

Wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej w badaniach tworzyw sztucznych

Maciej Augustyniak*, Mateusz Barczewski**, Jacek Andrzejewski**

*Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych

**Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Tworzyw Sztucznych

Streszczenie: Na przykładzie skanera optycznego oraz klasycznej maszyny współrzędnościowej przeanalizowano możliwość i zasadność użytkowania tychże narzędzi w pomiarach tworzyw polimerowych.

Słowa kluczowe: współrzędnościowa technika pomiarowa, deformacje, skaner 3D, tworzywa sztuczne

1. Wstęp

Współrzędnościowa technika pomiarowa (WTP) stanowi jedną z głównych dziedzin rozwoju dzisiejszej metrologii. W pomiarach wielkości geometrycznych, elementów maszyn i urządzeń, WTP odgrywa coraz większą rolę, gdyż rozwój nowoczesnego przedsiębiorstwa produkcyjnego wymaga ciągłego doskonalenia, również produkowania wyrobów coraz dokładniejszych – o malejącym polu i wartości tolerancji. Maszyny współrzędnościowe pozwalają mierzyć dowolne kształty (bez tworzenia specjalizowanego oprzyrządowania), a oprogramowanie przeprowadzać kompleksową analizę wymiarową.

Powszechność tworzyw polimerowych jako materiałów konstrukcyjnych wymaga dokładnego opisu procesów przetwórczych oraz wpływu ich parametrów na właściwości kształtowanych wyrobów. Materiały te znajdują szerokie zastosowanie dzięki łatwości formowania wieloseryjnych wyrobów przy znacznym zmniejszeniu kosztów produkcji w odniesieniu do innych grup materiałów. Zaletą tworzyw polimerowych jest ich mała gęstość, odporność na korozję, duże możliwości modyfikacji umożliwiające nadawanie im żądanych właściwości oraz łatwość ich przetwarzania i formowania. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych i intensywnie rozwijanych technologii kształtowania termoplastycznych tworzyw polimerowych jest wtryskiwanie. Zakładając, że geometria formy odwzorowuje ukształtowanie wyrobu w niezmienny sposób, na ostateczną dokładność wymiarową znaczący wpływ mają parametry procesu, szczególnie: temperatura formy i temperatura przetwarzanego polimeru, ciśnienie wtrysku oraz wynikający z nich czas przebywania wypraski w formie.

W przypadku tworzyw semikrystalicznych stopień krystaliczności, tj. procentowa zawartość tworzywa o strukturze uporządkowanej, w znaczący sposób wpływa na właściwości gotowego wyrobu. Na stopień krystaliczności polimeru mają też wpływ warunki przetwórcze (w szczególności temperatura formy) jak i celowe modyfikowanie polimeru przez dodanie nukleantów, tj. zarodków krystalizacji heterogenicznej. Wprowadzanie nukleantów równoznaczne ze zwiększaniem liczby zarodków krystalizacji prowadzi do zmiany struktury polimeru skutkującej zmniejszeniem wielkości wydzielenia fazy krystalicznej, a co za tym idzie polepszeniem właściwości wytrzymałościowych goto-

wego wyrobu. Wzrost fazy krystalicznej, spowodowany kształtowaniem wyrobu w podwyższonej temperaturze, prowadzi do zwiększenia skurczu przetwórczego i zmian wymiarów formowanego wyrobu [1, 2].

2. Współrzędnościowa technika pomiarowa – stosowane maszyny

W pomiarach wielkości geometrycznych, dotyczących elementów maszynowych, zaczyna dominować współrzędnościowa technika pomiarowa. Umożliwia ona wyznaczanie wymiarów, przestrzennie ukształtowanych części maszyn, ze stosunkowo wysoką dokładnością i w czasie dostosowanym do rytmu ich wytwarzania. Technika ta, jakościowo odmienna od dotychczasowych metod pomiaru, charakteryzuje się procedurami pomiarowymi opartymi na wartościach współrzędnych lokalizowanych punktów pomiarowych, które są podstawą wyznaczania wszystkich geometrycznych figur, z których składa się element maszyny. Przykładowo, wyznaczanie średnicy otworu odbywa się przez wyznaczenie co najmniej czterech wartości punktów tego okręgu w miejscach dowolnie, chociaż w miarę równomiernie, rozmieszczonych. Aproksymacja okręgiem średniokwadratowym umożliwia wyznaczenie średnicy lub promienia okręgu oraz współrzędnych jego środka. Skracza to czas pomiaru w stosunku do metod klasycznych, w których, jak w przypadku długościomierza, niezbędne było usytuowanie końcówki pomiarowej w osi mierzzonego otworu, co czyniło pomiar pracochłonnym, bowiem polegał na wyznaczeniu średnicy jako odległości końcówki między przeciwległymi ściankami otworu [3].

Opis i charakterystyki narzędzi pomiarowych są dość istotne, gdyż służą do przedstawienia i odpowiedniego sformułowania ich przydatności do wykonywania pomiarów, bez względu na zakres wartości sprawdzanych wielkości i oczekiwanej dokładności pomiarów. Współrzędnościowa technika pomiarowa stosowana w maszynach pomiarowych polega na wyznaczeniu współrzędnych punktów (x_i, y_i, z_i) tworzących zarys rzeczywisty, ustalonych względem układu współrzędnych (x, y, z) maszyny pomiarowej [4].

Technika współrzędnościowa zmienia filozofię pomiaru w stosunku do metod klasycznych, a jej zrozumienie i poznanie powinno wchodzić w skład podstawowego wykształcenia współczesnego inżyniera konstruktora maszyn, automatyka, robotyka, a szczególnie metrologa [3].

2.1. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa WENZEL LH54

Producent: Wenzel Präzision GmbH – Niemcy

Wymiary przestrzeni pomiarowej:

$X = 500 \text{ mm}; Y = 600 \text{ mm}; Z = 400 \text{ mm};$

Dokładność: $MPEE = \pm(2,5 + (L/350)) \mu\text{m}$ (dla głowicy TP200 firmy Renishaw);

Wyposażenie podstawowe: impulsowa głowica pomiarowa TP200 oraz przegub obrotowo-uchylny PH10M firmy Renishaw;

Oprogramowanie: Metrosoft CM3.70–Wenzel Metromec A.

Opisana maszyna współrzędnościowa znajduje się na wyposażeniu Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

2.2. Optyczny skaner 3D ATOS II firmy GOM

Optyczny skaner ATOS bazuje na zasadzie triangulacji, projektor głowicy dokonuje projekcji sekwencji prążków na mierzony obiekt, a dwie kamery rejestrują przebieg tych prążków. Rozwiązując równania transformacji optycznej, system z określoną dokładnością oblicza współrzędne dla każdego pojedynczego piksela kamery. Wynikiem poszczególnych pomiarów jest chmura punktów, liczba tych punktów jest zależna od rozdzielczości kamer. Mierzony element, system składa poszczególne chmury punktów, bazując na punktach referencyjnych, których odległości między sobą się nie zmieniają w czasie pomiarów. Po pomiarach następuje proces poligonizacji, którego rezultatem jest powierzchniowy model CAD, który bazuje na zebranej chmurze punktów. Taki model poddany zostaje analizie wymiarowej. Systemu teoretycznie nie ogranicza wielkość skanowanych elementów. Opisany skaner wraz z oprogramowaniem znajduje się na wyposażeniu Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

3. Materiały, metodyka przetwórstwa i pomiarów

Do badań wykorzystano komercyjny izotaktyczny polipropylen o nazwie handlowej Moplen HP500J o gęstości $0,9 \text{ g/cm}^3$ oraz wskaźniku szybkości płynięcia $MFI=3,2 \text{ g/10 min}$ ($230 \text{ }^\circ\text{C}/2,16 \text{ kg}$). Jako nukleant modyfikujący strukturę i właściwości, zastosowano benzoesan sodu, w dalszej części oznaczany NaBz.

W przypadku materiału modyfikowanego osnowa polimerowa została wymieszana z nukleantem w ilości 1 % wag. NaBz, w procesie dwukrotnego wytłaczania na wytłaczarce jednoślismakowej z wykorzystaniem ślimaka o specjalnej konstrukcji (wyposażonego w strefę intensywnego mieszania).

Wypraski kształtowane w procesie wtryskiwania z wykorzystaniem wtryskarki hydraulicznej ENGEL ES 80/20 HLS przy zmiennej temperaturze formy wynoszącej w kolejnych próbach odpowiednio 20, 40, 60 i $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Pozostałe parametry procesu przetwórczego przedstawiono w tab. 1.

W przypadku wtryskiwania polipropylenu modyfikowanego NaBz, udział fazy krystalicznej jest większy, co powoduje zwiększenie skurczu przetwórczego przy niezmiennych pozostałych parametrach procesu.

Tab. 1. Parametry przetwarzania iPP; wtryskarka ENGEL ES 80/20 HLS

Tab. 1. Processing parameters of iPP; injection molding machine ENGEL ES 80/20 HLS

Ciśnienie wtrysku	70 MPa	Ciśnienie docisku	55 MPa
Czas docisku	2 s	Czas chłodzenia	45 s
Prędkość obrotowa ślimaka	105 obr/min	Ciśnienie uplastyczniania	1,5 MPa
Skok ślimaka	65 mm	Prędkość wtrysku	100 mm/s
Temperatury układu uplastyczniania	Dysza: $210 \text{ }^\circ\text{C}$; III Strefa: $230 \text{ }^\circ\text{C}$; II Strefa: $215 \text{ }^\circ\text{C}$; I Strefa: $195 \text{ }^\circ\text{C}$		

Pomiary z wykorzystaniem skanera optycznego zostały wykonane głowicą o polu pomiarowym $75 \times 75 \text{ mm}$. Wyniki zaprezentowano w postaci mapy odchyłek oraz przekrojów inspekcyjnych w charakterystycznych punktach. Jako element referencyjny przyjęto próbkę wtryskiwaną w temperaturze formy wynoszącej $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pomiary z wykorzystaniem klasycznej maszyny współrzędnościowej wykonano w trybie CNC. Geometryczne cechy wyrobu, które były przedmiotem analizy to długość, szerokość, wysokość oraz podstawowe odchyłki, np. płaskość powierzchni. Na rysunkach zaprezentowano również wyniki pomiarów w przekrojach charakterystycznych.

4. Wyniki pomiarów

Ze względu na dużą ilość wyników, zaprezentowane zostały tylko najbardziej charakterystyczne cechy geometryczne oraz deformacje o największych wartościach.

4.1. Wyniki pomiarów cech geometrycznych

Tab. 2. Wyniki pomiarów cech geometrycznych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej WENZEL LH54

Tab. 2. The results of measurements of geometrical features on the coordinate measuring machine WENZEL LH54

GOM	Oznaczenie próbki							
Cechy geometryczne	PP_23	PP_40	PP_60	PP_80	PP_NaBz_23	PP_NaBz_40	PP_NaBz_60	PP_NaBz_80
Długość [mm]	147,58	147,48	147,20	146,95	147,59	147,47	147,17	147,09
Odchyłka płaskości 1 [mm]	0,42	0,47	0,35	0,36	0,42	0,39	0,44	0,32
Szerokość 1 [mm]	19,61	19,67	19,66	19,64	19,57	19,58	19,51	19,51
Szerokość 2 [mm]	9,88	9,88	9,94	9,95	9,81	9,84	9,83	9,85

Tab. 3. Wyniki pomiarów cech geometrycznych na skanerze optycznym firmy GOM

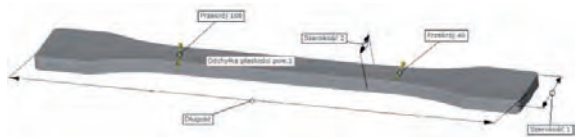
Tab. 3. The results of measurements of geometrical features on the GOM's optical scanner

Wenzel	Oznaczenie próbki							
Cechy geometryczne	PP_23	PP_40	PP_60	PP_80	PP_NaBz_23	PP_NaBz_40	PP_NaBz_60	PP_NaBz_80
Długość [mm]	147,45	147,20	147,13	146,88	147,47	147,34	147,18	146,95
Odchyłka płaskości 1 [mm]	0,30	0,23	0,41	0,33	0,24	0,23	0,31	0,35
Szerokość 1 [mm]	19,63	19,64	19,64	19,65	19,53	19,51	19,47	19,49
Szerokość 2 [mm]	9,28	9,14	10,39	9,90	7,69	9,01	9,76	9,24

5. Podsumowanie i wnioski

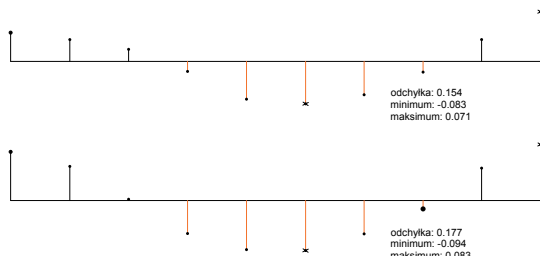
Ważne i decydujące znaczenie ma we współczesnej metrologii sprzęt pomiarowy. Dotyczy to szczególnie pomiarów stosowanych w budowie i eksploatacji maszyn oraz różnego rodzaju urządzeń mechanicznych. Jak wykazują dotychczasowe obserwacje, jakość wytwarzania i warunki praktycznego stosowania takich wyrobów są w dużej mierze uzależnione od stosowanej techniki pomiarowej, w której stosuje się nowoczesne narzędzia pomiarowe [4].

Z przeprowadzonych badań wynika, że technika współrzędnościowa to nowoczesne i przyszłościowe narzędzie w procesie kształtowania dokładności wykonania wyrobu na każdym etapie jego powstawania. Podstawową przewagą współrzędnościowych maszyn pomiarowych nad innymi przyrządami pomiarowymi jest ich dokładność i możliwość pomiaru dowolnej geometrii wyrobu. Te cechy pozwalają zastosować WTP do badań wymagających dużej dokładności oraz wszędzie tam, gdzie zależy nam na kompleksowej ocenie spełnienia wymagań geometrycznych.



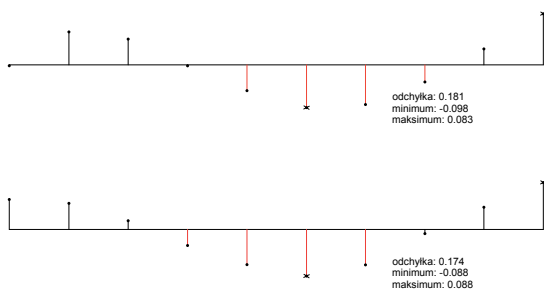
Rys. 1. Geometria wyrobu poddanego badaniom z oznaczeniem mierzonych cech

Fig. 1. The geometry of the product under test with an indication of the measured traits



Rys. 2. Przekroje „106” z oznaczeniem punktów pomiarowych oraz odchyłką. U góry próbka PP_20, u dołu próbka PP_80. Pomiar na maszynie współrzędnościowej firmy WENZEL

Fig. 2. „106” cross-section with marked points and deviation. At the top – the PP_20 sample, at the bottom – the PP_80 sample. Measurement on WENZEL's CMM



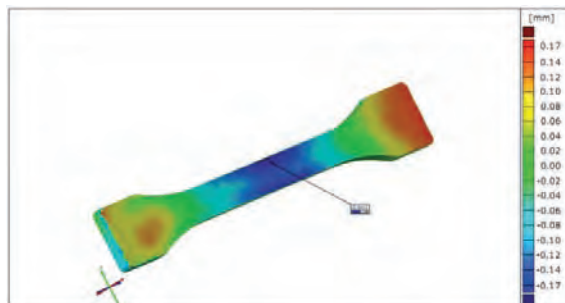
Rys. 3. Przekroje „40” z oznaczeniem punktów pomiarowych oraz odchyłką. U góry próbka PP_20, u dołu próbka PP_80. Pomiar na maszynie współrzędnościowej firmy WENZEL

Fig. 3. „40” cross-section with marked points and deviation. At the top – the PP_20 sample, at the bottom – the PP_80 sample. Measurement on WENZEL's CMM

Porównując klasyczną technikę współrzędnościową z optyczną techniką współrzędnościową trzeba podkreślić zalety tej drugiej. Należy do nich zaliczyć: znaczne skrócenie czasu pomiaru, brak konieczności programowania maszyny, pomiar dużo większej liczby punktów podczas pojedynczego pomiaru, łatwiejszą obróbkę i analizę danych. Podstawowym ograniczeniem w powszechnym stosowaniu skanerów 3D jest ich mniejsza dokładność pomiaru w odniesieniu do stykowych WMP. Dlatego też optyczną technikę współrzędnościową wykorzystuje się do pomiaru części maszyn produkowanych z dokładnością kilku setnych części milimetra. Na podkreślenie zasługuje również fakt, iż optyczna technika współrzędnościowa nie jest konkurencją dla klasycznej techniki współrzędnościowej, jest natomiast jej uzupełnieniem [5].

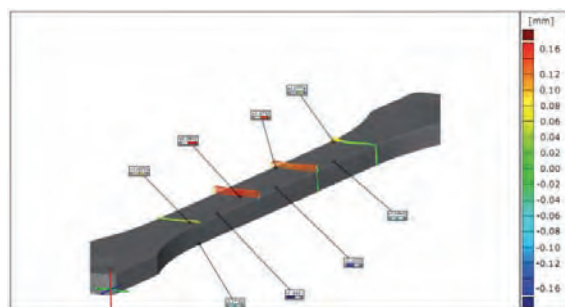
Badania wykazały, iż temperatura formy w procesie wtryskiwania termoplastycznych tworzyw polimerowych jest jednym z decydujących parametrów warunkującym ostateczną dokładność geometryczną wyrobu założoną przez konstruktora. Tabele nr 2 i 3 dostarczają informacji o bezpośrednim wpływie badanego parametru (zmienna temperatura formy) na wartość mierzonych cechy geometrycznych o największym zakresie czyli na długość badanego elementu. Wzrost temperatury formy prowadzi do wzrostu skurczu przetwórczego próbki a tym samym do zmniejszenia jej długości w zakresie ok. 0,5 mm.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysnuć wniosek, iż większy potencjał zastosowań metrologicznych w przetwórstwie tworzyw sztucznych mają optyczne narzędzia współrzędnościowej techniki pomiarowej. Charakterystyka badanych elementów (mała sztywność) zmusza do stosowania



Rys. 4. Mapa odchyłek zeskanowanych wyrobów PP_40, PP_20 (element referencyjny)

Fig. 4. Deviaton's map of scanned detail PP_40, PP_20 (reference element)



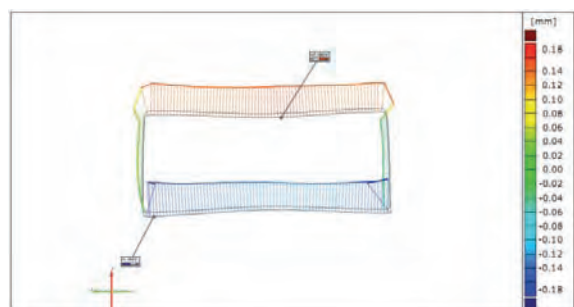
Rys. 5. Poprzeczne przekroje inspekcyjne (dla próbek PP_20 i PP_40) z oznaczeniem wartości punktów maksymalnych i minimalnych

Fig. 5. Inspection transverse cross-sections (for samples PP_20 and PP_40) with indication of the maximum and minimum deviation points

podparcia i zamocowania wyrobów na całej ich długości (to z kolei warunkuje ograniczony zasięg pomiarów) w badaniach z wykorzystaniem stykowych współrzędnościowych maszyn pomiarowych. W przeciwnym wypadku można zaobserwować wyginanie i odkształcenia powierzchni wynikające z nacisku pomiarowego. Ponadto, niektóre wyniki z klasycznej WMP należałoby odrzucić, traktując je jako błąd grubości. Prawdopodobnie (mimo zastosowania podparcia próbki na całej jej długości) doszło do jej wygięcia podczas pomiarów ich cechy oznaczonej jako „szerokość 2”, co można zaobserwować znacznymi różnicami w wynikach pomiaru dwoma różnymi przyrządami pomiarowymi. Dlatego stosowanie optycznych narzędzi pomiarowych, na przykładzie optycznego skanera 3D, pozwala przeprowadzać kompleksową kontrolę metrologiczną wyrobów wykonanych z badanej grupy materiałowej. Brak nacisku pomiarowego eliminuje niebezpieczeństwo związane z odkształceniem mierzonych detali wykonanych z materiałów charakteryzujących się małą sztywnością.

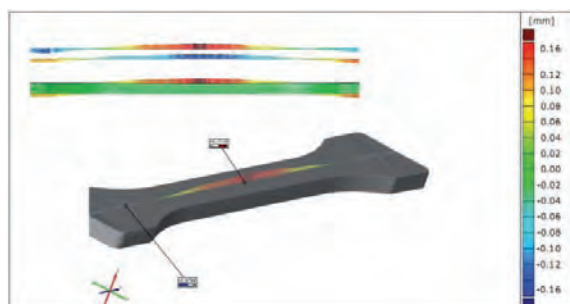
Bibliografia

1. Sterzyński T.: *Processing and property improvement In isotactic polypropylen by heterogeneous nucleation*, „Polimery”, nr 45/2000, 786–791.
2. Sterzyński T.: *Nucleation by Additives In Semi-Crystalline Polymers: Effects on Mechanical Behaviour* [w:] *Per-*



Rys. 6. Poprzeczny przekrój inspekcyjny – 62 mm od początku mierzonego elementu (dla próbek PP_20 i PP_40) z oznaczeniem wartości punktów maksymalnych i minimalnych

Fig. 6. The inspection transverse cross-section – 62 mm measured from the beginning of the element (for samples PP_20 and PP_40) with indication of the maximum and minimum points



Rys. 7. Wzdłużny przekrój inspekcyjny (dla próbek PP_20 i PP_40) z oznaczeniem wartości punktów maksymalnych i minimalnych

Fig. 7. Longitudinal section inspection (for samples PP_20 and PP_40) marked the points of maximum and minimum

formance of pastics, Pr. zb., Hanser Verlag, Munich 2001, rozdział 12.

3. Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, OWPW, Warszawa 1994, 7.
4. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, 219, 269.
5. Grzelka M., Augustyniak M.: *Wykorzystanie WTP w analizie wpływu nawęglania na dokładność geometryczną w procesie kształtowania wyrobu*. [w:] Śladek J., Jakubiec W. (red.): *Postępy w metrologii współrzędnościowej*. ATH, Bielsko-Biała 2010, 157–158. ■

The use of coordinate measuring technique in the study of plastics

Abstract: This paper presents a practical aspect of the application of modern coordinate measuring technique in plastics processing. On the example of ATOS II 3D GOM scanner and the classical CMM examines the possibility and appropriateness of use of these tools in the study of polymeric materials. In connection with the use of different parameters of the injection molding of polymeric materials obtained have been promoting different degrees of crystalline of the material which we can observe in the form of deformation product geometry which is analyzed. Observation of these deformations and the subsequent analysis of the sample allow determining the impact of process parameters on the dimensional accuracy of molded parts. The use of optical and classical CMM allows us to analyze their differences and determine the suitability of the application of these tools in research on precision of manufactured of plastics. Results from measurements of the 3D scanner were presented in the form of surface deviation maps for easy observation of the global geometry changes for products manufactured from a variety of factors in injection process. There were also presented sections deviations. For comparison, similar (as possible) sections were measured on classical CMM. This research methodology allows assessing the property using two different tools developed in the coordinate measuring technique, for research related with an accuracy of manufacturing in plastics processing.

Keywords: CMM, deformations, optical scanner 3D, plastics

mgr inż. Maciej Augustyniak

Doktorant Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. W pracy naukowej podejmuje praktyczny aspekty zastosowania współrzędnościowej techniki pomiarowej.

e-mail: maciej.augustyniak@gmail.com



mgr inż. Mateusz Barczewski

Doktorant Zakładu Tworzyw Sztucznych Politechniki Poznańskiej. W pracy naukowej podejmuje tematy związane z reologią polimerów.

e-mail: mateusz.barczewski@put.poznan.pl



mgr inż. Jacek Andrzejewski

Doktorant Zakładu Tworzyw Sztucznych Politechniki Poznańskiej. W pracy naukowej podejmuje tematy związane z nanokompozytami, badaniami nieniszczącymi.

e-mail: jacek.andrzejewski@put.poznan.pl

