Inżynieria Maszyn, R. 18, z. 1, 2013

inżynieria odwrotna, szybkie prototypowanie,
skanowanie 3D, modelowanie CAD

Filip GÓRSKI[1]
Wiesław KUCZKO[1]
Radosław WICHNIAREK[1]

ODTWARZANIE ZUŻYTYCH LUB ZNISZCZONYCH ELEMENTÓW MASZYN ZA POMOCĄ INŻYNIERII ODWROTNEJ ORAZ TECHNIK SZYBKIEGO WYTWARZANIA

Utrzymanie maszyn i urządzeń w ciągłej pracy jest ważnym kryterium sukcesu przedsiębiorstw produkcyjnych. W przypadku, kiedy z różnych względów nie ma dostępu do dokumentacji technicznej poszczególnych podzespołów lub nie ma możliwości nabycia części zamiennych, dużym wyzwaniem staje się skrócenie do minimum przerw w produkcji spowodowanych awariami. Stosując techniki inżynierii odwrotnej oraz szybkiego wytwarzania na podstawie zużytego lub uszkodzonego elementu można w krótkim czasie wytworzyć jego funkcjonalny odpowiednik. W pracy przedstawiono metodykę pomiaru, odtworzenia dokumentacji trójwymiarowej oraz wytworzenia prototypu funkcjonalnego koła zębatego przenoszącego napęd z silnika w urządzeniu poligraficznym. Dokonano porównania użyteczności części wykonanych z zastosowaniem dwóch technik: kształtowania przyrostowego uplastycznionym tworzywem oraz odlewania próżniowego w formach silikonowych.

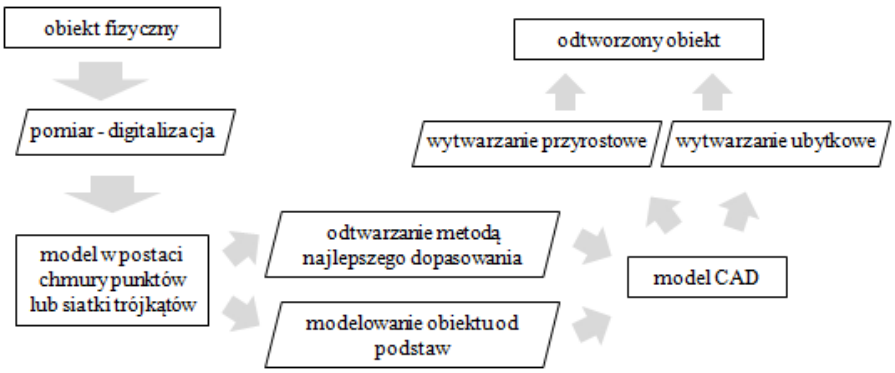
1. WPROWADZENIE

W celu obniżenia kosztów związanych z projektowaniem i przygotowaniem produkcji, nowoczesne przedsiębiorstwa produkcyjne często zlecają opracowanie i wykonanie oprzyrządowania technologicznego wykonawcom zewnętrznym. Wynikiem takiego działania jest możliwość koncentracji zasobów przedsiębiorstwa na kluczowych procesach oraz minimalizacja kosztów wytwarzania. Niestety, wiele firm w poszukiwaniu jeszcze większych oszczędności decyduje się na zakup jedynie samych narzędzi lub urządzeń – bez dokumentacji technicznej. W przypadku awarii lub zużycia, nie ma możliwości ich szybkiej naprawy, regeneracji, wykonania nowych odpowiedników lub zakupu części zamiennych. W podobnej sytuacji znajdują się przedsiębiorstwa, w których produkcja opiera się na stosowaniu często kilkudziesięcioletnich maszyn, które pomimo, że dobrze sprawdzają się w danej technologii wytwarzania to jednak ich stopień zużycia prowadzi do częstych awarii. Również w tym przypadku brak dokumentacji technicznej i dostępnych na rynku części może w znacznym stopniu utrudnić szybkie usunięcie awarii [1]. W celu skrócenia do

[1] Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, wieslaw.kuczko@doctorate.put.poznan.pl

minimum przerw w produkcji spowodowanych awariami, stosuje się nowoczesne techniki pomiarów, konstruowania oraz szybkiego wytwarzania, pozwalające skrócić czas potrzebny na naprawę urządzenia i wznowienie produkcji [2].

Inżynieria odwrotna części maszyn i urządzeń pozwala na szybką digitalizację istniejących obiektów fizycznych z zastosowaniem współrzędnościowych systemów pomiarowych oraz ich rekonstrukcję tradycyjnymi technologiami ubytkowymi lub nowoczesnymi technikami wytwarzania przyrostowego (rys. 1). Odtworzenie modelu CAD na podstawie obiektu rzeczywistego najczęściej stosowane jest w celu wprowadzenia zmian konstrukcyjnych, replikacji lub inspekcji geometrii badanego elementu. W zależności od kształtu oraz przeznaczenia elementu, odtwarzanie można przeprowadzić na dwa sposoby. Pierwszy z nich to aproksymacja krzywiznami i rozpięcie pomiędzy nimi powierzchni (np. NURBS). Do zalet tej metody należy duża dokładność odwzorowania i krótszy czas potrzebny na wykonanie modelu CAD. Największą wadą jest jednak ścisłe dopasowanie płatów powierzchni do danych otrzymanych z pomiarów. Jeśli zmierzony obiekt nosił ślady zużycia, na modelu CAD ślady te zostaną odwzorowane. Dlatego w przypadku elementów zużytych lub uszkodzonych stosowana jest druga metoda odtwarzania. Polega ona na zamodelowaniu obiektu od podstaw, z zastosowaniem danych z pomiaru jako wzorca. Ten proces odtwarzania jest znacznie bardziej czasochłonny i wymaga doświadczenia oraz wiedzy od konstruktora [3]. Rezultatem procesu odtwarzania od podstaw jest model bryłowy, w którym można rozróżnić podstawowe kształty geometryczne, takie jak stożki, walce, sfery czy płaszczyzny. Ponadto znając sposób działania elementu można go odtworzyć do stanu nominalnego usuwając w procesie modelowania ślady zużycia lub błędy wynikające z technologii jego wytwarzania (np. brak symetryczności). Możliwe jest także wprowadzenie zmian konstrukcyjnych istniejącego elementu, celem usprawnienia działania całego urządzenia [4]. Odpowiednio przygotowany model CAD może posłużyć do wytworzenia elementu rzeczywistego technikami ubytkowymi lub technikami przyrostowymi.



Rys. 1. Schemat odtwarzania części z zastosowaniem inżynierii odwrotnej (opracowanie własne)
Fig. 1. Scheme of re-creation of machine parts using reverse engineering techniques (own work)

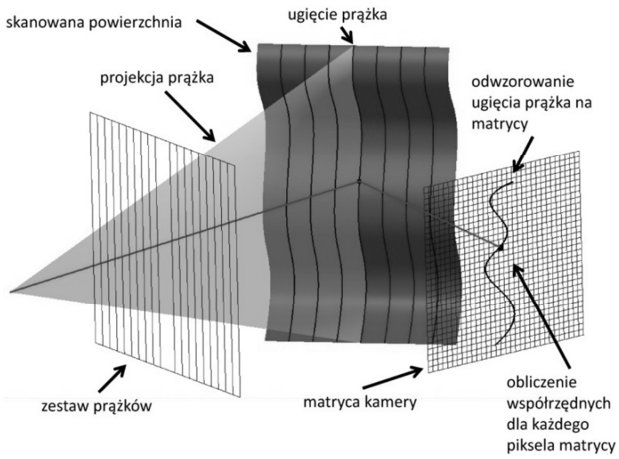
W artykule przedstawiono proces odtworzenia koła zębatego o zębach skośnych, przenoszącego napęd z silnika elektrycznego na koła zębate mechanizmu podawania

papieru w urządzeniu poligraficznym. Oryginalne koło zębate uległo uszkodzeniu polegającemu na podłużnym pęknięciu co spowodowało nieprawidłową pracę urządzenia. Ze względu na brak dostępności tej części w serwisie oraz brak dokumentacji technicznej całego urządzenia, podjęto decyzję o wykonaniu jej odpowiednika. Zastosowano techniki pomiarów optycznych (skanowanie 3D) i modelowanie w programie CATIA do wykonania modelu CAD koła zębatego oraz techniki szybkiego wytwarzania do uzyskania jego fizycznego odpowiednika.

2. DIGITALIZACJA OBIEKTU RZECZYWISTEGO

Pierwszym etapem odtwarzania jest digitalizacja zużytego elementu. Dane pomiarowe można pozyskać korzystając z jednej z kilku dostępnych grup metod, do których należą metody bezstykowe (skanery optyczne i laserowe, systemy fotogrametryczne, tomografy) oraz stykowe (współrzędnościowe maszyny pomiarowe, ramiona pomiarowe oraz obrabiarki CNC wyposażone w głowice pomiarowe). Ze względu na szeroki zakres zastosowań oraz krótki czas pomiaru, podczas którego zbierane są informacje w postaci chmury punktów o dużej gęstości, coraz częściej stosowane są skanery optyczne oparte o projekcję światła strukturalnego. Tego rodzaju skaner (urządzenie ATOS I firmy GOM) został zastosowany podczas procesu odtwarzania opisanego w niniejszej pracy.

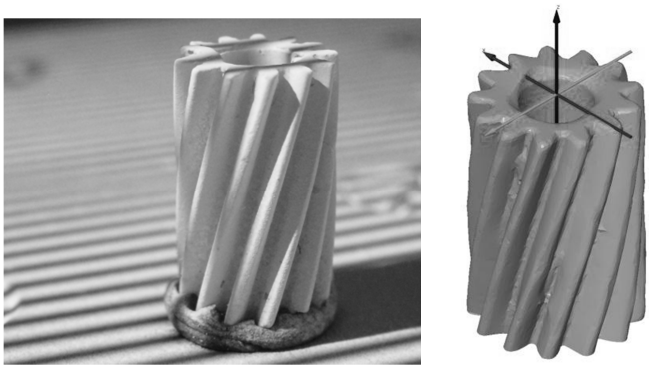
Podstawą działania optycznego skanera 3D jest zastosowanie światła o znanej strukturze – najczęściej w postaci prążków. Prążki światła są rzutowane na mierzony obiekt, którego kształt powoduje ich deformację. W momencie rzutowania prążków wykonywane są zdjęcia, które są analizowane w czasie rzeczywistym przez algorytm zaimplementowany w oprogramowaniu skanera 3D. Na podstawie stopnia deformacji prążków w stosunku do zachowanego ich wzorca oraz parametrów kalibracyjnych skanera 3D obliczane są współrzędne przestrzenne dla każdego piksela obrazu zarejestrowanego przez matrycę. Wynikiem pojedynczego pomiaru jest chmura punktów reprezentująca mierzoną powierzchnię. Schemat działania skanera prążkowego przestawia rysunek 2 [5].



Rys. 2. Schemat działania skanera prążkowego [5]
Fig. 2. Scheme of operation of the fringe projection optical scanner [5]

Obiekt mierzony - koło zębate zostało zamocowane na stole obrotowym z naniesionymi markerami, umożliwiającymi wzajemną orientację względem siebie poszczególnych serii pomiarowych, wykonywanych przy różnym położeniu przestrzennym skanera względem mierzonego obiektu. Ponadto w celu uniknięcia refleksów świetlnych w trakcie rzutowania prążków, powierzchnia zębów została zmatowiona poprzez naniesienie za pomocą aerografu cienkiej warstwy proszku kredowego.

Do pomiaru zastosowano skaner GOM Atos o wielkości pola pomiarowego 125x125mm. Łącznie w serii pomiarowej wykonano 32 ujęcia. Bezpośrednim wynikiem pomiaru była chmura punktów, którą następnie poddano procesowi filtracji oraz triangularyzacji. Otrzymany w ten sposób model w postaci siatki trójkątów został zapisany w formacie STL, standardowo stosowanym jako format wymiany danych między maszynami pomiarowymi, systemami CAD oraz urządzeniami do wytwarzania przyrostowego. Proces pomiaru oraz jego wynik przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Po lewej - rzutowanie prążków na mierzony obiekt, po prawej - wynik skanowania, siatka trójkątów rozpięta na chmurze punktów
Fig. 3. On the left – fringe projection on the measured object, on the right – result of 3D scanning, triangle mesh over a point cloud

3. ODTWORZENIE GEOMETRII KOŁA ZĘBATEGO

Model w formacie STL został zaimportowany do systemu Catia v5, wyposażonego w moduły zawierające narzędzia do odtwarzania geometrii oraz wykonywania operacji na modelach powierzchniowych opartych o siatkę trójkątów. Na podstawie poszczególnych przekrojów zmierzona została przybliżona średnica wierzchołkowa koła zębatego d_a = 7,9mm. Metodą wykreślną określony został również kąt pochylenia linii zęba. Krzywa przestrzenna narysowana wzdłuż linii zęba została zrzutowana na walec obrazujący średnicę d_a. Na walec zrzutowana została również jego oś. Tak powstały wycinek walca został rozwinięty na płaszczyźnie. Krzywa stanowiąca przeciwprostokątną trójkąta prostokątnego została przybliżona do prostej określającej kąt pochylenia linii zęba β=18,5˚. Po określeniu średnicy d_a, kąta β z zależności (1) obliczono moduł normalny m (liczba zębów z=13).

$$d_a = m \cdot \left(\frac{z}{cos\beta} + 2\right) \tag{1}$$

Obliczona w ten sposób wartość modułu wyniosła 0,49884. Z typoszeregu modułów dla kół zębatych wybrano najbliższą wartość m=0,5 i ponownie podstawiając do wzoru (1) obliczono nominalną średnicę wierzchołkową. Ze wzorów (2) do (5) obliczono pozostałe parametry koła zębatego [6] przestawione w tabeli 1.

$$d_f = m \cdot \left(\frac{z}{cos\beta} - 2{,}5\right) \tag{2}$$

$$m = \frac{p}{\pi} \tag{3}$$

$$d = m_t \cdot z \tag{4}$$

$$m_t = \frac{m}{cos\beta} \tag{5}$$

Tabela 1. Podstawowe parametry odtwarzanego koła zębatego
Table 1. Basic parameters of the re-created gear

Parametr		Wartość
Średnica wierzchołków	d_a [mm]	7,92
Średnica dna wrębów	d_f [mm]	5,67
Średnica podziałowa	d [mm]	6,92
Moduł normalny	m	0,5
Moduł czołowy	mt	0,532
Podziałka	p [mm]	1,57
Kąt przyporu	α [^{o}]	20
Kąt pochylenia linii zęba	β [^{o}]	18,5
Liczba zębów	z	13

Ze względu na brak w programie CATIA modułu służącego do modelowania kół zębatych o zarysie ewolwentowym, w celu uzyskania tego zarysu zdefiniowano dwa prawa zmienności, określające współrzędne przestrzenne Y oraz Z kolejnych punktów tworzących ten zarys (wzór (6) i (7)):

$$Y = r_b(\sin(t \cdot \pi) - \cos(t \cdot \pi) \cdot t \cdot \pi) \tag{6}$$

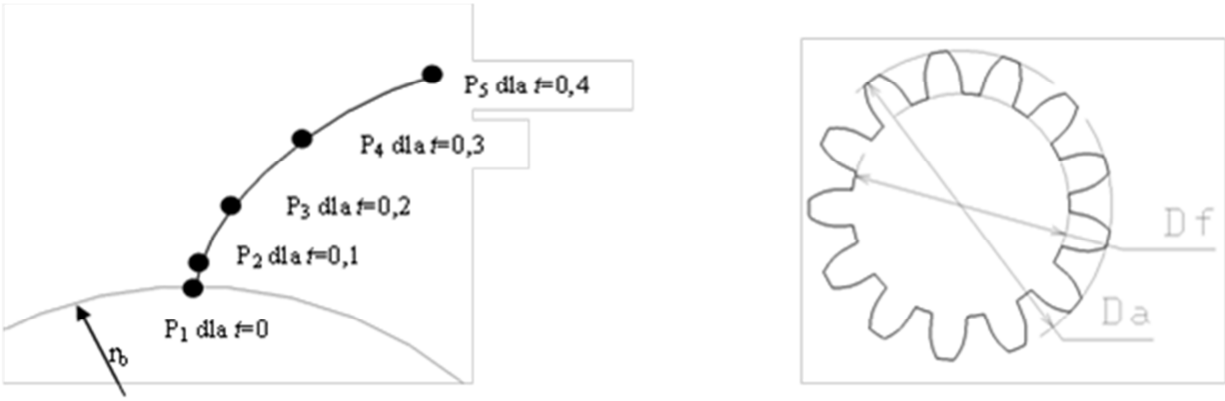
$$Z = r_b(\cos(t \cdot \pi) + \sin(t \cdot \pi) \cdot t \cdot \pi) \tag{7}$$

$$r_b = \frac{d}{2} \cdot cos\alpha \tag{8}$$

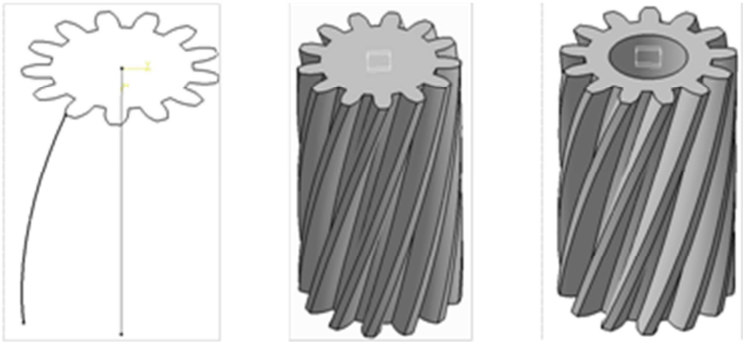
gdzie r_b stanowi promień koła zasadniczego, natomiast t określa kąt odwinięcia ewolwenty [7].

Tworząc punkty o współrzędnych zdefiniowanych przez prawa zmienności (6) i (7) dla parametru t o wartościach kolejno 0; 0,1; 0,2; 0,3 oraz 0,4 i łącząc je za pomocą krzywej typu "spline" utworzono zarys ewolwentowy, którego pierwszy punkt znajduje się na obwodzie koła zasadniczego (rys. 4). Otrzymana krzywa posłużyła do wykonania zarysu zęba oraz zarysu koła zębatego (rys. 4b). Znając kąt pochylenia zębów β=18,5^o, narysowano prostą nachyloną pod tym kątem do osi X i następnie zrzutowano ją na powierzchnię walca o średnicy równej średnicy wierzchołków zębów i wysokości równej szerokości koła wynoszącej 12,8mm.

Otrzymana w ten sposób krzywa umożliwiła wykonanie operacji wyciągnięcia szkicu z zarysem koła zębatego wzdłuż jej krzywizny. Zrzutowaną krzywą oraz wynik operacji wyciągnięcia przedstawia rysunek 5.



Rys. 4. Po lewej - zarys ewolwentowy zęba, po prawej - profil odtworzonego koła zębatego
Fig. 4. On the left – involute profile of a tooth, on the right – profile of the re-created gear



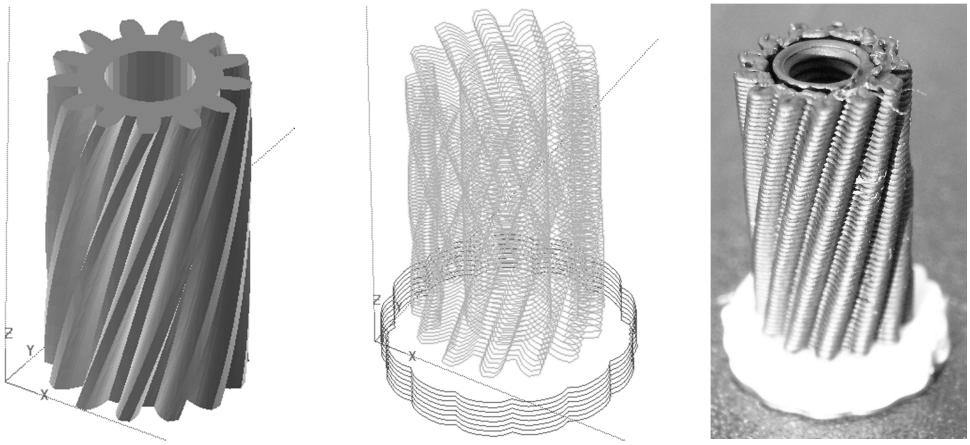
Rys. 5. Po lewej - profil wyciągany po krzywej, w środku wynik operacji wyciagnięcia profilu, po prawej - odtworzony model koła zębatego
Fig. 5. On the left – profile swept along a curve, in the middle – result of the sweep operation, on the right – re-created model of the gear

Ostatnią operacją odtwarzania modelu elementu było wykonanie otworu o średnicy 3,5mm pod oś silnika, na której koło było oryginalnie osadzone.

4. WYTWORZENIE PROTOTYPU KOŁA ZĘBATEGO

Odpowiednik uszkodzonego koła zębatego powinien charakteryzować się wytrzymałością zapewniającą zdolność przeniesienia obciążeń związanych z pracą całego mechanizmu. Spośród dostępnych metod wytwarzania zdecydowano się na wykonanie odlewu żywicznego w formie silikonowej. Zastosowanie tej techniki wymaga fizycznego modelu wzorcowego, który służy do wykonania formy. Konieczne było zatem wytworzenie prototypu koła zębatego, na podstawie którego możliwe byłoby wykonanie formy

silikonowej. Ze względu na krótki czas wykonania prototyp wzorcowy wytworzony został techniką kształtowania przyrostowego, uplastycznionym tworzywem termoplastycznym (ang. FDM - *Fused Deposition Modeling*). Technika FDM polega na nakładaniu kolejnych warstw uplastycznionego tworzywa termoplastycznego przez głowicę wytłaczającą. W metodzie tej nie następuje pełny przetop materiału, a kolejne warstwy złączone są ze sobą tylko siłami adhezji, dlatego zastosowanie koła zębatego wykonanego metodą FDM spowodowałoby jego zniszczenie podczas pracy poprzez rozłączenie się sąsiadujących warstw i rozdzielenie nałożonych nici tworzywa. Drukowanie uplastycznionym tworzywem termoplastycznym sprawdza się w sytuacji kiedy prototyp ma charakter wizualny, lub jeśli poddawany jest względnie małym obciążeniom [8], gdyż wytrzymałość wyrobów kształtowanych techniką FDM z tworzyw termoplastycznych jest zawsze mniejsza niż wytrzymałość wyrobów o tej samej geometrii nominalnej, lecz wytwarzanych metodami konwencjonalnymi, np. przez wtryskiwanie [10]. Prototyp koła zębatego został wytworzony na maszynie Dimension BST 1200, z tworzywa P400 z zachowaniem grubości warstwy równej 0,254mm i pełnym wypełnieniem wnętrza każdej warstwy. Jako dane wejściowe dla procesu technologicznego zastosowano utworzony wcześniej plik STL. Geometria z pliku została podzielona na warstwy, następnie określono ścieżki, po których poruszała się głowica w trakcie procesu wytwarzania. Proces trwał ok. 10 minut, a jego wynikiem był prototyp przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Po lewej plik STL, w środku model podzielony na warstwy, po prawej prototyp wykonany techniką FDM
Fig. 6. On the left – STL file, in the middle – model sliced into layers, on the right – FDM-made prototype

Ze względu na skomplikowany kształt koła zębatego, jego niewielkie wymiary oraz ograniczenia technologiczne maszyny BST 1200, koło zostało wykonane ze zbyt dużym uproszczeniem. Spowodowało to problemy z zazębieniem koła zębatego z pozostałymi kołami w mechanizmie. Ocena przydatności prototypu wykonanego techniką FDM do wytworzenia formy silikonowej była zatem negatywna. Podjęto decyzję o zastosowaniu jako model wzorcowy oryginalnego elementu, którego uszkodzenie nie wpłynęło istotnie na geometrię krzywizny zarysu zębów, a nieciągłości materiałowe po zalaniu formy silikonowej żywicą mogły zostać usunięte.

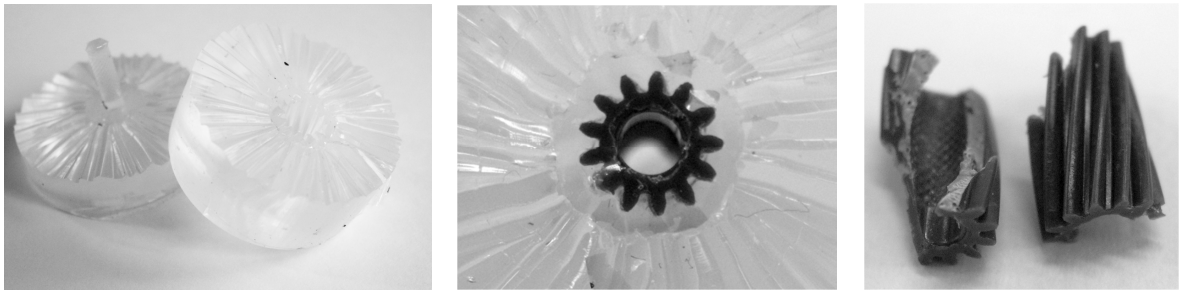
Technologia odlewania żywic w formach silikonowych (ang. *Vacuum Casting* - VC) pozwala znacznie rozszerzyć zakres zastosowań technik szybkiego prototypowania, ze względu na możliwość wytwarzania modeli funkcjonalnych, a także gotowych wyrobów w małych i średnich seriach znacznie niższym kosztem niż w przypadku wytwarzania przyrostowego. Ponadto duży wybór dostępnych w tej technologii żywic pozwala na dobranie odpowiedniego materiału nie tylko celem spełnienia wymagań wytrzymałościowych, ale również wizualnych.

Formy w VC wykonywane są z chemoutwardzalnych żywic silikonowych, wypełniających w skrzynce formierskiej przestrzeń wokół modelu wzorcowego. Pierwszy etap sieciowania silikonu odbywa się w warunkach próżni, która umożliwia usunięcie pęcherzyków gazu z mieszaniny dwóch składników silikonu. Po odgazowaniu dalsza część procesu sieciowania odbywa się w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Po usunięciu modelu wzorcowego, w formie można odlewać żywice w sposób grawitacyjny w warunkach zmniejszonego ciśnienia [9].

Do wykonania formy silikonowej zastosowano dwuskładnikowy silikon XTX 45. Charakteryzuje się on transparentnością, bardzo dobrym odwzorowaniem szczegółów modelu wzorcowego oraz małym skurczem. Czas przydatności silikonu do prawidłowego formowania wynosi 20 minut, natomiast pełne sieciowanie następuje po 10 godzinach. Odgazowanie silikonu nastąpiło z zastosowaniem komory próżniowej MCP Hek 4/01.

Przygotowaną formę, w której znalazł się model wzorcowy wypełniono uprzednio odgazowanym silikonem XTX 45 i powtórnie odgazowano przy minimalnym, możliwym do uzyskania, ciśnieniu w czasie 2 min. Po zakończeniu procesu sieciowania forma została otwarta, a model wzorcowy usunięty (rys. 7). Formę wyposażono w układ wlewowy oraz odpowietrzający.

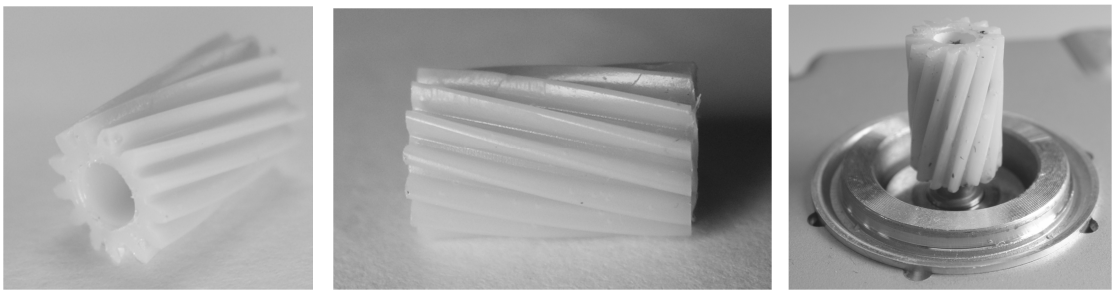
Pierwszy odlew wykonano z żywicy epoksydowej EPO 5019 charakteryzującej się dużą twardością (92 Shore w skali D), odpornością na ścieranie oraz stosunkowo małym skurczem. Charakterystyczną dla tej żywicy cechą jest znajdujący się w niej wypełniacz w postaci proszku stalowego – można w zasadzie uznać ją za materiał kompozytowy. Ze względu na długi czas sieciowania, odlew wykonany z tej żywicy mógł być wyjęty z formy dopiero po 24 godzinach od zalania, natomiast pełne utwardzenie nastąpiło po 48 godzinach. Po utwardzeniu podjęto próbę osadzenia koła zębatego na wale silnika. Podczas osadzania, za pomocą prasy ręcznej, koło uległo uszkodzeniu – pojawiło się pęknięcie biegnące wzdłuż linii zęba.



Rys. 7. Po lewej - forma silikonowa, w środku forma wypełniona żywicą, po prawej - uszkodzony odlew z żywicy EPO 5019
Fig. 7. On the left – silicone mold, in the middle – mold filled with resin, on the right – damaged casting out of EPO 5019

Zniszczenie zostało spowodowane nieprawidłowymi właściwościami zastosowanej żywicy – jest ona wprawdzie twarda, lecz również krucha. Ponadto nastąpił proces synergii skurczów silikonu oraz żywicy epoksydowej, co doprowadziło do zbyt ciasnego pasowania obu współpracujących elementów.

Drugi odlew wykonano z szybkoutwardzalnej żywicy poliuretanowej Axon F19, która charakteryzuje się krótkim czasem życia (9 min.), pełnym utwardzeniem już po 4 godzinach oraz twardością 72 Shore w skali D. Forma została przygotowana w taki sam sposób jak w przypadku żywicy epoksydowej. Po pełnym utwardzeniu odlew został wyjęty z formy i osadzony na wale silnika (rys. 8).



Rys. 8. Po lewej i w środku - odlew koła z żywicy F19, po prawej - koło osadzone na wale silnika elektrycznego
Fig. 8. On the left and in the middle – gears out of F19 resin, on the right – gear mounted on the shaft of the electric engine

Po sprawdzeniu poprawności działania mechanizmu stwierdzono, że pracował on cicho a sterownik urządzenia nie sygnalizował żadnych błędów. Można założyć, że zazębianie wszystkich trzech kół mechanizmu przebiegało w sposób prawidłowy. Po przepracowaniu tysiąca cykli mechanizm został zdemontowany w celu weryfikacji stopnia zużycia koła zębatego. Po dokładnych oględzinach wzrokowych stwierdzono brak widocznych śladów nieprawidłowego zużycia. Przydatność funkcjonalnego zamiennika koła zębatego wykonanego z żywicy poliuretanowej należy zatem ocenić pozytywnie. Zestawienie i ocenę wszystkich wykonanych prototypów przedstawia tabela 2.

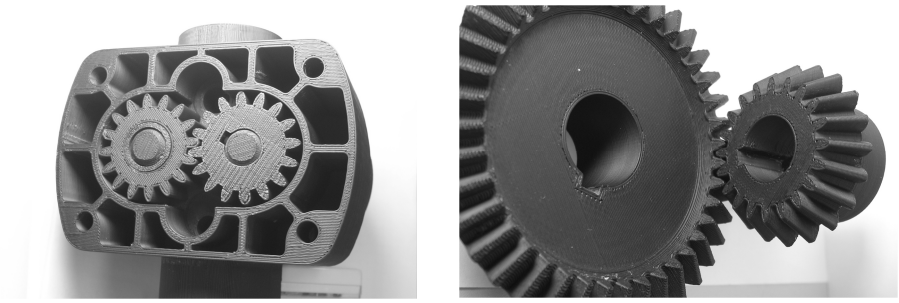
Tabela 2 Zestawienie cech oraz ocena wykonanych prototypów koła zębatego
Table 2. Summary of features and evaluation of produced gear prototypes

Technika wytwarzania	Materiał	Czas wytwarzania	Ocena dokładności	Ocena wytrzymałości
Przyrostowa (FDM)	ABS	10 min.	nieakceptowalna	nieakceptowalna
Vacuum Casting	żywica EPO 5019	62 h	akceptowalna, niezadowalająca	nieakceptowalna
Vacuum Casting	żywica Axon F19	28 h	zadowalająca	zadowalająca

5. WNIOSKI

Metoda FDM umożliwia szybkie wytworzenie części maszyny bezpośrednio na podstawie modelu cyfrowego (CAD), jednakże w przypadku obiektów o małych gabarytach

poziom dokładności odwzorowania wymiarów i kształtu jest za mały, podobnie ma się rzecz z wytrzymałością Wytwarzanie funkcjonalnych prototypów kół zębatych o zarysie ewolwentowym za pomocą tej techniki jest możliwe, w przypadku gdy koła mają zęby o odpowiedniej wielkości (rys. 10). Ustalenie granicznej wartości modułu oraz średnicy podziałowej, poniżej których przyrostowe wytwarzanie kół zębatych z tworzyw sztucznych jest niemożliwe, powinno być przedmiotem dalszych badań.



Rys. 10. Przykłady funkcjonalnych przekładni zębatych wytworzonych przyrostową techniką FDM – po lewej przekładnia walcowa, po prawej stożkowa, w obu przypadkach koła zębate o zarysie ewolwentowym
Fig. 10. Examples of functional gearboxes manufactured using FDM technology – cylindrical gearbox on the left, bevel gearbox on the right, involute profiles in both cases

Elementy, które zostały zniszczone poprzez naruszenie ciągłości materiałowej, ale nie są zużyte, mogą posłużyć jak wzorce kształtów dla metody odlewania żywic w formach silikonowych. Warunkiem koniecznym jest brak znaczących ubytków materiału na powierzchniach pracujących (w tym przypadku na powierzchniach zębów koła).

Pomimo, że FDM pozwala najszybciej wytworzyć pojedyncze wyroby, to jednak ma mniejszy zakres stosowania niż VC. Koszt wytworzenia pojedynczego elementu lub małej serii elementów zapasowych jest zdecydowanie mniejszy w przypadku zastosowania metody odlewania żywic w formach silikonowych niż dla tradycyjnej technologii przetwórstwa tworzyw polimerowych, czyli wtryskiwania. Dzięki możliwości odlewania różnych żywic możliwe jest lepsze dopasowanie właściwości materiałowych wytworzonego elementu. W jednej formie można wykonać kilkadziesiąt sztuk odlewów z różnych materiałów, co stwarza możliwość doboru odpowiedniego materiału na drodze eksperymentalnej.

Odtwarzając część wyrobu, która odgrywała w nim rolę funkcjonalną, konieczne jest przygotowanie dokumentacji geometrycznej od podstaw. Informacje pozyskane ze skanowania (pomiaru) rzeczywistego obiektu mogą stanowić jedynie punkt odniesienia, na podstawie którego będzie można wybrać właściwe parametry konstrukcyjne korzystając z odpowiednich norm – szczególnie w przypadku konstruowania części o wymiarach znormalizowanych, takich jak koła zębate.

Badania przedstawione w pracy były częściowo finansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki (nr 2011/01/N/ST8/07603). NARODOWE CENTRUM NAUKI

LITERATURA

[1] PAJĄK E., DUDZIAK A., GÓRSKI F., WICHNIAREK R., 2011, *Techniki przyrostowe i wirtualna rzeczywistość w procesach przygotowania produkcji*, Promocja 21, Poznań.

[2] GÓRSKI F., KUCZKO W., WICHNIAREK R., 2013 *Application of rapid prototyping technology for manufacturing ergonomic multi-material functional prototypes*, Selected problems, Perfekta Info, Lublin.

[3] BĘDZA T., FRANKIEWICZ M., DYBAŁA B., CHLEBUS E., 2010, *Inżynieria odwrotna w procesie odtwarzania uszkodzonych lub zużytych części maszyn i narzędzi*, Górnictwo Odkrywkowe, Poltegor, Wrocław.

[4] BUDZIK G., PAJĄK D., 2010, *Metody inżynierii odwrotnej*, Stal Metale & Nowe Technologie, 11-12.

[5] KOWALSKI M., PASZKIEWICZ R., KUCZKO W., WICHNIAREK R., ZAWADZKI P., 2011, *Automatyzacja procesu skanowania na podstawie danych pozyskanych z pomiarów fotogrametrycznych*, Postępy Nauki i Techniki, 7, Lublin.

[6] BRANOWSKI B., 2007, *Podstawy konstrukcji napędów maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 380-383.

[7] KORZENIEWSKI H., 2006, *Uzębienie ewolwentowe kół trochoidalnych*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 26/2.

[8] WICHNIAREK R., GÓRSKI F., KUCZKO W., 2012, *Analiza wpływu stopnia wypełnienia modeli FDM na ich dokładność kształtową*, Przetwórstwo Tworzyw, 5/49.

[9] WEISS E., WARACZYŃSKI B., 2007, *Zastosowanie technologii Vacuum Casting do wytwarzania prototypów funkcjonalnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, 5.

[10] GÓRSKI F., WICHNIAREK R., ANDRZEJEWSKI J., 2012, *Wpływ orientacji części na wytrzymałość modeli z ABS wytwarzanych techniką modelowania uplastycznionym tworzywem sztucznym, Przetwórstwo Tworzyw* 5/149.

RE-CREATION OF WORN OR DAMAGED MACHINE PARTS USING REVERSE ENGINEERING AND RAPID MANUFACTURING TECHNIQUES

Keeping machines and devices in constant operation is an important criterion of success of manufacturing companies. In case when for some reason there is no access to technical documentation of particular sub-assemblies or there is no possibility of purchasing the spare parts, reduction of unwanted pauses in production caused by machine malfunction becomes a huge challenge. Application of reverse engineering and Rapid Manufacturing techniques allows to produce a functional replacement for the worn or destroyed part in a relatively short time. The paper presents methodology of measurement, re-creation of 3D documentation and manufacturing of a functional prototype of a helical gear for power transmission from electrical engine in a typographic device. A comparison of usability of parts manufactured using two technologies was prepared. The first technology was Fused Deposition Modeling – one of additive manufacturing technologies and the second technology was Vacuum Casting.