanych w proces wytwarzania.

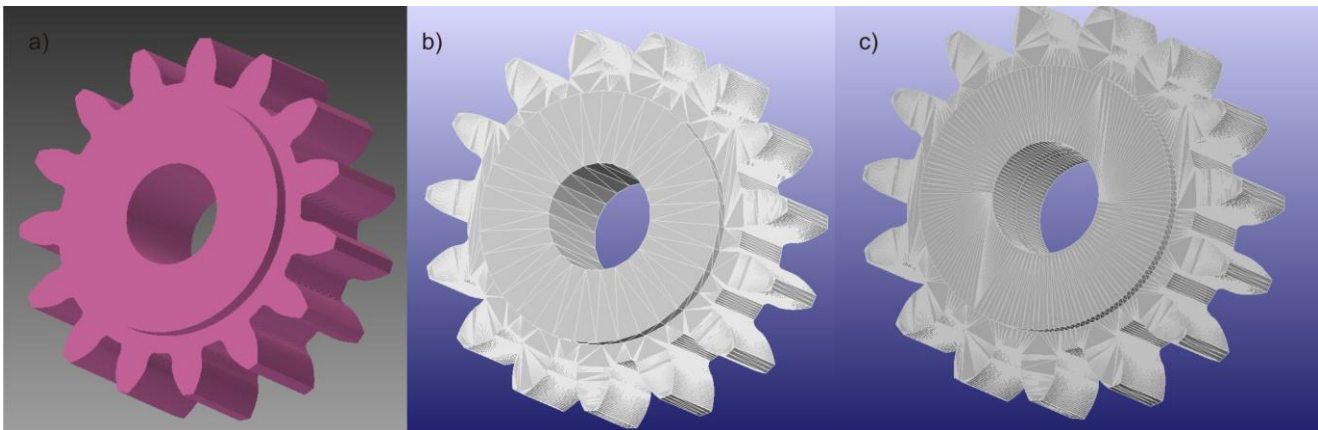
Transfer danych związany jest również z formą przesyłu informacji opartej o systemy sieciowe lub inne metody komunikacji np. jeżeli wymagana jest ciągła komunikacja komputera sterującego z maszyną wytwórczą.

Schemat transferu danych może być modyfikowany w zależności od dostępnego parku maszynowego, oprogramowania sposobów komunikacji czy wymiany danych między poszczególnymi elementami systemu wytwórczego.

### 3. PRZYGOTOWANIE MODEU KOŁA ZĘBATEGO W FORMACIE STL

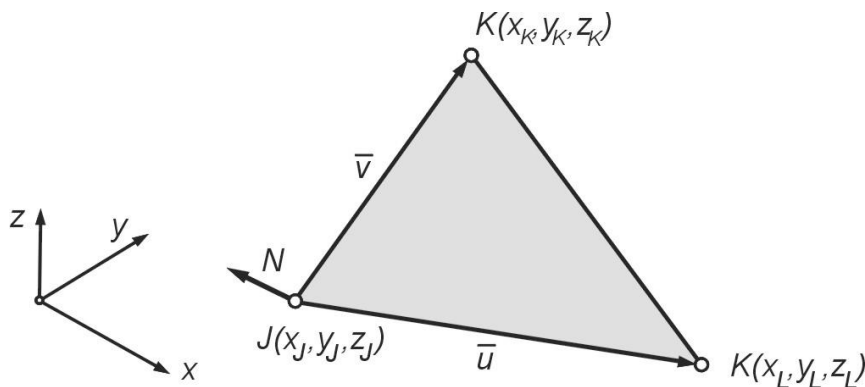
Określone formaty zapisu plików są rozwijane w sposób ciągły przez producentów urządzeń do szybkiego prototypowania. Największe zastosowanie ma format STL, zdecydowana większość programów CAD ma możliwość eksportu danych w tym formacie. Do programów tych należą m.in.: AutoCAD, CATIA, I-DEAS, IronCAD, ProE, Rhino, SolidDesigner, SolidEdge, SolidWorks, Think3, NX, 3D Studio Max. Eksport danych realizowany jest najczęściej przez komendy „zapisz jako” (STL), czasami komendą eksportu formatu STL, czy osobnym poleceniem (np. tessellation – CATIA).

W zależności od programu możliwe jest określenie dokładności odwzorowania modelu. Niektóre programy pozwalają na bardzo szczegółowe określenie parametrów pliku STL (np. Inventor – rys. 3). Podstawą do zapisu prawidłowej geometrii koła zębatego jest poprawny model 3D-CAD (rys. 3a). Modyfikacja geometrii w modelu STL możliwa jest przy wykorzystaniu dostępnych opcji programowych. Analizując siatki trójkątów opisujące bryłę koła zębatego (rys. 3b i 3c) można zauważyć graniastość powierzchni walcowej piasty koła (rys. 3b), która jest nieakceptowana w dalszych etapach procesu wytwarzania. Natomiast model STL przedstawiony na rysunku 3c może być poddany dalszej obróbce danych do uzyskania gotowego prototypu fizycznego.



**Rys. 3.** Przygotowanie danych modelu koła zębatego przekładni lotniczej w systemie Inventor: a) model CAD, b) model STL o niskiej dokładności, c) model STL o wysokiej dokładności

Wielkość i kształt trójkątów można regulować przez ustawienie odpowiednich parametrów eksportu danych w wyniku czego powstaje siatka złożona z trójkątów opisanych określonymi współrzędnymi (rys. 4). Dokładność aproksymacji zależy od kształtu powierzchni modelu [2-5]. Powierzchnie płaskie są całkowicie odwzorowywane przez trójkąty. Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowych powoduje powstanie tzw. błędu cięciwy, który występuje pomiędzy powierzchnią modelu a aproksymującą ją siatką trójkątów.



**Rys. 4.** Pojedyncza, płaska, trójkątna powierzchnia jednostkowa formatu STL [1]

Błąd mierzony jest w kierunku prostopadłym do płaszczyzny trójkąta, a jego wartość zależy od złożonych parametrów aproksymacji. Błąd cięciwy odpowiedzialny jest również za dokładność wykonania powierzchni wypukłych i wklęsłych o różnych promieniach krzywizny. Dokładność aproksymacji można opisać również kątem aproksymacji.

W przypadku prostych modeli geometrycznych generowany plik STL nie posiada dużej objętości. Rozmiar pliku znacznie się powiększa dla modeli o złożonych powierzchniach krzywoliniowych, jakimi są np. koła zębate.

Wykonanie dokładnych modeli kół zębatych RP wymaga zastosowania odpowiedniej tolerancji eksportu danych do formatu STL. Parametry teselacji określone są w systemach 3D-CAD za pomocą różnych algorytmów, które determinują dokładność odwzorowania. Są również odpowiedzialne za powstawanie błędów odwzorowania geometrii.

Podczas przetwarzania plików 3D-CAD do formatu STL mogą pojawić się błędy opisu geometrii. Błędy te wynikają z niedokładności przetwarzania modelu przez algorytmy teselacji w translatorach systemów CAD. Najczęściej pojawiają się następujące błędy modelu STL:

- odwrócenie wektorów normalnych,
- szczeliny i luki pomiędzy trójkątami opisującymi powierzchnię,
- zwichrowania powierzchni,
- zagubienia całych powierzchni lub ich fragmentów,
- pokrywające się trójkąty,
- przypisanie pojedynczej krawędzi do więcej niż jednego trójkąta.

Szczegółowy opis błędów odwzorowania w formacie STL zawarty jest w pracach [1-7].

## WNIOSKI

Proces obróbki i transferu danych w procesie szybkiego prototypowania przekładni lotniczej ma zasadnicze znaczenie dla wykonania prawidłowych prototypów z zastosowaniem metod przyrostowych. Pierwszym krokiem przygotowania danych jest opracowanie modelu 3D-CAD wytwarzanego prototypu. Modele 3D-CAD wykonywane są za pomocą systemów komputerowego wspomaganie projektowania mających możliwości tworzenia trójwymiarowych modeli. Zależnie od dostępnego i stosowanego oprogramowania oraz bazy urządzeń wytwórczych następują kolejne etapy transferu i przygotowania danych numerycznych.

Znaczna część oprogramowania urządzeń do szybkiego wytwarzania prototypów metodami przyrostowymi pozwala na odczyt danych geometrycznych modelu zapisanych w postaci pliku STL. Biorąc to pod uwagę bardzo istotne jest prawidłowe przygotowanie danych i ustalenie odpowiedniej dokładności geometrycznej eksportowanej geometrii.

Programy dedykowane do przyrostowych systemów szybkiego prototypowania mają procedury dzielenia trójwymiarowych modeli na warstwy oraz określania procesu budowy kolejnych warstw. Na tej podstawie wykonywany jest następnie prototyp fizyczny.

W przypadku wytwarzania prototypów kół zębatych przekładni lotniczej, niezależnie od zastosowanej metody szybkiego wytwarzania – Rapid Manufacturing, obróbka programowa i transfer danych ma zasadniczy wpływ na dokładność wymiarowo kształtową wytwarzanych prototypów.

## Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę procesu obróbki i transferu danych w procesie szybkiego prototypowania kół zębatych przekładni lotniczej.

W pierwszej części artykułu opisany jest ogólny schemat przepływu danych w procesie szybkiego prototypowania. Wykonywanie modeli kół zębatych jest zagadnieniem skomplikowanym. Modele 3D-CAD wykonywane są za pomocą specjalnych opcji generatorów i podprogramów z użyciem profesjonalnych programów komputerowego wspomaganie projektowania. Niezwykle istotne jest przygotowanie danych do kolejnych etapów przyrostowego procesu wytwarzania. Najczęściej używanym w procesach RP jest format STL, stąd przedstawiony został proces zapisu danych geometrycznych koła zębatego do tego formatu.

Opisane zostały również różne warianty transferu danych w zależności od dysponowania przez firmę czy jednostkę naukową określonych składowych mających wpływ na proces szybkiego prototypowania czyli oprogramowania CAD, oprogramowania RP oraz urządzeń RP.

**Słowa kluczowe:** Rapid Prototyping, koła zębate, transfer danych, obróbka danych

## The analysis of the data processing and data transfer in the process of rapid prototyping of aircraft gear

## Abstract

The article presents an analysis of the processing and transfer of data in the process of rapid prototyping

aircraft gear.

In the first part of the article describes the general scheme of the flow in the process of rapid prototyping. Making a model of gears is a complicated issue. 3D CAD models are made with special options generators and routines with professional computer-aided design programs. It is essential for preparing data for subsequent incremental steps of the manufacturing process. The most commonly used in the process of RP is the STL format, so the recording process is presented gear geometric data format.

Were also described variants of data transfer, depending on the disposition by the company or research unit specific components that affect the process of rapid prototyping like: CAD software, RP software and RP machines.

**Keywords:** Rapid Prototyping, gear, data transfer, data processing

## ACKNOWLEDGEMENT

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme - Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund - Project "Modern material technologies in aerospace industry", No POIG.0101.02-00-015/08 is gratefully acknowledged.

## BIBLIOGRAFIA

1. Budzik G.: *Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
2. Budzik G.: *Szybkie wytwarzanie prototypów z tytanu*, Stal Metale & Nowe Technologie, nr 7-8/2011.
3. Budzik G.: *Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
4. Budzik G., Kozik B., Pacana J., Żmuda B.: *Modelling and prototyping of aeronautical planetary gear demonstrator*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 17, No 3 2010, s. 49-54.
5. Cader M., Budzik G., Zboiński M.: *Technologie wytwarzania przyrostowego w praktyce*. MECHANIK, z. 8-9s.762-767, 2013.
6. Choi S. H., Samavedam S.: *Modeling and optimization of Rapid Prototyping*, Computers in Industry Nr 47/2002.
7. Jaskólski J., Sobolak M., Budzik G.: *Rapid prototyping using in models building of engine elements*, Journal of KONES Internal Combustion Engines, Warszawa 2004.
8. Kochan D., Chua C.K.: *State of the art and future trends in rapid prototyping and manufacturing*. International Journal of Information Technology, No 1/1995.
9. Lee, K.; Woo, H.: *Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping*, Computers & Industrial Engineering No 38/2000, Pergamon, s. 21-38
10. Liou W.: *Rapid Prototyping and engineering applications – a toolbox for prototype development*, Taylor & Francis Group, 2008.
11. Sobolak M., Budzik G.: *Prototypowanie kół zębatych z wykorzystaniem stereolitografii i odlewania próżniowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 217, Koła Zębate 2004, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004, s. 264-270