

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

KATEDRA TECHNOLOGII i AUTOMATYZACJI

mgr inż. Krystian Stachowiak

*„Analiza badawcza i możliwości wykorzystania odpadów z recyklingu jako
napelniaczy kompozytów polimerowych przeznaczonych do obróbki skrawaniem”*

Praca doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Adam Gnatowski, prof. PCz

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Rafał Gołębski, prof. PCz

Częstochowa, 2024 r.

Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania dla promotorów, bez których niniejsza praca by nie powstała:

Dr hab. inż. Adam Gnatowski, Prof. PCz

Dr hab. inż. Rafał Gołębski, Prof. PCz

Za ukierunkowanie rozprawy, pomoc oraz życzliwość podczas prowadzenia badań.

Chciałbym również podziękować wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej dysertacji, w szczególności Żonie Katarzynie, Dzieciom oraz Rodzicom.

Spis Treści

Wykaz symboli, skrótów i akronimów	5
Wprowadzenie.....	7
1. Przegląd literatury.....	9
1.1. Definicja i elementy budowy kompozytów polimerowych.....	9
1.2. Metody otrzymywania kompozytów o osnowie polimerowej	11
1.3. Recykling tworzyw sztucznych i metali kolorowych	13
1.4. Obróbka wiórowa kompozytów, narzędzia, parametry procesu	15
1.5. Tworzywa polimerowe stosowane w obróbce skrawaniem, właściwości, zastosowanie	24
1.6. Stopy aluminium i miedzi stosowane w obróbce skrawaniem, właściwości.....	28
1.7. Właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych z wypełniaczami metalowymi i ich wpływ na proces obróbki skrawaniem	29
1.8. Topografia powierzchni po obróbce skrawaniem.....	30
1.9. Tomografia kompozytów polimerowych.....	40
2. Cel i zakres pracy.....	43
3. Metodyka badawcza oraz wykorzystane materiały.....	45
3.1. Charakterystyka wykorzystanych materiałów	45
3.2. Metody badań właściwości termicznych	45
3.3. Techniki badań właściwości termomechanicznych	47
3.4. Cyfrowe techniki mikroskopowe w badaniach powierzchniowych	48
3.5. Zaawansowane optyczne techniki mikroskopowe	49
3.6. Tomografia komputerowa w analizie strukturalnej kompozytów.....	52
3.7. Metody pomiaru twardości i udarności materiałów kompozytowych..	55
3.8. Proces obróbki skrawaniem kompozytu	58

4. Formowanie kompozytów metodą prasowania	60
5. Analiza wpływu napelnacza na zmiany właściwości mechanicznych	67
5.1. Ocena dynamicznych właściwości mechanicznych (DMTA)	67
5.2. Analiza termiczna metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej.....	78
5.3. Badania twardości i udarności wyprasek kompozytowych	88
5.4. Wnioski	93
6. Analiza powierzchni po obróbce skrawaniem.....	97
6.1. Charakterystyka powierzchni kompozytów	97
6.1.1. Topografia powierzchni kompozytu aluminium – PA6.....	97
6.1.2 Topografia powierzchni kompozytu mosiądz – PA6	105
6.1.3. Topografia powierzchni kompozytu mosiądz – PEEK.....	112
6.1.4. Topografia powierzchni kompozytu aluminium – PEEK.....	118
6.1.5 Badania makroskopowe kompozytu aluminium – PA6	124
6.1.6 Badania makroskopowe kompozytu mosiądz – PA6	126
6.1.7. Badania makroskopowe kompozytu mosiądz –PEEK.....	129
6.1.8 Badania makroskopowe kompozytu aluminium – PEEK.....	132
6.2. Tomograficzna ocena struktury kompozytów	134
6.3. Wnioski	152
7. Wnioski i uwagi końcowe	155
Streszczenie	162
Summary.....	164
Literatura	166
Spis rysunków.....	176
Spis tabel	181
Suplement.....	183

Wykaz symboli, skrótów i akronimów

Symbole:

- n – prędkość obrotowa,
- v_c – prędkość skrawania dla ruchu obrotowego,
- v_v – prędkość posuwu,
- f – posuw,
- a_p – głębokość skrawania,
- a_e – promieniowa głębokość skrawania (szerokość skrawania),
- R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu,
- R_z – średnia wysokość chropowatości,
- S_q – średnie kwadratowe odchylenie powierzchni,
- S_a – średnia arytmetyczna odchylenia wysokości powierzchni,
- S_z – maksymalna wysokość profilu,
- S_{sk} – współczynnik asymetrii powierzchni,
- S_{ku} – współczynnik nachylenia powierzchni (kurtozy),
- S_p – maksymalna wysokość szczytu,
- S_v – maksymalna wysokość wgłębienia,
- S_k – głębokość chropowatości rdzenia,
- V_{mc} – objętość rdzenia,
- V_{vc} – objętość dołków,
- V_{mp} – objętość wierzchołków,
- V_{vv} – procentowa objętość funkcjonalna,
- E – moduł Younga,
- E^* – zespolony moduł Younga,
- E' – moduł zachowawczy,
- E'' – moduł stratności,
- $\tan \delta$ – tangens kąta stratności mechanicznej,
- a_{cU} – udarność próbek bez karbu,
- E_c – skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu kształtki,
- h – grubość kształtki,
- b – szerokość kształtki do badań,

PA6 – poliamid 6,

PEEK – polieteroeteroketon,

DSC – skaningowa kalorymetria różnicowa,

DMTA – termiczna analiza dynamicznych właściwości mechanicznych,

Al – aluminium,

M – mosiądz,

1-PA5%/Al95%/W0,8 – próbka nr 1, 5% PA6, 95% wiór Al o frakcji 0,6–0,8 mm,
2-PA10%/Al90%/W0,8 – próbka nr 2, 10%PA6, 90% wiór Al o frakcji 0,6–0,8 mm,
3-PA15%/Al85%/W0,8 – próbka nr 3, 15% PA6, 85% wiór Al o frakcji 0,6–0,8 mm,
4-PA5%/Al95%/W1,18 – próbka nr 4, 5% PA6, 95% wiór Al o frakcji 0,8–1,18 mm,
5-PA10%/Al90%/W1,18 – próbka nr 5, 10% PA6, 90% wiór Al o frakcji 0,8–1,18 mm,
6-PA15%/Al85%/W1,18 – próbka nr 6, 15% PA6, 85% wiór Al o frakcji 0,8–1,18 mm,
7-PA5%/M95%/W0,4 – próbka nr 7, 5% PA6, 95% wiór M o frakcji 0,2–0,4 mm,
8-PA10%/M90%/W0,4 – próbka nr 8, 10%PA6, 90% wiór M o frakcji 0,2–0,4 mm,
9-PA15%/M85%/W0,4 – próbka nr 9, PA6 15%, 85% wiór M o frakcji 0,2–0,4 mm,
10-PA5%/M95%/W0,6 – próbka nr 10, 5% PA6, 95% wiór M o frakcji 0,4–0,6 mm,
11-PA10%/M90%/W0,6 – próbka nr 11, 10% PA6, 90% wiór M o frakcji 0,4–0,6 mm,
12-PA15%/M85%/W0,6 – próbka nr 12, 15% PA6, 85% wiór M o frakcji 0,4–0,6 mm,
1'-PEEK5%/M95%/W0,4 – próbka nr 1', 5% PEEK, 95% wiór M o frakcji 0,2–0,4 mm,
2'-PEEK10%/M90%/W0,4 – próbka nr 2', 10% PEEK, 90% wiór M o frakcji 0,2–0,4 mm,
3'-PEEK15%/M85%/W0,4 – próbka nr 3', 15% PEEK, 85% wiór M o frakcji 0,2–0,4 mm,
4'-PEEK5%/M95%/W0,6 – próbka nr 4', 5% PEEK, 95% wiór M o frakcji 0,4–0,6 mm,
5'-PEEK10%/M90%/W0,6 – próbka nr 5', 10% PEEK, 90% wiór M o frakcji 0,4–0,6 mm,
6'-PEEK15%/M85%/W0,6 – próbka nr 6', 15%PEEK, 85% wiór M o frakcji 0,4–0,6 mm,
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8 – próbka nr 7', 5% PEEK, 95% wiór Al o frakcji 0,6–0,8 mm,
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8 – próbka nr 8', 10% PEEK, 90% wiór Al o frakcji 0,6–0,8 mm,
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 – próbka nr 9', 15% PEEK, 85% wiór Al o frakcji 0,6–0,8 mm,
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 – próbka nr 10', 5% PEEK, 95% wiór M o frakcji 0,8–1,18 mm,
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18 – próbka nr 11', 10% PEEK, 90% wiór M o frakcji 0,8–1,18 mm,
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18 – próbka nr 12', 15% PEEK, 85% wiór M o frakcji 0,8–1,18 mm.

Wprowadzenie

W epoce, w której świadomość ekologiczna i konieczność ochrony środowiska naturalnego stają się priorytetami globalnymi, rola recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów zyskuje na znaczeniu. Potrzeba ochrony środowiska jest wyraźnie widoczna w strategiach politycznych, inicjatywach korporacyjnych oraz postawach konsumentów, którzy coraz częściej poszukują produktów i procesów przyjaznych dla środowiska. W tym dynamicznie zmieniającym się środowisku, kluczowym aspektem staje się efektywne zarządzanie odpadami, obejmujące recykling oraz ponowne wykorzystanie materiałów, co jest nie tylko odpowiedzią na rosnące wymagania regulacyjne, ale także wyrazem świadomej odpowiedzialności społecznej i ekologicznej.

Recykling jako integralny element gospodarki obiegu zamkniętego, odgrywa kluczową rolę w minimalizacji zużycia surowców, ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych i zmniejszaniu ilości odpadów składowanych na wysypiskach. Wykorzystanie odpadów z recyklingu jako napełniaczy w kompozytach polimerowych to innowacyjne podejście, które otwiera nowe możliwości w wielu dziedzinach przemysłu. Ta metoda nie tylko przyczynia się do redukcji kosztów materiałowych i energetycznych, ale także zwiększa wartość dodaną odpadów. Ponadto, wprowadzenie materiałów recyklingowych do procesów produkcji kompozytów polimerowych może prowadzić do tworzenia produktów o ulepszonych właściwościach.

Kompozyty polimerowe, które są coraz częściej stosowane w nowoczesnych konstrukcjach, nabierają znaczenia jako materiały zastępujące tradycyjne surowce w różnych sektorach przemysłu. Dzięki swoim unikalnym właściwościom, takim jak lekkość, wysoka wytrzymałość mechaniczna oraz odporność na korozję, materiały te znajdują zastosowanie w produkcji zaawansowanych technologicznie komponentów oraz przedmiotów codziennego użytku. Warto zaznaczyć, że kompozyty polimerowe można dostosowywać do zróżnicowanych wymagań funkcjonalnych, co czyni je uniwersalnymi w różnorodnych zastosowaniach. Ponadto, wykorzystanie odpadów, w postaci wiórów ze stopów aluminium i miedzi (mosiądzu), jako napełniaczy

w kompozytach, przyczynia się do obniżenia kosztów produkcji oraz wspiera zrównoważony rozwój poprzez ograniczenie wykorzystania surowców pierwotnych.

Innowacyjne materiały stawiają coraz większe wyzwanie w dziedzinie obróbki skrawaniem, która jest jednym z podstawowych procesów w produkcji przemysłowej. Nowoczesne materiały charakteryzują się unikalnymi właściwościami, co sprawia, że obróbka skrawaniem staje się trudniejsza, ponieważ tradycyjne narzędzia i metody mogą być nieskuteczne lub szybko się zużywać. Odpowiedni dobór narzędzi, parametrów obróbki staje się kluczowym aspektem w celu uzyskania podwyższonych tolerancji, jak również jakości obrabianych powierzchni. Dokładność wymiarowo-kształtowa w połączeniu z odpowiednią jakością narzędzi pozwala na obróbkę z wysokimi parametrami technologicznymi, co sprzyja zwiększeniu wydajności procesu i zmniejszeniu kosztów.

Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza wpływu wiórów ze stopów aluminium i mosiądzu jako napełniaczy w kompozytach polimerowych na ich właściwości mechaniczne i termiczne oraz na proces obróbki skrawaniem. Analiza ta obejmuje badania porównawcze zmian właściwości termomechanicznych uzyskanych kompozytów, z uwzględnieniem zmian struktury warstwy wierzchniej przed i po procesie obróbki skrawaniem. Badania te mają na celu nie tylko ocenę jakości obrabianych powierzchni, ale również zrozumienie wpływu napełniaczy recyklingowych na proces obróbki.

Podjętowany temat badań jest nie tylko aktualny, ale również ma istotne znaczenie dla przyszłości przemysłu i ochrony środowiska oraz osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju.

1. Przegląd literatury

1.1. Definicja i elementy budowy kompozytów polimerowych

Kompozyty stanowią grupę materiałów, które zyskują na popularności dzięki ciągłemu rozszerzaniu się ich możliwości aplikacyjnych. W ciągu ostatnich lat obserwuje się intensywny rozwój w dziedzinie badań nad kompozytami polimerowymi oraz metodami ich obróbki. W literaturze technicznej niezwykle trudno jest znaleźć jednoznaczną definicję materiału kompozytowego. Jedną z przyczyn tej sytuacji jest różnorodność terminów stosowanych w odniesieniu do materiałów kompozytowych, która wynika z ich powiązania z licznymi dziedzinami, takimi jak polimery, metaloznawstwo, ceramika czy inżynieria materiałowa [1, 2]. Według powszechnie przyjętej i stosowanej definicji kompozyty to zaawansowane materiały, które składają się przynajmniej z dwóch różnorodnych składników (faz), połączonych, by stworzyć materiał o unikalnych, często poprawionych właściwościach w porównaniu do właściwości poszczególnych komponentów. Uzupełniając powyższą definicję należy wspomnieć o dwóch pojęciach dotyczących głównych składników kompozytu a mianowicie o osnowie (matrycy) oraz wzmocnieniu (zbrojeniu lub napełniaczu). W zależności od rodzaju osnowy kompozyty można podzielić na: kompozyty o osnowie metalowej oraz kompozyty o osnowie niemetalowej (ceramicznej, polimerowej). Osnowę stanowi materiał wypełniający przestrzeń między elementami wzmacniającymi. Polimery jako osnowa w strukturach kompozytów odgrywają ważną rolę, zapewniając równomierne rozłożenie obciążeń na napełniacz, wzmacniając oraz nadając finalnym produktom pożądane kształty. Ponadto decydują o właściwościach cieplnych i chemicznych oraz o palności kompozytów. Wpływają również na wybór metod produkcyjnych, co ma istotne znaczenie dla optymalizacji procesów wytwarzania. Natomiast ze względu na rodzaj fazy zbrojącej wyróżniamy kompozyty zbrojone włóknami (ciągłymi, krótkimi), cząsteczkami oraz dyspersyjnie. Wzmocnienie stanowią w zależności od potrzeb bardzo zróżnicowane materiały, mające za zadanie wprowadzenie zmian wytrzymałościowych lub nadanie cech eksploatacyjnych [3-6].

W kontekście niemal nieograniczonego zakresu możliwości kombinacji składników, ich morfologii, struktury oraz składu chemicznego (tab. 1.1.), w procesie projektowania materiałów kompozytowych niezbędne jest ich kompleksowe rozpatrzenie zarówno na poziomie mikroskopowym, jak i makroskopowym.

Tab. 1.1. Schemat możliwych kombinacji materiałów kompozytowych [7]

OSNOWA	ZBROJENIE		
	Metal	Polimer	Ceramika
Metal	Metal - Metal	Metal - Polimer	Metal - Ceramika
Polimer	Polimer - Metal	Polimer - Polimer	Polimer - Ceramika
Ceramika	Ceramika - Metal	Ceramika - Polimer	Ceramika - Ceramika

Biorąc pod uwagę prostotę procesu produkcyjnego, dostępność komponentów oraz aktualnie rosnące zapotrzebowanie, najbardziej popularne materiały kompozytowe zostały opracowane z matrycą polimerową. Kompozyty polimerowe są projektowane i produkowane celowo, aby uzyskać właściwości niemożliwe do osiągnięcia przez pojedyncze składniki działające niezależnie. Są one wykorzystywane nie tylko do poprawy parametrów mechanicznych, ale również cech elektrycznych, termicznych, tribologicznych i innych, kluczowych w różnorodnych warunkach środowiskowych. Zawierają włókna lub cząstki, które zwiększają sztywność i wytrzymałość w stosunku do matrycy. Dodatkowo, elementy wzmacniające mogą poprawiać przewodnictwo cieplne i elektryczne, obniżać współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz zwiększać odporność na zużycie [8].

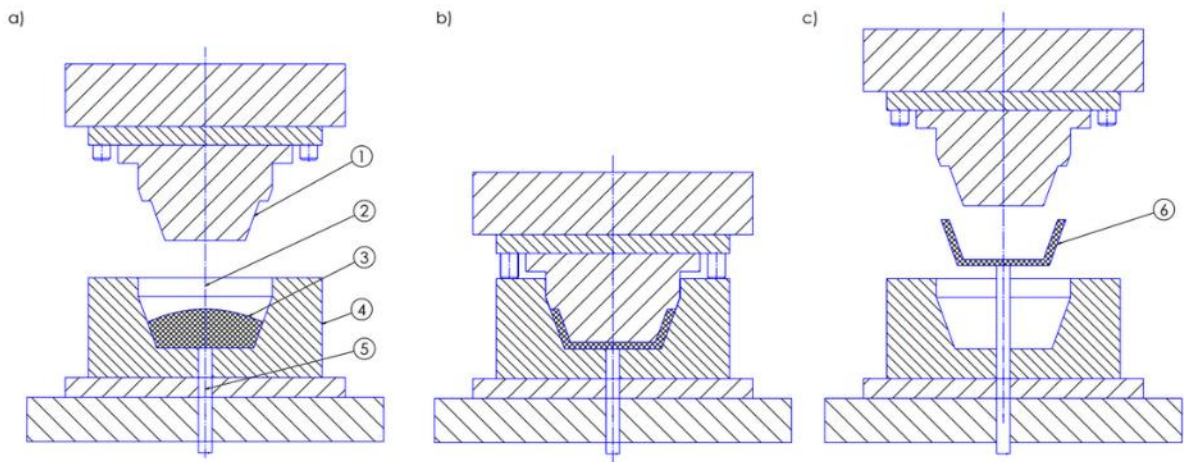
Kompozyty polimerowe stanowią interesującą grupę materiałów, oferując szerokie możliwości innowacji w projektowaniu i produkcji. Ich adaptowalność, połączona z doskonałymi właściwościami mechanicznymi, sprawia, że są one cenione w wielu zaawansowanych aplikacjach inżynierskich. Wyzwania związane z ich wykorzystaniem motywują do prowadzenia nieustannych prac badawczych i rozwojowych.

1.2. Metody otrzymywania kompozytów o osnowie polimerowej

Wśród kluczowych technik produkcji kompozytów wymienia się metody takie jak formowanie wtryskowe, ekstruzja, laminacja oraz prasowanie. Każda z tych technologii oferuje wyjątkowe korzyści i jest wybierana w zależności od oczekiwanych właściwości końcowego produktu oraz specyfikacji surowców użytych do jego wytworzenia. Kompozyty o osnowie termoplastów wytwarza się między innymi metodą prasowania [9-12].

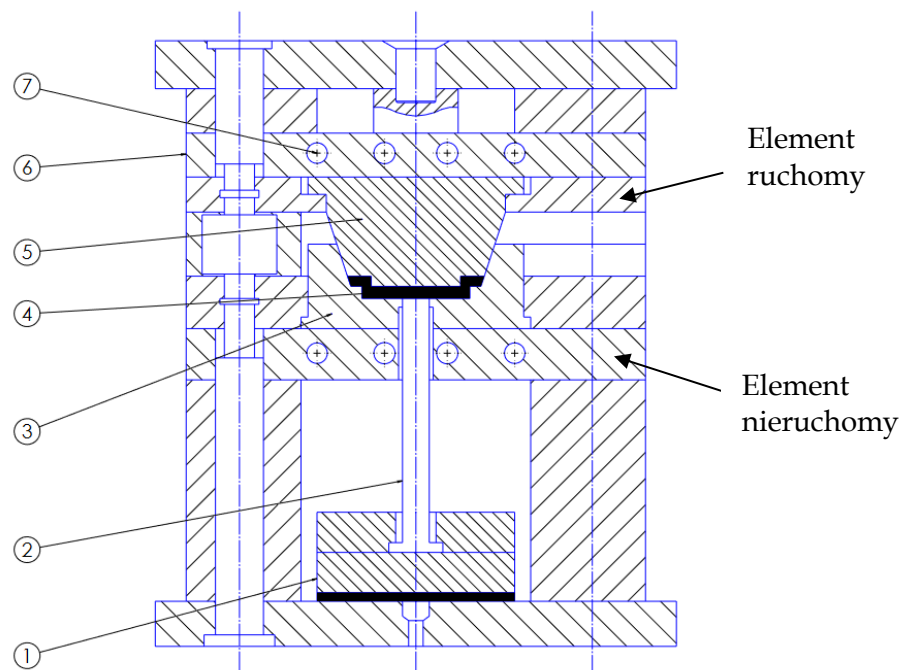
Prasowanie dzielimy na prasowanie wstępne (tabletkowanie), wysokociśnieniowe i niskociśnieniowe. Prasowanie niskociśnieniowe stosuje się głównie do tworzyw utwardzających się w wyniku polimeryzacji addycyjnej i kopolimeryzacji rodnikowej, gdzie ciśnienie w procesie nie przekracza 2 MPa. Spoiwem są nienasycone żywice poliestrowe i epoksydowe z inicjatorem lub utwardzaczem, natomiast nośnikiem są m.in. napełniacze arkuszowe lub cięte włókno. Prasowanie to może odbywać się w temperaturze normalnej oraz podwyższonej [13].

Wysokociśnieniowe prasowanie dzielimy na tłoczne, przetłoczne i płytowe. Kluczowymi parametrami procesu są: temperatura, ciśnienie oraz czas prasowania. Ważne jest ustalenie optymalnego ich zakresu gwarantującego otrzymanie wyprasek o najlepszych właściwościach użytkowych. Temperatura prasowania jest parametrem sprzężonym z temperaturą uplastycznienia tworzywa. Prasowanie tłoczne (rys. 1.1.) odbywa się w specjalnie zaprojektowanej formie i polega na umieszczeniu chłodnego lub wstępnie ogrzanego tworzywa, w postaci proszku, granulatu w gnieździe otwartej formy, zamknięciu formy stemplem, ogrzaniu do stanu plastyczności, wywołaniu pod naciskiem stempla płynięcia, zestaleniu tworzywa w podwyższonej lub obniżonej temperaturze i na wyjęciu wypraski ze zdemontowanej formy. Prasowanie odbywa się przy użyciu specjalnych pras hydraulicznych zaprojektowanych do pracy w pionie. Dodatkowo, prasy te są wyposażone w system grzewczy, który umożliwia kontrolę temperatury wewnątrz formy [14].



Rys. 1.1. Schemat prasowania tłocznego: a) napełnianie gniazda, b) forma zamknięta, c) wypychanie wypraski; 1 - stempel, 2 - gniazdo formujące, 3 - tłoczywo, 4 - matryca, 5 - wypychacz, 6 - wypraska prasownicza [15].

Forma tłoczna wykorzystywana w procesie prasowania pod wysokim ciśnieniem (rys. 1.2.) skonstruowana jest z dwóch głównych elementów: części stałej (nieruchomej), która jest przymocowana do nieruchomego stołu prasy, oraz części ruchomej, przytwierdzonej do ruchomego tłoka prasy.



Rys. 1.2. Forma tłoczna do tworzyw utwardzalnych: 1 - płyta układu pchania wypraski, 2 - wypychacz, 3 - matryca, 4 - wypraska, 5 - stempel, 6 - płyta grzejna podzespołu ruchomego, 7 - kanały grzejne [16, 17].

1.3. Recykling tworzyw sztucznych i metali kolorowych

Rozwój przemysłu wraz z postępowaniem cywilizacji przekładają się na ilość odpadów, dlatego zwiększa się również rola oraz znaczenie recyklingu tworzyw sztucznych i metali kolorowych. Eliminacja takich odpadów, szczególnie powszechnie używanych wymusza uwzględnienie aspektów technologicznych, ekonomicznych i energetycznych, a szczególnie kwestii wpływu na środowisko naturalne. Recykling to proces odzyskiwania i ponownego wykorzystywania odpadów pochodzących zarówno z procesów technologicznych wykorzystujących tworzywa polimerowe i obróbki skrawaniem, jak i z samych zużytych produktów wykonanych z tych materiałów.

W przypadku recyklingu tworzyw sztucznych istnieje kilka głównych metod wykorzystywanych do ich odzyskiwania: recykling surowcowy (chemiczny), recykling materiałowy, recykling organiczny oraz odzysk energii.

Recykling surowcowy polega na przeprowadzeniu na odpadach polimerowych określonych reakcji chemicznych, które prowadzą do uzyskania z nich surowców chemicznych lub energetycznych. Najczęściej wykorzystywane są reakcje chemiczne takie jak: piroliza, uwodornianie, hydroliza, piroliza niskotemperaturowa.

Recykling materiałowy polega na zagospodarowaniu odpadów metodami przetwórczymi, czyli przekazaniu ich do ponownego przetwórstwa i uzyskanie nowych wyrobów. Powtórne użycie tworzyw polimerowych z odpadów wymaga ich oddzielenia od pozostałych odpadów typu szkło, metale lub papier. Optymalnym i prostym wariantem wydaje się podział na trzy frakcje: palną (papier, tekstylia, drewno, odpady organiczne), niepalną (szkło, metal, ceramika) i odpady tworzyw polimerowych. Te ostatnie mogą być dalej sortowane metodami mechanicznymi. Recykling materiałowy pozwala na bezpośrednie odzyskanie materiału bez konieczności przeprowadzania procesów chemicznych. Problemem utrudniającym ten proces są: zanieczyszczenie odpadów innymi materiałami konstrukcyjnymi, zmieszanie ze sobą różnych rodzajów polimerów oraz zawilgocenie. Z tego względu proces technologiczny recyklingu materiałowego składa się z kilku etapów: segregacja odpadów, ich rozdrabnianie, oddzielenie zanieczyszczeń metalicznych, mycie, oddzielenie wody i wysuszenie polimeru, sporządzenie mieszanki do wytłaczania,

wyłaczanie i otrzymanie granulatu, przetwórstwo wybraną metodą i otrzymanie gotowego wyrobu [18, 19].

Recykling energetyczny to spalanie odpadów z odzyskiem energii. Zaletą recyklingu energetycznego jest fakt, że niezależnie od rodzaju zastosowanego tworzywa polimerowego, użytych napełniaczy i postaci odpadu, nie zachodzi potrzeba wstępnej segregacji, mycia czy usuwania substancji organicznych. Rozwój procedur recyklingu wymaga skomplikowanych działań zarówno w aspekcie organizacyjnym, technicznym, jak również zwiększonej świadomości ekologicznej co stanowi ważny krok w kierunku zrównoważonej gospodarki materiałowej [20, 21].

Recykling drobnoziarnistych odpadów metalowych obliguje do wykorzystania specjalistycznych maszyn, wśród których kluczową rolę odgrywają urządzenia prasujące służące do scalania, brykietowania materiałów. W praktyce najczęściej stosowane są prasy o działaniu stemplowym oraz walcowym. Wybór konkretnego typu urządzenia prasującego jest uzależniony od charakterystyki i rodzaju odpadów, a także od wymagań operacyjnych oraz zasobów technicznych przedsiębiorstwa [22].

Połączenie skutecznego recyklingu tworzyw polimerowych z wykorzystaniem do ponownej produkcji odpadów metali kolorowych jako napełniaczy w kompozytach polimerowych jest innowacyjnym podejściem w inżynierii mechanicznej i materiałowej. Jest to praktyka, która ma na celu wykorzystanie odpadów w postaci wióra ze stopów aluminium oraz mosiądzu pochodzącego z przemysłu mechanicznego (obróbkowego). Główne cechy tego podejścia obejmują wiele korzyści. Po pierwsze, pozwala to na efektywny recykling surowców, co redukuje ilość odpadów składowanych na składowiskach. Po drugie, metaliczne napełniacze znacząco poprawiają wytrzymałość i właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych, co czyni je bardziej trwałymi i odpornymi na obciążenia. Dodatkowo, metaliczne napełniacze, takie jak aluminium i mosiądz, charakteryzują się naturalną odpornością na korozję, co przekłada się na dłuższą żywotność materiałów kompozytowych. Wykorzystanie odpadów metalowych może również przyczynić się do obniżenia kosztów produkcji kompozytów, ponieważ materiały te często są dostępne w niższych cenach niż nowe surowce. Podejście to jest zgodne

z ideą zrównoważonego rozwoju, ponieważ redukuje zużycie surowców naturalnych i minimalizuje negatywny wpływ na środowisko.

Jednakże, istnieją wyzwania związane z przetwarzaniem odpadów metalowych, kontrolą jakości oraz dostosowaniem procesów produkcyjnych do uzyskania specyficznych właściwości kompozytów. Niemniej jednak, rosnące zainteresowanie recyklingiem odpadów metalowych w produkcji kompozytów polimerowych jest obiecującym krokiem w kierunku bardziej zrównoważonych i ekologicznych materiałów, które mogą znacząco wpłynąć na różne dziedziny przemysłu. Recykling jest kluczowym narzędziem w dążeniu do zrównoważonego gospodarowania surowcami i redukcji ilości odpadów trafiających na składowiska.

1.4. Obróbka wiórowa kompozytów, narzędzia, parametry procesu

Dynamiczny rozwój i szerokie zastosowanie kompozytów polimerowych w różnych gałęziach przemysłu spowodował potrzebę podjęcia między innymi zagadnień ich obróbki. W inżynierii mechanicznej, obróbka wiórowa odgrywa kluczową rolę jako jedna z podstawowych metod kształtowania ubytkowego. Metoda ta obejmuje szeroki zakres procesów produkcyjnych, których głównym zadaniem jest usunięcie nadmiaru materiału w celu osiągnięcia wymaganego kształtu, wymiaru lub wykończenia powierzchni przedmiotu. Realizacja obróbki wiórowej przez skrawanie z użyciem zdefiniowanego narzędzia o określonej liczbie ostrzy umożliwia przeprowadzenie różnorodnych procesów technologicznych, takich jak toczenie, frezowanie, wiercenie, rozwiercanie, przeciąganie, gwintowanie, struganie oraz obróbkę uzębień. Każdy z tych procesów ma określone zastosowanie, co pozwala na precyzyjną obróbkę komponentów o złożonych geometriach i wysokich wymaganiach jakościowych. Obróbka skrawaniem znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle maszynowym, lotniczym, motoryzacyjnym, narzędziowym i wielu innych, co podkreśla jej uniwersalność i niezbędność w nowoczesnym przemyśle.

Kluczowy w obróbce skrawaniem jest odpowiedni dobór narzędzi oraz parametrów obróbki, które muszą być dostosowane do specyfiki obrabianego materiału i wymaganej jakości końcowego produktu. Ważna jest również znajomość

cech materiałowych obrabianego detalu, takich jak twardość, wytrzymałość czy skłonność do tworzenia wiórów, ponieważ wpływają one bezpośrednio na proces skrawania, zużycie narzędzi oraz chropowatość powierzchni. Praktyka ta wymaga nie tylko wiedzy teoretycznej, ale także doświadczenia i umiejętności w zakresie inżynierii produkcji [23–26].

Obróbka kompozytów polimerowych jest procesem wymagającym i zależy znacząco od ich cech materiałowych. Kompozyty wzbogacone o napelniacze mineralne, wzmocnione włóknami szklanymi oraz te wykazujące wysoką sprężystość stanowią grupy produktów, które prezentują wyjątkowe wyzwania w kontekście obróbki skrawaniem. Ze względu na złą przewodność cieplną i względnie niską temperaturę topnienia większości kompozytów polimerowych należy zwracać szczególną uwagę na dobre odprowadzenie ciepła w trakcie obróbki. W przypadku przegrzania materiału w trakcie obróbki mogą powstać odbarwienia, nadtopienie powierzchni, deformacja lub delaminacja. W celu uniknięcia skutków przegrzania należy przede wszystkim przestrzegać kilku kryteriów. Pierwszym z nich jest weryfikacja stanu ostrza narzędzi, które musi być we właściwym stanie i ostre. Kolejnym ważnym aspektem jest kąt przyłożenia, który musi być dostatecznie duży, aby do obrabianego materiału przylegało tylko ostrze w celu uniknięcia tarcia. Należy również pamiętać o właściwym odprowadzeniu wiórów, aby uniknąć wzrostu temperatury. W przypadku kompozytów polimerowych środki chłodzące z reguły nie są konieczne, ewentualnie w celu lepszego odprowadzenia wiórów w procesie wiercenia i gwintowania można stosować środki chłodzące [23, 27].

O wyniku procesu obróbki decyduje również szereg czynników powstających z wzajemnego oddziaływania obrabianego przedmiotu, narzędzia oraz obrabiarki. Warto zauważyć, że dla wytworzonego i badanego w pracy materiału kompozytowego dodatkowe czynniki takie jak ciśnienie pracowania, orientacja i rozmiar wiórów mają również ogromny wpływ na przebieg i jakość obróbki ubytkowej. W tabeli (tab. 1.2.) przedstawiono podstawowe czynniki wpływające na proces obróbki wiórowej.

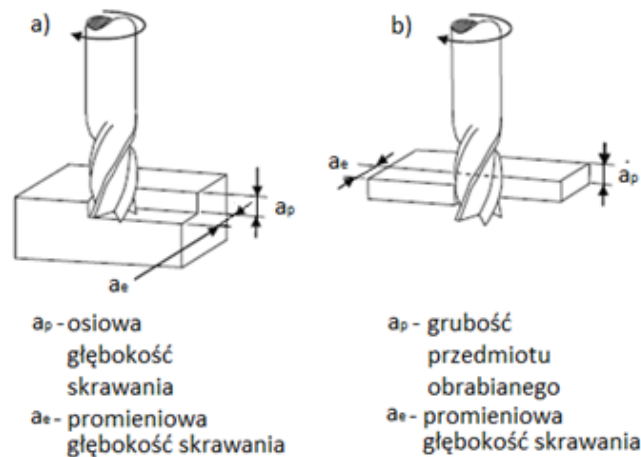
Tab. 1.2. Czynniki wpływające na proces obróbki wiórowej [28]

Czynniki wpływające na proces obróbki wiórowej	
Obrabiany przedmiot	- dokładność obróbki - oddziaływanie na strefy obrabiane - topografia powierzchni - materiał
Proces obróbki	- tworzenie wióra - temperatura - zużycie - tarcie
Proces produkcji	- koszty produkcji - optymalizacja kosztów - parametry skrawania
Parametry skrawania	- prędkość skrawania - posuw - siły skrawania - ciecz chłodząco-smarująca
Materiał narzędzia skrawającego	- rodzaj - właściwości - geometria ostrzy
Obrabiarka	- charakterystyka termiczna - dokładność i sztywność obrabiarki - odprowadzanie wiórów

Uwzględniając specyfikę struktury materiałowej kompozytu oraz wszystkie niekorzystne zjawiska związane z wywoływaniem dekohezji, narzędzia wykorzystywane do obróbki kompozytów powinny charakteryzować się specjalną budową, zarówno w sensie geometrii jak i rodzaju materiału i pokrycia. Można dokonać klasyfikacji narzędzi wykorzystywanych w produkcji, według grup materiałowych:

- stale narzędziowe, zarówno węglowe jak i stopowe,
- stale szybko tnące,
- stopy o wysokiej twardości,
- węgliki spiekane pokrywane,
- spieki ceramiczne,
- materiały super twarde (borazon, diament polikrystaliczny) [29].

W niniejszej pracy skupiono się na procesie frezowania kompozytów, gdzie narzędzie wykonuje ruch obrotowy, a obrabiany przedmiot porusza się ruchem posuwowym prostoliniowym. Metody frezowania klasyfikuje się w zależności od kierunku pracy narzędzia. Wyróżniamy frezowanie obwodowe oraz czołowe, co ilustruje poniższy rysunek (rys. 1.3.).



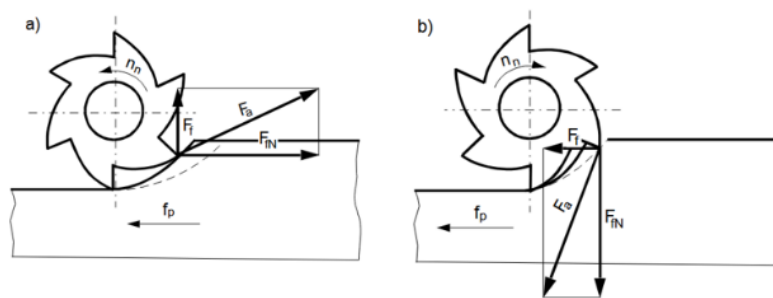
Rys. 1.3. Frezowanie a) czołowe, b) obwodowe [30]

W przypadku frezowania czołowego materiał jest usuwany za pomocą ostrzy ostrza znajdują się na powierzchni czołowej narzędzia (rys. 1.3.a). W trakcie tego procesu, czoło freza odgrywa kluczową rolę w skrawaniu materiału.

Frezowanie obwodowe natomiast polega na tym, że ruch skrawający zachodzi głównie na obwodzie narzędzia, co oznacza, że to zewnętrzne ostrza freza wykonują skrawanie (rys. 1.3.b). W tym procesie frez może przemieszczać się równoległe do przedmiotu obrabianego (frezowanie wzdłużne) lub prostopadle (frezowanie poprzeczne). Frezowanie obwodowe jest powszechnie stosowane w przypadku obróbki powierzchni płaskich, rowków, konturów swobodnych oraz przecinania w celu uzyskania pożądanych kształtów i wymiarów.

Frezowanie obwodowe rozpatruje się także pod względem kinematyki ruchu narzędzia i przedmiotu obrabianego, możemy wówczas podzielić je na współbieżne oraz przeciwbieżne. W przypadku frezowania przeciwbieżnego (rys. 1.4.a), przedmiot obrabiany przesuwają się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu obrotowego freza, podczas gdy w frezowaniu współbieżnym (rys. 1.4.b) posuw przedmiotu

obrabanego jest zgodny z kierunkiem jego obrotu. Zastosowanie odpowiedniego sposobu frezowania obwodowego ma istotny wpływ na efektywność oraz jakość procesu obróbki. Ma to istotny związek z siłami, jakie frez wywiera na materiał obrabiany (rys. 1.4.). Składowa siły skrawania F_{FN} działa inaczej w zależności od wybranej metody. W przypadku frezowania przeciwbieżnego siła podniesienie przedmiotu od powierzchni zamocowania, natomiast przy frezowaniu współbieżnym będzie go dociskać [31].



Rys. 1.4. Frezowanie a) przeciwbieżne, b) współbieżne [31]

Parametry frezowania to prędkość skrawania V_c , prędkość obrotowa n oraz prędkość posuwu V_f .

Prędkość skrawania określa się według wzoru:

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (1)$$

gdzie:

d – średnica narzędzia [mm],

n – prędkość obrotowa [obr/min].

Prędkość posuwu określa się według wzoru:

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \left[\frac{mm}{min} \right] \quad (2)$$

gdzie:

f_z – posuw na ostrze [mm/ostrze],

z – liczba ostrzy

n – prędkość obrotowa [obr/min].

Podczas frezowania nie występuje stała grubość warstwy skrawanej, dlatego wprowadza się do obliczeń średnią grubość warstwy skrawanej h_m , która wyrażana jest wzorem:

$$A = b \cdot h_m \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$$

gdzie:

b – szerokość skrawanej warstwy [mm],

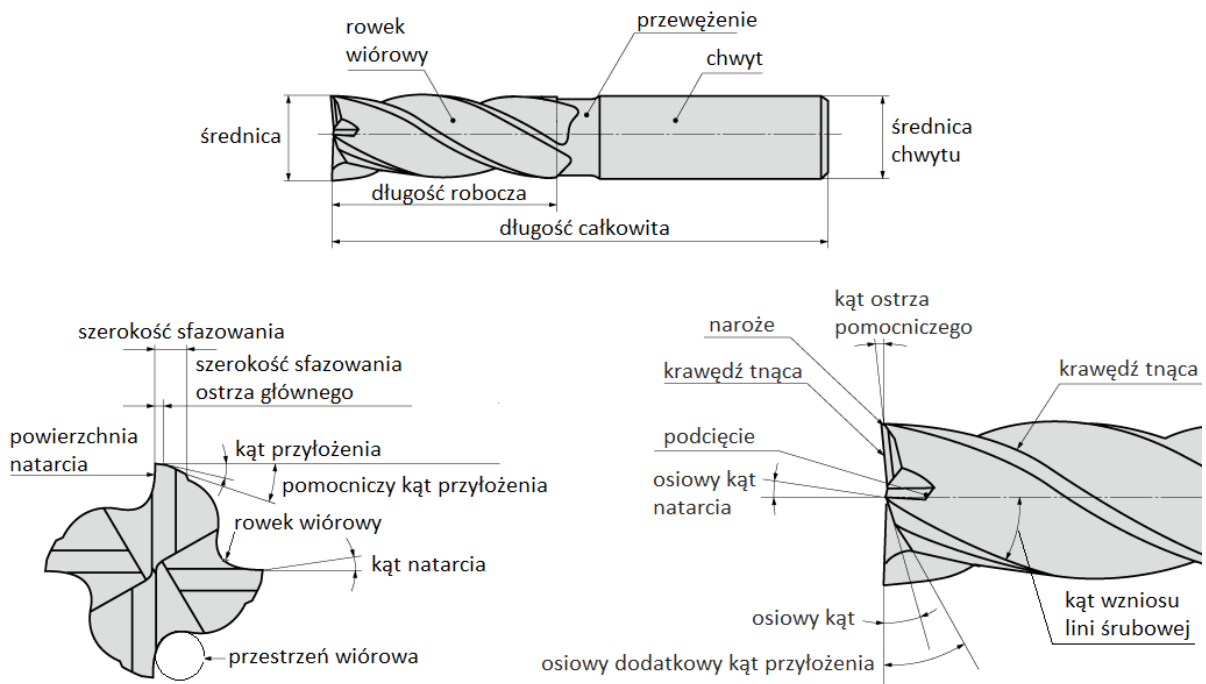
h_m – średnia grubość warstwy skrawanej [mm].

Zachowanie kompozytów polimerowych w trakcie obróbki jest determinowane przez parametry procesowe, takie jak prędkość skrawania, kąt natarcia, promień krawędzi tnącej, głębokość skrawania i materiał narzędzia. Dodatkowo właściwości reologiczne i termiczne kompozytów polimerowych mają znaczący wpływ na proces obróbki. Ze względu na złą przewodność cieplną i względnie niską temperaturę topnienia w większości termoplastów, należy zwracać uwagę, aby podczas obróbki wytworzona i przenoszona na obrabiany detal była możliwie mała ilość ciepła. W przypadku tworzyw termoplastycznych, zwiększenie kąta natarcia i zmniejszenie głębokości skrawania prowadzi do zmniejszenia ilości deformacji. Ze względu na swoje właściwości termiczne i mechaniczne, tworzywa te reagują na zmiany parametrów obróbki w sposób odmienny niż materiały metalowe czy nawet inne rodzaje polimerów, takie jak termoutwardzalne. Wzrost prędkości skrawania prowadzi do zwiększenia generowanego ciepła w strefie skrawania, dlatego materiały te mogą ulegać topieniu lub degradacji termicznej przy podwyższonej temperaturze. Wyższe prędkości skrawania mogą ułatwić usuwanie wiórów z obszaru cięcia, co jest korzystne dla utrzymania jakości obróbki. W przypadku niektórych termoplastów, miękkie i lepkie wióry mogą kleić się do

ostrza narzędzia skrawającego. Dla uniknięcia takiej sytuacji wymaga się opracowania odpowiedniej strategii obróbki w celu uzyskania wysokiej jakości powierzchni m.in. chropowatości. Optymalizacja prędkości skrawania podczas obróbki materiałów termoplastycznych wymaga znalezienia równowagi między efektywnością obróbki a ryzykiem negatywnych skutków związanych z generowaniem ciepła [32, 33].

Narzędzia do obróbki tworzyw sztucznych i materiałów kompozytowych produkowane są ze stali szybko tnącej (HSS), węglików spiekanych, ceramiki lub diamentu polikrystalicznego (PKD). Każda z tych grup materiałowych ma swoje charakterystyczne właściwości mechaniczne i termiczne, co kierkuje ich zastosowanie do określonych procesów obróbkowych. Najpopularniejsze są trzpieniowe frezy monolityczne węglikowe. Dla materiałów o mniejszym udziale zbrojenia poniżej 60% projektuje się frezy o krawędziach ułatwiających łamanie cząstek lub włókien podczas obróbki, przeciwdziałając ich strzępieniu i wrywaniu z materiału. Dla wysokowytrzymałych materiałów kompozytowych o dużej zawartości zbrojenia powyżej 60%, projektuje się frezy o ostrzach z syntetycznego diamentu zapewniające odpowiednią w tych warunkach odporność na ścieranie. Pokrycie to może być naniesione za pomocą technologii chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) lub fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD). Diament jest najtwardszym znanym materiałem, co sprawia, że frezy te charakteryzują się wyjątkową twardością i odpornością na ścieranie, a także wydłużoną żywotnością w porównaniu do frezów węglikowych [34].

Frezy stosowane do obróbki tworzyw sztucznych i kompozytów charakteryzują się indywidualnie zaprojektowaną geometrią dla potrzeb obróbki "na zimno". Na rysunku 1.5 przedstawiono standardową budowę i geometrie ostrza freza trzpieniowego. Specjalne geometrie łamaczy wióra projektowane są w celu zredukowania siły skrawania oraz ciepła procesowego. Projektuje się frezy jedno, dwu lub wieloostrowe w celu zapobieganiu delaminacji, strzępieniu lub wrywaniu cząstek w kompozytach polimerowych przy zoptymalizowanym procesie frezowania z wykorzystaniem oprogramowania CAD/CAM.



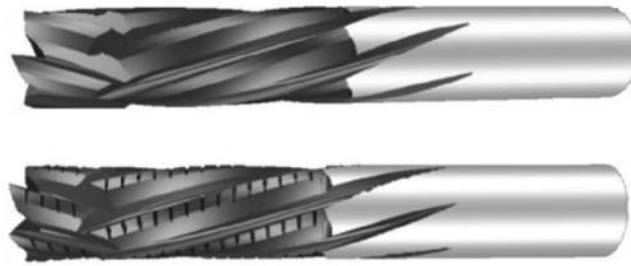
Rys. 1.5. Budowa i geometria ostrza freza trzpieniowego [28]

Na rysunku 1.6 przedstawiono jednoostrzowy (rys. 1.6.a) i trzyostrzowy (rys. 1.6.b) frez trzpieniowy VHM bez powłoki ze specjalną geometrią do obróbki tworzyw sztucznych i aluminium.



Rys. 1.6. Frez trzpieniowy VHM bez powłoki a) jednoostrzowy b) trzyostrzowy [35]

Na rysunku 1.7 zaprezentowano uniwersalne wielostrzowe kompresyjne frezy pełno węglkowe do obróbki kompozytów. W celu zapewnienia odpowiednich parametrów i jakości obróbki frezy produkowane są z bardzo drobnego i twardego węgla wraz z innowacyjną geometrią. W ramach poprawienia żywotności narzędzia nanosi się dodatkowe powłoki diamentowe [35].



Rys. 1.7. Frez wieloostrowy kompresyjny pełno węglkowy do obróbki kompozytów [36]

Na rysunku 1.8 zaprezentowano frezy walcowo-czołowe z geometrią wieloostrową naprzemienskością zwaną również diamentową z racji szlifowania w kształcie diamentu. Technika wykonania i geometria zapewniają najlepszą wydajność cięcia w zastosowaniu do kompozytów z włóknem szklanym. Narzędzia z drobnym profilem ostrzy są przeznaczone do kompozytów z dużym udziałem włókien, a z profilem grubym do materiałów typu sandwich i spienionych. Frez wykorzystywany jest do frezowania czołowego, frezowania obwodowego i obcinania krawędzi kompozytów włóknistych [35, 36].



Rys. 1.8. Frez walcowo-czołowy z geometrią wieloostrową [35, 36]

Wysokowydajne frezy PKD (rys. 1.9.) spełniają bardzo wysokie wymagania w zakresie wydajności obróbki skrawaniem, a ze względu na wykonanie z różnym kątem osiowym przeznaczone są do różnych strategii obróbczych. Frezy te występują z kątem osiowym 0° (warunki neutralne), dodatnim 2° lub 4° (warunki normalne) oraz ujemnym -2° lub -4° (do cienkich materiałów, które w trakcie obróbki są dociskane do podłoża) [36].



Rys. 1.9. Wysokowydajne frezy PKD a) kąt osiowy 0° b) dodatni kąt osiowy 2° lub 4° c) ujemny kąt osiowy -2° lub -4° [35]

Aktualnie najczęściej używanymi maszynami do obróbki kompozytów polimerowych są 3 lub 5 osiowe frezarki numeryczne CNC, które są sterowane komputerowo, umożliwiając wykonanie procesu z dużą dokładnością i powtarzalnością. Nieunikniony postęp w konstrukcji obrabiarek, nowe coraz trudniej obrabialne materiały, wymogły znaczące zmiany również w konstrukcji i budowie narzędzi. Obserwuje się nowe rozwiązania w zakresie materiałów narzędziowych, powłok ochronnych, narzędzi składanych i monolitycznych ze szczególnym zwróceniem uwagi na stosowanie nowych geometrii. Wymagania podwyższonych tolerancji jak również jakości obrabianych powierzchni są coraz większe, nie tylko w obszarze obróbki metali, lecz także materiałów niemetalowych. Dokładność wymiarowo-kształtowa w połączeniu z dużą sztywnością narzędzi pozwala na obróbkę z wysokimi parametrami technologicznymi, co sprzyja zwiększeniu wydajności obróbki i zmniejszeniu jej kosztów.

1.5. Tworzywa polimerowe stosowane w obróbce skrawaniem, właściwości, zastosowanie

Termoplasty, będące klasą tworzyw polimerowych, wyróżniają się znaczącym spektrum właściwości, które przyczyniają się do ich szerokiego uznania oraz aplikacji w różnorodnych dziedzinach inżynieryjnych i przemysłowych. Termoplasty znajdują zastosowanie w kluczowych sektorach, takich jak inżynieria samochodowa, technologia medyczna, przetwórstwo żywności oraz przemysł opakowań. Elastyczność w przetwarzaniu, odporność na działanie chemikaliów, rezystywność

elektryczna oraz inne pożądane właściwości mechaniczne i termiczne sprawiają, że termoplasty są integralnym komponentem nowoczesnych materiałów kompozytowych. Do grupy termoplastów należą poliolefiny (PE, PP, PVC), styreny (PS, SAN, ABS, POM), termoplasty oparte na fluorze (PTFE, FEP, PVDF), poliamidy PA, termoplastyczne poliestry (PET, PPE, PEEK), polisulfony oraz polikondensaty PSU, PES, PPS, PI, PAI i PEI.

Różnorodność struktury i cech kompozytów polimerowych wpływają na ich przydatność do procesów obróbki mechanicznej. Istnieją kompozyty, które ze względu na swój charakter pozwalają na stosunkowo łatwą obróbkę. Inne zaś, jak te uzupełnione o napełniacze mineralne, wzmocnione włóknem szklanym lub charakteryzujące się znaczną elastycznością, mogą stanowić istotne wyzwania podczas skrawania. W dalszej części dokonano przeglądu charakterystyk wybranych polimerów wykorzystywanych w produkcji kompozytów i procesach obróbczych.

Poliamid – PA6, to produkt polikondensacji kaprolaktamu i jest jednym z najbardziej popularnych tworzyw konstrukcyjnych. Jest tworzywem krystalicznym o gęstość $1,13 \text{ g/cm}^3$ i temperaturze topnienia około $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Poliamid posiada dobre właściwości mechaniczne, dużą wytrzymałość na rozciąganie, odporność na ścieranie, mały współczynnik tarcia. Materiał ten charakteryzuje się stałością kształtu w podwyższonych temperaturach, odpornością na działanie benzyny i rozpuszczalników, dużą chłonnością wilgoci (2,5 – 2,8%) oraz wykazuje pełzanie na zimno. Do mocnych stron poliamidu należy bardzo dobra estetyka powierzchni, dobra odporność na ścieranie i odporność na uderzenie (również w niskiej temperaturze), dobre płynięcie, łatwość przetwórstwa, dobre właściwości elektroizolacyjne, doskonała odporność na działanie paliw i olejów, duża wytrzymałość i sztywność w wysokiej temperaturze. Materiał wykazuje również słabe strony takie jak: duża chłonność wilgoci, konieczność suszenia materiału przed przetwórstwem, nieodporność na działanie silnych kwasów nieorganicznych, niska stabilność wymiarowa [37].

Poliamid z racji, iż jest ekonomicznym tworzywem jest wykorzystywany do produkcji elementów między innymi w branży AGD (obudowy, skrzynki, narzędzia),

motoryzacji (elementy chłodnic, klamki, uchwyty) elektronice (wtyczki, przekaźniki, styczniki) oraz sporcie (siedziska stadionowe, wiązadła narciarskie). Pomimo, że poliamidy są łatwe w obróbce, to są materiałem podatnym na uszkodzenia [38]. Należy zwracać uwagę, aby używane narzędzia do obróbki były ostre, ponieważ tępe narzędzie może prowadzić do powstawania napięć, które mogą spowodować pęknięcie lub osłabienie elementu gotowego.

Polieteroeteroketon – PEEK, jest tworzywem sztucznym należącym do tworzyw wysokotemperaturowych. Materiał charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością chemiczną, biokompatybilnością, dobrą stabilnością wymiarową, doskonałą odpornością termiczną, odpornością na hydrolizę, sterylizację, doskonałymi właściwościami izolacyjnymi oraz bardzo wysoką odpornością na działanie płomienia. Wśród znikomych wad można wytypować: bardzo wysoką temperaturę przetwórstwa, bardzo wysoki koszt, zastosowania w niezwykle wymagających aplikacjach, ograniczoną odporność na działanie niektórych stężonych kwasów (siarkowy, azotowy) oraz stosunkowo niską odporność na działanie promieniowania UV. Materiał znalazł szerokie zastosowanie w budowie pojazdów, maszyn tekstylnych, technice medycznej, środków spożywczych, mechanice precyzyjnej, maszynach papierniczych i pakujących, elektrotechnice. PEEK jest stosowany m.in. do wytwarzania kół zębatach, łożysk, elementów ślizgowych, okładzin ciernych, tulei, kołnierzy, pierścieni oporowych, elementów napędu, układów hamulcowych i kierowniczych, pomp, turbin, systemów wentylacji oraz endoskopów.

Politetrafluoroetylen – PTFE, to fluoropolimer o silnym wiązaniu chemicznym pomiędzy fluorem, a węglem co gwarantuje bardzo stabilny związek o wysokich właściwościach chemicznych i odporności cieplnej. Materiał ten charakteryzuje się niskim współczynnikiem tarcia i jest stosowany w urządzeniach półprzewodnikowych, do budowy aparatury chemicznej czy laboratoryjnej oraz do zastosowań w kontakcie z żywnością [39, 40].

Poliacetal – POM, jest to tworzywo częściowo krystaliczne otrzymywane przez polimeryzację formaldehydu. Charakteryzuje się wysokim stopniem krystaliczności, bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, odpornością na ścieranie, stabilnością wymiarową. Wśród zalet poliacetalu znajdziemy: twardość, sztywność, ciągliwość, niełamliwość, wysoką odporność kształtu na ciepło, dobrą odporność na ścieranie, małą chłonność wilgoci, dobre właściwości dielektryczne, odporność na rozpuszczalniki i na tworzenie rys naprężeniowych. Niestety jest nieodporny na działanie promieniowania UV. Stosowany jest między innymi w przemyśle spożywczym, elektrycznym czy motoryzacyjnym [41]. Jest dobrym materiałem dla obróbki skrawaniem, dlatego w wielu przypadkach może być zamiennikiem elementów wykonanych z metali i ich stopów.

W tabeli 1.3 przedstawiono informacje o właściwościach wybranych tworzyw, ułatwiających właściwy dobór narzędzi skrawających.

Tab. 1.3. Wybrane właściwości tworzyw: PA, PEEK, POM (GF25), PTFE (CF25) pod względem obróbki skrawaniem [28]

	PA	PEEK	POM (GF25)	PTFE (CF25)
Nazwa	poliamidy, PA, PA6, PA6.6, PA12	Polieteroeteroketon	polioksymetylen	politetrafluoroetylen
Rodzaj	tworzywa termoplastyczne częściowo krystaliczne	tworzywa termoplastyczne częściowo krystaliczne	tworzywa termoplastyczne częściowo krystaliczne	tworzywa termoplastyczne częściowo krystaliczne
Właściwości	wysoka absorpcja wody, dobra skrawalność do 120°C powyżej następuje uplastycznienie	wysoka wytrzymałość na rozciąganie i na zginanie przy obciążeniu zmiennym, dobra skrawalność	uniwersalne tworzywo sztuczne, trudnoskrawalne, ścierne, ryzyko delaminacji	trudnoskrawalne, ścierne, ryzyko delaminacji
Udział włókna szklanego [%]	-	-	25% włókna szklanego	25% włókna węglowego
Tg [°C]	80	145	100	260
Moduł E [N/mm ²]	3300	3600	8800	4200
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	50	70	-	-
Współczynnik rozszerzalność cieplnej	$8 \cdot 10^{-5} \cdot 1/K$	$5 \cdot 10^{-5} \cdot 1/K$	$12 \cdot 10^{-5} \cdot 1/K$	$13 \cdot 10^{-5} \cdot 1/K$
Absorpcja wilgoci [%]	2,8	0,1	0,3	0,1
Absorpcja wody [%]	8,5	0,5	0,5	0,1

1.6. Stopy aluminium i mosiądzu zastosowane w obróbce skrawaniem, właściwości

Stopy aluminium charakteryzują się dobrą skrawalnością z racji niskiej temperatury topnienia i mogą być obrabiane z wysokimi prędkościami skrawania nawet do 2500 m/min w przypadku narzędzi diamentowych i do 1200 m/min w przypadku narzędzi z węglików spiekanych. Aluminium jest cenione ze względu za swoje szczególne właściwości. Materiał ten jest lekki, stabilny, odporny na korozję, daje się łatwo przetwarzać, jest dobrym przewodnikiem oraz świetnie nadaje się do recyklingu. Poniżej przedstawiono poszczególne parametry aluminium:

- Gęstość ρ : 2,7 [g/cm³]
- Twardość wg Mohsa: 2,75
- Magnetyzm χ_p : paramagnetyczny $\chi_p = 2,1 \cdot 10^{-5}$
- Temperatura topnienia T_m : [660,32 °C]
- Temperatura wrzenia T_b : [2467 °C]
- Objętość molowa V_m : $10,00 \cdot 10^{-6}$ [m³/mol]
- Ciepło parowania ΔH_{vap} : 293 [kJ/mol]
- Ciepło topnienia ΔH_{fus} : 10,7 [kJ/mol]
- Prędkość dźwięku V_s : 5100 [m/s] przy 293,15 [K]
- Ciepło właściwe c_p : 897 [J/(kg · K)]
- Przewodność właściwa σ : $37,7 \cdot 10^6$ [A/(V · m)]
- Przewodność cieplna k : 235 [W/(m · K)]

W związku z dużą różnorodnością stopów aluminium, w celu usprawnienia procesu selekcji odpowiednich warunków obróbki, dokonano ich klasyfikacji na kategorie. Kryteria podziału opierają się przede wszystkim na procentowej zawartości krzemu w kompozycji stopu [28]:

- grupa I – stopy o zawartości Si $\leq 2\%$,
- grupa II – stopy o zawartości $2\% < \text{Si} \leq 12\%$,
- grupa III – stopy o zawartości Si $> 12\%$.

Stopy z grupy II najlepiej nadają się do obróbki pod względem kształtów wiórów i osiągniętej jakości powierzchni. Siły skrawania przy obróbce są o wiele niższe tj. ok 30% w porównaniu ze stalą o tej samej wytrzymałości. Ze względu na dużą objętość wiórów strategia obróbki i geometria narzędzia mają znaczący wpływ na ich kształt i odprowadzenie. Trwałość narzędzia jest w dużym stopniu zmienna a decydującą miarą zużycia jest zużycie powierzchni przyłożenia [28, 42].

W odróżnieniu od stopów aluminium czysta miedź jest trudnoskrawalna ze względu na dużą ciągliwość i plastyczność. Stopy zawierające Zn, Sn, Al i Si tworzą lepsze warunki do skrawania dając wiór o korzystnym kształcie. Zawartość powyżej 37% cynku w składzie stopów miedzi i cynku (mosiądz) powoduje spadek odporności na obciążenia dynamiczne przy wzroście twardości, co wpływa na tworzenie w trakcie obróbki krótszego lub sypkiego wióra. Podczas obróbki skrawaniem mosiądzu, oprócz temperatury topnienia, ważnym aspektem jest również jego gęstość. Materiał ten topi się w temperaturze od 850 °C do 950 °C, a jego ciepło właściwe wynosi $0,377 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ przy ekspozycji termicznej 20 °C. Gęstość mosiądzu oscyluje w granicach 8,3 – 8,7 g/cm³. Podczas standardowego użytkowania, mosiądz charakteryzuje się zadowalającą wytrzymałością na korozję zarówno w środowisku atmosferycznym, jak i wodnym. Dodatkowo, mosiądz jest podatny na specyficzny rodzaj korozji określany jako pęknięcie sezonowe [28, 43, 44].

1.7. Właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych z napełniaczami metalowymi i ich wpływ na proces obróbki skrawaniem

Właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych, w których stosowane są napełniacze ze stopów aluminium i mosiądzu, mają znaczący wpływ na proces obróbki skrawaniem. Napełniacze te, są wprowadzane do matrycy polimerowej w celu poprawienia wytrzymałości, sztywności, a także przewodności cieplnej lub elektrycznej kompozytu. Jednakże te metalowe dodatki wprowadzają pewne wyzwania w procesie obróbki skrawaniem [45].

Pierwszym istotnym aspektem jest twardość napełniaczy w porównaniu do polimeru. Napełniacze metalowe są znacznie twardsze niż większość polimerów, co może prowadzić do szybszego zużycia narzędzi skrawających [46]. W rezultacie,

proces obróbki skrawaniem kompozytów polimerowych z napełniaczami metalowymi może wymagać częstszej wymiany narzędzi, co zwiększa koszty produkcji [47].

Kolejnym istotnym czynnikiem jest delaminacja, czyli oddzielanie się warstw kompozytu w wyniku niewłaściwie dobranych parametrów obróbki, dlatego kontrola parametrów obróbki, takich jak prędkość obrotowa, posuw oraz głębokość skrawania, jest tak kluczowa [48]. W trakcie obróbki skrawaniem może dochodzić do wzrostu temperatury, zwłaszcza w miejscach kontaktu narzędzia z materiałem. Aluminium lub mosiądz mogą przyczyniać się do przewodnictwa cieplnego, co może prowadzić do wzrostu temperatury w strefach skrawania. Nadmiernie wysoka temperatura może powodować deformację materiału co negatywnie wpływa na jakość obróbki [49, 50]. Właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych z napełniaczami metalowymi stanowią istotny czynnik wpływający na proces obróbki skrawaniem. Twardość, delaminacja, kontrola temperatury i zużycie narzędzi są kluczowymi kwestiami, które należy uwzględnić podczas obróbki tych zaawansowanych materiałów. Optymalizacja parametrów obróbki oraz wybór odpowiednich narzędzi i strategii obróbki są niezbędne do uzyskania pożądanych wyników [51].

1.8. Topografia powierzchni po obróbce skrawaniem

Topografia powierzchni jest powszechnie definiowana jako zbiór szczegółowych cech trójwymiarowych określonego obszaru powierzchni. Pomiary chropowatości 3D są wykorzystywane w celu lepszego zrozumienia charakterystyki powierzchni, a w obróbce skrawaniem jest kluczowym elementem wpływającym na właściwości funkcjonalne obrabianych elementów. Zjawiska związane z interakcją dwóch powierzchni mają naturę trójwymiarową, co sprawia, że ich opis nie może ograniczać się jedynie do analizy profilu. Jest to szczególnie istotne w kontekście kontaktu dwóch współpracujących elementów [52, 53].

Powierzchnia materiału ma bezpośredni wpływ na jego właściwości mechaniczne, trybologiczne, a także estetyczne, co czyni ją istotnym obszarem badań zarówno w kontekście teoretycznym, jak i praktycznym. W celu skutecznego

projektowania, modyfikacji oraz analizy powierzchni, niezbędne jest zrozumienie oraz umiejętność precyzyjnego określenia jej parametrów. Inżynierskie zainteresowanie topograficzną oceną powierzchni przyczyniło się do podjęcia prac nad znormalizowaniem metod jej oceny i parametrów stosowanych do opisu nierówności powierzchni. Najpowszechniejsze parametry i funkcje stosowane w analizie trójwymiarowej w większości oznaczają się literą „S”, jako odpowiednik litery „R” w parametrach profilu. Parametry dotyczące cech funkcyjnych oznaczane są literą „V”. Standardowa metodyka analizy topografii powierzchni obejmuje wyznaczenie wartości stereometrycznych parametrów chropowatości według ISO 25178 oraz ISO 21920 [54, 55].

Parametry powierzchni można podzielić na kilka głównych kategorii: amplitudowe i funkcyjne (tab. 1.4.). Każda z tych kategorii dostarcza informacji, które są kluczowe w różnorodnych zastosowaniach inżynierskich.

Parametry amplitudowe powierzchni opisują profil chropowatości powierzchni, czyli odchylenia rzeczywistej powierzchni od idealnie gładkiej. Parametry te dostarczają istotnych informacji na temat struktury powierzchni, co jest kluczowe w procesach takich jak tarcie, zużycie czy adhezja.

Parametry funkcyjne powierzchni są miarą zdolności powierzchni do pełnienia określonych funkcji, takich jak przenoszenie obciążeń, zatrzymywanie smaru czy odporność na zużycie. Współczynnik nośności, współczynnik smarności oraz wskaźnik zużycia to tylko niektóre z parametrów, które pozwalają ocenić, jak powierzchnia będzie się zachowywać w warunkach eksploatacyjnych.

Parametry funkcyjne powierzchni, takie jak objętość rdzenia, objętość dołków oraz objętość wierzchołków, dostarczają informacji na temat trójwymiarowej struktury powierzchni. Parametry te są szczególnie istotne w kontekście analizy zdolności powierzchni do zatrzymywania smaru oraz jej odporności na zużycie [56].

Tab. 1.4. Parametry tekstury powierzchni według normy ISO 25178 [57]

Parametry amplitudowe chropowatości powierzchni		
S_q	Średnie kwadratowe odchylenie powierzchni	Pierwiastek średniej wartości kwadratowej wysokości względem powierzchni odniesienia.
S_a	Średnia arytmetyczna wysokości	Średnia arytmetyczna wszystkich wartości wysokości na powierzchni, określająca ogólny poziom wysokości.
S_z	Maksymalna wysokość profilu	Różnica między najwyższym szczytem (S_p) a najniższą doliną (S_v) na powierzchni.
S_{sk}	Współczynnik asymetrii powierzchni	Miara asymetrii rozkładu wysokości. Dodatnia wartość wskazuje na dominację szczytów, a ujemna na dominację dolin.
S_{ku}	Współczynnik nachylenia powierzchni (kurtozy)	Miara ostrości rozkładu wysokości. Wartość większa od 3 wskazuje na większą ilość ekstremalnych wartości (szczytów i dolin) niż w rozkładzie normalnym.
S_p	Maksymalna wysokość szczytu	Największa wartość wysokości szczytu od poziomu odniesienia.
S_v	Maksymalna wysokość wgłębienia	Największa wartość głębokości wgłębienia od poziomu odniesienia.
Parametry funkcjonalne tekstury powierzchni		
S_k	Głębokość chropowatości rdzenia	Parametr określa głębokość chropowatości w obszarze rdzenia powierzchni (inaczej wysokości rdzenia), co ma kluczowe znaczenie przy ocenie nośności powierzchni.
S_{vq}	Średniokwadratowa nierówność doliny	Wyznacza średnią kwadratową odchyłkę nierówności w dolinach powierzchni, dostarczając informacji o głębokości i rozkładzie dolin.
S_{pq}	Średniokwadratowa nierówność płaskowyżu	Parametr określa średnią kwadratową odchyłkę nierówności na płaskowyżu powierzchni, co jest istotne w analizie mikrostruktury tego obszaru.
S_{pk}	Zredukowana wysokość wierzchołka	Zredukowana wysokości wierzchołków, określa odporność powierzchni na zużycie i ścieranie, co czyni go ważnym parametrem w kontekście wytrzymałości powierzchni.
S_{mr1}	Górna powierzchnia nośna	Parametr określa procent udziału powierzchni gdzie strefa wzniesień przechodzi w strefę rdzenia.
S_{mr2}	Dolny obszar nośny	Parametr określa procent udziału powierzchni gdzie strefa rdzenia przechodzi w strefę wgłębień, co jest istotne dla oceny homogeniczności powierzchni.
S_{mq}	Stosunek materiałowy na przejściu płaskowyż-dolina	Parametr odnosi się do stosunku materiałowego na granicy między płaskowyżem a doliną, co jest istotne dla oceny homogeniczności powierzchni.

Parametry funkcyjne wolumetryczne tekstury powierzchni		
V_{mc}	Objętość rdzenia	Objętość materiału w rdzeniu powierzchni, określona jako objętość do poziomu głębokości materiału.
V_{vc}	Objętość dołków	Objętość pustek poniżej powierzchni rdzenia, które mogą zatrzymywać smar.
V_{mp}	Objętość wierzchołków	Objętość wierzchołków, które są najbardziej narażone na ścieranie.
V_{vv}	Procentowa objętość funkcjonalna	Procentowa objętość materiału powyżej określonej głębokości.

Wśród najważniejszych parametrów analizy nierówności powierzchni znajduje się średnie arytmetyczne odchylenie wysokości powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_a , które daje ogólne pojęcie o nierówności powierzchni i wyraża się wzorem:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (4)$$

Kolejnym ważnym parametrem jest średnie kwadratowe odchylenie wysokości S_q . Jest to miara chropowatości powierzchni, która dostarcza informacji na temat nierówności na powierzchni między innymi po obróbce skrawaniem. S_q jest wyrażany w mikrometrach (μm) i obliczany na podstawie powierzchniowego rozkładu wysokości punktów.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (5)$$

Parametry S_a i S_q są niewystarczające do badania zużycia, ze względu na ich czułość na różnicowanie szczytów, wgłębień, dolin oraz odstępów między elementami tekstury powierzchni. Parametry te mogą być używane do wskazania istotnych różnic statystycznych w charakterystyce tekstury powierzchni. Średnie kwadratowe odchylenie powierzchni S_q jest przydatne do oceny powierzchni optycznych, podczas gdy średnia arytmetyczna wysokości S_a znajduje zastosowanie w ocenie powierzchni obrabianych [58].

Współczynnik asymetrii powierzchni (S_{sk}) jest miarą asymetrii rozkładu wysokości profilu powierzchni względem średniej wysokości i wyrażany jest wzorem:

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \sqrt{\iint_A z^3(x, y) dx dy} \right] \quad (6)$$

Parametr ten informuje, czy profil powierzchni ma tendencję do dominacji szczytów, dolin czy jest symetryczny. Jeżeli wartość $S_{sk} > 0$ profil posiada więcej dolin niż szczytów. Gdy parametr $S_{sk} < 0$ profil charakteryzuje się większą ilością szczytów niż dolin. Natomiast gdy wartość parametru $S_{sk} = 0$ profil jest symetryczny wokół średniej wysokości. Wartość S_{sk} jest istotna przy ocenie właściwości mechanicznych powierzchni, takich jak tarcie i zużycie. Powierzchnie z dodatnią skośnością mogą mieć lepsze właściwości smarujące, podczas gdy powierzchnie z ujemną skośnością mogą być bardziej podatne na zużycie.

Kolejnym ważny parametrem jest współczynnik nachylenia powierzchni S_{ku} (kurtozy), który jest ważny dla oceny ekstremalnych właściwości powierzchni, takich jak obecność ostrych pików lub głębokich dolin, które mogą wpływać na wytrzymałość mechaniczną, zużycie i zdolność do zatrzymywania smaru. Współczynnik S_{ku} wyraża się wzorem:

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \sqrt{\iint_A z^4(x, y) dx dy} \right] \quad (7)$$

Parametr S_{ku} (kurtoza powierzchni) jest kluczowym wskaźnikiem w analizie topografii powierzchni, umożliwiającym ocenę rozkładu wysokości wierzchołków i dolin w odniesieniu do rozkładu normalnego (Gaussa). Dla idealnego rozkładu Gaussa wartość S_{ku} wynosi 3,0. W tym przypadku powierzchnia wykazuje umiarkowaną liczbę i głębokość dolin oraz umiarkowaną wysokość szczytów. Taki profil jest często pożądanym, ponieważ zapewnia zrównoważone właściwości ślizgowe oraz zdolność do zatrzymywania smaru, co może poprawić trwałość i funkcjonalność powierzchni. Wartość S_{ku} mniejsza niż 3,0 wskazuje na platykurtyczny rozkład wysokości powierzchni. Powierzchnia charakteryzuje się mniej skoncentrowanymi, szerokimi i płytkimi dolinami oraz niskimi szczytami. Taki profil sugeruje, że powierzchnia jest stosunkowo płaska. W praktyce oznacza to, że powierzchnia może mieć dobre właściwości ślizgowe, lecz może być mniej efektywna w zatrzymywaniu smaru. Jeżeli wartość S_{ku} jest większa niż 3,0 to powierzchnia ma bardziej

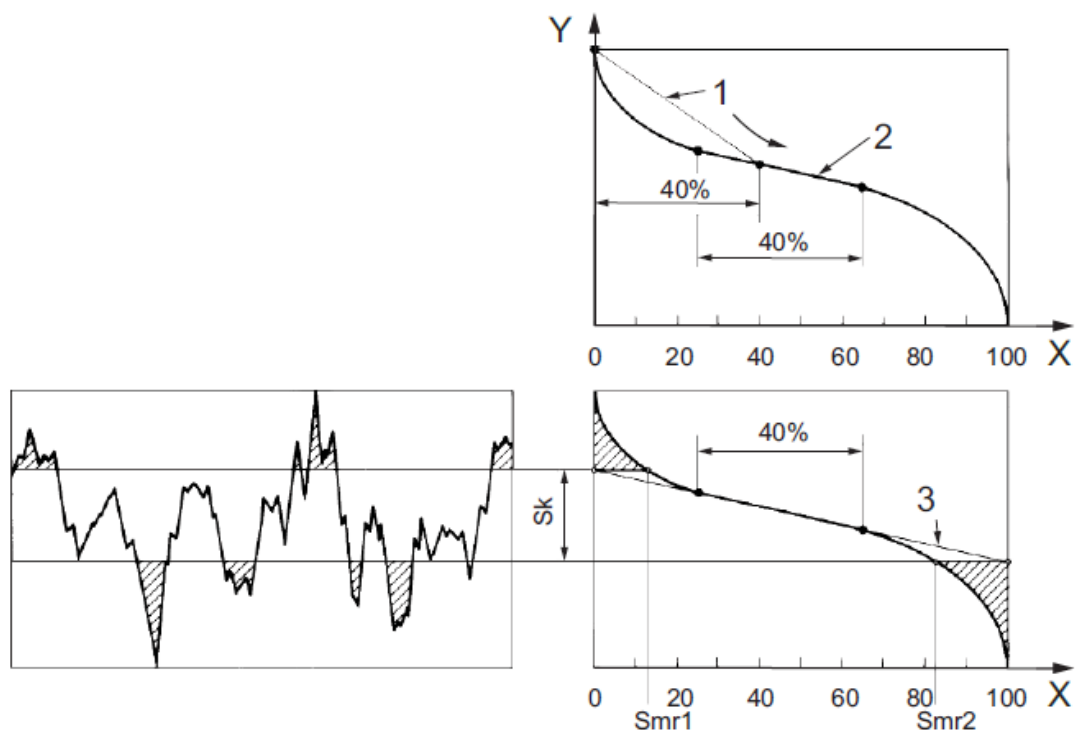
skoncentrowane, ostre i wysokie szczyty oraz głębokie doliny. Taki profil sugeruje, że powierzchnia jest bardziej wypukła. W praktyce może to oznaczać lepsze właściwości zatrzymywania smaru, ale jednocześnie większą podatność na zużycie z powodu obecności ostrych wierzchołków. Analiza wartości S_{ku} jest kluczowa dla inżynierów i naukowców zajmujących się projektowaniem i optymalizacją powierzchni technicznych.

Parametry powierzchni S_k , S_{mr1} , S_{mr2} odgrywają kluczową rolę w ocenie funkcjonalności powierzchni w zastosowaniach technicznych. Wysokość rdzenia S_k to parametr powierzchni, który określa wysokość centralnej części profilu powierzchni. Jest to odległość pomiędzy poziomem dołków a poziomem wierzchołków profilu powierzchni. Parametr ten jest kluczowy w ocenie stabilności i wytrzymałości powierzchni. Reprezentuje on główną część materiału, która bierze udział w przenoszeniu obciążeń mechanicznych. Wysoka wartość tego parametru wskazuje na obecność wyraźnego rdzenia, co może sugerować dobrą odporność powierzchni na zużycie i obciążenia.

Parametr S_{mr1} określa procent powierzchni nośnej przy określonej głębokości od wierzchołków profilu. Jest to punkt na krzywej materiałowej, który odpowiada za określenie pierwszego procenta powierzchni, zazwyczaj oznaczany jako procent z najwyższych szczytów profilu. Pozwala na ocenę początkowego kontaktu powierzchni z innymi materiałami co jest istotne w kontekście początkowego zużycia i adhezji powierzchni. Niska wartość S_{mr1} może sugerować bardziej gładką powierzchnię, co zmniejsza początkowe tarcie i zużycie.

Dolny obszar nośny (S_{mr2}) to parametr określający procent powierzchni nośnej przy określonej głębokości od poziomu rdzenia do najniższych dołków profilu. Jest to punkt na krzywej materiałowej, który odpowiada za określenie procenta powierzchni w dolnej części profilu. Parametr jest kluczowy w ocenie zdolności powierzchni do utrzymania smaru oraz odprowadzania zanieczyszczeń. Wysoka wartość sugeruje, że powierzchnia ma dobrze rozwinięte doliny, co może poprawiać efektywność smarowania i odprowadzania zanieczyszczeń, tym samym zwiększając trwałość powierzchni.

Rysunek (rys. 1.10.) przedstawia wykres profilu powierzchni, który został podzielony na trzy kluczowe obszary tj. wierzchołki (S_{mr1}), rdzeń (S_k) oraz doliny (S_{mr2}).



Rys. 1.10. Wykres profilu powierzchni, wyznaczenie parametrów S_k , S_{mr1} i S_{mr2} wg normy ISO 25178 [57]

W analizie struktury powierzchni, szczególnie w kontekście tribologii i technologii materiałowej, ocena parametrów funkcyjnych V_{mc} , V_{vc} , V_{mp} oraz V_{vv} odgrywa kluczową rolę w zrozumieniu właściwości powierzchni. Parametry te pozwalają na ocenę charakterystyki powierzchni pod kątem jej potencjalnych zastosowań i właściwości użytkowych.

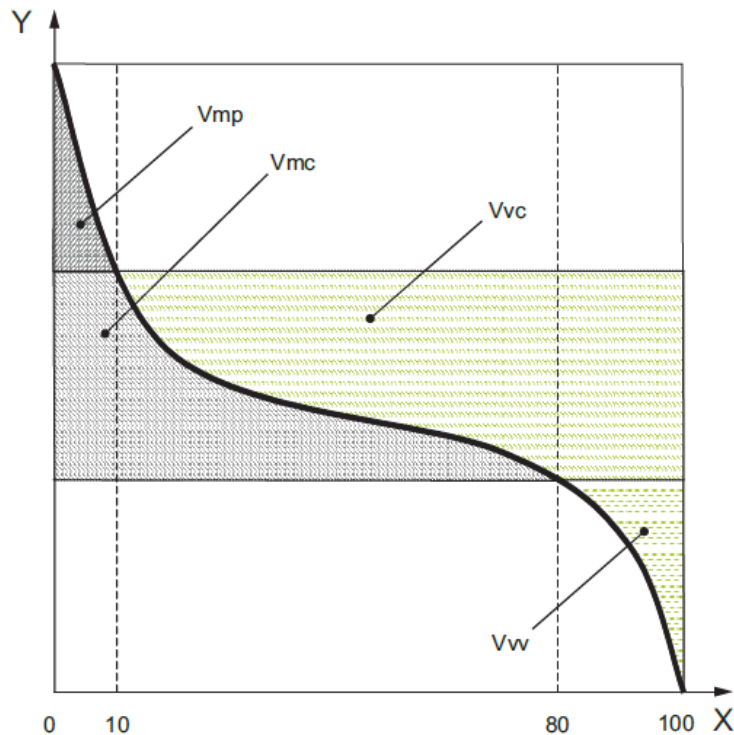
Objętość rdzenia (V_{mc}) to parametr, który odnosi się do objętości materiału powierzchniowego znajdującego się w obszarze rdzenia, czyli centralnej części profilu powierzchni, która nie zawiera ekstremalnych szczytów ani głębokich dolin. Parametr V_{mc} jest miarą stabilności strukturalnej powierzchni oraz kluczowym wskaźnikiem dla oceny trwałości powierzchni w zastosowaniach mechanicznych. Wysoka wartość V_{mc} wskazuje na bardziej stabilną i trwałą powierzchnię, co jest pożądane w elementach narażonych na duże obciążenia.

Objętość dołków (V_{vc}) to parametr, który odnosi się do objętości przestrzeni pomiędzy powierzchnią a linią referencyjną w obszarach dolin profilu powierzchni. Jest to miara ilości wolnej przestrzeni, która może być wykorzystana na przykład do magazynowania smarów lub innych substancji. Wysoka wartość V_{vc} wskazuje na zdolność powierzchni do efektywnego przechowywania smaru, co może znacząco redukować tarcie i zużycie elementów mechanicznych.

Objętość wierzchołków (V_{mp}) to parametr, który odnosi się do objętości materiału powierzchniowego znajdującego się powyżej linii referencyjnej w obszarze wierzchołków profilu powierzchni. Wartość V_{mp} jest miarą obecności szczytów na powierzchni, które mogą wpływać na początkowy kontakt i interakcje z innymi powierzchniami. Niska wartość V_{mp} wskazuje na gładką powierzchnię z niewielką ilością szczytów, co może prowadzić do zmniejszonego zużycia na początku eksploatacji.

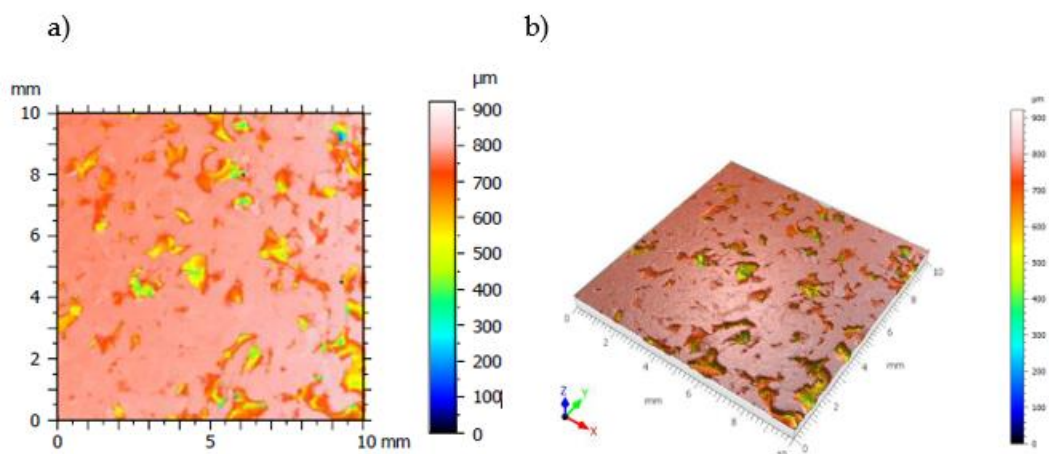
Procentowa objętość funkcjonalna (V_{vv}) to parametr, który odnosi się do procentowego udziału objętości dolin w całkowitej objętości powierzchni. Jest to wskaźnik efektywności powierzchni w kontekście jej zdolności do pełnienia funkcji użytkowych, takich jak magazynowanie smaru czy odprowadzanie zanieczyszczeń. Wysoka wartość V_{vv} sugeruje, że powierzchnia ma dobrze rozwiniętą strukturę dolin, co może poprawiać jej zdolność do utrzymania smaru i odprowadzania zanieczyszczeń, a tym samym zwiększać trwałość i niezawodność powierzchni w długoterminowej eksploatacji.

Na rysunku 1.11 przedstawiono wykres funkcyjnych parametrów powierzchni, gdzie wartość osi X to współczynnik materiałowy powierzchni wyrażany w procentach, a wartość osi Y to wysokość. Wykres umożliwia wizualizację rozmieszczenia i wielkości poszczególnych parametrów funkcyjnych powierzchni, co pozwala na lepsze zrozumienie jej struktury i właściwości użytkowych.



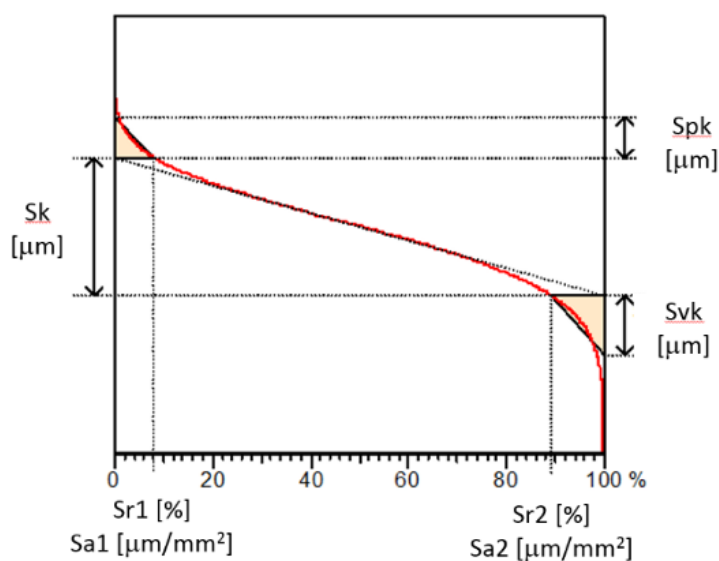
Rys. 1.11. Parametry objętości pustki i objętości materiału parametrów funkcyjnych powierzchni wg normy ISO 25178 [57]

Po zebraniu danych pomiarowych chropowatości powierzchni istnieją dwie podstawowe możliwości graficznej prezentacji powierzchni. Jedną z nich jest mapa konturowa, a druga to izometryczny obraz powierzchni, zwany aksonometrią. Metoda konturowa (rys. 1.12.a) polega na ustaleniu płaszczyzny na zadanej wysokości, znalezieniu przecięć z liniami łączącymi punkty siatki i połączeniu tych punktów. Najczęściej stosowaną opcją graficznej prezentacji powierzchni jest obraz izometryczny (rys. 1.12.b) tworzony w aksonometrii. Obraz trójwymiarowy jest uzyskiwany na podstawie nałożenia na siebie kolejnych profili zdejmowanych na ogół w płaszczyznach równoległych i po ukryciu linii niewidocznych. Obraz izometryczny o odpowiedniej szerokości i rozdzielczości jest obecnie podstawową techniką dogodnie prezentującą powierzchnię pod kątem zastosowania [59–62].



Rys. 1.12. Graficzna prezentacja powierzchni dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18
a) mapa konturowa b) obraz izometryczny

W analizie topografii powierzchni stosowana jest również krzywa udziału materiałowego, znana również jako krzywa Abbotta-Firestone'a (rys. 1.13.). Krzywa ta dostarcza istotnych informacji dotyczących charakterystyki powierzchni, takich jak chropowatość, nośność, retencja płynów oraz odporność na zużycie. Jest ona interpretowana jako procentowy przyrost udziału poszczególnych punktów topografii w tworzeniu całkowitej powierzchni. Parametry wyznaczone z krzywej udziału materiałowego umożliwiają szczegółową analizę strefy wierzchołków oraz wgłębień powierzchni co jest kluczowe dla oceny jej funkcjonalności i trwałości [63-66].



Rys. 1.13. Krzywa Abbotta - Firestone'a [57]

Badania nad normalizacją parametrów topografii powierzchni są na zaawansowanym etapie, a uzyskanie wysokiego poziomu wiarygodności danych pomiarowych jest kluczowe dla weryfikacji hipotez w kontekście badań naukowych. Współczesne techniki pomiarowe umożliwiają precyzyjne charakteryzowanie powierzchni, co jest niezbędne do oceny jakości oraz funkcjonalności materiałów. Zastosowanie zaawansowanych metod pomiarowych, takich jak interferometria czy profilometria, pozwala na uzyskanie szczegółowych danych o strukturze powierzchni, co jest kluczowe w procesie optymalizacji właściwości mechanicznych i fizycznych materiałów. Wysoka dokładność tych pomiarów umożliwia badanie mikroskopijnych defektów oraz ich wpływu na wytrzymałość i trwałość materiałów [67-71].

Coraz większe zainteresowanie technikami addytywnymi w przemyśle wytwórczym prowadzi do konieczności zrozumienia i kontroli topografii powierzchni wytwarzanych komponentów. Analiza topograficzna jest niezbędna nie tylko w ocenie jakości powierzchni, ale także w przewidywaniu zachowania materiałów w różnych warunkach eksploatacyjnych. Dzięki temu możliwe jest projektowanie materiałów o lepszych właściwościach użytkowych i dłuższej żywotności, co ma istotne znaczenie dla postępu technologicznego w inżynierii mechanicznej i materiałowej [72].

1.9. Tomografia kompozytów polimerowych

Przemysłowa tomografia komputerowa (CT) stanowi przełom w technice diagnostycznej, umożliwiając nieinwazyjne badanie wewnętrznej struktury przedmiotów w sposób, który dotychczas był nieosiągalny dla innych metod badawczych [73]. Wykonując jedno skanowanie bez skomplikowanego mocowania otrzymujemy pełen pomiar detalu, analizę i kontrolę ukrytych wad i struktury wewnętrznej, których nie da się wykryć za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Technologia ta, wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie do generowania szczegółowych przekrojów badanych obiektów i znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, od kontroli jakości, testowania materiałów, po

archeologię oraz badania nad dziedzictwem kulturowym [74]. Kluczową zaletą przemysłowej tomografii komputerowej jest jej zdolność do dostarczania obrazów o wysokiej rozdzielczości bez konieczności ingerencji w budowę badanego obiektu, co czyni ją nieocenionym narzędziem w przypadku analizy cennych lub delikatnych przedmiotów [75]. Poprzez zastosowanie zaawansowanego oprogramowania do przetwarzania danych, umożliwia rekonstrukcję trójwymiarowych modeli wewnętrznych struktury, co pozwala na głęboką analizę i zrozumienie ukrytych cech materiałów [76]. Technika ta jest wyjątkowo wszechstronna, co znajduje odzwierciedlenie w jej zdolności do badania różnorodnych materiałów, w tym metali, tworzyw sztucznych, kompozytów, a nawet tkanki biologicznej w kontekście zastosowań biomedycznych [77]. Dzięki temu tomografia przemysłowa stała się kluczowym narzędziem w wielu branżach, w tym w automatyce, lotnictwie, produkcji przemysłowej oraz naukach o materiałach, oferując możliwości, które przekraczają tradycyjne metody badawcze [78].

Jednym z najważniejszych zastosowań przemysłowej tomografii komputerowej jest identyfikacja wad wewnętrznych struktury, takich jak pęknięcia, porowatość czy niezgodności materiałowe, które mogą mieć kluczowe znaczenie dla oceny jakości i trwałości produktów [79]. Technologia ta umożliwia dokładną analizę defektów bez konieczności niszczenia badanego przedmiotu, co jest szczególnie ważne w procesach kontroli jakości oraz w badaniach nad zachowaniem materiałów pod wpływem obciążeń czy warunków eksploatacyjnych [80].

W ramach kontroli montażu, tomografia komputerowa umożliwia dokładne sprawdzenie, czy zmontowane części odpowiednio do siebie pasują i prawidłowo funkcjonują, co jest niezbędne do weryfikacji integralności montażu oraz zgodności z projektowanymi specyfikacjami. Kontrola technologii łączenia, takich jak spawanie, lutowanie, klejenie czy nitowanie, za pomocą pojedynczego skanowania, pozwala na ocenę, czy połączenia są wolne od defektów, zapewniając odpowiednią wytrzymałość i długotrwałość konstrukcji [81]. W sektorze elektroniki, skanowanie komponentów, takich jak płytki drukowane czy akumulatory pozwala na szybką identyfikację potencjalnych wad, co jest kluczowe dla zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa urządzeń elektronicznych [82]. Przemysłowa tomografia komputerowa odgrywa

również istotną rolę w inżynierii odwrotnej, umożliwiając tworzenie dokładnych modeli cyfrowych obiektów fizycznych [83]. Ta zdolność do dokładnego odwzorowania zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych cech przedmiotów otwiera nowe możliwości w projektowaniu, analizie i optymalizacji produktów [84]. W kontekście badań naukowych i rozwoju produktów, umożliwia przyspieszenie procesów badawczych, redukcję kosztów oraz ulepszenie charakterystyk technicznych i użytkowych produktów [85]. W dziedzinie metrologii, niniejsza metoda znajduje zastosowanie w porównywaniu danych nominalnych z rzeczywistymi, w tym w odniesieniu do odchyleń od modelu CAD lub części referencyjnej. Zastosowanie tomografii komputerowej umożliwia precyzyjne zmierzenie wymiarów skomplikowanych komponentów, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych, oraz grubości ścianek konstrukcji wewnętrznych. W sektorze narzędziowym, analiza ta jest wykorzystywana do kompleksowej weryfikacji kondycji narzędzi, co wywiera znaczący wpływ na jakość procesów produkcyjnych [82].

Przykładem urządzenia wykorzystywanego w przemyśle jest Zeiss Metrotom 1500, dzięki swojej zdolności do precyzyjnego obrazowania, znajduje zastosowanie w badaniach materiałowych, umożliwiając szczegółową analizę mikrostruktury materiałów [86].

Podsumowując, przemysłowa tomografia komputerowa reprezentuje nową erę w diagnostyce przemysłowej, oferując nieporównywalną dokładność, wszechstronność i zdolność do głębokiej analizy wewnętrznej struktury przedmiotów. Jej wpływ na przemysł, naukę i badania jest nieoceniony, przyczyniając się do rozwoju nowych produktów i poprawy procesów produkcyjnych [86, 87].

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest analiza wpływu napelnacza na proces obróbki skrawaniem oraz na zmiany własności mechanicznych i termicznych wytworzonych metodą prasowania kompozytów polimerowych na bazie stopów aluminium i mosiądzu. Przeprowadzone zostały badania porównawcze zmian właściwości termomechanicznych uzyskanych wyprasek z uwzględnieniem zmian struktury warstwy wierzchniej przed i po procesie obróbki skrawaniem.

W celu określenia zmian właściwości termicznych i mechanicznych przeprowadzone zostały: analiza właściwości termicznych metodą różnicowej kalometrii skaningowej (DSC), termiczna analiza dynamicznych właściwości mechanicznych (DMTA), badania twardości i udarności wytworzonych kompozytów, badania powierzchniowe, badania makroskopowe (wizualne) powierzchni oraz tomografia komputerowa.

Badania przeprowadzono dla próbek kompozytów o bardzo dużej zawartości napelnacza, w których osnowa polimerowa stanowi 5 - 15% zawartości masowo. Badania podjęte w pracy obejmują kompozyty z napelnaczami ze stopów aluminium i mosiądzu.

Do wytworzenia próbek badawczych zaprojektowano specjalne narzędzie do procesu przetwórstwa metodą prasowania, umożliwiające wytworzenie płytek kompozytowych o wymiarach 80 x 80 x 10 mm.

W procesie obróbki skrawaniem kompozytów zjawiska występujące niejednokrotnie mają osobliwy charakter w porównaniu do obróbki materiałów metalowych. Głównym celem badawczym podczas obróbki wytworzonych próbek było określenie niekorzystnego wpływu dobranych parametrów skrawania jak również narzędzi i ich geometrii na zjawisko dekohezji występujące w skrawanym materiale. Bardzo często podczas skrawania materiałów polimerowych jak również kompozytowych na skutek działających sił powierzchni po obróbce ulegają niekorzystnej degradacji. Szczególny wpływ na to mają właściwości samego materiału, jak jego porowatość, kształt i wielkość ziaren, a przede wszystkim właściwości termomechaniczne. Są to czynniki w istotny sposób wpływający na przebieg procesu obróbki takiego materiału, jak również na jakość powierzchni

obrobionej. Przeprowadzona analiza badawcza w tym zakresie polegała na określeniu wpływu właściwości mechanicznych wytworzonego materiału na przebieg procesu obróbki. Właściwy dobór narzędzia, w tym jego geometrii oraz stosowanej powłoki ma istotny wpływ na przebieg procesu obróbki. Przeprowadzono badania jakości obrobionej powierzchni w funkcji stosowanych narzędzi, strategii i parametrów obróbki.

Dokonana analiza literatury pozwala na sformułowanie następujących tez:

1. Zawartość, frakcja i rodzaj napełniacza w postaci wiórów mosiądzu i aluminium w kompozytach z osnową polimerową w istotny sposób wpływa na ich właściwości termomechaniczne oraz strukturę wewnętrzną, w których kontekście istotne jest określenie wpływu znaczących trendów zmian.

2. Charakterystyka parametrów topograficznych powierzchni kompozytu po obróbce skrawaniem może zachowywać porównywalne trendy dla zmian parametrów obróbki tożsamy w przypadku obróbki materiałów jednorodnych.

3. Wielkość frakcji zastosowanych napełniaczy istotnie wpływa na zmianę struktury kompozytu, tym samym oddziałując na zmiany wartości wolumetrycznych parametrów funkcyjnych powierzchni po obróbce skrawaniem.

3. Metodyka badawcza oraz wykorzystane materiały

3.1. Charakterystyka wykorzystanych materiałów

Do wykonania wyprasek kompozytowych wykorzystano proszki polimerowego tworzywa Alphalon® 24 (poliamid 6) oraz VICTREX™ Powder (PEEK 150P). Jako wypełniacze zastosowano wióry o różnych frakcjach ze stopu aluminium PA6/2017 według PN/EN ISO AlCu4MgSi i mosiądzu MO58 wg PN/EN ISO CuZn40Pb2. Właściwości poszczególnych tworzyw i metali zamieszczono w suplemencie według dostarczonych przez producenta kart charakterystyk.

Alphalon® 24 jest to poliamid 6 o barwie naturalnej i niskiej lepkości, stosowany do produkcji folii dla przemysłu opakowaniowego oraz monofilamentów, a także jako tworzywo konstrukcyjne dla przemysłu samochodowego, elektrotechnicznego oraz artykułów gospodarstwa domowego.

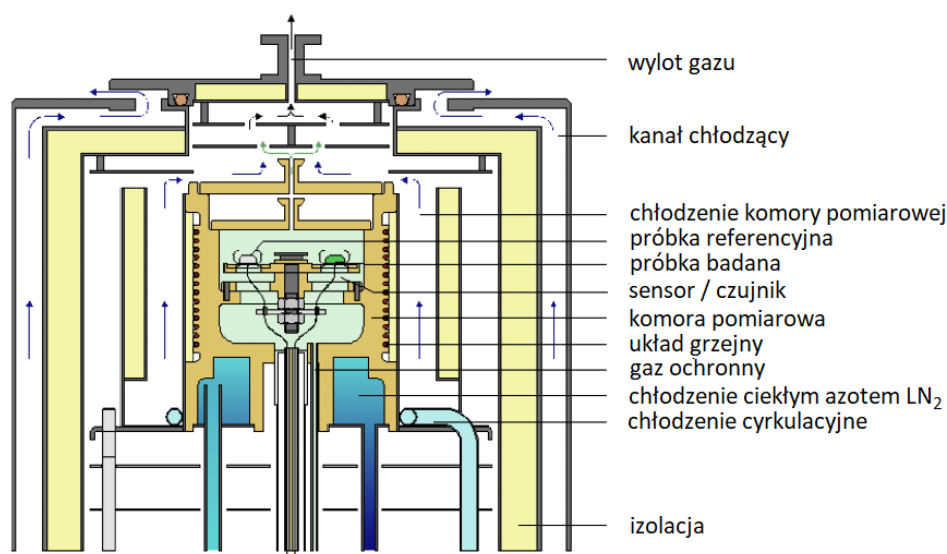
Tworzywo VICTREX™ Powder (PEEK 150P) jako tworzywo konstrukcyjne charakteryzuje się wysokimi parametrami mechanicznymi i termicznymi.

3.2. Metody badań właściwości termicznych

Badania właściwości termicznych kompozytów polimerowych wykonano metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej, polegającej na pomiarze zmian właściwości fizycznych badanego materiału podczas kontrolowanego procesu ogrzewania. DSC jest metodą kalorymetryczną, która polega na pomiarze wydzielanego lub pochłanianego przez materiał ciepła. Do badań wykorzystano urządzenie DSC 214 Polyma firmy NETZSCH.

Procedura przygotowania próbek do DSC wymagała, aby próbki, wolne od zanieczyszczeń, dokładnie odważono przy użyciu precyzyjnej wagi analitycznej. Pobrane próbki o średniej wadze 12 miligramów równomiernie rozłożono w tyglach, a następnie zamknięto je i umieszczono, wraz z próbkami referencyjnymi w urządzeniu. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów ustalono odpowiednie parametry badania, takie jak zakres temperatury, prędkość

ogrzewania/chłodzenia oraz atmosferę gazową, po czym wykonano analizę zgodnie z zaplanowanym eksperymentem. Badania przeprowadzono zgodnie z normą ISO 11357-3:2018-06 [88]. Próbki nagrzewano z szybkością 10 K/min w zakresie temperatury dobranej na podstawie odpowiednich wartości katalogowych dla badanych polimerów. W przypadku poliamidu 6 zakres temperatury badania wynosił od -50 °C do 280 °C, zaś dla PEEK od -50 °C do 380 °C. Pomiary przeprowadzono w atmosferze azotu. Na rysunku 3.1 zamieszczono schemat komory pomiarowej urządzenia [89-91].



Rys. 3.1. Schemat komory pomiarowej DSC [92]

Wynikiem przeprowadzonego badania jest wykres zmiany sygnału DSC [mW/mg] w funkcji czasu lub temperatury. Przy użyciu metody DSC określa się temperaturę zeszklenia, temperaturę topnienia fazy krystalicznej oraz entalpię topnienia. Przemiany zachodzące podczas topnienia kompozytów polimerowych są określane na podstawie krzywych DSC mierzonych dla próbek ogrzewanych ze stałą szybkością. Entalpia topnienia fazy krystalicznej, jak i niektóre inne parametry są traktowane jako stałe materiałowe. Analizę wyników badań wraz z wyznaczeniem parametrów termicznych przeprowadzono w programie Netzsch Proteus [93, 94].

3.3. Techniki badań właściwości termomechanicznych

Termiczną analizę dynamicznych właściwości mechanicznych kompozytów polimerowych wykonano metodą DMTA. W trakcie badania kompozyt jest poddawany zmiennym naprężeniom przy jednoczesnym kontrolowaniu temperatury. W metodzie tej bada się zachowanie materiału na zmienne warunki obciążenia oraz wartości takie jak moduł Younga, tłumienie, kruchość oraz stopień relaksacji. Zastosowana aparatura DMA 242 firmy NETZSCH (rys. 3.2.) umożliwia pomiar modułu zachowawczego E' , modułu stratności E'' oraz tangensa kąta stratności mechanicznej $\tan \delta$ w zależności od temperatury lub czasu, częstotliwości i amplitudy [94–96]. Moduł zachowawczy i moduł stratności są składowymi zespolonego modułu Younga, według wzoru:

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (8)$$

gdzie:

E^* - zespolony moduł Younga,

E' - moduł zachowawczy,

E'' - moduł stratności.

Tangens kąta przesunięcia fazowego δ wyrażany jest równaniem:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (9)$$

gdzie:

$\tan \delta$ - tangens kąta stratności mechanicznej,

E' - moduł zachowawczy,

E'' - moduł stratności.

Kąt przesunięcia fazowego o wartości zerowej jest wskaźnikiem idealnej sprężystości materiału. W przypadku materiałów o charakterystyce lepkosprężystej, wartość tego kąta oscyluje w przedziale od 0 do 90 stopni, co jest funkcją zmian częstotliwości drgań oraz temperatury [97, 98].



Rys. 3.2. Netzsch DMA 242 C

Zmiany właściwości mechanicznych w funkcji temperatury badano za pomocą urządzenia Netzsch DMA 242 z uchwytem do trzypunktowego swobodnego zginania próbki w postaci belki o wymiarach 55 x 10 x 4 mm zgodnie z normą ISO 6721-1:2019 [99]. Próbki umieszczone w uchwycie o długości 50 mm poddano działaniu siły sinusoidalnej o częstotliwości 1 Hz i 10 Hz ze stałą amplitudą 240 μm , przy ogrzewaniu z szybkością 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Temperatura rozpoczęcia badania dla tworzywa i kompozytów z PA6 z wynosiła -90°C , a temperatura zakończenia 200 $^{\circ}\text{C}$. W przypadku tworzywa PEEK i kompozytów z PEEK temperatura rozpoczęcia badania wynosiła -90°C , a temperatura zakończenia 300 $^{\circ}\text{C}$.

Metoda DMTA jest szczególnie przydatna w badaniach kompozytów polimerowych, ponieważ pozwala na określenie temperatury przejścia ze stanu zeszklenia w stan wysoko elastyczny i zachowanie materiału w zakresie kruchości i elastyczności oraz ocenę stabilności termicznej i odkształcalności materiałów.

3.4 Cyfrowe techniki mikroskopowe w badaniach powierzchniowych

Strukturę powierzchni próbek analizowano przy użyciu mikroskopu cyfrowego typu VHX-7000 firmy Keyence (rys. 3.3.). Badanie wykonano przy powiększeniu x50. Zaawansowane funkcje, takie jak kompozycja głębi ostrości oraz wielokierunkowe oświetlenie, umożliwiły uzyskanie obrazów o wysokiej jakości

nawet przy analizie skomplikowanych powierzchni próbek. Mikroskop VHX-7000 umożliwia precyzyjne pomiary odległości, kątów, powierzchni, a także analizę złożonej struktury morfologicznej. Funkcje automatycznego wykrywania krawędzi oraz pomiaru wielopunktowego ułatwiają przeprowadzenie dokładnych i powtarzalnych pomiarów. Oprogramowanie mikroskopu umożliwia automatyczną oraz ręczną kalibrację, co pozwala na precyzyjne dostosowanie urządzenia do badania konkretnej próbki. Kalibracja obejmuje ustawienie ostrości, regulację oświetlenia oraz wybór odpowiedniej soczewki. Zastosowany mikroskop cyfrowy typu VHX-7000 firmy Keyence jest skutecznym narzędziem do badania i analizy różnych typów materiałów, a szczególnie powierzchni przed i po obróbce skrawaniem [100].



Rys. 3.3. Mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000

3.5. Zaawansowane optyczne techniki mikroskopowe

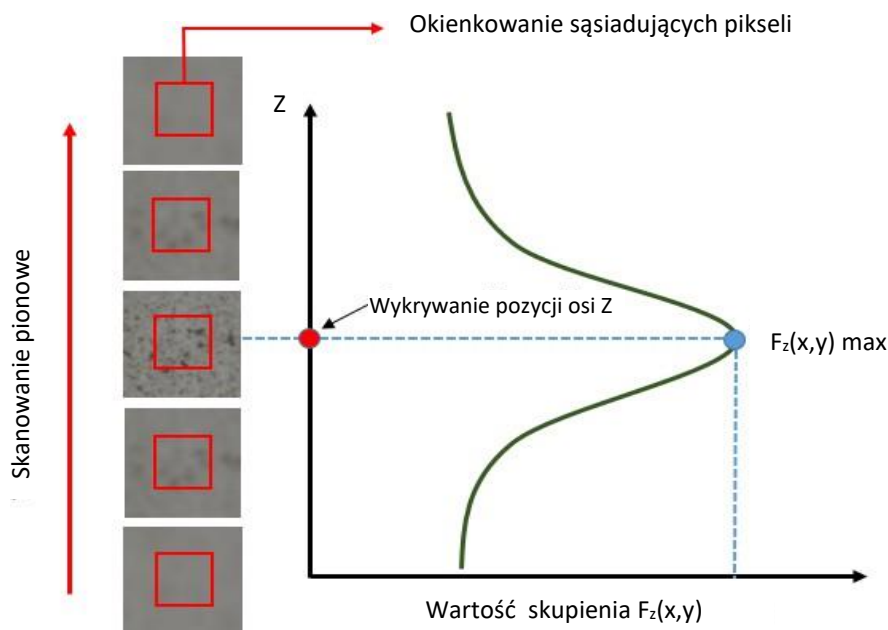
Próbki analizowano za pomocą mikroskopu optycznego Alicona Infinite Focus (rys. 3.4.). System pomiarowy mikroskopu działa na zasadzie zmiany ostrości, wykorzystując metodologię skanowania powierzchniowego, która integruje małą głębię ostrości układu optycznego ze skanowaniem pionowym, wydobywając szczegóły topograficzne w różnych płaszczyznach ogniskowych.



Rys. 3.4. Mikroskop cyfrowy Alicona Infinite Focus

Pomiar realizowany był poprzecznie do kierunku obróbki, z regulowanym, białym, koncentrycznym oświetleniem skierowanym na próbkę. W trakcie pomiaru powierzchnia próbki odbija promienie świetlne, a ich odbicie rejestruje czujnik umieszczony w części optycznej mikroskopu. Manipulowanie czujnikiem wzdłuż osi Z zmienia odległość od mierzonej powierzchni, dostosowując w ten sposób płaszczyzny ostrości. Zasadę działania mikroskopii zmienności ogniskowania przedstawiono na rysunku 3.5 [101].

Do każdego punktu przypisana jest współrzędna wysokości w oparciu o zmianę ostrości. Dla każdego konkretnego punktu podawane są współrzędne wyznaczające jego położenie w osiach x , y , z . Zasięg działania urządzenia w osiach x , y , z wynosi 200, 200, 100 mm. W badaniu zastosowano powiększenie $\times 10$ przy odległości roboczej 17,5 mm. Boczny zakres pomiarowy w osiach x , y wynosił 1,62 mm, a rozdzielczość pionową ustawiono na 100 nm [101].



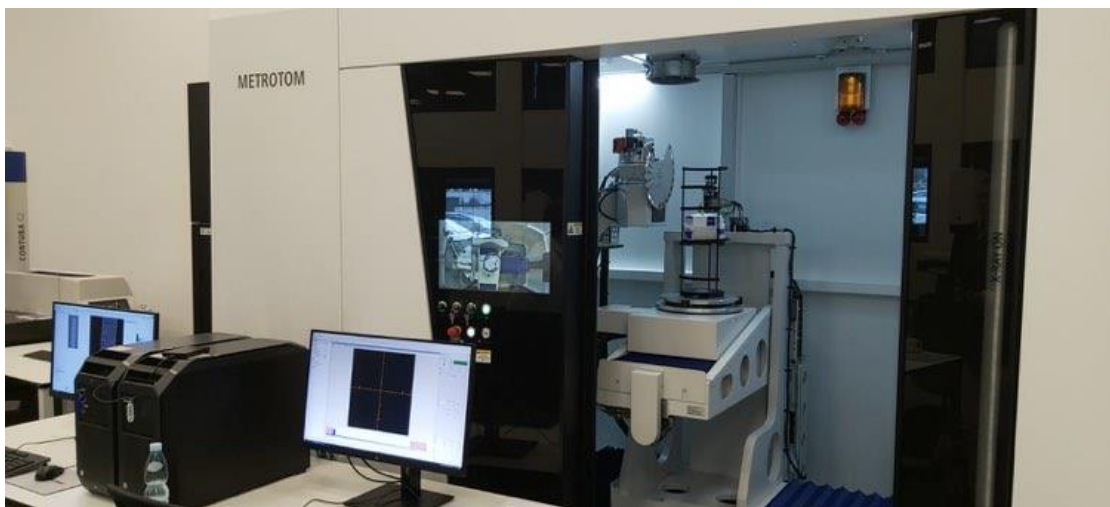
Rys. 3.5. Schemat zasady pionowego skanowania powierzchni w celu znalezienia największego kontrastu (wartość ostrości umożliwiająca określenie wysokości powierzchni) [105]

Wykorzystanie urządzeń do pomiaru geometrii i tekstury powierzchni w mikroskali obejmuje szeroki zakres zastosowań od pomiarów wymiarowych i geometrycznych po analizę tekstury oraz topografii powierzchni. Specjalistyczna optyka oraz zaawansowane algorytmy umożliwiają jednak rozszerzenie tych możliwości pomiarowych. Metoda ta jest głównie stosowana do analizy powierzchni wytworzonych w procesach obróbki skrawaniem, takich jak frezowanie, toczenie, wiercenie, jak również w innych procesach produkcyjnych, takich jak odlewanie i formowanie wtryskowe [102, 103].

Zgodnie z normą ISO 25178 w badaniu wyznaczono m.in. parametry wysokości (S_q - średnia kwadratowa wysokości, S_p - maksymalna wysokość szczytu, S_v - maksymalna wysokość wgłębienia, S_a - średnia arytmetyczna wysokości, S_z - maksymalna wysokość profilu, S_{ku} - kurtroza) oraz parametry funkcyjne (V_{mc} - objętość rdzenia, V_{vc} - maksymalna objętość dołków, V_{mp} - objętość wierzchołków, V_{vv} - procentowa objętość funkcjonalna) [57].

3.6. Tomografia komputerowa w analizie strukturalnej kompozytów

W badaniach zastosowano tomograf komputerowy Metrotom 1500 marki ZEISS (rys. 3.6.) reprezentujący nową generację urządzeń do nieinwazyjnego badania materiałów i komponentów jest zaawansowaną maszyną zaprojektowaną do precyzyjnych inspekcji. Jego konstrukcja oraz specyfikacje techniczne są dostosowane do wymagań nowoczesnej metrologii i kontroli jakości. Metrotom 1500 charakteryzuje się wymiarami $3,7 \times 2,4 \times 1,8$ m, co odzwierciedla jego zdolność do obsługi większych obiektów badawczych. Urządzenie jest wyposażone w zaawansowaną lampę rentgenowską typu zamkniętego, chłodzoną wodą, z zakresem napięcia od 30 do 225 kV, co umożliwia penetrację materiałów o większej gęstości. Maksymalny pobór mocy lampy wynosi 500 W, co przekłada się na wyższą efektywność i szybkość skanowania. Przestrzeń pomiarowa tomografu Metrotom 1500 umożliwia pomiar w kierunku Z do 800 mm, a w kierunkach Y i X do 615 mm.



Rys. 3.6. Tomograf ZEISS Metrotom 1500

System detekcji opiera się na zaawansowanej matrycy detektorów z wysoką rozdzielczością, umieszczoną w odległości do 1500 mm od źródła promieni X, co umożliwia uzyskanie szczegółowych obrazów o wysokiej precyzji. Rozmiar pojedynczego piksela wynosi 139×139 μm , co zapewnia wyjątkową jakość obrazu i dokładność pomiarów. Tomograf Metrotom 1500 jest przystosowany do pracy w warunkach temperatury otoczenia od $+18$ $^{\circ}\text{C}$ do $+22$ $^{\circ}\text{C}$ przy wilgotności 40–70%. Takie warunki zapewniają optymalne środowisko pracy i stabilność pomiarów.

Metrotom 1500 jest wyposażony w zamkniętą obudowę zabezpieczającą przed promieniowaniem rentgenowskim, wykonaną z kombinacji materiałów absorbujących promieniowanie, w tym polimerów i szkła ołowianego. Dzięki temu promieniowanie X nie przekracza dawki $1 \mu\text{Sv/h}$ w odległości 0,1 m od obudowy.

Z uwagi na swoje zaawansowane możliwości techniczne, Metrotom 1500 jest szczególnie odpowiedni do badań elementów wykonanych z różnorodnych materiałów, w tym metali, ceramiki i kompozytów. Idealnie nadaje się do zastosowań w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, odlewniczym oraz w inżynierii odwrotnej i defektoskopii, oferując niezrównaną jakość i dokładność pomiarów.

Dzięki detektorowi 3k o wysokiej rozdzielczości uzyskiwano dla próbek kompozytowych o wymiarach $10 \times 10 \times 80 \text{ mm}$ szczegółowe obrazy z rozdzielczością voxela wynoszącą $0,034342 \text{ mm}$. Voxel, skrót od "volumetric pixel" (voksel przestrzenny), to trójwymiarowy odpowiednik piksela stosowanego w obrazach dwuwymiarowych. Reprezentuje on wartość w regularnej siatce przestrzennej 3D, umożliwiając modelowanie obiektów trójwymiarowych. Voksel jest kluczowy w analizach medycznych, do tworzenia i analizy obrazów 3D, zawierających informacje o właściwościach fizycznych, takich jak gęstość czy intensywność promieniowania [104].

Każda próbka została zamocowana w specjalnym uchwycie o niskiej gęstości, który zapewnił stabilność podczas skanowania. Uchwyt o niskiej gęstości ma niski współczynnik absorpcji promieniowania rentgenowskiego, co oznacza, że nie powoduje istotnych artefaktów na obrazach tomograficznych. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie czystszych i bardziej precyzyjnych obrazów struktury wewnętrznej próbki. Na rysunku 3.7 przedstawiono sposób mocowania próbek.



Rys. 3.7. Mocowanie próbki do badań na tomografie ZEISS Metrotom 1500

W wyniku przeprowadzonego badania uzyskano szczegółowe trójwymiarowe modele próbek, które pozwoliły na kompleksową analizę struktury wewnętrznej dzięki współpracy z zaawansowanym oprogramowaniem analitycznym ZEISS INSPECT. Oprogramowanie stanowi integralną część, zwiększającą użyteczność urządzenia 1500 w różnych zastosowaniach badawczych i przemysłowych. Nieniszczące badanie obiektów wykazało obecność różnych faz metalicznych oraz napełniaczy. Dokładna analiza pozwoliła na identyfikację tych faz oraz ich rozmieszczenie w strukturze materiału. Analiza wykazała również obecność mikroporów oraz pustek w strukturze próbki. Badania potwierdzają, że tomografia komputerowa jest efektywną metodą analizy struktury materiałów, a uzyskane wyniki są kluczowe dla zrozumienia mikrostruktury i przewidywania zachowania materiałów w różnych warunkach [105–107].

3.7. Metody pomiaru twardości i udarności materiałów kompozytowych

Badanie twardości metodą Rockwella stanowi jedno z kluczowych narzędzi w charakterystyce właściwości mechanicznych materiałów, szczególnie w kontekście inżynierii materiałowej oraz projektowania konstrukcji. Twardość materiału, definiowana jako jego zdolność do opierania się trwałemu odkształceniu plastycznemu pod wpływem siły zewnętrznej, jest istotnym parametrem determinującym wybór materiałów w różnorodnych zastosowaniach technicznych. Wartość twardości, wyrażana w jednostkach twardości Rockwella (HR), jest bezpośrednio związana z odpornością materiału na penetrację przez twardszy element, znany jako wgłębnik.

Metoda Rockwella, szczegółowo określona w normie ISO 6508, jest szeroko stosowana ze względu na swoją uniwersalność, precyzję oraz relatywnie niewielkie wymagania dotyczące przygotowania próbek. Jest ona szczególnie użyteczna w ocenie twardości metali, materiałów kompozytowych, tworzyw polimerowych. Podstawą tej metody jest pomiar głębokości trwałego odkształcenia powstałego w wyniku oddziaływania znormalizowanego obciążenia przy użyciu odpowiedniego wgłębniaka, co pozwala na wyznaczenie wartości twardości [108–112].

W przeprowadzonych badaniach zastosowano cyfrowy twardościomierz Rockwella modelu DigiRock DP3 firmy Sinowon (rys.3.8.), który jest wyposażony w panel dotykowy umożliwiający bezpośredni odczyt wyników. Użyto wgłębniaka kulkowego o średnicy 6,35 mm wykorzystywanego w pomiarze twardości w skali HRM przeznaczonej do pomiarów twardości miękkich materiałów takich jak mosiądz i aluminium. Proces pomiaru trwał 15 sekund i był przeprowadzany przy całkowitym obciążeniu wynoszącym 980,7 N, na które składało się wstępne obciążenie 98,07 N oraz główne obciążenie wynoszące 882,6 N.

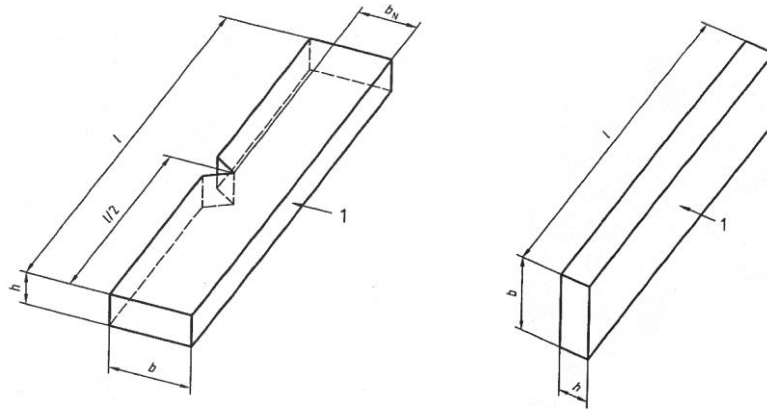
W celu zapewnienia dokładności pomiaru, wgłębnik najpierw przykładano do powierzchni próbki przy zastosowaniu obciążenia wstępnego, co miało na celu wyeliminowanie wpływu ewentualnych nierówności powierzchni próbki i zapewnienie stabilnego kontaktu. Po obciążeniu głównym, głębokość wgłębienia została zmierzona, a wartość twardości automatycznie odczytano z panelu

urządzenia. Takie podejście minimalizuje ryzyko błędów pomiarowych, zapewniając powtarzalność i wiarygodność uzyskanych wyników, co jest kluczowe w kontekście oceny właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych.



Rys. 3.8. Cyfrowy twardościomierz Rockwella z panelem dotykowym DigiRock DP3 Sinowon

Udarność to właściwość materiału, która opisuje jego odporność na uszkodzenia powstałe w wyniku dynamicznego uderzenia. Określa się ją poprzez stosunek energii potrzebnej do złamania próbki w sposób dynamiczny do powierzchni przekroju poprzecznego tej próbki w miejscu złamania. Wartość energii nie jest wystarczającym wskaźnikiem, ponieważ sposób, w jaki materiał ulega pęknięciu, może być kruchy lub plastyczny, zależnie od jego charakterystyki. Metoda Charpy'ego opiera się na udarowym zginaniu próbki o kształcie prostokątnym, z wycięciem karbu lub też nie (rys. 3.9.), umieszczonej na dwóch podporach, a następnie określeniu energii zużytej na złamanie próbki.



Rys. 3.9. Kształtki do badań: a) z karbem, b) bez karbu; 1 - kierunek uderzenia, l - długość, b - szerokość, h - grubość [117]

Zgodnie z normą ISO 179-1:2023, metoda Charpy'ego jest powszechnie stosowana do oceny materiałów wykorzystywanych w procesach technologicznych, takich jak prasowanie, wtryskiwanie, odlewanie czy wytłaczanie arkuszy i płyt, jak również do testowania tworzyw polimerowych i laminatów. Badanie to ma istotne znaczenie w kontroli jakości produktów oraz weryfikacji materiałów podczas ich odbioru. Próbki z termoplastycznych arkuszy i płyt, w tym laminatów, są wytwarzane metodą obróbki skrawaniem, natomiast próbki z gotowych wyrobów można uzyskać przez wycinanie lub obróbkę skrawaniem [117]. W badaniu wykorzystano młot Charpy'ego Zwick/Roell HIT 5.5P, który przedstawiono na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Młot Charpiego Zwick/Roell HIT 5.5P do badania udarności próbek z tworzyw sztucznych z karbem lub bez karbu

Udarność próbek bez karbu (a_{cU}) obliczamy w kJ/m^2 według wzoru:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \text{ [kJ}/\text{m}^2] \quad (10)$$

gdzie:

E_c - skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu kształtki [J],

h - grubość kształtki [mm],

b - szerokość kształtki do badań [mm].

Udarność próbki z karbem (a_{cN}) należy obliczyć w kJ/m^2 według wzoru:

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \text{ [kJ}/\text{m}^2] \quad (11)$$

gdzie:

E_c - skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu kształtki [J],

h - grubość kształtki [mm],

b_N - pozostała szerokość kształtki do badań (w miejscu karbu) [mm].

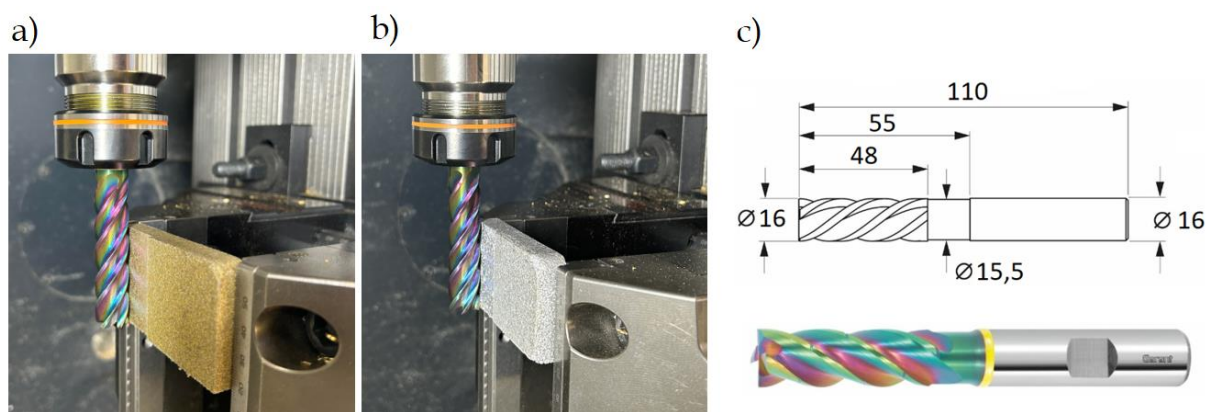
Zastosowanie metody Charpy'ego umożliwia ocenę właściwości wytrzymałościowych materiałów przy zginaniu udarowym. Należy jednak zwrócić uwagę, że wyników tego testu nie można bezpośrednio przekładać na rzeczywiste warunki eksploatacyjne produktów końcowych. Wynika to z faktu, że jest to metoda umowna, a na uzyskane rezultaty wpływają liczne czynniki, takie jak kształt i wymiary próbek, sposób ich przygotowania, szybkość aplikacji naprężenia oraz temperatura badania [111, 113, 114, 115, 116, 117].

3.8. Proces obróbki skrawaniem kompozytu

Wytworzone metodą prasowania próbki zostały poddane obróbce skrawaniem celem oceny ich skrawalności oraz stanu powierzchni po obróbce. Obróbka skrawaniem materiałów o niejednorodnej strukturze stanowi duże wyzwanie dla tego typu procesu. Podstawowe trudności przy obróbce materiałów kompozytowych to niezadowalająca jakość powierzchni oraz trudności związane z prawidłowym

doborem narzędzi i parametrów obróbki. Podczas obróbki możliwe jest powstawanie uszkodzeń powierzchni typowych przy obróbce materiałów niejednorodnych, a nieobecnych przy skrawaniu materiałów niemetalowych. Obróbkę wykonano na frezarce sterowanej numerycznie DMG MORI CMX50U. Materiał obrabiany w postaci płytki półfabrykatu kompozytowego został zamocowany w imadle dedykowanym do obróbki wieloosiowej ze szczękami pazurowymi (rys.3.11.a, b). Przy zamocowaniu zwrócono szczególną uwagę na siłę zacisku szczęk która nie przekraczała 25kN celem zniwelowania występowania naprężeń wewnętrznych w materiale podczas obróbki. Do skrawania wykorzystano wysokojakościowy pięcioostrzowy frez z węgliku spiekanego o średnicy 16 mm z pokryciem diamond like carbon (DLC) (rys. 3.11.c), wykorzystywany do obróbki aluminium i metali nieżelaznych oraz tworzyw polimerowych (materiałów dających krótki lub długi wiór podczas obróbki). W procesie przyjęto następujące parametry obróbki: posuw na ostrze $f_z = 0,05$ mm/ostrze, prędkość skrawania $V_c = 550$ m/min, głębokość skrawania $a_p = 25$ mm, szerokość skrawania $a_e = 1$ mm.

Chwytność narzędzia wykonany był zgodnie z DIN 6535 HA w tolerancji h5. Zastosowano oprawkę narzędziową wykonaną zgodnie z ISO 7388-1 typu ER32 SK40 A100, spełniającą warunek dokładności ruchu obrotowego ≤ 3 μ m, oraz dokładności wyważenia G 2.5 przy prędkości obrotowej 25000 min [118].



Rys. 3.11. Proces obróbki kompozytu a) zamocowanie próbki kompozytowej z wiórami mosiądzu, b) zamocowanie próbki kompozytowej z wiórami aluminium, c) parametry pięcioostrzowego freza z węgliku spiekanego

4. Formowanie kompozytów metodą prasowania

Napełniacz w postaci wiórów przygotowano przed procesem mieszania z polimerem i prasowania poprzez przesiewanie i frakcjonowanie przy użyciu wstrząsarki laboratoryjnej (rys. 4.1.), wyposażonej w precyzyjne sita o ściśle określonych wymiarach prostokątnych boków oczek: 1,18 mm, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm oraz 0,2 mm, dobranych na podstawie frakcji metali uzyskanych z recyklingu. Dzięki temu zabiegowi uzyskano wióry aluminiowe o frakcjach w zakresach 0,6–0,8 mm oraz 0,8–1,18 mm, a także wióry mosiężne o frakcjach 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm. Wióry te stanowiły 85%, 90% oraz 95% masy całkowitej każdej z próbek. Frakcje te stanowiły kluczowy element w dalszym procesie technologicznym, takim jak prasowanie, gdzie odpowiednie granulacje wpływają na właściwości końcowego produktu.



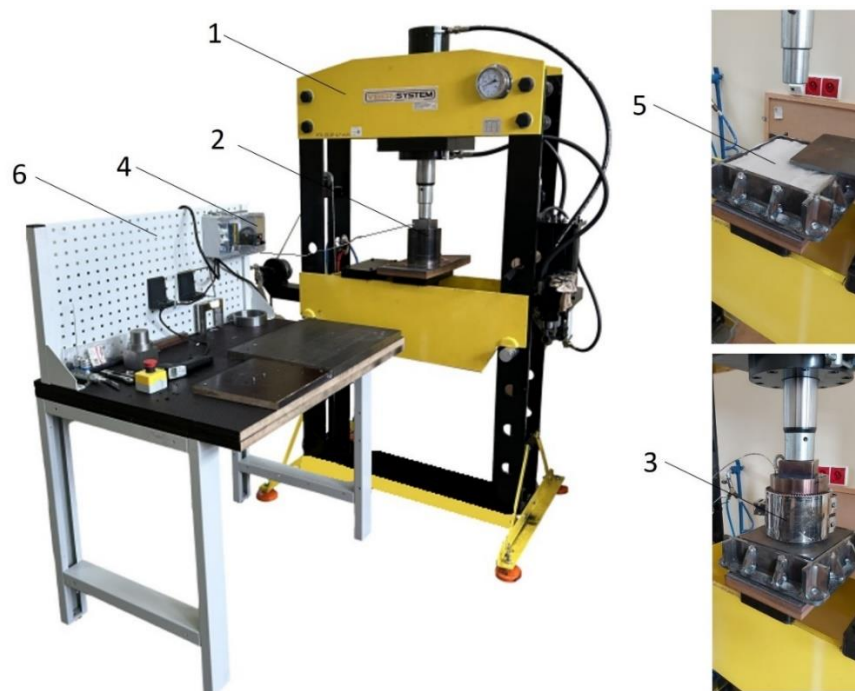
Rys. 4.1. Wstrząsarka laboratoryjna Ø200 mm LPzE-2e [119]

W pracy przyjęto nazewnictwo próbek oparte na górnej wartości średnicy oczek sita, aby jednoznacznie określić maksymalny rozmiar cząstek, jakie znajdują się w danej frakcji. Taki sposób nazewnictwa umożliwia szybkie i łatwe porównywanie próbek oraz ich właściwości. Górna wartość sita oczek sita jest bezpośrednio związana z maksymalnym rozmiarem cząstek zatrzymanych na sicie, nazwy próbek

odzwierciedlają najważniejszy parametr, który ma bezpośredni wpływ na ich zachowanie w dalszych procesach technologicznych, takich jak prasowanie. To podejście do nazewnictwa próbek ułatwia także porównanie wyników oraz zapewnia spójność w dokumentacji i analizach.

Osnowę, w postaci proszku o frakcji poniżej $0,5\ \mu\text{m}$, stanowiły Alphalon® 24 (poliamid 6) oraz VICTREXTM Powder PEEK 150P, których zawartość wagowa w próbkach kompozytowych wynosiła 5%, 10% i 15%. Charakterystykę zastosowanych tworzyw zestawiono w suplemencie.

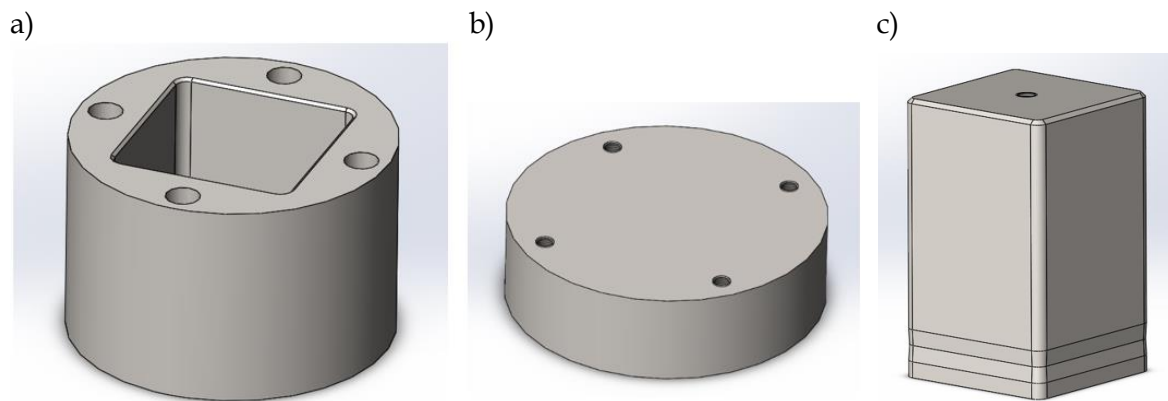
Do przygotowania wyprasek w kształcie płyty sześcienniej zastosowano prasę hydrauliczną marki Viber-System, Gorzów Wielkopolski, Polska, o sile nacisku 75 ton (rys. 4.2.). W celu zminimalizowania strat ciepła podczas procesu nagrzewania opracowano i wykonano innowacyjny izolator termiczny. Izolator ten charakteryzuje się wyjątkową skutecznością w redukcji odprowadzania ciepła i rozkładzie temperatury w formie, co znacząco poprawiło efektywność energetyczną całego układu.



Rys. 4.2. Stanowisko do wytwarzania próbek: 1 – prasa warsztatowa VIBER-SYSTEM 75 TON WP75PRK, 2 – matryca, 3 – układ grzewczy, 4 – regulator temperatury, 5 – izolator termiczny, 6 – stół montażowy

W procesie prasowania użyto specjalnie zaprojektowanej formy przeznaczonej do wytwarzania doświadczalnych wyprasek. Matryca (rys. 4.3.a) wraz

z podstawą (rys. 4.3.b) oraz stemplem (rys. 4.3.c) zostały wykonane z materiału 40HM (42CrMo4).



Rys. 4.3. Model matrycy a) korpus matrycy, b) podstawa matrycy, c) stempel

Elementy formy poddano dodatkowo procesowi hartowania z wysokim odpuszczaniem, dzięki czemu uzyskano twardość na poziomie 48 ± 2 HRC, co zapewnia odpowiednią wytrzymałość i trwałość podczas procesu formowania.

Proces wytwarzania kompozytowych płytek z napelniaczem w postaci wiórow aluminium lub mosiężnych, w zależności od zastosowanego materiału osnowy polimerowej, składał się z kilku kluczowych etapów.













Proces wytwarzania kompozytowych próbek z napelniaczem w postaci wiórow składał się z kilku etapów. W pierwszej kolejności przygotowano mieszaninę polimeru z wiórami metalowymi, w odpowiedniej proporcji wagowej dla każdej próbki oraz przeprowadzono proces mieszania składników w mieszarce bębnowej. Tworzywa polimerowe przed procesem mieszania suszono w temperaturze $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla PA6 w czasie 12 godzin i $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla PEEK w czasie 5 godzin, w suszarce szafkowej Shini CD-9-CE (Shini Plastics Technologies, Inc.). Następnie uzyskaną mieszaninę zasypywano do gniazda formy. W kolejnym etapie przeprowadzono proces formowania w odpowiednich warunkach temperatury i ciśnienia, co pozwalało na uzyskanie pożądanej struktury i właściwości mechanicznych kompozytu. Mieszaninę tworzywa PA6 z wiórami aluminium umieszczoną w gnieździe formy prasowniczej homogenizowano w temperaturze $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ pod ciśnieniem 50 MPa przy użyciu prasy hydraulicznej. Układ grzejny stanowiła wykonana cylindryczna opaska grzałkowa













o mocy 2400 W, wraz z termoparą i układem stabilizacji temperatury. Proces chłodzenia przeprowadzono przy użyciu sprężonego powietrza, od temperatury uplastycznienia do temperatury 50 °C, w czasie zależnym od zawartości napełniacza od 1500 s – dla kompozytu o zawartości 15% osnowy polimerowej, 2000 s dla 10% zawartości osnowy polimerowej, do 3000 s dla 5% zawartości osnowy polimerowej. W przypadku kompozytów PA6 z wiórami mosiądzu zastosowano następujące parametry: temperatura uplastycznienia 230 °C, ciśnienie 50 MPa, czas chłodzenia od 1800 s – dla kompozytu o zawartości 15% osnowy polimerowej, 2300 s dla 10% zawartości osnowy polimerowej, do 3500 s dla 5% zawartości osnowy polimerowej. Podobnie mieszaninę tworzywa PEEK z wiórami aluminium umieszczoną w gnieździe formy prasowniczej homogenizowano w temperaturze 370 °C pod ciśnieniem 50 MPa przy użyciu prasy hydraulicznej. Proces chłodzenia przeprowadzono przy użyciu sprężonego powietrza, od temperatury uplastycznienia do temperatury 50 °C, w czasie zależnym od zawartości napełniacza, od 2000 s – dla kompozytu o zawartości 15% osnowy polimerowej, 3000 s dla 10% zawartości osnowy polimerowej, do 4000 s dla 5% zawartości osnowy polimerowej. W przypadku kompozytów PEEK z wiórami mosiądzu zastosowano następujące parametry: temperatura uplastycznienia 370 °C, ciśnienie 50 MPa, czas chłodzenia od 2400 s – dla kompozytu o zawartości 15% osnowy polimerowej, 3600 s dla 10% zawartości osnowy polimerowej, do 4800 s dla 5% zawartości osnowy polimerowej.

Proces wytwarzania próbek porównawczych z PA6 i PEEK przebiegał w tych samych parametrach jak dla kompozytu o największej zawartości osnowy polimerowej.

W procesie prasowania wytworzono 24 rodzaje pod względem składu i frakcji wypraski kompozytowe, z których przygotowano próbki do badań. Wytworzone kompozyty zestawiono w tabeli (tab. 4.1.)

Tab. 4.1. Zestawienie próbek uzyskanych metodą prasowania

<p>1-PA5%/Al95%/W0,8 - próbka nr 1, 5% PA6 / 95% wiór Al o frakcji 0,6-0,8 mm</p>	<p>2-PA10%/Al90%/W0,8 - próbka nr 2, 10%PA6 / 90% wiór Al o frakcji 0,6-0,8 mm</p>	<p>3-PA15%/Al85%/W0,8 - próbka nr 3, 15% PA6 / 85% wiór Al o frakcji 0,6- 0,8 mm</p>
		
<p>4-PA5%/Al95%/W1,18 - próbka nr 4, 5% PA6 / 95% wiór Al o frakcji 0,8-1,18 mm</p>	<p>5-PA10%/Al90%/W1,18 - próbka nr 5, 10% PA6 / 90% wiór Al o frakcji 0,8-1,18 mm</p>	<p>6-PA15%/Al85%/W1,18 - próbka nr 6, 15% PA6 / 85% wiór Al o frakcji 0,8-1,18 mm</p>
		
<p>7-PA5%/M95%/W0,4 - próbka nr 7, 5% PA6 / 95% wiór M o frakcji 0,2-0,4 mm</p>	<p>8-PA10%/M90%/W0,4 - próbka nr 8, 10%PA6 / 90% wiór M o frakcji 0,2-0,4 mm</p>	<p>9-PA15%/M85%/W0,4 - próbka nr 9, PA6 15% / 85% wiór M o frakcji 0,2-0,4 mm</p>
		
<p>10-PA5%/M95%/W0,6 - próbka nr 10, 5% PA6 / 95% wiór M o frakcji 0,4-0,6 mm</p>	<p>11-PA10%/M90%/W0,6 - próbka nr 11, 10% PA6 / 90% wiór M o frakcji 0,4-0,6 mm</p>	<p>12-PA15%/M85%/W0,6 - próbka nr 12, 15% PA6 / 85% wiór M o frakcji 0,4-0,6 mm</p>
		

1'-PEEK5%/M95%/W0,4 - próbka nr 1', 5% PEEK / 95% wiór M o frakcji 0,2-0,4 mm	2'-PEEK10%/M90%/W0,4 - próbka nr 2', 10% PEEK / 90% wiór M o frakcji 0,2-0,4 mm	3'-PEEK15%/M85%/W0,4 - próbka nr 3', 15% PEEK / 85% wiór M o frakcji 0,2-0,4 mm
		
4'-PEEK5%/M95%/W0,6 - próbka nr 4', 5% PEEK / 95% wiór M o frakcji 0,4-0,6 mm	5'-PEEK10%/M90%/W0,6 - próbka nr 5', 10% PEEK / 90% wiór M o frakcji 0,4-0,6 mm	6'-PEEK15%/M85%/W0,6 - próbka nr 6', 15% PEEK / 85% wiór M o frakcji 0,4-0,6 mm
		
7'-PEEK5%/A195%/W0,8 - próbka nr 7', 5% PEEK / 95% wiór Al o frakcji 0,6-0,8 mm	8'-PEEK10%/A190%/W0,8 - próbka nr 8', 10% PEEK / 90% wiór Al o frakcji 0,6-0,8 mm	9'-PEEK15%/A185%/W0,8 - próbka nr 9', 15% PEEK / 85% wiór Al o frakcji 0,6-0,8 mm
		
10'-PEEK5%/A195%/W1,18 - próbka nr 10', 5% PEEK / 95% wiór M o frakcji 0,8-1,18 mm	11'-PEEK10%/A190%/W1,18 - próbka nr 11', 10% PEEK / 90% wiór M o frakcji 0,8-1,18 mm	12'-PEEK15%/A185%/W1,18 - próbka nr 12', 15% PEEK / 85% wiór M o frakcji 0,8-1,18 mm
		

W tabeli 4.2 zestawiono uzyskane kompozyty o kształcie płytek 80 x 80 x 10 mm według zależności wagowych osnowy i napelnacza oraz proporcji objętościowych uwzględniając ciężar właściwy materiałów.

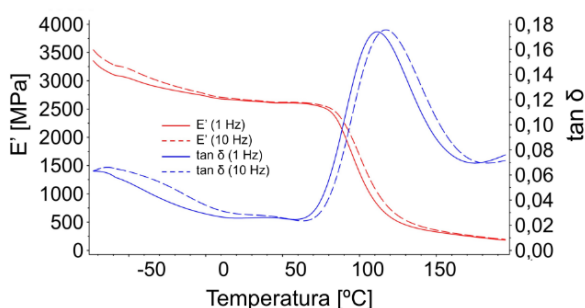
Tab. 4.2. Zestawienie próbek pod względem składu wagowego i objętościowego

Nr próbki	Osnowa polimerowa				Napelniacz metalowy			
	Waga	Gęstość	Masa	Objętość	Waga	Gęstość	Masa	Objętość
	[g]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[g]	[g/cm ³]	[%]	[%]
1-PA5%/Al95%/W0,8	7,5	1,13	5	11,10	142,5	2,68	95	88,90
2-PA10%/Al90%/W0,8	15	1,13	10	20,86	135	2,68	90	79,14
3-PA15%/Al85%/W0,8	22,5	1,13	15	29,50	127,5	2,68	85	70,50
4-PA5%/Al95%/W1,18	7,5	1,13	5	11,10	142,5	2,68	95	88,90
5-PA10%/Al90%/W1,18	15	1,13	10	20,86	135	2,68	90	79,14
6-PA15%/Al85%/W1,18	22,5	1,13	15	29,50	127,5	2,68	85	70,50
7-PA5%/M95%/W0,4	17,5	1,13	5	28,19	332,5	8,43	95	71,81
8-PA10%/M90%/W0,4	35	1,13	10	45,32	315	8,43	90	54,68
9-PA15%/M85%/W0,4	52,5	1,13	15	56,83	297,5	8,43	85	43,17
10-PA5%/M95%/W0,6	17,5	1,13	5	28,19	332,5	8,43	95	71,81
11-PA10%/M90%/W0,6	35	1,13	10	45,32	315	8,43	90	54,68
12-PA15%/M85%/W0,6	52,5	1,13	15	56,83	297,5	8,43	85	43,17
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	17,5	1,30	5	25,45	332,5	8,43	95	74,55
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	35	1,30	10	41,88	315	8,43	90	58,12
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	52,5	1,30	15	53,37	297,5	8,43	85	46,63
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	17,5	1,30	5	25,45	332,5	8,43	95	74,55
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	35	1,30	10	41,88	315	8,43	90	58,12
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	52,5	1,30	15	53,37	297,5	8,43	85	46,63
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	7,5	1,30	5	9,79	7,5	2,68	95	90,21
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	15	1,30	10	18,64	15	2,68	90	81,36
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	22,5	1,30	15	26,68	22,5	2,68	85	73,32
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	7,5	1,30	5	9,79	142,5	2,68	95	90,21
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	15	1,30	10	18,64	135	2,68	90	81,36
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	22,5	1,30	15	26,68	127,5	2,68	85	73,32

5. Analiza wpływu napelnacza na zmiany właściwości mechanicznych

5.1. Ocena dynamicznych właściwości mechanicznych (DMTA)

Przedstawione na rysunku 5.1 wyniki badań zmiany wartości modułu zachowawczego oraz tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury i częstotliwości drgań wskazują na znaczne różnice dla próbek z poliamidu 6 i z kompozytów. W fazie szklistej dla poliamidu 6 zarejestrowano maksymalną wartość modułu zachowawczego równą 3490 MPa przy częstotliwości 1 Hz i 3600 MPa przy 10 Hz. Zarejestrowano niewielki wpływ temperatury na wartości modułu zachowawczego. Znaczne zmiany zarejestrowano w wyższym zakresie temperatury. W temperaturze przejścia szklistego (T_g) wartość modułu wyniosła 2600 MPa. Fazę szklistą odnotowano w przedziale temperatury od 60 °C do 130 °C, co jest charakterystyczne dla polimerów, które podczas ogrzewania przechodzą z fazy szklistej do lepkosprężystej.

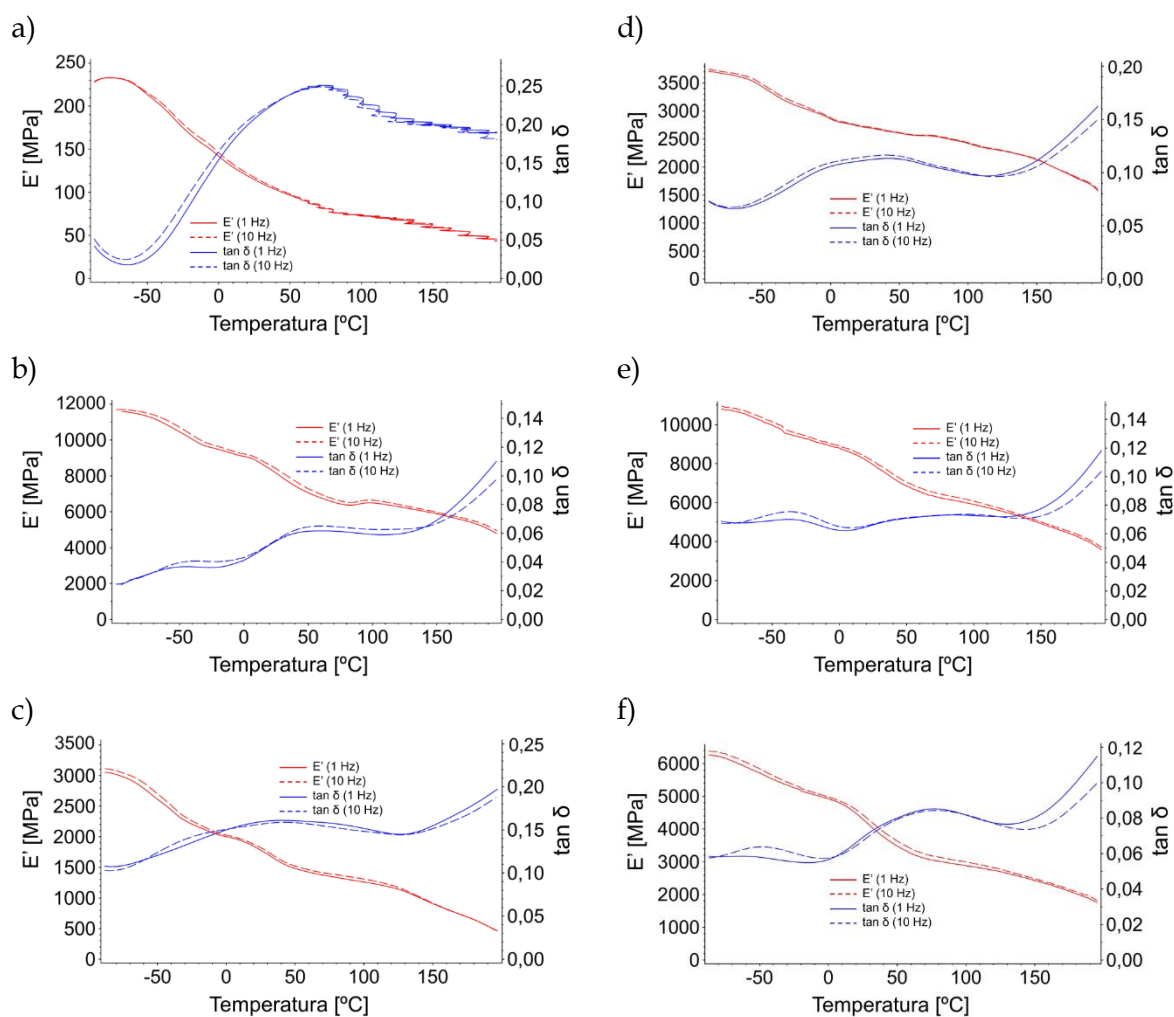


Rys. 5.1. Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury PA6

Przy częstotliwości 10 Hz odnotowano wyższe wartości modułu zachowawczego (E') w porównaniu z wynikami dla niższej częstotliwości 1 Hz w całym zakresie temperatury, co wskazuje, że materiał wykazuje większą sztywność przy szybszych cyklach obciążenia. W fazie odkształceń wysokoelastycznych zauważono wyraźny spadek wartości modułu zachowawczego. W temperaturze płynięcia, wynoszącej 175 °C zarejestrowano niewielką wartość modułu E' , wynoszącą

250 MPa. Maksimum $\tan \delta$, zarejestrowane przy niższej częstotliwości, w temperaturze 60 °C odpowiadało temperaturze przejścia szklistego.

Na rysunku 5.2 przedstawiono przebieg zmian wartości tangensa kąta stratności oraz modułu zachowawczego w funkcji temperatury dla próbek kompozytów zawierających napełniacz w postaci wiórów aluminiowych o wielkościach frakcji 0,6–0,8 mm oraz 0,8–1,18 mm.



Rys. 5.2. Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury kompozytu PA6 z wiórami aluminium: a) 1-PA5%/Al95%/W0,8, b) 2-PA10%/Al90%/W0,8, c) 3-PA15%/Al85%/W0,8, d) 4-PA5%/Al95%/W1,18, e) 5-PA10%/Al90%/W1,18, f) 6-PA15%/Al85%/W1,18

Analiza metodą DMTA (rys. 5.3.) kompozytów z PA6 oraz dodatkiem wiórów aluminiowych wykazała znaczące różnice w przebiegu zmian wartości modułu zachowawczego (E') oraz tangensa kąta stratności mechanicznej ($\tan \delta$) w porównaniu do poliamidu. Wartości modułu zachowawczego E' dla kompozytów

z wiórami o frakcji 0,6–0,8 mm wykazały charakterystyczne zmiany w zakresie fazy szklistej, w temperaturze zeszklenia (T_g) oraz fazy wysokoelastycznej i plastycznej. Najwyższą wartość E' zanotowano dla próbki 2-PA10%/Al90%/W0,8, wynoszącą 11590 MPa przy częstotliwości 1 Hz i 11700 MPa przy 10 Hz w fazie szklistej (rys. 5.2.b). Wartości te były wyższe o około 8100 MPa w porównaniu do PA6. W temperaturze zeszklenia ($78,5\text{ }^\circ\text{C}$) wartość E' wyniosła 6300 MPa przy częstotliwości 1 Hz. Zmiany wartości tangensa kąta stratności mechanicznej w zakresie temperatury od $-90\text{ }^\circ\text{C}$ do $0\text{ }^\circ\text{C}$ wskazały na zbliżony przebieg zmian dla obu częstotliwości. W temperaturze zeszklenia odnotowano maksymalną wartość $\tan \delta$ wynoszącą 0,062 dla częstotliwości 1 Hz, z maksymalną różnicą 0,01 pomiędzy częstotliwościami.

W przypadku próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8 odnotowano najwyższą wartość E' równą 3050 MPa przy 1 Hz oraz 3100 MPa przy 10 Hz (rys. 5.2.c). W przypadku kompozytu o wyższej zawartości polimeru, wartości modułu E' były niższe w porównaniu z PA6, odpowiednio 440 MPa dla 1 Hz i 500 MPa dla 10 Hz. Niewielkie różnice pomiędzy częstotliwościami wskazują na sprężyste właściwości materiału, z minimalnymi stratami energii mechanicznej. W temperaturze zeszklenia ($56,4\text{ }^\circ\text{C}$) wartość modułu zachowawczego E' wyniosła 1500 MPa dla 1 Hz oraz odnotowano maksymalną wartość $\tan \delta$ równą 0,016 dla częstotliwości 1 Hz.

Z kolei dla próbki 1-PA5%/Al95%/W0,8 zanotowano wartość modułu E' równą 240 MPa w fazie zeszklenia przy częstotliwości 1 Hz, co stanowi spadek o 93% w stosunku do PA6 (rys. 5.2.a).

Analiza wyników dla próbek z wiórami o frakcji 0,8–1,18 mm potwierdziła, że wartości modułu E' zarejestrowane w zakresie temperatury badania były wyższe w porównaniu do PA6, jednak niższe niż dla mniejszych frakcji napełniacza. Przykładowo, w fazie szklistej dla próbki 5-PA10%/Al90%/W1,18 zanotowano wartość E' wynoszącą 10790 MPa dla 1 Hz oraz 10930 MPa dla 10 Hz (rys. 5.2.e). W temperaturze zeszklenia wartość modułu E' wyniosła 6400 MPa dla 1 Hz, a różnica w stosunku do PA6 7300 MPa dla 1 Hz i 7330 MPa dla 10 Hz. W temperaturze zeszklenia równej $75\text{ }^\circ\text{C}$ zarejestrowano maksymalną wartość $\tan \delta$, która wyniosła 0,071. Dla obu częstotliwości maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,02.

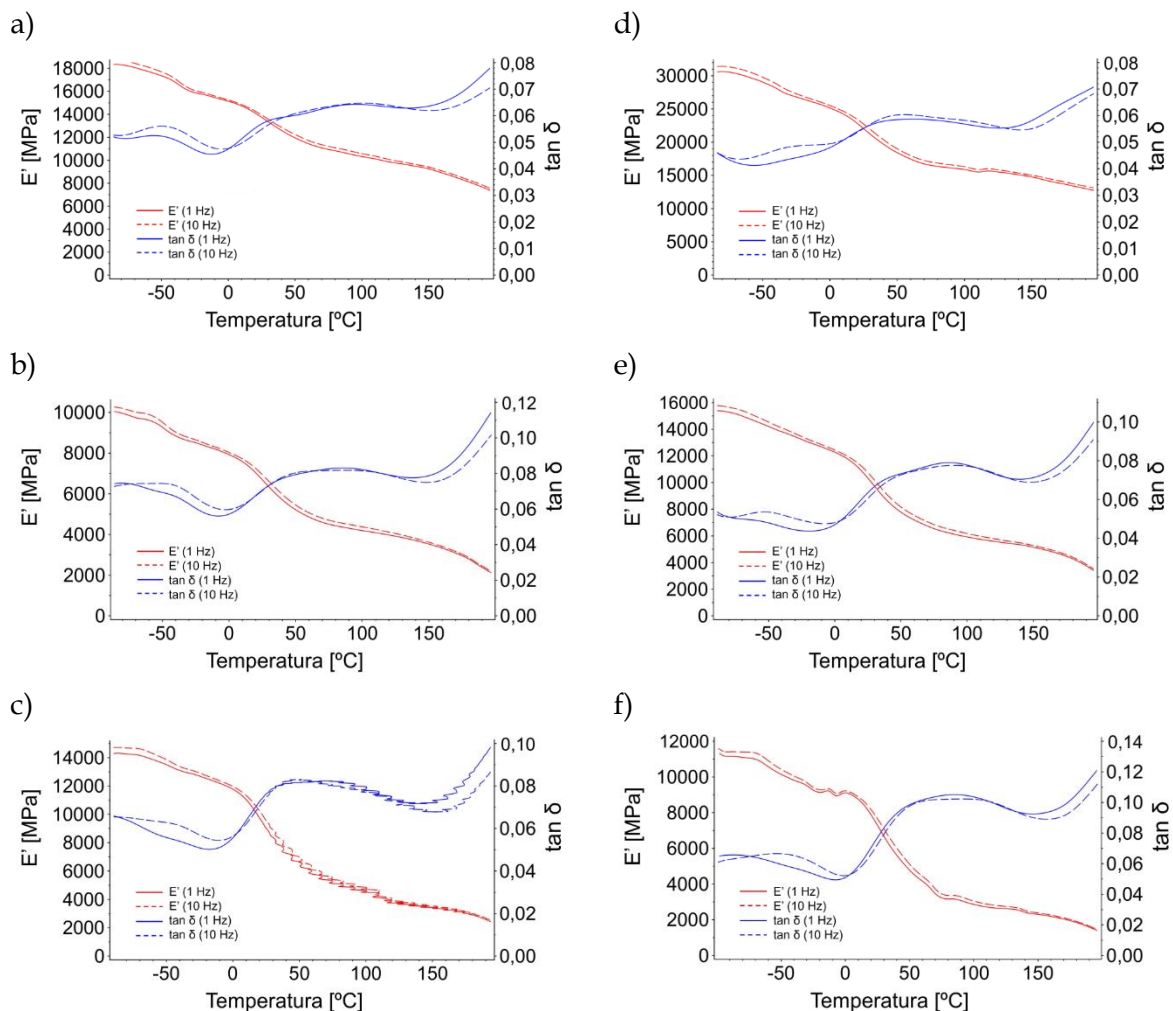
Dla próbki 4-PA5%/Al95%/W1,18 zarejestrowano najwyższą wartość E' równą 3705 MPa dla 1 Hz i 3750 MPa dla 10 Hz (rys. 5.2.d). W porównaniu do próbki z PA6 Różnica modułu zachowawczego wartości wyniosła 215 MPa dla 1 Hz i 150 MPa dla 10 Hz. Różnica w całym zakresie temperatury dla częstotliwości badania wyniosła około 50 MPa, a w temperaturze zeszklenia (90 °C) zarejestrowano wartość modułu E' wynoszącą 2500 MPa. Wyniki badań wskazują na bardzo znaczne różnice w wartościach modułu w porównaniu do PA6 oraz niewielką podatność na temperaturę badanego kompozytu.

Analiza próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18 wykazała najwyższą wartość E' wynoszącą 6260 MPa dla 1 Hz i 6380 MPa dla 10 Hz w fazie zeszklenia (rys. 5.2.f). W temperaturze zeszklenia (68,1 °C) zarejestrowano wartość modułu E' 3000 MPa dla 1 Hz, a różnica wartości E' w stosunku do PA6 wyniosła 2770 MPa.

Analiza DMTA wykazała, że dodatek wiórów aluminium znacząco wpływa na właściwości mechaniczne kompozytów PA6. W zależności od frakcji i zawartości wiórów, kompozyty wykazywały różne poziomy sztywności i wartości modułu zachowawczego w poszczególnych fazach podczas ogrzewania. Dla obu frakcji wiórów 10% zawartości tworzywa wpływa na poprawę stabilności mechanicznej kompozytów, natomiast zbyt wysoka zawartość wiórów może prowadzić do osłabienia struktury i obniżenia sztywności. Wyniki te wskazują, że odpowiedni dobór frakcji i zawartości wiórów jest kluczowy dla uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych kompozytów PA6 z aluminium, szczególnie w kontekście zastosowań wymagających wysokiej stabilności termicznej i mechanicznej.

Dla kompozytów z PA6 i dodatkiem wiórów mosiądzu (rys. 5.3) odnotowano znacznie wyższe wartości modułu zachowawczego (E') w porównaniu do próbki wykonanej z PA6 oraz niższą podatność na temperaturę modułu zachowawczego w wyższej temperaturze, szczególnie w przypadku najmniejszej zawartości polimeru w kompozycie i większej frakcji wióra. Najwyższą wartość E' zarejestrowano dla próbki 10-PA5%/M95%/W0,6, wynoszącą 30100 MPa dla częstotliwości 1 Hz oraz 31370 MPa dla 10 Hz w temperaturze -90 °C (rys. 5.3.d). W porównaniu do próbki PA6, różnica wartości E' wyniosła odpowiednio 26610 MPa dla 1 Hz oraz 27770 MPa dla 10 Hz w tej samej temperaturze. W temperaturze zeszklenia (81,5 °C) dla modułu

E' zarejestrowano wartość 18000 MPa przy częstotliwości 1 Hz. W całym zakresie temperatury różnica wartości wynosiła około 100 MPa. W temperaturze zeszklenia (81,5 °C) maksymalna wartość tangensa kąta stratności mechanicznej wyniosła 0,059, a maksymalna różnica wartości tangensa kąta stratności między częstotliwościami wyniosła 0,01. Dla próbki 11-PA10%/M90%/W0,6 o tej samej frakcji wiórów zarejestrowano najwyższą wartość E' równą 15370 MPa przy częstotliwości 1 Hz oraz 15755 MPa dla 10 Hz w fazie zeszklenia (rys. 5.3.e). W porównaniu do próbki kompozytowej 10-PA5%/M95%/W0,6 odnotowano niższe wartości modułu zachowawczego, wynoszące odpowiednio 14730 MPa dla 1 Hz oraz 15615 MPa dla 10 Hz w temperaturze -90 °C.



Rys. 5.3. Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury kompozytu PA6 z wiórami mosiądzu: a) 7-PA5%/M95%/W0,4, b) 8-PA10%/M90%/W0,4, c) 9-PA15%/M85%/W0,4, d) 10-PA5%/M95%/W0,6, e) 11-PA10%/M90%/W0,6, f) 12-PA15%/M85%/W0,6

W temperaturze zeszklenia wynoszącej 67,8 °C, dla modułu E' zarejestrowano wartość 7000 MPa przy częstotliwości 1 Hz. W temperaturze 67,8 °C maksymalna wartość $\tan \delta$ wynosiła 0,079 przy częstotliwości 1 Hz. Względem obu częstotliwości maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,01.

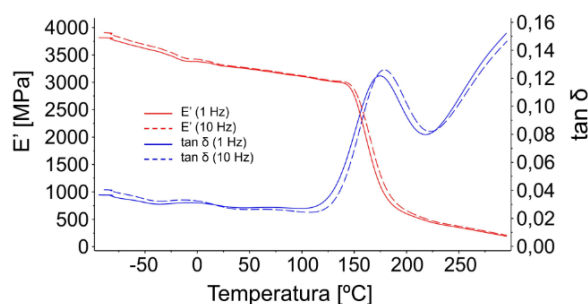
W przypadku próbek z frakcją wiórów wynoszącą 0,4–0,6 mm dla kompozytu 12-PA15%/M85%/W0,6 zanotowano najniższe wartości modułu zachowawczego (rys. 5.3.f). Różnice w wartości E' wynosiły odpowiednio 18900 MPa przy częstotliwości 1 Hz oraz 20035 MPa przy 10 Hz w temperaturze -90 °C. W temperaturze zeszklenia, przy częstotliwości 1 Hz, wartość modułu zachowawczego wynosiła 5500 MPa. Zmiany wartości $\tan \delta$ w fazie szklistej wykazały maksymalną różnicę wynoszącą 0,01. W temperaturze 0 °C wartość $\tan \delta$ wynosiła 0,049, a w temperaturze zeszklenia wynoszącej 60,4 °C maksymalna wartość $\tan \delta$ wyniosła 0,1. Analiza wyników dla próbek z mniejszą frakcją wiórów (0,2–0,4 mm) wskazała, że próbki te charakteryzują się niższymi wartościami modułu E' w porównaniu do tych z większą frakcją. Najkorzystniejsze właściwości mechaniczne uzyskano dla próbki 7-PA5%/M95%/W0,4, gdzie wartość E' wyniosła 18340 MPa przy 1 Hz i 18680 MPa przy 10 Hz w temperaturze -90 °C (rys. 5.3.a). Różnica w wartości modułu w stosunku do próbki 10-PA5%/M95%/W0,6 wyniosła 11760 MPa przy 1 Hz i 12690 MPa przy 10 Hz w tej samej temperaturze. Wartość modułu E' w temperaturze zeszklenia wynosiła 11000 MPa. W temperaturze zeszklenia (95,2 °C) zarejestrowano maksymalną wartość $\tan \delta$ wynoszącą 0,06. Dla próbki 9-PA15%/M85%/W0,4 zanotowano najwyższą wartość E' , wynoszącą 14100 MPa przy 1 Hz oraz 14780 MPa przy 10 Hz w fazie szklistej (rys. 5.3.c). Różnica względem próbki 12-PA15%/M85%/W0,6 wyniosła odpowiednio 16000 MPa dla 1 Hz i 16590 MPa dla 10 Hz w tej samej temperaturze. Przy częstotliwości 1 Hz i temperaturze zeszklenia wartość E' wynosiła 5500 MPa. Wartość maksimum $\tan \delta$ przy temperaturze zeszklenia (62,9 °C) wyniosła 0,083.

Próbka 8-PA10%/M90%/W0,4 wykazała najniższe wartości modułu E' (rys. 5.3.b). Zarejestrowano wartość E' wynoszącą 10050 MPa przy 1 Hz i 10270 MPa przy 10 Hz w temperaturze -90 °C. Różnica w wartościach modułu w porównaniu do próbki 12-PA15%/M85%/W0,6 wyniosła 20050 MPa przy 1 Hz i 21100 MPa przy

10 Hz. W temperaturze zeszklenia (80,1 °C) moduł E' osiągnął wartość 4100 MPa przy częstotliwości 1 Hz, a maksymalna wartość $\tan \delta$ w temperaturze zeszklenia wynosiła 0,078.

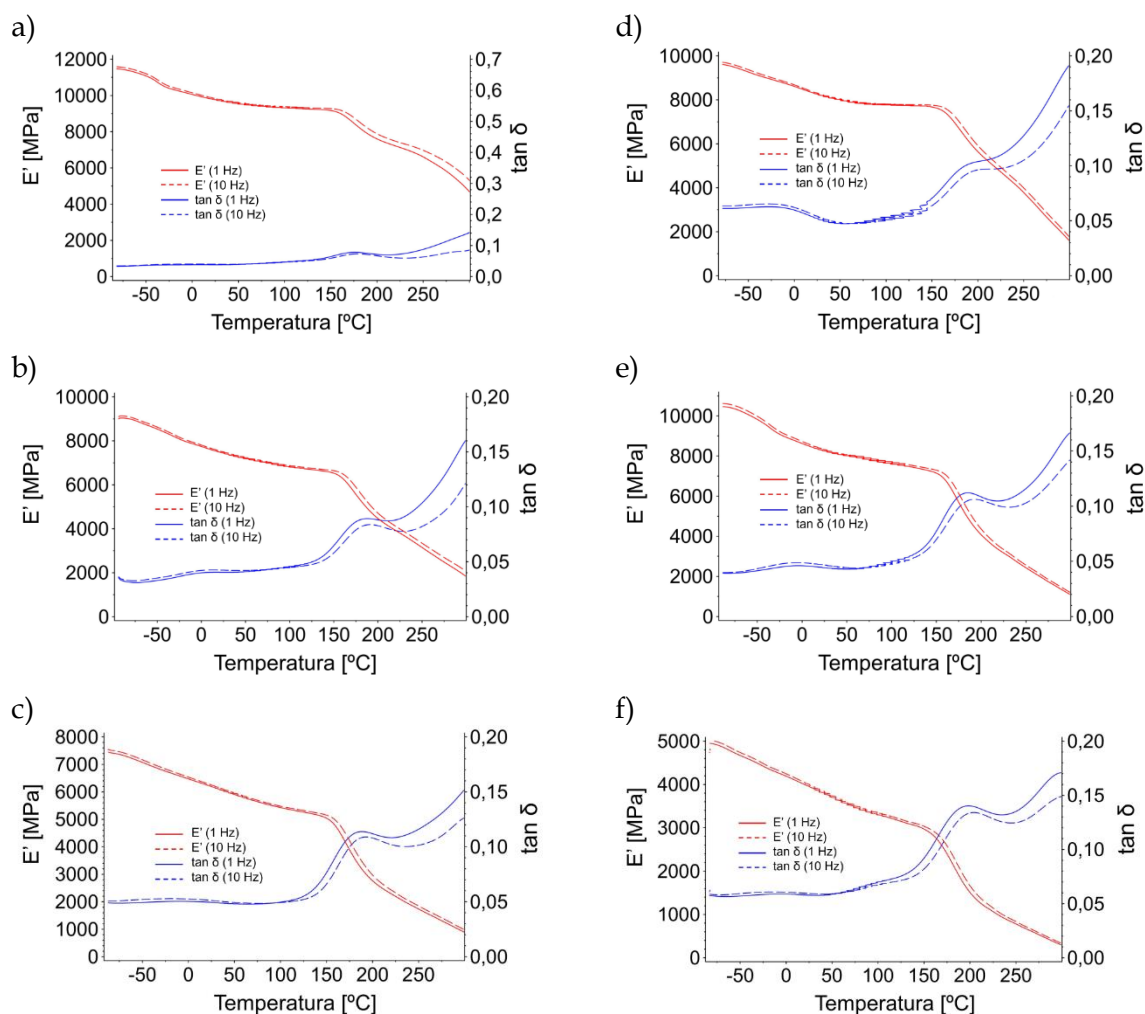
Podsumowując, analiza wyników badań wskazuje, że kompozyty z większą frakcją wióra (0,4–0,6 mm) i zawartością poliamidu w zakresie 5%–10% wykazują lepsze właściwości mechaniczne, co wskazuje na możliwość do zastosowań wymagających wysokiej sztywności materiału. Zmniejszenie frakcji wióra do 0,2–0,4 mm prowadzi do obniżenia modułu zachowawczego E' , co może ograniczać zastosowanie takich kompozytów w aplikacjach wymagających wytrzymałości mechanicznej. Wartości $\tan \delta$ wskazują na konieczność uwzględnienia wpływu temperatury na właściwości mechaniczne kompozytów, szczególnie w warunkach podwyższonej temperaturze.

Na rysunku 5.4 przedstawiono zależność tangensa kąta stratności i modułu zachowawczego od temperatury w zakresie od -90 °C do 300 °C dla materiału PEEK. Krzywe termograficzne dla próbek badanych przy częstotliwościach 1 Hz i 10 Hz wykazały podobne przebiegi w całym analizowanym zakresie temperatury badania. Analiza DMTA przeprowadzona dla PEEK ujawniła typowe cechy wysokowydajnych termoplastów, z temperaturą zeszklenia wynoszącą 152,2 °C, przy której wartość $\tan \delta$ wynosiła 0,09. Najwyższą wartość modułu E' zarejestrowano przy -90 °C, wynoszącą 3800 MPa dla 1 Hz oraz 3900 MPa dla 10 Hz. W temperaturze zeszklenia moduł E' wynosił 2300 MPa dla 1 Hz. W temperaturze 180 °C zarejestrowano maksymalną wartość $\tan \delta$ wynoszącą 0,12. Wyniki te potwierdzają, że tworzywo PEEK charakteryzuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi w szerokim zakresie temperatury w porównaniu do PA6, co czyni je szczególnie przydatnym w zastosowaniach wymagających dużej wytrzymałości.



Rys. 5.4. Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury dla PEEK

Dla próbek kompozytowych wykonanych z PEEK oraz wiórów mosiądzu o frakcjach 0,2-0,4 mm i 0,4-0,6 mm, na rysunku 5.5 przedstawiono zależności tangensa kąta stratności i modułu zachowawczego w funkcji temperatury. Wartości modułu zachowawczego (E') dla kompozytu zawierającego wióry o frakcji 0,2-0,4 mm wykazały charakterystyczne zmiany w analizowanym zakresie temperatury. Najwyższą wartość E' odnotowano dla próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6 z wiórami o frakcji 0,4-0,6 mm, która wyniosła 10460 MPa przy 1 Hz i 10600 MPa przy 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.5.e). W porównaniu z PEEK różnica wyniosła 6660 MPa dla 1 Hz i 6700 MPa dla 10 Hz w tej samej temperaturze. Wartość modułu zachowawczego E' przy częstotliwości 1 Hz i temperaturze zeszklenia wynoszącej $145,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ wyniosła 7100 MPa. W tej temperaturze zarejestrowano także maksymalną wartość tangensa kąta stratności mechanicznej ($\tan \delta$), która wyniosła 0,1. W przypadku kompozytów z wiórami o frakcji 0,4-0,6 mm, próbka 4'-PEEK5%/M95%/W0,6 wykazała niższe wartości E' w porównaniu do próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, odpowiednio o 660 MPa przy 1 Hz oraz 950 MPa przy 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.5.d). W temperaturze zeszklenia, wynoszącej $156,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, wartość modułu E' wyniosła 3000 MPa dla 1 Hz, natomiast wartość maksimum $\tan \delta$ wyniosła 0,07. Względem obu częstotliwości maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,03. Dla próbki 6'-PEEK15%/M85%/W0,6 stwierdzono największe różnice w wartości modułu E' w porównaniu do próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6 (rys. 5.5.f). Moduł zachowawczy dla częstotliwości 1 Hz wyniósł 4950 MPa, a dla 10 Hz 5020 MPa w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Rys. 5.5. Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury próbek kompozytu PEEK z wiórami mosiądzu: a) 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, b) 2'-PEEK10%/M90%/W0,4, c) 3'-PEEK15%/M85%/W0,4, d) 4'-PEEK5%/M95%/W0,6, e) 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, f) 6'-PEEK15%/M85%/W0,6

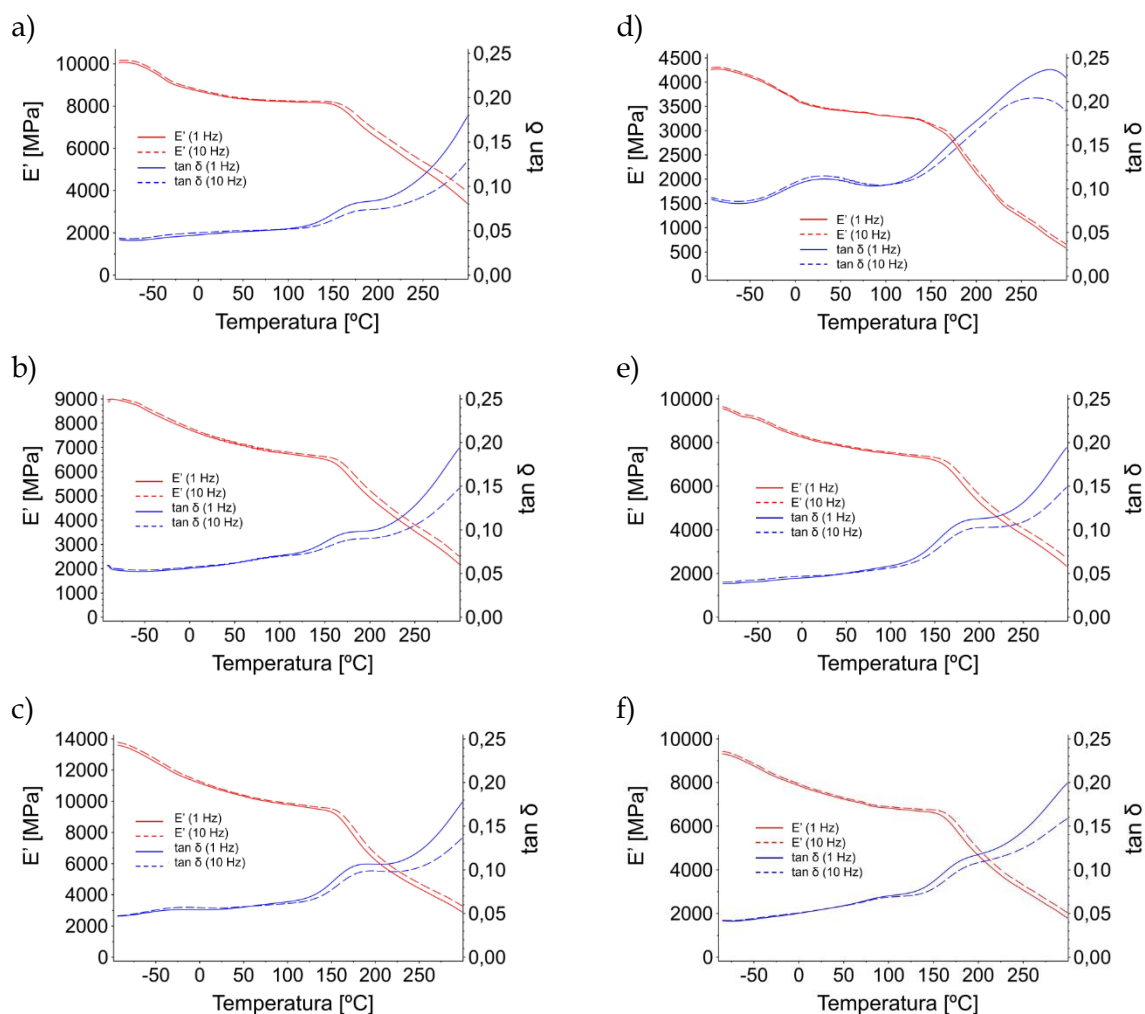
Wartość modułu zachowawczego E' przy częstotliwości 1 Hz i w temperaturze zeszklenia wynoszącej 128,4 °C osiągnęła 2000 MPa, a zarejestrowana wartość tangensa kąta stratności mechanicznej wynosiła 0,08. Różnica w wartości $\tan \delta$ między częstotliwościami wyniosła maksymalnie 0,03.

Dla próbek z wiórami o frakcji 0,2-0,4 mm, najwyższą wartość modułu E' odnotowano dla próbki 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, wynoszącą 11490 MPa przy częstotliwości 1 Hz i 11600 MPa przy 10 Hz (rys. 5.5.a). W temperaturze zeszklenia (174,2 °C), wartość $\tan \delta$ wyniosła 0,1, a wartość modułu E' dla 1 Hz była równa 4000 MPa. Natomiast względem obu częstotliwości maksymalna różnica wartości tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,05. Dla próbki

2'-PEEK10%/M90%/W0,4 zarejestrowano wartość E' równą 9000 MPa przy 1 Hz oraz 9100 MPa przy 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.5.b). Wartości modułu E' dla tej próbki były niższe w porównaniu z próbką 5'-PEEK10%/M90%/W0,6 o 1460 MPa przy 1 Hz i 1500 MPa przy 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Przy temperaturze $155,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, moduł E' wyniósł 6700 MPa, a maksimum $\tan \delta$ wynosiło 0,07. W konsekwencji zwiększania zawartości polimeru w kompozycie, próbka 3'-PEEK15%/M85%/W0,4 charakteryzowała się niższą wartością modułu E' w porównaniu do próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, wynoszącą 7430 MPa dla 1 Hz i 7500 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.5.c). W temperaturze zeszklenia ($146,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), wartość $\tan \delta$ wyniosła 0,1, a moduł E' wyniósł wartość 4000 MPa dla 1 Hz. Maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,05. Wyniki badań wskazują, że optymalna zawartość PEEK w kompozytach polimerowych wynosi 10%, co zapewnia najlepsze właściwości mechaniczne dla zastosowanych frakcji wiórów. Zawartość PEEK na poziomie 10% prowadzi do uzyskania najwyższych wartości modułu zachowawczego E' . Zwiększenie zawartości PEEK powyżej 10% skutkuje obniżeniem sztywności kompozytu, co może ograniczać jego zastosowanie w bardziej wymagających aplikacjach, szczególnie w wyższych temperaturach.

Dla wyprasek z PEEK z dodatkiem wiórów aluminiowych o frakcjach 0,6–0,8 mm oraz 0,8–1,18 mm zarejestrowano zależności w funkcji temperatury dla tangensa kąta stratności i modułu zachowawczego, które przedstawiono na rysunku 5.6. Analiza tych wyprasek ujawniła zróżnicowane wartości modułu E' i $\tan \delta$, zależnych od rozmiaru frakcji wiórów.

Najwyższą wartość modułu E' (13600 MPa przy 1 Hz oraz 13780 MPa przy 10 Hz) odnotowano dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, zawierającej wióry o frakcji 0,6–0,8 mm, w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.6.c). Różnica w porównaniu z PEEK wynosiła 9800 MPa dla 1 Hz i 9880 MPa dla 10 Hz w tej samej temperaturze. W całym badanym zakresie temperatury różnica ta wynosiła około 50 MPa. W temperaturze zeszklenia ($130,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) dla modułu E' uzyskano wartość 9000 MPa przy 1 Hz. Wartość tangensa kąta stratności ($\tan \delta$) w tej temperaturze wyniosła 0,07, a względem obu częstotliwości maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,05.



Rys. 5.6. Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury próbek kompozytu PEEK z wiórami aluminium: a) 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, b) 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, c) 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, d) 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, e) 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, f) 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18

W przypadku próbki 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, o tej samej frakcji wiórów, odnotowano maksymalną wartość modułu E' równą 10000 MPa dla 1 Hz oraz 10160 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.6.a). W porównaniu z próbką 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 wartości te były niższe o 3600 MPa dla 1 Hz i 3620 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. W temperaturze zeszklenia ($155,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) moduł E' wyniósł 8000 MPa przy 1 Hz, a maksimum $\tan \delta$ wynosiło 0,07. Maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej była równa 0,03. Dla próbki 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, z wiórami o frakcji 0,6–0,8 mm, odnotowano najniższe wartości (rys. 5.6.b). Różnica w wartościach E' w stosunku do próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 wynosiła

5600 MPa dla 1 Hz i 4700 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. W temperaturze $141,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ maksimum $\tan \delta$ wynosiło 0,08, a maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej wynosiła 0,04.

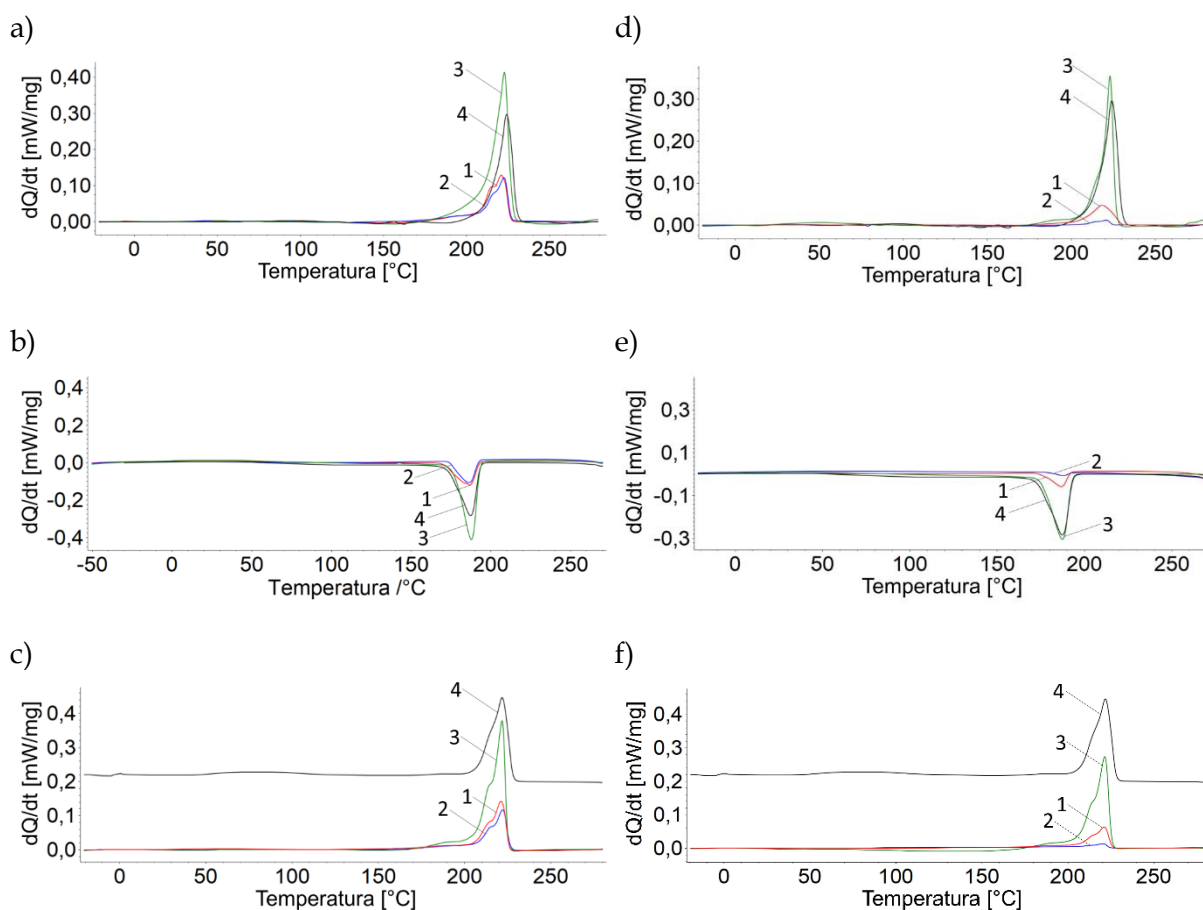
Analiza wyników dla próbek z frakcją wiórów 0,8–1,18 mm wykazała, że wartości modułu E' były niższe niż dla próbek z mniejszą frakcją napełniacza. Dla próbki 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, wartość modułu E' wynosiła 9600 MPa dla 1 Hz oraz 9700 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.6.e). Różnica wartości E' w porównaniu do próbki o najkorzystniejszych parametrach wyniosła 4000 MPa dla 1 Hz i 4080 MPa dla 10 Hz. W temperaturze zeszklenia ($127,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) moduł E' osiągnął 7500 MPa dla 1 Hz, a maksimum $\tan \delta$ wyniosło 0,08. Maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej między częstotliwościami wyniosła 0,05. Próbka 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18 wykazała najwyższą wartość E' , wynoszącą 9200 MPa dla 1 Hz oraz 9400 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.6.f). W porównaniu z próbką 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 różnica wyniosła 4400 MPa dla 1 Hz i 4380 MPa dla 10 Hz. W temperaturze zeszklenia ($139,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) moduł E' wyniósł 7000 MPa przy 1 Hz, maksimum $\tan \delta$ wynosiło 0,07. Względem obu częstotliwości maksymalna różnica wartości tangensa kąta stratności mechanicznej wynosiła 0,02. Próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, zawierająca wióry o frakcji 0,8–1,18 mm, wykazała najniższe wartości E' , wynoszące 4250 MPa dla 1 Hz i 4310 MPa dla 10 Hz w temperaturze $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5.6.d). W całym zakresie temperatury odnotowano różnicę wynoszącą około 50 MPa. W temperaturze $148,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ zarejestrowano maksimum $\tan \delta$, a względem obu częstotliwości maksymalna różnica tangensa kąta stratności mechanicznej wynosiła 0,05.

Wyniki badań wskazują, że kompozyty z wiórami o frakcji 0,6–0,8 mm mają wyższe wartości modułu E' w porównaniu z kompozytami zawierającymi większą frakcję (0,8–1,18 mm).

5.2. Analiza termiczna metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej

Na rysunku 5.7 przedstawiono wyniki badań próbek wykonanych z kompozytu z napełniaczem w postaci wiórów aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm

(rys 5.7.a, b, c) oraz 0,8–1,18 mm (rys 5.7.d, e, f). Analiza termogramów oraz wyniki badań zebrane w tabeli 5.1 wskazują, że wartości temperatury topnienia – maksimum refleksu dla wszystkich próbek w pierwszym i drugim ogrzewaniu są zbliżone i mieszczą się w przedziale $220,9 \div 225,5$ °C. Najwyższą wartość temperatury topnienia odnotowano dla próbki PA6 w drugim ogrzewaniu (225,5 °C). W przypadku chłodzenia, temperatura krystalizacji jest niższa i wynosi od 186,7 °C do 188,1 °C, co wskazuje na różnice w procesie krystalizacji przy chłodzeniu. W tabeli 5.1 zamieszczono zestawienie parametrów wyznaczonych na podstawie uzyskanych pomiarów DSC.



Rys. 5.7. Termogramy DSC badanych materiałów: 1-(1-PA5%/Al95%/W0,8), 2-(2-PA10%/Al90%/W0,8), 3-(3-PA15%/Al85%/W0,8), 4-(PA6) – a) pierwsze ogrzewanie, b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(4-PA5%/Al95%/W1,18), 2-(5-PA10%/Al90%/W1,18), 3-(6-PA15%/Al85%/W1,18), 4-(PA6) – d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie ogrzewanie

Najwyższe wartości entalpi topnienia odnotowano dla próbek 3-PA15%/Al85%/W0,8 i 6-PA15%/Al85%/W1,18 w pierwszym ogrzewaniu (odpowiednio 34,62 J/g i 20,69 J/g), co wskazuje na wyższe wartości stopnia krystaliczności tych próbek. Najwyższe wartości stopnia krystaliczności zarejestrowano dla próbek 3-PA15%/Al85%/W0,8 i 6-PA15%/Al85%/W1,18 (odpowiednio 18,22% i 10,89% w pierwszym ogrzewaniu). Kompozyty te charakteryzują się bardziej uporządkowaną strukturą krystaliczną. Wartości te są niższe dla próbek 1-PA5%/Al95%/W0,8, 2-PA10%/Al90%/W0,8, 4-PA5%/Al95%/W1,18, 5-PA10%/Al90%/W1,18 co wskazuje na bardziej amorficzną strukturę osnowy polimerowej tych kompozytów.

Tab. 5.1. Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PA6 i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i frakcji 0,8–1,18 mm

Ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia, maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
1-PA5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	220,9	208,0 ÷ 223,5	12,49	6,57	83,4
2-PA10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	223,2	199,3 ÷ 226,0	11,06	5,82	78,5
3-PA15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	222,6	218,5 ÷ 226,7	34,62	18,22	56,4
4-PA5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	221,7	212,8 ÷ 225,6	5,217	2,75	90,9
5-PA10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	221,7	214,1 ÷ 224,4	1,011	0,53	75,6
6-PA15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	223,5	221,6 ÷ 226,1	20,69	10,89	68,1
PA6		223,4	212,6 ÷ 226,2	18,92	10,44	81,2

Chłodzenie					
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. krystalizacji, maks. refleksu	Zakres temp. krystalizacji	Entalpia krystalizacji	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[°C]
1-PA5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	186,7	184,7 ÷ 192,8	10,240	89,1
2-PA10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	186,8	173,5 ÷ 192,2	7,633	64,4
3-PA15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	188,1	177,0 ÷ 192,9	26,07	72
4-PA5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	187,1	175,9 ÷ 191,8	4,163	82,3
5-PA10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	187,8	178,5 ÷ 192,5	0,6449	82,9
6-PA15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	187,5	175,4 ÷ 192,9	20,95	60,8
PA6		187,4	173,4 ÷ 193,3	20,32	60,7

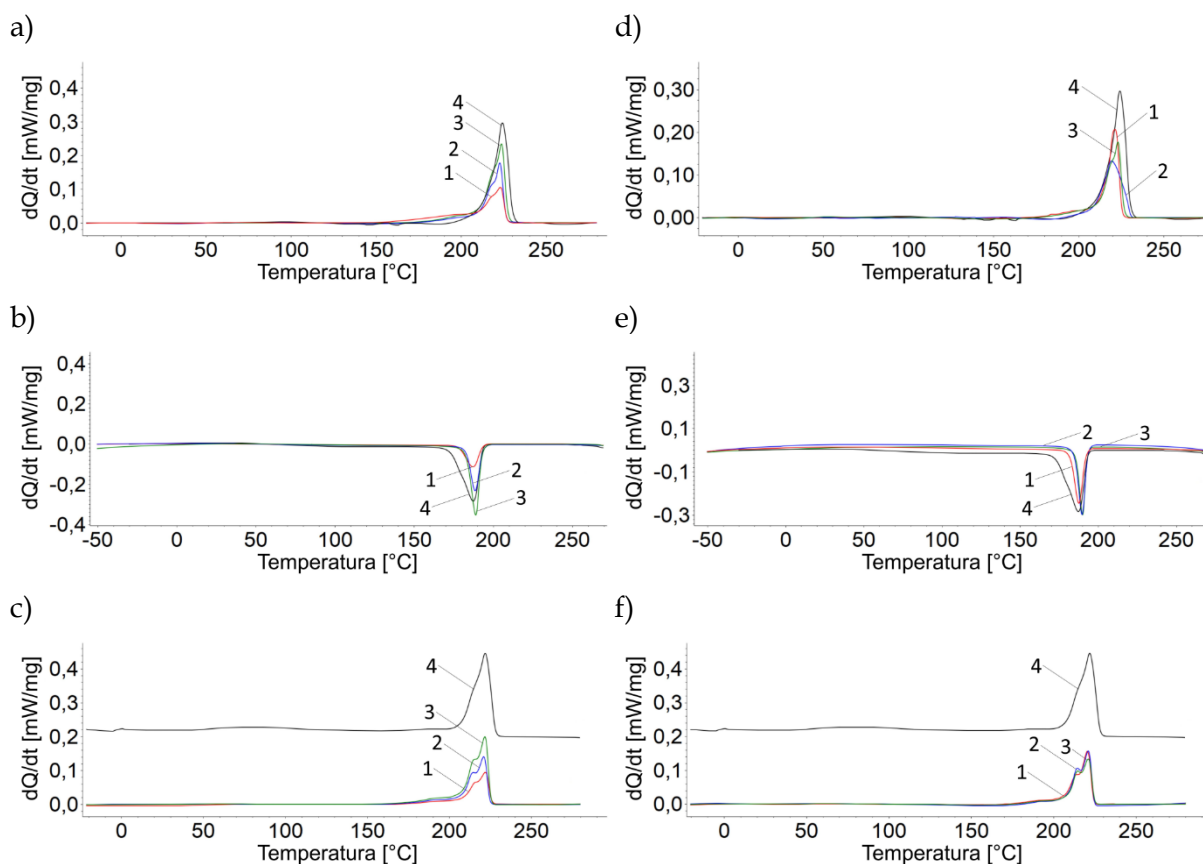
Drugie ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
1-PA5%/Al95%/W0,8	0,6-0,8	221,6	210,7 ÷ 225,7	12,72	6,69	91,5
2-PA10%/Al90%/W0,8	0,6-0,8	222,4	212,5 ÷ 226,0	10,54	5,55	84,7
3-PA15%/Al85%/W0,8	0,6-0,8	222,4	212,8 ÷ 224,6	26,52	13,96	65,2
4-PA5%/Al95%/W1,18	0,8-1,18	221,7	209,5 ÷ 225,3	5,565	2,93	79,2
5-PA10%/Al90%/W1,18	0,8-1,18	221,7	213,1 ÷ 224,6	1,304	0,60	76,9
6-PA15%/Al85%/W1,18	0,8-1,18	222,1	213,5 ÷ 225,0	21,12	11,11	58,7
PA6		225,5	220,6 ÷ 228,2	20,88	10,99	79,4

Wartości temperatury zeszklenia dla próbek różnią się znacząco. Najniższą wartość temperatury zeszklenia odnotowano dla próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8 podczas pierwszego ogrzewania równą 56,4 °C (tab. 5.1.). Dla próbek 1-PA5%/Al95%/W0,8 i PA6 zarejestrowano wyższe wartości temperatury zeszklenia. Analizując wyniki badań można stwierdzić dla kompozytów 3-PA15%/Al85%/W0,8 i 6-PA15%/Al85%/W1,18 wyższe wartości stopnia krystaliczności, co wskazuje na bardziej uporządkowaną strukturę krystaliczną. Różnice w wartości temperatury topnienia - maksimum refleksu oraz temperatury zeszklenia wskazują na różnorodność w stabilności termicznej i strukturze próbek.

Na podstawie analizy termogramów (rys. 5.8.) próbek kompozytowych z napelniaczem w postaci wiórów mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm (rys 5.8.a, b, c) i 0,4-0,6 mm (rys 5.8.d, e, f) oraz wyników badań zebranych w tabeli 5.2 stwierdzono, że wartości temperatury topnienia - maksimum refleksu dla wszystkich próbek w pierwszym i drugim ogrzewaniu są zbliżone i mieszczą się w przedziale 219,7 - 225,5 °C. Najwyższą wartość temperatury topnienia odnotowano dla próbki PA6 w drugim ogrzewaniu (225,5 °C). W przypadku chłodzenia, maksimum refleksu wskazuje na różnice w procesie krystalizacji przy chłodzeniu.

Zarejestrowano zmiany zakresu temperatury topnienia fazy krystalicznej dla próbek z napelniaczem. Przykładowo, zakres dla próbki 9-PA15%/M85%/W0,4 w pierwszym ogrzewaniu uległ rozszerzeniu (218,5 ÷ 226,5 °C), w porównaniu do PA6 (212,6 ÷ 226,2 °C). Najwyższe wartości entalpii topnienia odnotowano dla próbki PA6

(18,92 J/g w pierwszym ogrzewaniu i 20,88 J/g w drugim ogrzewaniu), co wskazuje na wyższy stopień krystaliczności tej próbki (tab. 5.2.).



Rys. 5.8. Termogramy DSC badanych materiałów: 1-(7-PA5%/M95%/W0,4), 2-(8-PA10%/M90%/W0,4), 3-(9-PA15%/M85%/W0,4), 4-(PA6) - a) pierwsze ogrzewanie, b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(10-PA5%/M95%/W0,6), 2-(11-PA10%/M90%/W0,6), 3-(12-PA15%/M85%/W0,6), 4-(PA6) - d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie ogrzewanie

Wartości temperatury zeszklenia dla próbek różnią się znacząco. Najniższą wartość temperatury zeszklenia odnotowano dla kompozytów z większą zawartością osnowy polimerowej. Dla próbek 7-PA5%/M95%/W0,4 i PA6 zarejestrowano wyższe wartości temperatury zeszklenia. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że próbki kompozytowe wykazują różnorodność w wartościach temperatury topnienia oraz temperatury zeszklenia, co wskazuje na różnice w stabilności termicznej i strukturze próbek. Najwyższe wartości temperatury zeszklenia odnotowano dla próbek 7-PA5%/M95%/W0,4 i PA6, co wskazuje na ich większą stabilność termiczną w fazie szklistej.

Tab. 5.2. Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm i frakcji 0,4-0,6 mm

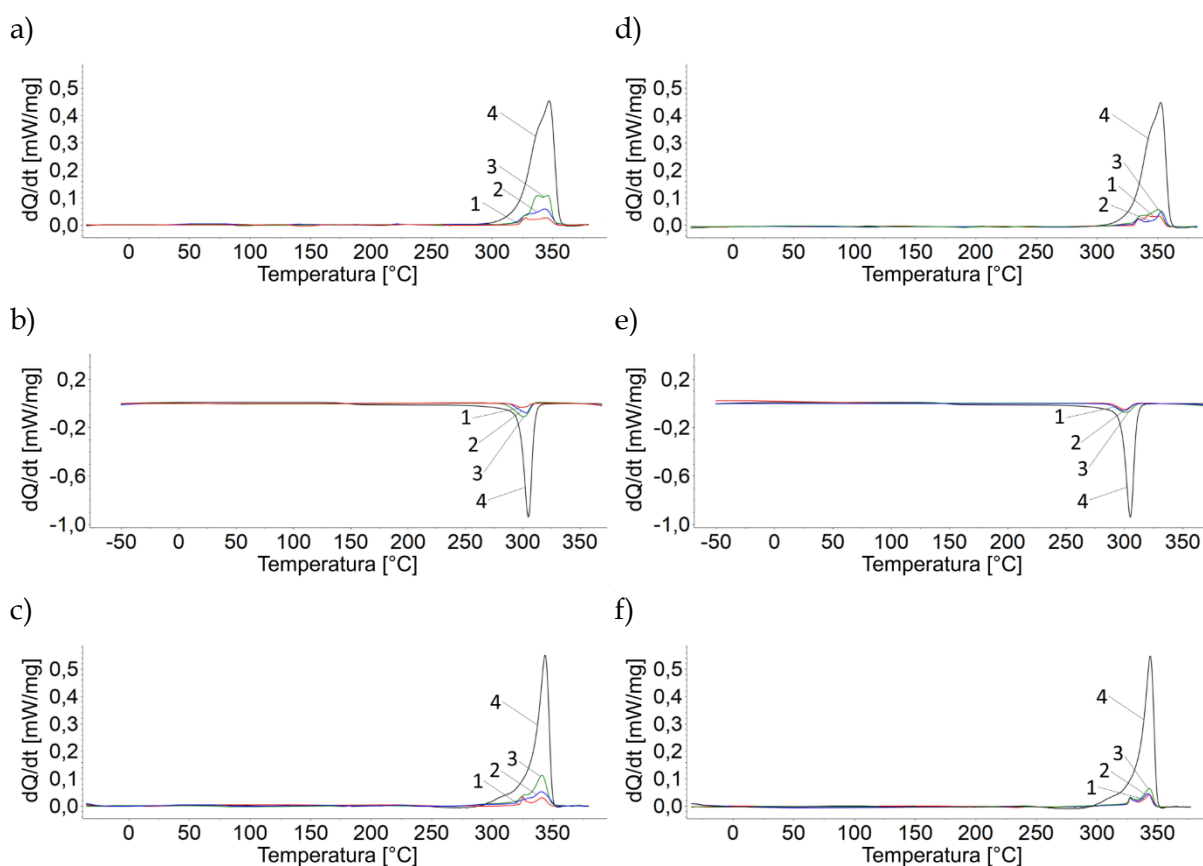
Pierwsze ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
7-PA5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	223,5	217,0 ÷ 225,9	12,46	5,96	95,2
8-PA10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	222,9	218,7 ÷ 225,6	12,96	6,82	80,1
9-PA15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	224,3	218,5 ÷ 226,5	17,62	9,27	62,9
10-PA5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	219,7	218,4 ÷ 224,5	13,32	7,01	81,5
11-PA10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	223,3	219,9 ÷ 225,5	12,02	6,33	67,8
12-PA15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	223,2	219,8 ÷ 226,0	12,58	6,62	60,4
PA6		223,4	212,6 ÷ 226,2	18,92	10,44	81,2

Chłodzenie					
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. krystalizacji, maks. refleksu	Zakres temp. krystalizacji	Entalpia krystalizacji	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[°C]
7-PA5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	187,4	178,1 ÷ 193,3	6,638	73,9
8-PA10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	188,6	183,7 ÷ 192,7	9,972	72,2
9-PA15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	189,0	182,8 ÷ 193,0	15,46	70,5
10-PA5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	187,8	182,2 ÷ 192,0	10,49	77,8
11-PA10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	189,8	185,3 ÷ 193,1	10,26	73,5
12-PA15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	190,2	186,1 ÷ 192,8	9,096	50,4
PA6		187,4	173,4 ÷ 193,3	20,32	60,7

Drugie ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
7-PA5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	222,1	211,7 ÷ 225,4	8,106	4,27	94,7
8-PA10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	221,1	208,4 ÷ 224,3	11,62	6,11	83,0
9-PA15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	221,9	213,0 ÷ 224,9	16,62	8,75	53,8
10-PA5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	220,4	212,9 ÷ 223,9	11,67	6,14	81,4
11-PA10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	221,1	209,3 ÷ 224,2	11,87	6,25	71,4
12-PA15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	221,4	209,5 ÷ 224,2	10,71	5,64	55,0
PA6		225,5	220,6 ÷ 228,2	20,88	10,99	79,4

Analiza wyników badań wyprasek kompozytowych na osnowie z PEEK, z napełniaczem w postaci wiórów mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm (rys 5.9.a, b, c) i 0,4-0,6 mm (rys 5.9.d, e, f) oraz wyników badań zebranych w tabeli (tab. 5.3.) wskazuje, że wartości temperatury topnienia dla wszystkich próbek w pierwszym

oraz drugim ogrzewaniu są zbliżone i mieszczą się w przedziale 325,3 – 348,5 °C. Najwyższą wartość temperatury topnienia odnotowano dla próbki PEEK w pierwszym ogrzewaniu (348,5 °C). W przypadku chłodzenia, wartości maksimum refleksu są niższe i wynoszą od 299,5 °C do 305,2 °C, co wskazuje na różnice w procesie krystalizacji przy chłodzeniu. Zarejestrowano zróżnicowanie w zakresie temperatury topnienia, zakresie topnienia fazy krystalicznej oraz temperaturze zeszklenia, co wskazuje na istotne różnice w stabilności termicznej oraz strukturze wewnętrznej. Dla próbki 1'-PEEK5%/M95%/W0,4 zarejestrowano wyższą wartość temperatury zeszklenia w pierwszym ogrzewaniu (174,2 °C). Najniższą wartość temperatury zeszklenia odnotowano dla próbki 6'-PEEK15%/M85%/W0,6 w drugim ogrzewaniu (118,5 °C), co wskazuje, na niższą stabilność termiczną w fazie szklistej.



Rys. 5.9. Termogramy DSC badanych materiałów: 1-(1'-PEEK5%/M95%/W0,4), 2-(2'-PEEK10%/M90%/W0,4), 3-(3'-PEEK15%/M85%/W0,4), 4-(PA6) – a) pierwsze ogrzewanie, b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(4'-PEEK5%/M95%/W0,6), 2-(5'-PEEK10%/M90%/W0,6), 3-(6'-PEEK15%/M85%/W0,6), 4-(PA6), – d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie ogrzewanie

Tab. 5.3. Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i frakcji 0,4–0,6 mm

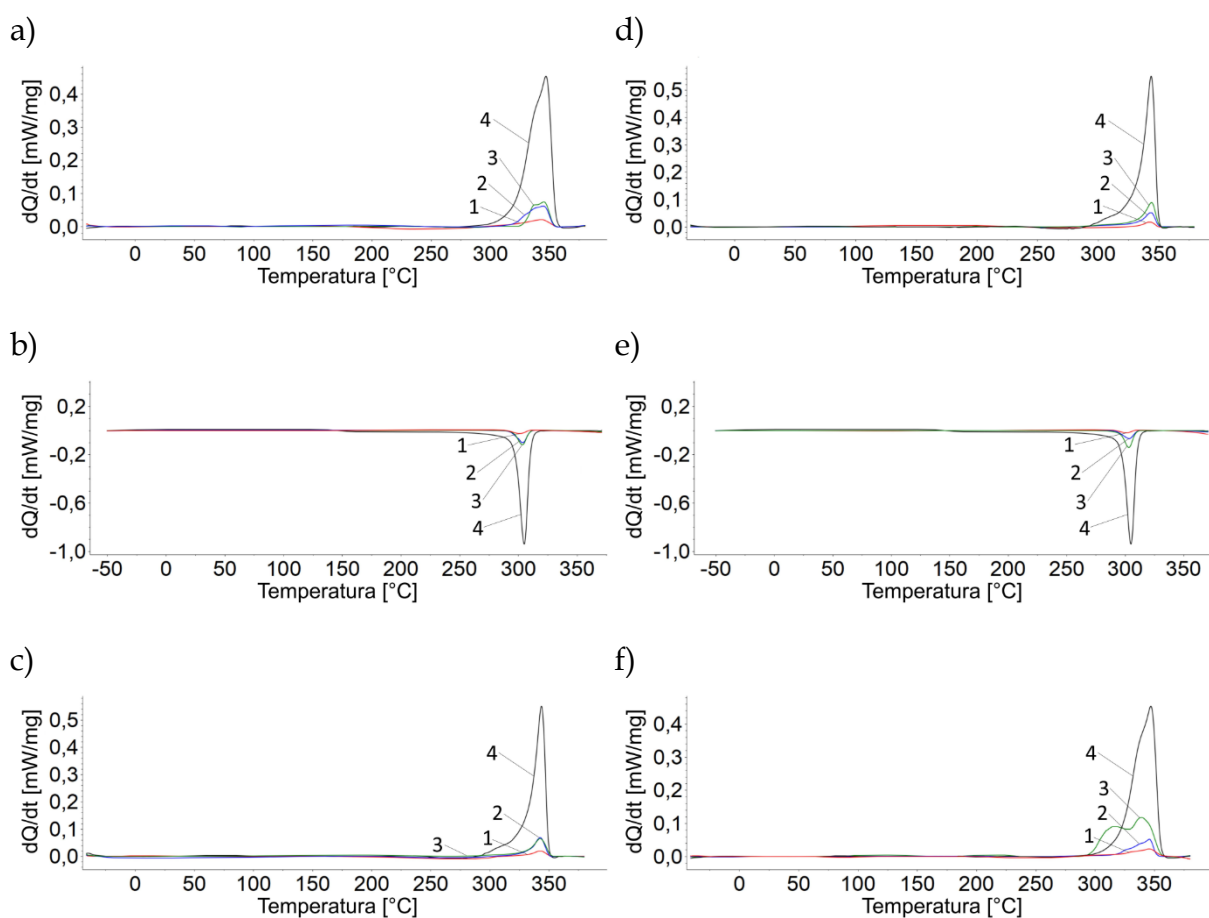
Pierwsze ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	326,3	326,3 ÷ 324,0	3,715	2,86	174,2
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	345,0	324,3 ÷ 351,9	7,757	5,97	155,6
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	337,7	324,0 ÷ 350,4	13,24	10,18	146,7
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	335,6	324,7 ÷ 352,5	5,205	4,00	156,4
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	348,1	324,7 ÷ 352,4	6,039	4,65	136
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	346,5	323,3 ÷ 351,2	9,100	7,00	128,4
PEEK		348,5	321,7 ÷ 354,1	61,28	47,14	152,7

Chłodzenie					
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. krystalizacji, maks. refleksu	Zakres temp. krystalizacji	Entalpia krystalizacji	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[°C]
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	299,5	286,0 ÷ 307,9	3,136	141,7
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	303,2	296,9 ÷ 308,7	6,069	168
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	300,7	286,6 ÷ 309,2	9,345	153,4
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	300,4	288,9 ÷ 309,8	2,82	140
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	300,2	285,3 ÷ 308,5	4,267	142,9
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	301,9	287,8 ÷ 309,7	6,826	137,4
PEEK		305,2	297,5 ÷ 310,6	60,03	152,8

Drugie ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	325,3	325,3 ÷ 324,1	3,155	2,43	162,2
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	343,4	324,2 ÷ 348,3	5,435	4,18	153,7
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	342,0	325,9 ÷ 347,3	12,44	9,57	150,3
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	325,9	324,7 ÷ 348,4	4,479	3,45	141,2
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	325,4	324,2 ÷ 347,5	5,855	4,50	138
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	343,4	324,1 ÷ 348,0	7,521	5,79	118,5
PEEK		343,8	333,9 ÷ 349,3	49,254	37,87	152,8

Na podstawie analizy termogramów kompozytów wykonanych z wiórów aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm (rys 5.10.a, b, c) i 0,8–1,18 mm (rys 5.10.d, e, f) oraz wyników badań zebranych w tabeli (tab. 5.4.) stwierdzono, że wartości temperatury topnienia - maksimum refleksu dla wszystkich próbek w pierwszym i drugim ogrzewaniu są zbliżone, mieszczą się w przedziale 338,3 – 348,5 °C. W przypadku

chłodzenia zarejestrowano niższe wartości temperatury krystalizacji dla kompozytów, co wskazuje na różnice w procesie krystalizacji przy chłodzeniu. Dla próbki 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18 zarejestrowano wysoką wartość entalpii topnienia w pierwszym ogrzewaniu (31,87 J/g), co wskazuje na znaczny rozrost fazy krystalicznej, a w konsekwencji zmiany właściwości mechanicznych kompozytu. Najniższą wartość temperatury zeszklenia odnotowano dla próbki 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18 podczas chłodzenia (116,2 °C), a najwyższą podczas chłodzenia dla 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 (163,9 °C).



Rys. 5.10. Termogramy DSC badanych materiałów: 1-(7'-PEEK5%/Al95%/W0,8), 2-(8'-PEEK10%/Al90%/W0,8), 3-(9'-PEEK15%/Al85%/W0,8), 4-(PA6) - a) pierwsze ogrzewanie, b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(10'-PEEK5%/Al95%/W1,18), 2-(11'-PEEK10%/Al90%/W1,18), 3-(12'-PEEK15%/Al85%/W1,18), 4-(PA6) - d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie ogrzewanie

Tab. 5.4. Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i frakcji 0,8–1,18 mm

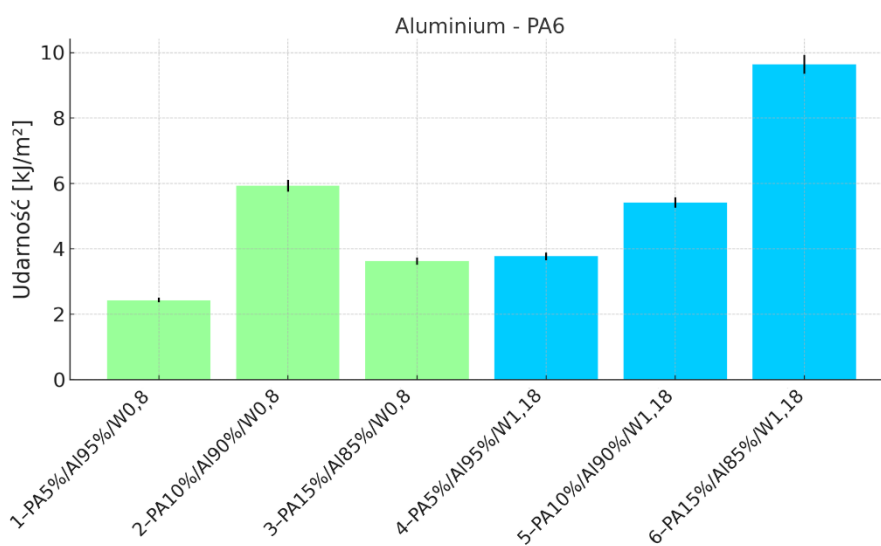
Pierwsze ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	348,4	348,4 ÷ 307,9	4,513	3,47	155,4
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	345,7	342,0 ÷ 352,7	12,00	9,23	141,2
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	346,6	339,0 ÷ 353,3	7,813	6,01	130,5
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	346,2	321,1 ÷ 356,7	3,962	3,05	148,1
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	347,3	336,3 ÷ 350,1	7,055	5,43	127,9
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	338,3	304,4 ÷ 355,3	31,87	24,51	139,5
PEEK		348,5	321,7 ÷ 354,1	61,28	47,14	152,7

Chłodzenie					
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. krystalizacji, maks. refleksu	Zakres temp. krystalizacji	Entalpia krystalizacji	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[°C]
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	301,1	288,1 ÷ 309,1	0,349	152,3
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	304,4	300,8 ÷ 306,7	4,734	159,6
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	303,8	295,6 ÷ 309,7	6,214	163,9
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	301,2	289,1 ÷ 308,8	0,7226	128,6
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	303,4	292,2 ÷ 310,3	4,105	142,7
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	303,6	296,3 ÷ 309,0	7,748	116,2
PEEK		305,2	297,5 ÷ 310,6	60,03	152,8

Drugie ogrzewanie						
Nr próbki	Frakcja wióra	Temp. topnienia maks. refleksu	Zakres temp. topnienia fazy krystalicznej	Entalpia topnienia	Stopień krystaliczności	Temp. zeszklenia
	[mm]	[°C]	[°C]	[J/g]	[%]	[°C]
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	341,1	302,8 ÷ 347,4	3,594	2,76	153,7
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	342,6	338,1 ÷ 345,0	5,995	4,58	162,6
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	344,2	331,2 ÷ 349,1	7,128	5,48	148,7
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	342,7	331,1 ÷ 347,8	1,415	1,09	140,9
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	343,1	334,6 ÷ 347,9	4,216	3,24	135,6
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	344,6	333,0 ÷ 349,8	7,653	5,89	135,7
PEEK		343,8	333,9 ÷ 349,3	49,254	37,87	152,8

5.3. Badania twardości i udarności wyprasek kompozytowych

Celem badania było zweryfikowanie wpływu zawartości tworzyw PA6 i PEEK w kompozycie na udarność kompozytów z napełniaczem w postaci wiórów aluminium i mosiądzu o różnych frakcjach. Analizę przeprowadzono w celu określenia składu wskazującego na korzystne parametry twardości i udarności pod kątem procesu obróbki skrawaniem. Na podstawie badań zarejestrowano wartości udarności a_k [kJ/m²], które w formie wykresów słupkowych przedstawiono na rysunkach 5.11-5.14. Dla kompozytów z napełniaczem w postaci wiórów aluminium i PA6 (rys. 5.11.) o wyższej zawartości procentowej osnowy jak w próbkach 2-PA10%/Al90%/W0,8, 5-PA10%/Al90%/W1,18 i 6-PA15%/Al85%/W1,18 uzyskano wyższą udarność w porównaniu do próbek o niższej zawartości tworzywa. Dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18 o frakcji wióra 0,8-1,18 mm zarejestrowano najwyższą wartość udarności a_k wynoszącą 9,6 kJ/m².

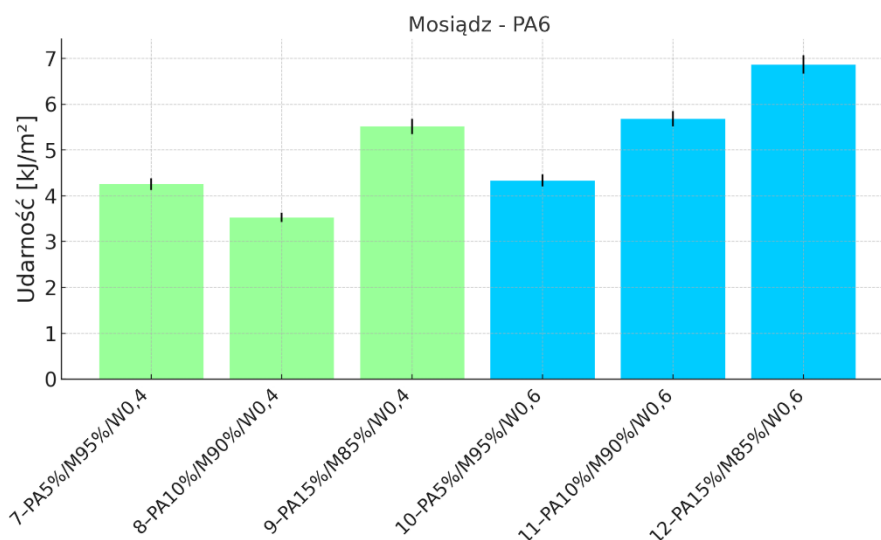


Rys. 5.11. Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PA6 z wiórami aluminium (kolor zielony określa frakcję wióra 0,6-0,8 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,8-1,18 mm)

Wzrost zawartości PA6 w kompozycie z aluminium znacząco poprawia zdolność materiału do absorpcji energii uderzenia. Ważnym wynikiem badania jest informacja, że wzrost zawartości PA6 nie zawsze prowadził do liniowego wzrostu udarności. Dla próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8 o frakcji wióra 0,6-0,8 mm

zarejestrowano niższą wartość udarności niż dla próbki 2-PA10%/Al90%/W0,8, co może sugerować, że istnieje optymalna proporcja PA6 w kompozycie, po której dalsze zwiększanie zawartości polimeru nie przynosi dalszych korzyści.

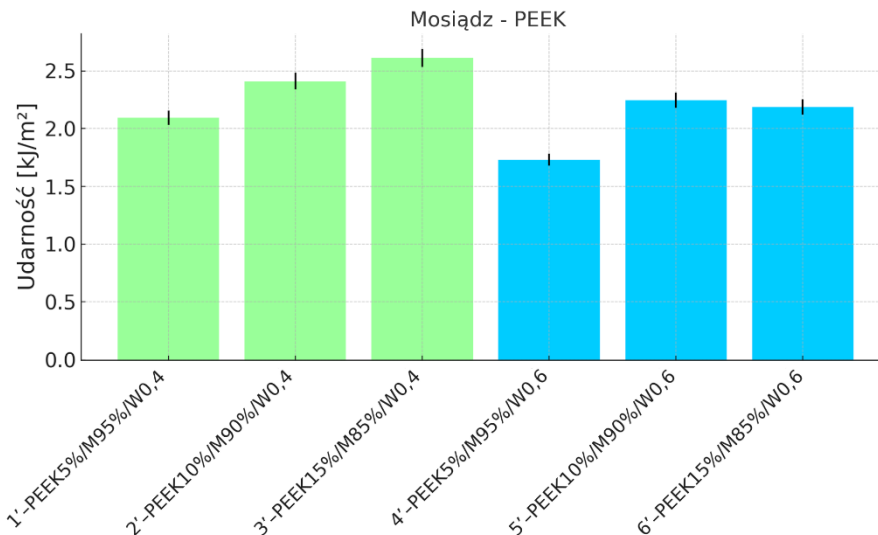
Wyniki badań dla kompozytu PA6 z wiórami mosiądzu wskazują na podobny trend jak w przypadku aluminium, jednak wartości udarności są niższe. Analiza wyników (rys. 5.12.) wykazała, że próbki 10-PA5%/M95%/W0,6, 11-PA10%/M90%/W0,6, 12-PA15%/M85%/W0,6 o frakcji wióra 0,4–0,6 mm wykazują odpowiednio wyższe wartości udarności od próbek z mniejszym wiórem. Dla próbki 12-PA15%/M85%/W0,6 uzyskano najwyższą wartość udarności 6,9 kJ/m².



Rys. 5.12. Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PA6 z wiórami mosiądzu (kolor zielony określa frakcję wióra 0,2–0,4 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,4–0,6 mm)

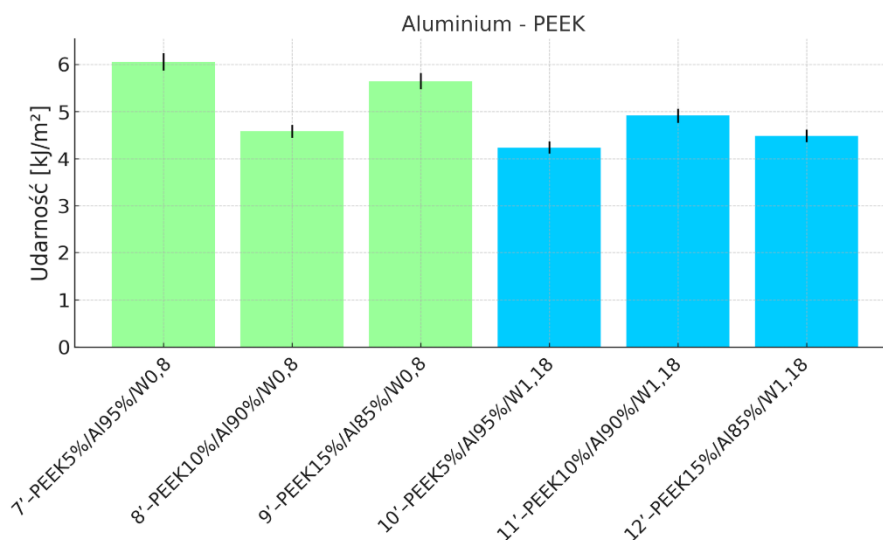
Połączenie tworzywa PEEK z mosiądzem nie przyniosło tak wyraźnych korzyści jak w przypadku PA6. Maksymalna wartość udarności wyniosła 2,6 kJ/m² dla próbki 3'-PEEK15%/M85%/W0,4 (rys. 5.13.).

Niskie wartości udarności mogą wynikać z ograniczonej zdolności PEEK do efektywnego łączenia się z wiórami o małej frakcji, co ogranicza zdolność do rozpraszania energii uderzenia. Dodatkowo, wyższa sztywność tworzywa PEEK może prowadzić do bardziej kruchych właściwości materiału kompozytowego, co tłumaczy niższe wyniki udarności.



Rys. 5.13. Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PEEK z wiórami z mosiądzu (kolor zielony określa frakcję wióra 0,2-0,4 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,4-0,6 mm)

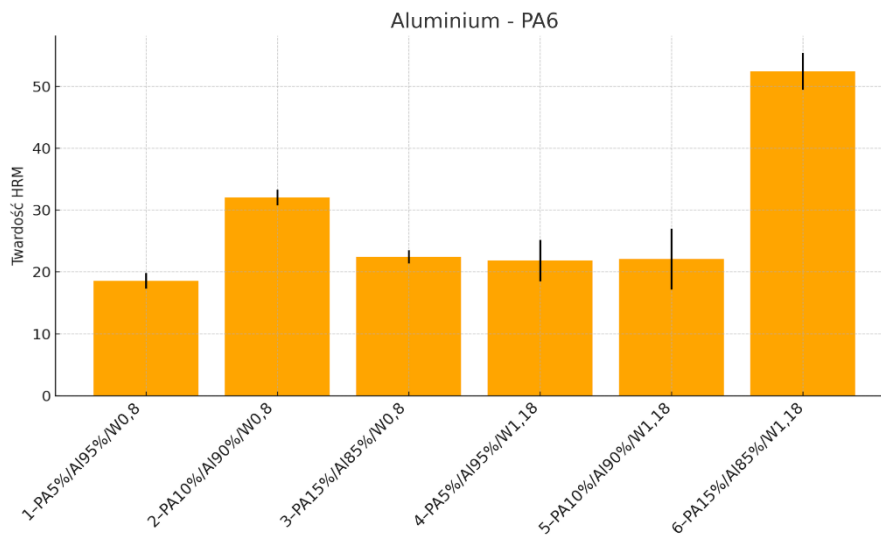
W grupie kompozytów aluminium – PEEK (rys. 5.14.) najwyższą wartość udarności uzyskano dla próbki 7'-PEEK5%/Al95%/W0.8 – 6,1 kJ/m². Wartości udarności są ogólnie wyższe niż w przypadku połączenia mosiądzu z PEEK.



Rys. 5.14. Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PEEK z aluminium (kolor zielony określa frakcję wióra 0,6-0,8 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,8-1,18 mm)

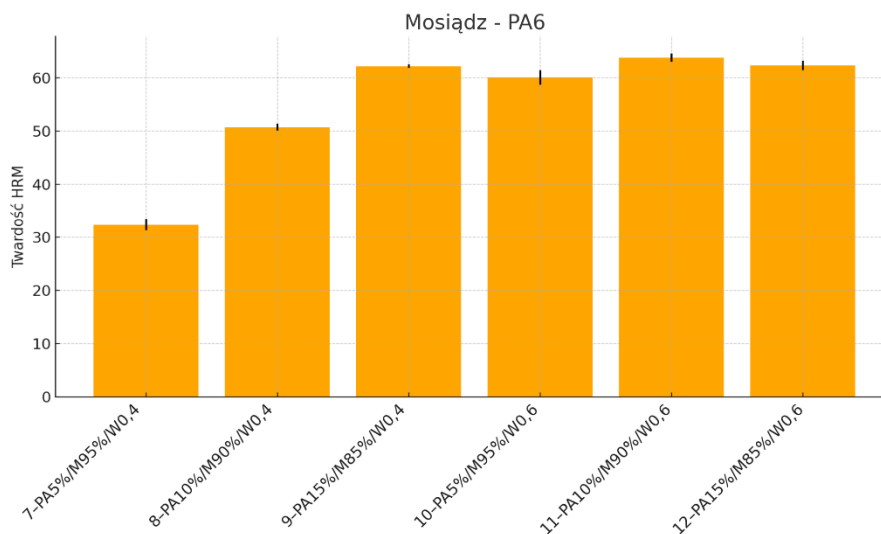
Z uzyskanych danych wynika, że twardość materiałów kompozytowych zmienia się w zależności od zawartości polimeru. Próbki kompozytu PA6 z wiórami

aluminium (rys. 5.15.) wykazują zróżnicowaną wartość twardości, która waha się od 18,55 do 52,46 HRM. Najwyższe wartości twardości obserwuje się dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18.



Rys. 5.15. Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PA6 z wiórami aluminium

Dla próbek kompozytów PA6 z wiórami mosiądzu zarejestrowano wyższe wartości twardości w porównaniu do aluminium (rys. 5.16.). Wartości twardości zarejestrowano od 32,32 do 63,78 HRM.



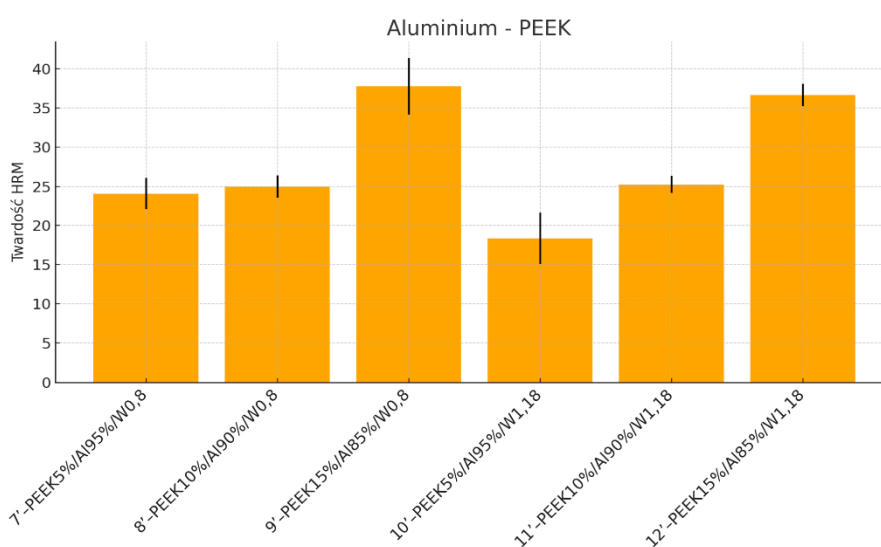
Rys. 5.16. Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PA6 z wiórami mosiądzu

Dla próbek kompozytowych wykonanych z wiórów mosiądzu i PEEK odnotowano najwyższe wartości twardości wśród wszystkich analizowanych kompozytów, od 48,27 do 72,43 HRM, co wskazuje, że polieteroeteroketon jest materiałem o bardzo wysokich parametrach pod względem twardości.



Rys. 5.17. Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PEEK z wiórami mosiądzu

Analiza wyników dla próbek z grupy kompozytów aluminium z PEEK (rys. 5.18.) wykazuje zmiany wartości twardości od 18,37 do 37,78 HRM, a najniższą wartość zarejestrowano dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18.



Rys. 5.18. Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PEEK z wiórami aluminium

Badania potwierdzają, że istnieje odpowiedni stosunek zawartości osnowy polimerowej w kompozycie w stosunku do napełniacza z uwzględnieniem frakcji wiórów metalicznych, który maksymalizuje uzyskanie korzystnych parametrów udarności i twardości. Dalsze zwiększanie zawartości polimerów nie zawsze prowadzi do poprawy właściwości mechanicznych.

Zastosowanie tworzywa PA6 potwierdza większą efektywność w poprawie udarności kompozytów niż PEEK, co czyni ten materiał bardziej odpowiednim do zastosowań wymagających wysokiej absorpcji energii.

Wzrost twardości jest generalnie skorelowany ze wzrostem udarności, co wskazuje na silną zależność między tymi właściwościami mechanicznymi w badanych kompozytach oraz wpływa na proces obróbki skrawaniem.

5.4. Wnioski

Badania DMTA wykazały, że próbki z wyższą zawartością polimeru (np. 15% PA6 lub PEEK) charakteryzują się niższymi wartościami modułu zachowawczego w porównaniu do próbek o niższej zawartości tworzywa. Wynika to z faktu, że większa ilość polimeru prowadzi do większej elastyczności materiału, a tym samym zmniejszenia jego sztywności.

Próbki z niższą zawartością polimeru (5% PA6 lub PEEK) wykazywały wyższe wartości modułu E' , co wskazuje na większą sztywność i jest wynikiem większego udziału wiórów metalicznych.

Fracja wiórów również ma istotny wpływ na moduł zachowawczy. Dla próbek z mniejszą frakcją wiórów (np. 0,2–0,4 mm dla mosiądzu, 0,6–0,8 mm dla aluminium) rejestrowano wyższe wartości modułu zachowawczego, co wskazuje na to, że drobniejsze wióry lepiej dyspergują w matrycy polimerowej, co prowadzi do większej sztywności kompozytu.

Z kolei dla próbek z większą frakcją wiórów (np. 0,4–0,6 mm dla mosiądzu, 0,8–1,18 mm dla aluminium) odnotowano niższe wartości modułu E' , co może być wynikiem mniejszej efektywności wypełnienia przestrzeni przez polimer pomiędzy

większymi wiórami. Większe wióry mogą tworzyć obszary lokalnej koncentracji naprężeń, co może prowadzić do zmniejszenia ogólnej sztywności materiału.

Tangens kąta stratności mechanicznej ($\tan \delta$) odzwierciedla zdolność materiału do rozpraszania energii mechanicznej, co jest związane z jego właściwościami tłumienia i przejściami fazowymi. W badaniach DMTA obserwowano, że próbki z wyższą zawartością polimeru wykazywały wyższe wartości $\tan \delta$, co wskazuje na to, że te kompozyty mają większą zdolność do rozpraszania energii. Wyższe wartości $\tan \delta$ wskazują również na bardziej rozszerzone przejścia fazowe, takie jak przejście ze stanu szklistego do wysokoelestrycznego.

Fracja wiórów również wpływa na wartości $\tan \delta$. Próbki z mniejszą frakcją wiórów wykazywały wyższe wartości $\tan \delta$, co może wskazywać na lepsze rozproszenie wiórów w matrycy polimerowej i bardziej złożoną dynamikę wewnętrzną. W próbkach z większą frakcją wiórów wartości $\tan \delta$ były niższe, co wskazuje na to, że większe wióry mogą tworzyć bardziej jednorodne obszary w kompozycie, co z kolei prowadzi do zmniejszenia zdolności materiału do tłumienia energii mechanicznej.

Wyniki badań wykazały, że wartość temperatury zeszklenia zależy zarówno od zawartości polimeru, jak i frakcji wiórów. Niższa zawartość polimeru oraz większa frakcja wiórów prowadziły do wyższej T_g , co wskazuje na większą sztywność materiału i ograniczoną ruchliwość łańcuchów polimerowych. Wyższa zawartość polimeru i mniejsza frakcja wiórów obniżały T_g , co jest związane z większą elastycznością i wyższą ruchliwością segmentów łańcuchów polimerowych.

Badania DMTA potwierdziły, że zarówno zawartość polimeru, jak i frakcja wiórów mają istotny wpływ na właściwości mechaniczne kompozytów. Wyższa zawartość polimeru sprzyja zwiększeniu elastyczności materiału i jego zdolności do rozpraszania energii, co jest szczególnie widoczne w przebiegu krzywej i wartościach $\tan \delta$. Mniejsza frakcja wiórów prowadzi do wyższej sztywności i większych strat mechanicznych, co wskazuje na bardziej złożoną dynamikę wewnętrzną materiału.

Badania przeprowadzone metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) na kompozytach polimerowych zawierających PA6 oraz PEEK z dodatkiem wiórów

aluminium i mosiądzu dostarczyły również istotnych informacji na temat wpływu zawartości polimeru oraz frakcji wiórów na właściwości termiczne i strukturalne tych materiałów.

Entalpia topnienia oraz stopień krystaliczności są bezpośrednio związane z uporządkowaniem struktury krystalicznej osnowy w kompozytach. Wyniki wykazały, że próbki z wyższą zawartością polimeru (np. 15% PA6 lub PEEK) oraz mniejszą frakcją wiórów charakteryzowały się wyższą entalpią topnienia i wyższym stopniem krystaliczności. Oznacza to, że w tych próbkach formują się bardziej rozległe i uporządkowane obszary krystaliczne, co przekłada się na lepsze właściwości mechaniczne i wyższą stabilność termiczną.

Wzrost frakcji wiórów (np. z 0,6–0,8 mm do 0,8–1,18 mm w przypadku aluminium) prowadził do zmniejszenia entalpii topnienia i stopnia krystaliczności, co wskazuje, że większe wióry mogą ograniczać zdolność polimeru do tworzenia uporządkowanych struktur krystalicznych. W efekcie, kompozyty z większą frakcją wiórów wykazywały bardziej amorficzną strukturę, co mogło wpływać na ich właściwości mechaniczne, czyniąc je mniej wytrzymałymi.

Temperatura zeszklenia jest kluczowym parametrem, który określa, w jakiej temperaturze materiał przechodzi z fazy szklistej do fazy wysokoelastycznej, co ma bezpośredni wpływ na jego elastyczność i ruchliwość łańcuchów polimerowych. W badanych kompozytach zauważono, że wyższa zawartość wiórów prowadziła do obniżenia temperatury zeszklenia. Niższa wartość temperatury zeszklenia w próbkach z większą ilością wiórów może wskazywać na zwiększony wpływ napelnacza na ograniczenie ruchliwości łańcuchów polimerowych.

Wyniki badań wskazują, że zarówno zawartość polimeru, jak i frakcja wiórów mają istotny wpływ na właściwości termiczne i strukturalne kompozytów. Wyższa zawartość polimeru sprzyja formowaniu bardziej uporządkowanych struktur krystalicznych, co przekłada się na wyższy stopień krystaliczności i entalpię topnienia. Z kolei większa frakcja wiórów może ograniczać te właściwości, prowadząc do bardziej amorficznej struktury i niższej temperatury zeszklenia.

Badania wytrzymałościowe wskazują na istnienie zależności między zawartością polimerów w kompozycie, a frakcją wiórów metalicznych, których

odpowiedni dobór może maksymalizować korzystne parametry udarności i twardości wpływając tym samym na proces obróbki skrawaniem kompozytów. Dalsze zwiększanie zawartości polimerów w kompozycie nie zawsze skutkuje poprawą właściwości mechanicznych. Zastosowanie do wytworzenia kompozytów z napełniaczem w postaci wiórów metalicznych tworzywa PA6 okazało się bardziej efektywne w podwyższeniu wartości udarności kompozytów w porównaniu do PEEK, co sprawia, że PA6 jest odpowiednim jako osnowa dla wytworzonych kompozytów do zastosowań wymagających wysokiej absorpcji energii.

6. Analiza powierzchni po obróbce skrawaniem

6.1. Charakterystyka powierzchni kompozytów

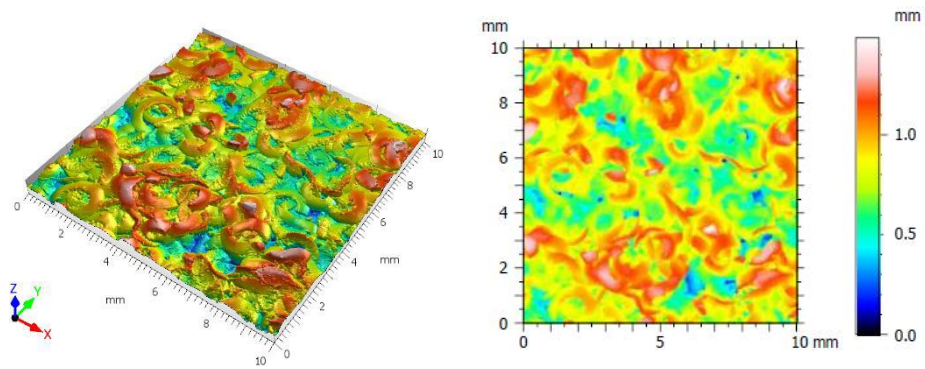
Stereometria powierzchni stanowi istotny obszar badań w naukach inżynierskich, skupiający się na trójwymiarowej analizie topografii powierzchni. Dokładne poznanie geometrii powierzchni jest kluczowe dla zrozumienia jej właściwości funkcyjnych a uzyskane wyniki badań mają na celu pomóc w wyborze optymalnej powierzchni pod kątem zastosowań inżynierskich. Ukształtowanie struktury geometrycznej powierzchni jest rezultatem złożonych interakcji między metodą obróbki, jej parametrami i kinematyką. Stopień izotropowości struktury, wynikający z rozmieszczenia śladów obróbki, jest kluczowym czynnikiem determinującym właściwości funkcyjne powierzchni i jej zachowanie w różnych warunkach eksploatacyjnych. Różne techniki obróbki, takie jak frezowanie, toczenie, szlifowanie czy obróbka elektroerozyjna, prowadzą do powstania odmiennej struktury powierzchniowej. Każda z tych metod generuje charakterystyczne ślady obróbki wynikające z mechanizmu usuwania materiału oraz ruchu narzędzia względem powierzchni obrabianej. Parametry takie jak prędkość obróbki, posuw, głębokość skrawania oraz rodzaj i stan narzędzia wpływają na jakość powierzchni, oraz jej parametry amplitudowe chropowatości i funkcyjne. Optymalne parametry obróbki, takie jak posuw, głębokość skrawania i prędkość skrawania, mogą zminimalizować defekty powierzchniowe oraz poprawić właściwości materiału [120].

6.1.1. Topografia powierzchni kompozytu aluminium - PA6

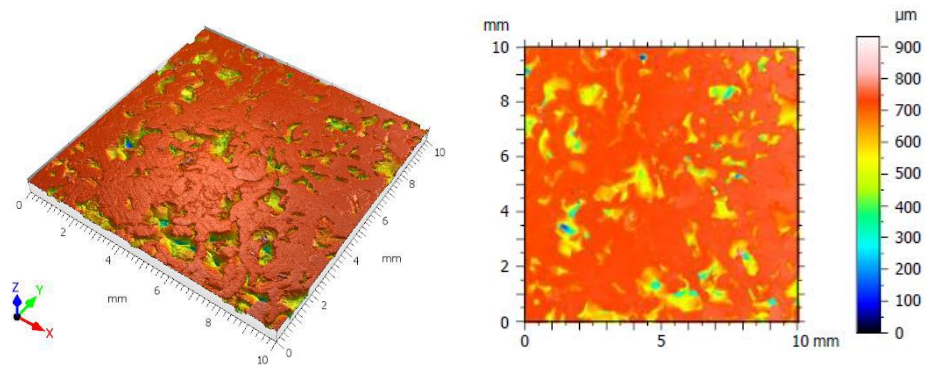
Badania powierzchni przeprowadzono dla kompozytów z poliamidu 6 oraz wiórów aluminium o frakcjach 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm. Celem badania było określenie wpływu frakcji wiórów aluminiowych oraz zawartości tworzywa PA6 w kompozycie na właściwości powierzchni materiału kompozytowego. Analizie poddano parametry amplitudowe i funkcyjne. Strategia pomiaru była realizowana poprzecznie do kierunku obróbki, co ma istotne znaczenie w interpretacji parametrów amplitudowych chropowatości. Obszar pomiaru obejmował fragment losowo wybrany na powierzchni o wymiarze 10 x 10 mm. Wyniki badań map konturowych

oraz obrazów izometrycznych powierzchni dla kompozytu przedstawiono na rysunku 5.10.

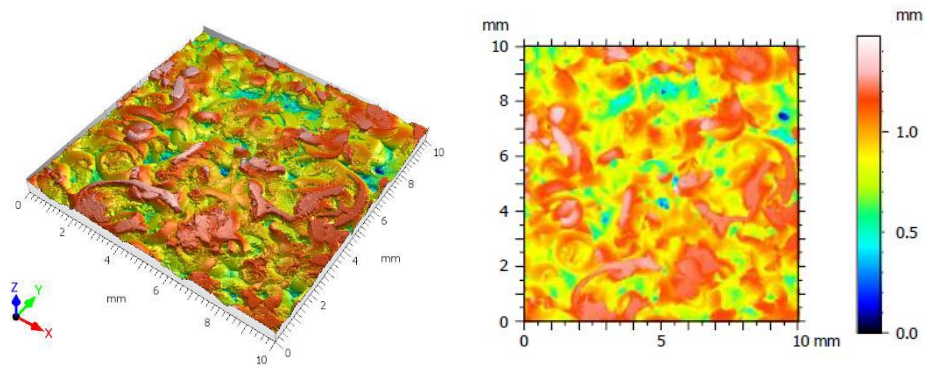
a)



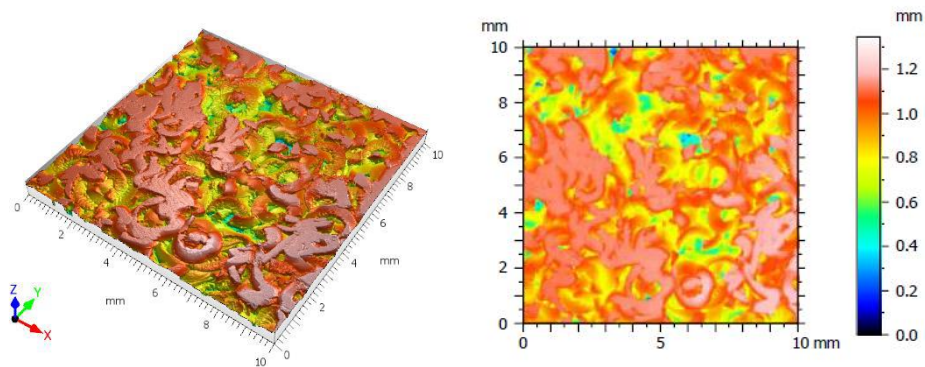
b)



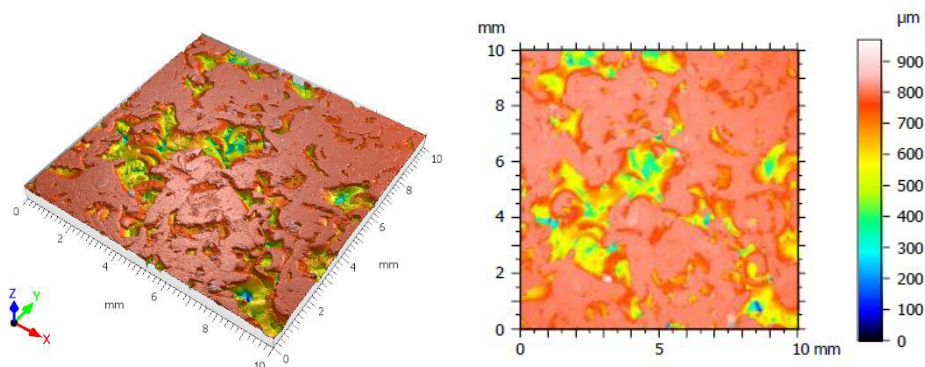
c)



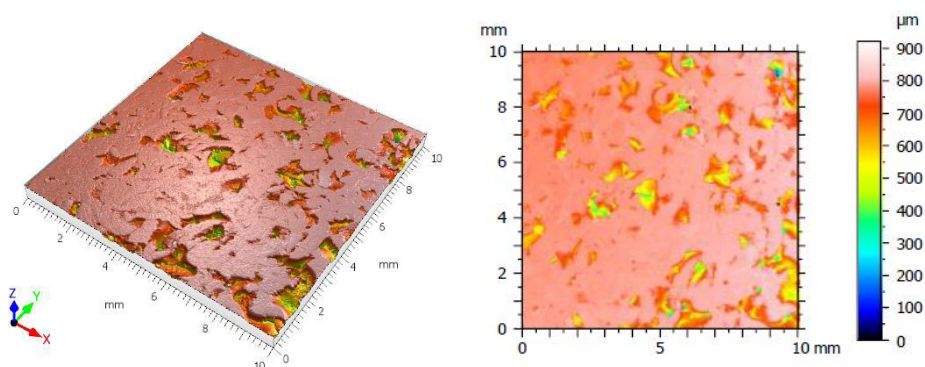
d)



e)



f)



Rys. 6.1. Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PA6 i wiórami aluminium: o frakcji 0,6–0,8 mm: a) 1-PA5%/Al95%/W0,8, b) 2-PA10%/Al90%/W0,8, c) 3-PA15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm: d) 4-PA5%/Al95%/W1,18, e) 5-PA10%/Al90%/W1,18, f) 6-PA15%/Al85%/W1,18

Wyniki pomiarów topografii przedstawiono w tabeli 6.1 Zestawiono wartości amplitudowe: średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej (R_a), średnia wysokość profilu chropowatości (R_z), średnie kwadratowe odchylenie powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_q), maksymalna wysokość szczytu profilu (S_p), maksymalna wysokość wgłębienia profilu (S_v), maksymalna wysokość profilu (S_z), średnia arytmetyczna wysokość odchylenia powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_a), współczynnik nachylenia powierzchni (S_{ku}) oraz współczynnik asymetrii powierzchni (S_{sk}).

W analizie wyników określenie parametru R_z stanowi bardziej precyzyjną metodę oceny lokalnych zmian chropowatości powierzchni w porównaniu do parametru R_a , który jest średnią arytmetyczną odchylenia profilu powierzchni od linii średniej. Parametr R_z określa odległość między pięcioma najwyższymi szczytami,

a pięcioma najniższymi dolinami w badanym odcinku profilu, co czyni go bardziej wrażliwym na ekstremalne wartości chropowatości. W przypadku powierzchni, na której występują znaczące lokalne nierówności, takie jak ostre szczyty lub głębokie doliny, parametr R_z uwzględnia skrajne wartości, odzwierciedlając ich wpływ na ogólną chropowatość powierzchni.

Tab. 6.1. Parametry chropowatości kompozytów z PA6 i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm

Nr próbki	R_a	R_z	S_q	S_p	S_v	S_z	S_a	S_{ku}	S_{sk}
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]		
1-PA5%/Al95%/W0,8	117,3	927,7	197,5	611,6	819,5	1431	159,9	2,855	-0,143
2-PA10%/Al90%/W0,8	44,69	354,2	71,52	229,0	709,4	938,4	46,74	15,16	-3,063
3-PA15%/Al85%/W0,8	134,6	1069	174,6	513,8	930,7	1444	139,8	3,265	-0,506
4-PA5%/Al95%/W1,18	95,99	458,3	148,7	321,0	961,2	1282	119,2	4,418	-1,136
5-PA10%/Al90%/W1,18	78,33	720,1	100,4	220,3	724,8	945,1	73,14	7,686	-2,047
6-PA15%/Al85%/W1,18	29,35	227,0	69,66	162,0	758,6	920,6	42,66	16,57	-3,255

Ujemne wartości współczynnika asymetrii powierzchni S_{sk} wskazują na przewagę dolin oraz świadczą o tym, że większa część materiału znajduje się w okolicach wierzchołków powierzchni. Należy zauważyć, że zużycie powierzchni prowadzi do zmniejszenia wartości współczynnika S_{sk} , który jest jednym z kluczowych parametrów, mających wpływ na redukcję chropowatości powierzchni.

W przypadku próbki 1-PA5%/Al95%/W0,8 o frakcji wióra z aluminium 0,6–0,8 mm wartość współczynnika asymetrii powierzchni S_{sk} bliska zeru sugeruje równomierne rozłożenie występujących pików i dolin, co może przekładać się na stabilną interakcję powierzchniową z innymi materiałami. Dla próbki odnotowano wartość $S_{ku} < 3$ co świadczy o braku na powierzchni wysokich pików lub głębokich dolin i wskazuje na platykurtyczny rozkład wysokości powierzchni. W tym przypadku mówimy o kurtozie ujemnej, której cechy mają mniejszą koncentrację niż przy rozkładzie normalnym. Dla badanej próbki zarejestrowano wysoką wartość chropowatości (R_z) i (R_a), co może wskazywać na powierzchnię o umiarkowanej wytrzymałości na zużycie.

Profil powierzchni dla próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8, której wartość kurtozy wynosiła 3,265 potwierdza umiarkowaną liczbę i głębokość dolin oraz umiarkowaną

wysokość szczytów. Taki profil jest pożądany, ponieważ zapewnia zrównoważone właściwości ślizgowe oraz zdolność do zatrzymywania smaru, co może poprawić trwałość i funkcjonalność powierzchni.

Dla pozostałych próbek współczynnik nachylenia powierzchni S_{ku} wynosił znacznie powyżej wartości 3 co potwierdza obecność na powierzchni ostrych i wysokich pików oraz głębokich dolin. W badaniach odnotowano znacznie podwyższoną wartość wskaźnika S_{ku} dla próbek 2-PA10%/Al90%/W0,8, 5-PA10%/Al90%/W1,18, 6-PA15%/Al85%/W1,18.

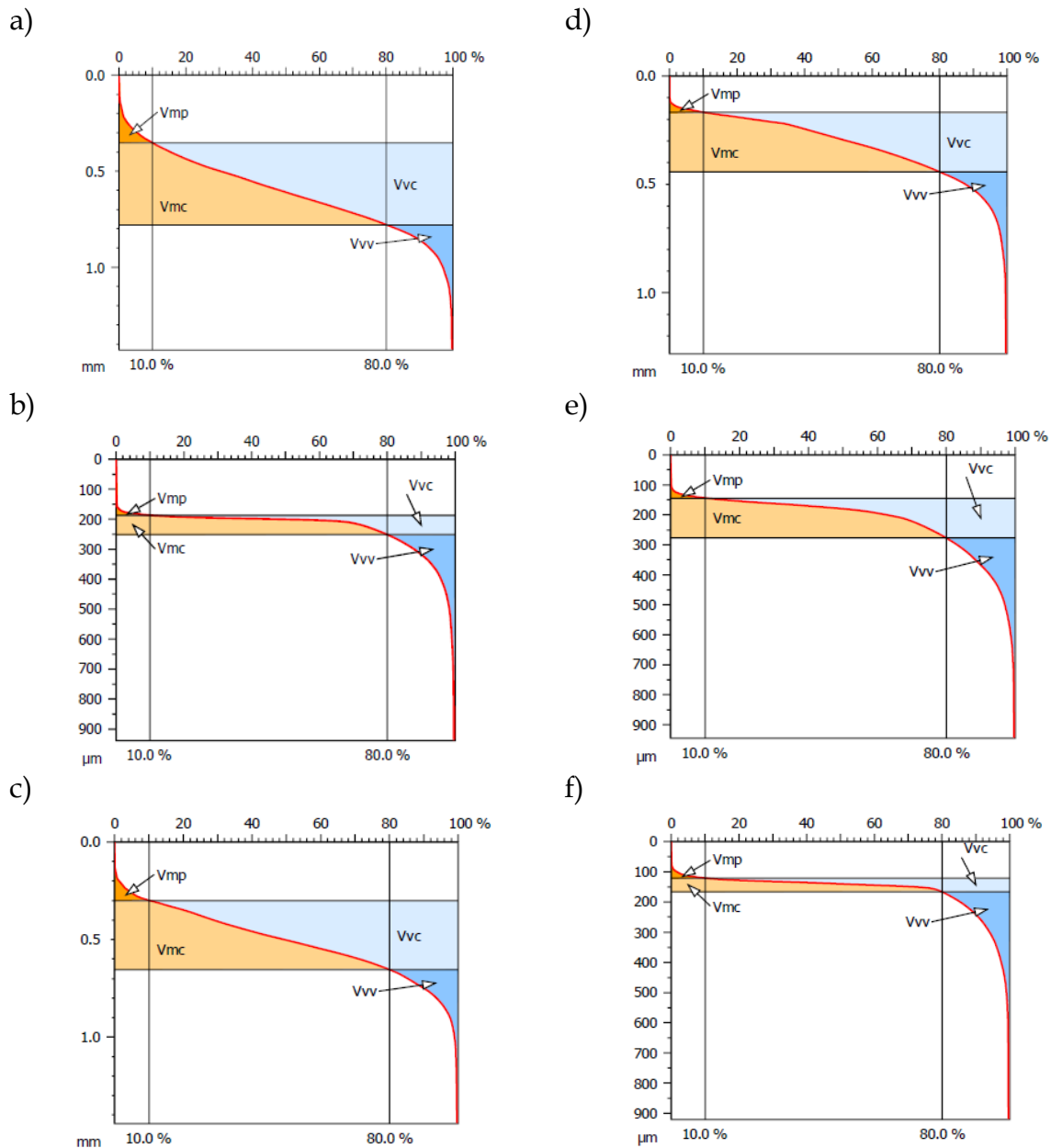
Uzyskane dodatkowo wartości kurtozy dla wyprasek kompozytowych wskazują, że niezależnie od asymetrii powierzchni, próbki charakteryzują się leptokurtycznym rozkładem. Oznacza to, że cechy powierzchni mają większą koncentrację niż w porównaniu do rozkładu normalnego, co sugeruje wyższe prawdopodobieństwo wystąpienia wartości odstających.

Podsumowując, wyniki badań dla tej grupy materiałów potwierdzają, że zarówno frakcja wiórów aluminium, jak i zawartość poliamidu 6 mają znaczący wpływ na chropowatość powierzchni kompozytów. Dla próbek z wiórami o frakcji 0,6–0,8 mm zwiększenie zawartości tworzywa z 5% do 10% zmniejsza chropowatość powierzchni, co sugeruje, że dodatek większej ilości poliamidu poprawia homogenizację i redukuje nierówności powierzchni. Natomiast zwiększenie zawartości tworzywa do 15% powoduje ponowny wzrost chropowatości, co może być związane z tworzeniem się bardziej złożonych struktur powierzchniowych lub aglomeratów poliamidu, które zwiększają nierówności.

W przypadku próbek z wiórami o frakcji 0,8–1,18 mm zwiększenie zawartości PA6 z 5% do 10% redukuje wartość R_a , natomiast R_z nie zmienia się w sposób liniowy, co wskazuje na to, że większa ilość poliamidu przy większym wiórze może tworzyć bardziej jednolitą powierzchnię, choć mogą się pojawiać głębsze doliny. Zwiększenie frakcji wypełniacza powoduje dalsze wygładzenie powierzchni (spadek R_a i R_z), co może wynikać z lepszej integracji i położenia względem siebie wiórów i homogenizacją struktury powierzchni.

W dalszej części analizy badanych próbek określono parametry funkcyjne wynikające z krzywej udziału materiałowego. Funkcyjną charakterystykę

powierzchni przedstawiono na rysunku 6.2 i określono za pomocą czterech kluczowych parametrów: objętości piku materiału (V_{mp}), objętości rdzenia materiału (V_{mc}), objętości rdzenia pustej przestrzeni (V_{vc}) oraz objętości pustej przestrzeni wgłębienia (V_{vv}).



Rys. 6.2. Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiarami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm: a) 1-PA5%/Al95%/W0,8, b) 2-PA10%/Al90%/W0,8, c) 3-PA15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm: d) 4-PA5%/Al95%/W1,18, e) 5-PA10%/Al90%/W1,18, f) 6-PA15%/Al85%/W1,18

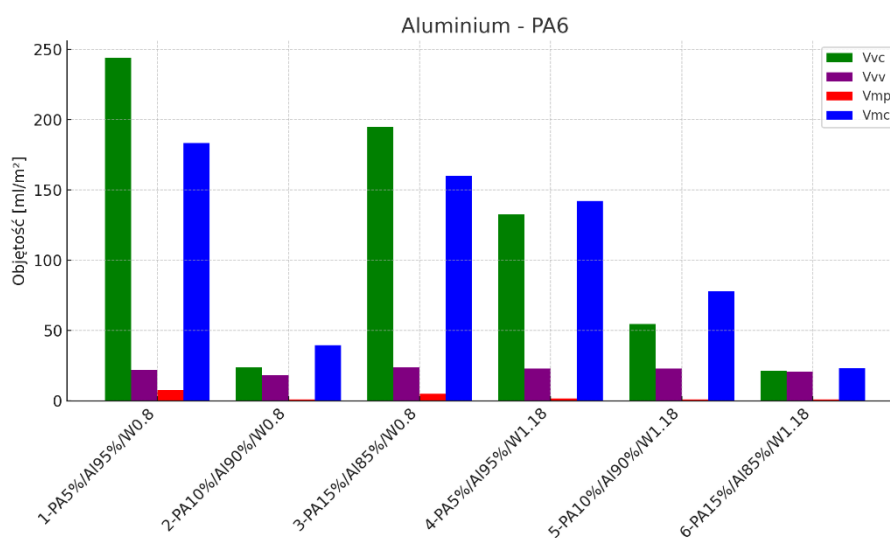
W badaniu zastosowano filtr Gaussa, który w analizie struktury powierzchni jest uzasadniony ze względu na jego właściwości, które pozwalają na efektywne

wygładzanie danych, eliminację szumów oraz oddzielenie składowych mikrogeometrycznych od makrogeometrii powierzchni. Filtr Gaussa jest jednym z najczęściej stosowanych narzędzi w analizie profili powierzchni ze względu na jego zdolność do zachowania charakterystycznych cech powierzchni przy jednoczesnym usunięciu niepożądanych zakłóceń. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PA6 i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm

Nr próbki	Frakcja wióra	V_{mp}	V_{mc}	V_{vc}	V_{vv}
	[mm]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]
1-PA5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	7,363	183,2	244,00	21,84
2-PA10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	0,9122	39,6	23,93	18,42
3-PA15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	4,889	159,9	194,7	23,68
4-PA5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	1,723	142,1	132,5	22,83
5-PA10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	1,12	77,65	54,51	22,71
6-PA15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	1,091	23,27	21,19	20,55

Analiza parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} w odniesieniu do próbek o różnym składzie i frakcji wióra jest kluczowym elementem oceny właściwości powierzchni w kontekście jej potencjalnych zastosowań w technologiach materiałowych oraz tribologii. Na rysunku 6.3 przedstawiono obliczone objętości poszczególnych parametrów powierzchniowych dla próbek kompozytowych z aluminium i PA6 w zależności od frakcji wiórów.



Rys. 6.3. Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PA6 i wiórów aluminium

Objętość wierzchołków (V_{mp}) jest pierwszym analizowanym parametrem, który odnosi się do objętości materiału powierzchniowego znajdującego się powyżej linii referencyjnej w obszarze wierzchołków profilu powierzchni. Wartość V_{mp} jest szczególnie istotna w kontekście oceny interakcji powierzchni na początkowym etapie eksploatacji, gdzie szczyty profilu mogą znacząco wpływać na zużycie i tarcie.

Próbki o większej zawartości poliamidu, zwłaszcza z mniejszą frakcją wióra (0,6–0,8 mm), wykazują wyższe wartości, co sugeruje obecność bardziej wyeksponowanych szczytów na powierzchni. Przykładem jest próbka 1-PA5%/Al95%/W0,8 gdzie wartości V_{mp} jest równa 7,363 ml/m², co może wskazywać, że powierzchnia ta, pomimo wyższej zawartości wierzchołków, może podlegać szybszemu zużyciu w początkowej fazie eksploatacji (rys. 6.2.a). Z kolei dla próbki 2-PA10%/Al90%/W0,8 zarejestrowano najniższą wartość V_{mp} , co wskazuje na bardziej gładką powierzchnię, która może być bardziej korzystna w aplikacjach wymagających niskiego tarcia i zużycia (rys. 6.2.b).

Analiza próbek badawczych pod względem parametru objętości rdzenia (V_{mc}) (rys. 6.2.a) wykazuje, że dla próbki 1-PA5%/Al95%/W0,8, charakteryzującej się najniższą zawartością poliamidu i mniejszą frakcją wióra, odnotowano najwyższą wartość V_{mc} (183,2 ml/m²). Wysoka wartość V_{mc} wskazuje, że powierzchnia ta może być bardziej stabilna i trwała w aplikacjach narażonych na duże obciążenia mechaniczne. Dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18 - (rys. 6.2.f) otrzymano najniższą wartość V_{mc} (23,27 ml/m²), co może wskazywać na mniej stabilną strukturę, potencjalnie bardziej podatną na odkształcenia i zużycie w trudnych warunkach eksploatacyjnych.

W badanej grupie próbek, najwyższą wartość V_{vc} zaobserwowano dla próbki 1-PA5%/Al95%/W0,8 równą 244,00 ml/m² (rys. 6.2.a), co wskazuje, że powierzchnia ta ma znaczącą zdolność do magazynowania smaru, co może przekładać się na lepsze właściwości tribologiczne. Przeciwnie, próbkę 6-PA15%/Al85%/W1,18 charakteryzuje najniższa wartość V_{vc} (21,19 ml/m²), co może ograniczać jej zdolność do przechowywania smaru, a tym samym potencjalnie prowadzić do zwiększonego tarcia i szybszego zużycia powierzchni.

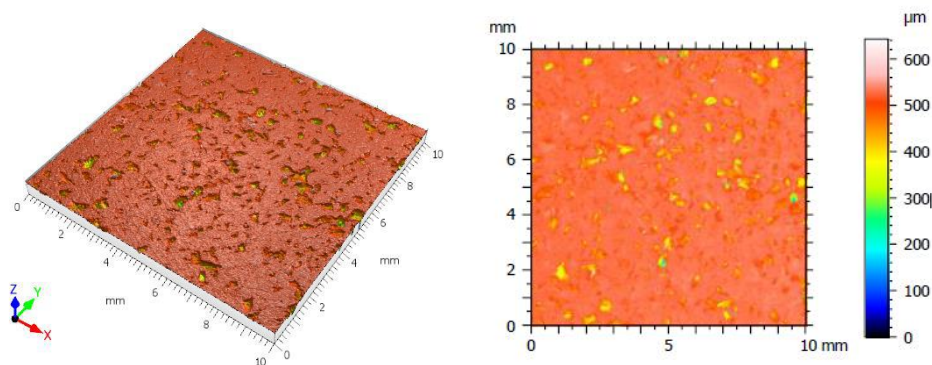
Wartości V_{vv} dla badanych próbek są stosunkowo zbliżone, co wskazuje, że wszystkie próbki mają dobrze rozwiniętą strukturę dolin. Najwyższą wartość V_{vv} odnotowano dla próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8 (23,68 ml/m²), co wskazuje, że ta powierzchnia może mieć najlepsze właściwości użytkowe w kontekście długoterminowej eksploatacji, związanej z utrzymaniem smaru i odprowadzaniem zanieczyszczeń (rys. 6.2.c).

Analiza wykazała, że zarówno frakcja wiórów aluminium, jak i zawartość PA6 mają istotny wpływ na chropowatość powierzchni kompozytów. Zwiększenie zawartości PA6 przy mniejszych frakcjach wiórów prowadzi do homogenizacji powierzchni, jednak zbyt duża zawartość PA6 może powodować wzrost chropowatości. W przypadku większych frakcji wiórów, większa ilość PA6 może prowadzić do bardziej jednolitej powierzchni, z możliwością występowania głębszych dolin.

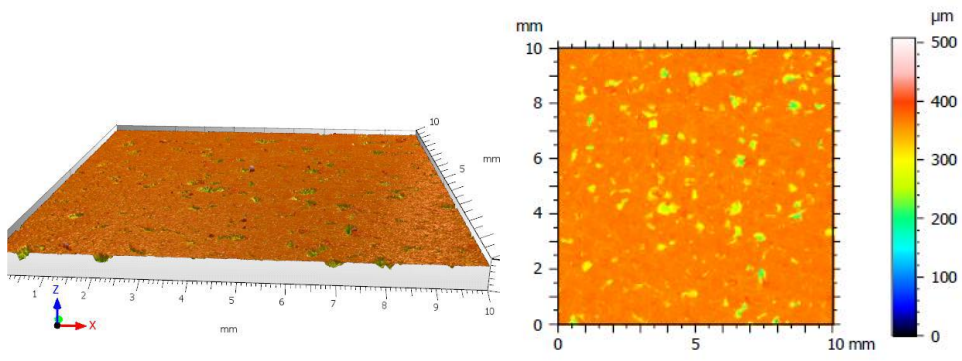
6.1.2 Topografia powierzchni kompozytu mosiądz - PA6

W przeprowadzonym badaniu analizowano topografię powierzchni kompozytów z wiórów mosiądzu i PA6, o różnej zawartości osnowy (5%, 10%, 15%) oraz dwóch różnych frakcjach wiórów mosiądzu: 0,2-0,4 mm i 0,4-0,6 mm. Analiza obejmowała pomiar parametrów wysokościowych (amplitudowych) i funkcyjnych, które dostarczają informacji na temat chropowatości, morfologii oraz potencjalnych właściwości użytkowych badanych kompozytów. Wyniki parametrów wysokościowych przedstawiono w postaci map konturowych oraz obrazów izometrycznych powierzchni na rysunku 6.4.

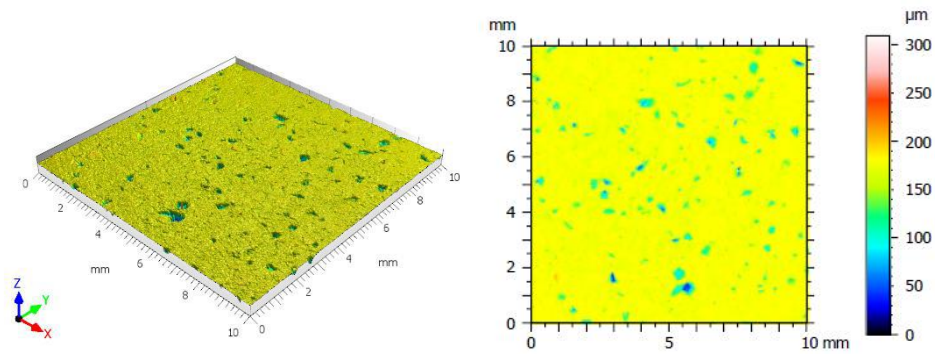
a)



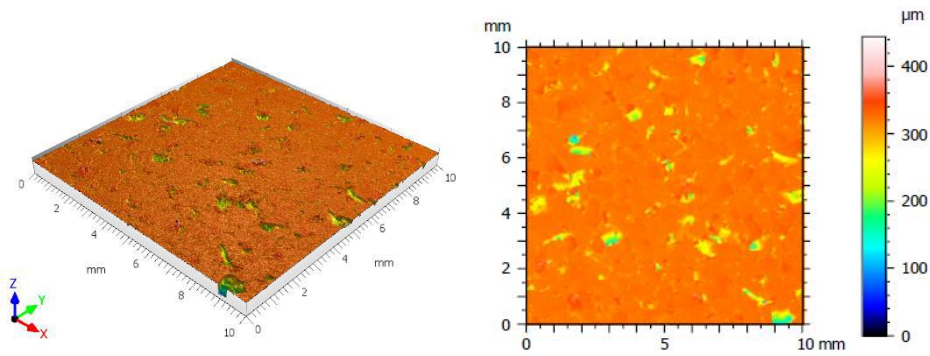
b)



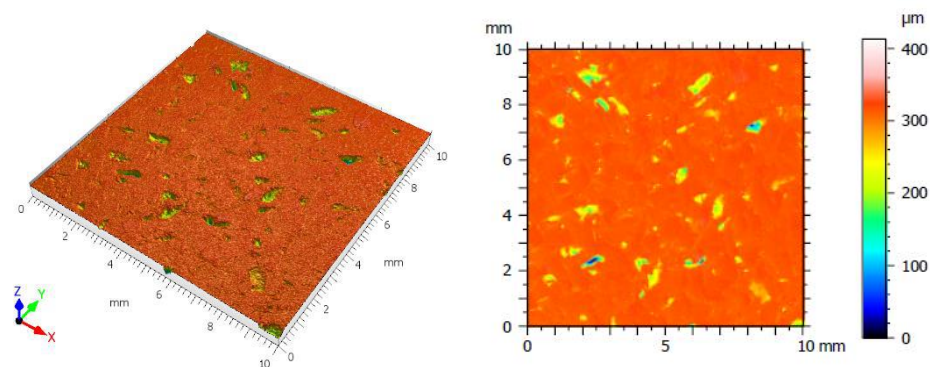
c)



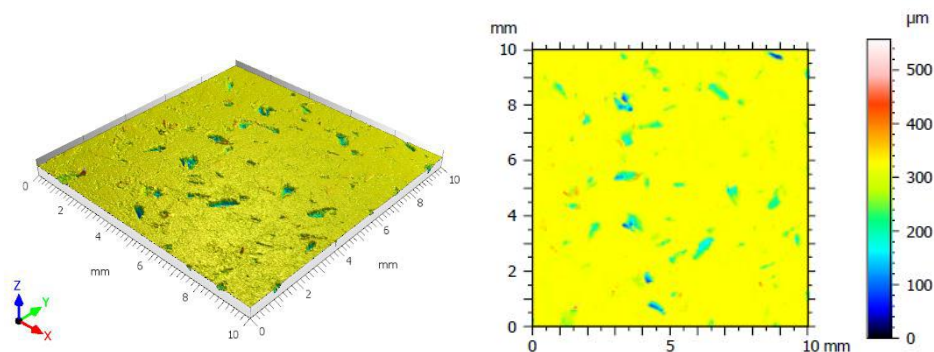
d)



e)



f)



Rys. 6.4. Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm: a) 7-PA5%/M95%/W0,4, b) 8-PA10%/M90%/W0,4, c) 9-PA15%/M85%/W0,4; o frakcji 0,4-0,6 mm: d) 10-PA5%/M95%/W0,6, e) 11-PA10%/M90%/W0,6, f) 12-PA15%/M85%/W0,6

Podczas badań uzyskano następujące wartości parametrów: średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej (R_a), średnia wysokość profilu chropowatości (R_z), średnie kwadratowe odchylenie powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_q), maksymalna wysokość szczytu profilu (S_p), maksymalna wysokość wgłębienia profilu (S_v), maksymalna wysokość profilu (S_z), średnia arytmetyczna wysokość odchylenia powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_a), współczynnik nachylenia powierzchni (S_{ku}) oraz współczynnik asymetrii powierzchni (S_{sk}). Wyniki przedstawiono w tabeli 6.3.

Tab. 6.3. Parametry chropowatości kompozytów z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm i 0,4-0,6 mm

Nr próbki	R_a	R_z	S_q	S_p	S_v	S_z	S_a	S_{ku}	S_{sk}
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]		
7-PA5%/M95%/W0,4	29,27	204,7	30,05	126,5	517,1	643,6	17,11	26,88	-4,087
8-PA10%/M90%/W0,4	6,291	118,8	19,56	145,5	363,5	509	9,911	28,70	-4,406
9-PA15%/M85%/W0,4	4,815	98,40	13,33	136,6	171,8	308,4	6,442	32,48	-4,793
10-PA5%/M95%/W0,6	12,83	177,1	19,81	121,6	321,3	442,9	9,233	37,58	-5,037
11-PA10%/M90%/W0,6	13,30	130,7	20,41	100,9	309,6	410,5	8,904	46,00	-5,737
12-PA15%/M85%/W0,6	10,90	189,9	23,79	238,7	314,7	553,4	10,47	36,73	-5,051

Współczynnik S_{sk} dostarcza kluczowych informacji o asymetrii powierzchni, a ujemne wartości wskazują, że powierzchnia ma więcej dolin niż szczytów. Taka charakterystyka powierzchni jest korzystna w kontekście utrzymywania smaru, co poprawia właściwości tribologiczne materiału. Niezależnie od frakcji wiórów

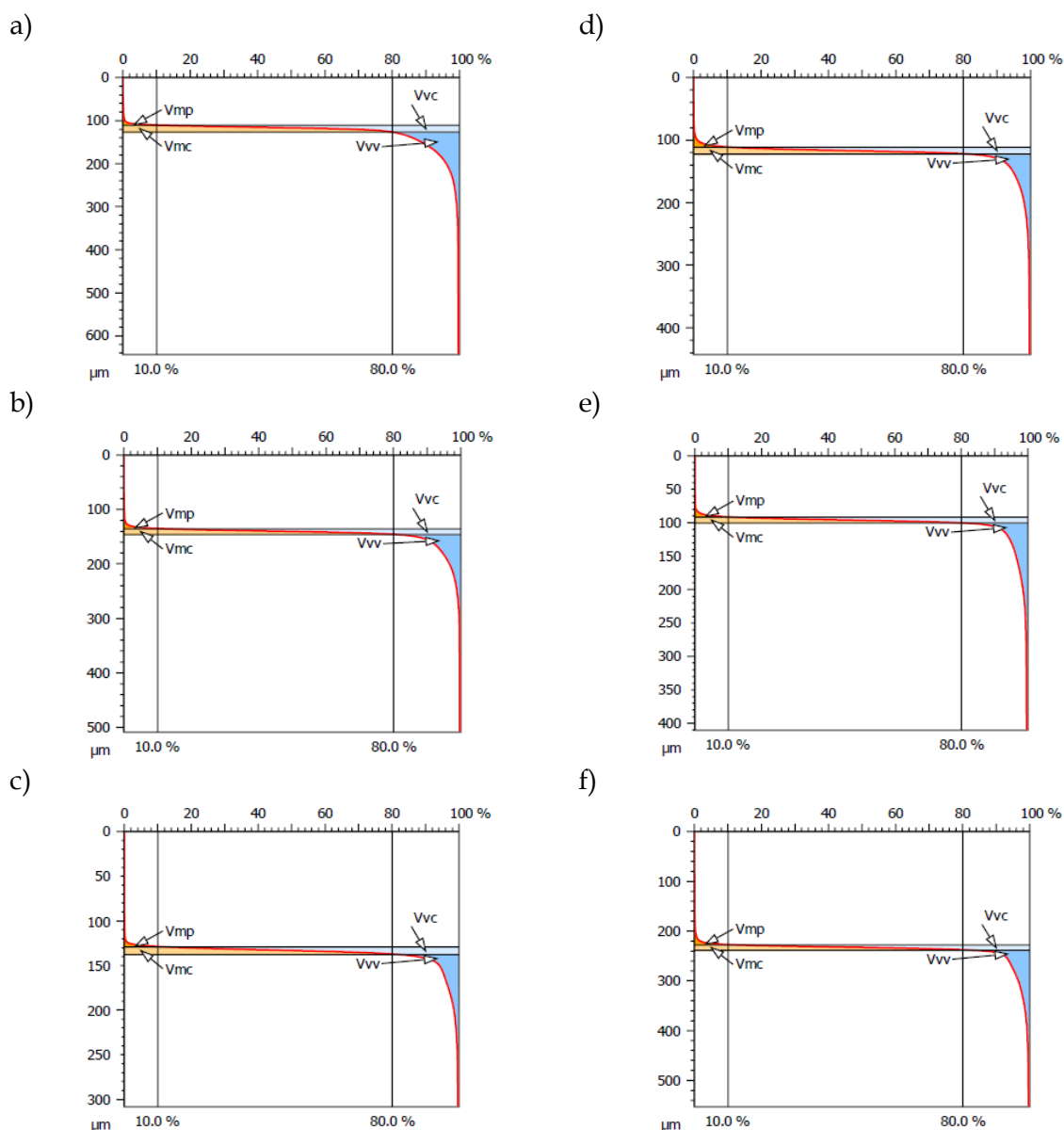
mosiądzu zwiększenie zawartości PA6 w kompozytach powoduje wzrost wartości współczynnika asymetrii powierzchni (S_{sk}), co wskazuje na dalsze pogłębienie dolin i bardziej wklęsły charakter powierzchni.

Wartości współczynnika nachylenia powierzchni (S_{ku}) powyżej 3 oznaczają, że profil powierzchni ma więcej ostrych szczytów i głębokich dolin. Dla wszystkich wyprasek kompozytowych uzyskano bardzo wysokie wartości kurtozy (S_{ku}), co potwierdza, że powierzchnie mają ostry profil z wyraźnymi szczytami i dolinami. Jest to typowe dla powierzchni, które mają silne interakcje z otoczeniem w kontekście tarcia. Wysokie dodatnie wartości kurtozy dla wszystkich wyprasek w tej grupie kompozytów wskazują, że niezależnie od asymetrii powierzchni, próbki charakteryzują się leptokurtycznym rozkładem. Potwierdza to, że cechy mają większą koncentrację niż w porównaniu do rozkładu normalnego.

Podsumowując wzrost zawartości PA6 do 10% w kompozytach z frakcją wióra 0,2–0,4 mm prowadzi do wygładzenia powierzchni i zmniejszenia chropowatości, na co wskazują niższe wartości R_a i R_z . Dalsze zwiększenie zawartości PA6 do 15% powoduje zmniejszenie chropowatości, ale jednocześnie powierzchnia staje się bardziej "ostra" i wyrazista, co jest widoczne w wyższych wartościach S_{ku} i ujemnym S_{sk} .

Analiza wyników dla próbek z większą frakcją wióra tj. 0,4–0,6 mm wykazała, że zwiększenie zawartości PA6 do 10% skutkuje nieznacznym spadkiem R_a , ale znaczącym spadkiem R_z . Jednak dalszy wzrost zawartości tworzywa do 15% prowadzi do zwiększenia R_z , co sugeruje pojawienie się głębszych dolin i wyższych szczytów, mimo że ogólna chropowatość powierzchni maleje.

W kolejnym etapie analizy dokonano interpretacji parametrów funkcyjnych wynikających z krzywej udziału materiałowego z filtrem Gaussa (rys. 6.5.). Funkcyjna charakterystyka powierzchni została określona za pomocą parametrów: objętości pików materiału (V_{mp}), objętości rdzenia materiału (V_{mc}), objętości rdzenia pustej przestrzeni (V_{vc}) oraz objętości pustej przestrzeni wgłębienia (V_{vv}). Wyniki badań przedstawiono w tabeli 6.4.

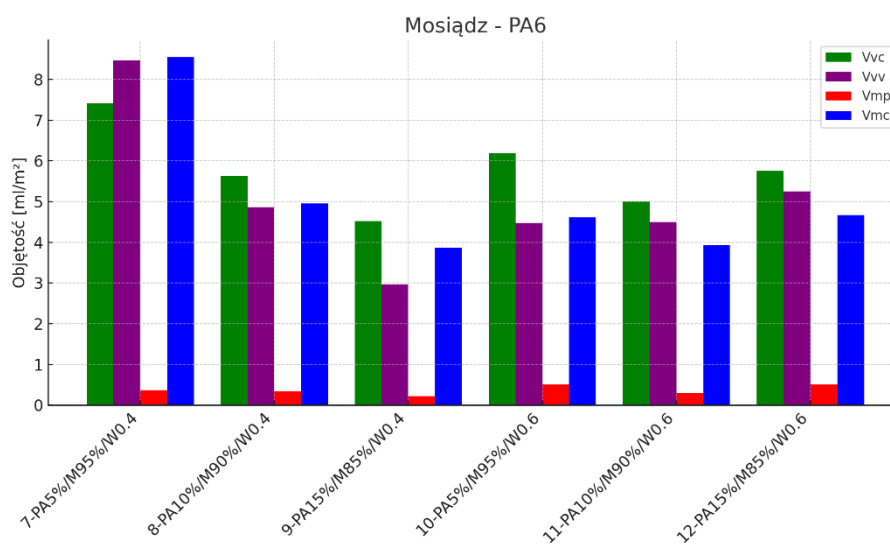


Rys. 6.5. Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm: a) 7-PA5%/M95%/W0,4, b) 8-PA10%/M90%/W0,4, c) 9-PA15%/M85%/W0,4: o frakcji 0,4–0,6 mm: d) 10-PA5%/M95%/W0,6, e) 11-PA10%/M90%/W0,6, f) 12-PA15%/M85%/W0,6

Tab. 6.4. Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm

Nr próbki	Frakcja wióra	V_{mp}	V_{mc}	V_{vc}	V_{vv}
	[mm]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]
7-PA5%/M95%/W0,4	0,2-0,4	0,3635	8,549	7,422	8,468
8-PA10%/M90%/W0,4	0,2-0,4	0,3436	4,961	5,624	4,865
9-PA15%/M85%/W0,4	0,2-0,4	0,2159	3,874	4,521	2,966
10-PA5%/M95%/W0,6	0,4-0,6	0,5037	4,616	6,193	4,481
11-PA10%/M90%/W0,6	0,4-0,6	0,3031	3,933	5,013	4,504
12-PA15%/M85%/W0,6	0,4-0,6	0,5004	4,671	5,755	5,248

Analiza parametrów funkcyjnych, takich jak V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} i V_{vv} , odgrywa kluczową rolę w ocenie właściwości powierzchni próbek o różnym składzie i frakcji wiórów, co ma istotne znaczenie w kontekście ich potencjalnych zastosowań w technologiach materiałowych i tribologii. Na rysunku 6.6 przedstawiono objętości poszczególnych parametrów powierzchniowych dla kompozytów z wiórami mosiądzu i PA6 w zależności od zastosowanej frakcji wiórów.



Rys. 6.6. Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PA6 i wiórów mosiądzu

Parametr V_{mp} odnosi się do objętości szczytów na powierzchni, co determinuje gładkość powierzchni. W próbkach z mosiądzem i PA6, wartości V_{mp} są ogólnie niskie, co potwierdza, że powierzchnia jest gładka z ograniczoną liczbą wyraźnych szczytów.

Jak przedstawiono na rysunku 6.5.c) najniższą wartość objętości piku materiału (V_{mp}) równą 0,2159 ml/m² odnotowano dla próbki 9-PA15%/M85%/W0,4, co wskazuje, że 15% zawartość PA6 i mniejsza frakcja wiórów prowadzi do uzyskania bardziej gładkiej powierzchni. Dla pozostałych próbek o frakcji wióra 0,2–0,4 mm wartości V_{mp} są podobne, co wskazuje na stabilność tego parametru. Tego rodzaju powierzchnie są bardziej jednorodne i mogą charakteryzować się mniejszym współczynnikiem tarcia, co jest korzystne w aplikacjach, gdzie wymagana jest minimalizacja zużycia materiału i zachowanie wysokiej jakości powierzchni.

Wzrost objętości piku materiału (V_{mp}) w próbkach 10-PA5%/M95%/W0,6 i 12-PA15%/M85%/W0,6 z frakcją 0,4-0,6 mm wskazuje, że powierzchnia staje się mniej jednorodna, z większym udziałem wyraźnych szczytów. Może to prowadzić do zwiększenia chropowatości powierzchni, co w niektórych zastosowaniach może prowadzić do zwiększonego tarcia i szybszego zużycia. Satysfakcjonujący wynik zbliżony do próbek z mniejszą frakcją wióra uzyskano dla próbki 11-PA10%/M90%/W0,6.

Analiza wykresu na rysunku 6.5 pod względem parametru (V_{mc}) wykazuje, że próbka 7-PA5%/M95%/W0,4, o najniższej zawartości poliamidu i frakcji wióra 0,2-0,4 mm, wykazuje najwyższą wartość objętości rdzenia V_{mc} (8,549 ml/m²). Powierzchnia próbki może być bardziej stabilna i trwała w aplikacjach narażonych na duże obciążenia mechaniczne. Natomiast próbka 9-PA15%/M85%/W0,4 wykazuje najniższą wartość V_{mc} równą 3,874 ml/m² (rys. 6.5.c). Uzyskany wynik może wskazywać na mniej stabilną strukturę, bardziej podatną na odkształcenia i zużycie w trudnych warunkach eksploatacyjnych.

Najwyższa zdolność do utrzymania eksploatacyjnego smaru zarejestrowano dla próbki 7-PA5%/M95%/W0,4, dla której wartość V_{vc} wynosiła 7,422 ml/m² (rys. 6.4.a). Pozostałe próbki wykazały zbliżone wartości objętości rdzenia pustej przestrzeni w zakresie od 4,521 do 6,193 ml/m².

Wartości V_{vv} w grupie badanych próbek są stosunkowo zbliżone, poza próbką 9-PA15%/M85%/W0,4 co wskazuje, że wszystkie próbki mają dobrze rozwiniętą strukturę dolin. Najwyższą wartość V_{vv} odnotowano dla próbki 7-PA5%/M95%/W0,4 (8,468 ml/m²). Powierzchnia tej próbki może mieć najlepsze właściwości użytkowe w kontekście długoterminowej eksploatacji, związanej z utrzymaniem smaru i odprowadzaniem zanieczyszczeń (rys. 6.5.c).

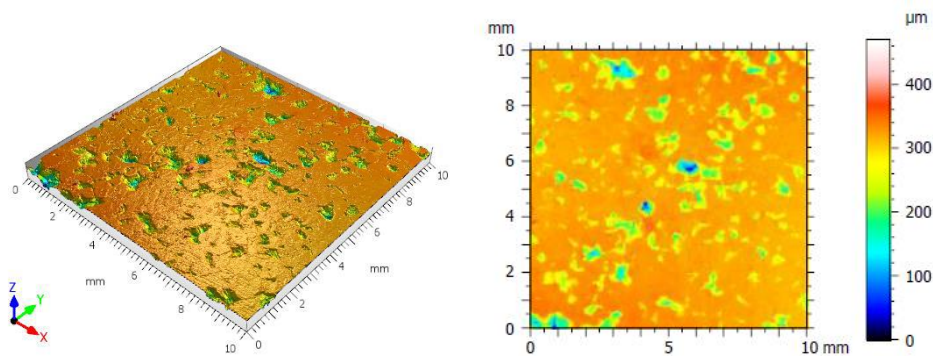
Podsumowując, analiza zarówno parametrów amplitudowych i funkcyjnych wykazała, że zmiany frakcji wiórów mosiądzu oraz zawartości PA6 mają istotny wpływ na topografię i funkcjonalność powierzchni kompozytów. Mniejsze frakcje wiórów oraz niższa zawartość PA6 prowadzą do większej chropowatości i porowatości, co może zwiększać przyczepność i odporność na zużycie, podczas gdy większe frakcje wiórów oraz 10% zawartość PA6 prowadzą do wygładzenia

powierzchni i zmniejszenia porowatości, co może poprawiać właściwości użytkowe w kontekście zatrzymywania smaru i ogólnej wytrzymałości powierzchni.

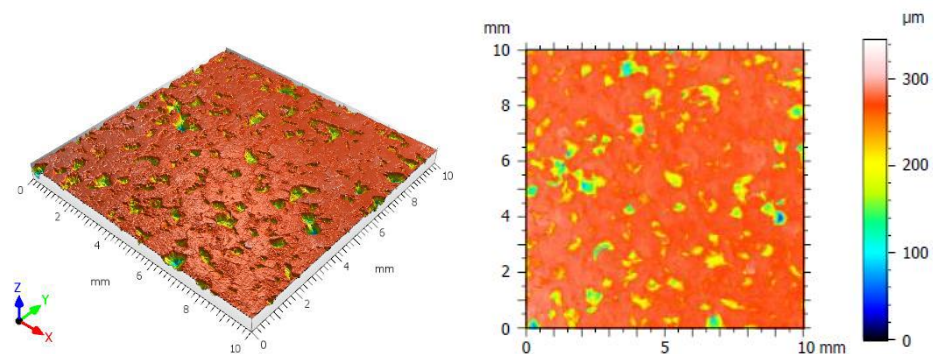
6.1.3. Topografia powierzchni kompozytu mosiądz - PEEK

W przeprowadzonym badaniu dokonano szczegółowej analizy topografii powierzchni wyprasek kompozytowych wykonanych z PEEK i wiórów mosiądzu o dwóch frakcjach 0,2-0,4 mm i 0,4-0,6 mm. Badanie objęło pomiar parametrów wysokościowych (amplitudowych) oraz funkcyjnych powierzchni. Badania powierzchni przedstawiono w formie graficznej w postaci map konturowych oraz obrazów izometrycznych powierzchni na (rys. 6.7.).

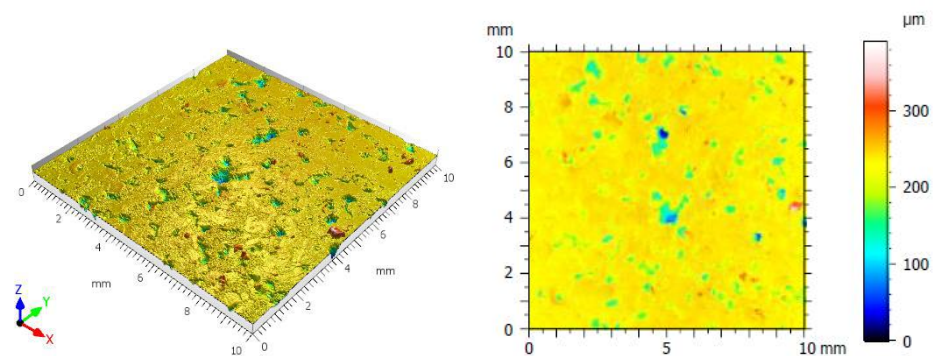
a)



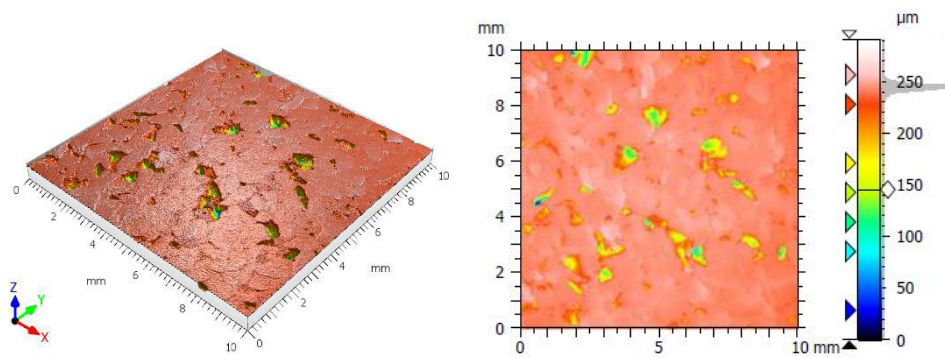
b)



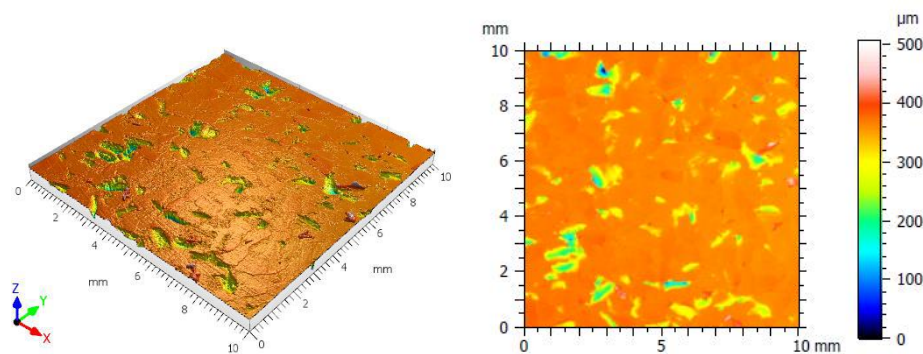
c)



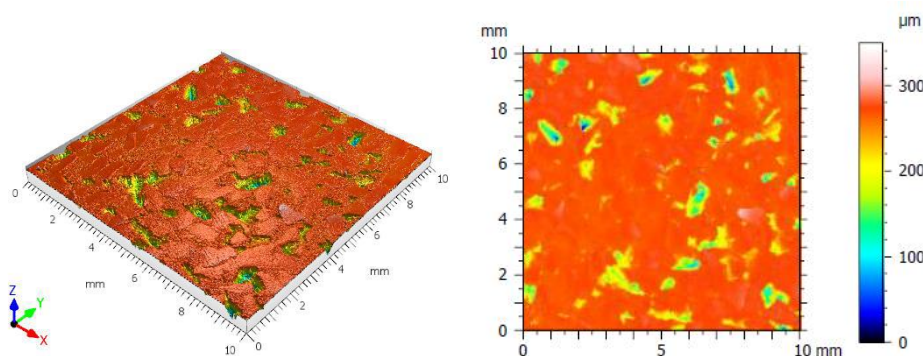
d)



e)



f)



Rys. 6.7. Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PEEK i wiórami miedzi o frakcji 0,2-0,4 mm: a) 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, b) 2'-PEEK10%/M90%/W0,4, c) 3'-PEEK15%/M85%/W0,4; o frakcji 0,4-0,6 mm: d) 4'-PEEK5%/M95%/W0,6, e) 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, f) 6'-PEEK15%/M85%/W0,6

Uzyskane wyniki pomiarów topografii przedstawiono w tabeli 6.5, w której zestawiono następujące parametry: średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej (R_a), średnia wysokość profilu chropowatości (R_z), średnie kwadratowe odchylenie powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_q), maksymalna wysokość szczytu profilu (S_p), maksymalna wysokość wgłębienia profilu (S_v), maksymalna wysokość profilu (S_z), średnia arytmetyczna wysokość odchylenia

powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_a), współczynnik nachylenia powierzchni (S_{ku}) oraz współczynnik asymetrii powierzchni (S_{sk}).

Tab. 6.5. Parametry chropowatości kompozytów z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm i 0,4-0,6 mm

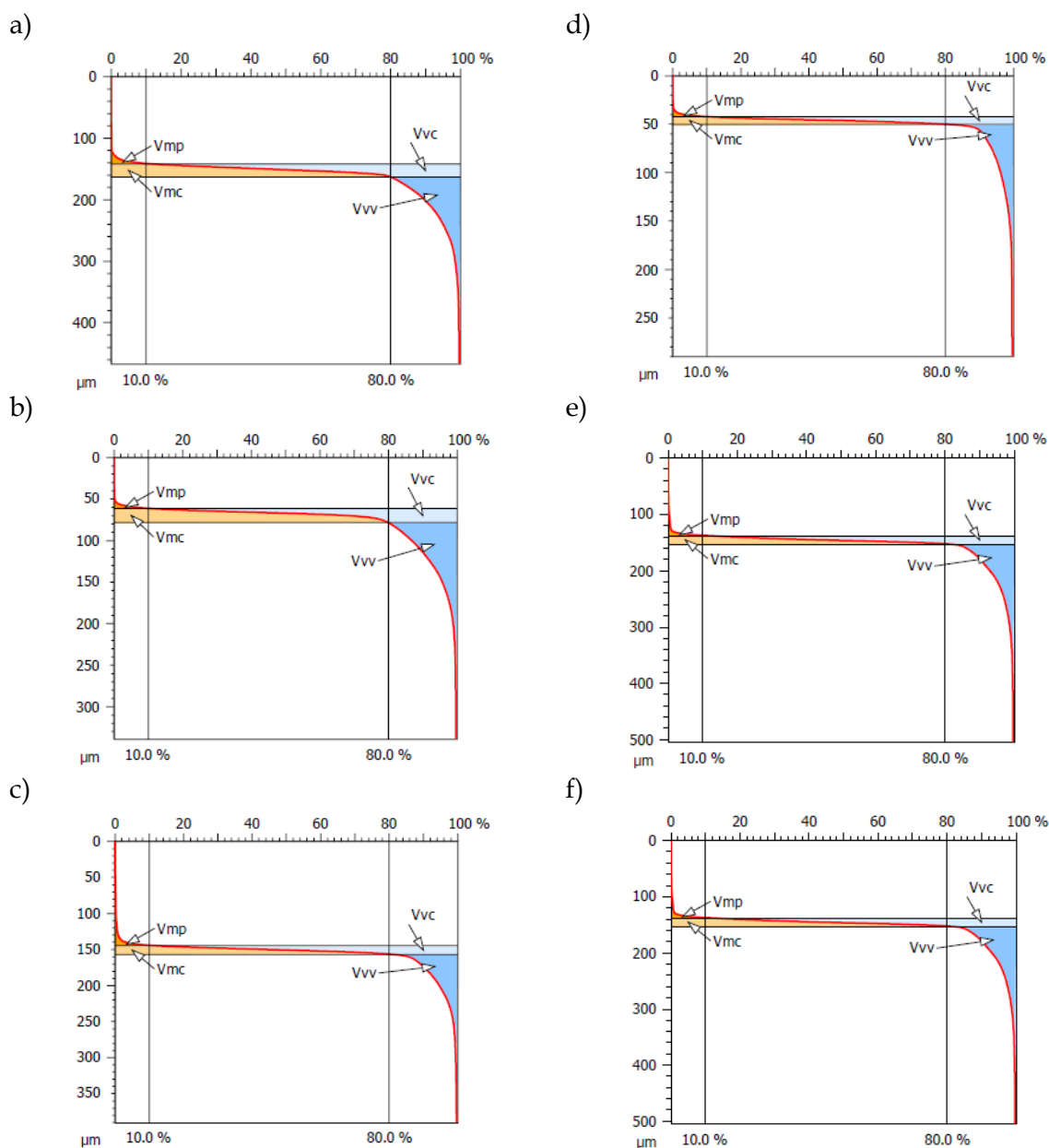
Nr próbki	R_a	R_z	S_q	S_p	S_v	S_z	S_a	S_{ku}	S_{sk}
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]		
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	35,66	271,5	33,61	162,1	305,1	467,2	20,70	14,25	-3,044
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	18,26	160,0	28,15	71,03	262,3	333,4	17,94	12,93	-2,950
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	17,84	248,2	21,57	154,4	233,8	388,2	11,57	21,70	-3,434
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	3,539	96,21	18,42	49,20	239,2	288,4	8,819	29,13	-4,648
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	5,019	80,44	30,43	153,9	351,3	505,2	16,30	21,63	-3,777
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	17,79	198,4	26,92	88,14	260,6	348,7	15,41	17,31	-3,480

W badanej grupie kompozytów uzyskano również ujemne wartości współczynnika asymetrii powierzchni S_{sk} co wskazuje na przewagę dolin oraz świadczy o tym, że większa część materiału znajduje się w okolicach wierzchołków powierzchni. Najniższą wartością współczynnika asymetrii powierzchni charakteryzowała się próbka 2'-PEEK10%/M90%/W0,4 z zawartością 10% tworzywa PEEK i frakcją wióra 0,2-0,4 mm.

Dla wszystkich badanych próbek uzyskano wyniki znacznie wyższe do standardowej wartości współczynnika nachylenia powierzchni (S_{ku}). Potwierdza to fakt, że powierzchnie mają ostry profil z wyraźnymi szczytami i dolinami. Dodatkowo wartości (S_{ku}) dla wszystkich próbek wskazują, że niezależnie od asymetrii powierzchni, próbki charakteryzują się leptokurtycznym rozkładem.

Dla próbek z wiórami o frakcji 0,2-0,4 mm oraz 0,4-0,6 mm zwiększenie zawartości tworzywa z 5% do 10% zmniejsza chropowatość powierzchni, co wskazuje, że dodatek większej ilości PEEK redukuje nierówności powierzchni. Natomiast zwiększenie zawartości tworzywa do 15% powoduje ponowny wzrost chropowatości.

Dla grupy kompozytów wykonanych z PEEK i wiórów mosiądzu określono funkcyjną charakterystykę powierzchni za pomocą parametrów funkcyjnych z zastosowaniem filtra Gaussa. W ramach badania wyznaczono następujące parametry: objętości piku materiału (V_{mp}), objętości rdzenia materiału (V_{mc}), objętości rdzenia pustej przestrzeni (V_{vc}) oraz objętości pustej przestrzeni wgłębienia (V_{vv}) (rys. 6.8).



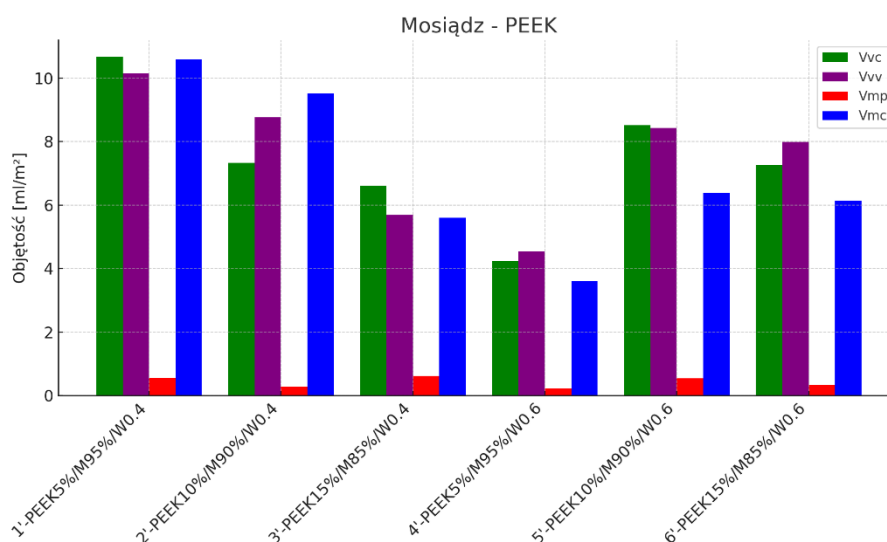
Rys. 6.8. Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami mosiądzu o frakcji 0,2-0,4 mm: a) 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, b) 2'-PEEK10%/M90%/W0,4, c) 3'-PEEK15%/M85%/W0,4; o frakcji 0,4-0,6 mm d) 4'-PEEK5%/M95%/W0,6, e) 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, f) 6'-PEEK15%/M85%/W0,6

Wyniki badań zostały przedstawiono w tabeli 6.6.

Tab. 6.6. Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm

Nr próbki	Frakcja wióra	V_{mp}	V_{mc}	V_{vc}	V_{vv}
	[mm]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	0,2–0,4	0,556	10,580	10,670	10,15
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	0,2–0,4	0,276	9,514	7,326	8,76
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	0,2–0,4	0,614	5,600	6,610	5,68
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	0,4–0,6	0,217	3,604	4,240	4,54
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	0,4–0,6	0,548	6,370	8,519	8,43
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	0,4–0,6	0,341	6,146	7,260	7,99

Na rysunku 6.9 zebrano uzyskane objętości poszczególnych parametrów powierzchniowych dla próbek kompozytowych z mosiądzu i PEEK w zależności od frakcji wiórów.



Rys. 6.9. Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PEEK i wiórów mosiądzu

Najniższe wartości objętości pików materiału (V_{mp}) odnotowano dla próbek 2'-PEEK10%/M90%/W0,4 i 4'-PEEK5%/M95%/W0,6. (rys. 6.8.b, d) W przypadku próbki 2'-PEEK10%/M90%/W0,4 o 10% zawartości PEEK i mniejszej frakcji wiórów można przyjąć, że taki skład prowadzi do uzyskania bardziej gładkiej powierzchni. Analizując niski wynik (V_{mp}) dla próbki 4'-PEEK5%/M95%/W0,6 można stwierdzić, że większa frakcja wióra przy 5% zawartości tworzywa również prowadzi do gładziej powierzchni. Wartości V_{mp} dla pozostałych próbek o frakcji wióra 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm są zbliżone. Powierzchnie próbek są jednorodne i charakteryzują się

mniejszym współczynnikiem tarcia, co jest wskazane w aplikacjach, gdzie wymagana jest minimalizacja zużycia materiału i zachowanie wysokiej jakości powierzchni.

Analiza wykresu na rysunku 6.8.a) pod względem parametru objętości rdzenia (V_{mc}) wykazuje, że próbka 1'-PEEK5%/M95%/W0,4 charakteryzuje się najwyższą wartością V_{mc} (10,580 ml/m²). Wysoka wartość V_{mc} potwierdza, że powierzchnia ta może być bardziej stabilna i trwała w aplikacjach narażonych na duże obciążenia mechaniczne. Wykres na rysunku 6.6.d) dla próbki 4'-PEEK5%/M95%/W0,6 potwierdza najniższą wartość V_{mc} (3,604 ml/m²), co wskazuje na mniej stabilną strukturę podatną na odkształcenia i zużycie w trudnych warunkach.

W badanej grupie próbek, najwyższą wartość V_{vc} zaobserwowano dla próbki 1'-PEEK5%/M95%/W0,4 równą 10,670 ml/m² (rys. 6.8.a), co wskazuje, że powierzchnia ta ma znaczącą zdolność do magazynowania smaru. Próbkę 4'-PEEK5%/M95%/W0,6 o takiej samej zawartości PEEK (5%) charakteryzuje najniższa wartość V_{vc} (4,240 ml/m²), co może ograniczać jej zdolność do przechowywania smaru i tym samym zwiększając tarcie i szybsze zużycie powierzchni.

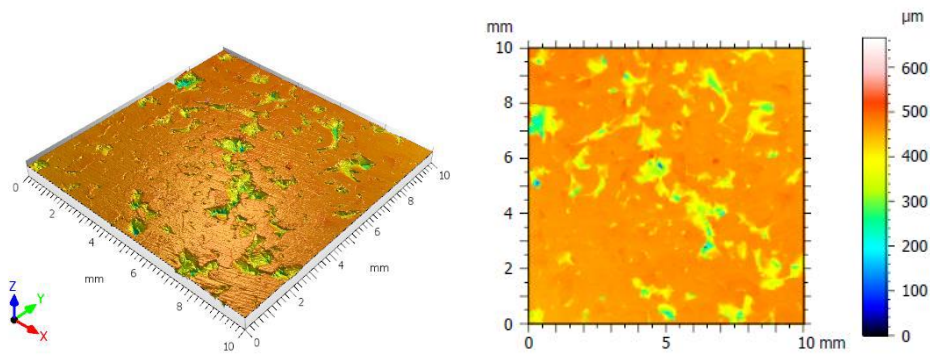
Wartości V_{vv} dla badanych próbek są stosunkowo zbliżone, co wskazuje, że wszystkie próbki mają dobrze rozwiniętą strukturę dolin. Najwyższą wartość V_{vv} odnotowano dla próbki 1'-PEEK5%/M95%/W0,4 (10,15 ml/m²). Wynik ten potwierdza, że powierzchnia próbki może mieć najlepsze właściwości użytkowe związane z utrzymaniem smaru i odprowadzaniem zanieczyszczeń (rys. 6.8.c).

Podsumowując, analiza zarówno parametrów amplitudowych, jak i funkcyjnych wykazała, że zmiany w frakcji wiórów mosiądzu oraz zawartości PEEK istotnie wpływają na topografię i funkcjonalność powierzchni kompozytów. Mniejsze frakcje wiórów oraz niższa zawartość PEEK prowadzą do większej chropowatości, podczas gdy większe frakcje wiórów oraz 10% zawartość PEEK prowadzą do wygładzenia powierzchni i zmniejszenia porowatości.

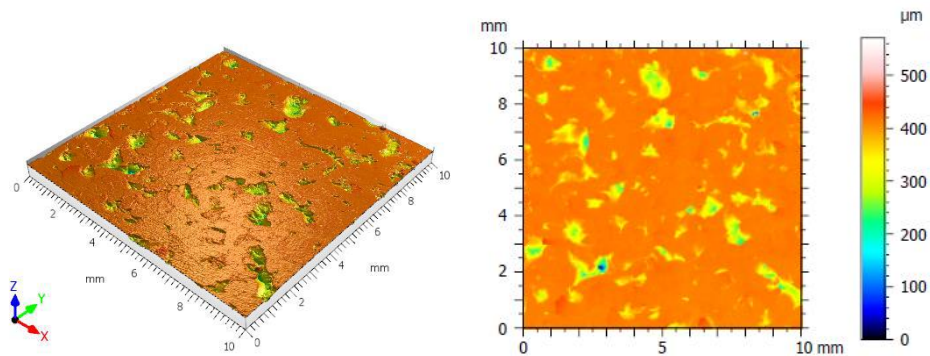
6.1.4. Topografia powierzchni kompozytu aluminium - PEEK

W badaniu analizowano powierzchnię kompozytów PEEK z wiórami aluminium o dwóch frakcjach 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm. Badanie obejmowało zarówno parametry amplitudowe i funkcyjne, dostarczając pełnego obrazu topografii badanych próbek. Na podstawie badań określono parametry, które przedstawiono w formie graficznej. Wyniki badań map konturowych oraz obrazów izometrycznych powierzchni przedstawiono graficznie na rysunku 6.10.

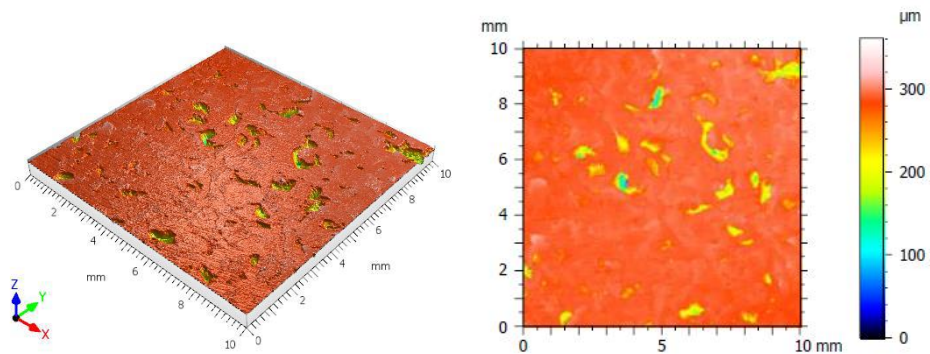
a)



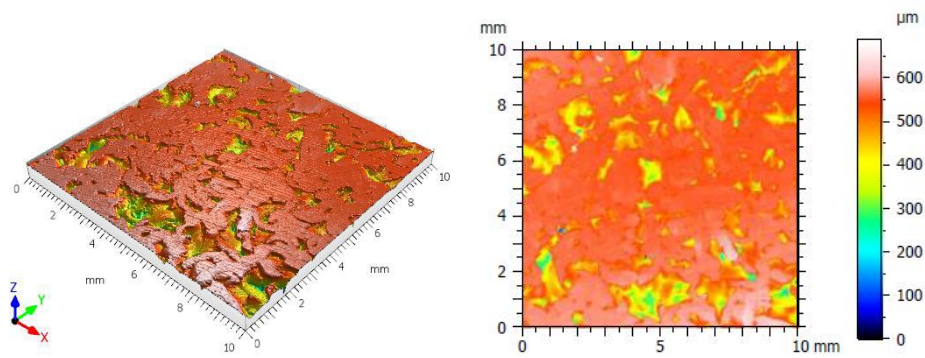
b)



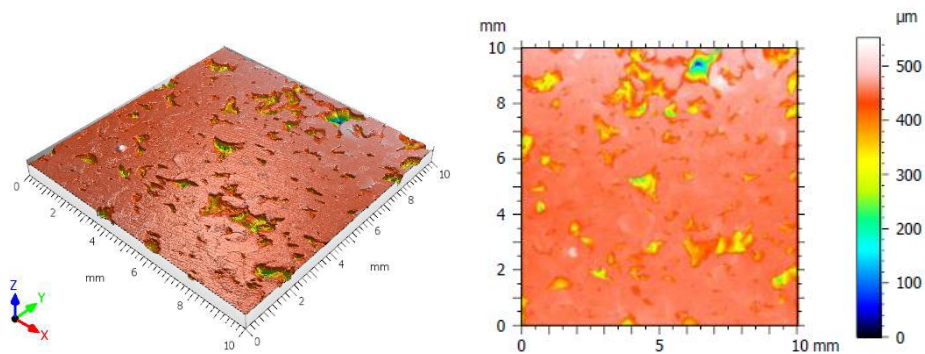
c)



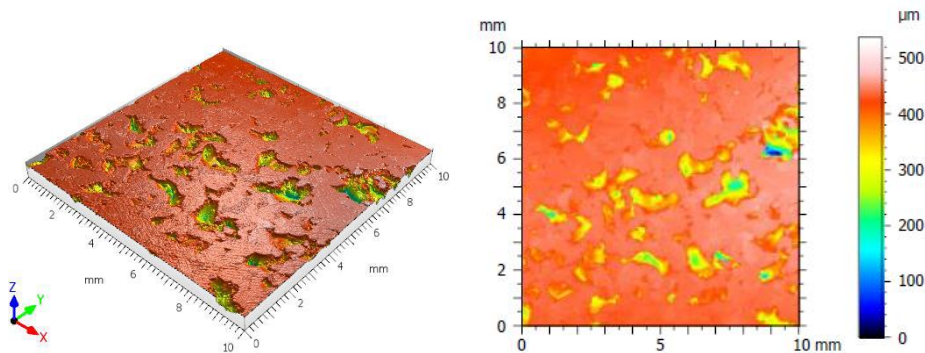
d)



e)



f)



Rys. 6.10. Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm: a) 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, b) 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, c) 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm: d) 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, e) 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, f) 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18

W tabeli 6.7 przedstawiono zebrane wartości parametrów opisujących wysokość powierzchni, takie jak: średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej (R_a), średnia wysokość profilu chropowatości (R_z), średnie kwadratowe odchylenie powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_q), maksymalna wysokość szczytu profilu (S_p), maksymalna wysokość wgłębienia profilu (S_v), maksymalna wysokość profilu (S_z), średnia arytmetyczna wysokość odchylenia powierzchni od

płaszczyzny odniesienia (S_a), współczynnik nachylenia powierzchni (S_{ku}) oraz współczynnik asymetrii powierzchni (S_{sk}).

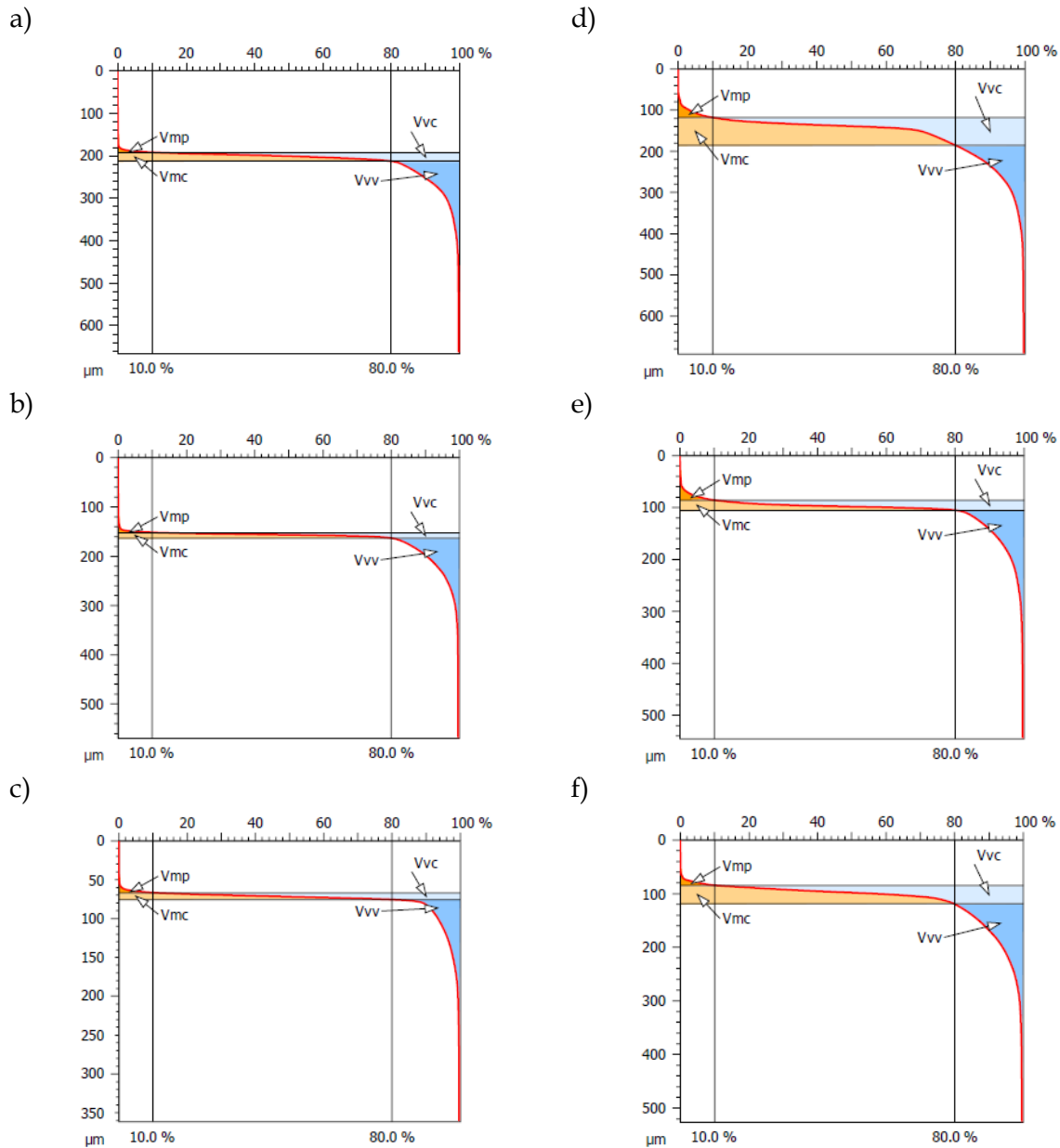
Tab. 6.7. Parametry chropowatości kompozytów z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm

Nr próbki	R_a	R_z	S_q	S_p	S_v	S_z	S_a	S_{ku}	S_{sk}
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]		
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	19,47	222,6	35,16	211,5	452,5	664,0	20,97	18,41	-3,431
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	18,69	154,9	29,77	166,7	401,2	567,9	17,32	22,02	-3,750
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	8,776	126,7	18,66	76,15	284,8	360,9	8,96	30,16	-4,642
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	31,20	234,7	55,86	158,6	534,2	692,8	38,80	9,84	-2,295
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	24,69	226,0	35,42	107,0	438,3	545,3	19,90	20,88	-3,593
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	22,96	170,5	43,19	111,9	414,1	526,0	27,65	13,91	-2,914

Otrzymane ujemne wartości współczynnika asymetrii powierzchni S_{sk} wskazują na dominację dolin oraz sugerują, że większa ilość materiału jest skoncentrowana w rejonach wierzchołków powierzchni.

Współczynnik nachylenia powierzchni S_{ku} we wszystkich wypraskach kompozytowych znacząco przekraczał wartość 3, co wskazuje na obecność ostrych i wysokich szczytów oraz głębokich dolin na powierzchni. Wśród wyników zaobserwowano znacznie podwyższoną wartość wskaźnika S_{ku} dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8. Dodatkowo wartości kurtozy dla kompozytów wskazują, że próbki charakteryzują się leptokurtycznym rozkładem, co oznacza, że cechy powierzchni są bardziej skoncentrowane w porównaniu do rozkładu normalnego.

Podsumowując analizę badań dla tej grupy próbek, potwierdza się, że frakcja wiórów aluminium i zawartość poliamidu 6 mają wpływ na chropowatość powierzchni. Dla próbek z wiórami o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm zwiększenie zawartości tworzywa do 15% zmniejsza chropowatość powierzchni, co wskazuje, że dodatek większej ilości poliamidu poprawia homogenizację i redukuje nierówności powierzchni. Dla powyższych próbek przeprowadzono analizę wyników i interpretację parametrów funkcyjnych wynikających z krzywej udziału materiałowego. Funkcyjna charakterystyka powierzchni została określona za pomocą parametrów funkcyjnych: objętości pików materiału (V_{mp}), objętości rdzenia materiału (V_{mc}), objętości rdzenia pustej przestrzeni (V_{vc}) oraz objętości pustej przestrzeni wgłębienia (V_{vv}) (rys. 6.11.).

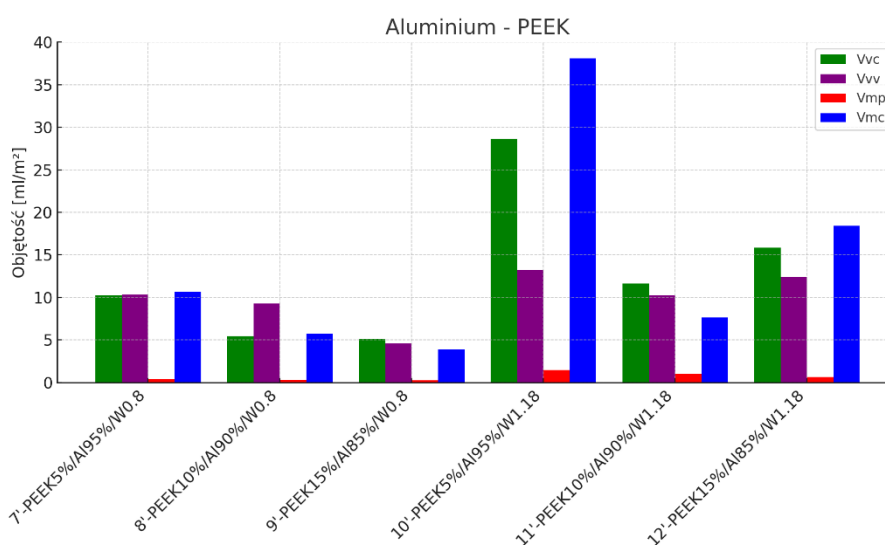


Rys. 6.11. Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm: a) 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, b) 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, c) 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm: d) 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, e) 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, f) 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18

W celu zapewnienia kompleksowego zrozumienia wyników, uzyskane dane zebrano i przedstawiono w tabeli 6.8 i w formie wykresu na rysunku 6.12.

Tab. 6.8. Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm

Nr próbki	Frakcja wióra	V_{mp}	V_{mc}	V_{vc}	V_{vv}
	[mm]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]	[ml/m ²]
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	0,6–0,8	0,417	10,650	10,250	10,34
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	0,6–0,8	0,311	5,738	5,447	9,26
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	0,6–0,8	0,271	3,893	5,108	4,56
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	0,8–1,18	1,456	38,130	28,620	13,21
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	0,8–1,18	1,008	7,633	11,620	10,26
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	0,8–1,18	0,628	18,420	15,860	12,40



Rys. 6.12. Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PEEK i wiórów aluminium

W grupie wyprasek z frakcją wiórów 0,6–0,8 mm odnotowano najwyższą wartość objętości piku materiału (V_{mp}) dla próbki 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8 zawierającej 5% tworzywa, wynoszącą 0,417 ml/m², co wskazuje na obecność wyraźnych szczytów na powierzchni. Natomiast wśród próbek z większą frakcją wiórów (0,8–1,18 mm) zmierzono najwyższą wartość objętości piku materiału (V_{mp}) równą 1,456 ml/m² dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18. Powierzchnie obu próbek mogą podlegać szybszemu zużyciu w początkowej fazie eksploatacji (rys. 6.11.a, d). Z kolei próbki z 15% zawartością PEEK charakteryzują się najniższą wartością V_{mp} , co wskazuje na bardziej gładką powierzchnię, która może być bardziej korzystna w aplikacjach wymagających niskiego tarcia i zużycia (rys. 6.11.c, f).

Analiza pod względem parametru objętości rdzenia (V_{mc}) wykazuje, że próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, charakteryzująca się najniższą zawartością PEEK i frakcją wióra 0,8-1,18 mm, wykazuje najwyższą wartość V_{mc} (38,130 ml/m²). Powierzchnia próbki może być bardziej stabilna i trwała w aplikacjach narażonych na duże obciążenia mechaniczne. Dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 (rys. 6.8.c) uzyskano najniższą wartość V_{mc} (3,893 ml/m²), co wskazuje na mniej stabilną strukturę. Próbka jest bardziej podatna na odkształcenia i zużycie w trudnych warunkach eksploatacyjnych.

Wysokie wartości V_{vc} (10,250 ml/m²) próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 wskazują na dużą ilość osnowy w rdzeniu i znaczne właściwości absorpcyjne. Próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 charakteryzowała się najniższą wartością V_{vc} (5,108ml/m²), co potwierdza mniej wyraźne szczyty oraz zmniejszenie porowatości powierzchni ograniczając jej zdolność do przechowywania smaru.

Najwyższą wartość objętości pustej przestrzeni wgłębienia (V_{vv}) wśród badanych próbek odnotowano dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 (13,21 ml/m²), co wskazuje, że ta powierzchnia ma najlepsze właściwości użytkowe związane z utrzymaniem smaru i odprowadzaniem zanieczyszczeń (rys. 6.11.c). Najniższą wartość odnotowano dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 równą 4,56 ml/m².

Podsumowując, próbki z mniejszą frakcją wiórów (0,6-0,8 mm) i niższą zawartością PEEK mają bardziej wyraźne szczyty na powierzchni, co wskazuje na większą chropowatość. Natomiast zwiększenie zawartości PEEK skutkuje bardziej zrównoważoną strukturą powierzchni, która jest mniej porowata.

6.1.5 Badania makroskopowe kompozytu aluminium - PA6

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań makroskopowych próbek kompozytowych wykonanych z wiórów aluminium i PA6. Badanie przeprowadzono na mikroskopie Keyence z zastosowaniem powiększenia x50, aby określić strukturę powierzchni oraz jakość wykonania kompozytu. W badaniu zastosowano oświetlenie, które umożliwiło uzyskanie wysokiej jakości obrazu z wyraźnym kontrastem pomiędzy poszczególnymi składnikami kompozytu. Badania miały za cel określić czy obróbka mechaniczna poprawia jakość powierzchni, czy redukuje ubytki oraz zwiększa jednorodność strukturalną kompozytów. Na rysunku 6.13 przedstawiono fotografie próbek kompozytowych wykonanych z wiórów aluminiowych i poliamidu 6 przed i po obróbce. Badania miały na celu ocenę jakości powierzchni, jednorodności struktury oraz identyfikację potencjalnych defektów, które mogą wpływać na właściwości mechaniczne i funkcjonalne kompozytów.

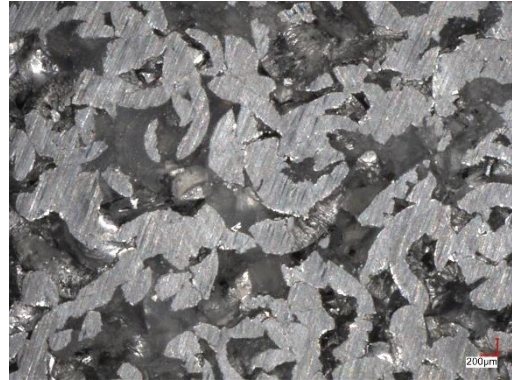
W pierwszym etapie badań dokonano analizy próbek przed obróbką mechaniczną. Próbki z mniejszą frakcją wiórów (0,6–0,8 mm) wykazały bardziej jednorodną strukturę powierzchni, jednak z obecnymi mikrodefektami, które mogą wynikać z nierównomiernego rozłożenia wiórów w matrycy polimerowej. Z kolei próbki z większą frakcją wiórów (0,8–1,18 mm) charakteryzowały się większymi nierównościami i wyraźniejszymi defektami powierzchniowymi, co można przypisać trudnościom w równomiernym rozmieszczeniu większych wiórów w polimerze.

W drugim etapie przeprowadzono obróbkę mechaniczną próbek, co pozwoliło na ocenę jej wpływu na jakość powierzchni. Obróbka mechaniczna metodą frezowania znacząco poprawiła jakość powierzchni wszystkich próbek, redukując liczbę defektów oraz zwiększając jednorodność struktury. Próbki z mniejszą frakcją wiórów po obróbce wykazały bardziej gładką powierzchnię z mniejszą ilością mikrodefektów, podczas gdy próbki z większą frakcją wiórów, mimo poprawy, nadal wykazywały pewne nierówności wynikające z obecności większych wiórów.

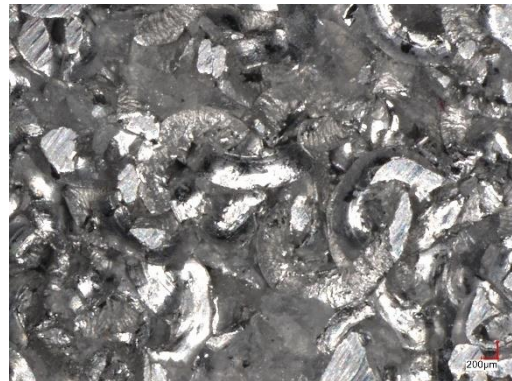
a)



b)

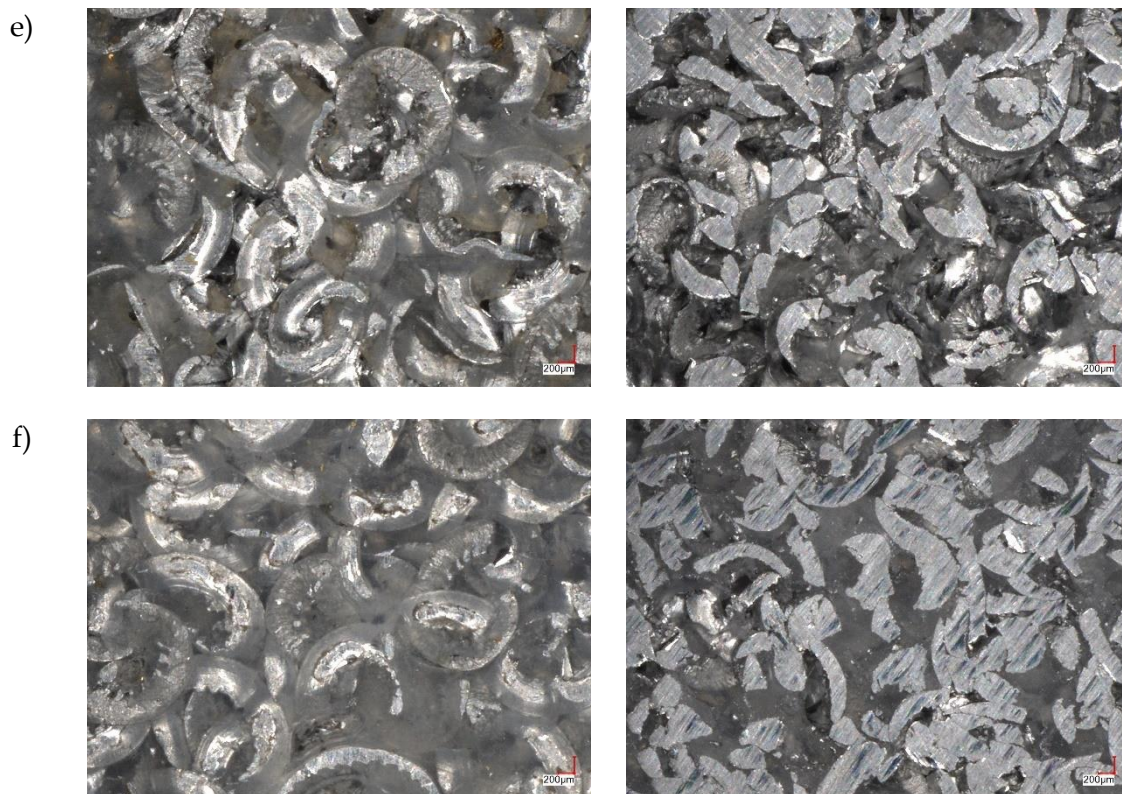


c)



d)





Rys. 6.13. Makroskopowe fotografie próbek kompozytowych z wiórów aluminiowych oraz poliamidu 6 przed obróbką i po obróbce:

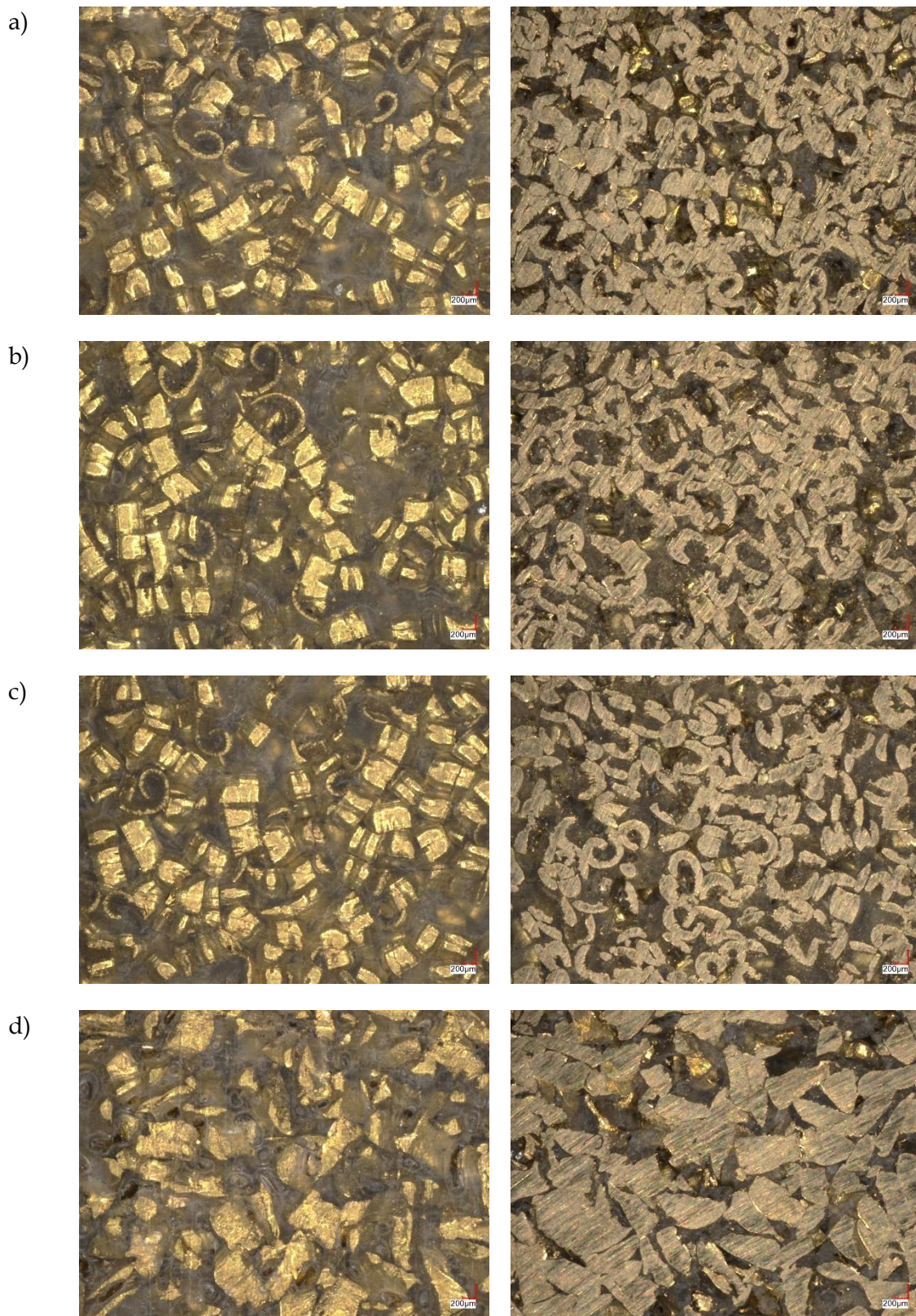
- a) próbka 1-PA5%/Al95%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm
- b) próbka 2-PA10%/Al90%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm
- c) próbka 3-PA15%/Al85%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm
- d) próbka 4-PA5%/Al95%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm
- e) próbka 5-PA10%/Al90%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm
- f) próbka 6-PA15%/Al85%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

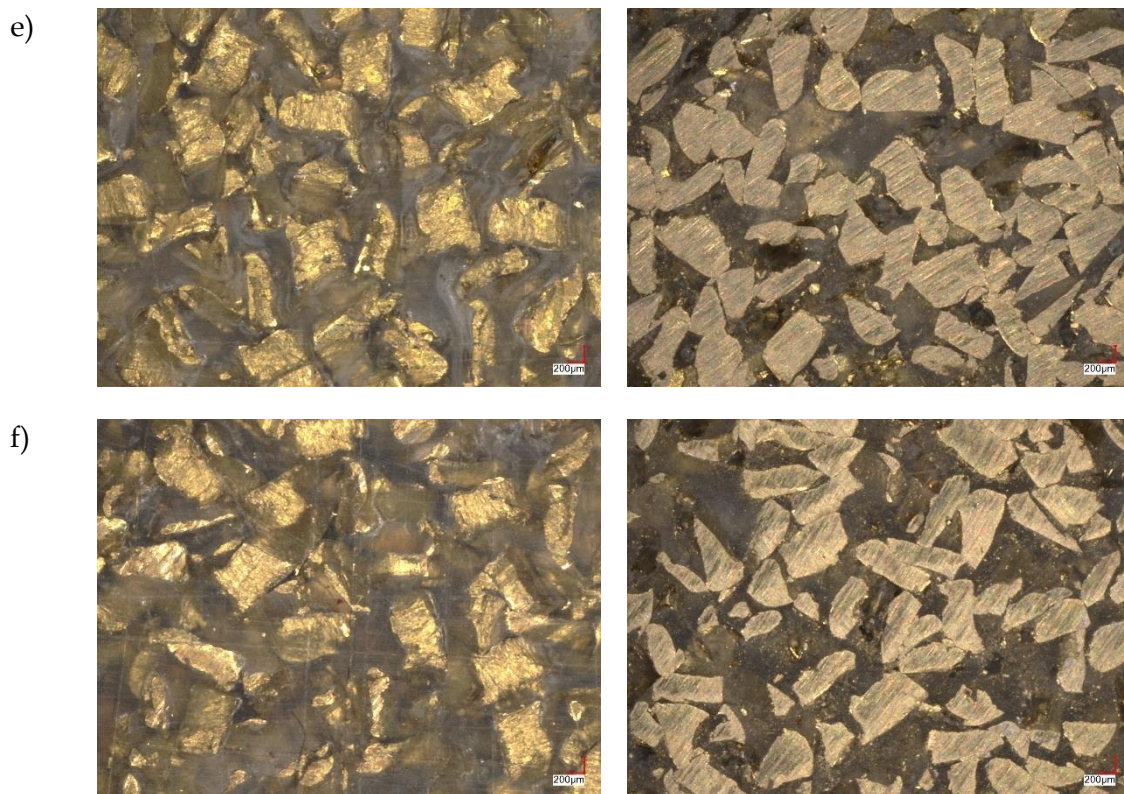
Wyniki badań wskazują, że mniejsze frakcje wiórów sprzyjają uzyskaniu bardziej jednorodnej powierzchni, a obróbka mechaniczna dodatkowo poprawia te właściwości, co jest istotne dla optymalizacji procesów produkcji kompozytów o wysokich wymaganiach jakościowych.

6.1.6 Badania makroskopowe kompozytu mosiądz - PA6

Celem przeprowadzonych badań była analiza wpływu frakcji wiórów mosiądzu oraz obróbki mechanicznej na jakość powierzchni kompozytów z PA6 i mosiądzu. Próbki kompozytowe zostały przygotowane z wiórów mosiądzu w dwóch frakcjach (0,2-0,4 mm oraz 0,4-0,6 mm) oraz trzech różnych proporcjach polimeru do wiórów (5%, 10%, 15% PA6). Badania miały na celu ocenę wpływu tych

zmiennych na morfologię powierzchni kompozytów zarówno przed, jak i po obróbce mechanicznej. Na rysunku 6.14 przedstawiono fotografie przed i po obróbce.





Rys. 6.14. Fotografie próbek kompozytowych z wiórów mosiądzu oraz poliamidu 6 przed obróbką i po obróbce:

- a) próbka 7-PA5%/M95%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm
- b) próbka 8-PA10%/M90%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm
- c) próbka 9-PA15%/M85%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm
- d) próbka 10-PA5%/M95%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm
- e) próbka 11-PA10%/M90%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm
- f) próbka 12-PA15%/M85%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

Przed obróbką próbki z frakcją wiórów 0,2-0,4 mm (7-PA5%/M95%/W0,4, 8-PA10%/M90%/W0,4, 9-PA15%/M85%/W0,4) charakteryzują się relatywnie jednolitą strukturą, jednak obecne są drobne nierówności i defekty, które mogą być wynikiem nierównomiernego rozmieszczenia mniejszych wiórów mosiądzu w matrycy polimerowej. Chociaż defekty te są mniejsze w skali, ich obecność może wpływać na właściwości mechaniczne kompozytu. Obróbka mechaniczna przyniosła znaczącą poprawę jakości powierzchni. Widoczna jest redukcja liczby defektów, a powierzchnie stały się bardziej gładkie i jednolite, co wskazuje, że obróbka skutecznie eliminuje mikrodefekty, poprawiając ogólną jakość powierzchni kompozytów.

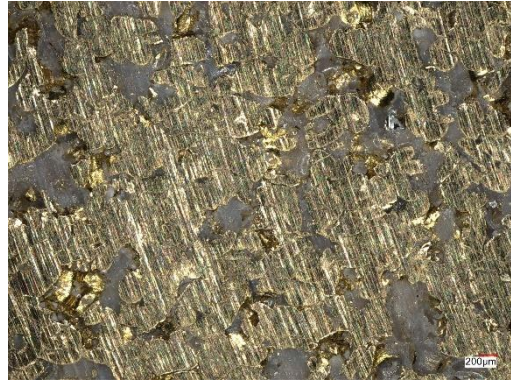
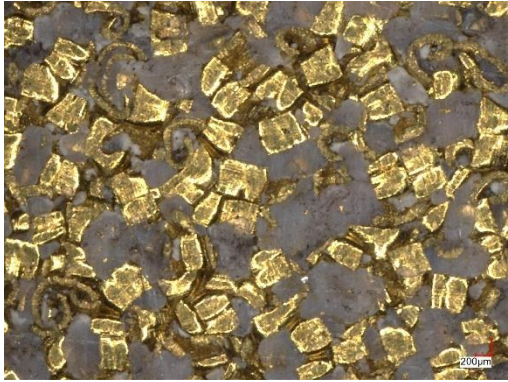
Natomiast próbki z większą frakcją wiórów (10-PA5%/M95%/W0,6, 11-PA10%/M90%/W0,6, 12-PA15%/M85%/W0,6) przed obróbką są bardziej zróżnicowane pod względem nierówności powierzchniowych. Mimo większej trudności w uzyskaniu idealnie jednorodnej powierzchni, obróbka mechaniczna znacząco poprawiła jakość tych próbek. Zredukowano liczbę i wielkość defektów, co wskazuje na skuteczność obróbki w poprawie strukturalnej jednorodności, nawet w próbkach z większymi wiórami.

Badania potwierdzają, że zarówno frakcja wiórów mosiądzu, jak i obróbka mechaniczna mają kluczowe znaczenie dla uzyskania wysokiej jakości powierzchni kompozytów z mosiądzu i PA6. Mniejsze frakcje wiórów sprzyjają uzyskaniu bardziej jednorodnych powierzchni. Wyniki te są kluczowe dla optymalizacji procesów produkcyjnych kompozytów, szczególnie w zastosowaniach wymagających wysokiej precyzji i trwałości powierzchni.

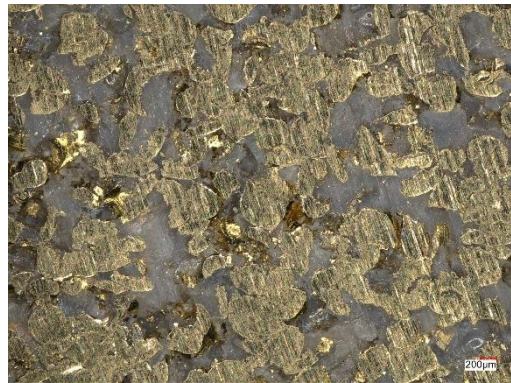
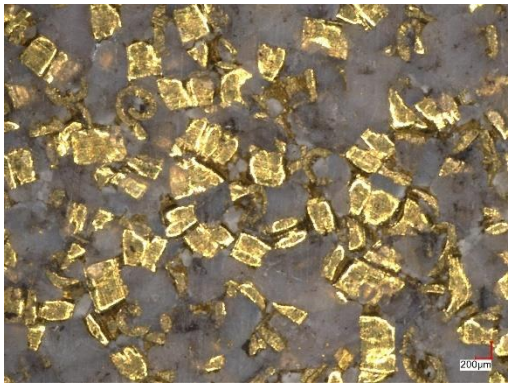
6.1.7. Badania makroskopowe kompozytu mosiądz -PEEK

W ramach niniejszych badań dokonano oceny wpływu rozmiaru frakcji wiórów mosiądzu oraz procesu obróbki mechanicznej na morfologię powierzchni kompozytów. Próbki kompozytowe przygotowano wykorzystując wióry mosiądzu o dwóch różnych frakcjach (0,2-0,4 mm oraz 0,4-0,6 mm) oraz trzech zróżnicowanych proporcjach wagowych PEEK do mosiądzu (5%, 10%, 15%). Badania miały na celu zidentyfikowanie zmian w topografii powierzchni kompozytów przed oraz po obróbce mechanicznej z naciskiem na ocenę efektywności tej obróbki w poprawie jakości powierzchni. Na rysunku (rys. 6.15.) przedstawiono fotografie próbek kompozytowych z wiórów mosiądzu i PEEK przed i po obróbce.

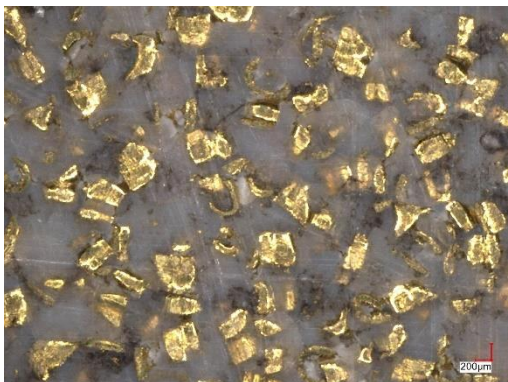
a)



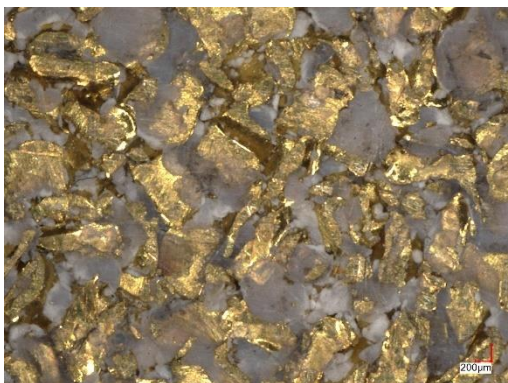
b)

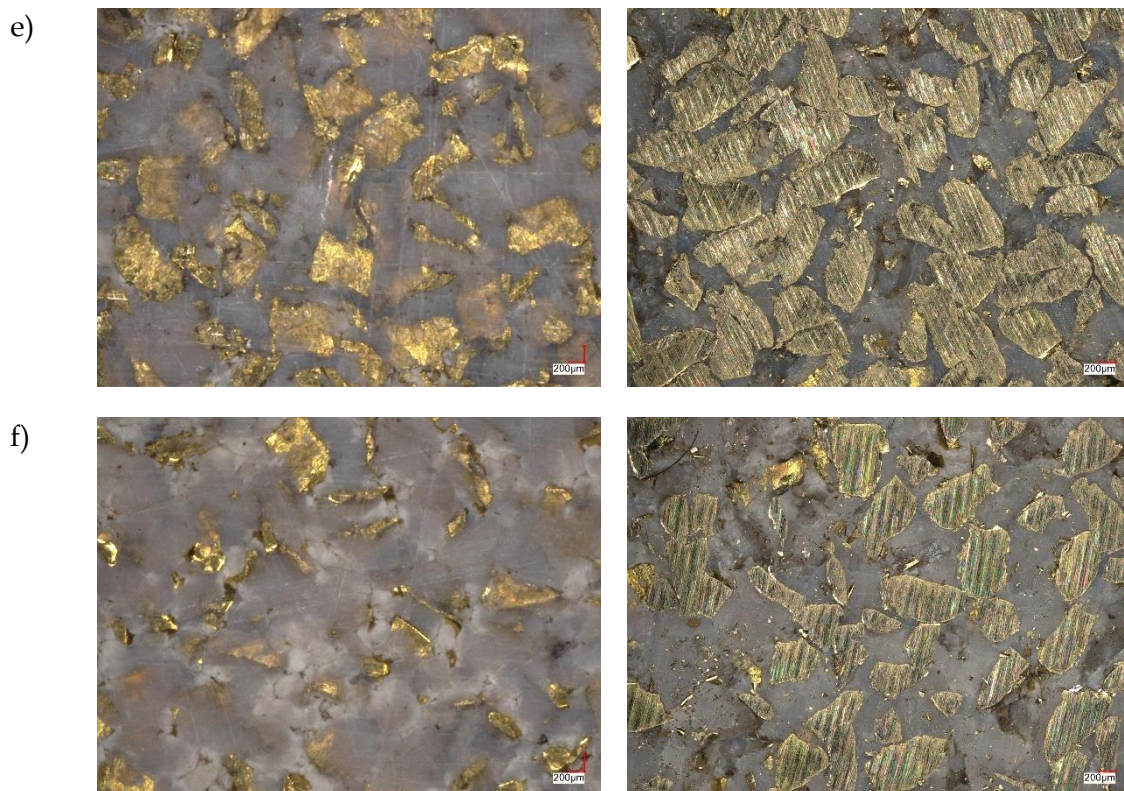


c)



d)





Rys. 6.15. Fotografie próbek kompozytowych z wiórów mosiądzu oraz PEEK przed obróbką i po obróbce:

- a) próbka 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm
- b) próbka 2'-PEEK10%/M90%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm
- c) próbka 3'-PEEK15%/M85%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm
- d) próbka 4'-PEEK5%/M95%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm
- e) próbka 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm
- f) próbka 6'-PEEK15%/M85%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

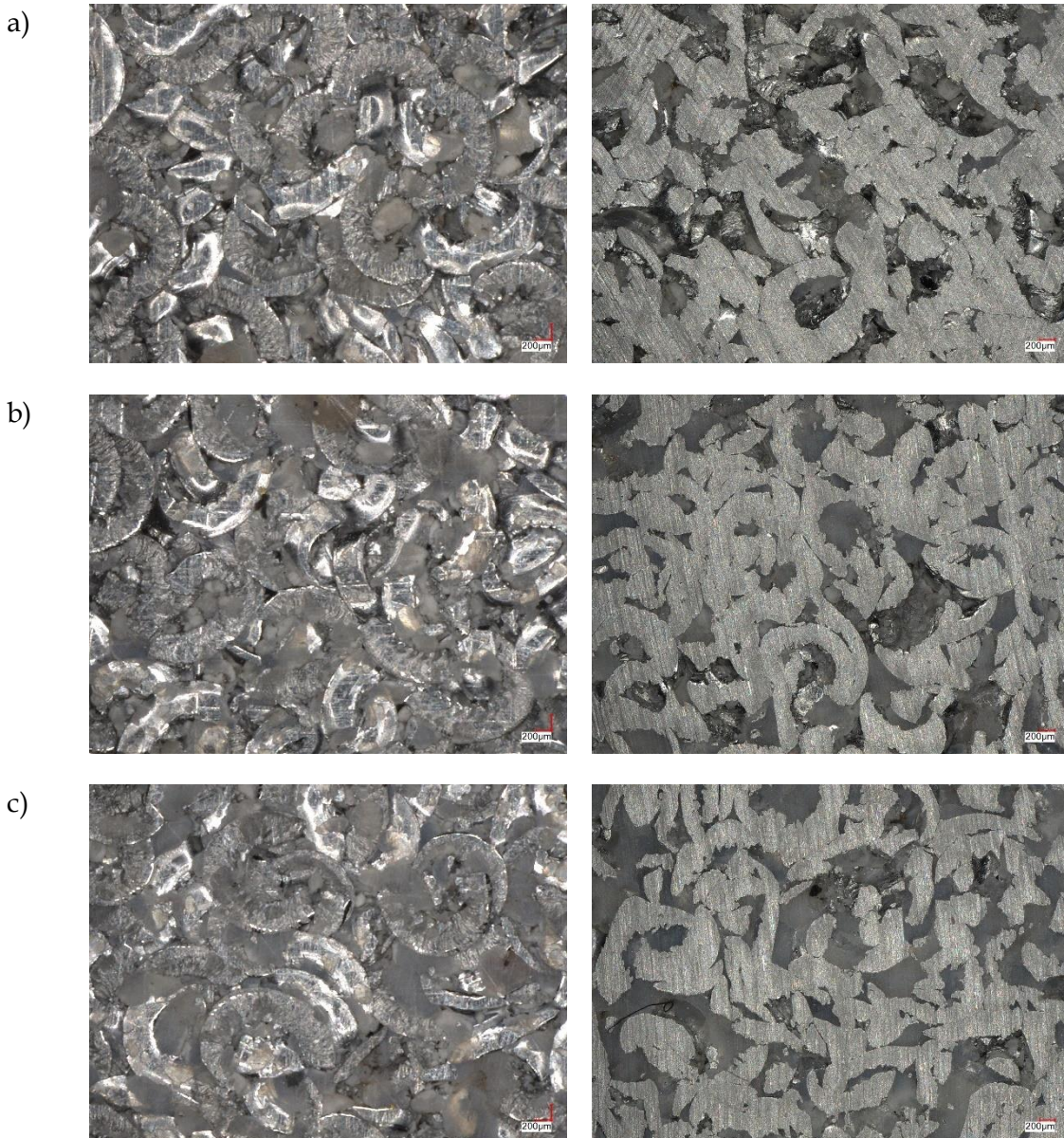
Analiza powierzchni próbek przed obróbką wykazała, że kompozyty z frakcją wiórów mosiądzu 0,2-0,4 mm charakteryzują się większą jednorodnością. W próbkach z większą frakcją wiórów tj. 0,4-0,6 mm stwierdzono występowanie bardziej wyraźnych nierówności oraz defektów, co może być rezultatem trudności w równomiernym rozmieszczeniu większych wiórów w polimerze.

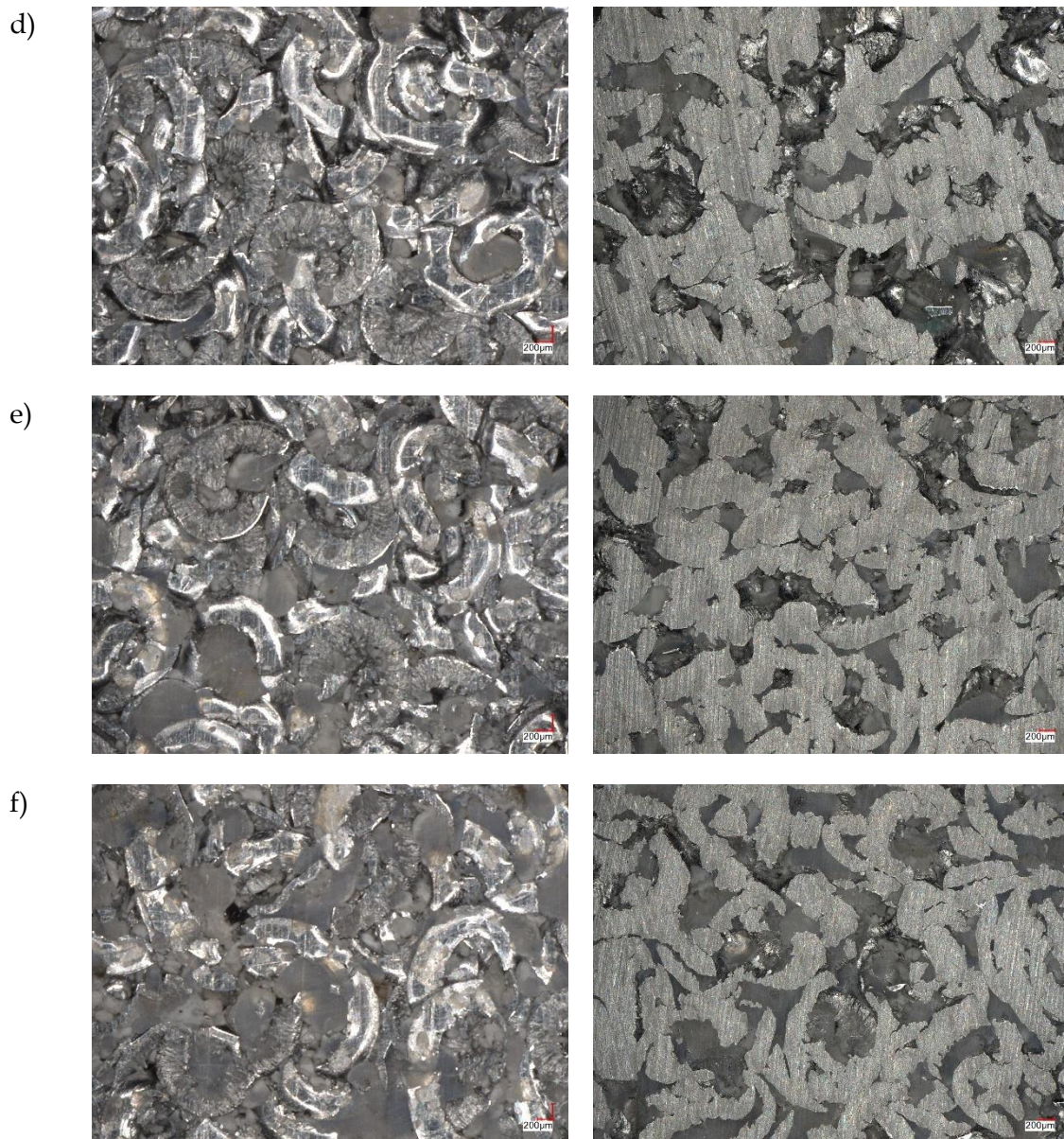
Po przeprowadzeniu obróbki mechanicznej zaobserwowano znaczną poprawę jakości powierzchni we wszystkich analizowanych próbkach. Obróbka mechaniczna była efektywna w redukcji defektów powierzchniowych, prowadząc do uzyskania bardziej gładkich i jednolitych powierzchni. W próbkach z mniejszą frakcją wiórów zmiany były mniej zauważalne, jednak zaobserwowano dalszą redukcję drobnych defektów oraz poprawę ogólnej gładkości powierzchni. W próbkach z większą frakcją

wiórów, obróbka mechaniczna znacząco zredukowała wcześniejsze nierówności, co świadczy o jej skuteczności w poprawie strukturalnej jednorodności kompozytów.

6.1.8 Badania makroskopowe kompozytu aluminium - PEEK

W ramach przeprowadzonych badań poddano analizie kompozyty składające się z polieteroeteroketonu (PEEK) oraz wiórów aluminiowych o różnych frakcjach (0,6–0,8 mm oraz 0,8–1,18 mm). Celem była szczegółowa ocena wpływu wielkości frakcji wiórów oraz obróbki mechanicznej na morfologię powierzchni tych kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem jednorodności powierzchni oraz występowania defektów. Na rysunku 6.16 przedstawiono fotografie próbek kompozytowych z wiórów aluminium i PEEK przed i po obróbce.





Rys. 6.16. Fotografie próbek kompozytowych z wiórów aluminium oraz PEEK przed obróbką i po obróbce:

- a) próbka 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm
- b) próbka 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm
- c) próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm
- d) próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm
- e) próbka 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm
- f) próbka 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

Porównanie wyników dla różnych frakcji wiórów wykazało, że mniejsze frakcje (0,6-0,8 mm) są bardziej sprzyjające dla uzyskania jednorodnej powierzchni już na etapie formowania kompozytu, co jest korzystne z punktu widzenia minimalizacji

defektów powierzchniowych. Z kolei większe frakcje wiórów (0,8–1,18 mm), choć początkowo prowadzą do powstawania większych nierówności, również mogą być skutecznie wygładzane za pomocą odpowiednio dobranego procesu obróbki mechanicznej.

Podsumowując, wszystkie próbki przed obróbką mechaniczną charakteryzowały się zwiększoną chropowatością, widocznymi nierównomiernościami oraz mikro ubytkami. Po obróbce mechanicznej zaobserwowano znaczną poprawę jakości powierzchni próbek. Powierzchnie stały się gładkie i bardziej jednolite, co skutkowało redukcją chropowatości oraz zmniejszeniem liczby mikro ubytków.

Jednym z kluczowych problemów w obróbce materiałów kompozytowych o badanej strukturze są źle dobrane narzędzia skrawające. Błędnie dobrane narzędzie może powodować wyrywanie wiórów, co prowadzi do uszkodzeń materiału oraz znacznego pogorszenia wytrzymałości mechanicznej i jakości powierzchni. Badania wykazały, że odpowiedni dobór narzędzi skrawających oraz parametrów obróbki jest kluczowy dla minimalizacji tych defektów.

6.2. Tomograficzna ocena struktury kompozytów

W badaniach tomograficznych przeprowadzono analizę materiałów kompozytowych o zróżnicowanych proporcjach wypełniacza metalicznego, o różnych frakcjach oraz osnowy (PA6 i PEEK) w różnych proporcjach wagowych. Celem badania było określenie wpływu tych proporcji na strukturę kompozytów, co jest kluczowe dla analizy zależności wpływu procesu przetwórstwa i właściwości termomechanicznych na proces obróbki skrawaniem. Do analizy próbek zastosowano tomografię komputerową przy użyciu systemu METROTOM 1500, co umożliwiło uzyskanie trójwymiarowych obrazów wewnętrznej struktury materiałów. Parametry skanowania tomograficznego były następujące: napięcie 130 kV, prąd 61 μ A, rozdzielczość (voxel) 0,034342 μ m, metoda skanowania 360-stopniowy, skan wokół osi próbki z automatyczną rekonstrukcją obrazów. Powyższe parametry pozwoliły na przeprowadzenie skanowania dla pełnej objętości próbki w czasie 40 minut

Tomograficzne obrazy trójwymiarowe uzyskano poprzez rekonstrukcję krzyżową. W analizie wykorzystano oprogramowanie Zeiss Inspekt X-Ray, które umożliwiło szczegółową ocenę składu procentowego poszczególnych faz, detekcję pustek oraz zanieczyszczeń w objętości próbek. Dzięki zastosowaniu kolorowej mapy gęstości przypisanej do różnych faz, możliwe było graficzne przedstawienie wyników oraz ich analizę. W założeniach badawczych w oprogramowaniu przyporządkowano kolory do zobrazowania materiału: czerwony – osnowa polimerowa, niebieski – faza metaliczna, biały – pory, czarny – zanieczyszczenia. Z użyciem oprogramowania obliczono dokładne procentowe wielkości udziału poszczególnych faz. Rezultaty obliczeń objętościowych dla czterech grup kompozytów przedstawiono w tabeli 6.9.


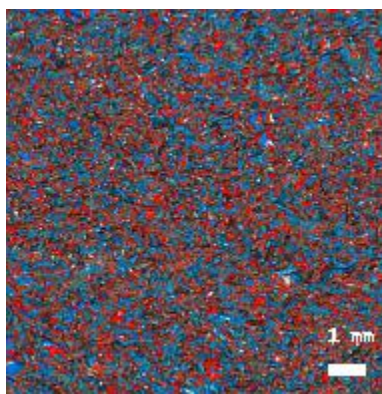
Tab. 6.9. Zestawienie procentowe udziału osnowy polimerowej, napełniacza metalicznego, pustek oraz zanieczyszczeń w badanych próbkach

Nr próbki	Wypełniacz metalowy [%]	Osnowa polimerowa [%]	Pory [%]	Wtrącenia [%]	Jednorodność składu [%]
1-PA5%/Al95%/W0,8	88,90	9,55	1,50	0,05	niska
2-PA10%/Al90%/W0,8	79,14	20,42	0,40	0,04	wysoka
3-PA15%/Al85%/W0,8	70,50	29,05	0,40	0,05	średnia
4-PA5%/Al95%/W1,18	88,90	9,45	1,60	0,05	niska
5-PA10%/Al90%/W1,18	79,14	20,57	0,25	0,04	wysoka
6-PA15%/Al85%/W1,18	70,50	28,25	1,20	0,05	niska
7-PA5%/M95%/W0,4	71,81	27,84	0,30	0,05	niska
8-PA10%/M90%/W0,4	54,68	45,03	0,25	0,04	wysoka
9-PA15%/M85%/W0,4	43,17	56,49	0,30	0,04	średnia
10-PA5%/M95%/W0,6	71,81	27,65	0,50	0,04	niska
11-PA10%/M90%/W0,6	54,68	44,97	0,30	0,05	wysoka
12-PA15%/M85%/W0,6	43,17	56,39	0,40	0,04	średnia
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	74,55	25,06	0,35	0,04	niska
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	58,12	41,55	0,30	0,03	wysoka
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	46,63	52,99	0,35	0,03	wysoka
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	74,55	24,81	0,60	0,04	niska
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	58,12	41,44	0,40	0,04	wysoka
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	46,63	52,92	0,40	0,05	średnia
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	90,21	9,34	0,40	0,05	niska
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	81,36	18,29	0,30	0,05	średnia
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	73,32	26,34	0,30	0,04	wysoka
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	90,21	8,45	1,30	0,04	niska
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	81,36	17,94	0,7	0,05	średnia
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	73,32	26,13	0,5	0,05	wysoka

Próbki z 5% zawartością tworzywa polimerowego zarówno PA6 i PEEK (1-PA5%/Al95%/W0,8, 7-PA5%/M95%/W0,4, 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8) nie były poddane szczegółowym badaniom tomograficznym, ponieważ wyniki poprzednich analiz wykazały, że tak niska zawartość osnowy nie rokowała dobrze pod względem właściwości strukturalnych i mechanicznych kompozytów. Główne powody, dla których próbki te nie zostały uwzględnione w dalszych badaniach, były następujące: wyraźne zaburzenia jednorodności strukturalnej, wyższa porowatość oraz niska integracja osnowy polimerowej z metalową. Na podstawie wcześniejszych wyników stwierdzono, że dalsze badania próbek z 5% zawartością tworzywa nie wykazują tendencji poprawy w zakresie kluczowych parametrów.

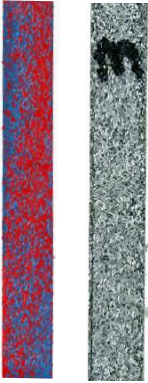
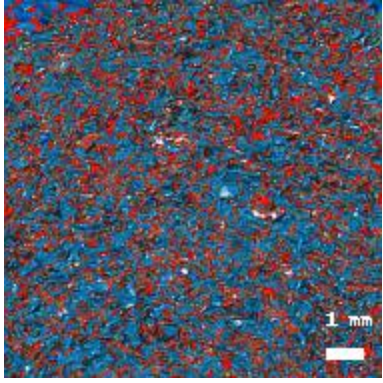
Próbka 2-PA10%/Al90%/W0,8 charakteryzuje się jednorodnością strukturalną, z dobrze zintegrowaną fazą metalową (tab. 6.10.). Wysoka zawartość fazy metalowej napełniacza o mniejszej frakcji przy relatywnie niskiej zawartości osnowy poliamidowej powoduje, że struktura jest niejednorodna, widoczne są agregacje przenikających się faz napełniacza i osnowy, co wpływa na właściwości mechaniczne. Porowatość na poziomie 0,4% wskazuje na obecność śladowych ilości pustek, które mogą wpływać na wytrzymałość materiału, co potwierdza wartość udarności w tej grupie kompozytów. Zanieczyszczenia na poziomie 0,04% objętości próbki powstałe podczas procesu produkcji potwierdzają wysoki stopień czystości materiału pochodzącego z recyklingu.

Tab. 6.10. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 2-PA10%/Al90%/W0,8

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 2-PA10%/Al90%/W0,8		
Frakcja wióra 0,6–0,8 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 20,42% - wypełnienie metalowe: 79,14% - pory: 0,4% - wtrącenia: 0,04%		

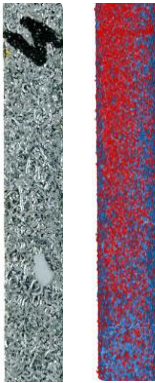
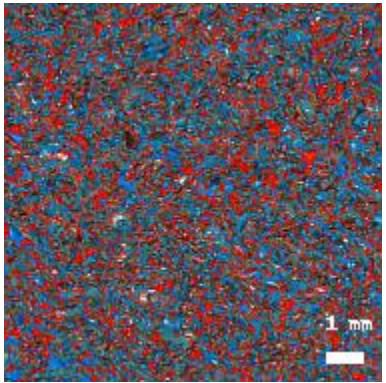
Wzrost zawartości PA6 do 15% (tab. 6.11.) powoduje równomierne pokrycie wiórów, jednak prowadzi do transmitowania osnowy na zewnątrz próbki w trakcie procesu prasowania na gorąco, co obserwuje się w warstwie zewnętrznej. Minimalna porowatość świadczy o bardzo dobrej kohezji między fazami. Pustki są praktycznie nieobecne, co wskazuje, że większa ilość PA6 skutecznie eliminuje defekty strukturalne. Śladowe ilości zanieczyszczeń na poziomie 0,05% objętości próbki potwierdzają wysoki stopień czystości materiału.

Tab. 6.11. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 3-PA15%/Al85%/W0,8		
Frakcja wióra 0,6-0,8 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 29,05% - wypełnienie metalowe: 70,50% - pory: 0,4% - wtrącenia: 0,05%		


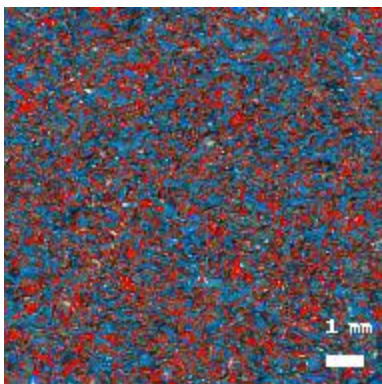
Próbka 4-PA5%/Al95%/W1,18 charakteryzuje się wyraźną niejednorodnością strukturalną, wynikającą z niskiej zawartości osnowy polimerowej oraz dużej frakcji wiórów metalowych (tab. 6.12.). Zbyt mała ilość osnowy poliamidowej przy większej frakcji wiórów sprawia, że struktura materiału jest niejednorodna, a fazy napelnacza i osnowy nie są dobrze zintegrowane. W wyniku tego powstają liczne pustki, zwłaszcza wokół większych cząstek napelnacza, co negatywnie wpływa na właściwości mechaniczne kompozytu. Porowatość na poziomie 1,6% świadczy o obecności znacznych ilości pustek, które mogą osłabiać materiał, szczególnie w miejscach koncentracji wiórów. Mimo to, zanieczyszczenia na poziomie 0,05% objętości próbki wskazują na wysoki stopień czystości materiału, co jest wynikiem precyzyjnego procesu sortowania oraz obróbki.

Tab. 6.12. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 4-PA5%/Al95%/W1,18

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 4-PA5%/Al95%/W1,18		
Frakcja wióra 0,8-1,18 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 9,45% - wypełnienie metalowe: 88,90% - pory: 1,6% - wtrącenia: 0,05%		


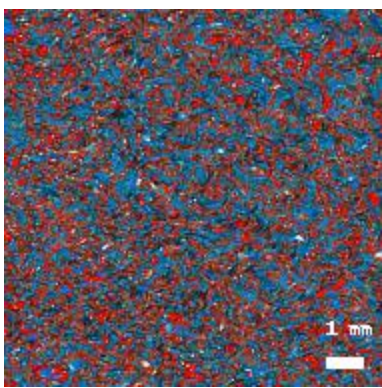
Dla próbki kompozytu z 10% zawartością PA6 i frakcji wiórów 0,8-1,18 mm (tab. 6.13.) zaobserwowano bardziej jednorodną strukturę w porównaniu do próbek o niższej zawartości osnowy. Umiarkowana porowatość i niewielka ilość pustek w obszarach o większej koncentracji wiórów sprawiają, że materiał zachowuje swoje właściwości mechaniczne, co świadczy o efektywnym rozłożeniu fazy osnowy i napełniacza. W związku z tym fazy napełniacza i osnowy są dobrze zintegrowane. Minimalna ilość wtrąceń (0,04%) dowodzi wysokiej jakości i czystości materiału, co pozytywnie wpływa na jego trwałość i wytrzymałość mechaniczną. Porowatość próbki jest śladowa, co oznacza, że pustki są obecne w materiale i występują w obszarach, gdzie koncentracja wiórów jest większa, ale ich wpływ na właściwości mechaniczne próbki jest ograniczony. Niewielkie pory mogą powstawać na skutek niepełnego wypełnienia przestrzeni między wiórami przez osnowę, ale mimo to materiał wykazuje stosunkowo dobrą wytrzymałość.

Tab. 6.13. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 5-PA10%/Al90%/W1,18

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 5-PA10%/Al90%/W1,18		
Frakcja wióra 0,8-1,18 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 20,57% - wypełnienie metalowe: 79,14% - pory: 0,25% - wtrącenia: 0,04%		

Zwiększenie zawartości PA6 do 15% przy frakcji wiórów 0,8-1,18 mm poprawia jednorodność struktury (tab. 6.14.). Transmisja osnowy na powierzchnię próbki nie jest tak wyraźna jak przy mniejszej frakcji wiórów, tym samym struktura kompozytu jest bardziej zbalansowana. Podwyższona porowatość (1,2%) wskazuje, że większa ilość osnowy nie do końca wypełnia przestrzenie między wiórami, powodując powstawanie pustek. Pustki występują głównie w miejscach, gdzie wióry są blisko siebie. Zaobserwowano niski poziom wtrąceń (0,05% objętości próbki), co świadczy o wysokiej czystości materiału. Minimalne wtrącenia potwierdzają staranność procesu produkcji oraz selekcji surowców, co jest istotne z punktu widzenia stabilności i długotrwałej wytrzymałości kompozytu.

Tab. 6.14. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18


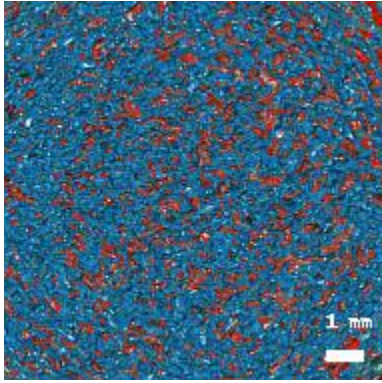
Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 6-PA15%/Al85%/W1,18		
Frakcja wióra 0,8-1,18 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 28,25% - wypełnienie metalowe: 70,50% - pory: 1,2% - wtrącenia: 0,05%		

Podsumowując badania wykazały, że kompozyty z wyższym udziałem PA6 (15%) mają tendencję do tworzenia zewnętrznej warstwy osnowy, co skutkuje transmitowaniem osnowy na powierzchnię próbki w trakcie prasowania. Takie zjawisko obserwowano szczególnie w próbkach z mniejszą frakcją wiórów (0,6–0,8 mm), gdzie rozkład fazy metalowej był bardziej jednorodny. Z kolei próbki z niższą zawartością PA6 (5%) charakteryzowały się większą liczbą pustek, co może wynikać z niewystarczającego wypełnienia przestrzeni między wiórami aluminiowymi przez osnowę.

W przypadku części próbek z większą frakcją wiórów (0,8–1,18 mm) jednorodność struktury była mniej korzystna. Wyniki wskazały, że próbki z mniejszą frakcją wiórów (0,6–0,8 mm) charakteryzowały się mniejszą porowatością, co pozytywnie wpływa na integralność strukturalną kompozytu. W próbkach z większą frakcją wiórów (0,8–1,18 mm) stwierdzono większą liczbę pustek, co może prowadzić do pogorszenia właściwości mechanicznych.


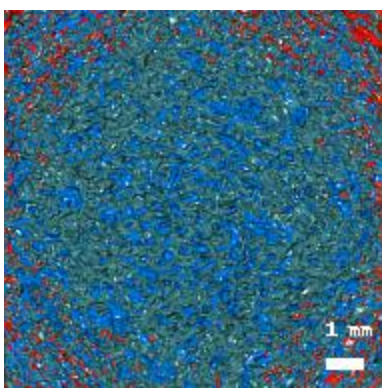
W przypadku kompozytów PA6 z napelniaczem w postaci wiórów mosiądzu zarejestrowano odmienną charakterystykę struktury. Dla próbki 8-PA10%/M90%/W0,4 (tab. 6.15.) stwierdzono znaczną jednorodność w ułożeniu składników kompozytu w strukturze, co jest wynikiem stosunkowo małej frakcji wiórów mosiądzu (0,2–0,4 mm) i wystarczającej ilości osnowy do pełnego wypełnienia przestrzeni między wiórami. Niska porowatość (0,25%) pozytywnie wpływa na integralność strukturalną próbki. Brak znaczących pustek zapewnia dobre właściwości mechaniczne kompozytu. Minimalna ilość wtrąceń, wynosząca zaledwie 0,04%, wskazuje na wysoką czystość materiału. Niski poziom wtrąceń jest wynikiem starannego procesu produkcji oraz precyzyjnej selekcji surowców. Dzięki temu kompozyt zachowuje wysokie standardy jakościowe, co jest istotne dla zapewnienia jego wytrzymałości.

Tab. 6.15. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 8-PA10%/M90%/W0,4

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 8-PA10%/M90%/W0,4		
Frakcja wióra 0,2-0,4 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 45,03% - wypełnienie metalowe: 54,68% - pory: 0,25% - wtrącenia: 0,04%		

Wzrost zawartości PA6 nie powoduje równomiernego pokrycia wiórów (tab. 6.16.), a prowadzi do dyfundowania osnowy na zewnątrz próbki, co obserwuje się w warstwie zewnętrznej. Obecność pustek na poziomie 0,3% objętości próbki potwierdza występowanie niewielkiego osłabienia w strukturze, szczególnie w miejscach koncentracji pustek. Niewielkie pustki mogą prowadzić do lokalnego osłabienia materiału, co może wpływać na jego wytrzymałość na rozciąganie lub ściskanie. Próbka charakteryzuje się minimalną ilością wtrąceń (0,04%), co świadczy o wysokiej czystości materiału. Proces produkcji próbek wydaje się być dokładny, a surowce starannie dobrane, co pozwala na utrzymanie wysokiej jakości kompozytu.


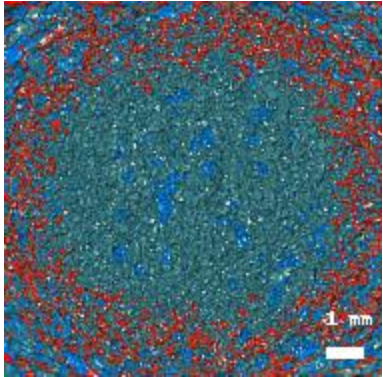
Tab. 6.16. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 9-PA15%/M85%/W0,4

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 9-PA15%/M85%/W0,4		
Frakcja wióra 0,2-0,4 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 56,49% - wypełnienie metalowe: 43,17% - pory: 0,3% - wtrącenia: 0,04%		

Niższa zawartość PA6 (5%) i frakcja wiórów mosiądzu (0,4-0,6 mm) (tab. 6.17.) prowadzą do znacznych niejednorodności w strukturze. Wióry nie są w pełni


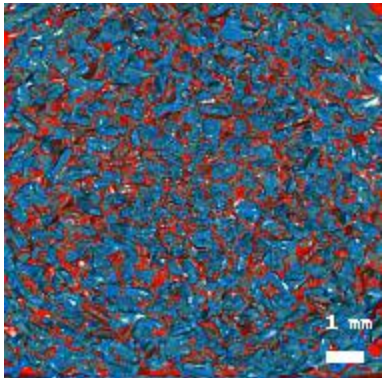
otoczone osnową, co może prowadzić do lokalnych defektów. Umiarkowana porowatość (0,5%), wynika z niewystarczającej ilości osnowy do efektywnego wypełnienia przestrzeni. Fakt występowania pustek, może negatywnie wpływać na wytrzymałość kompozytu, zwłaszcza pod obciążeniami dynamicznymi. Śladowe wtrącenia na poziomie 0,04% objętości próbki wskazują na doskonałą stabilność procesu produkcji, który minimalizuje ryzyko zanieczyszczeń. Optymalizacja zawartości osnowy mogłaby pomóc w osiągnięciu bardziej jednorodnej struktury, co poprawiłoby właściwości mechaniczne kompozytu, szczególnie w zakresie wytrzymałości oraz zmniejszyło ryzyko występowania defektów strukturalnych.

Tab. 6.17. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 10-PA5%/M95%/W0,6

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 10-PA5%/M95%/W0,6		
Frakcja wióra 0,4-0,6 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 27,65% - wypełnienie metalowe: 71,81% - pory: 0,5% - wtrącenia: 0,04%		


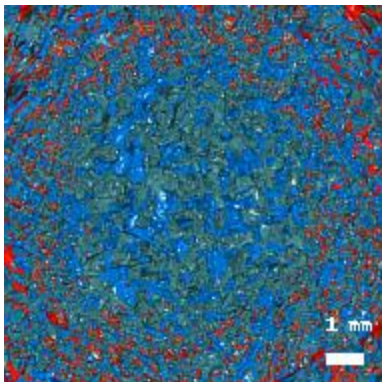
W przypadku próbki z 10% zawartością PA6 i frakcji wiórów 0,4-0,6 mm (tab. 6.18.) struktura jest bardziej jednolita niż w próbce z 5% PA6, jednakże wciąż obecne są miejsca o wyższej koncentracji wiórów, co może powodować lokalne zagęszczenia. Porowatość w próbce jest niska, wynosząca 0,3%, co wskazuje na dobrą integrację osnowy z fazą metalową. Niska porowatość przekłada się na wysoką spójność strukturalną i minimalizuje ryzyko wystąpienia pustek, które mogłyby negatywnie wpływać na wytrzymałość mechaniczną materiału. W porównaniu z próbkami o niższej zawartości PA6, ta próbka wykazuje bardziej solidną strukturę z mniejszą liczbą defektów. Obecność pustek jest minimalna, a osnowa dobrze wypełnia przestrzenie między wiórami. Niewielka ilość wtrąceń (0,05%) dodatkowo potwierdza wysoką jakość kompozytu i stabilność procesu produkcji.

Tab. 6.18. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 11-PA10%/M90%/W0,6

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 11-PA10%/M90%/W0,6		
Frakcja wióra 0,4-0,6 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 44,97% - wypełnienie metalowe: 54,68% - pory: 0,3% - wtrącenia: 0,05%		

Większa zawartość PA6 (15%) i frakcja wiórów (0,4-0,6 mm) (tab. 6.19.) prowadzą do dobrej jednorodności struktury, natomiast również zaobserwowano transmitowanie osnowy na zewnątrz próbki. Porowatość próbki jest bardzo niska, wynosząca zaledwie 0,4%, co jest wynikiem dobrej integracji osnowy z wiórami, co oznacza, że proces produkcji zapewnił solidną jakość wykonania kompozytu. Zachowanie wysokiej integralności strukturalnej próbki minimalizuje ryzyko wystąpienia defektów strukturalnych, takich jak pęknięcia czy osłabienia materiału. Przekłada się to na lepszą trwałość i wytrzymałość mechaniczną kompozytu. Wtrącenia stanowią jedynie 0,04% objętości próbki, co dodatkowo podkreśla wysoki standard produkcji i dobrą kontrolę procesu. Taki niski poziom defektów przyczynia się do poprawy ogólnych właściwości mechanicznych materiału.

Tab. 6.19. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 12-PA15%/M85%/W0,6


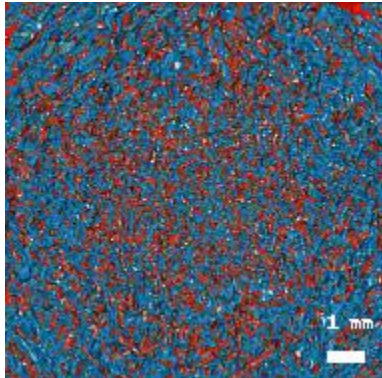
Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 12-PA15%/M85%/W0,6		
Frakcja wióra 0,4-0,6 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 56,39% - wypełnienie metalowe: 43,17% - pory: 0,4% - wtrącenia: 0,04%		

Badane próbki wykazały zróżnicowaną jednorodność strukturalną, poziom porowatości, obecność pustek oraz śladowe ilości zanieczyszczeń. Próbki z mniejszą frakcją wiórów (0,2–0,4 mm) i wyższą zawartością osnowy PA6 (10–15%) charakteryzowały się lepszą jednorodnością strukturalną oraz niższą porowatością, co pozytywnie wpłynęło na integralność materiału. Z kolei próbki o większej frakcji wiórów (0,4–0,6 mm) i niższej zawartości osnowy (5%) wykazywały pewną niejednorodność, co prowadziło do lokalnych defektów strukturalnych i nieco wyższej porowatości.

W przypadku zastosowania do wytworzenia kompozytów jako osnowy tworzywa PEEK zarejestrowano w badaniach tomograficznych znaczne różnice w strukturze w zależności od rodzaju, zawartości i frakcji napelnacza.


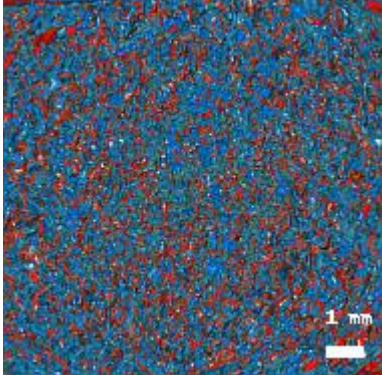
W przypadku 10% zawartości PEEK w kompozycie, polimer skutecznie wypełnia przestrzenie między wiórami mosiężnymi, szczególnie przy frakcji wiórów 0,2–0,4 mm (tab. 6.20.). Struktura jest jednorodna z dobrze zintegrowanymi fazami. Porowatość próbki jest bardzo niska i wynosi 0,4%. Niska porowatość oznacza, że przestrzenie między wiórami zostały efektywnie wypełnione osnową polimerową, co przyczynia się do zachowania wysokiej integralności strukturalnej próbki. Obecność pustek jest minimalna, co świadczy o dobrze przeprowadzonym procesie produkcji. Wtrącenia wynoszą jedynie 0,03%, co wskazuje na wysoki poziom czystości próbki oraz minimalną ilość zanieczyszczeń, co dodatkowo zwiększa spójność strukturalną i wytrzymałość kompozytu.

Tab. 6.20. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 2'-PEEK10%/M90%/W0,4

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 2'-PEEK10%/M90%/W0,4		
Frakcja wióra 0,2–0,4 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 41,55% - wypełnienie metalowe: 58,12% - pory: 0,4% - wtrącenia: 0,03%		

Wysoka zawartość PEEK (15%) i mała frakcja wiórów mosiądzu (0,2–0,4 mm) (tab. 6.21.) sprzyjają uzyskaniu bardzo jednolitej struktury, z równomiernym rozłożeniem fazy metalowej. Porowatość w próbce jest bardzo niska i wynosi 0,35% objętości próbki, co świadczy o wysokim poziomie wypełnienia osnową i doskonałej integracji z wypełnieniem. Niska porowatość ogranicza obecność defektów w strukturze, co pozytywnie wpływa na wytrzymałość materiału i jego stabilność podczas eksploatacji. Dzięki temu kompozyt jest bardziej odporny na pęknięcia oraz inne defekty mechaniczne. Pustki są równomiernie rozproszone w strukturze kompozytu, co pomaga zachować jego spójność. Wtrącenia wynoszą jedynie 0,03%, co wskazuje na minimalną obecność zanieczyszczeń i wysoką czystość materiału. Niskie wtrącenia świadczą o wysokiej jakości procesu produkcji, co przekłada się na trwałość kompozytu i jego niezawodność w długoterminowej eksploatacji.

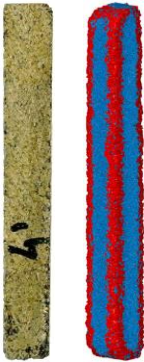
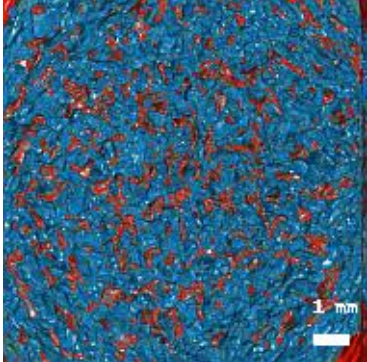
Tab. 6.21. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 3'-PEEK15%/M85%/W0,4

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 3'-PEEK15%/M85%/W0,4		
Frakcja wióra 0,2–0,4 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: – osnowa polimerowa: 52,99% – wypełnienie metalowe: 46,63% – pory: 0,35% – wtrącenia: 0,03%		

Niska zawartość PEEK (5%) i frakcja wiórów 0,4–0,6 mm prowadzą do mniej jednolitej struktury, z miejscami niepełnego pokrycia wiórów osnową (tab. 6.22.). Integracja fazy polimerowej z metalową jest nieoptymalna. Miejsca z niepełnym pokryciem wiórów osnową polimerową prowadzą do lokalnych osłabień struktury. Porowatość na poziomie 0,6% świadczy o obecności pustek, które również mogą osłabiać strukturę kompozytu. Pustki te powstają w miejscach, gdzie osnowa nie wypełnia w pełni przestrzeni między wiórami mosiądzu, co może prowadzić do obniżenia wytrzymałości. Wtrącenia na poziomie 0,04% są minimalne, co wskazuje na dobrą jakość procesu produkcji, ale nie kompensuje to efektów wynikających


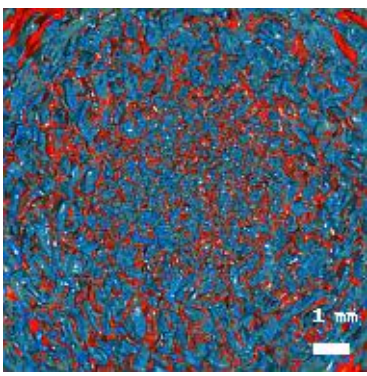
z niepełnego wypełnienia osnową. Kompozyt ten jest mniej wytrzymały w porównaniu do próbek o wyższej zawartości PEEK. Optymalizacja zawartości osnowy mogłaby poprawić jednorodność struktury i wytrzymałość na obciążenia.

Tab. 6.22. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 4'-PEEK5%/M95%/W0,6

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 4'-PEEK5%/M95%/W0,6		
Frakcja wióra 0,4-0,6 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 24,81% - wypełnienie metalowe: 74,55% - pory: 0,6% - wtrącenia: 0,04%		


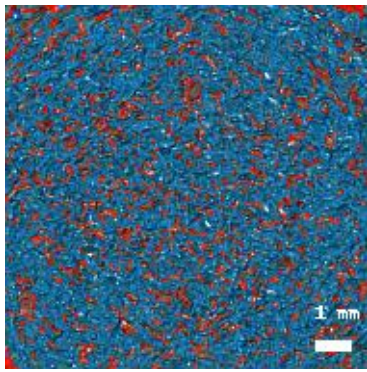
Przy 10% zawartości PEEK i frakcji wiórów 0,4-0,6 mm struktura jest bardziej jednorodna w porównaniu z próbką z 5% PEEK, ale wciąż mogą występować lokalne zagęszczenia fazy metalowej (tab. 6.23.). Niska porowatość próbki, wynosząca 0,4%, wskazuje na dobrze wypełnione przestrzenie między wiórami, co ogranicza obecność pustek i zwiększa integralność strukturalną kompozytu. Mniejsza liczba pustek przekłada się na poprawę wytrzymałości materiału na obciążenia mechaniczne, a także jego odporność na pęknięcia i inne defekty. Wtrącenia na poziomie 0,04% wskazują na minimalną ilość zanieczyszczeń, co sprzyja zachowaniu spójności strukturalnej i trwałości kompozytu.

Tab. 6.23. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 5'-PEEK10%/M90%/W0,6		
Frakcja wióra 0,4-0,6 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 41,44% - wypełnienie metalowe: 58,12% - pory: 0,4% - wtrącenia: 0,04%		

Przy 15% zawartości PEEK i frakcji wiórów 0,4–0,6 mm kompozyt wykazuje dobrą jednorodność struktury (tab. 6.24.). Ponownie zaobserwowano przenikanie osnowy na zewnątrz próbki, co obserwuje się w warstwie zewnętrznej próbki. Większa ilość osnowy skutecznie otacza wióry minimalizując defekty, a znikoma porowatość potwierdza wysoką efektywność wypełnienia przestrzeni między wiórami. Porowatość na poziomie 0,4% potwierdza, że struktura kompozytu jest wyjątkowo spójna, a minimalna liczba pustek ogranicza ryzyko powstawania defektów, co zwiększa wytrzymałość mechaniczną materiału. Chociaż wtrącenia wynoszą 0,05%, co jest minimalnym poziomem, ich obecność nie wpływa znacząco na integralność strukturalną kompozytu. Wysoka zawartość osnowy skutecznie wypełnia przestrzenie między wiórami, co sprzyja zachowaniu integralności materiału, a liczba pustek jest znikoma.

Tab. 6.24. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 6'-PEEK15%/M85%/W0,6

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 6'-PEEK15%/M85%/W0,6		
Frakcja wióra 0,4–0,6 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 52,92% - wypełnienie metalowe: 46,63% - pory: 0,4% - wtrącenia: 0,05%		


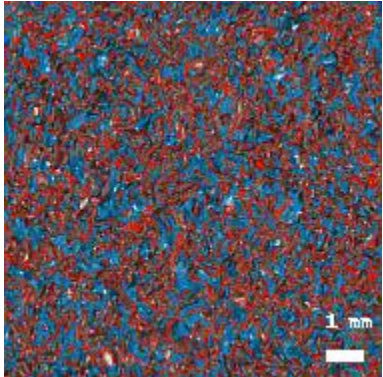
Podsumowując próbki zawierające mniejsze frakcje wiórów (0,2–0,4 mm) wykazały większą jednorodność strukturalną, co przekłada się na lepsze właściwości mechaniczne kompozytów. Większa frakcja wiórów (0,4–0,6 mm) prowadziła do pojawienia się niejednorodności i miejscowego osłabienia struktury, co może negatywnie wpływać na wytrzymałość materiału.

Próbki o wyższej zawartości PEEK (10% i 15%) charakteryzowały się lepszym pokryciem wiórów mosiężnych osnową i niższą porowatością, co sprzyjało zachowaniu wysokiej integralności strukturalnej i wytrzymałości mechanicznej.

Z kolei niższa zawartość osnowy (5%) prowadziła do niepełnego otoczenia wiórów, zwiększonej porowatości i obecności liczniejszych pustek.

Wyniki badań tomograficznych kompozytów PEEK z wiórami aluminium zestawiono w tabelach 6.25–6.29. Przy średniej zawartości PEEK (10%) i frakcji wiórów aluminium 0,6–0,8 mm (tab. 6.25.) struktura jest jednorodna, z równomiernym rozłożeniem wiórów w osnowie. Równomierne rozłożenie wiórów w całej objętości kompozytu ogranicza powstawanie defektów, takich jak lokalne zagęszczenia fazy metalowej, co korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne próbki. Niska porowatość na poziomie 0,3% zapewnia wysoką integralność strukturalną. Równomierne rozmieszczenie pustek ma umiarkowany wpływ na strukturę kompozytu. Wtrącenia na poziomie 0,05% są minimalne, co wskazuje na wysoki poziom czystości próbki, co również pozytywnie wpływa na jej właściwości mechaniczne.


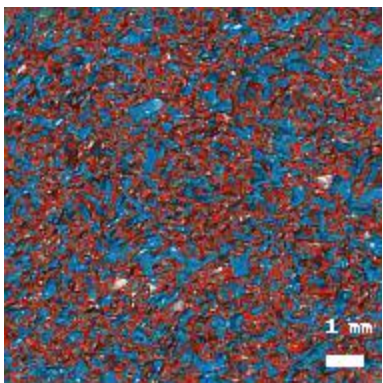
Tab. 6.25. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8		
Frakcja wióra 0,6–0,8 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 18,29% - wypełnienie metalowe: 81,36% - pory: 0,3% - wtrącenia: 0,05%		

Zwiększenie zawartości PEEK do 15% przy frakcji wiórów 0,6–0,8 mm (tab. 6.26.) sprzyja uzyskaniu bardzo jednolitej struktury. Osnowa polimerowa skutecznie otacza wióry, co zapewnia doskonałe wypełnienie przestrzeni między nimi, ograniczając powstawanie defektów i zwiększając spójność strukturalną. Kompozyt cechuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną dzięki optymalnemu rozkładowi fazy polimerowej i metalowej. Minimalna porowatość na poziomie 0,30% potwierdza doskonałe wypełnienie przestrzeni między wiórami. Rozproszone pustki są niewielkie i nie mają znaczącego wpływu na integralność strukturalną kompozytu,


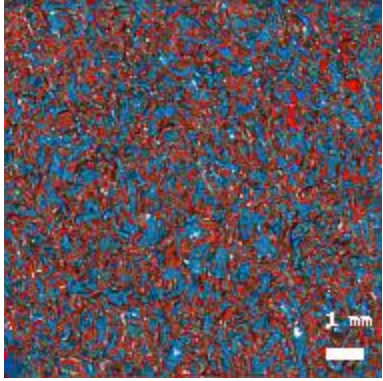
co pozwala zachować wysoką wytrzymałość materiału. Niska porowatość minimalizuje ryzyko powstawania osłabień w strukturze, co zwiększa odporność kompozytu na obciążenia mechaniczne. Obecność wtrąceń na poziomie 0,04% objętości potwierdza doskonałą homogenizację mieszanki, co skutkuje wysoką czystością materiału.

Tab. 6.26. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8		
Frakcja wióra 0,6-0,8 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 26,34% - wypełnienie metalowe: 73,32% - pory: 0,30% - wtrącenia: 0,04%		

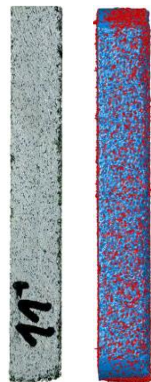
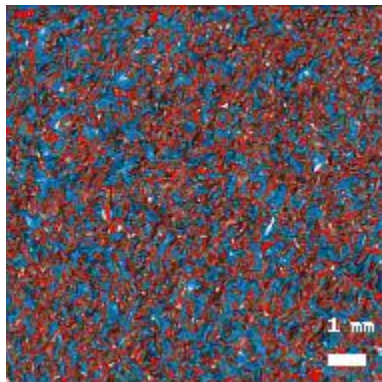
Dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 zarejestrowano wyraźne zaburzenia jednorodności struktury, wynikające z niskiej zawartości osnowy PEEK (5%) w połączeniu z dużą frakcją wiórów aluminiowych (0,8-1,18 mm) (tab. 6.27.). Niewystarczająca ilość osnowy skutkuje niepełnym otoczeniem wiórów, co prowadzi do powstawania nieciągłości w strukturze kompozytu. Porowatość wynosi 1,3% objętości próbki, można ją uznać za stosunkowo niską. Niemniej jednak, przy większej frakcji wiórów (0,8-1,18 mm), taka porowatość może prowadzić do powstania lokalnych pustek w strukturze, zwłaszcza w miejscach, gdzie wióry nie są w pełni otoczone osnową. Niewielka ilość wtrąceń (0,04% objętości próbki) świadczy o wysokiej czystości materiału i skutecznym procesie produkcyjnym, który minimalizuje ryzyko zanieczyszczeń. Jednakże, niska zawartość wtrąceń nie kompensuje negatywnego wpływu wynikającego z niejednorodności struktury i podwyższonej porowatości.

Tab. 6.27. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18		
Fracja wióra 0,8-1,18 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 8,45% - wypełnienie metalowe: 90,21% - pory: 1,3% - wtrącenia: 0,04%		


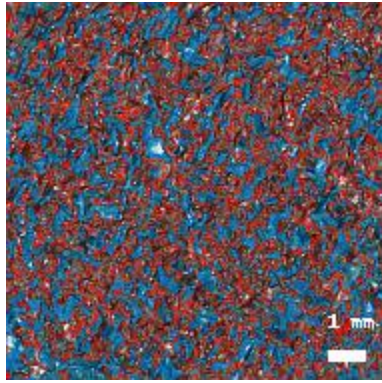
Dla próbki 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18 przy tej samej frakcji wiórów, ale z wyższą zawartością osnowy (10%) (tab. 6.28.), zarejestrowano lepszą jednorodność strukturalną, zauważono jednak pewne nieciągłości wynikające z dużego rozmiaru wiórów. Niemniej jednak, rozmiar wiórów (0,8-1,18 mm) powoduje pewne nieciągłości, szczególnie w miejscach, gdzie osnowa nie jest w stanie w pełni otoczyć wiórów. To zjawisko może prowadzić do powstawania lokalnych obszarów o mniejszej wytrzymałości mechanicznej. Porowatość wynosząca 0,7% wskazuje na średnią jakość wypełnienia osnową przestrzeni między wiórami. Choć jest ona mniejsza niż w próbce z niższą zawartością PEEK, obecność pustek nadal wpływa na spójność struktury i jej wytrzymałość. Obecność wtrąceń na poziomie 0,05% świadczy o dobrym procesie produkcji, jednak wpływ tych wtrąceń jest minimalny w porównaniu do nieciągłości wynikających z dużej frakcji wiórów i porowatości. Zwiększenie zawartości osnowy przyczynia się do zmniejszenia ilości pustek, jednak nadal występują obszary, gdzie osnowa nie wypełnia przestrzeni w sposób wystarczający.

Tab. 6.28. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18		
Frakcja wióra 0,8-1,18 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 17,94% - wypełnienie metalowe: 81,36% - pory: 0,7% - wtrącenia: 0,05%		

Badania wykazały, że struktura próbki 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18 (tab. 6.29.) ulega poprawie wraz ze wzrostem procentowym osnowy. Osnowa skutecznie wypełnia przestrzeń między większymi wiórami aluminiowymi (o frakcji 0,8-1,18 mm), co sprzyja lepszej integracji fazy polimerowej i metalowej. Taka poprawa strukturalna ogranicza lokalne defekty, co bezpośrednio przekłada się na lepsze właściwości mechaniczne próbki. Porowatość wynosząca 0,5% jest niska, co świadczy o skutecznym wypełnieniu przestrzeni między wiórami przez osnowę. Niewielka liczba pustek wskazuje na wysoką jakość kompozytu. Wtrącenia na poziomie 0,05% są minimalne, co świadczy o skutecznym procesie produkcyjnym, minimalizującym obecność zanieczyszczeń i defektów. Dzięki temu kompozyt ma większą odporność na obciążenia mechaniczne i lepszą trwałość w długoterminowym użytkowaniu.

Tab. 6.29. Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18

Charakterystyka próbki	Zdjęcia belki próbki	Przekrój poprzeczny próbki
Nr próbki: 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18		
Frakcja wióra 0,8-1,18 mm		
Rozmiar 10 x 10 x 80 mm		
Skład procentowy objętości próbki dla poszczególnych faz: - osnowa polimerowa: 26,13% - wypełnienie metalowe: 73,32% - pory: 0,5% - wtrącenia: 0,05%		

Analiza wyników potwierdziła, że zarówno wielkość frakcji wiórów aluminiowych, jak i zawartość osnowy PEEK mają istotny wpływ na jednorodność strukturalną i właściwości mechaniczne kompozytów. Mniejsze frakcje wiórów (0,6–0,8 mm) i wyższa zawartość osnowy (10%–15%) sprzyjają uzyskaniu bardziej jednorodnej struktury z mniejszą liczbą defektów, co przekłada się na lepszą wytrzymałość mechaniczną. W przypadku kompozytów z większą frakcją wiórów (0,8–1,18 mm) i mniejszą zawartością tworzywa, konieczne jest zapewnienie odpowiedniej ilości osnowy, aby zminimalizować nieciągłości i poprawić integralność strukturalną kompozytów.

6.3. Wnioski

Zastosowane zaawansowane techniki analityczne, w tym stereometria powierzchni oraz tomografia komputerowa potwierdzają, że kontrola mikrostruktury kompozytów jest kluczowa dla optymalizacji ich właściwości użytkowych. Właściwy dobór proporcji fazy metalicznej i osnowy, a także odpowiednia kontrola frakcji wiórów, pozwalają na uzyskanie materiałów o wysokiej wytrzymałości, niskiej porowatości oraz optymalnych właściwościach powierzchniowych.

Badania topograficzne oraz tomograficzne wykazały, że struktura wewnętrzna kompozytów z PA6 i PEEK wzmacnianych wiórami metalowymi (aluminium, mosiądz) jest silnie zależna od zawartości osnowy, frakcji wiórów oraz procesu prasowania na gorąco. Próbki z większą zawartością osnowy (10–15% PA6 lub PEEK) charakteryzowały się lepszą jednorodnością i niższą porowatością, co przekładało się na ich wyższą integralność strukturalną. Z kolei próbki z mniejszą zawartością osnowy i większą frakcją wiórów wykazywały większą liczbę pustek.

Analiza stereometryczna powierzchni kompozytów wskazała, że frakcja wiórów również ma istotny wpływ na chropowatość powierzchni. Mniejsze wióry sprzyjają uzyskaniu powierzchni o niższej chropowatości, zaś próbki z większymi wiórami wykazały większą chropowatość i nierówności powierzchniowe, co może

być niepożądane w aplikacjach wymagających precyzyjnego dopasowania i minimalnego tarcia.

Badania w zakresie tomografii komputerowej potwierdziły, że optymalizacja proporcji osnowy polimerowej oraz frakcji wiórów metalicznych pozwala na uzyskanie kompozytów o pożądanym właściwościach mechanicznych i strukturalnych. Najlepsze wyniki osiągają kompozyty z większą zawartością osnowy (10-15%) i mniejszą frakcją wiórów (0,2-0,6 mm), które wykazują niską porowatość, wysoką jednorodność struktury i lepszą odporność na obciążenia mechaniczne.

Tomografia komputerowa ujawniła, że porowatość kompozytów wzrasta wraz z mniejszą zawartością osnowy oraz większą frakcją wiórów. Porowatość ta, na ogół niewielka (od 0,2% do 0,6% objętości), ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne kompozytów. Próbki o wyższej porowatości wykazały tendencję do obniżonej wytrzymałości mechanicznej, szczególnie w kontekście dynamicznych obciążeń. Próbki o niższej porowatości, osiągniętej dzięki większej zawartości osnowy, cechowały się lepszą wytrzymałością i większą odpornością na pękanie.

Na podstawie uzyskanych wyników można wyróżnić grupę próbek, które wykazały najlepsze właściwości strukturalne i mechaniczne. Próbki zawierające 10% i 15% PEEK oraz 10% i 15% PA6 cechują się lepszą jednorodnością struktury oraz niższą porowatością. Wyniki wskazują, że zwiększenie ilości osnowy w kompozycie skutkuje bardziej efektywnym wypełnieniem przestrzeni między wiórami metalicznymi, co z kolei przekłada się na zmniejszenie pustek oraz wyższą wytrzymałość mechaniczną.

Na szczególną uwagę zasługują próbki takie jak:

1. 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18 (tab. 6.29.) – Niska porowatość (0,5%) i wysoka integralność strukturalna dzięki większej ilości osnowy.
2. 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 (tab. 6.26.) – Minimalna liczba pustek i doskonała homogenizacja, co skutkuje wysoką odpornością na obciążenia mechaniczne.
3. 3'-PEEK15%/M85%/W0,4 (tab. 6.21.) – Bardzo niska porowatość (0,35%) i wysoka jednorodność struktury, co wpływa pozytywnie na wytrzymałość materiału.
4. 8-PA10%/M90%/W0,4 (tab. 6.15.) – Niska porowatość (0,25%) i doskonała integracja faz osnowy i napełniacza.

Badania wykazały, że próbki z mniejszą frakcją wiórów metalicznych (0,2-0,6 mm) charakteryzują się lepszą jednorodnością strukturalną i niższą porowatością. Mniejsze wióry są lepiej otoczone osnową, co ogranicza powstawanie pustek i defektów. Wśród kompozytów z mniejszą frakcją wiórów na uwagę zasługują próbki takie jak:

1. 2'-PEEK10%/M90%/W0,4 (tab. 6.20.) – Wysoka spójność strukturalna dzięki niskiej porowatości (0,3%) i dobrze zintegrowanym fazom.
2. 5'-PEEK10%/M90%/W0,6 (tab. 6.23.) – Niska porowatość (0,4%) i dobra jednorodność struktury, co wpływa na poprawę wytrzymałości mechanicznej.

Analiza porowatości wskazała, że niska porowatość (0,25-0,5%) jest kluczowym czynnikiem wpływającym na wytrzymałość mechaniczną kompozytów. Próbki o niższej porowatości, takie jak 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 czy 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18, wykazywały lepszą odporność na obciążenia mechaniczne. Wyższa porowatość (powyżej 1%) prowadzi do osłabienia strukturalnego i może skutkować obniżeniem właściwości mechanicznych, co było widoczne w próbkach o niższej zawartości osnowy, np. 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 (tab. 6.27.).

Wyniki badań wskazują na konieczność odpowiedniego doboru składu kompozytów w zależności od zamierzonych zastosowań. W aplikacjach wymagających wysokiej wytrzymałości mechanicznej i minimalnej porowatości zaleca się stosowanie większej zawartości osnowy (15%) oraz mniejszych frakcji wiórów. Z kolei w aplikacjach, gdzie priorytetem jest uzyskanie specyficznych właściwości powierzchniowych, jak zwiększona chropowatość dla poprawy przyczepności, odpowiednim wyborem mogą być kompozyty z większymi wiórami i mniejszą ilością osnowy.

7. Wnioski i uwagi końcowe

Głównym celem poznawczym pracy było przeprowadzenie szczegółowych badań dotyczących określonych właściwości termomechanicznych oraz struktury kompozytu. W ramach badań wytworzono nowy materiał konstrukcyjny, charakteryzujący się odpowiednimi właściwościami do zastosowania w procesie obróbki skrawaniem. Szczególny nacisk położono na dobór odpowiednich parametrów procesu produkcyjnego kompozytu, a także na ocenę jego trwałości i wytrzymałości w warunkach eksploatacyjnych. Przeprowadzone badania miały na celu nie tylko zrozumienie fundamentalnych aspektów zachowania się kompozytu w warunkach zmian temperatury i obciążenia, ale także dostarczenie praktycznych wskazówek dla inżynierów zajmujących się tworzeniem innowacyjnych materiałów o wysokiej wydajności.

Przeprowadzone badania oraz ich analiza prowadzą do wniosków, które stanowią odpowiedź na postawione tezy.

Teza 1: Zawartość, frakcja i rodzaj napelniacza w postaci wiórow mosiądzu i aluminium w kompozytach z osnową polimerową w istotny sposób wpływa na ich właściwości termomechaniczne oraz strukturę wewnętrzną, w których kontekście istotne jest określenie wpływu znaczących trendów zmian.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano istotny wpływ zawartości frakcji oraz rodzaju napelniacza w kompozytach z osnową polimerową (PA6 i PEEK) na właściwości i strukturę wewnętrzną, co jest kluczowe w kontekście standaryzacji i ich zastosowania. Wzrost zawartości napelniacza metalicznego (zarówno aluminium, jak i mosiądzu) wpływa na poprawę właściwości mechanicznych kompozytów, jednak nadmierna ilość napelniacza może prowadzić do osłabienia elastyczności materiału i wzrostu jego kruchości. Przykładem jest próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 (5% PEEK, 95% aluminium), w której nadmierna ilość aluminium przyczynia się do wzrostu wartości temperatury zeszklenia (T_g) o 15% w stosunku do próbek z niższą zawartością napelniacza, ale jednocześnie wpływa negatywnie na elastyczność i strukturę kompozytu.

Rodzaj osnowy również odgrywa kluczową rolę w zachowaniu termomechanicznym kompozytów. Kompozyty z osnową PEEK wykazywały wyższą twardość i stabilność termiczną w porównaniu z PA6, co potwierdzają wyniki dla próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6 (10% PEEK, 90% mosiądzu), dla której zarejestrowano wartość twardości 72,43 HRM, wyższą od wartości maksymalnych dla PA6 (twardość 63,78 HRM dla próbki 11-PA10%/M90%/W0,6). Wyższa twardość PEEK jest efektem lepszej stabilności termicznej i większej sztywności struktury kompozytu.

Fracja wypełniacza (wielkość wiórów metalicznych) znacząco wpływała na strukturę wewnętrzną kompozytów. Próbki z mniejszą frakcją wiórów (0,6-0,8 mm) wykazywały lepszą jednorodność strukturalną i niższą porowatość, co bezpośrednio przekładało się na poprawę właściwości mechanicznych. Przykładem jest próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 (15% PEEK, 85% aluminium), dla której przy mniejszej frakcji wiórów zarejestrowano porowatość 0,3%, co zapewniło równomierny rozkład obciążeń i zwiększyło wytrzymałość kompozytu. Wzrost frakcji (0,8-1,18 mm) prowadził do powstawania większej liczby pustek, co wpływało na spadek wytrzymałości kompozytu (np. próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 z porowatością 1,3%). Stabilność termiczna badanych kompozytów była zależna zarówno od zawartości wypełniacza, jak i rodzaju osnowy. Badania DSC wykazały, że kompozyty z PEEK, szczególnie te z większą zawartością aluminium, charakteryzowały się wyższą temperaturą zeszklenia (T_g) i większą stabilnością mechaniczną w wysokich temperaturach. Na przykład, dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 odnotowano wartość modułu zachowawczego E' na poziomie 13 600 MPa w -90°C , co oznacza, że kompozyt z PEEK lepiej zachowuje swoje właściwości mechaniczne w niskich temperaturach. Próbki z wyższą zawartością wypełniacza aluminiowego w osnowie PEEK, takie jak 9'-PEEK15%/Al85%/W08 charakteryzowały się wyższymi wartościami modułu zachowawczego E' , co świadczy o lepszej odporności na dynamiczne obciążenia. Z kolei kompozyty z PA6 wykazywały większą elastyczność przy niższej temperaturze, co może być korzystne w zastosowaniach wymagających odporności na dynamiczne uderzenia.

Teza 2: Charakterystyka parametrów topograficznych powierzchni kompozytu po obróbce skrawaniem może zachowywać porównywalne trendy dla zmian parametrów obróbki tożsamyh w przypadku obróbki materiałów jednorodnych.

Przeprowadzone badania wykazały, że parametry topograficzne powierzchni kompozytów po obróbce skrawaniem wykazują porównywalne trendy w stosunku do materiałów jednorodnych, pod warunkiem odpowiedniego doboru frakcji i zawartości napełniacza.

Mniejsze frakcje napełniacza (0,6–0,8 mm) sprzyjały uzyskaniu bardziej jednorodnej struktury powierzchniowej, co zmniejszało defekty wynikające z obróbki skrawaniem. Przykładem jest próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, dla której wykazano po obróbce skrawaniem wartość funkcyjnych i parametrów chropowatości porównywalną do materiałów jednorodnych, takich jak aluminium. Równomierne rozmieszczenie wiórów w osnowie polimerowej pozwalało na minimalizację defektów powierzchniowych, takich jak pory czy wykruszenia, które mogłyby powstać podczas obróbki skrawaniem.

Zastosowanie większej frakcji napełniacza (0,8–1,18 mm) prowadziło do powstawania nierównomierności powierzchni po obróbce, co skutkowało wyższymi wartościami objętości wgłębień (V_{vv}) oraz większymi defektami powierzchniowymi. Przykładem jest próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, dla której wykazano wartość objętości wgłębień 13,21 ml/m², co było wyższe niż w próbkach z mniejszą frakcją wiórów, gdzie wartość V_{vv} wynosiła około 4,56 ml/m².

Parametry obróbki skrawaniem, takie jak prędkość skrawania, prędkość posuwu i głębokość oraz szerokość skrawania, miały podobny wpływ na przebieg procesu obróbki kompozytów polimerowych z napełniaczami metalowymi w porównaniu do materiałów jednorodnych. W przypadku kompozytów z większymi frakcjami napełniaczy (np. 0,8–1,18 mm), obserwowano bardziej wyraźne ślady skrawania, co wynikało z nierównomiernego rozkładu napełniacza w osnowie.

Teza 3: Wielkość frakcji zastosowanych napełniaczy istotnie wpływa na zmianę struktury kompozytu, tym samym oddziałując na zmiany wartości wolumetrycznych parametrów funkcyjnych powierzchni po obróbce skrawaniem.

Wielkość frakcji napełniaczy metalicznych (aluminium i mosiądz) miała istotny wpływ na strukturę kompozytów, ich porowatość oraz właściwości powierzchniowe po obróbce skrawaniem.

Zastosowanie mniejszej frakcji napełniacza (0,6–0,8 mm) prowadziło do uzyskania bardziej jednorodnej struktury wewnętrznej, co skutkowało zmniejszeniem porowatości kompozytów. Przykładem jest próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8 która charakteryzowała się porowatością na poziomie 0,3%, co bezpośrednio przełożyło się na lepsze właściwości mechaniczne i wytrzymałość na obciążenia dynamiczne.

Zastosowanie większej frakcji napełniacza (0,8–1,18 mm) skutkowało wzrostem porowatości, co negatywnie wpływało na właściwości mechaniczne i trwałość kompozytów. Przykładowo, próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W118 wykazała wyższą porowatość (1,3%), co wpływało na jej gorszą jednorodność strukturalną oraz tendencję do powstawania mikropęknięć w trakcie obróbki skrawaniem.

Badania wykazały, że zastosowanie mniejszej frakcji wiórów prowadziło do niższych wartości parametrów wolumetrycznych, takich jak objętość wgłębień (V_{vv}), co świadczyło o lepszej jednorodności struktury powierzchni po obróbce skrawaniem. Przykładem jest próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, dla której wartość V_{vv} wyniosła 4,56 ml/m², w porównaniu do 13,21 ml/m² dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18 z większą frakcją wiórów.

Wyniki badań potwierdzają, że dobór odpowiedniej frakcji napełniaczy metalicznych jest kluczowy dla uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych oraz powierzchniowych kompozytów. Zastosowanie mniejszej frakcji skutkuje uzyskaniem bardziej jednorodnej struktury, zmniejszeniem porowatości oraz poprawą odporności na zużycie mechaniczne, co jest szczególnie istotne w aplikacjach przemysłowych wymagających wysokiej jakości powierzchni.

Wnioski te wskazują na wpływ frakcji, zawartości i rodzaju napełniacza na właściwości mechaniczne, strukturalne oraz termiczne kompozytów, a także na ich zachowanie podczas obróbki skrawaniem. Wybór odpowiednich proporcji i wielkości

frakcji napelnacza pozwala na odpowiednią modyfikację właściwości materiału pod kątem specyficznych wymagań aplikacyjnych.

W tabeli (tab. 7.1.) zestawiono najważniejsze właściwości wybranych kompozytów oraz ich klasyfikację.

Tab. 7.1. Zestawienie najważniejszych cech kompozytów oraz ich właściwości

Legenda: + korzystne właściwości – niekorzystne właściwości ± wybór pośredni	Wpływ mikropęknięć na trwałość	Wpływ twardości na obróbkę	Jakość powierzchni po obróbce	Skrawalność	Parametry termomechaniczne – zastosowanie	Wytrzymałość strukturalna
1-PA5%/Al95%/W0,8	-	±	-	-	±	-
2-PA10%/Al90%/W0,8	+	+	+	+	+	+
3-PA15%/Al85%/W0,8	+	+	+	+	+	+
4-PA5%/Al95%/W1,18	-	±	-	-	±	-
5-PA10%/Al90%/W1,18	+	+	+	+	+	+
6-PA15%/Al85%/W1,18	+	+	+	+	+	+
7-PA5%/M95%/W0,4	±	±	-	-	±	-
8-PA10%/M90%/W0,4	±	±	±	±	+	±
9-PA15%/M85%/W0,4	+	+	+	+	+	+
10-PA5%/M95%/W0,6	-	±	-	-	±	-
11-PA10%/M90%/W0,6	±	+	+	+	±	+
12-PA15%/M85%/W0,6	+	+	+	+	+	+
1'-PEEK5%/M95%/W0,4	-	±	-	-	±	-
2'-PEEK10%/M90%/W0,4	±	+	+	±	±	±
3'-PEEK15%/M85%/W0,4	+	+	+	+	+	+
4'-PEEK5%/M95%/W0,6	-	±	-	-	±	-
5'-PEEK10%/M90%/W0,6	±	±	±	±	±	±
6'-PEEK15%/M85%/W0,6	+	+	+	+	+	+
7'-PEEK5%/Al95%/W0,8	±	±	±	±	+	-
8'-PEEK10%/Al90%/W0,8	+	+	+	+	+	+
9'-PEEK15%/Al85%/W0,8	+	+	+	+	+	+
10'-PEEK5%/Al95%/W1,18	±	±	±	±	±	-
11'-PEEK10%/Al90%/W1,18	+	+	+	+	+	+
12'-PEEK15%/Al85%/W1,18	+	+	+	+	+	+

Z przedstawionych analiz wynika, iż najkorzystniejsze właściwości termiczne, właściwości dynamiczne i możliwość obróbki skrawaniem można uzyskać przy określonym składzie kompozytu mosiądz – PEEK. Stwierdzono, iż najkorzystniejszy pod względem właściwości skład procentowy kompozytu kształtuje się w granicach od 90 do 85% zawartości mosiądzu, przy czym w zależności od wymogów uzyskania odpowiednich właściwości dla konkretnych wyrobów można zmieniać skład procentowy i frakcję.

Zastosowanie kompozytów wykonanych z tworzywa PEEK i PA6 z włóknami metalicznymi może obejmować produkcję obudów oraz innych komponentów elektronicznych. Kolejnym obszarem zastosowania mogą być elementy wykończeniowe wewnątrz, w których kompozyty mogą zastępować tradycyjne metalowe części, takie jak uchwyty czy wsporniki, oferując niższe koszty produkcji bez kompromisu w zakresie estetyki i trwałości. Kompozyty z napełniaczem z aluminium wykazującym właściwości przewodzenia ciepła, mogą być stosowane do produkcji radiatorów w elektronice. Dzięki temu urządzenia mogą utrzymywać optymalną temperaturę, zapewniając jednocześnie niską wagę oraz długą żywotność komponentów. W budownictwie ekologicznym kompozyty z napełniaczami aluminiowymi mogą być stosowane do produkcji lekkich, odpornych na warunki atmosferyczne paneli elewacyjnych, które są łatwiejsze w montażu i przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju.

Dalszy kierunek rozwoju badań

Kolejnym kierunkiem badań może być wykorzystanie innych materiałów z recyklingu, po obróbce skrawaniem, jako napełniaczy w kompozytach polimerowych. Analiza możliwości wykorzystania różnorodnych materiałów pozwoli na dalsze zmniejszenie kosztów produkcji oraz zwiększenie zrównoważenia procesów technologicznych.

Warto również przeprowadzić dalsze badania nad doborem narzędzi skrawających stosowanych do obróbki kompozytów z napełniaczami metalowymi. Zwiększenie odporności na ścieranie oraz poprawa wydajności narzędzi pozwoli na

jeszcze większe obniżenie kosztów produkcji i poprawę jakości wykończenia powierzchni.

Dalsze badania mogą również uwzględniać analizę wpływu warunków środowiskowych, takich jak wilgotność, temperatura czy promieniowanie UV na właściwości kompozytów z napełniaczami z recyklingu. Pozwoli to na dokładniejsze określenie trwałości i niezawodności tych materiałów w długoterminowych zastosowaniach.

Streszczenie

Praca ma standardową strukturę, podzieloną na trzy główne części. Pierwszą część stanowi przegląd literatury, na który składają się rozdziały dotyczące zarówno teorii kompozytów polimerowych, jak i metod ich obróbki. Opisano podstawowe parametry procesów obróbki skrawaniem, metody wytwarzania kompozytów polimerowych oraz narzędzia i maszyny stosowane w tej technologii. Dokonano szczegółowej charakterystyki tworzyw polimerowych stosowanych w obróbce skrawaniem, podając ich właściwości, zastosowania oraz sposoby modyfikacji. Zawarto także przegląd literatury na temat recyklingu tworzyw sztucznych i metali kolorowych, szczególnie aluminium i mosiądzu, oraz możliwości ich wykorzystania jako napełniaczy w kompozytach polimerowych. Przegląd ten kończy się omówieniem wpływu parametrów obróbki na właściwości kompozytów po procesie skrawania.

Druga część pracy przedstawia cele badawcze oraz tezy. Główne założenie badawcze polegało na zbadaniu wpływu wiórów aluminiowych i mosiężnych na właściwości mechaniczne, termiczne i proces obróbki skrawaniem kompozytów polimerowych. Podano zakres pracy, który obejmuje badania nad poprawą właściwości tych kompozytów oraz ich potencjalnym zastosowaniem w przemyśle.

Trzecia część pracy poświęcona jest prezentacji wyników badań oraz metodologii badawczej. Na początku wyszczególniono materiały wybrane do badań, opisano metody wytwarzania kompozytów oraz proces obróbki skrawaniem, jak również techniki badań strukturalnych i właściwości materiałowych. W rozdziale czwartym opisano proces wytwarzania kompozytów. W rozdziale piątym opisano wyniki badań właściwości termicznych kompozytów przeprowadzonych metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) oraz badań właściwości termomechanicznych wyznaczonych metodą DMTA. Uzupełnieniem badań są pomiary badań twardości i udarnośći wyprasek kompozytowych. W rozdziale szóstym przedstawiono analizę topografii powierzchni kompozytów przed i po obróbce skrawaniem, a także badania tomograficzne struktury kompozytów.

Końcowe rozdziały pracy poświęcone są podsumowaniu wyników oraz ich analizie. Przedstawiono wpływ wiórów aluminiowych i mosiężnych na właściwości kompozytów, szczególnie w kontekście poprawy wytrzymałości mechanicznej. Zawarto także wnioski dotyczące optymalizacji procesu obróbki skrawaniem, szczególnie w aspekcie zużycia narzędzi oraz parametrów procesu, które mają kluczowe znaczenie dla jakości końcowej obrabianych materiałów.

Pracę zamyka analiza wyników badań wraz z wnioskami końcowymi, a także spis literatury, na której oparto niniejszą rozprawę.

Summary

The work has a standard structure, divided into three main parts. The first part consists of a literature review, which includes chapters on both the theory of polymer composites and the methods for their processing. It describes the basic parameters of machining processes, methods of manufacturing polymer composites, as well as the tools and machines used in this technology. A detailed characterization of the polymer materials used in machining is provided, including their properties, applications, and modification methods. The literature review also covers the recycling of plastics and non-ferrous metals, particularly aluminum and brass, and their potential use as fillers in polymer composites. This review concludes with a discussion of how processing parameters affect the properties of composites after machining.

The second part of the work presents the research objectives and theses. The main research goal was to investigate the impact of aluminum and brass chips on the mechanical, thermal properties, and machining process of polymer composites. The scope of the work, which includes studies on improving the properties of composites and their potential applications in industry, is also provided.

The third part of the work is dedicated to presenting the research results and methodology. It begins by detailing the materials selected for the study, describing the methods for producing the composites and their machining process, as well as the techniques used for structural and material property analysis. Chapter four describes the composite manufacturing process. Chapter five presents the results of thermal property tests conducted using differential scanning calorimetry (DSC) and the thermomechanical properties determined using the DMTA method. Complementing the research are hardness and impact strength tests of the composite samples. Chapter six presents the surface topography analysis of the composites before and after machining, as well as tomographic studies of the composite structure.

The final chapters of the work focus on summarizing and analyzing the results. The impact of aluminum and brass chips on the properties of the composites is discussed, particularly regarding the improvement in mechanical strength.

Conclusions regarding the optimization of the machining process, especially concerning tool wear and process parameters that are critical for the final quality of the machined materials, are also included.

The work concludes with an analysis of the research results and final conclusions, along with a bibliography of the literature referenced in this dissertation.

Literatura

- [1] Sikora R.: Wprowadzenie do przetwórstwa tworzyw polimerowych. Projekt leksykonu naukowo-technicznego, Lublin, 2002.
- [2] Braszczyńska-Malik K.N., Pędzich Z., Pietrzak K., Rosłaniec Z., Sterzyński T., Szweycer M.: Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych. *Kompozyty* 1, 2005.
- [3] Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1987.
- [4] Kucharczyk W.: Przetwórstwo tworzyw sztucznych dla mechaników. Wydawnictwo Politechnika Radomska, Radom, 2005.
- [5] Sikora R.: Podstawy przetwórstwa tworzyw polimerowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 1992.
- [6] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: *Kompozyty*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [7] Wojtkun F., Solncev U. P. E.: *Materiały specjalnego przeznaczenia*. Politechnika Radomska, Radom, 2001.
- [8] Dobrzański L. A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2002.
- [9] Giles Jr. H. F., Mount III E. M., Wagner Jr. J. R.: *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. William Andrew, New York, 2004.
- [10] Sharma V. P., Agarwal V., Umar S., Singh A. K.: *Polymer composites sustainability: environmental perspective, future trends and minimization of health risk*. Proceedings of the International Conference on Environmental Science and Development, Singapore, 2011.
- [11] Brent Strong A.: *Plastic Materials and Processing*. Pearson Prentice Hall, 1996.
- [12] Barbero E. J.: *Introduction to composite materials design*. CRC Press, USA, 2010.
- [13] Koszkuł J.: *Materiały Polimerowe*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 1999.

- [14] Davim J. P.: *Materials and Surface Engineering: Research and Development*. Elsevier, 2012.
- [15] Sikora R.: *Przetwórstwo Tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne ŻAK, Warszawa, 1993.
- [16] <https://www.tworzywa.pwr.wroc.pl/pl/dydaktyka/prasowanie-wysokocisnieniowe-tloczne/>.
- [17] Kasprzycki A., Sochacki W.: *Wybrane Zagadnienia Projektowania i Eksploatacji Maszyn i Urządzeń*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2009.
- [18] Kijeński J. A., Błędzki A. K., Jeziórska R.: *Odzysk i recykling materiałów polimerowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2020.
- [19] Błędzki A. K.: *Recykling tworzyw sztucznych*. Politechnika Szczecińska, Szczecin, 1993.
- [20] Gruin I., Ryszkowska J., Markiewicz B.: *Materiały polimerowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
- [21] Harper, Charles A.: *Modern Plastics Handbook*. McGraw Hill Professional, New York, 2000.
- [22] Wilczyński K.: *Wybrane zagadnienia przetwórstwa tworzyw sztucznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2011.
- [23] Kaczmarek J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1971.
- [24] Jemieliński K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
- [25] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2010.
- [26] Górski E.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa, 1982.
- [27] Storch B.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
- [28] Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge, GARANT: *Poradnik obróbki skrawaniem*, 2021.

- [29] Józwik J., Tofil A., Banaszek M., Kuric I.: Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów włóknistych i oceny chropowatości powierzchni. *Postępy Nauki i Techniki* nr 15, 2012.
- [30] Öktem, H.: An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* nr 43, 2009.
- [31] Kuryjański R.: *Obróbka skrawaniem i obrabiarki*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2011.
- [32] Xiao, K. Q., Zhang, L. C.: The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International journal of mechanical sciences* nr 44, 2002.
- [33] Gubbels G. P. H.: *Diamond turning of glassy polymers*. Rozprawa doktorska, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
- [34] <https://www.ita-polska.com.pl/systemy-narzedziowe/narzedzia-frezarskie/frezy-trzpieniowe-do-obrobki-kompozytow/>.
- [35] <https://www.hoffmann-group.com/>.
- [36] <https://www.tizimplements.pl/>.
- [37] <https://www.ensingerplastics.com/pl-pl/>.
- [38] Rabek J. F.: *Polimery. Otrzymywanie, metody badawcze i zastosowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [39] Arifin N., Yusoff H., Sudin I., Kadir A. Z. A., Ali R., Yacob S., Arshad A., Ismail S.A: Study the effect of cnc milling parameter on surface roughness of pom material. *ARPJ*, Pakistan, 2016.
- [40] Ehrenstein G. W., Brocka-Krzemińska Ż.: *Materiały polimerowe. Struktura, właściwości, zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2016.
- [41] Cho M. H., Park S.: Micro CNC surface texturing on polyoxymethylene (POM) and its tribological performance in lubricated sliding. *Tribology International* nr 44, 2011.
- [42] Pieśko P., Zagórski I.: Analiza porównawcza metod frezowania HSM, HPC oraz frezowania konwencjonalnego wysokokrzemowych stopów aluminium. *Postępy nauki i technik* nr 7, 2011.

- [43] Borowski G., Kuczmaszewski J.: Utylizacja drobnoziarnistych odpadów metalowych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2005.
- [44] Drzymała Z.: Rozwój technologii utylizacji wiórów metalowych. Materiały Konferencji nt. Projektowanie Procesów Technologicznych, Poznań, 2001.
- [45] Pierończyk J., Biało D.: Selected problems of electrodischarge machining of aluminum matrix composites. Composites, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2001.
- [46] Wang D., Onawumi P.Y., Ismail S.O., Dhakal H.N., Popov I., Silberschmidt V.V., Roy A.: Machinability of natural-fibre-reinforced polymer composites: Conventional vs ultrasonically-assisted machining. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing nr 119, 2019.
- [47] Teti. R.: Machining of composite materials. CIRP Annals nr 51, 2002.
- [48] Davim J. P.: Machinability of Fiber-Reinforced Plastics: A Review. Journal of Materials Processing Technology nr 186, 2008.
- [49] Davim, J. P.: Machining composites materials. John Wiley and Sons, USA, 2013.
- [50] Pecat O., Rüdiger R., Ekkard B.: Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP, Procedia Cirp 1, 2012.
- [51] Han X., Xu D., Axinte D., Liao Z., Li H. N.: On understanding the specific cutting mechanisms governing the workpiece surface integrity in metal matrix composites machining. Journal of Materials Processing Technology nr 288, 2021.
- [52] Grobelny P., Furmański Ł, Czapczyk K.: Model investigations of the broaching process. Materiały z konferencji - 6th International Technical Conference, Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2015.
- [53] Twardowski P., Czapczyk K., Furmański Ł, Grobelny P. Jabłoński P.: Usefulness of modern cemented carbides for high speed cutting. 7th International Technical Conference, Technological forum 2016, Materiały konferencyjne, Czech Republic, 2016.
- [54] Ourahmoune, R. E. H.: Contribution to the understanding of mechanical surface functionalization of thermoplastic matrix composites (PEEK) intended for adhesive bonding. Diss. Ecole Centrale de Lyon, Lyon, 2012.

- [55] Mathia T. G., Pawlus P., Wieczorowski M.: Recent trends in Surface metrology, *Wear* nr 271, 2011.
- [56] Wieczorowski M.: Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni. *Inżynieria Maszyn* nr 18, 2013.
- [57] ISO 25178-2:2021: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [58] Królczyk G. M.: Morfologia powierzchni stali duplex po procesie toczenia na sucho i z chłodziwem. *Politechnika Opolska, Opole*, 2015.
- [59] Adamczak S.: *Metrologia Geometryczna Powierzchni Technologicznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2023.
- [60] Gapiński B., Wieczorowski M., Grzelka M., Arroyo A. P., Bermudez T. A.: The application of micro CT to assess quality of workpieces manufactured by means of rapid prototyping. *Polimery* nr 62, 2017.
- [61] Wieczorowski M.: Kierunki rozwoju metrologii nierówności powierzchni. *Mechanik* 87, 2014.
- [62] Dudzińska S., Tartakowski Z., Grochała D.: Ekologiczne aspekty oceny struktury geometrycznej powierzchni wyrobów z tworzyw polimerowych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* nr 17, 2016.
- [63] Meylan B., Dogan P., Sage D., Wasmer K.: A simple, fast and low-cost method for in situ monitoring of topographical changes and wear rate of a complex tribo-system under mixed lubrication. *Wear* nr 364, 2016.
- [64] Lawrence K D., Ramamoorthy B.: Surface topography characterization of automotive cylinder liner surfaces using fractal methods. *Applied Surface Science* nr 280, 2013.
- [65] Schmähling J., Hamprecht F. A.: Generalizing the Abbott–Firestone curve by two new surface descriptors. *Wear* nr 262, 2007.
- [66] Lawrence K. D., Shanmugamani R., Ramamoorthy B.: Evaluation of image based Abbott–Firestone curve parameters using machine vision for the characterization of cylinder liner surface topography. *Measurement* nr 55, 2014.

- [67] Zeng W., Xiang J., Liam B.: Surface characterization based tool wear monitoring in peripheral milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 40, 2009.
- [68] Wieczorowski M., Wojciechowski S., Twardowski P.: Surface texture analysis after ball end milling with various surface inclination of hardened steel. *Metrology and Measurement Systems* 1, 2014.
- [69] Twardowski P., Wojciechowski S., Wieczorowski M., Mathia, T.: Surface roughness analysis of hardened steel after high speed milling. *Scanning* nr 33, 2011.
- [70] Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R.: Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy. *Scanning: The Journal of Scanning Microscopies*, 2014.
- [71] Grzesik W., Wanat T.: Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* nr 46, 2006.
- [72] Krolczyk G. M., Legutko S.: Investigations Into Surface Integrity in the Turning Process of Duplex Stainless Steel. *Transactions of Famena* nr 38, 2014.
- [73] Kruth J. P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L. Weckenmann, A.: Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP annals* nr 60, 2011.
- [74] Maire E., Withers, P. J.: Quantitative X-ray tomography. *International materials reviews* nr 59, 2014.
- [75] Carmignato S.: Accuracy of industrial computed tomography measurements: experimental results from an international comparison. *CIRP annals* nr 61, 2012.
- [76] Villarraga G. H.: X-ray computed tomography for dimensional measurements. *Proc. of Digital Imaging 2016-An ASNT Topical Conference*, 2016.
- [77] Sun W., Symes D. R., Brenner C. M., Bohnel M., Brown S., Mavrogordato M. N., Salamon, M.: Review of high energy x-ray computed tomography for non-destructive dimensional metrology of large metallic advanced manufactured components. *Reports on Progress in Physics* nr 85, 2022.

- [78] De Chiffre L., Carmignato S., Kruth J. P., Schmitt R., Weckenmann, A.: Industrial applications of computed tomography. CIRP annals nr 63, 2014.
- [79] Cnudde V., Boone M. N.: High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. Earth-Science Reviews nr 123, 2013.
- [80] Stock S. R.: Microcomputed tomography: methodology and applications. CRC press, 2019.
- [81] Cnudde V., Masschaele B., Dierick, M., Vlassenbroeck J., Van Hoorebeke L., Jacobs, P.: Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. Applied geochemistry nr 21 2006.
- [82] <https://www.zeiss.pl/>.
- [83] De Chiffre L., Carmignato S., Kruth J. P., Schmitt R., Weckenmann A.: Industrial applications of computed tomography. CIRP annals nr 63, 2014.
- [84] Bauer W., Bessler F. T., Zabler E., Bergmann R. B.: Computer tomography for nondestructive testing in the automotive industry. In Developments in X-ray Tomography IV, 2004.
- [85] Vicente M. A., Gonzalez D. C., Minguez J.: Recent advances in the use of computed tomography in concrete technology and other engineering fields. Micron nr 118, 2019.
- [86] Villarraga G., H., Peitsch, C. M., Ramsey, A., Smith, S. T.: The role of computed tomography in additive manufacturing. In 2018 ASPE and euspen summer topical meeting: advancing precision in additive manufacturing, 2018.
- [87] Hassen A. A., Kirka M. M.: Additive Manufacturing: The rise of a technology and the need for quality control and inspection techniques. Materials Evaluation nr 76, 2018.
- [88] ISO 11357-3:2018-06: Differential Scanning Calorimetry (DSC)—Part 3: De-termination of Temperature and Enthalpy of Melting and Crystallization.
- [89] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J.: Metody i ocena właściwości tworzyw sztucznych. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2000.
- [90] Rabek J. F.: Podstawy fizykochemii polimerów. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1977.

- [91] Menczel J. D., Grebowicz J.: Handbook of Differential Scanning Calorimetry: Techniques, Instrumentation, Inorganic, Organic and Pharmaceutical Substances. Butterworth-Heinemann, 2023.
- [92] Schiesl C.: Thermische Analyse Möglichkeiten zur Untersuchung von dentalen Kunststoffen. Doctoral dissertation, 2009.
- [93] Przygocki W.: Metody fizyczne badań polimerów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1990.
- [94] Wrasidlo W.: Thermal analysis of polymers. Springer, Berlin, 2005.
- [95] Gedde U. W., Hedenqvist M. S., Hakkarainen M., Nilsson F., Das O., Gedde U. W., Das O.: Thermal analysis of polymers. Applied Polymer Science, Springer, 2021.
- [96] Menczel J. D., Judovits L., Prime R. B., Bair H. E., Reading, M., Swier S.: Differential scanning calorimetry (DSC). Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications, 2009.
- [97] Gnatowski A., Chyra M., Baranowski W.: Badania właściwości termomechanicznych i morfologii rur z polietylenu poddanych procesowi starzenia za pomocą promieniowania UV. Polimery nr 59, 2014.
- [98] Florczak B., Miszczak M., Borkowski J.: Badania dynamiczno-mechaniczno-termiczne stałych, homogenicznych-dwubazowych paliw rakietowych. Problemy Techniki Uzbrojenia nr 38, 2009.
- [99] ISO 6721-1:2019: Plastics – Determination of Dynamic Mechanical Properties – Part 1: General Principles.
- [100] <https://www.keyence.eu/plpl/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/>.
- [101] <https://www.alicon.com/>.
- [102] Leach R., Giusca C.: Calibration of optical surface topography measuring instruments. In Optical Measurement of Surface Topography Springer, Berlin Heidelberg, 2011.
- [103] Moroni G., Syam W. P., Petro S.: A simulation method to estimate task-specific uncertainty in 3D microscopy. Measurement nr 122, 2018.

- [104] Doi K.: Computer aided diagnosis in medical imaging: historical review, current status and future potential. *Computerized Medical Imaging and Graphics* nr 31, 2007.
- [105] Bartscher M., Hilpert U., Goebels J., Weidemann G.: Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements, *CIRP annals* nr 56, 2007.
- [106] Hiller J., Kasperl S., Hilpert U., Bartscher M.: Coordinate measuring with industrial X-ray computed tomography; Koordinatenmessung mit industrieller Roentgen Computertomografie. *Technisches Messen*, nr 74, 2007.
- [107] Ryniewicz A.: Accuracy assessment of shape mapping using Computer Tomography. *Metrology and Measuring Systems* nr 3, 2010.
- [108] ISO 6508-1:2023: Metallic materials – Rockwell hardness test Part 1: Test method.
- [109] Callister W. D. Jr., Rethwisch D. G.: *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley and Sons, 2020.
- [110] Moczko J., Pukanszky B.: Particulate filled polypropylene: Structure and properties. *Polypropylene handbook: morphology, blends and composites*, 2019
- [111] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J.: *Metody badania i ocena właściwości tworzyw sztucznych*. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2000.
- [112] ASTM International, *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM D785-08, 2013.
- [113] Dieter G. E., David B.: *Mechanical metallurgy*. McGraw-hill, New York, 1976.
- [114] Ashby M. F., Jones D. R.: *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*. Elsevier, 2012.
- [115] German J.: *Wprowadzenie do mechaniki pękania*. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków, 2018.
- [116] Smith W. F., Hashemi J.: *Foundations of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill, New York, 2006.

- [117] ISO 179-1:2023: Plastics Determination of Charpy impact properties Part 1: Non-instrumented impact test.
- [118] ISO 7388-1:2007: Tool shanks with 7/24 taper for automatic tool changers – Part 1: Dimensions and designation of shanks of forms A, AD, AF, U, UD and UF.
- [119] <http://multiserw-morek.pl/>.
- [120] Petropoulos G. P., Pandazaras C. N., Davim, J. P.: Surface texture characterization and evaluation related to machining. Surface integrity in machining, 2010.

Spis rysunków

- Rys. 1.1.** Schemat prasowania tłoczego: a) napełnianie gniazda, b) forma zamknięta, c) wypychanie wypraski; 1 - stempel, 2 - gniazdo formujące, 3 - tłoczywo, 4 - matryca, 5 - wypychacz, 6 - wypraska prasownicza
- Rys. 1.2.** Forma tłoczna do tworzyw utwardzalnych: 1 - płyta układu pchania wypraski, 2 - wypychacz, 3 - matryca, 4 - wypraska, 5 - stempel, 6 - płyta grzejna podzespołu ruchomego, 7 - kanały grzejne
- Rys. 1.3.** Frezowanie a) czołowe, b) obwodowe
- Rys. 1.4.** Frezowanie a) przeciwbieżne, b) współbieżne
- Rys. 1.5.** Budowa i geometria ostrza freza trzpieniowego
- Rys. 1.6.** Frez trzpieniowy VHM bez powłoki a) jednopiórowy b) trzyostrzowy
- Rys. 1.7.** Frez wieloostrowy kompresyjny pełno węglkowy do obróbki kompozytów
- Rys. 1.8.** Frez walcowo-czołowy z geometrią wieloostrową
- Rys. 1.9.** Wysokowydajne frezy PKD a) kąt osiowy 0° b) dodatni kąt osiowy 2° lub 4° c) ujemny kąt osiowy -2° lub -4°
- Rys. 1.10.** Wykres profilu powierzchni, wyznaczenie parametrów S_k , S_{mr1} i S_{mr2} wg normy ISO 25178
- Rys. 1.11.** Parametry objętości pustki i objętości materiału parametrów funkcyjnych powierzchni wg normy ISO 25178
- Rys. 1.12.** Graficzna prezentacja powierzchni dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18 a) mapa konturowa b) obraz izometryczny
- Rys. 1.13.** Krzywa Abbotta - Firestone'a
- Rys. 3.1.** Schemat komory pomiarowej DSC
- Rys. 3.2.** Netzsch DMA 242 C
- Rys. 3.3.** Mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000
- Rys. 3.4.** Mikroskop cyfrowy Alicona Infinite Focus
- Rys. 3.5.** Schemat zasady pionowego skanowania powierzchni w celu znalezienia największego kontrastu (wartość ostrości umożliwiająca określenie wysokości powierzchni)
- Rys. 3.6.** Tomograf ZEISS Metrotom 1500
- Rys. 3.7.** Mocowanie próbki do badań na tomografie ZEISS Metrotom 1500
- Rys. 3.8.** Cyfrowy twardościomierz Rockwella z panelem dotykowym DigiRock DP3 Sinowon
- Rys. 3.9.** Kształtki do badań: a) z karbem, b) bez karbu; 1 - kierunek uderzenia, l - długość, b - szerokość, h - grubość
- Rys. 3.10.** Młot Charpiego Zwick/Roell HIT 5.5P do badania udarności próbek z tworzyw sztucznych z karbem lub bez karbu

- Rys. 3.11.** Proces obróbki kompozytu a) zamocowanie próbki kompozytowej z wiórami mosiądzu, b) zamocowanie próbki kompozytowej z wiórami aluminium, c) parametry pięcioostrzowego freza z węglika spiekane
- Rys. 4.1.** Wstrząsarka laboratoryjna Ø200 mm LPzE-2e
- Rys. 4.2.** Stanowisko do wytwarzania próbek: 1 – prasa warsztatowa VIBER-SYSTEM 75 TON WP75PRK, 2 – matryca, 3 – układ grzejny, 4 – regulator temperatury, 5 – izolator termiczny, 6 – stół montażowy
- Rys. 4.3.** Model matrycy a) korpus matrycy, b) podstawa matrycy, c) stempel
- Rys. 5.1.** Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury PA6
- Rys. 5.2.** Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury kompozytu PA6 z wiórami aluminium:
a) 1-PA5%/Al95%/W0,8, b) 2-PA10%/Al90%/W0,8,
c) 3-PA15%/Al85%/W0,8, d) 4-PA5%/Al95%/W1,18,
e) 5-PA10%/Al90%/W1,18, f) 6-PA15%/Al85%/W1,18
- Rys. 5.3.** Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury kompozytu PA6 z wiórami mosiądzu:
a) 7-PA5%/M95%/W0,4, b) 8-PA10%/M90%/W0,4,
c) 9-PA15%/M85%/W0,4, d) 10-PA5%/M95%/W0,6,
e) 11-PA10%/M90%/W0,6, f) 12-PA15%/M85%/W0,6
- Rys. 5.4.** Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury dla PEEK
- Rys. 5.5.** Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury próbek kompozytu PEEK z wiórami mosiądzu:
a) 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, b) 2'-PEEK10%/M90%/W0,4,
c) 3'-PEEK15%/M85%/W0,4, d) 4'-PEEK5%/M95%/W0,6,
e) 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, f) 6'-PEEK15%/M85%/W0,6
- Rys. 5.6.** Przebieg zmian wartości modułu zachowawczego i tangensa kąta stratności mechanicznej w zależności od temperatury próbek kompozytu PEEK z wiórami aluminium:
a) 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, b) 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8,
c) 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, d) 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18,
e) 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, f) 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18
- Rys. 5.7.** Termogramy DSC badanych materiałów: 1-(1-PA5%/Al95%/W0,8), 2-(2-PA10%/Al90%/W0,8), 3-(3-PA15%/Al85%/W0,8), 4-(PA6) – a) pierwsze ogrzewanie, b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(4-PA5%/Al95%/W1,18), 2-(5-PA10%/Al90%/W1,18), 3-(6-PA15%/Al85%/W1,18), 4-(PA6) – d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie, f) drugie ogrzewanie

- Rys. 5.8.** Termogramy DSC badanych materiałów:
 1-(7-PA5%/M95%/W0,4), 2-(8-PA10%/M90%/W0,4),
 3-(9-PA15%/M85%/W0,4), 4-(PA6) – a) pierwsze ogrzewanie,
 b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(10-PA5%/M95%/W0,6),
 2-(11-PA10%/M90%/W0,6), 3-(12-PA15%/M85%/W0,6), 4-(PA6)
 – d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie ogrzewanie
- Rys. 5.9.** Termogramy DSC badanych materiałów:
 1-(1'-PEEK5%/M95%/W0,4), 2-(2'-PEEK10%/M90%/W0,4),
 3-(3'-PEEK15%/M85%/W0,4), 4-(PA6) – a) pierwsze ogrzewanie,
 b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(4'-PEEK5%/M95%/W0,6),
 2-(5'-PEEK10%/M90%/W0,6), 3-(6'-PEEK15%/M85%/W0,6),
 4-(PA6), – d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie
 ogrzewanie
- Rys. 5.10.** Termogramy DSC badanych materiałów:
 1-(7'-PEEK5%/Al95%/W0,8), 2-(8'-PEEK10%/Al90%/W0,8),
 3-(9'-PEEK15%/Al85%/W0,8), 4-(PA6) – a) pierwsze ogrzewanie,
 b) chłodzenie, c) drugie ogrzewanie; 1-(10'-PEEK5%/Al95%/W1,18),
 2-(11'-PEEK10%/Al90%/W1,18), 3-(12'-PEEK15%/Al85%/W1,18),
 4-(PA6) – d) pierwsze ogrzewanie, e) chłodzenie: f) drugie ogrzewanie
- Rys. 5.11** Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PA6 z wiórami aluminium (kolor zielony określa frakcję wióra 0,6–0,8 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,8–1,18 mm)
- Rys. 5.12.** Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PA6 z wiórami mosiądzu (kolor zielony określa frakcję wióra 0,2–0,4 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,4–0,6 mm)
- Rys. 5.13.** Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PEEK z wiórami z mosiądzu (kolor zielony określa frakcję wióra 0,2–0,4 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,4–0,6 mm)
- Rys. 5.14.** Zestawienie wyników badań udarności dla próbek kompozytu PEEK z aluminium (kolor zielony określa frakcję wióra 0,6–0,8 mm, kolor niebieski określa frakcję wióra 0,8–1,18 mm)
- Rys. 5.15.** Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PA6 z wiórami aluminium
- Rys. 5.16.** Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PA6 z wiórami mosiądzu
- Rys. 5.17.** Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PEEK z wiórami mosiądzu
- Rys. 5.18.** Porównanie wyników badań twardości dla wyprasek kompozytów PEEK z wiórami aluminium
- Rys. 6.1.** Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PA6 i wiórami aluminium: o frakcji 0,6–0,8 mm: a) 1-PA5%/Al95%/W0,8, b) 2-PA10%/Al90%/W0,8, c) 3-PA15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm: d) 4-PA5%/Al95%/W1,18, e) 5-PA10%/Al90%/W1,18, f) 6-PA15%/Al85%/W1,18

- Rys. 6.2.** Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm:
a) 1-PA5%/Al95%/W0,8, b) 2-PA10%/Al90%/W0,8,
c) 3-PA15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm:
d) 4-PA5%/Al95%/W1,18, e) 5-PA10%/Al90%/W1,18,
f) 6-PA15%/Al85%/W1,18
- Rys. 6.3.** Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PA6 i wiórów aluminium
- Rys. 6.4.** Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm: a) 7-PA5%/M95%/W0,4,
b) 8-PA10%/M90%/W0,4, c) 9-PA15%/M85%/W0,4;
o frakcji 0,4–0,6 mm: d) 10-PA5%/M95%/W0,6,
e) 11-PA10%/M90%/W0,6, f) 12-PA15%/M85%/W0,6
- Rys. 6.5.** Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm:
a) 7-PA5%/M95%/W0,4, b) 8-PA10%/M90%/W0,4,
c) 9-PA15%/M85%/W0,4; o frakcji 0,4–0,6 mm:
d) 10-PA5%/M95%/W0,6, e) 11-PA10%/M90%/W0,6,
f) 12-PA15%/M85%/W0,6
- Rys. 6.6.** Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PA6 i wiórów mosiądzu
- Rys. 6.7.** Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm: a) 1'-PEEK5%/M95%/W0,4,
b) 2'-PEEK10%/M90%/W0,4, c) 3'-PEEK15%/M85%/W0,4;
o frakcji 0,4–0,6 mm: d) 4'-PEEK5%/M95%/W0,6,
e) 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, f) 6'-PEEK15%/M85%/W0,6
- Rys. 6.8.** Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm:
a) 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, b) 2'-PEEK10%/M90%/W0,4,
c) 3'-PEEK15%/M85%/W0,4; o frakcji 0,4–0,6 mm
d) 4'-PEEK5%/M95%/W0,6, e) 5'-PEEK10%/M90%/W0,6,
f) 6'-PEEK15%/M85%/W0,6
- Rys. 6.9.** Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PEEK i wiórów mosiądzu
- Rys. 6.10.** Stereometryczny obraz powierzchni próbek z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm: a) 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8,
b) 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, c) 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8;
o frakcji 0,8–1,18 mm: d) 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18,
e) 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, f) 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18
- Rys. 6.11.** Interpretacja graficzna parametrów funkcyjnych powierzchni kompozytów z wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm:
a) 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, b) 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8,
c) 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8; o frakcji 0,8–1,18 mm:
d) 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, e) 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18,

f) 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18

Rys. 6.12. Porównanie parametrów funkcyjnych V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} oraz V_{vv} kompozytów z PEEK i wiórów aluminium

Rys. 6.13. Makroskopowe fotografie próbek kompozytowych z wiórów aluminiowych oraz poliamidu 6 przed obróbką i po obróbce:

a) próbka 1-PA5%/Al95%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm

b) próbka 2-PA10%/Al90%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm

c) próbka 3-PA15%/Al85%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm

d) próbka 4-PA5%/Al95%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

e) próbka 5-PA10%/Al90%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

f) próbka 6-PA15%/Al85%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

Rys. 6.14. Fotografie próbek kompozytowych z wiórów mosiądzu oraz poliamidu 6 przed obróbką i po obróbce:

a) próbka 7-PA5%/M95%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm

b) próbka 8-PA10%/M90%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm

c) próbka 9-PA15%/M85%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm

d) próbka 10-PA5%/M95%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

e) próbka 11-PA10%/M90%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

f) próbka 12-PA15%/M85%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

Rys. 6.15. Fotografie próbek kompozytowych z wiórów mosiądzu oraz PEEK przed obróbką i po obróbce:

a) próbka 1'-PEEK5%/M95%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm

b) próbka 2'-PEEK10%/M90%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm

c) próbka 3'-PEEK15%/M85%/W0,4, frakcja 0,2-0,4 mm

d) próbka 4'-PEEK5%/M95%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

e) próbka 5'-PEEK10%/M90%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

f) próbka 6'-PEEK15%/M85%/W0,6, frakcja 0,4-0,6 mm

Rys. 6.16. Fotografie próbek kompozytowych z wiórów aluminium oraz PEEK przed obróbką i po obróbce:

a) próbka 7'-PEEK5%/Al95%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm

b) próbka 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm

c) próbka 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8, frakcja 0,6-0,8 mm

d) próbka 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

e) próbka 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

f) próbka 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18, frakcja 0,8-1,18 mm

Spis tabel

- Tab. 1.1.** Schemat możliwych kombinacji materiałów kompozytowych
- Tab. 1.2.** Czynniki wpływające na proces obróbki wiórowej
- Tab. 1.3.** Wybrane właściwości tworzyw: PA, PEEK, POM (GF25), PTFE (CF25) pod względem obróbki skrawaniem
- Tab. 1.4.** Parametry tekstury powierzchni według normy ISO25178
- Tab. 4.1.** Zestawienie próbek uzyskanych metodą prasowania
- Tab. 4.2.** Zestawienie próbek pod względem składu wagowego i objętościowego
- Tab. 5.1.** Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PA6 i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i frakcji 0,8–1,18 mm
- Tab. 5.2.** Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i frakcji 0,4–0,6 mm
- Tab. 5.3.** Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i frakcji 0,4–0,6 mm
- Tab. 5.4.** Zestawienie wyników badań z różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskanych z obliczeń w programie Netzsch Proteus dla próbek z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i frakcji 0,8–1,18 mm
- Tab. 6.1.** Parametry chropowatości kompozytów z PA6 i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm
- Tab. 6.2.** Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PA6 i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm
- Tab. 6.3.** Parametry chropowatości kompozytów z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm
- Tab. 6.4.** Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PA6 i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm
- Tab. 6.5.** Parametry chropowatości kompozytów z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm
- Tab. 6.6.** Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PEEK i wiórami mosiądzu o frakcji 0,2–0,4 mm i 0,4–0,6 mm
- Tab. 6.7.** Parametry chropowatości kompozytów z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm
- Tab. 6.8.** Parametry funkcyjne wolumetryczne powierzchni kompozytów z PEEK i wiórami aluminium o frakcji 0,6–0,8 mm i 0,8–1,18 mm.
- Tab. 6.9.** Zestawienie procentowe udziału osnowy polimerowej, napelnacza metalicznego, pustek oraz zanieczyszczeń w badanych próbkach
- Tab. 6.10.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 2-PA10%/Al90%/W0,8

- Tab. 6.11.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 3-PA15%/Al85%/W0,8
- Tab. 6.12.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 4-PA5%/Al95%/W1,18
- Tab. 6.13.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 5-PA10%/Al90%/W1,18
- Tab. 6.14.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 6-PA15%/Al85%/W1,18
- Tab. 6.15.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 8-PA10%/M90%/W0,4
- Tab. 6.16.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 9-PA15%/M85%/W0,4
- Tab. 6.17.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 10-PA5%/M95%/W0,6
- Tab. 6.18.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 11-PA10%/M90%/W0,6
- Tab. 6.19.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 12-PA15%/M85%/W0,6
- Tab. 6.20.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 2'-PEEK10%/M90%/W0,4
- Tab. 6.21.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 3'-PEEK15%/M85%/W0,4
- Tab. 6.22.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 4'-PEEK5%/M95%/W0,6
- Tab. 6.23.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 5'-PEEK10%/M90%/W0,6
- Tab. 6.24.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 6'-PEEK15%/M85%/W0,6
- Tab. 6.25.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 8'-PEEK10%/Al90%/W0,8
- Tab. 6.26.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 9'-PEEK15%/Al85%/W0,8
- Tab. 6.27.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 10'-PEEK5%/Al95%/W1,18
- Tab. 6.28.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 11'-PEEK10%/Al90%/W1,18
- Tab. 6.29.** Zestawienie wyników pomiarów dla próbki 12'-PEEK15%/Al85%/W1,18
- Tab. 7.1.** Zestawienie najważniejszych cech kompozytów oraz ich właściwości

Suplement

W tabelach od 1 do 6 przedstawiono właściwości tworzyw polimerowych i metali kolorowych użytych w pracy. W tabelach zestawiono dane z kart materiałowych producenta firmy Ensinger oraz Dostal.

Tab. 1. Właściwości VICTREX™ Powder (PEEK 150P)

	Jednostka	Wartość	Metoda badania
Gęstość	[g/cm ³]	1.30	ISO 1183
Moduł sprężystości przy rozciąganiu [23 °C]	[MPa]	4100	ISO 527-1
Naprężenie przy rozciąganiu, 23 [°C]	[MPa]	100	ISO 527-2
Odształcenie przy rozciąganiu, 23 [°C]	[%]	15	ISO 527-2
Moduł sprężystości przy zginaniu, 23 [°C]	[MPa]	3900	ISO 178
Naprężenie przy zginaniu, 23 [°C]	[MPa]	170	ISO 178
Wytrzymałość na uderzenie wg Izoda z karbem, 23 [°C]	[kJ/m ²]	4,5	ISO 180/A
Wytrzymałość na uderzenie wg Izoda bez karbu, 23 [°C]		brak zerwania	ISO 180/1U
Temperatura zeszklenia: początek	[°C]	143	ISO 11357-2
Temperatura zeszklenia: środek	[°C]	147	ISO 11357-2
Temperatura topnienia	[°C]	343	ISO 11357-3
Lepkość topnika, 400 [°C]	[Pa·s]	130	ISO 11443
Temperatura suszenia	[°C]	120 do 150	
Czas suszenia	[h]	od 3 do 5	
Temperatura topnienia	[°C]	380 do 400	

Tab. 2. Właściwości Alphalon® 24 (poliamid 6)

	Jednostka	Wartość	Metoda badania
Lepkość względna (RV)		2,4 ± 0,05	ISO 307 - 1% w 96% H ₂ SO ₄
Liczba lepkościowa	[ml/g]	125	ISO 307 - 0,5% w 96% H ₂ SO ₄
Temperatura topnienia, DSC	[°C]	220	ISO 11357
Gęstość	[g/cm ³]	1,13	ISO 1183
Wielkość granulek	[mm]	2,5	
Zawartość wody	% [m/m]	≤ 0,1	ISO 15512
Zawartość związków ekstrahowalnych	% [m/m]	< 0,64	ISO 6427

Tab. 3. Skład chemiczny stopu aluminium AlCu4MgS (PA6/2017)

Skład chemiczny [%]							
Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Cr	Mg
0,20	0,60	3,50	0,40	0,17	0,23	0,08	0,40
0,80	0,80	4,50	1,00	0,23	0,27	0,12	1,00

Tab. 4. Własności fizyczne stopu aluminium AlCu4MgSi (PA6/2017)

Właściwość	Wartość
Gęstość	2,68 [g/cm ³]
Temperatura płynięcia	645 [°C]
Temperatura krzepnięcia	510 [°C]
Ciepło właściwe	873 [J/kgK]
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	22,9 [µm/mK]
Liczba Poissona	0,33
Opór właściwy	51 [nWm]
Moduł sprężystości poprzecznej G	27200 [MPa]
Moduł sprężystości E	72500 [MPa]
Przewodność elektryczna	32,5% IACS
Przewodność cieplna	134 [W/mK]

Tab. 5. Skład chemiczny mosiądzu MO58 / CuZn40Pb2

Skład chemiczny [%]						
Cu	Pb	Al	Ni	Fe	Cu	Sn
57,0	1,6	Max	Max	Max	57,0	Max
59,0	2,5	0,05	0,3	0,3	59,0	0,3

Tab. 6. Własności fizyczne mosiądzu MO58 / CuZn40Pb2

Właściwość	Wartość
Gęstość	8,43 [g/cm ³]
Moduł sprężystości E	96 [MPa]
Ciepło właściwe	0,377 [J/kgK]
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	21,1 [10 ⁻⁶ /K]
Opór właściwy	1,8 [10 ⁻³ /K]
Przewodność cieplna	113 [W/mK]
Przewodność elektryczna (IACS)	25% IACS
Przewodność elektryczna	14,9 [MS/m]