

# Kompozyty handlowych nienasyconych żywic poliestrowych z dodatkiem nanonapełniaczy Nanobent<sup>®</sup>

## Cz. II. Nanokompozyty z udziałem krajowych nanonapełniaczy stosowane w technologii *Vacuum Casting*

Romana Śliwa<sup>1)</sup>, Mariusz Oleksy<sup>2), \*</sup>, Olimpia Markowska<sup>3)</sup>, Grzegorz Budzik<sup>3)</sup>, Tomasz Dziubek<sup>3)</sup>, Małgorzata Zaborniak<sup>3)</sup>, Justyna Czech-Polak<sup>2)</sup>, Maciej Heneczkowski<sup>2)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.016](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.016)

**Streszczenie:** Zbadano możliwości wykorzystania nanokompozytów na podstawie nienasyconych żywic poliestrowych (UP) (Polimal<sup>®</sup> 103 i Polimal<sup>®</sup> 109) z dodatkiem nanonapełniaczy Nanobent<sup>®</sup> (ZR1 i ZR2) w technologii *Vacuum Casting* (VC). Oceniono reaktywność (czas żelowania i maksymalną temperaturę utwardzania) kompozycji odlewniczych oraz ich właściwości tiksotropowe, wpływające w istotny sposób na przebieg procesu technologicznego wytwarzania prototypów kół zębatach w matrycach silikonowych. Za pomocą systemu optycznego ATOS II Triple Scan Blue Light firmy GOM oznaczono zależność dokładności wymiarów geometrycznych otrzymanych modeli kół zębatach od rodzaju nanonapełniacza i jego zawartości w kompozycie.

**Słowa kluczowe:** nienasycona żywica poliestrowa, czas żelowania, tiksotropia, nanonapełniacze, nanokompozyty, koła zębata, matryca silikonowa, technologia *Vacuum Casting*.

### Composites of commercial unsaturated polyester resins containing nanofillers Nanobent<sup>®</sup>. Part II. Nanocomposites with domestic nanofillers applied in *Vacuum Casting* technology

**Abstract:** The possibility of application of nanocomposites based on unsaturated polyester resin matrix (Polimal<sup>®</sup> 103 and Polimal<sup>®</sup> 109) and nanofillers Nanobent<sup>®</sup> (ZR1 and ZR2) in *Vacuum Casting* technology (VC) was investigated. The reactivity of the molding compositions (gel time and maximum curing temperature) as well as their thixotropic properties, which have an important impact on the technology process of prototyping gears in silicone matrices, were assessed. Using the optical measuring system ATOS II Triple Scan Blue Light (GOM) the dependence of geometric dimension accuracy of the gear wheel models on the type of nanofiller and its content in the composite was determined.

**Keywords:** unsaturated polyester resin, gel time, thixotropy, nanofillers, nanocomposites, gear wheels, silicone matrix, *Vacuum Casting* technology.

Niniejsza publikacja stanowi kontynuację badań dotyczących kompozytów na bazie handlowych nienasyconych żywic poliestrowych z dodatkiem nanonapełniaczy Nanobent<sup>®</sup>. W Cz. I [1] przedstawiono wyniki badań

wytrzymałościowych (wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga, udarność wg Charpy'ego oraz twardość wg Rockwella), strukturalnych (SEM, TEM, FT-IR i WAXS) oraz palności (LOI i zapalność) takich kompozytów stosowanych potencjalnie jako elementy konstrukcji lotniczych. Część II obejmuje badania przydatności ww. kompozytów do otrzymywania modeli kół zębatach z wykorzystaniem technologii *Vacuum Casting* (VC).

Tworzywa polimerowe są szeroko wykorzystywane w budowie maszyn, zakres ich zastosowania jest jednak ograniczony ze względu na nie zawsze zadowalające właściwości użytkowe. Rozwój materiałów polimerowych jest więc ukierunkowany na otrzymywanie tworzyw wzmocnionych, na przykład nanokompozytów hybrydowych. Wymagania przemysłu maszynowego stawiane elementom maszyn obejmują, oprócz dobrych

<sup>1)</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Przeróbki Plastycznej, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów.

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

<sup>3)</sup> Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów.

<sup>\*</sup> Autor do korespondencji; e-mail: [molek@prz.edu.pl](mailto:molek@prz.edu.pl)

właściwości mechanicznych, wiele cech specyficznych, np. odporność na podwyższoną temperaturę czy nawet na działanie ognia (przemysł lotniczy). Wspomniane właściwości można uzyskać w przypadku odpowiednio zaprojektowanego nanokompozytu hybrydowego. Wytwarzanie prototypów kół zębatach może być realizowane z zastosowaniem takich specjalistycznych nanokompozytów oraz nowoczesnych metod szybkiego prototypowania [2–7]. Metody szybkiego prototypowania pozwalają na wykonanie modeli fizycznych z określoną dokładnością, zależną od: przygotowania modelu 3D-CAD (ang. CAD – *Computer Aided Design*) [8–11], obróbki programowej danych oraz dokładności urządzenia RP (*Rapid Prototyping*). Analiza systemów RP, RT (*Rapid Tooling*) i RM (*Rapid Manufacturing*) umożliwia określenie technologicznych warunków wytwarzania prototypów kół zębatach. Do metod RP zalicza się systemy wytwarzania bezpośredniego (przyrostowe i ubytkowe) oraz technologie pośrednie, oparte na szybkim wytwarzaniu narzędzi (np. form odlewniczych) [12]. Narzędzia do wykonywania prototypów są otrzymywane w procesie RT [13, 14]. Metody te znacznie przyspieszają projektowanie i wytwarzanie nowych lub modernizację już istniejących rozwiązań modelowych. Można tu wyróżnić bezpośrednio otrzymywanie modelu z zastosowaniem systemów RP przyrostowych (przyrost tworzywa konstrukcyjnego w wyniku łączenia, spiekania, topienia, klejenia i polimeryzacji tworzywa wyjściowego) [15–23] oraz pośrednie wytwarzanie narzędzi, np. matryc silikonowych, pod obniżonym ciśnieniem w technologii VC [24–30].

Technologia VC jest jedną z metod RT stosowaną do wytwarzania matryc silikonowych i prototypów w warunkach obniżonego ciśnienia w komorach próżniowych. Matryce silikonowe umożliwiają wykonywanie prototypów badawczych i użytkowych z wosków odlewniczych, żywic poliestrowych, epoksydowych i poliuretanowych oraz z ich kompozytów [31–33]. Silikonowe narzędzia przetwórcze można stosować do wytwarzania pojedynczych prototypów lub krótkich serii wyrobów, od kilku do kilkudziesięciu sztuk. W takich formach można przetwarzać materiały o płynnej postaci wyjściowej, w gniazdach formy jest nadawany kształt wyrobu, który następnie jest utrwalany w wyniku zestalenia bądź sieciowania przetwarzanej żywicy polimerowej lub jej kompozycji.

W ostatnich latach na rynku pojawiło się wiele handlowych żywic poliestrowych, poliuretanowych i epoksydowych, przeznaczonych do odlewania w formach silikonowych. Wadą takich żywic są ich niewystarczająco trwałe właściwości użytkowe, co przekłada się na krótki czas stosowania, nie tylko prototypu wykonanego z takiej żywicy w badaniach zmęczeniowych, ale także wytwarzanych z niej docelowo elementów maszyn [26, 34]. Dlatego, jak już wcześniej wspomniano, stale rośnie zapotrzebowanie rynku na nowe materiały polimerowe o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej i lepszych

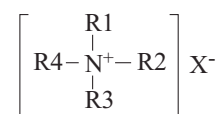
właściwościach użytkowych niż właściwości tradycyjnych żywic chemoutwardzalnych [35].

Z naszych doświadczeń [26, 33–36] wynika, że dodatki modyfikowanych bentonitów w ilości przekraczającej 5 % mas. wyraźnie wpływał na pogorszenie płynięcia w gnieździe formującym w procesie odlewania wyrobów precyzyjnych, takich jak elementy maszyn (koła zębata). Modyfikowane bentonity (Nanobenty) są zagęstnikami małocząsteczkowych żywic chemoutwardzalnych, wyraźnie zwiększają lepkość pozorną kompozycji i nadają im właściwości tiksotropowe. W technologii VC, oprócz lepkości, równie ważna jest reaktywność kompozycji polimerowej, oceniana na podstawie czasu żelowania i maksymalnej temperatury utwardzania. Znajomość tych dwóch parametrów umożliwia poprawne prowadzenie procesu odlewania próżniowego. Celem naszej pracy było określenie wpływu reaktywności i właściwości tiksotropowych badanych kompozycji na stabilność wymiarową wytworzonych z nich modeli kół zębatach.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

– Nanobent<sup>®</sup> ZR1, bentonit modyfikowany IV-rzędową solą amoniową (QAS) o ogólnym wzorze



gdzie: R1 – podstawnik benzylowy, R2 i R3 – podstawniki metylowe, R4 – podstawnik alifatyczny o liczbie atomów węgla C8–C12;

– Nanobent<sup>®</sup> ZR2, bentonit modyfikowany QAS, gdzie: R1 i R4 – podstawniki alifatyczne o liczbie atomów węgla C10–C12, R2 i R3 – podstawniki metylowe; oba bentonity produkowane w ZGM Zębiec, według technologii opracowanej w ramach grantu celowego nr 03933/C ZR7-6/2007;

– Nienasycona żywica poliestrowa Polimal<sup>®</sup> 103 (UP103);

– nienasycona żywica poliestrowa Polimal<sup>®</sup> 109 (UP109);

– naftenian kobaltu (2-proc. roztwór w styrenie);

– Luperox K-1 (roztwór nadtlenu metyloetyloketonu we ftalanie dibutyli); produkty dostarczone przez Zakłady Chemiczne „Organika-Sarzynia-Ciech” w Nowej Sarzynie.

### Przygotowanie kompozycji nienasyconych żywic poliestrowych z dodatkiem Nanobentów<sup>®</sup>

Kompozycje na osnowie nienasyconych żywic poliestrowych UP103 i UP109 z udziałem 1,0, 3,0 i 5,0 % mas. Nanobentów<sup>®</sup> ZR1 lub ZR2 sporządzono wg procedury opisanej w Cz. I [1].

## Otrzymywanie kształtek do badań strukturalnych i wytrzymałościowych oraz prototypów kół zębatach

Kompozycje na osnowie żywic Polimal® 103 i Polimat® 109 utwardzono z wykorzystaniem utwardzacza Luperox K-1 (2 % mas.) i przyspieszacza kobaltowego (0,4 % mas.), zgodnie z zaleceniami producenta żywic. Kompozycje odpowietrzano następnie w laboratoryjnej komorze próżniowej VACUUM UHG 400 (firmy Schuechl, Niemcy) i odlewano w temp. 40 °C w silikonowych formach. Otrzymano kształtki do badań wytrzymałościowych, zgodnie z normą ISO 527-1:1998. Przed operacją odlewania prototypów kół zębatach formy silikonowe wygrzewano w temp. 40 °C przez 2 h. Kształtki oraz prototypy utwardzono w temperaturze pokojowej w ciągu 24 h, a następnie dotwardzono w temp. 80 °C przez 2 h. Po upływie dwóch dni kształtki oceniano pod względem dokładności ich wymiarów geometrycznych.

## Metody badań

### Właściwości tiksotropowe

Oznaczanie właściwości tiksotropowych badanych kompozycji wykonano w temp. 25 °C za pomocą wiskozymetru rotacyjnego RheoStress RS6000, z zastosowaniem znanej w literaturze [37] metody, tzw. pętli histerezy krzywych płynięcia, przy wzrastających a następnie malejących szybkościach ścinania. W pomiarach wykorzystano układ „stożek-płytką” o średnicy 20 mm. Na podstawie wyników obliczono pole powierzchni pętli histerezy płynięcia, które jest miarą energii niszczenia struktury tiksotropowej cieczy.

W celach porównawczych oznaczono także współczynnik (indeks) tiksotropii badanych kompozycji wg PN-73/C-81547. Lepkość kompozycji mierzono za pomocą wiskozymetru Brookfielda typu RVDV II, w temp. 25 °C, przy szybkości obrotowej 5 min<sup>-1</sup> oraz 50 min<sup>-1</sup>. W pomiarach stosowano wirnik numer 2. Między pomiarami zachowywano przerwę trwającą 0,5 h, umożliwiającą odbudowę struktury tiksotropowej cieczy. Współczynnik tiksotropii obliczano ze wzoru:

$$IT = \frac{\eta_5}{\eta_{50}} \quad (1)$$

gdzie:  $\eta_5$  i  $\eta_{50}$  – wyznaczone wartości lepkości przy szybkości obrotowej 5 min<sup>-1</sup> oraz 50 min<sup>-1</sup>.

### Reaktywność badanych kompozycji

Czas żelowania i maksimum temperatury utwardzania badanych kompozycji zawierających układ utwardzający oznaczano w temp. 25 °C zgodnie z normą PN-EN ISO 2535 za pomocą aparatu Żelpenetrator WB-2. Przyrząd pozwalał na śledzenie przebiegu tzw. krzywej żelowania, obrazującej zmiany temperatury w czasie utwardzania mieszaniny reakcyjnej.

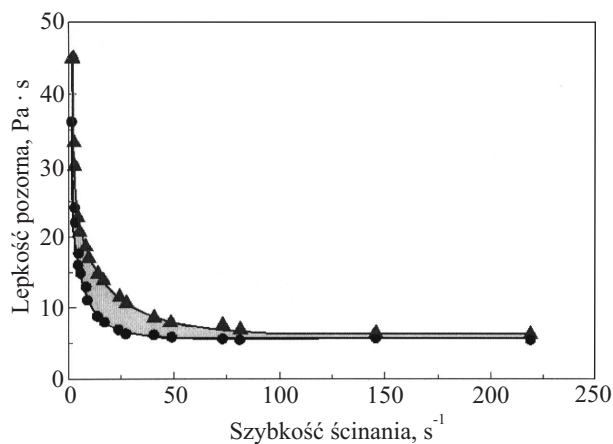
## Dokładność wymiarów geometrycznych otrzymanych modeli kół zębatach

Analizę przeprowadzono z zastosowaniem bezstykowego systemu optycznego, opartego na współrzędnościowym skanerze optycznym ATOS Triple Scan II Blue Light firmy GOM. Kalibrację systemu pomiarowego 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 pomiarowym, a następnie zeskanowanie ich rozmieszczenia, co stanowiło bazę do wykonania właściwych pomiarów przy użyciu stołu obrotowego. Na wszystkie mierzone koła zębata naklejono punkty referencyjne, następnie pokryto powierzchnię kół kredą antyrefleksyjną i, dodatkowo, oczyszczono z kredy punkty referencyjne. Rozmieszczenie punktów referencyjnych na stole pomiarowym pozwoliło na zmniejszenie ich liczby na skanowanych kołach zębatach. Analizę wyników pomiarów wykonano z zastosowaniem programu Atos Professional V7.5, w odniesieniu do modeli nominalnych 3D-CAD wykonanych wcześniej w programie CATIA V5.

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

### Właściwości tiksotropowe badanych kompozycji

Porównano przebieg funkcji  $\eta = f(\dot{\gamma})$  oraz pole powierzchni pętli histerezy lepkości (pola zawartego między krzywą wyznaczoną przy wzrastających szybkościach ścinania, a krzywą wyznaczoną przy malejących szybkościach ścinania, rys. 1), odpowiadające wartości pracy koniecznej do zniszczenia wiązań w strukturze tiksotropowej.



Rys. 1. Pętla histerezy lepkości kompozycji UP103 z dodatkiem 3 % mas. Nanobentu® ZR1 przy: rosnącej (▲) i malejącej (●) szybkości ścinania

Fig. 1. Viscosity hysteresis loop for the composition of UP103 with 3 wt % Nanobent® ZR1 for increasing (▲) and decreasing shear rate (●)

T a b e l a 1. Właściwości tiksotropowe i reaktywność kompozycji na osnowie żywic UP103 i UP109

T a b e l e 1. Thixotropic properties and reactivity of the test compositions with unsaturated polyester resins UP103 and UP109 as a matrix

Oznaczona właściwość	Zawartość napełniacza, % mas.						
	0,0	1,0	3,0	5,0	1,0	3,0	5,0
	UP103	UP103ZR1			UP103ZR2		
Pole powierzchni pętli histerezy lepkości, J/m <sup>3</sup>	0	4,8 ± 0,2	9,3 ± 0,3	12,9 ± 0,2	3,3 ± 0,3	6,8 ± 0,1	9,3 ± 0,3
Indeks tiksotropii <i>IT</i>	0	1,8 ± 0,1	3,6 ± 0,2	5,0 ± 0,2	1,2 ± 0,2	2,4 ± 0,2	3,4 ± 0,2
Czas żelowania, s	128 ± 3	156 ± 2	182 ± 3	210 ± 3	191 ± 5	228 ± 3	245 ± 2
Maksymalna temperatura utwardzania, °C	197,2 ± 0,2	173,4 ± 0,4	161,1 ± 0,3	153,5 ± 0,3	179,2 ± 0,2	166,8 ± 0,3	152,9 ± 0,3
Skurcz promieniowy <i>S<sub>p</sub></i> , %	3,0 ± 0,2	1,8 ± 0,1	0,9 ± 0,1	—	1,8 ± 0,1	0,9 ± 0,2	—
Skurcz osiowy <i>S<sub>o</sub></i> , %	2,9 ± 0,3	1,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	—	1,7 ± 0,2	0,8 ± 0,1	—
	UP109	UP109ZR1			UP109ZR2		
Pole powierzchni pętli histerezy lepkości, J/m <sup>3</sup>	0	4,9 ± 0,2	9,5 ± 0,4	13,2 ± 0,3	3,4 ± 0,3	6,9 ± 0,1	9,7 ± 0,3
Indeks tiksotropii <i>IT</i>	0	1,9 ± 0,1	3,7 ± 0,2	5,1 ± 0,1	1,3 ± 0,2	2,5 ± 0,2	3,6 ± 0,1
Czas żelowania, s	126 ± 2	152 ± 1	177 ± 2	206 ± 2	143 ± 3	212 ± 4	234 ± 3
Maksymalna temperatura utwardzania, °C	198,6 ± 0,4	176,7 ± 0,3	163,2 ± 0,2	155,1 ± 0,2	177,2 ± 0,2	166,6 ± 0,4	154,2 ± 0,4
Skurcz promieniowy <i>S<sub>p</sub></i> , %	2,9 ± 0,2	1,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	—	1,7 ± 0,2	0,9 ± 0,1	—
Skurcz osiowy <i>S<sub>o</sub></i> , %	2,8 ± 0,2	1,6 ± 0,2	0,6 ± 0,1	—	1,7 ± 0,1	0,7 ± 0,2	—

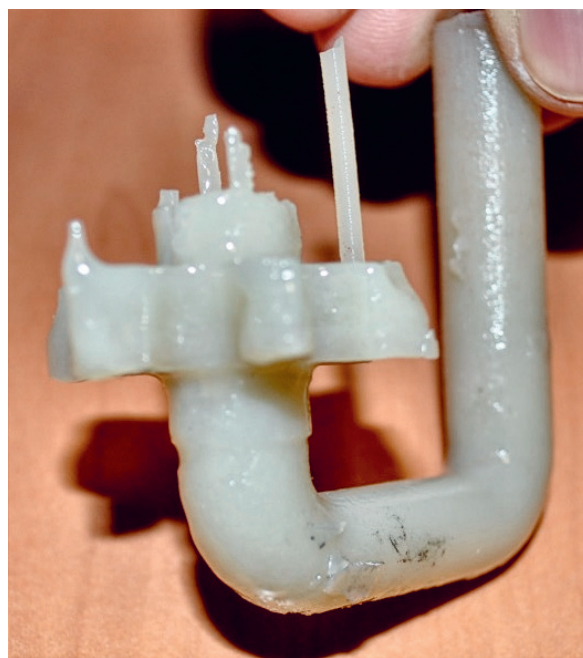
Stwierdzono, że kompozycje UP103 i UP109 zawierające dodatek Nanobentów<sup>®</sup> ZR1 lub ZR2 wykazują dobre właściwości tiksotropowe (tabela 1). Zaobserwowano także zwiększenie pola powierzchni pętli histerezy lepkości wraz z udziałem napełniaczy w kompozycji. Znacznie lepszy efekt tiksotropowy uzyskano w przypadku kompozycji UP/ZR1 niż kompozycji UP/ZR2. Obecność w Nanobencie<sup>®</sup> ZR1 IV-rz. soli amoniowej QAS, zawierającej podstawnik benzyłowy i podstawnik alifatyczny o dużej liczbie atomów węgla (≥10) wpływa na większe rozsuniecie warstw modyfikowanego bentonitu, a także lepszą zwilżalność i rozproszenie cząstek ZR1 w żywicy (jak już wcześniej wykazano w Cz. I [1]), a w konsekwencji jej korzystniejsze właściwości tiksotropowe.

Na podstawie wartości indeksu tiksotropii (*IT*) (tabela 1) można stwierdzić, że najlepszymi właściwościami tiksotropowymi charakteryzowały się kompozycje na osnowie żywicy UP109 z dodatkiem 5 % mas. ZR1.

Uzyskany efekt tiksotropii spowodował jednak znaczny wzrost lepkości pozornej kompozycji, utrudniający wypełnianie oraz odpowietrzanie gniazda formującego (rys. 2). Podobnych zjawisk nie zauważono w przypadku odlewania modeli kół z kompozycji zawierających 1,0 i 3,0 % mas. Nanobentów<sup>®</sup>.

### Reaktywność badanych kompozycji

Jak już wspomniano, bardzo istotnym parametrem w technologii VC jest reaktywność kompozycji polimerowej — czas jej żelowania i maksimum temperatury utwardzania. Wyznaczone czasy żelowania i maksima

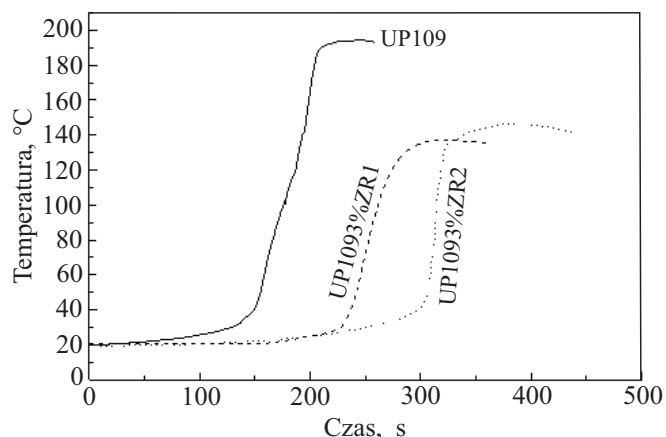


Rys. 2. Model koła zębatego otrzymany z kompozycji na osnowie UP109 zawierającej 5 % mas. ZR1, z widocznymi defektami spowodowanymi dużą lepkością pozorną kompozycji

Fig. 2. View of the model the gear wheel obtained from the composition with UP109 matrix containing 5 wt % ZR1, with visible defects arising from high apparent viscosity the composition

temperatury utwardzania sporządzonych kompozycji przedstawia rys. 3 i tabela 1.

Stwierdzono, że dodatek ZR1 i ZR2 powoduje wydłużenie czasu żelowania nienasyconych żywic poliestro-



Rys. 3. Krzywe zmian temperatury utwardzania żywicy UP109 i jej kompozycji z udziałem Nanobentów® UP1093%ZR1 i UP1093%ZR2

Fig. 3. Comparison of temperature curves as a function of time during the cross-linking process of UP109 and its compositions with Nanobent®: UP1093 % ZR1 and UP1093 % ZR2

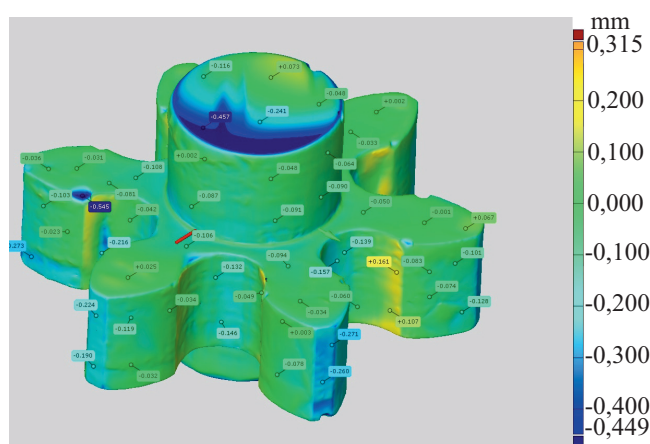
wych UP103 i UP109, od 7 do 67 %, wraz z zawartością nanonapełniaczy w kompozycji. Maksymalna temperatura sieciowania żywicy po dodaniu Nanobentów® obniża się nawet o kilkanaście stopni (rys. 3 i tabela 1).

Wydłużenie czasu żelowania kompozycji w przypadku technologii VC jest zjawiskiem korzystnym. Wolniejszy wzrost temperatury utwardzania, a jednocześnie obniżenie jej maksimum ogranicza ryzyko powstania wad odlewanych prototypu, np. miejscowych przegrzań, zwiększonych naprężeń wewnętrznych i zmniejszenia stabilności wymiarów (rys. 4), prowadzących do pogorszenia właściwości mechanicznych modelu. Należy tutaj nadmienić, że gwałtowny, egzotermiczny przebieg reak-

cji utwardzania może spowodować rozszczelnienie formy i nierównomierne utwardzenie polimeru w miejscach o największej grubości.

### Dokładność wymiarów geometrycznych

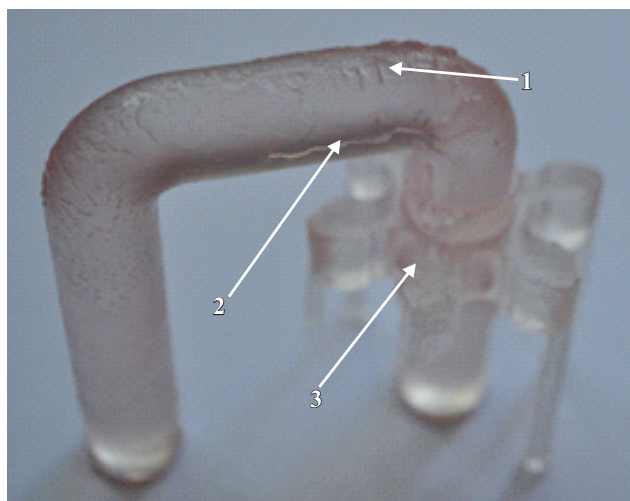
Zbadano odlewy kół zębatach otrzymane z nienapełnionych nienasyconych żywic poliestrowych UP103 i UP 109 (rys. 5 i 6) oraz z nanokompozytów (rys. 7 i 8) na ich podstawie, po wcześniejszym usunięciu kanału wlewowego i kanałów odpowietrzających. Duża lepkość kompozycji UP z dodatkiem 5 % mas. ZR1 lub ZR2 spowodowała, że modele kół zębatach miały wiele niedolewów,



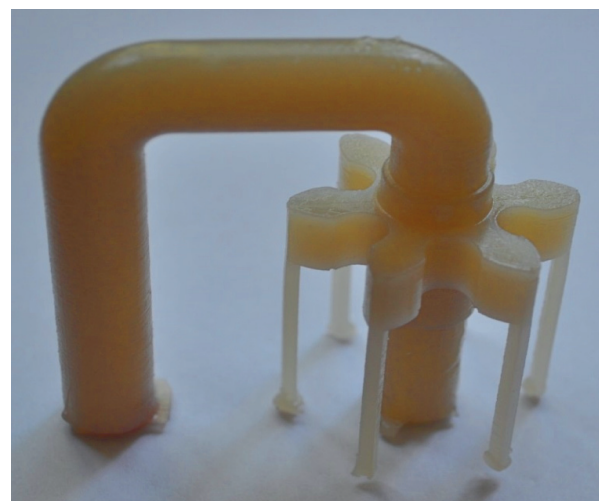
Rys. 5. Szczegółowe zestawienie odchylek wymiarów geometrycznych odlewu koła zębatach otrzymanego z nienapełnionej nienasyconej żywicy poliestrowej UP109

Fig. 5. A detailed list of the deviations of gear wheel cast obtained from the unfilled unsaturated polyester resin UP109

a)

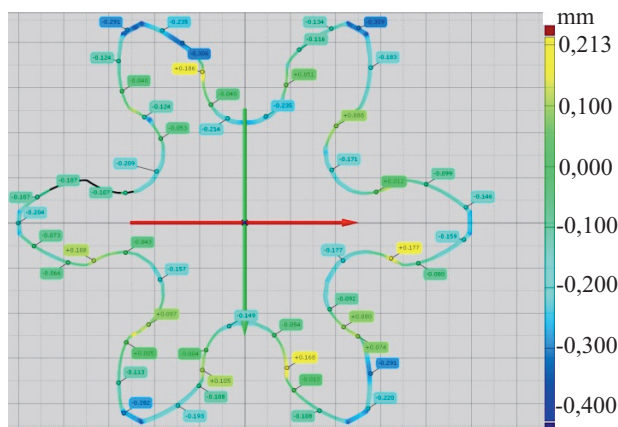


b)



Rys. 4. Modele kół zębatach otrzymane z: a) nienasyconej żywicy poliestrowej UP109, z widocznymi defektami powstałymi w wyniku przegrzania formy; 1 – pofałdowania, 2 – rysy, 3 – pęknięcia, b) nanokompozytu na podstawie UP103 bez widocznych defektów

Fig. 4. View of the model gear wheels obtained from: a) unsaturated polyester resin UP109, with visible defects arising from the overheating of the mold; 1 – corrugations, 2 – scratches, 3 – cracks, b) nanocomposite with UP103 matrix without visible defects

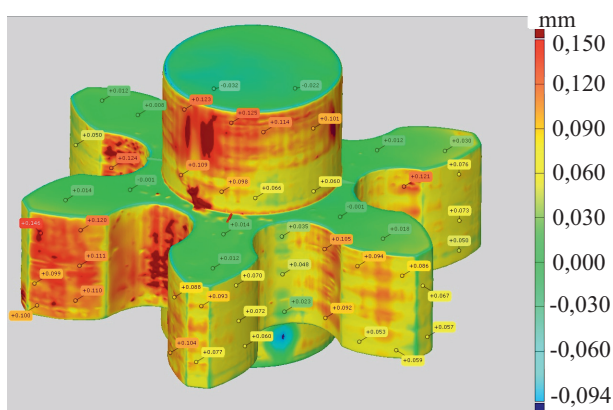


Rys. 6. Szczegółowe zestawienie odchylek wymiarów geometrycznych profilu odlewu koła otrzymanego z nienapełnionej nienasyconej żywicy poliestrowej UP109

Fig. 6. A detailed list of the geometric dimension deviations of wheel cast profile obtained from the unfilled unsaturated polyester resin UP109

dlatego nie wykorzystano ich w badaniach. Otrzymane protokoły pomiarowe (rys. 5) określają całkowite wartości odchylek wymiarów geometrycznych, z uwzględnieniem wartości liczbowych w wybranych punktach inspekcyjnych, modeli kół zębatach wytworzonych z nienapełnionej żywicy poliestrowej UP109.

Dokładność wymiarów geometrycznych kół zębatach, analizowana w programie GOM Inspect V7.5, może być przedstawiona w postaci szczegółowych odchylek określonych w wybranych punktach powierzchni koła zębatego (rys. 5) oraz profili przekrojów wieńca koła wykonanych w płaszczyźnie normalnej do jego osi (rys. 6). Szczegółowy raport z pomiaru może liczyć nawet kilkadziesiąt stron, dlatego też, ze względu na objętość opracowania, przedstawiono tylko wybrane wyniki.

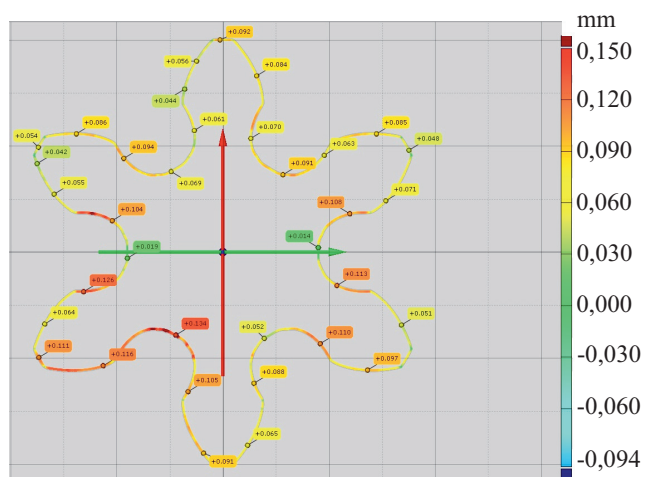


Rys. 7. Szczegółowe zestawienie odchylek wymiarów geometrycznych odlewu koła otrzymanego z nanokompozytu na osnowie UP109 z dodatkiem 3 % mas. ZR1

Fig. 7. A detailed list of the geometric dimension deviations of wheel cast obtained from the nanocomposite with UP109 matrix containing 3 wt % ZR1

Na podstawie porównania wymiarów badanych kół zębatach wytworzonych z nienapełnionej nienasyconej żywicy poliestrowej (UP) z wymiarami modeli nominalnych 3D-CAD można stwierdzić wyraźne rozbieżności (rys. 5 i 6). Odchyłki mieszczą się w przedziale od +0,186 do nawet -0,309 mm. Takie istotne błędy w odwzorowaniu geometrii wytworzonych kół zębatach wynikają przede wszystkim z większego skurczu przetwórczego nienapełnionej żywicy poliestrowej [38], natomiast rozbieżności między wymiarami modelowymi a rzeczywistymi górnej krawędzi piasty oraz zębów kół mogą wynikać z niedokładnej obróbki mechanicznej miejsc po usuniętym kanale wlewowym i po kanałach odpowietrzających.

Wykonano też pomiary dokładności odwzorowania wymiarów geometrycznych kół zębatach wytworzonych z nanokompozytów na osnowie UP103 i UP109 (rys. 7, 8).



Rys. 8. Szczegółowe zestawienie odchylek wymiarów geometrycznych profilu odlewu koła otrzymanego z nanokompozytu na osnowie UP109 z dodatkiem 3 % mas. ZR1

Fig. 8. A detailed list of the geometric dimension deviations of wheel cast profile obtained from the nanocomposite with UP109 matrix containing 3 wt % ZR1

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w przypadku kół zębatach otrzymanych z żywicy UP109 zawierającej 3 % mas. ZR1 nastąpiło wyraźne zmniejszenie skurczu przetwórczego, a także nieznaczne zwiększenie wymiarów kół w stosunku do wymiarów modelu nominalnego (rys. 7 i 8). Przyczyną tego zjawiska mogą być większe rozmiary gniazda formującego lub elastycznego charakteru matrycy silikonowej.

Na podstawie wyników pomiarów obliczono wartości skurczu promieniowego ( $S_p$ ) i osiowego ( $S_o$ ) (tabela 1). Dzięki wprowadzeniu do matrycy żywicy poliestrowej UP103 i UP109 nanonapełniaczy ZR1 i ZR2 uzyskano zmniejszenie skurczu wytworzonych nanokompozytów, co wpłynęło na poprawę dokładności odwzorowania

wymiarów odlewanych modeli kół zębatach. Stwierdzono wyraźny wpływ dodatku nanonapełniaczy oraz ich zawartości w kompozycie na wartość skurczu. Największe ograniczenie skurczu zarówno  $S_p$ , jak i  $S_o$  uzyskano w przypadku nanokompozytu na osnowie UP109 z dodatkiem 3 % mas. ZR1 (tabela 1).

#### PODSUMOWANIE

– Obecność Nanobentów<sup>®</sup> ZR1 i ZR2 w kompozycjach z UP103 i UP109 wyraźnie wpływa na poprawę ich właściwości tiksotropowych, przy czym korzystna ilość napełniaczy, pozwalająca na odpowiednie wypełnianie formy podczas odlewania niskociśnieniowego, mieści się w przedziale 1,5–3,0 % mas.

– Dodatek Nanobentów<sup>®</sup> wpływa na wydłużenie czasu żelowania i obniżenie maksymalnej temperatury sieciowania żywicy, co ułatwia wytworzenie z niej modeli metodą VC oraz eliminuje powstawanie niekorzystnych zjawisk: pęknięć, deformacji w odlewie itp.

– Zastosowanie bezstykowych optycznych systemów pomiarowych umożliwi całościową ocenę stabilności wymiarów geometrycznych prototypów kół zębatach, w zależności od badanego nanokompozytu. Najdokładniejsze odwzorowanie wymiarów formy odlewniczej uzyskano w przypadku modeli kół zębatach wytworzonych z nanokompozytu na osnowie UP109 z dodatkiem 3 % mas. ZR1.

– Zastosowana technologia *Vacuum Casting* pozwala na wyeliminowanie kosztownych matryc metalowych na etapie przygotowania modeli przekładni zębatach. Tak wykonane modele prototypowe mogą służyć do testowania nowych konstrukcji układów przeniesienia napędów, wykonanych z nanokompozytów.

*Badania realizowane w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG) w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

#### LITERATURA

- [1] Oleksy M.: *Polimery* **2012**, 57, 212. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.212>
- [2] Chiu Y.Ch., Maa Ch.Ch.M., Liu F.Y. i in.: *European Polymer Journal* **2008**, 44, 1003. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.01.033>
- [3] Cho I., Lee K., Choi W., Song Y.A.: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2000**, 40, 1813. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00086-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00086-3)
- [4] Heneczkowski M., Oleksy M., Oliwa R. i in.: *Polimery* **2013**, 58, 759. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.759>
- [5] Jirathearanat S., Vazquez V., Rodriguez C.A., Altan T.: *Journal of Materials Processing Technology* **2000**, 98, 116. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00312-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00312-X)
- [6] Rochus P., Plessier J.-Y., Van Elsen M. i in.: *Acta Astronautica* **2007**, 61, 352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.004>
- [7] Ding-Ru Y., Shiao-Wei K., Yi-Che S., Feng-Chih Ch.: *Polymer* **2004**, 45, 2633. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2004.02.020>
- [8] Pham D.T., Gault R.S.: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **1998**, 38, 1257. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- [9] Gururaja M.N., Hari Rao A.N.: *International Journal of Soft Computing and Engineering* **2012**, 1, 352.
- [10] Kozik B.: *Journal of KONES Powertrain and Transport* **2012**, 20, 207.
- [11] Noga S.: *Journal of Sound and Vibration* **2010**, 329, 1507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2009.10.039>
- [12] Budzik G., Dziubek T., Markowska O., Tutak M.: *Stal Metale Nowe Technologie* **2011**, 5–6, 54.
- [13] Budzik G.: „Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania prototypów elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, str. 118–133.
- [14] Rosochowski A., Matuszak S.: *Journal of Materials Processing Technology* **2000**, 106, 191. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00613-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00613-0)
- [15] Chen T.K., Tien Y.L., Wie K.H.: *Polymer* **2000**, 41, 1345. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00280-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00280-3)
- [16] Chen Y.H., Song Y.: *Computer Aided Design* **2001**, 33, 331. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00092-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00092-0)
- [17] Chiang Ch.-L., Hsu S.W.: *Journal of Polymer Research* **2010**, 17, 315. <http://dx.doi.org/10.1007/s10965-009-9318-3>
- [18] Chiu W.K., Tan S.T.: *Computer Aided Design* **2000**, 32, 707. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00046-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00046-4)
- [19] Chlebus E.: „Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003, str. 8–14.
- [20] Chlebus E.: „Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji”, WNT, Warszawa 2000, str. 16–24.
- [21] Cho I., Lee K., Choi W., Song Y.A.: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2000**, 40, 1813. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00086-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00086-3)
- [22] Choi H., Samavedam S.: *Computers in Industry* **2002**, 47, 39. [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00140-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00140-3)
- [23] Chua Ch.K., Chew T.H., Eu K.H.: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **1998**, 14, 617.
- [24] Kruth J.P.: *CIRP Annals* **1991**, 40, 603.
- [25] Nannan X., Zhuangya Z., Haiguang Z. i in.: *Asia Sim* **2012**, 323, 76.
- [26] Oleksy M., Heneczkowski M., Budzik G.: *Polimery* **2008**, 53, 60.
- [27] Tang Y., Tan W.K., Fuh J.Y.H., Loh H.T. i in.: *Journal of Materials Processing Technology* **2007**, 192–193, 334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.098>
- [28] Thian S.C.H., Fuh C.J.Y.H., Wong C.Y.S. i in.: *Microsystem Technologies* **2008**, 14, 1125. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-008-0640-1>

- [29] Weiss E., Waraczyński B.: *Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej **2007**, 5, 89.
- [30] Yang M.Y., Ryu S.G.: *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, 113, 280.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00714-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00714-2)
- [31] Budzik G., Markowski T., Sobolak M.: *Acta Mechanica Slovaca* **2006**, 2, 67.
- [32] Budzik G., Markowski T., Sobolak M.: *Journal of Kones Powertrain and Transport* **2007**, 14, 61.
- [33] Budzik G., Oleksy M.: *Przegląd Mechaniczny* **2009**, 7–8, 43.
- [34] Oleksy M., Oliwa R., Zawila B., Budzik G.: *Polimery* **2012**, 57, 463. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.463>
- [35] Oleksy M., Szwarc-Rzepka K., Heneczowski M. i in.: *Materials* **2014**, 7, 6064. <http://dx.doi.org/10.3390/ma7086064>
- [36] Budzik G., Markowski T., Sobolak M.: *Archives of Foundry Engineering* **2007**, 7, 131.
- [37] Kembłowski Z., Petera J.: *Rheologica Acta* **1979**, 18, 702. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01533344>
- [38] Oleksy M.: „Technologia Rapid Prototyping hybrydowych nanokompozytów polimerowych stosowanych na koła zębate”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014, ISBN 978-83-7199-957-7.

Otrzymano 7 I 2015 r.

Instytut Chemii Przemysłowej *im. prof. I. Mościckiego* w Warszawie

opracował ogólnokrajową

**BAZĘ APARATURY DO OKREŚLANIA CHARAKTERYSTYKI I PRZETWÓRSTWA POLIMERÓW**

będącej w posiadaniu uczelni, instytutów PAN i instytutów badawczych.

Baza jest wyposażona w funkcje umożliwiające wyszukiwanie wg zadanych parametrów: nazwy, typu lub modelu aparatu, roku produkcji, producenta, charakterystyki parametrów technicznych, zastosowania do badań, lokalizacji, słów kluczowych, sposobu wykonywania badań, numerów norm, wg których prowadzi się badania, oraz adresu i kontaktu z osobą odpowiedzialną za dany aparat. Baza jest ciągle uaktualniana.

Dostęp do danych i wyszukiwanie informacji w bazie jest bezpłatne.

Instytucje i firmy zainteresowane zamieszczeniem w bazie informacji o posiadanej aparaturze prosimy o przesłanie danych na adres [polimery@ichp.pl](mailto:polimery@ichp.pl)

[aparaturapolimery.ichp.pl](http://aparaturapolimery.ichp.pl)