

Płocica Mieczysław, dr inż.
tel. 17 865 13 18
e-mail: mplocica@prz.edu.pl

INŻYNIERIA ODWROTNA W PROCESIE DYDAKTYCZNYM STUDIÓW WYŻSZYCH NA PRZYKŁADZIE SAMOCHODU MIKRUS MR-300

Streszczenie: W artykule opisano metodykę prowadzenia prac inżynierskich i magisterskich, dotyczących inżynierii odwrotnej. Przedstawiono możliwości rekonstrukcji geometrii różnych elementów maszyn z wykorzystaniem oprogramowania CAD.

Słowa kluczowe: inżynieria odwrotna, rekonstrukcja geometrii

REVERSE ENGINEERING IN THE TEACHING PROCESS IN THE TECHNICAL UNIVERSITY FOR EXAMPLE MIKRUS MR-300 CAR

Summary: This paper describes the methodology of leading of engineering and master's thesis, dedicated reverse engineering. There are shown the possibilities of reconstructing the geometry of various machine parts using CAD software.

Keywords: reverse engineering, geometry reconstruction

1. WPROWADZENIE

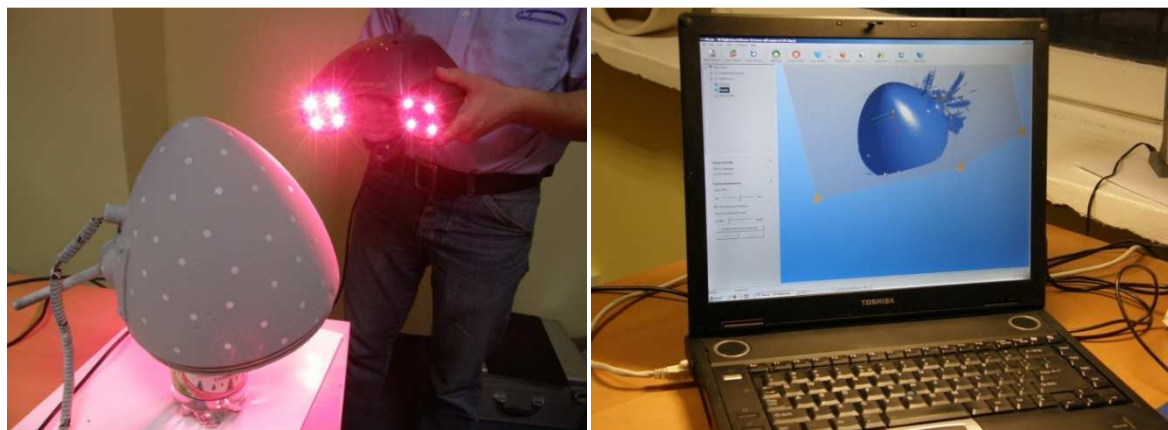
Inżynieria odwrotna (ang. *reverse engineering*) jest procesem o charakterze rekonstrukcyjnym, polegającym na uzyskaniu trójwymiarowego modelu wirtualnego obiektu fizycznego.

Trójwymiarowy model wirtualny można uzyskać na podstawie danych z:

- tradycyjnych pomiarów inżynierskich (suwmiarka, wysokościomierz itp.)
- skanowania przestrzennego.

Uzyskany model pozwala na:

- odtworzenie zniszczonych lub zużytych części
- zbudowanie repliki części, zespołu lub nawet pojazdu
- odtworzenie dokumentacji technicznej
- opracowanie technologii wytworzenia.



Rys. 1.1 Przykład pobierania danych w procesie inżynierii odwrotnej – skanowanie klosza reflektora i efekt w postaci chmury punktów (po prawej)

W związku z ideą utworzenia Wirtualnego Muzeum Polskiej Myśli Technicznej, zainicjowaną przez Stowarzyszenie ProCAX, w Politechnice Rzeszowskiej są realizowane prace dyplomowe, których celem jest opracowanie cyfrowych modeli zabytkowych pojazdów, stanowiących historyczny polski dorobek motoryzacyjny. Aktualnie najbardziej zaawansowany jest model samochodu Mikrus MR-300, produkowanego w latach 1957-1960 przez WSK Mielec. Geometria podzespołów i elementów pojazdu jest odtwarzana w oparciu o istniejące, dostępne części, oraz fragmenty zachowanej dokumentacji technicznej. Z uwagi na zły stan oryginalnych rysunków, są one najczęściej pomocne tylko w charakterze poglądowym.



Rys. 1.2 Samochody Mikrus MR-300

Zakres realizowanych prac obejmuje następujące zagadnienia:

1. Ocena stanu zachowania elementów rekonstruowanego obiektu (elementu maszynowego). Identyfikacja uszkodzeń oraz rodzajów i stopnia zużycia poszczególnych powierzchni.
2. Określenie powierzchni szczególnie istotnych dla odtworzenia właściwości funkcjonalnych obiektu. Wskazanie fragmentów powierzchni i krawędzi oraz punktów przedmiotu, które zachowały pierwotną geometrię (kształt, położenie) i zmierzone, mogą stanowić odniesienie dla rekonstrukcji uszkodzonych fragmentów.
3. Opracowanie metodyki pomiarów i wybór metod pomiarowych. Wykonanie pomiarów z użyciem narzędzi klasycznych lub metod współrzędnościowych (skanowanie 3D, pomiary na współrzędnościowej maszynie pomiarowej).
4. Opracowanie koncepcji budowy modelu CAD w oparciu o dane z pomiarów.
5. Wykonanie modelu 3D.
6. Stworzenie dokumentacji wykonawczej 2D.

2. ODTWORZENIE DOKUMENTACJI TECHNICZNEJ WYBRANYCH ELEMENTÓW BLOKU NAPĘDOWEGO

Celem pracy była identyfikacja geometrii i wykonanie dokumentacji wybranych elementów bloku napędowego Mi-10A, produkowanego przez WSK Rzeszów do samochodu Mikrus. Elementy wybrano tak, aby reprezentowały różnorodne rodzaje

powierzchni, co wiąże się z każdorazową koniecznością definiowania kolejności pomiarów i doboru odpowiedniej metody pomiarowej. Odtwarzanie dokumentacji rozpoczęto od elementu najprostszego geometrycznie (w tym przypadku wał korbowy), przechodząc dalej do części o coraz większym stopniu skomplikowania (głowica, cylinder, półkartery). Modelowanie 3D i tworzenie dokumentacji konstrukcyjnej zrealizowano z użyciem systemu CATIA.

2.1 Planowanie i wykonanie pomiarów geometrii elementu na przykładzie głowicy silnika

Przystępując do odtworzenia geometrii i opracowania modelu głowicy, ustalono następującą kolejność pomiarów:

- ✓ pomiar komory spalania (promienia odcinka kuli oraz średnicy połączonego z wycinkiem stożka, wysokości komory spalania, średnica otworu pod tuleję mocującą świecę, grubości ścianki komory spalania),
- ✓ pomiar otworów pod szpilki (średnica otworów, kąt i średnica rozstawu),
- ✓ pomiar nabeł,
- ✓ pomiar dolnego żebra (szerokości, długości, promieni zaokrągleń),
- ✓ pomiar pozostałych 13 żeber (wysokości, szerokości, promieni zaokrągleń),
- ✓ pomiar otworów umożliwiających montowanie śrub oraz świecy (szerokości oraz średnicy, zbieżności odlewniczych),
- ✓ pomiar zbieżności odlewniczych żeber,
- ✓ pomiar otworu służącego do montowania pokrywy ukierunkowującej przepływ powietrza.

Wyniki pomiarów, na bazie których przystąpiono do modelowania 3D głowicy przedstawiono w tab. 2.1.



Rys. 2.1 Głowica silnika Mi-10A

Proces tworzenia modelu jest zbliżony do kolejności pomiarów głowicy z tą różnicą, że na początku wykonano model głowicy w postaci pełnej bryły z wykorzystaniem modułu Part Design. Następnie model powierzchniowy odzwierciedlający promienie zaokrągleń żeber u podstawy oraz wysokość żeber pionowych, wykonany w module Generative Shape Design, posłużył jako powierzchnia tnąca, która nadała modelowanej bryle wymagany kształt. Narzędzia z tego modułu w prosty sposób umożliwiają wykonanie powierzchni ograniczającej żebra, co było utrudnione w sa-

mym module do tworzenia brył. W późniejszym etapie z użyciem narzędzi z modułu Part Design zostały wykonane otwory pod szpilki, komora spalania, jak również zostały zamodelowane zbieżności odlewnicze żeber.

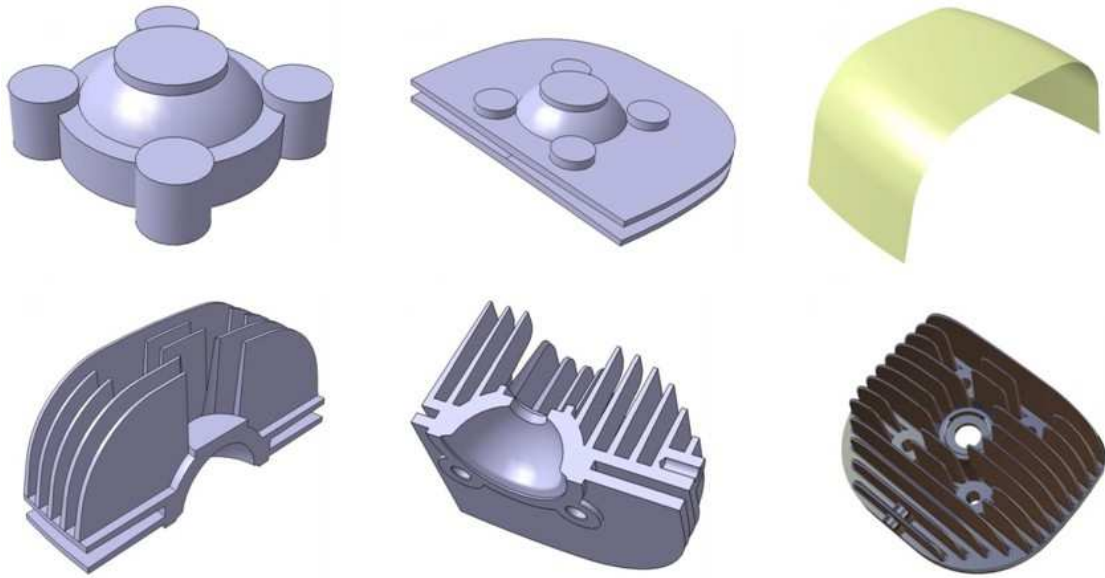
Tab. 2.1 Zestawienie wymiarów głowicy

Nazwa szczegółu	Wymiar [mm]		
Wymiary gabarytowe głowicy (max): - szerokość, długość, wysokość	160	120	70,5
Komora spalania: - promień kuli - średnica stożka - wysokość komory spalania - grubość ścianki nad komorą spalania - gwint wewnętrzny pod wkręcaną tuleję		R 25 Ø 58 23,5 8 M 20	
Otwory pod szpilki: - średnica otworów - średnica rozstawu - kąt rozstawu		Ø 9 Ø 79 45°	
Zbieżność, grubość oraz rozstaw żeber: - poziomych - pionowych	1,4 °	5	9
	1 °	3,3	9,3
Średnica nab	Ø 22		
Gwint wewnętrzny otworu mocującego pokrywę ukierunkowującą przepływ powietrza	M 6		
Fragment uszczelniający głowicę z cylindrem: - wysokość - średnica		2,5 Ø 79	
Promienie zaokrągleń żeber: - poziomych - pionowych		R 300, R 60, R 5 R 300, R 12, R 20...R 45 (rosnący o 5)	
Promienie odlewnicze	2		

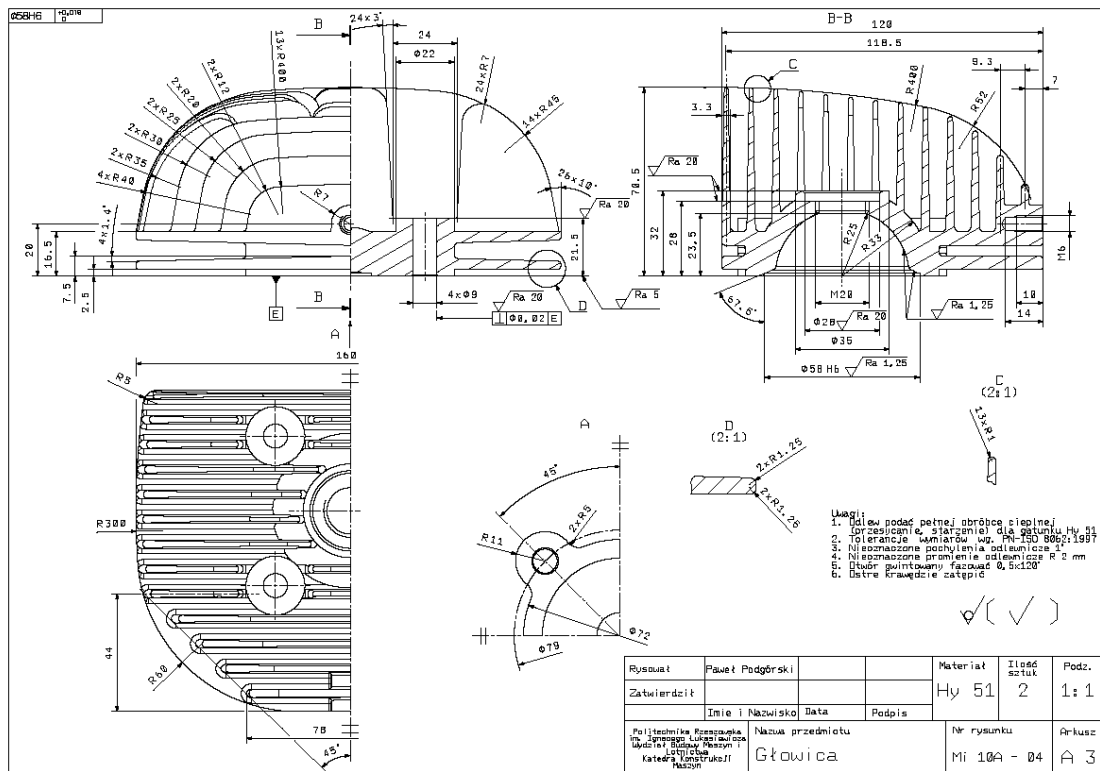
Kolejność tworzenia modelu głowicy można podzielić na następujące procesy:

- ✓ wykonanie komory spalania z uwzględnieniem elementów przeznaczonych do mocowania szpilek,
- ✓ zamodelowanie dwóch żeber u podstawy z uwzględnieniem promieni zaokrągleń i zbieżności odlewniczych,
- ✓ uzupełnienie modelu w żebra pionowe,
- ✓ wykonanie modelu powierzchniowego odzwierciedlającego kształt obrysu żeber pionowych oraz promienie zaokrągleń żeber poziomych,
- ✓ usunięcie z modelu bryłowego nadmiaru żeber względem płaszczyzny,
- ✓ wycięcie komory spalania oraz fragmentów w uźebrowaniu ułatwiających montowanie świecy i nakrętek na szpilkach,

- ✓ wykonanie otworów pod szpilki, wkręcanej tulei przeznaczonej do mocowania świecy oraz naby wraz z otworem gwintowanym wykorzystywanym do montowania pokrywy,
- ✓ uzupełnienie modelowanego cylindra w promienie odlewnicze, fazowania oraz nadanie cech materiałowych.



Rys. 2.2 Etapy kształtowania modelu CAD



Rys. 2.3 Rysunek wykonawczy głowicy

Według tej samej metodyki odtworzono dokumentację cylindra oraz układu korbowo-tłokowego (w tym drugim przypadku wykonano dodatkowo złożenie 3D).

2.2 Model górnego półkarteru silnika

Blok napędowy Mi-10A ma budowę typu motocyklowego. Dwa półkartery, górny (rys. 2.4) i dolny, mieszczą w sobie układ korbowo-tłokowy i mechanizmy przeniesienia napędu (sprzęgło, skrzynię biegów i przekładnię główną z mechanizmem różnicowym). Odtworzenie skomplikowanej geometrii półkarterów wymagało użycia następującego zestawu narzędzi pomiarowych:

- głębokościomierz elektroniczny,
- centrówka,
- średnicówka,
- sprawdziany gwintów,
- kątomierz optyczny,
- promieniomierze,
- macak nożycowy (do pomiarów grubości ścianek odlewów),
- suwmiarka.



Rys. 2.4 Widok ogólny górnego półkarteru silnika Mi-10A

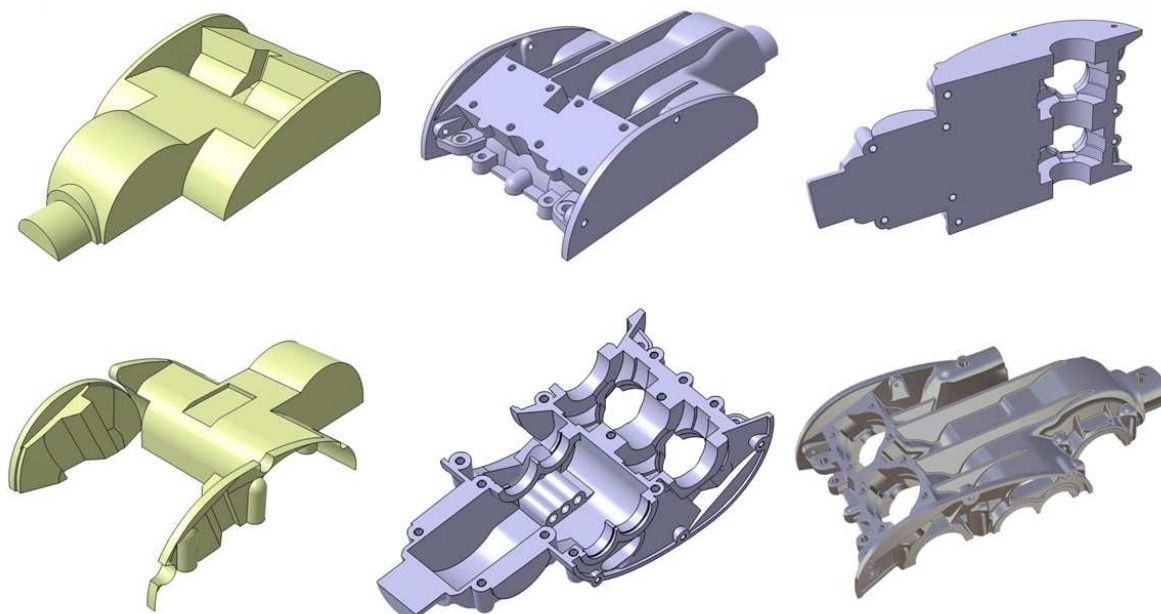
Do wykonania modelu (półkarter górny) niezbędne było wykonanie pomiarów, w kolejności:

- ✓ wymiarów liniowych,
- ✓ wysokości nab i żeber,
- ✓ rozstawu otworów gwintowanych mocujących kartery, pokrywy boczne i cylindry,
- ✓ rozstawu podtoczeń,
- ✓ kąta pochylenia układu cylinder-tłok,
- ✓ grubości panewek łożyskowania,
- ✓ grubości ścianek karterów oraz żeber,
- ✓ rozstawu osi,
- ✓ promieni odlewniczych przejść półkarterów,
- ✓ promieni przejść pokryw bocznych,
- ✓ zbieżności odlewniczych.

Model półkarteru utworzono techniką modelowania hybrydowego w następujących etapach:

- ✓ wykonanie modelu powierzchniowego odzwierciedlającego kształty zewnętrzne i przekształcenie go w model bryłowy,
- ✓ zamodelowanie głównych promieni przejść ścianek oraz żeber zewnętrznych,

- ✓ wycięcie powierzchni przeznaczonej do montażu cylindrów wraz z otworami gwintowanymi pod szpilki,
- ✓ utworzenie zewnętrznych elementów służących do mocowania pokryw bocznych oraz łączenia obydwu elementów korpusu,
- ✓ wykonanie panewek pod łożyska układu różnicowego,
- ✓ dodanie nab z otworami gwintowanymi,
- ✓ wycięcie w bryle miejsc pod osadzenie wału korbowego, otworów pod tłok wraz z kanałami przepływającymi ,
- ✓ wykonanie modelu powierzchniowego, odzwierciedlającego wnętrze półkarteru,
- ✓ wycięcie wnętrza bryły,
- ✓ uzupełnienie modelu w kolejne otwory gwintowane nab,
- ✓ dodanie powierzchni walcowych w miejscach panewek wału korbowego wraz ze zbieżnościami odlewniczymi,
- ✓ uzupełnienie powierzchni walcowych pod łożyska przekładni głównej,
- ✓ wykonanie uchwytu mocującego półkarter do ramy oraz otworów gwintowanych mocujących pokrywę wkładane pod łożyska wału korbowego,
- ✓ utworzenie żeber wzmacniających panewki wału korbowego oraz uzupełnienie wewnętrznych nab w zbieżności odlewnicze,
- ✓ uzupełnienie bryły w część brakujących promieni odlewniczych po stronach montażu pokryw półkarterów,
- ✓ dodanie żebra w skrzyni biegów oraz zamodelowanie brakujących promieni odlewniczych i otworów gwintowanych,
- ✓ utworzenie żeber wzmacniających powierzchnie walcowe mocowania przekładni głównej,
- ✓ uzupełnienie bryły w brakujące podtoczenia i otwory gwintowane,
- ✓ ukończenie bryły, wykonanie brakujących promieni i zbieżności odlewniczych oraz fazowań,
- ✓ nadanie cech materiałowych.
- ✓



Rys. 2.5 Etapy modelowania górnego półkarteru



Rys. 2.6 Wykonanie złożenia. U góry po lewej fizyczny egzemplarz silnika, wykorzystany do pomiarów

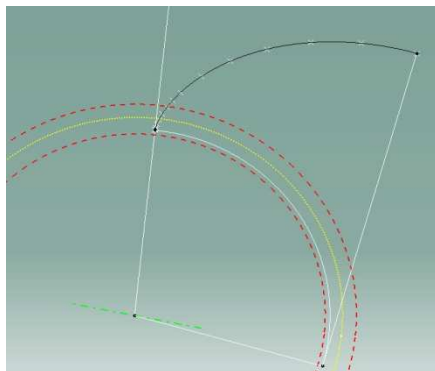
3. ODTWORZENIE DOKUMENTACJI KONSTRUKCYJNEJ SKRZYNI BIEGÓW

Podstawę do wykonania modeli 3D i dokumentacji płaskiej stanowiły elementy skrzyni biegów, pokazane na rys. 3.1.



Rys. 3.1 Elementy skrzyni biegów

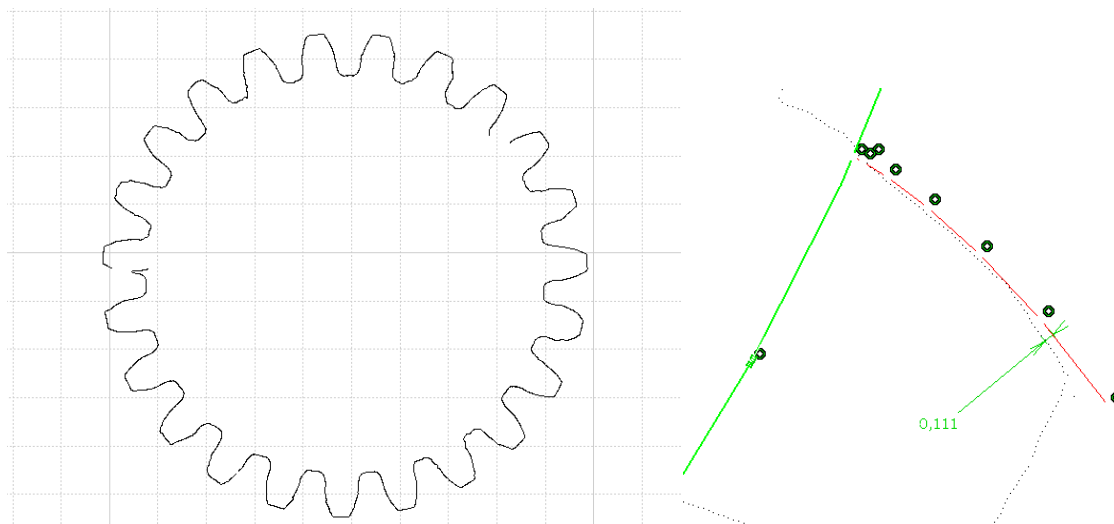
Ocena stanu kół zębatych wykazała typowe ślady zużycia powierzchni bocznych zębów oraz uszkodzenia takie jak złamanie zęba u podstawy i wgłębienia pittingowe. Ograniczało to liczbę pierwotnych cech geometrycznych, jakie zostały zachowane oraz wymagało uzupełnienia geometrii uzyskanej z pomiarów o obliczenia według klasycznej metodyki projektowania kół zębatych. Modelując uzębienia w środowisku CATIA zdecydowano się na odtworzenie rzeczywistej geometrii ewolwent (rys. 3.2).



Rys. 3.3 Odwijanie ewolwenty w programie CATIA

Innym sposobem jest pomiar zarysu kół za pomocą profilometru i dopasowanie geometrii obliczeniowej do zmierzonych wymiarów (dotyczy to wymiarów zarysu, które nie są zniekształcone przez zużycie). W analizowanym przypadku pomiary wykonano profilometrem BATY, co pozwoliło na otrzymanie punktów zarysu co 0,02 mm (rys. 3.4). Punkty te zostały użyte do porównania z krzywą ewolwentową, odwiniętą z obliczonego koła zasadniczego.

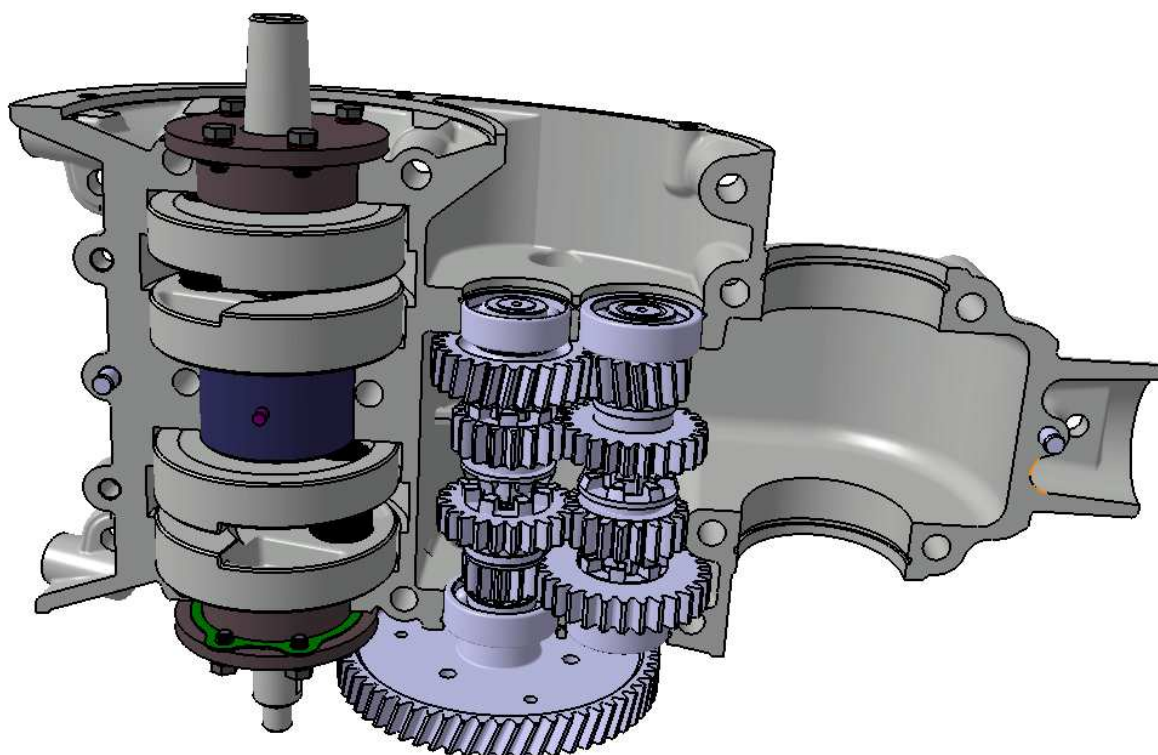
Kompletny model skrzyni biegów została dołączona do istniejącego już modelu bloku napędowego.



Rys. 3.4 Wynik pomiaru zarysu profilometrem oraz porównanie krzywizny ewolwenty ze zmierzonym zarysem

Niezależnie od sposobu pomiaru, należy mieć na uwadze, że modelując koła zębate w programach inżynierskich przez odwijanie ewolwenty jesteśmy w stanie ustalić jedynie teoretyczną lub przybliżoną geometrię uzębień, a otrzymany model 3D

można wykorzystać głównie do celów demonstracyjnych działania podzespołu. Dla wykonania fizycznej repliki skrzyni najwygodniej jest, po ustaleniu podstawowych parametrów uzębienia i zazębienia, zaprojektować koła zębate od nowa.

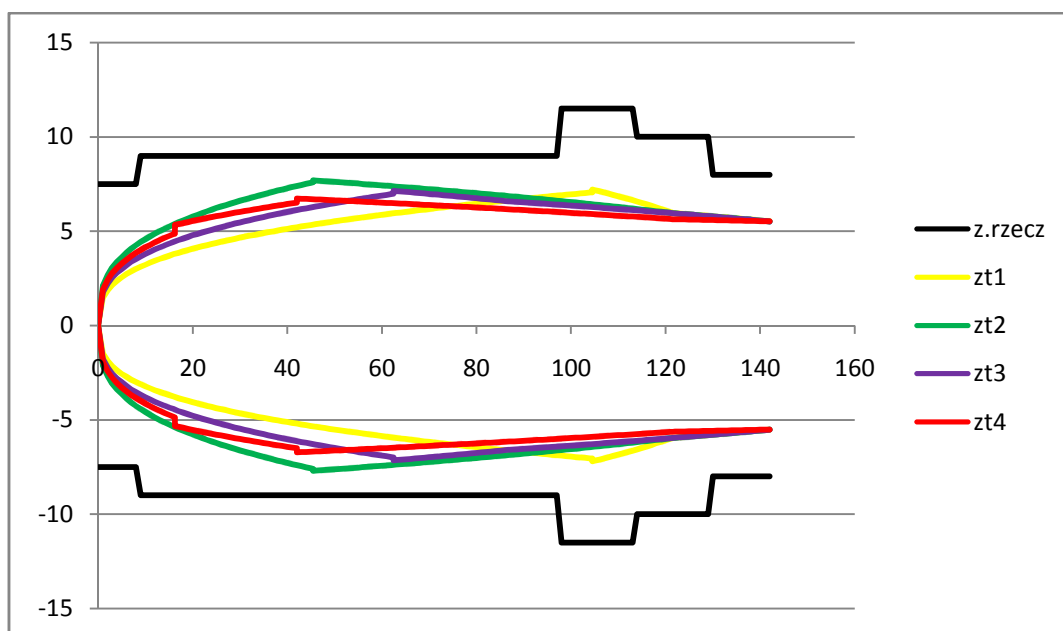


Rys. 3.5 Model skrzyni biegów w złożeniu z pozostałymi elementami bloku napędowego

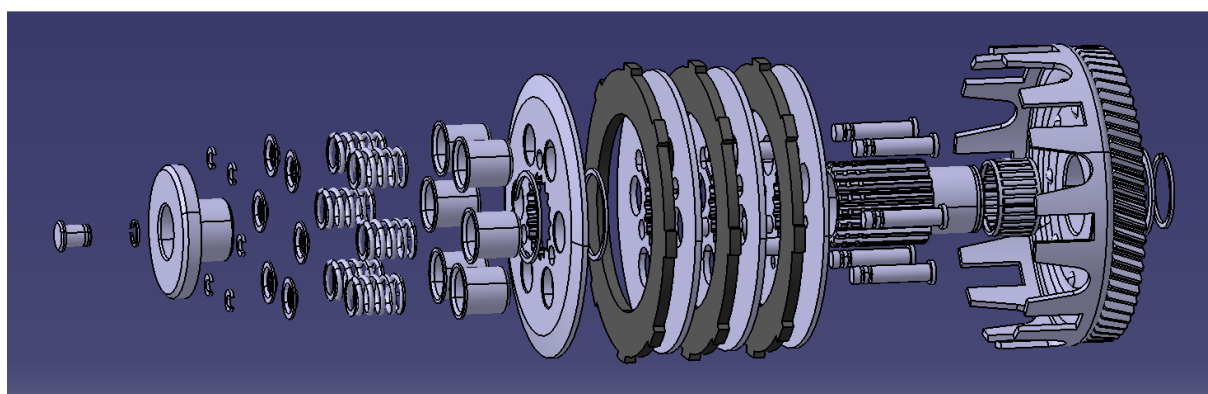
4. MODERNIZACJA ISTNIEJĄCEGO ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNEGO

W oparciu o częściowo odtworzony model bloku napędowego można dokonać modernizacji jednego z jego podzespołów, przyjmując jako ograniczenie, niewprowadzanie zmian konstrukcyjnych w pozostałych elementach. Rekonstruując układ napędowy Mikrusa zdecydowano się na obliczenie nowego sprzęgła, które dodatkowo przeniesiono z wału silnika na wałek pośredni. Przestanką do takiego działania były stwierdzone przez Instytut Transportu Samochodowego niedomagania zespołu sprzęgła, skutkujące awaryjnymi uszkodzeniami tarcz.

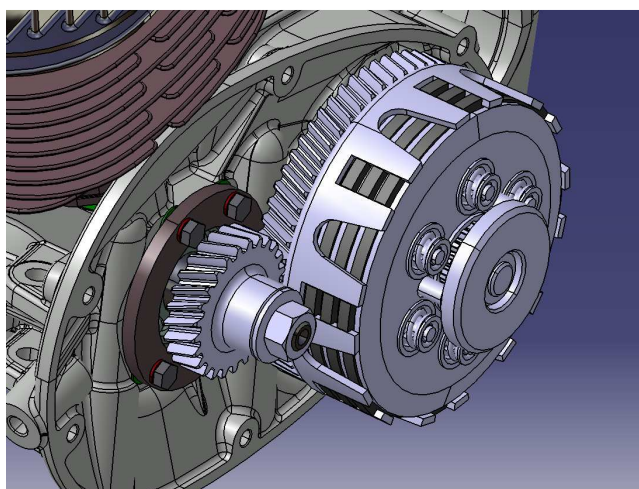
Modernizacja wymaga opracowania koncepcji nowego rozwiązania oraz wykonania obliczeń konstrukcyjnych. Zakres pracy obejmował analizę wytrzymałości statycznej. W rozpatrywanym przypadku wykazano, że zmiana konstrukcji sprzęgła może być wykonana bez ingerencji w geometrię wału korbowego i wałka pośredniego (rys. 4.1).



Rys. 4.1 Średnice teoretyczne wałka pośredniego skrzyni biegów przy załączonych poszczególnych biegach dla zmodernizowanego zespołu sprzęgła. Kolorem czarnym zaznaczono zarys wałka pośredniego w rozwiązaniu przed modernizacją



Rys. 4.2 Model zespołu sprzęgła w rysunku eksplodującym

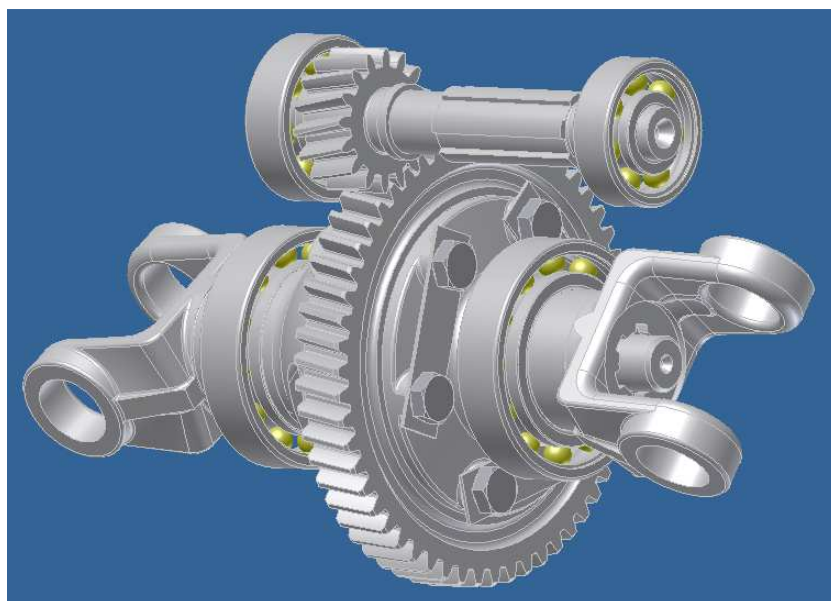


Rys. 4.3 Zmodernizowane sprzęgło w złożeniu

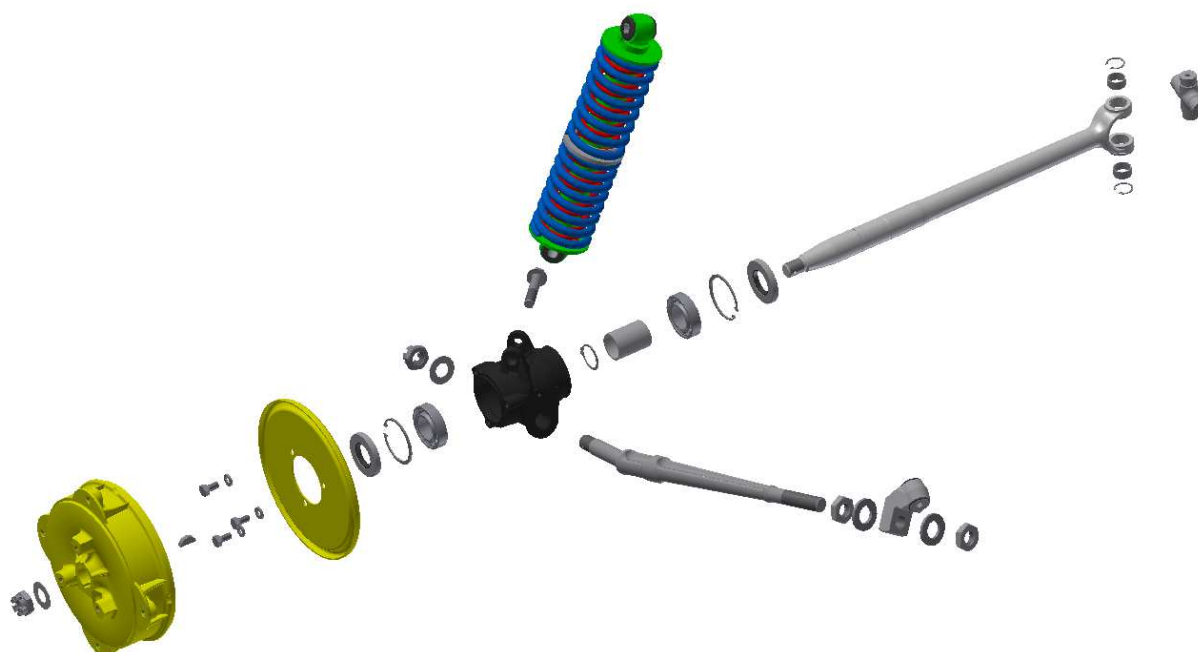
5. INNE PRACE

Kolejne prace dyplomowe dotyczyły odtworzenia przekładni głównej z mechanizmem różnicowym (rys. 5.1) oraz zawieszenia tylnego (rys. 5.2). W przypadku pierwszej z prac skupiono się na zagadnieniu odtwarzania geometrii kół stożkowych. Dodatkowym zadaniem, dotyczącym modelowania zawieszenia, była obliczeniowa weryfikacja sprężyn. Obydwie prace wykonano z użyciem programu Inventor.

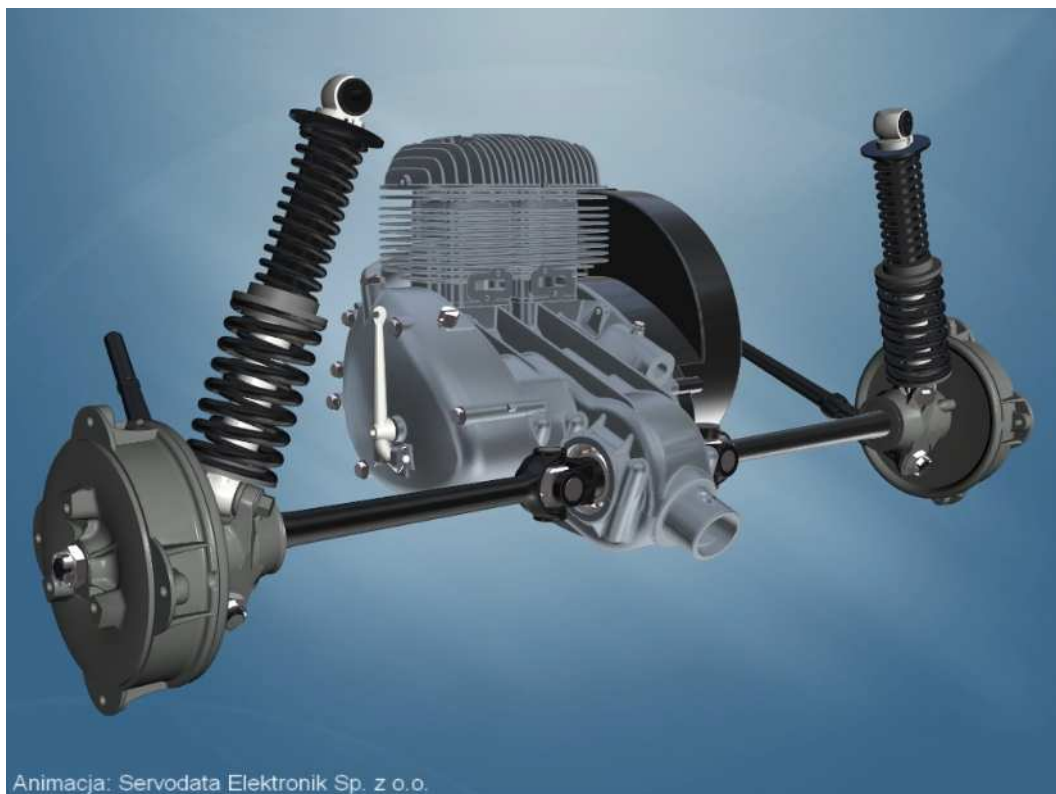
Złożenie wszystkich modeli komponentów pokazuje animacja, demonstrująca działanie zespołu (rys. 5.3, 5.4).



Rys. 5.1 Złożenie zespołu przekładni głównej



Rys. 5.2 Rysunek eksplodujący zawieszenia tylnego



Rys. 5.3 Zrzut ekranowy z animacji, przygotowanej przez firmę Servodata Elektronik sp. z o. o.



Rys. 5.4 Model układu napędowego Mikrusa w częściowym rozłożeniu

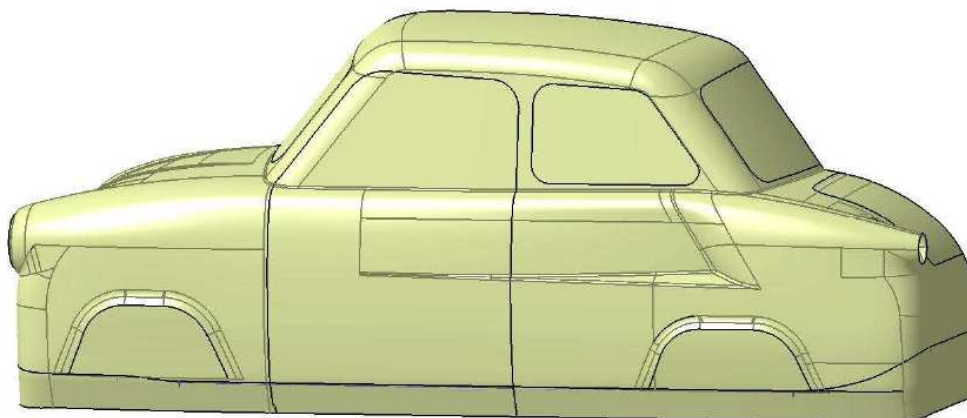
6. PODSUMOWANIE

Bezpośrednim efektem każdej z prac dyplomowych jest odtworzona dokumentacja płaska modelowanych elementów układu napędowego. Na jej podstawie można wykonać fizyczne repliki części. Model złożenia 3D można ponadto wykorzystać w celach edukacyjnych lub do wykonania replik części metodami Rapid Prototyping.

Podczas realizacji prac studenci mieli możliwość praktycznego przećwiczenia następujących zagadnień, związanych z działalnością inżynierską:

- umiejętność planowania działań inżynierskich (projektowanie, modelowanie 3D, pomiary),
- poznanie różnorodnych technik pobierania danych o geometrii obiektu fizycznego i umiejętność ich stosowania,
- umiejętność rozwiązywania problemów w przypadku niewystarczającej ilości danych o obiekcie,
- doskonalenie umiejętności modelowania bryłowego i tworzenia złożeń,
- praktyczne ćwiczenie umiejętności w zakresie modelowania CAD na niestandardowych przykładach, poznanie modelowania hybrydowego,
- doskonalenie umiejętności projektowania inżynierskiego i tworzenia dokumentacji technicznej.

Projekt „wirtualnego Mikrusa” jest kontynuowany. Aktualnie odtwarzane jest nadwozie (przy współudziale studentów Wojskowej Akademii Technicznej) oraz płyta nośna.



Rys. 6.1 Wstępna rekonstrukcja bryły nadwozia

7. LITERATURA

- [1] Płocica M., Winiarski B.: *Mikrus MR-300. 3 lata produkcji, 50 lat historii*. Wyd. PIWI, Kraków 2011.
Prace dyplomowe:
- [2] Augustyn Mateusz: *Rekonstrukcja geometrii zespołu przekładni głównej bloku napędowego Mi-10 do samochodu Mikrus MR-300*. Praca dyplomowa inżynierska. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2013.
- [3] Borowiec Marcin: *Rekonstrukcja dokumentacji wykonawczej zawieszenia tylnego samochodu Mikrus MR-300*. Praca dyplomowa inżynierska. Promotor: dr inż.

- Mieczysław Płocica, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2013.
- [4] Głuchowski Marek: *Odtworzenie dokumentacji konstrukcyjnej skrzyni biegów bloku napędowego Mi10*. Praca dyplomowa magisterska. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2012.
 - [5] Pleśniak Mateusz: *Rekonstrukcja geometrii uzębienia skrzyni biegów samochodu Mikrus MR-300*. Praca dyplomowa magisterska. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica. Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2011.
 - [6] Podgórski Paweł: *Odtwarzanie dokumentacji konstrukcyjnej złożonych obiektów technicznych na przykładzie samochodowego zespołu napędowego*. Praca dyplomowa magisterska. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica. Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2009.
 - [7] Puszczarz Krzysztof: *Projekt modernizacji bloku napędowego Mi10 samochodu Mikrus MR-300*. Praca dyplomowa inżynierska. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica. Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2012.
 - [8] Wronowski Tomasz: *Projekt nadwozia z tworzyw sztucznych do samochodu Mikrus MR-300*. Praca dyplomowa magisterska. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica. Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, 2010.