

**I Krajowa Konferencja Naukowa**  
**Szybkie prototypowanie**  
**Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary**  
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA  
RAPIDROM

## Zastosowanie inżynierii odwrotnej w procesie odtwarzania kół zębatach

### Reverse engineering in the recovering in the reconstruction of the gears

MAŁGORZATA ZABORNIAK  
 IWONA TOFIL-KOZDRA\*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.586

Artykuł przedstawia metodykę odtwarzania koła zębatego wchodzącego w skład zespołu pompy zębatej. Modelem badawczym była walcowa przekładnia zębata o zazębieniu zewnętrznym wraz z połową korpusu. Proces odtwarzania geometrii przeprowadzono dla obu kół zębatach, ponieważ współpracujące koła w przekładniach wymienia się parami, w celu równomiernego zużywania się, docierania i płynnej współpracy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szybkie prototypowanie, systemy CAD

*The article presents the methodology of recovering the geometry reconstruction of the damaged gear forming part of the gear of gear pump. Research model was a helical gear drive with external gear along with half of the body. The recovery process was performed for both the geometry of the gears since the cooperating gear wheels are exchanged in pairs, in order to equalize wear, lapping and seamless integration*

**KEYWORDS:** rapid prototyping, systems CAD

#### 1. Wprowadzenie

Nowoczesne metody projektowania i wytwarzania kół zębatach opierają się na komputerowych systemach wspomagania prac inżynierskich. W procesie projektowania, wytwarzania i analizy geometrycznej kół zębatach powszechnie znajdują zastosowanie systemy CAD (systemy komputerowego wspomagania projektowania) oraz RP (przyrostowe techniki wytwarzania). Zastosowanie technik RP pozwala wykonywać modele odlewnicze czy prototypy o różnym stopniu zaawansowania np. model koncepcyjny, geometryczny, konstrukcyjny, technologiczny, funkcjonalny

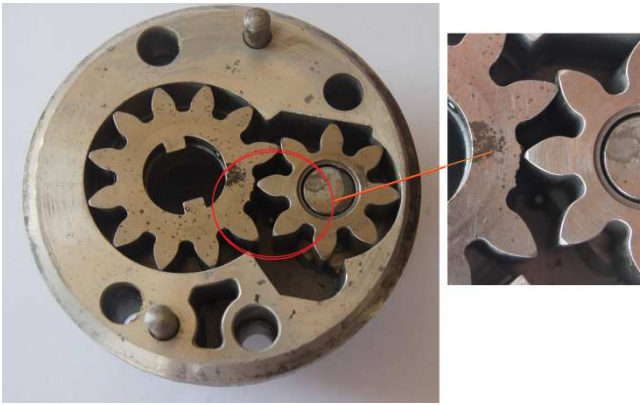
czy techniczny [1].

Inżynieria, w tradycyjnym znaczeniu tego słowa, oznacza przekształcenie koncepcji w obiekt materialny z zastosowaniem metod projektowych i wytwórczych, często wspomaganym komputerowo. Proces odtwarzania kół zębatach jest to procesem wieloetapowym, który pozwala na odtworzenie istniejących obiektów. Zostaje odtworzony przestrzenny cyfrowy obraz koła i przekazany do zastosowania w projekcie (modelu 3D-CAD) i procesie wytwarzania.

Zagadnienie odtwarzania kół zębatach dotyczy zużytych, zdekompletowanych, bądź zniszczonych kół przekładni. Odtwarzanie szczególnie istotnych części maszyn odbywa się w obliczu braku oryginalnej dokumentacji. Problem dotyczy kół zębatach będących częściami zamiennymi w maszynach i urządzeniach, gdzie producent danego urządzenia albo już nie istnieje, albo na danym rynku ponoszone są zbyt duże koszty serwisowania tych urządzeń. Istotne jest nie tylko odtwarzanie fizyczne takich przekładni, ale przy tym archiwizacja danych na poszczególnych etapach odtwarzania.

Odtworzenie dokładnego numerycznego modelu koła zębatego jest zadaniem złożonym. Mimo, że modelowanie geometrii uzębienia przekładni walcowych jest opisywane w licznych opracowaniach [4], to jednak uwzględnienie wszystkich uwarunkowań może znacząco skomplikować proces opracowania geometrii uzębienia. W artykule przedstawiono prace związane z modelowaniem geometrii przekładni zębatach oraz wykonano modele numeryczne 3D-CAD, a następnie wykonano prototyp badawczy przekładni zębatach. Artykuł przedstawia metodykę odtwarzania geometrii uszkodzonego koła zębatego wchodzącego w skład zespołu pompy zębatach.

\* dr inż. Małgorzata Zaborniak (mzab@prz.edu.pl)  
 mgr inż. Iwona Tofil-Kozdra (i.tofil-kozdra@wp.pl)



Rys. 1. Model badawczy walcowej przekładni zębata o zazębieniu zewnętrznym wraz z połową korpusu

Modelem badawczym była walcowa przekładnia zębata o zazębieniu zewnętrznym wraz z połową korpusu (rys.1). Proces odtwarzania geometrii przeprowadzono dla obu kół zębatach, ponieważ współpracujące koła w przekładniach wymienia się parami, w celu równomiernego zużywania się, docierania i płynnej współpracy. Ponadto odtwarzanie geometrii uzębienia pojedynczego koła zębatego w praktyce przemysłowej (przy braku dostępu do dokumentacji technicznej) nie wykonuje się. Powodem jest brak możliwości ustalenia faktycznej geometrii, wykonanej na podstawie oryginalnych obliczeń. W replice takiego koła zębatego pewne dane nie są w pełni identyfikowane np. współczynnik przesunięcia zarysu. Stąd temat pozornie prosty, z uwzględnieniem powyższych wymagań, staje się zagadnieniem o wiele bardziej złożonym i wymaga głębszego przygotowania teoretycznego.

Zaproponowano główne etapy metodycznego podejścia do odtworzenia kół zębatach:

1. Analiza oraz ocena stanu zużycia. Identyfikacja uszkodzeń oraz rodzaju i stopnia zużycia poszczególnych powierzchni. Określenie powierzchni szczególnie istotnych dla odtworzenia właściwości funkcjonalnych przekładni. Wskazanie fragmentów powierzchni i krawędzi oraz punktów na kołach zębatach, które zachowały pierwotną geometrię (kształt, położenie), które mogą stanowić odniesienie dla odtworzenia uszkodzonych fragmentów.
2. Opracowanie koncepcji budowy modelu 3D-CAD w oparciu o posiadane dane. Wykonanie modelu numerycznego i dalsza obróbka tych modeli.
3. Stworzenie dokumentacji wykonawczej 2D.
4. W oparciu o model 3D-CAD wykonanie prototypu/repliki kół zębatach z użyciem metod RP (lub wytworzenie kół zębatach z wykorzystaniem konwencjonalnych metod wytwarzania).

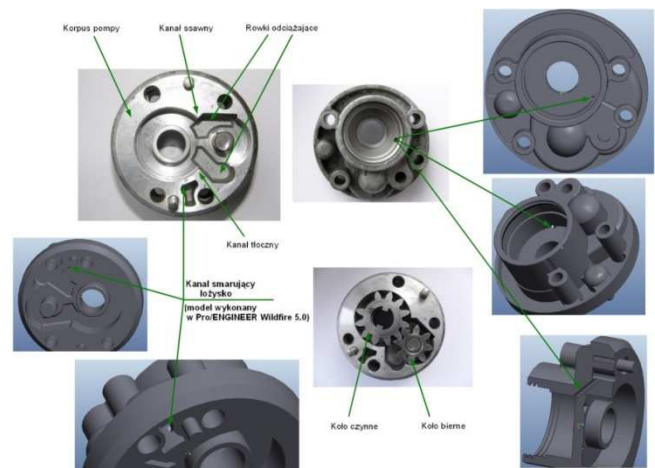
Należy podkreślić, że kolejność przedstawionych etapów może ulec zmianie oraz niektóre etapy mogą zostać pominięte. Ponadto wykorzystując dostępne współrzędnościowe techniki pomiarowe (przykładowo skanowanie optyczne) można rozszerzyć opracowanie koncepcji budowy modelu 3D-CAD w oparciu o dane uzyskane z pomiarów.

## 2. Analiza oraz ocena stanu zużycia modelu badawczego

Przeanalizowano stan zużycia powierzchni kół zębatach. Zwrócono szczególną uwagę na uszkodzenia w postaci wgniecenia i ubytków na jednym zębie w kole zębatach i na

trzech zębach w zębniku, oraz zniszczony w ok. 95 % ząb w kole zębatach [5]. W analizowanym przypadku nie ma identycznego zużycia i zniszczeń, są natomiast charakterystyczne ślady uszkodzeń, które mogą świadczyć o przedostaniu się do wnętrza pompy ciał obcych (zanieczyszczenia, opiłki, itp.) wraz z czynnikiem roboczym w wyniku postępującego zużycia silnika. W trakcie pracy pompy mogło dojść do przedostania się większego ciała obcego na którym zablokował się (obecnie urwany) ząb i jednorazowo lub wielokrotnie, podczas jednego cyklu lub kilku dojść do np.: złamania zmęczeniowego. Ślady (uszkodzenia typu wgniecenie, ubytek) na pozostałych zębach obu kół mogą świadczyć o tym, że pompa zębata została przyblokowana (zakleszczona) przez resztki urwanego zęba. Próbowano pracować wciskając mocniej te pozostałości w kilka zębów. Nie wykluczone, że zniszczenie zmęczeniowe zęba mogła przyspieszyć wada materiału w zakresie jego składu lub obróbki cieplno-chemicznej.

Zostały przeprowadzone analizy mające na celu identyfikację pompy, ustalenie marki pojazdu i funkcji jaką spełniała. Ze względu na sposób przenoszenia cieczy z obszaru przestrzeni ssawnej do tłocznej ustalono, że jest to pompa wyporowa, zębata o zazębieniu zewnętrznym, koła zębata o zębach prosty, zarysie ewolwentowym o pojedynczej ewolwencji. Zostało ustalone, że jest to układ olejowania z tzw. suchą miską olejową i pompa tzw. wtórna czyli pompa osuszająca – pojazd Mercedes-Benz. Następnie zostały oznaczone obszary istotne z punktu widzenia pracy pompy zębatej (rys.2).



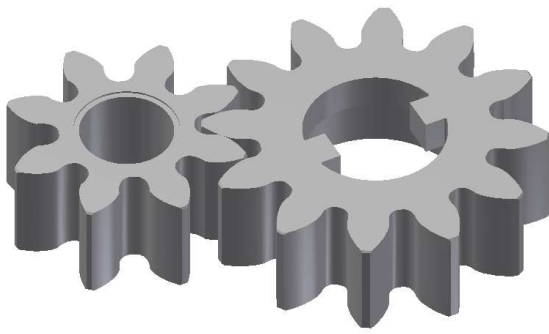
Rys. 2. Oznaczenie charakterystycznych obszarów i wyodrębnienie elementów zespołu [5]

Na podstawie założeń wstępnych przeprowadzono obliczenia uzębienia, zazębienia i parametrów charakterystycznych pompy zębatej [5].

## 3. Modele 3D-CAD kół zębatach

Modele numeryczne (3D-CAD) kół zębatach zostały wykonane w programie Inventor Professional 2013 firmy Autodesk [3,5]. Projektowanie przeprowadzono w kreatorze komponentów przekładni walcowej, do którego wprowadzono dane dotyczące geometrii oraz obciążeń przekładni, wprowadzono właściwości materiałowe dla tworzywa ABS [3,6], z którego został wykonany prototyp. Było to możliwe ponieważ odtwarzane koło zębatach z=12 wraz z kołem współpracującym (z=8) były kołami znormalizowanymi.

Po przeprowadzeniu obliczeń wytrzymałościowych i otrzymaniu poprawnych wyników wygenerowano modele bryłowe kół zębatach (rys. 3).



Rys. 3. Modele bryłowe kół zębatach

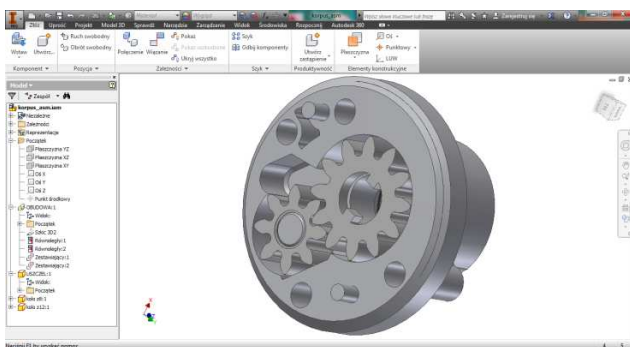
Modelownie kół zębatach składa się z wielu etapów, którymi są operacje modelowania powierzchniowego, bryłowego i kombinacje tych operacji. Projektowanie przekładni walcowej pompy zębatach przeprowadzono wykorzystując modelowanie hybrydowe polegające na połączeniu procedur modelowania powierzchniowego i bryłowego w celu odtworzenia geometrii przekładni, która została użyta w kolejnych etapach procesu wytwórczego.

W celu pełnego odtworzenia przekładni wykonano model 3D-CAD korpusu przekładni walcowej pompy zębatach (rys.4).



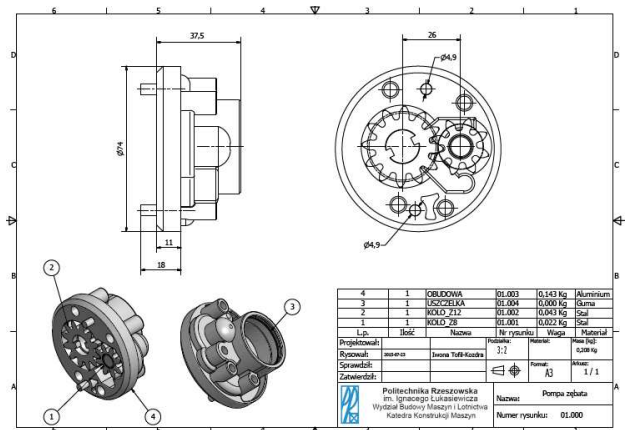
Rys. 4. Model 3D-CAD korpusu odtwarzanej przekładni walcowej pompy zębatach

W wyniku złożenia poszczególnych podzespołów otrzymano model 3D-CAD prototypu przekładni walcowej pompy zębatach (rys. 5).



Rys. 5. Model 3D-CAD odtwarzanej przekładni walcowej pompy zębatach

Otrzymane modele numeryczne stanowią podstawę tworzenia np. wirtualnej biblioteki modeli kół, które mogą być wykorzystywane przy kolejnych pracach inżynierskich. Przykładowo na rysunku 6 przedstawiono opracowaną dokumentację 2D w postaci rysunku zespołu pompy zębatach.



Rys. 6. Rysunek zespołu odtworzonej przekładni walcowej pompy zębatach [5]

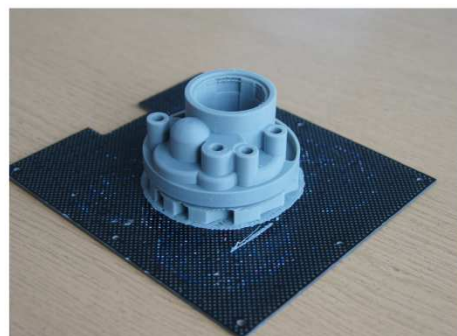
#### 4. Wykonanie prototypu pompy zębatach metodą RP

Wykonanie prototypu pompy zębatach zostało przeprowadzone na drukarce UP! plus 2 wykorzystującej technologię MEM (ang. Melted and Extruded Modeling) [1,6].

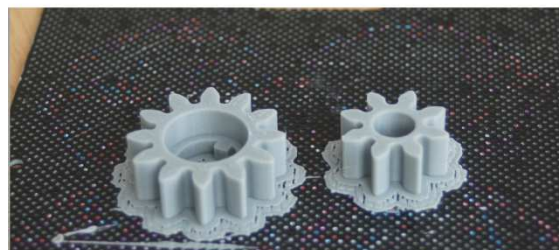
Wytwarzanie prototypu przekładni zębatach metodami RP wymagało opracowania danych numerycznych STL/RP odtwarzanego modelu. Dalsza obróbka pliku polegała na zadaniu odpowiednich parametrów pracy urządzenia (grubość warstwy, ustawienia modeli na platformie oraz podpór a także sposobu wypełnienia materiałem). Proces przygotowania danych ma zasadniczy wpływ na dokładność modelu otrzymanego w procesie RP. Parametry eksportowanych danych z systemów CAD powinny być zawsze wyższe niż dokładność urządzenia szybkiego prototypowania. Dzięki temu w procesie budowy modelu urządzenie RP nie powieła błędów programowych [1].

Kolejnym etapem było wykonanie modelu fizycznego (rys.7).

a)



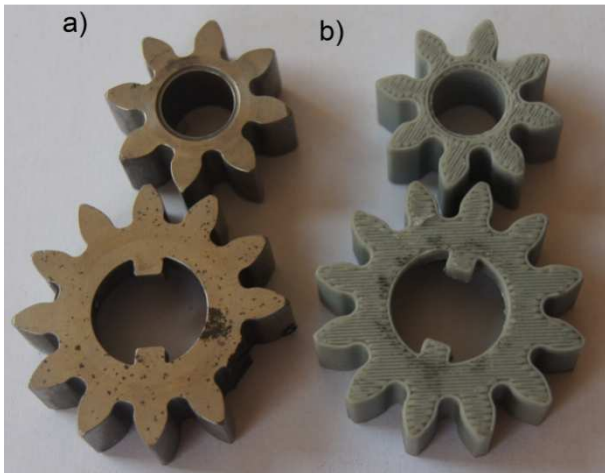
b)



Rys. 7. Model fizyczny wraz z platformą roboczą a) korpus, b) koła zębatach pompy zębatach

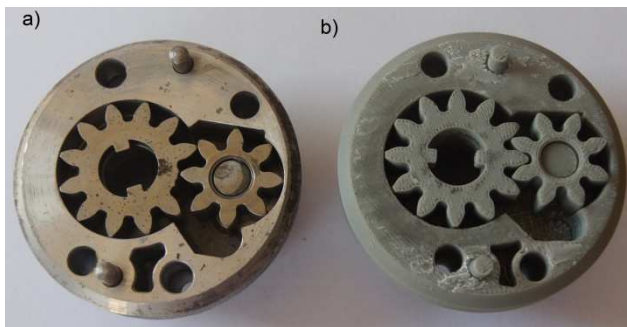
Po zakończeniu wydruku wykonano Post Processing polegający na oddzieleniu wydrukowanych elementów od platformy roboczej.

Na rysunku 8 przedstawiono rzeczywiste modele i modele odtworzone kół zębatych pompy zębatej.



Rys. 8. a) rzeczywiste modele, b) odtworzone modele RP kół zębatych pompy zębatej (modele MEM z ABS-u)

W efekcie przeprowadzonych prac otrzymano prototyp przekładni walcowej pompy zębatej przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. a) uszkodzona przekładni zębata, b) prototyp przekładni zębatej wykonany technologią RP

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodykę pozwalającą na odtworzenie niemal dowolnego koła zębatego. Opracowana metodyka ujmuje odtworzenia geometrii w układzie globalnym i szczegółowym. W układzie globalnym to pełne odtworzenie numeryczna i fizyczna kół zębatych. W układzie szczegółowym to obróbka danych na dowolnym etapie procesu odtwarzania. Ponieważ efektem prac jest wieloaspektowa dokumentacja do wielokrotnego i różnorodnego wykorzystania, np. wspomaganie kolejnych rekonstrukcji (analiza porównawcza, kontrola geometrii, wykonywanie replik/duplikatów modeli badawczych).

W projektowaniu inżynierskim konstrukcji mechanicznych, zachodzi potrzeba potwierdzenia poprawności i/lub dokładności rozwiązań otrzymanych metodami analitycznymi. Ze względu na ograniczoną dokładność geometryczną prototypów otrzymywanych metodami szybkiego prototypowania należałoby jako kierunek dalszych prac przeprowadzić analizy dokładności odwzorowania geometrii modelu 3D-CAD z modelem rzeczywistym odtwarzanych kół zębatych oraz analizy dokładności odwzorowania geometrii modelu RP z modelem rzeczywistym odtwarzanych kół zębatych [5].

## LITERATURA

1. Budzik Grzegorz „Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2013.
2. Markowski Tadeusz, Budzik Grzegorz, Kozik Bogdan, Sobolewski Bartłomiej „Analiza możliwości wytwarzania kół zębatych o małych modułach technologią FDM”. *Mechanik* nr 2/2014 (2014), s.130, s. 1-8.
3. Płuciennik Paweł „Projektowanie elementów maszyn z wykorzystaniem programu Autodesk Inventor - Obliczenia przekładni”. Warszawa: PWN, 2015.
4. Ochęduszek Kazimierz „Koła zębate. Konstrukcja”. Wydawnictwo Naukowo - Techniczne. Warszawa 1971.
5. Tofil-Kozdra Iwona „Zastosowanie inżynierii odwrotnej w procesie odtwarzania geometrii koła zębatego pompy zębatej”. Rzeszów: Praca dyplomowa, 2015.
6. [<http://www.rapidpro.pl>] MEM-melted-and-extruded-modeling.