

Zastosowanie systemu optycznego ATOS II w technikach szybkiego prototypowania modeli kół zębatach otrzymywanych na bazie żywicy epoksydowej

Tomasz Dziubek^{1), *)}, Mariusz Oleksy²⁾

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.044](https://doi.org/10.14314/polimery.2017.044)

Streszczenie: Oceniano właściwości mechaniczne oraz przetwórcze kompozytów otrzymanych na osnowie żywicy epoksydowej (EP) i napełniaczy hybrydowych, zwłaszcza pod kątem ich zastosowania w metodach szybkiego prototypowania do wytwarzania modeli kół zębatach. Weryfikację dokładności odwzorowania kształtu geometrycznego modelu wykonano za pomocą bezstykowego systemu optycznego opartego na współrzędnościowym skanerze optycznym ATOS Triple Scan II Blue Light firmy GOM. Wytworzone kompozyty hybrydowe wykazywały znacznie lepsze właściwości mechaniczne niż nienapełniona żywica epoksydowa. Dzięki wprowadzeniu do osnowy EP hybrydowych napełniaczy uzyskano ograniczenie skurczu promieniowego i osiowego, co wpłynęło na radykalną poprawę dokładności odwzorowania kształtu geometrycznego odlewanych kół zębatach.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, skaner optyczny, dokładność geometryczna, modele kół zębatach, napełniacze.

Application of ATOS II optical system in the techniques of rapid prototyping of epoxy resin-based gear models

Abstract: The mechanical and processing properties of composites with epoxy resin (EP) matrix and hybrid fillers, especially with regard to their use in rapid prototyping methods for the preparation of gear models, were evaluated. The accuracy assessment of geometric model shape mapping was performed using a non-contact optical system based on the coordinate optical scanner ATOS Triple Scan II Blue Light from GOM company. The produced hybrid composites show much better mechanical properties than those of unfilled epoxy resin. By introducing the hybrid fillers into EP matrix, a reduction in radial and axial shrinkage was achieved, which led to a radical improvement in the accuracy of geometric shape mapping of gear castings.

Keywords: polymer composites, optical scanner, geometric accuracy, gear models, fillers.

Ocena dokładności wykonania prototypów kół zębatach wytwarzanych w procesie szybkiego prototypowania (ang. *Rapid Prototyping* – RP), w tym odlewania próżniowego (ang. *Vacuum Casting* – VC), może być realizowana z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej. Integracja systemów komputerowego wspomaganie projektowania (ang. *Computer-Aided Design* – CAD) i wytwarzania (ang. *Computer-Aided Manufacturing* – CAM/RP) oraz pomiarowych metod współrzędnościowych (WMP, ang. *Coordinate Measuring Machine* – CMM) pozwala na znaczne przyspieszenie

procesu produkcyjnego elementów przekładni zębatach wysokiej jakości [1–3].

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe ze względu na dokładność pomiaru, możliwości zastosowania dodatkowych aplikacji oraz zaawansowane oprogramowanie stanowią niezbędny element wyposażenia większości zakładów przemysłowych, uczelni i laboratoriów badawczych, szczególnie znaczenie maszyny te mają także w wypadku produkcji jednostkowej – wytwarzania elementów prototypowych [4, 5].

Pomiar i analiza dokładności wykonania kół zębatach są możliwe dzięki specjalistycznemu wyposażeniu maszyn pomiarowych, m.in. w komercyjne programy przeznaczone tylko do badań kół zębatach. Metodologia pomiarów kół zębatach bazuje głównie na pomiarach ewolwenty i często nie uwzględnia osiągnięć nowoczesnej techniki komputerowej, jak np. możliwości graficznej, równoległej współpracy z systemami CAD [6–8]. W wypadku prototypów kół zębatach otrzymy-

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn, ul. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Chemiczny, Katedra Technologii i Materiałoznawstwa Chemicznego, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów.

*) Autor do korespondencji; e-mail: tdziubek@prz.edu.pl

wanych metodami RP/CNC (ang. *Computerized Numerical Control*) na podstawie modelu 3D-CAD jest możliwe wykonanie pomiarów kół zębatych o dowolnych zarysach. Techniki komputerowe CAD/CAM/CAE (ang. *Computer-Aided Engineering*) zintegrowane z systemami RP/CNC umożliwiają rozszerzenie zakresu pomiarów bez użycia specjalistycznego oprogramowania współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP) do pomiaru kół zębatych. W tym wypadku jest niezbędne opracowanie odpowiedniej strategii procesu pomiarowego w celu efektywnego wykorzystania możliwości oprogramowania WMP.

Proces projektowania i wytwarzania, zamknięty pętlą sprzężenia zwrotnego w postaci analizy dokładności geometrycznej prototypu, pozwala na znaczne skrócenie czasu produkcji kół zębatych z jednoczesnym ograniczeniem kosztów [9–11].

METODY STYKOWE

Maszyny współrzędnościowe umożliwiają pomiar i identyfikację cech geometrycznych prototypu na podstawie wielu punktów pomiarowych, wyznaczanie najbardziej skomplikowanych odchyłek kształtu i położenia w jednym układzie współrzędnych bez konieczności zmiany zamocowań, a także pomiary inspekcyjne na bazie modelu CAD oraz sprzęgnięcie np. pomiarów współrzędnościowych w proces inżynierii odwrotnej (ang. *Reverse Engineering* – RE). Możliwości te wykorzystuje się w pomiarach kół zębatych o nietypowym zarysie [12–14].

Współrzędnościowa maszyna pomiarowa zawiera zespoły ruchome, które mogą się przemieszczać w trzech wzajemnie prostopadłych osiach. Wartości przesunięcia wzdłuż osi są wskazywane przez wzorce długości i przesyłane do pamięci elektronicznych zespołów sterujących [15].

Procedury pomiarowe we współrzędnościowej technice opierają się na założeniu, że mierzona typowa część składa się ze względnie prostych elementów geometrycznych, takich jak: punkt, prosta, płaszczyzna, okrąg, walec, kula, stożek. Postawą do wyznaczenia wymiarów są współrzędne punktów pomiarowych. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa pozwala ponadto na określenie relacji między podstawowymi elementami geometrycznymi i uzyskanie wymiarów z rzutowania oraz przekrojów konstrukcyjnych.

Współrzędnościowa technika pomiarowa jest klasyfikowana jako technika stykowa z wykorzystaniem głowic stykowych (pomiary punktowe, z ang. *probing*) oraz głowic skanujących (z ang. *scanning*). Zastosowanie dodatkowych aplikacji, takich jak głowice obrotowo-uchylne oraz magazyny wymienne końcówek i głowic pomiarowych, znacznie usprawnia pracę maszyn współrzędnościowych, rozszerza również ich możliwości pomiarowe, zwłaszcza w cyklu automatycznym. Dodatkowe aplikacje pomiarowe, oparte na głowicach optycznych (ang. *Charge-Coupled Device* – CCD) lub laserowych systemach pomiarowych, pozwalają na optymalizację i przyspieszenie procesu pomiarowego.

METODY BEZSTYKOWE

Koła zębate o nietypowych zarysach są trudne do weryfikacji i identyfikacji za pomocą tradycyjnych metod pomiarowych, co wynika z typowego przeznaczenia systemów i metod pomiarowych do kół zębatych o ewolwentowych zarysach zębów [16]. Identyfikacja i weryfikacja dokładności odwzorowania geometrii kół zębatych o zarysach innych niż ewolwentowe są możliwe dzięki zastosowaniu pomiarowych metod bezstykowych [17, 18].

Do bezdotykowych metod pomiaru geometrii 3D zalicza się:

- skanowanie laserowe skanerem ręcznym,
- skanowanie laserowe głowicą zainstalowaną na WMP,
- skanowanie optyczne,
- tomografię komputerową.

Skanowanie laserowe

Skanowanie laserowe umożliwia przeprowadzenie pomiarów elementów o złożonych kształtach. Może być realizowane za pomocą głowic skanujących zamocowanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej lub na ramieniu pomiarowym oraz z zastosowaniem samopozycjonującego się laserowego skanera ręcznego. Urządzenia tego typu pozwalają na przekształcanie w procesie digitalizacji obiektów geometrycznych w trójwymiarową postać cyfrową. Skanery umożliwiają pomiary geometrii obiektów o różnych gabarytach. Możliwe jest też skanowanie nieprzezroczystych obiektów o matowej powierzchni [19–22].

Działanie samopozycjonujących się skanerów obejmuje zazwyczaj dwa powiązane ze sobą procesy – triangulacji laserowej oraz detekcji markerów. Triangulacja jest realizowana przez pomiar w dwóch prostopadłych kierunkach w układzie krzyżowym. Dane uzyskane z pomiarów triangulacyjnych są łączone w jeden obiekt w trybie procesu detekcji markerów (rys. 1). Markerami należy wcześniej okleić, nieregularnie, model lub specjalną matę, na której jest umieszczony (jeśli skanowany obiekt ma małe rozmiary), dzięki czemu skaner rozpoznaje swoją orientację względem przedmiotu. Skaner



Rys. 1. Proces skanowania skanerem ZScanner 700
Fig. 1. Scanning process using ZScanner 700

ręczny podczas pomiaru jest przemieszczany swobodnie przez operatora wokół mierzonego obiektu. Odmianą takiego rozwiązania jest dowolność względnego położenia obiektu i skanera, wyeliminowana jest ponadto konieczność wykonywania kilku chmur punktów z różnych ustawień skanera i późniejszego ich łączenia.

Skanowanie optyczne

Optyczny skaner bezdotykowy umożliwia pomiar i dokładne odtworzenie geometrii obiektów o złożonych kształtach, także kół zębatach. Podstawą procesu skanowania jest tu analiza ugięcia linii w serii obrazów prążkowych rzutowanych na obiekt. Na powierzchni płaskiej prążki takie są względem siebie równoległe. Na krzywoliniowej powierzchni skanowanego obiektu ulegają ugięciu wynikającemu z jego ukształtowania. Ugięcie jest rejestrowane przez kamerę (akwizycja danych) i przetwarzane za pomocą algorytmów uwzględniających parametry układu optycznego systemu. Uzyskany zbiór (chmura) punktów o współrzędnych x , y , z stanowi komputerowe odwzorowanie powierzchni skanowanego obiektu [23].

Oprogramowanie systemów skanujących pozwala na: łączenie obrazów skanowanych w celu uzyskania całej powierzchni pomiarowej, usuwanie szumów pomiarowych, uzupełnianie brakujących elementów powierzchni oraz wykonanie gotowego modelu 3D-CAD. Moduły programowe umożliwiają zapis chmury punktów w postaci pliku STL, wczytanie modelu 3D-CAD skanowanego elementu i wykonanie analizy dokładności pomiaru. Dokładność wyników pomiaru zależy od wielu czynników, m.in. od zastosowanej głowicy pomiarowej i pola pomiarowego powierzchni mierzonego obiektu oraz rodzaju światła emitowanego przez projektor głowicy.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Do przygotowania kompozytów wykorzystano następujące surowce:

– haloizyt modyfikowany oktakis(tetrametyloamoni)oktasilseskwioksanem (HP1), zgodnie z procedurą opisaną w patencie [24];

– haloizyt modyfikowany oktakis[3-[N-(hydroksyetylo)dimetyloamino]propylo]oktasilseskwioksanem (HP2), zgodnie z procedurą opisaną w patencie [19];

– krzemionkę modyfikowaną 20 cz. mas. mono[3-(2-aminoetyloamino)propylo]hepta(izobutylo)oktasilseskwioksanu (IHSP3), zgodnie z procedurą opisaną w zgłoszeniu patentowym [25], dostarczoną przez zespół prof. T. Jesionowskiego z Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej;

– wodorotlenek glinu $Al(OH)_3$, o nazwie handlowej APYRAL 200 SM (AP), wyprodukowany przez firmę Nabtec (Niemcy);

– żywicę epoksydową Epidian 6 (EP) wraz z utwardzaczem Z-1 (Z1), dostarczoną przez Zakłady Chemiczne „Organika-Sarzynia” Grupa Ciech w Nowej Sarzynie.

Przygotowanie dwuskładnikowej kompozycji żywicy poliuretanowej z napełniaczem

Skład kompozycji EP z napełniaczami przedstawiono w tabeli 1. Kompozycje przygotowywano kilkietapowo. Żywicę EP wstępnie wymieszano z badanymi napełniaczami przy użyciu wolnoobrotowego mieszadła mechanicznego, a następnie w celu lepszego zdyspergowania napełniacza w żywicy zastosowano:

– mieszanie w szybkoobrotowym mikserze z mieszadłem turbinowym w temp. 50 °C, z szybkością obrotową mieszadła 5000 min⁻¹, w ciągu 30 min;

– homogenizację przez 15 min w ucieraku typu cylinder-cylinder o niewielkiej szczelinie 0,75 mm, z prędkością obrotową ruchomego cylindra zapewniającą intensywne ścinanie równą 4000 min⁻¹;

– mieszanie w ciągu 20 min za pomocą homogenizatora ultradźwiękowego mieszalniny o temp. 50 °C.

Tak przygotowane kompozycje przechowywano w temp. ok. 4 °C w celu zapobiegnięcia sedymentacji napełniaczy i pogorszeniu właściwości przetwórczych mieszanek.

Otrzymywanie kształtek do badań wytrzymałościowych oraz prototypów kół zębatach z kompozytów na osnowie EP

Kompozycje na osnowie żywicy Epidian 6 utwardzano za pomocą utwardzacza Z-1 (13 % mas.), zgodnie z zaleceniami producenta żywic. Następnie kompozycje odpowietrzano w laboratoryjnej komorze próżniowej VAKUUM UHG 400 (firmy Schuechl, Niemcy) i odlewano w temp. 40 °C do form silikonowych przygotowanych zgodnie z normą ISO 527-1:1998. Kształtki oraz prototypy kół zębatach utwardzano w temperaturze pokojowej przez 24 h, a następnie dotwardzano w temp. 100 °C przez 6 h. Po upływie dwóch dni kształtki badano zgodnie z odpowiednimi normami.

Metody badań

Właściwości mechaniczne

– Wytrzymałość na rozciąganie określano zgodnie z normą ISO 527-1:1998 za pomocą maszyny wytrzymałościowej typu INSTRON 5967 zaopatrzonej w wideoekstensometr. Prędkość rozciągania wynosiła 2 mm/min, temperatura pomiarów 23 °C.

– Twardość wg Rockwella oznaczano z wykorzystaniem twardościomierza ZWICK 3106, zgodnie z normą EN 10109-1. Stosowano obciążenie wgłębnika równe 358 N. Jako wynik końcowy przyjęto średnią arytmetyczną z co najmniej 10 pomiarów.

– Udarowość wg Charpy'ego wyznaczano zgodnie z normą PN-EN ISO 179-1 za pomocą aparatu typu PSW4J pro-

T a b e l a 1. Skład badanych kompozytów na osnowie żywicy epoksydowej

T a b l e 1. Composition of tested composites with epoxy resin matrix

Symbol kompozytu	Zawartość HP1 % mas.	Zawartość HP2 % mas.	Zawartość napelniacza hybrydowego IHSP3, % mas.	Zawartość AP % mas.
EPHP1-1,5	1,50	–	–	–
EPHP1-3,0	3,00	–	–	–
EPHP1-4,5	4,50	–	–	–
EPIHSP3-1,5	–	–	1,50	–
EPIHSP3-3,0	–	–	3,00	–
EPIHSP3-4,5	–	–	4,50	–
EPHP1IHSP3-1,5	0,75	–	0,75	–
EPHP1IHSP3-3,0	1,50	–	1,50	–
EPHP1IHSP3-4,5	2,25	–	2,25	–
EPHP2-1,5	–	1,50	–	–
EPHP2-3,0	–	3,00	–	–
EPHP2-4,5	–	4,50	–	–
EPHP2IHSP3-1,5	–	0,75	0,75	–
EPHP2IHSP3-3,0	–	1,50	1,50	–
EPHP2IHSP3-4,5	–	2,25	2,25	–
EPAP-1,5	–	–	–	1,50
EPAP-3,0	–	–	–	3,00
EPAP-4,5	–	–	–	4,50
EPHP1AP-1,5	0,75	–	–	0,75
EPHP1AP-3,0	1,50	–	–	1,50
EPHP1AP-4,5	2,25	–	–	2,25
EPHP2AP-1,5	–	0,75	–	0,75
EPHP2AP-3,0	–	1,50	–	1,50
EPHP2AP-4,5	–	2,25	–	2,25

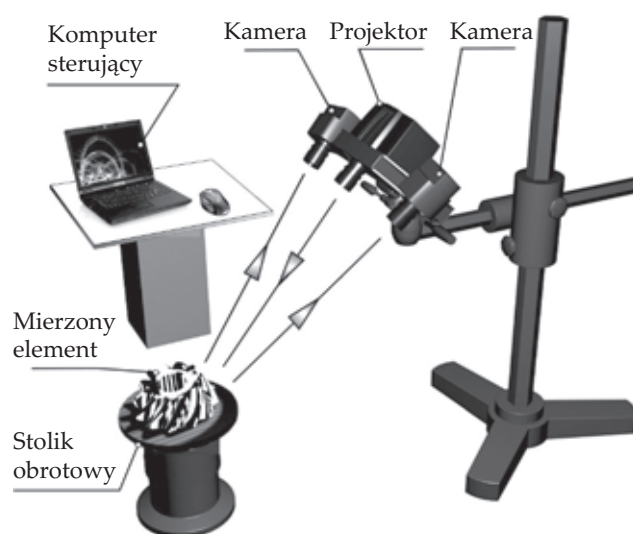
dukcji Gerhard Zorn (Niemcy), z wykorzystaniem młota o energii uderowej 1 J, z cyfrowym odczytem wyniku.

Pomiary współrzędnościowe prototypów kół zębanych

Analizę dokładności odwzorowania kształtu geometrycznego wytworzonych kół zębanych wykonano z zastosowaniem bezstykowego systemu optycznego opartego na współrzędnościowym skanerze optycznym ATOS Triple Scan II Blue Light firmy GOM w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej (rys. 2, rys. 3). Działanie optycznego skanera ATOS II, wykorzystujące światło niebieskie, umożliwia pomiar niemal niezależnie od natężenia światła dziennego lub sztucznego (białego). Pozwala to na włączenie systemu pomiarowego w cykl produkcyjny, bez konieczności tworzenia specjalnych warunków do prowadzenia badań. Zastosowanie w procesie skanowania światła niebieskiego pozwala również na znaczne skrócenie czasu pomiaru, m.in. dzięki zmniejszeniu wpływu otoczenia na proces skanowania [26–28].

Do badań stosowano stół obrotowy zintegrowany z systemem pomiarowym ATOS. Wprowadzenie automatyzacji pozwoliło na znaczne przyspieszenie procesu pomiarowego i częściowe wyeliminowanie konieczności

ści manualnej zmiany położenia skanowanego obiektu. Jeżeli do automatyzacji pomiarów stosuje się stół obrotowy, wówczas markerami można okleić zarówno mierzony element, jak i powierzchnię czynną stołu. W ta-



Rys. 2. System skanowania optycznego ATOS
Fig. 2. Optical scanning system ATOS



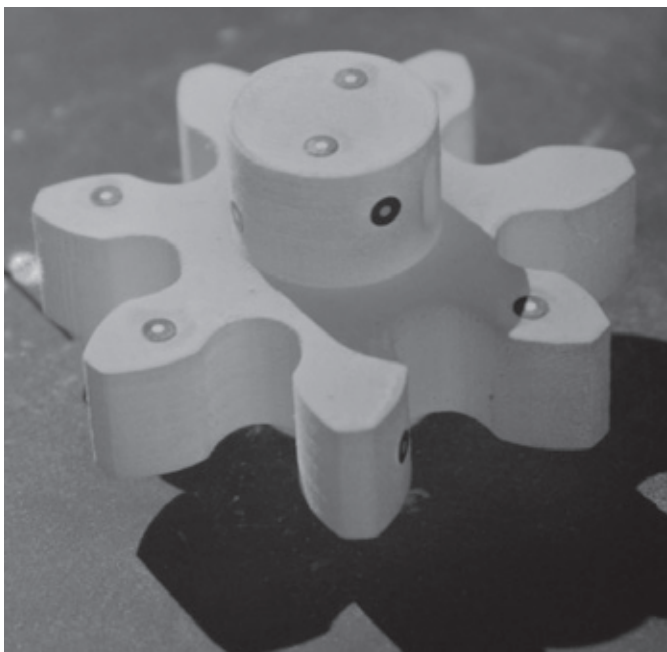
Rys. 3. Skanowanie koła zębatego za pomocą systemu optycznego ATOS Triple Scan II Blue Light

Fig. 3. Scanning the gear with ATOS Triple Scan II Blue Light optical system

kim wypadku należy zachować stałą pozycję mierzonego obiektu względem punktów referencyjnych stołu. W celu skrócenia obróbki danych w oprogramowaniu GOM Inspect skanera ATOS II wprowadzono dodatkowo opcję automatycznego dopasowania chmur punktów bez konieczności stosowania znaczników referencyjnych.

Kalibrację systemu pomiarowego ATOS Triple Scan II przeprowadzono zgodnie z procedurą określoną przez producenta, na podstawie pomiaru płyty kalibracyjnej o wymiarach dostosowanych do pola pomiarowego.

Przygotowanie stanowiska pomiarowego obejmowało również rozmieszczenie punktów referencyjnych na stole obrotowym, a następnie zeskanowanie ich rozmieszczenia – stanowiło to bazę do wykonania właściwych pomiarów.



Rys. 4. Koło zębate pokryte kredą antyrefleksyjną z zaznaczonymi punktami referencyjnymi (markerami)

Fig. 4. View of the gear coated by anti-reflection chalk with marked reference points (markers)

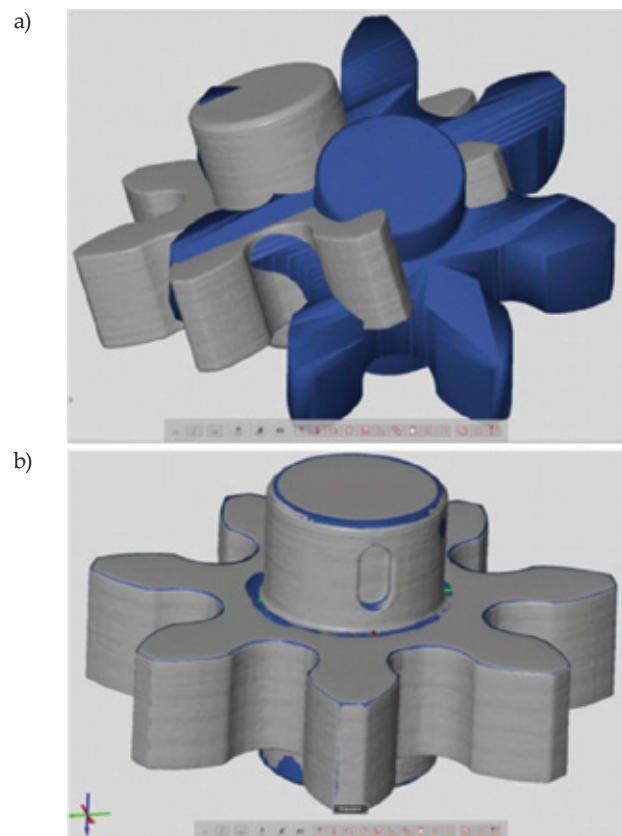
Wszystkie badane koła zębate przygotowano do pomiaru w taki sam sposób, tzn. naklejono punkty referencyjne, pokryto kredą antyrefleksyjną, po czym oczyszczono z kredy punkty referencyjne (rys. 4). Umieszczenie punktów referencyjnych na stole pomiarowym pozwoliło na zmniejszenie ich liczby na skanowanych kołach zębatych.

Wyniki pomiarów analizowano za pomocą programu GOM Inspect Professional V7.5 w odniesieniu do modeli nominalnych 3D-CAD (rys. 5) wykonanych wcześniej w programie CATIA.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Właściwości mechaniczne wytworzonych nanokompozytów hybrydowych

Wpływ zastosowanych nanonapełniaczy na właściwości mechaniczne kompozytów na osnowie żywicy EP oceniano na podstawie oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie, modułu Younga, twardości wg Rockwella i uderności wg Charpy'ego (tabela 2). Zaobserwowano wyraźną poprawę badanych cech wytrzymałościowych kompozytów napełnionych HP1, HP2 i IHSP3 w odniesieniu do właściwości nienapełnionej żywicy EP. Wpływ



Rys. 5. a) Proces nakładania, z zastosowaniem programu GOM Inspect V7.5, kształtów geometrycznych modelu badawczego i modelu nominalnego 3D-CAD, b) wynik tej operacji

Fig. 5. a) Process of reproducing geometrical shapes of the research and 3D-CAD nominal models using GOM Inspect V7.5 software, b) the result of this operation

Tabela 2. Właściwości mechaniczne kompozytów na osnowie żywicy epoksydowej

T a b l e 2. Mechanical properties of composites with epoxy resin matrix

Symbol kompozytu	Naprężenie zrywające, MPa	Moduł Younga GPa	Udarność według Charpy'ego, kJ/m ²	Twardość Rockwella MPa
EP	46,9 ± 1,1	2,99 ± 0,23	4,21 ± 0,49	144,9 ± 1,2
EPHP1-1,5	51,2 ± 0,8	3,11 ± 0,10	5,93 ± 0,29	140,9 ± 1,3
EPHP1-3,0	62,1 ± 0,9	3,29 ± 0,09	7,79 ± 0,31	138,9 ± 1,9
EPHP1-4,5	63,4 ± 1,3	3,36 ± 0,16	7,92 ± 0,43	137,1 ± 2,1
EPIHSP3-1,5	52,8 ± 1,2	3,14 ± 0,18	4,65 ± 0,63	156,8 ± 1,9
EPIHSP3-3,0	63,8 ± 0,6	3,31 ± 0,09	6,18 ± 0,24	167,5 ± 1,1
EPIHSP3-4,5	64,2 ± 0,7	3,42 ± 0,16	5,91 ± 0,61	171,3 ± 1,3
EPHP1IHSP3-1,5	55,2 ± 1,2	3,21 ± 0,09	6,32 ± 0,26	144,4 ± 1,2
EPHP1IHSP3-3,0	67,2 ± 0,8	3,55 ± 0,13	8,36 ± 0,19	155,2 ± 1,6
EPHP1IHSP3-4,5	67,1 ± 1,4	3,61 ± 0,08	7,99 ± 0,23	157,2 ± 1,3
EPHP2-1,5	48,2 ± 0,7	3,11 ± 0,12	5,64 ± 0,18	143,1 ± 1,1
EPHP2-3,0	59,1 ± 1,1	3,23 ± 0,10	7,44 ± 0,26	141,9 ± 1,2
EPHP2-4,5	60,3 ± 1,3	3,35 ± 0,07	6,73 ± 0,32	139,9 ± 1,1
EPHP2IHSP3-1,5	52,4 ± 1,0	3,25 ± 0,09	5,99 ± 0,31	144,9 ± 1,1
EPHP2IHSP3-3,0	65,2 ± 0,9	3,47 ± 0,12	7,49 ± 0,21	155,5 ± 1,4
EPHP2IHSP3-4,5	65,9 ± 1,2	3,59 ± 0,11	7,73 ± 0,41	157,2 ± 0,9
EPAP-1,5	48,2 ± 1,6	2,52 ± 0,13	4,34 ± 0,26	155,3 ± 1,4
EPAP-3,0	56,3 ± 1,4	2,91 ± 0,14	6,42 ± 0,12	162,2 ± 1,3
EPAP-4,5	58,7 ± 1,3	3,05 ± 0,10	7,16 ± 0,11	178,7 ± 1,2
EPHP1AP-1,5	50,8 ± 1,1	3,02 ± 0,12	5,14 ± 0,17	149,1 ± 1,1
EPHP1AP-3,0	60,9 ± 1,2	3,18 ± 0,09	7,31 ± 0,19	158,4 ± 1,3
EPHP1AP-4,5	62,6 ± 1,1	3,26 ± 0,11	8,14 ± 0,11	162,6 ± 1,7
EPHP2AP-1,5	49,2 ± 1,0	2,92 ± 0,12	4,81 ± 0,15	149,3 ± 1,1
EPHP2AP-3,0	58,3 ± 1,3	3,09 ± 0,12	7,11 ± 0,11	156,1 ± 1,6
EPHP2AP-4,5	59,7 ± 1,1	3,16 ± 0,08	7,79 ± 0,16	165,1 ± 1,2

na wytrzymałość kompozytów ma także stężenie cząstek napełniacza w żywicy; optymalna ich zawartość wynosi 3 % mas. (tabela 2). Najlepsze właściwości wytrzymałościowe wykazywały kompozyty żywicy EP z dodatkiem nanonapełniaczy HP1 i IHSP3. W odniesieniu do wartości odpowiadających nienapełnionej EP naprężenie zrywające zwiększyło się o ok. 43 %, moduł Younga – o ok. 19 %, udarność – o ok. 98 %, twardość – o ok. 8 % (tabela 2).

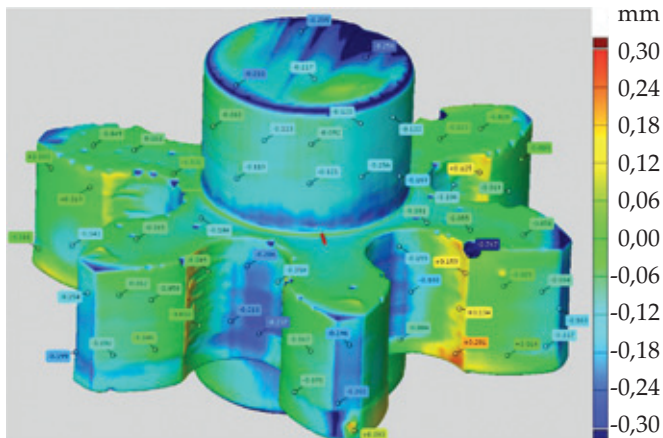
W wypadku kompozytów hybrydowych EP napełnionych HP1 z dodatkiem AP naprężenie zrywające zwiększyło się o ok. 33 %, moduł Younga – o ok. 9 %, udarność – o ok. 93 %, twardość – o 13 % (tabela 2).

Dokładność odwzorowania kształtu geometrycznego kół zębatach

Badaniom poddano odlewy, po wcześniejszym usunięciu kanału wlewowego i kanałów odpowietrzających, kół zębatach (rys. 4) otrzymane z nienapełnionej żywicy poliestrowej i z kompozytów hybrydowych na osnowie EP. Protokoły pomiarowe (rys. 6 i 7) określają dokładność

odwzorowania kształtów geometrycznych modelu badawczego koła zębatego, wytworzonych z nienapełnionej żywicy epoksydowej.

Analiza dokładności wykonania kół zębatach może być przedstawiona w programie GOM Inspect V7.5 w postaci szczegółowych odchyłek wymiarów określonych w wybranych punktach powierzchni koła (rys. 6) oraz określonych profili przekroju wieńca koła (rys. 7). Ze względu na dużą objętość szczegółowego raportu z pomiaru przedstawiono tu tylko wybrane wielkości. Na podstawie porównania badanych kół zębatach wytworzonych z nienapełnionej żywicy epoksydowej (EP) z modelami nominalnymi 3D-CAD można stwierdzić wyraźne rozbieżności wymiarów (rys. 6 i 7), zawierające się w przedziale -0,285 – +0,047 mm. Występowanie rozbieżności w wymiarach górnej krawędzi piasty i zębów modelu nominalnego oraz badanych kół mogą wynikać z niedokładnej obróbki mechanicznej w miejscach po usuniętych kanałach: wlewowym i odpowietrzających. Wpływ na takie istotne różnice w wymiarach kół badawczych przede wszystkim miał skurcz przetwórczy nienapełnionej żywicy.



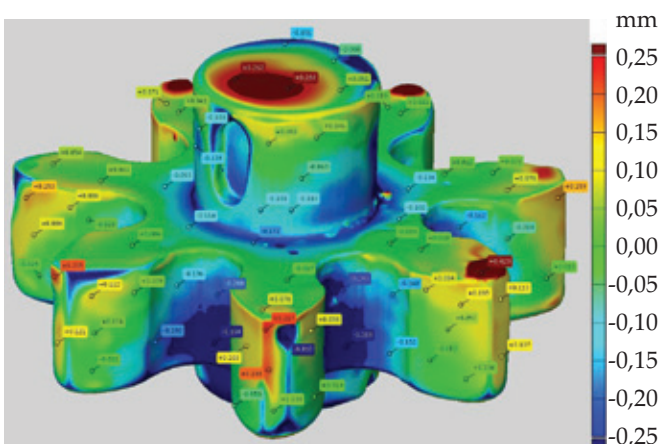
Rys. 6. Szczegółowe zestawienie odchyłek wymiarów odlewu koła zębatego wytworzonego z nienapełnionej żywicy epoksydowej

Fig. 6. Detailed list of dimensional deviations of gear casting produced from unfilled epoxy resin

Następnie wykonano pomiary dokładności wymiarowej kół zębatych wytworzonych z badanych kompozytów, wyniki zestawiono w tabeli 3 oraz na rys. 8–11.

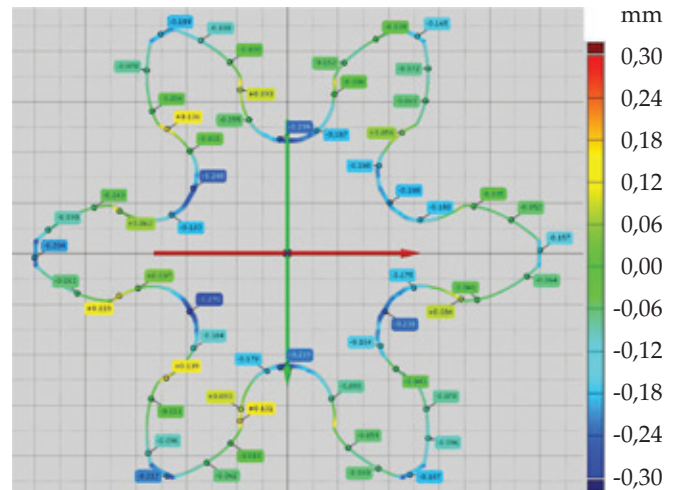
W wypadku kół zębatych wytworzonych z nanokompozytu hybrydowego zawierającego 3 % mas. mieszaniny modyfikowanego haloizytu (HP1) i modyfikowanej krzemionki (IHSP3) nie zaobserwowano niekorzystnego wpływu zjawiska skurczu przetwórczego (tabela 3). Stwierdzono natomiast nieznaczne zwiększenie wymiarów kół w stosunku do wymiarów modelu nominalnego (tabela 3, rys. 10, 11), co może wynikać z większych wymiarów matrycy silikonowej gniazda formującego lub jej elastycznego charakteru. Wpływ wymiarów gniazda formującego na dokładność odwzorowania kształtu geometrycznego kół zębatych będzie przedmiotem kolejnych badań.

Otrzymane wyniki wskazują, że wykonane nanokompozytowe modele odlewnicze z powodzeniem mogą być stosowane na etapie testów technologicznych nowych



Rys. 8. Szczegółowe zestawienie odchyłek wymiarów odlewu koła zębatego wytworzonego z kompozytu EPHP1-3,0

Fig. 8. Detailed list of dimensional deviations of gear casting produced from EPHP1-3,0 composite

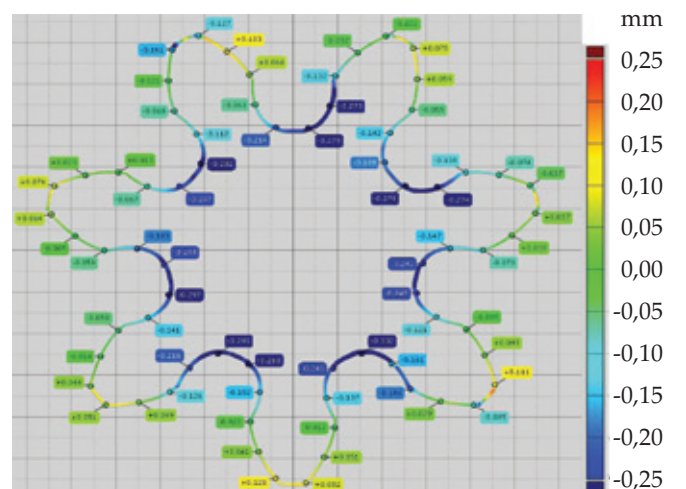


Rys. 7. Szczegółowe zestawienie odchyłek wymiarów profilu odlewu koła zębatego wytworzonego z nienapełnionej żywicy epoksydowej

Fig. 7. Detailed list of dimensional deviations of the profile of gear casting produced from unfilled epoxy resin

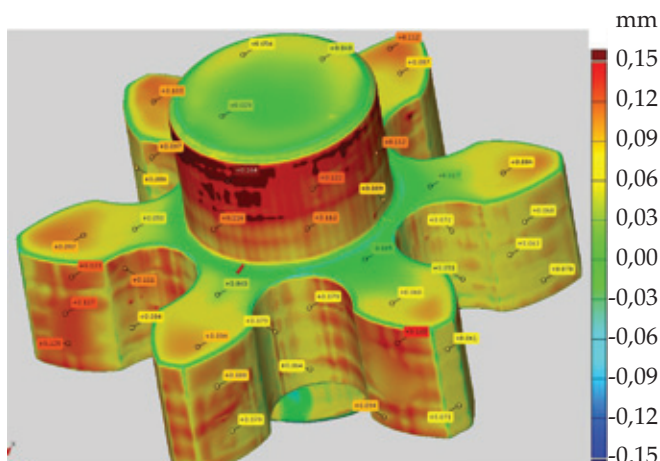
wyrobów. Zauważalne różnice dokładności odwzorowania kształtu geometrycznego modeli kół zębatych wytworzonych z nienapełnionej żywicy epoksydowej i z hybrydowych kompozytów na osnowie EP są wynikiem skurczu przetwórczego nienapełnionej żywicy. Dodatek napełniaczy wyraźnie go ograniczył, co umożliwiło uzyskanie lepszej zgodności wymiarowej odlewanych kół i modelu nominalnego 3D-CAD.

Technologia *Rapid Tooling – Vacuum Casting* pozwala na zwiększenie efektywności procesu technologicznego i wytworzenie z dużą dokładnością kompozytowych modeli odlewniczych kół zębatych. Analiza dokładności odwzorowania kształtu geometrycznego kół zębatych z zastosowaniem skanującego systemu optycznego ATOS Triple Scan II może być realizowana na wszystkich etapach procesu tech-



Rys. 9. Szczegółowe zestawienie odchyłek wymiarów profilu odlewu koła zębatego wytworzonego z kompozytu EPHP1-3,0

Fig. 9. Detailed list of dimensional deviations of the profile of gear casting produced from EPHP1-3,0 composite

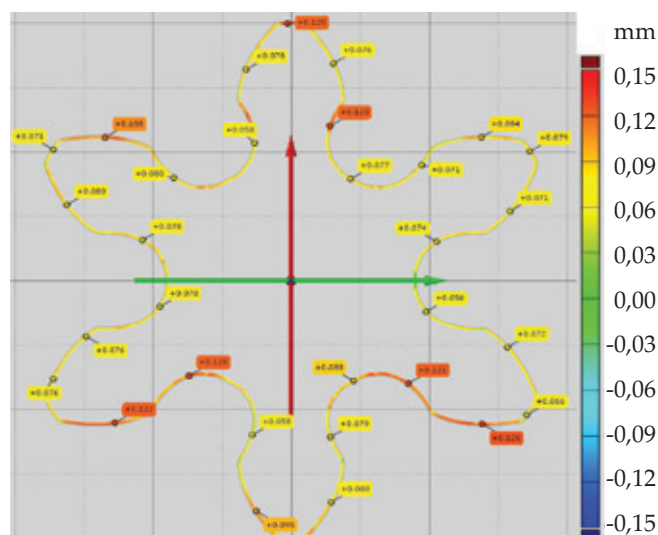


Rys. 10. Szczegółowe zestawienie odchyłek wymiarów odlewu koła zębatego wytworzonego z kompozytu EPHP1IHSP3-3,0
Fig. 10. Detailed list of dimensional deviations of gear casting produced from EPHP1IHSP3-3,0 composite

T a b e l a 3. Średni zakres zmian w wymiarach badanych kół zębatych otrzymanych z nienapełnionej żywicy epoksydowej i kompozytów na jej osnowie

T a b l e 3. Average range of change in the dimension of tested gears made of unfilled epoxy resin and its composites

Symbol kompozytu	Średni zakres zmian, mm
EP	od -0,285 do +0,047
EPHP1-1,5	od -0,009 do +0,101
EPHP1-3,0	od +0,018 do +0,146
EPHP1-4,5	od +0,011 do +0,152
EPIHSP3-1,5	od -0,011 do +0,119
EPIHSP3-3,0	od +0,012 do +0,121
EPIHSP3-4,5	od +0,014 do +0,136
EPHP1IHSP3-1,5	od -0,004 do +0,132
EPHP1IHSP3-3,0	od -0,001 do +0,164
EPHP1IHSP3-4,5	od +0,001 do +0,157
EPHP2-1,5	od -0,009 do +0,206
EPHP2-3,0	od +0,001 do +0,161
EPHP2-4,5	od +0,003 do +0,187
EPHP2IHSP3-1,5	od -0,007 do +0,201
EPHP2IHSP3-3,0	od -0,001 do +0,196
EPHP2IHSP3-4,5	od +0,001 do +0,203
EPAP-1,5	od -0,041 do +0,146
EPAP-3,0	od -0,034 do +0,158
EPAP-4,5	od -0,012 do +0,175
EPHP1AP-1,5	od -0,010 do +0,198
EPHP1AP-3,0	od +0,005 do +0,177
EPHP1AP-4,5	od +0,005 do +0,201
EPHP2AP-1,5	od -0,029 do +0,165
EPHP2AP-3,0	od -0,022 do +0,131
EPHP2AP-4,5	od -0,002 do +0,142



Rys. 11. Szczegółowe zestawienie odchyłek wymiarów profilu odlewu koła zębatego wytworzonego z kompozytu EPHP1IHSP3-3,0

Fig. 11. Detailed list of dimensional deviations of the profile of gear casting produced from EPHP1IHSP3-3,0 composite

nologicznego ich wytwarzania. Bezstykowy charakter metody umożliwia już pomiar modelu wykonanego w przyrostowym procesie szybkiego prototypowania, a pomiary i analizy są dokładniejsze niż pomiary stykowe. Z tego względu celowe jest wdrażanie takich metod pomiarowych w zakładach przemysłu maszynowego i lotniczego.

PODSUMOWANIE

Wytworzone kompozyty hybrydowe wykazywały znacznie lepsze właściwości wytrzymałościowe w porównaniu z właściwościami nienapełnionej żywicy: większe wartości udarowości bez karbu, naprężenia zrywającego oraz modułu Younga.

Dzięki wprowadzeniu do osnowy EP kombinacji hybrydowych napełniaczy uzyskano ograniczenie skurczu promieniowego i osiowego kompozytów, co wpłynęło na większą dokładność wymiarową odlewanych kół zębatych, zapewniającą poprawne działanie przekładni zębatej. Najlepsze odwzorowanie wymiarów formy odlewniczej wykazywały modele kół zębatych wytworzonych z kompozytu zawierającego 1,5 % mas. modyfikowanego haloizytu HP1 i 1,5 % mas. modyfikowanej krzemionki IHSP3.

Zastosowanie bezstykowych optycznych systemów pomiarowych umożliwiło pełną ocenę dokładności wykonania prototypów kół zębatych z różnych rodzajów otrzymanych nanokompozytów na osnowie EP.

LITERATURA

- [1] Budzik G.: *Archives of Foundry Engineering* **2007**, 7, 83.
- [2] Dziubek T., Zaborniak M.: *Scientific and Research Journal of Western Scientific Centre of Ukrainian Transport Academy*, Lwów **2009**, 17, 101.

- [3] Goch G.: *Gear Metrology, CIRP of Annals – Manufacturing Technology* **2003**, 52, 659.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60209-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60209-1)
- [4] PN-ISO 1328-1 Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Odchyłki jednoimiennych boków zębów.
- [5] PN-ISO 1328-2 Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Odchyłki złożone promieniowe oraz odchyłki bicia.
- [6] Haertig F., Lotze W.: *Laser Metrology and Machine Performance* **2001**, nr 5.
- [7] Jakubiec W., Malinowski J.: „Metrologia wielkości geometrycznych”, WNT, Warszawa 1993.
- [8] Marciniak A., Dziubek T., Zaborniak M.: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej **2008**, 75, 97.
- [9] Marciniak A., Dziubek T., Zaborniak M.: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej **2008**, 75, 107.
- [10] Neumann H.J.: “Industrial Coordinate Metrology”, Verlag Moderne Industrie, Lansberg am Lech 2000.
- [11] Ratajczyk E.: „Współrzędnościowa technika pomiarowa”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [12] Budzik G., Marciniak A., Markowski T. i in.: *Archives of Foundry Engineering* **2009**, 9, 137.
- [13] Budzik G., Kozik B., Sobolewski B. i in.: “Management of technology. Step to sustainable production, integrations of CAD and RP systems for aeronautical planetary gear demonstrator manufacturing”, University of Zagreb, Zagreb 2012, str. 303.
- [14] Jaskólski J., Budzik G., Grzelka M. i in.: *Combustion Engines* **2009**, 11, 416.
- [15] Budzik G.: „Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [16] Budzik G., Markowski T., Oleksy M., Grzelka M.: *Miesięcznik Naukowo-Techniczny Pomiary, Automatyka, Kontrola* **2010**, 1, 18.
- [17] Krolczyk G., Raos P., Legutko S.: *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette* **2014**, 21, 217.
- [18] Grzelka M., Chajda J., Budzik G. i in.: *Archives of Foundry Engineering* **2010**, 10, 255.
- [19] Budzik G., Dziubek T., Zaborniak M.: „Określenie chwilowego śladu styku przekładni zębatach z zastosowaniem metod szybkiego prototypowania” (red. Budzik G.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011, str. 131.
- [20] Budzik G., Dziubek T., Markowska O. i in.: *STAL Metale & Nowe Technologie* **2011**, 5–6, 54.
- [21] Dziubek T.: „Analiza współrzędnościowych systemów pomiarowych kół zębatach”, Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2012.
- [22] Dziubek T., Pisula J.: *Mechanik* **2013**, 2, 1.
- [23] Budzik G., Bernaczek J., Dziubek T. i in.: *STAL Metale & Nowe Technologie* **2012**, 3–4, 42.
- [24] *Zgłosz. pat.* P-397 541 (2011).
- [25] *Zgłosz. pat.* P-406 559 (2013).
- [26] Lazarz B., Wojnar G., Czech P.: *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* **2011**, 1, 68.
- [27] Budzik G., Kozik B., Pacana J.: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* **2013**, 85, 453.
<http://dx.doi.org/10.1108/AEAT-10-2012-0197>
- [28] Budzik G., Burek J., Bazan A. i in.: *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering* **2016**, 62, 11.
<http://dx.doi.org/10.5545/sv-ime.2015.2699>

