

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
INSTYTUT TECHNOLOGII MATERIAŁÓW

AUTOREFERAT

dr inż. Paweł Szymański

Poznań 2023

Spis treści

| | |
|--|-----------|
| 1. Dane personalne..... | 3 |
| 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułem rozprawy doktorskiej..... | 3 |
| 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych..... | 4 |
| 4. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego | 4 |
| 4.1. Spis powiązanych tematycznie artykułów naukowych..... | 5 |
| 4.2. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników..... | 10 |
| 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej..... | 48 |
| 5.1 Współpraca z krajowymi jednostkami naukowymi..... | 48 |
| 5.2 Współpraca z zagranicznymi jednostkami naukowymi..... | 48 |
| 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę..... | 49 |
| 6.1 Działalność dydaktyczna | 49 |
| 6.2 Działalność organizacyjna oraz popularyzująca naukę | 52 |
| 7. Informacje dodatkowe..... | 54 |
| 7.1 Staże w przemyśle. | 54 |
| 7.2 Działalność naukowa przed i po doktoracie. | 54 |

1. Dane personalne

| | |
|-------------------|---|
| Imię i nazwisko | Paweł Szymański |
| Data urodzenia | |
| Miejsce urodzenia | |
| Miejsce pracy | Politechnika Poznańska Wydział Inżynierii Mechanicznej Instytut Technologii Materiałów Zakład Odlewnictwa i Obróbki Plastycznej |
| Stanowisko | Adiunkt |
| ORCID | 0000-0003-3770-5082 |
| WoS ResearcherID | M-2264-2014 |
| Scopus | 12795171000 |
| e-mail | |
| telefon | |

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułem rozprawy doktorskiej

| | |
|------------|--|
| 18.12.2009 | Doktor nauk technicznych Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Dziedzina: nauki techniczne Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn Tytuł rozprawy doktorskiej: Recykling odlewów z metalowych kompozytów zawieszinowych Promotor: dr hab. inż. Jacek Jackowski, Prof. PP Recenzenci: prof. dr hab. inż. Michał Szweycer (Instytut Technologii Materiałów PP), prof. dr hab. inż. Bogdan Piekarski (Katedra Technologii Materiałowych ZUT) |
| 11.07.2012 | Magister inżynier Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Kierunek: Zarządzanie i Marketing Specjalność: Logistyka |

| | |
|-------------|---|
| | <p>Tytuł pracy magisterskiej: Projekt wstępny procesu opracowania zamówienia klienta na przykładzie wybranej odlewni</p> <p>Promotor: dr inż. Marek Pawlewski</p> |
| 2007 - 2009 | Podyplomowe studium pedagogiczne: „Kompetencje edukacyjne w obszarze przedmiotów politechnicznych” |

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

| | |
|----------------------------|--|
| 01.01.2020 – obecnie | Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa i Obróbki Plastycznej, adiunkt |
| 01.12.2019 – 31.12.2019 | Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa, adiunkt |
| 01.09.2004 – 30.11.2019 | Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa, asystent |
| 06.05.1996 – 01.09.2004 | Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa, pracownik techniczny |

4. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem naukowym zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) jest cykl dziesięciu powiązanych tematycznie artykułów i jedno opracowanie patentowe. Cykl prac wskazany jest pod zbiorczym tytułem:

Wytwarzanie metalowych odlewów kompozytowych w wyżarzanych formach ceramicznych

W pracach wyszczególniono dwa główne aspekty osiągnięcia habilitacyjnego, które dotyczą:

1. Wpływu parametrów materiałowo-technologicznych na proces wytwarzania odlewów z kompozytów zawieszinowych z jednoczesnym zaprojektowaniem procesu wypełniania formy.
2. Opracowania procesu kształtowania odlewów z nasycanym zbrojeniem z określeniem ich cech technologicznych.

4.1. Spis powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Poniżej przedstawiono prace, które tworzą monotematyczny cykl opracowań dotyczących procesu wytwarzania odlewów kompozytowych. Dla każdej pozycji wskazano typ publikacji i dokładnie opisano indywidualny wkład w tworzenie opracowania.

Oznaczenie pozycji:

- [A] - Artykuł naukowy opublikowany w recenzowanym czasopiśmie
- [R] - Rozdział w monografii
- [P] - Patent

Jackowski J., Szymański P., The structure of centrifugally cast composite casting, **Composites Theory and Practice**, 12: 1 (2012) 66-71

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [A1] – koncepcja artykułu i metodyki badań,
- analiza stanu zagadnienia,
- wykonanie badań,
- dobór impregnatu dla wydrukowanego modelu z PMMA,
- projekt i wykonanie układu wlewowo-zasilającego,
- wykonanie cienkościennych odlewów kompozytowych turbiny z zawiesziny A359/20SiCp
- przygotowanie zglądów i ocena metalograficzna,
- interpretacja wyników i sformułowanie wniosków.

Bernat Ł., Jackowski J., Szymański P., SiC particle distribution in castings made from composite suspension A359/SiC_p with various casting conditions, **Composites Theory and Practice**, 15: 3 (2015) 168-173, (11 pkt. MNiSzW)

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [A2] – koncepcja artykułu i metodyki badań,
- znaczący wkład w analizę stanu zagadnienia,
- wykonanie badań,
- projekt i wykonanie oprzyrządowania technologicznego do przeprowadzenia badań,

- projekt i wykonanie układów modelowych oraz przygotowanie form,
 - przeprowadzenie procesu zalewania form zawieszoną A359/20SiCp w warunkach wypełniania grawitacyjnego, z przeciwcieżnieniem oraz odśrodkowo,
 - ocena metalograficzna,
 - interpretacja wyników i sformułowanie wniosków.
-

Przestacki D., **Szymański P.**, Wojciechowski S., Formation of surface layer in metal matrix composite A359/20SiCP during laser assisted turning, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Volume 91, Part 1, December 2016, Pages 370–379, DOI: doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.026, (IF: 4,075; 50 pkt. MNiSzW; 140 pkt MEiN)

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [A3]
- wkład w koncepcję artykułu oraz metodyki badań,
 - wykonanie projektu odlewu wałka kompozytowego przeznaczonego do procesu toczenia ze wspomaganie laserowym,
 - projekt i wykonanie układów modelowych oraz przygotowanie form i odlewów,
 - wyznaczenie czasu sedymentacji cząstek SiC w skrawanej warstwie wierzchniej w warunkach nagrzewania laserowego,
 - przygotowanie zglądów i analiza metalograficzna,
 - interpretacja wyników i sformułowanie wniosków.
-

Gawdzińska K., Nagolska D., **Szymański P.**, Determination of Duration and Sequence of Vacuum Pressure Saturation in Infiltrated MMC Castings, **Archives of Foundry Engineering**, Volume 18, iss. 1/2018, s. 23 – 28, DOI: 10.24425/118806, (15 pkt. MNiSzW)

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [A4]
- wkład w koncepcję artykułu oraz metodyki badań,
 - wkład w analizę stanu zagadnienia,
 - projekt stanowiska do odlewania próżniowego,
 - określenie warunków procesu nasycania,
 - dobór stopu do przeprowadzenia prób nasycania.
-

Szymański P., Gawdzińska K., Nagolska D., Attempts to Prepare Precision Composite Castings by Sintering Al₂O₃/AlSi₁₁ Using Underpressure, **Archives of Foundry Engineering** - 2020, vol. 20, iss. 1, s. 49-54, DOI: 10.24425/afe.2020.131282, (40 pkt. MEiN)

[A5]

Indywidualny wkład własny w pracę:

- koncepcja artykułu oraz metodyki badań,
 - analiza stanu zagadnienia,
 - wykonanie badań,
 - wykonanie projektu odlewu kompozytowego,
 - dobór tworzywa i wydruk 3D matrycy do wykonania spieku zbrojenia,
 - wykonanie spieku zębaki z Al_2O_3 ,
 - określenie parametrów procesu infiltracji w oparciu o wyznaczone wartości ciśnienia kapilarnego,
 - przeprowadzenie procesu nasycania zbrojenia stopem aluminium w warunkach wypełniania z przeciwcisnieniem,
 - przygotowanie złądów i analiza metalograficzna,
 - interpretacja wyników i sformułowanie wniosków.
-

Sika R., Rogalewicz M., Popielarski P., Czarnecka-Komorowska D., Gawdzińska K., Przystacki D., **Szymański P.**, Decision Support System in the Field of Defects Assessment in the Metal Matrix Composites Castings, **Materials** - 2020, vol. 13, iss. 16, s. 3552-3589, DOI: 10.3390/ma13163552, (IF: 3,623; 140 pkt. MEiN)

[A6] **Indywidualny wkład własny w pracę:**

- analiza stanu zagadnienia,
 - przygotowanie złądów wytypowanych do badań próbek materiałów kompozytowych i ich analiza metalograficzna,
 - analiza wad wybranych materiałów kompozytowych,
 - udział w interpretacji wyników i formułowaniu wniosków.
-

Szymański M., Przystacki D., **Szymański P.**, Tool Wear and Surface Roughness in Turning of Metal Matrix Composite Built of Al_2O_3 Sinter Saturated by Aluminum Alloy in Vacuum Condition, **Materials** - 2022, vol. 15, iss. 23, s. 8375-1-8375-17, DOI: 10.3390/ma15238375, (IF: 3,4; 140 pkt. MEiN)

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [A7]**
- wkład w koncepcję artykułu oraz metodyki badań,
 - wykonanie projektu odlewu wałka kompozytowego,
 - dobór tworzywa i wydruk 3D matryc do wykonania kształtek zbrojenia,
 - wykonanie kształtek z Al_2O_3 o ziarnistości 046 i 100 FEPA,
 - impregnacja kształtek zbrojenia,
 - projekt i wykonanie układów modelowych oraz przygotowanie form gipsowych z umieszczonym wewnątrz zbrojeniem,
 - określenie parametrów procesu infiltracji w oparciu o wyznaczone wartości ciśnienia kapilarnego,

- przeprowadzenie procesu nasycania zbrojenia stopem aluminium (AlSi11) w warunkach wypełniania z przeciwcieniem,
- analiza metalograficzna,
- udział w opracowaniu wyników badań.

Szymański P., Popielarski P., Czarnecka-Komorowska D., Sika R. and Gawdzińska K., Determination of Saturation Conditions of the Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced with Al₂O₃ Sinter, **Materials** - 2023, 16, 6106, DOI: 10.3390/ma16186106, (IF: 3,4; 140 pkt. MEiN)

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [A8]
- koncepcja artykułu oraz metodyki badań,
 - analiza stanu zagadnienia,
 - wykonanie badań,
 - wykonanie projektu odlewu kompozytowej spirali lejności,
 - dobór tworzywa i wydruk matryc do wykonania spieków zbrojenia,
 - impregnacja spieków,
 - projekt i wykonanie układów modelowych oraz przygotowanie form gipsowych z umieszczonymi wewnątrz wkładkami zbrojenia,
 - określenie parametrów procesu infiltracji w oparciu o wyznaczone wartości ciśnienia kapilarnego,
 - przeprowadzenie procesu nasycania stopem aluminium (AlSi11) w warunkach wypełniania z przeciwcieniem,
 - ocena metalograficzna
 - interpretacja wyników i sformułowanie wniosków.

Szymański P., Manufacturing of Composite Castings by the Method of Fused Models Reinforced with Carbon Fibers Based on the Aluminum Matrix, **Archives of Foundry Engineering**, 2023, vol. 23, iss. 3, DOI: 0.24425/afe.2023.146670 (IF: 0,6; 100 pkt. MEiN)

Praca autorska

- [A9]
- koncepcja całego artykułu oraz metodyki badań,
 - przeprowadzenie analizy literatury,
 - wykonanie badań
 - wykonanie projektu odlewu kompozytowego,
 - impregnacja kształtki z włókna węglowego (CF),
 - projekt i wykonanie układu modelowego oraz przygotowanie form gipsowych z umieszczoną wewnątrz wkładką zbrojenia,
 - opracowanie metody zabezpieczającej wkładkę CF przed utlenianiem w trakcie procesu wypalania formy,

- określenie parametrów procesu infiltracji w oparciu o wyznaczone wartości ciśnienia kapilarnego,
 - przeprowadzenie procesu nasycania stopem aluminium (AlSi11) w warunkach wypełniania z przeciwcisnieniem,
 - ocena metalograficzna
 - interpretacja wyników i sformułowanie wniosków.
-

Szymański P., Rozdział w monografii, Procesy wspomaganie produkcji odlewów, IX.2. Zastosowanie technik szybkiego prototypowania w odlewnictwie, Zastosowanie metod addytywnych w technologii wytwarzania metalowych odlewów kompozytowych, *Odlewnictwo Współczesne. Poradnik Odlewnika. Technologia i Organizacja. T. II – 2023*, s. 922-933

Praca autorska

- [R1]
- koncepcja całego rozdziału w monografii,
 - przeprowadzenie analizy literatury,
 - zestawienie i charakterystyka metod druku 3D,
 - przedstawienie w postaci tabelarycznej możliwości zastosowania druku 3D w prototypowaniu odlewów konwencjonalnych i kompozytowych,
 - opracowanie w oparciu o badania własne możliwości wykorzystania różnych tworzyw sztucznych do drukowania modeli odlewniczych w zależności od zastosowanej masy ceramicznej stosowanej w technologii odlewania precyzyjnego.
-

Szymański P., Przystacki D., Patent krajowy, Wkładka kompozytowa pod rowek pierścienia tłoka silnika spalinowego oraz zastosowanie wkładki kompozytowej w produkcji tłoków, Pat/2024, P.424000, patent nr PAT.234535

Indywidualny wkład własny w pracę:

- [P1]
- koncepcja wynalazku,
 - wykonanie projektu odlewu kompozytowego wkładki pod pierścień tłoka,
 - dobór tworzywa oraz wykonanie wydruków modeli odlewniczych wkładki tłoka,
 - projekt i wykonanie układów modelowych oraz przygotowanie form,
 - przeprowadzenie procesu zalewania form zawiesiną A359/20SiCp w warunkach wypełniania z przeciwcisnieniem,
 - wyznaczenie parametrów temperaturowych dla procesu połączenia wkładki kompozytowej z odlewem tłoka,
 - udział w opracowaniu ochrony wynalazku.

4.2. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników

Głównym celem naukowym badań było opracowanie procesu wytwarzania kompozytowych odlewów kształtowych z kompozytów zawiesinowych i z nasycanym zbrojeniem wytwarzanych metodą wytapianych modeli w wyżarzanych formach ceramicznych.

Realizacja celu pracy wymagała:

1. Analizy procesu (z uwzględnieniem literatury i badań własnych) wytwarzania metalowych kompozytów zawiesinowych i z nasycanym zbrojeniem (MMC).
 2. Przedstawienia sposobów metod wytwarzania MMC.
 3. Dobrania materiału osnowy metalowej i zbrojenia (literatura, badania własne).
 4. Przeprowadzenia badań eksperymentalnych związanych z wytypowanymi metodami, które postanowiono przeprowadzić w celu wytworzenia odlewów kompozytowych wybranych typów.
 5. Opracowania wyników badań w zakresie:
 - wskazania wpływu parametrów materiałowo-technologicznych (temperatury zawiesiny, ciśnienia wypełnienia formy, czasu stygnięcia) w procesie wytwarzania odlewów z zawiesin kompozytowych z uwzględnieniem projektowania operacji wypełnienia formy,
- oraz
- procesu kształtowania odlewów z nasycanym zbrojeniem z określeniem cech technologicznych (jednorodności i/lub rozmieszczenia kształtu, wielkości i udziału fazy zbrojącej w odlewie, struktury zbrojenia, porowatości) odlewu kompozytowego i parametrów procesu (temperatury: formy, ciekłego stopu oraz zbrojenia; ciśnienia nasycania, czasu nasycania itp.).

Wykaz prac stanowiących wkład do dorobku został przedstawiony w punkcie 4.1 w kolejności chronologicznej wydawanych publikacji. Cele i osiągnięte wyniki zostały w dalszej części opracowania zaprezentowane tematycznie i zgodnie z chronologią przeprowadzonych badań.

W zależności od sposobu wytwarzania metalowe kompozyty odlewane możemy podzielić na trzy grupy: zawiesinowe, z nasycanym zbrojeniem oraz wytwarzane „in situ” [1-3].

Kompozyty zawiesinowe powstają przez wprowadzenie do ciekłej metalowej osnowy cząstek ceramicznych (Al_2O_3 , SiC, itp.), cząstek grafitowych, krótkich włókien lub wiszków [4, 5]. In situ powstają przez wprowadzenie do ciekłej osnowy reagenta lub struktura kształtowana jest w drodze kierunkowej krystalizacji. Odlewy z nasycanym zbrojeniem wytwarzane są w drodze infiltracji metalem porowatego spieku ceramicznego lub sprasowanych włókien [6].

Przygotowanie formy odlewniczej do wytwarzania odlewów z zawiesin kompozytowych obejmuje takie same standardy jak przy konwencjonalnych technologiach odlewniczych. Biorąc pod uwagę fakt, że przy produkcji odlewów z kompozytów zawiesinowych można stosować prawie wszystkie techniki wytwarzania odlewów, czynniki, które będą determinowały sposób wyboru technologii będą uwzględniały: seryjność produkcji, materiał osnowy, masę odlewu oraz możliwości technologiczne wytwórcy. Przy stosowaniu niektórych zawiesin kompozytowych (np. DurAlcanTM) należy nieznacznie zmodyfikować układ wlewowy np. zastosować stopniowe przewężanie układu aż do filtra w celu uzyskania ciągłości strugi lub zastosować układ wlewowy z tzw. „przerywanym przepływem”, który sprzyja usunięciu gazów przed wplynięciem zawiesiny do wnęki formy. Podczas zalewania niektórych zawiesin można stosować filtry ceramiczne, które usuwają tlenki i redukują turbulencję natomiast nie zatrzymują cząstek zbrojenia [7].

Na jakość odlewu kompozytowego ma wpływ nie tylko odtworzenie wnęki formy przez zawiesinę ale również tworząca się struktura wynikająca z rozmieszczenia cząstek fazy zbrojącej. Zjawiska powierzchniowe występujące w procesach wytwarzania odlewów kompozytowych o osnowie metalowej zbrojonej cząstkami mają istotny wpływ zarówno na tworzenie się struktury kompozytowej, jak i na jej właściwości oraz wady. Zjawiska te występują w okresie od chwili rozpoczęcia procesu łączenia komponentów, do momentu zakończenia procesu krzepnięcia metalowej osnowy kompozytowej.

Odlewy kompozytowe wzmocnione cząstkami ceramicznymi charakteryzują się wysoką odpornością na ścieranie co jednocześnie klasyfikuje te materiały do grupy tworzyw trudnoobrabialnych. Zasadne jest, żeby wytwarzając odlewy z materiałów kompozytowych do minimum ograniczyć ich obróbkę skrawaniem. Do precyzyjnych metod odlewania zaliczyć można odlewanie metodą wytapianych modeli. Odlewy wytwarzane tą metodą cechują się niską chropowatością powierzchni i małą odchyłką wymiarową [8]. Przebieg procesu odlewania metodą wytapianych modeli w zależności od zastosowanego materiału formierskiego przedstawiono w tabeli 1.

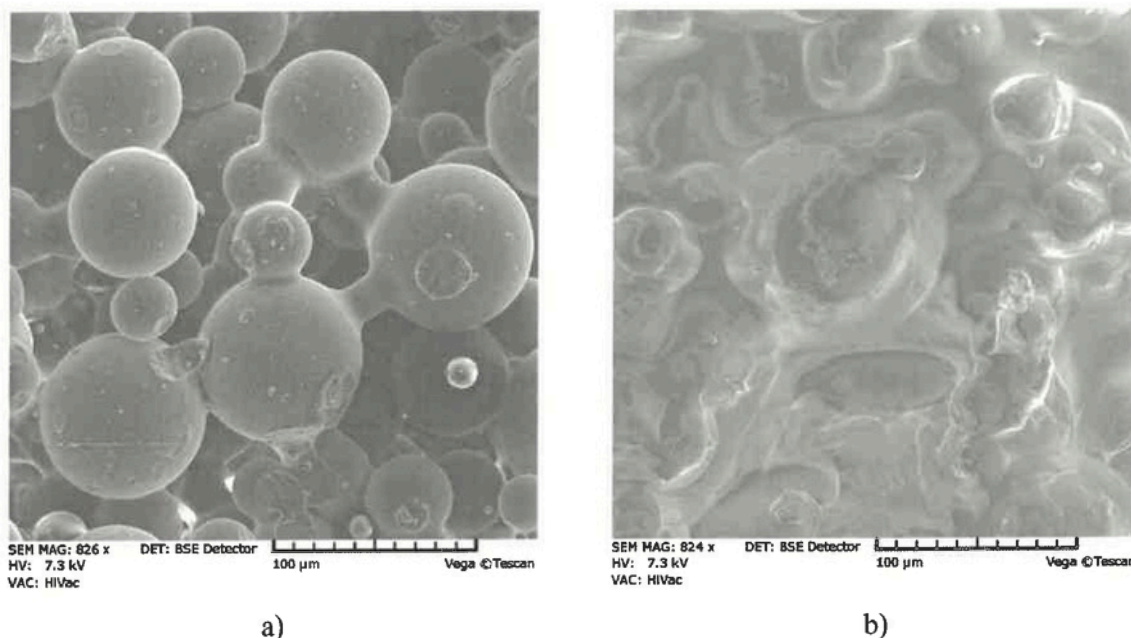
Tabela 1. Zestawienie materiałów stosowanych w procesie odlewania metodą wytapianych modeli.

| | |
|--|--|
| Wykonanie modeli odlewniczych z wosku lub tworzywa sztucznego w technologii: wtrysku, wtlaczania lub druku 3D | |
| ↓ | |
| Montaż modeli na układzie wlewowo zasilającym (struktura choinki) | |
| ↓ | |
| DOBÓR PROCESU FORMOWANIA | |
| GIPS ODLEWNICZY (metale nieżelazne) | ZAWIESINA CERAMICZNA+PIASEK (stopy wysokotopliwe) |
| Umieszczenie układu modelowego w tulei lub skrzynce | Odtuszczenie układu modelowego |
| Wymieszanie mechaniczne masy gipsowej; odgazowanie w komorze próżniowej, zalanie masą układu modelowego i ponowne odgazowanie w komorze próżniowej | Wytworzenie zawiesiny (zhydrolizowany krzemian etylu + mulit lub mączka kwarcowa lub cyrkonowa/ krzemionka koloidalna + mączka cyrkonowa lub kwarcowa), naniesienie powłoki na układ modelowy przez zanurzenie i posypanie naniesionej powłoki piaskiem, po wyschnięciu nanoszenie kolejnych warstw: od 6 do 8 |
| Wytapienie modeli i wyżarzenie formy w temperaturze do 720 °C | Wytapienie modeli i wyżarzenie formy w temperaturze 900 do 1100 °C |
| ↓ | |
| Zalewanie | |
| ↓ | |
| Oczyszczanie | |
| Wyplukiwanie w wodzie | Wybijanie mechaniczne, najczęściej udarowo |
| Trawienie, piaskowanie lub śrutowanie odlewów | |

Wytwarzanie odlewów metodą wytapianych modeli z uwagi na koszty oprzyrządowania przeznaczone jest głównie do produkcji seryjnej i masowej jednak rozwój w ostatnich latach technik druku 3D pozwala na wytwarzanie precyzyjnych modeli i matryc w krótkich seriach prototypowych. Ponieważ drukowane modele wykorzystywane w procesie wytwarzania odlewów, wykonane z tworzyw sztucznych, nie topią się w taki sam sposób jak mieszanki woskowe, w dalszej części opisu będzie używany termin „tracone modele” przy odniesieniu do modeli z tworzyw sztucznych.

W pracy [A1] przedstawiono proces wytwarzania odlewów z zawiesiny kompozytowej A359/20SiC_p (F3S.20S DurAlcan™), którego celem było wykonanie precyzyjnych odlewów kompozytowych przy użyciu metody traconych modeli oraz druku 3D. Do badań wybrano modele turbiny o średnicy 70,9 mm ze skrzydełkami o grubości 1mm, wydrukowane metodą 3DP (Three Dimensional Printining) z polimetakrylanu metylu (PMMA). Ze względu na technikę druku (warstwowe spajanie proszku) modele charakteryzowały się znaczną porowatością (rys. 1a). Przygotowanie modeli do formowania wymagało przeprowadzenia

procesu impregnacji w celu zabezpieczenia ich przed penetracją ciekłą masą ceramiczną oraz zapewnienia wymaganej jakości powierzchni odlewów. Modele zostały zaimpregnowane parafiną C₂₃H₄₈ w temperaturze 75°C, a następnie schłodzone do temperatury otoczenia (rys. 1b).



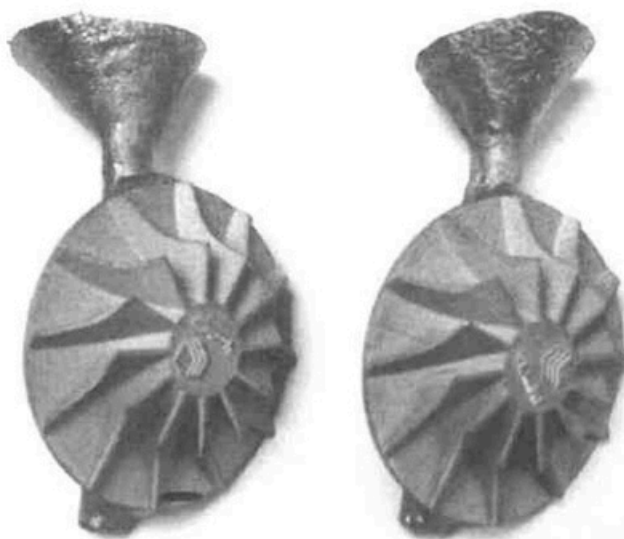
Rys. 1. Struktura wydrukowanego modelu z PMMA przed impregnacją – a), po impregnacji parafiną – b).

Gotowe modele łączono z układem wlewowym i umieszczano w tulejach stalowych. Do sporządzania form użyty został gips odlewniczy firmy KERR. Modele zalewano masą gipsową (rys. 2), którą następnie poddawano obróbce podciśnieniowej celem usunięcia pęcherzy gazowych.



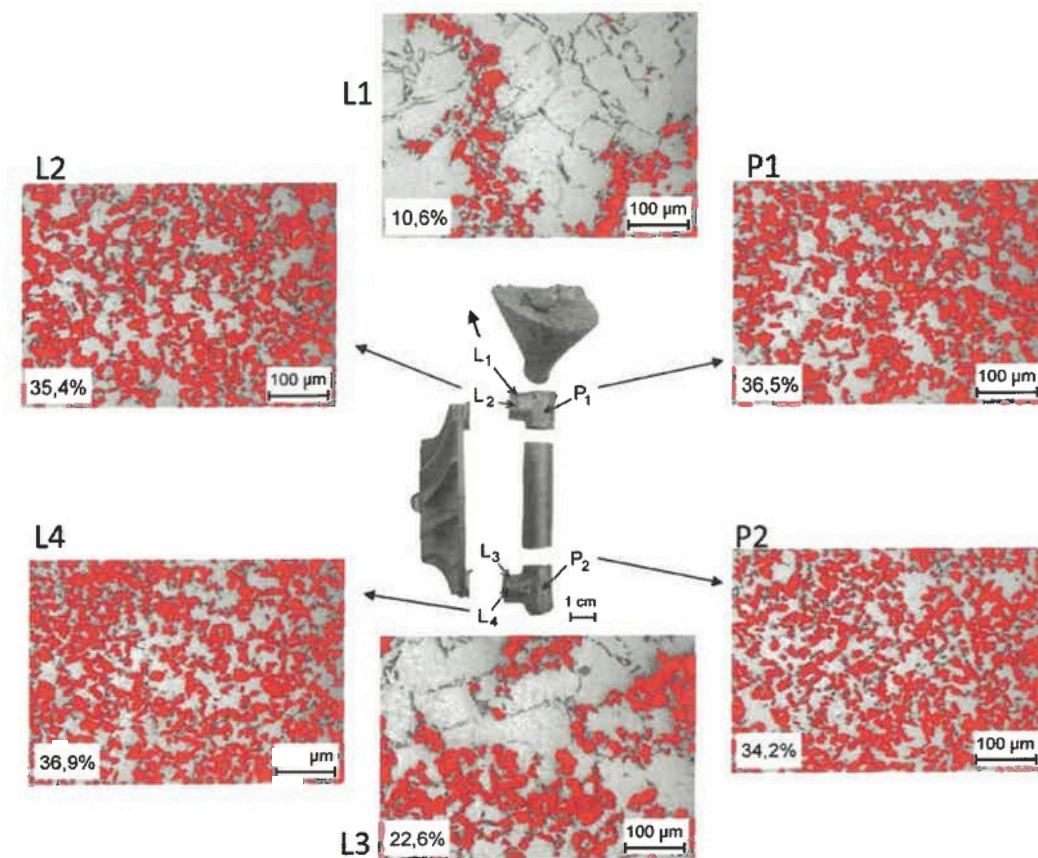
Rys. 2. Proces wykonania formy: zalewanie układu modelowego masą gipsową.

Po związaniu masy, formy suszono i wyżarzano w temperaturze 720°C przez okres 12 godzin. W trakcie procesu wyżarzania form modele wykonane z PMMA ulegały całkowitemu zgazowaniu. Przed zalewaniem, temperaturę form obniżano do wartości 300°C. Badania wstępne obejmowały zalewanie grawitacyjne gdzie po wybiciu odlewu z formy stwierdzono wady w postaci niedolewów głównie widoczne w obszarach łopatek. Przyczyną występowania wad było zbyt małe ciśnienie metalostatyczne, które nie pozwoliło na całkowite wypełnienie wnęki formy. Do zalewania kolejnych form użyta została odlewarzka firmy F.lliGiacetti posiadająca indukcyjny piec o pojemności tygla pozwalającej na zalanie jednownękowej formy turbiny. Porcję wlewano do tygielka pieca odlewarzki a po ustabilizowaniu temperatury (720°C), kłamrowano formę z tygłem i rozpoczynano wirowanie. Liczba obrotów była zawsze stała i wynosiła 270obr/min. Promień łączący oś wirowania układu tygiel-forma z osią odlewanej turbiny wynosił ok.180 mm. Czas wirowania układu przekraczał czas całkowitego zakrzepnięcia odlanej zawiesiny. Po zakończeniu wirowania, demontowano zalaną formę a masę gipsową oddzielano od odlewu w strumieniu wody. Żaden z uzyskanych odlewów nie posiadał wad kształtu np. w postaci niedolewów itp. (rys.3).



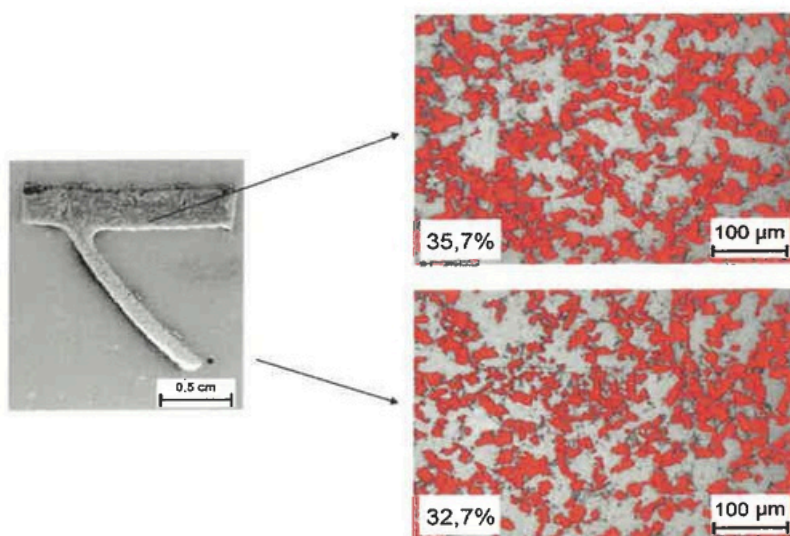
Rys. 3. Surowe odlewy wykonane z kompozytu A359/20SiC_p.

Kolejnym etapem badań była ocena metalograficzna struktury wewnętrznej uzyskanego odlewu, a szczególnie rozłożenia cząstek fazy zbrojącej w osnowie metalowej. Badania objęły szczególnie materiał cienkościennych łopatek turbiny oraz wybranych obszarów układu wlewowego (rys. 4).

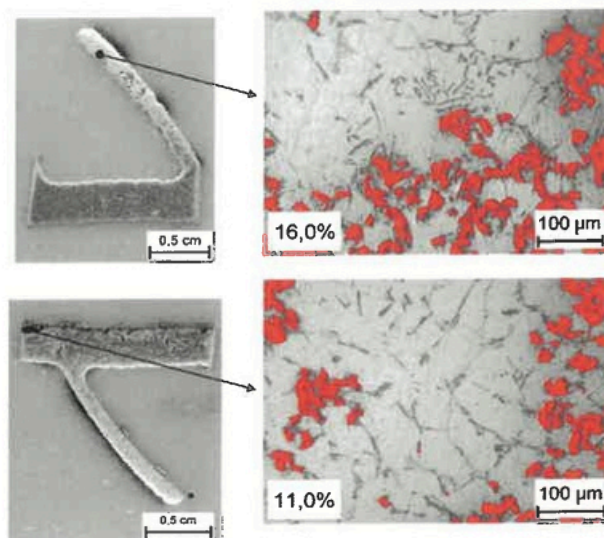


Rys. 4. Udział objętościowy SiC w osnowie Al-Si w wybranych obszarach układu wlewowego.

W układzie wlewowym oraz wlewach doprowadzających stwierdzono koncentrację cząstek fazy zbrojącej, która wynikała z wymuszonego działaniem siły odśrodkowej przepływu zawiesiny. Nierównomierne rozłożenie cząstek SiC wystąpiło również w obszarach badanego odlewu widoczne na rys. 5 i rys. 6.



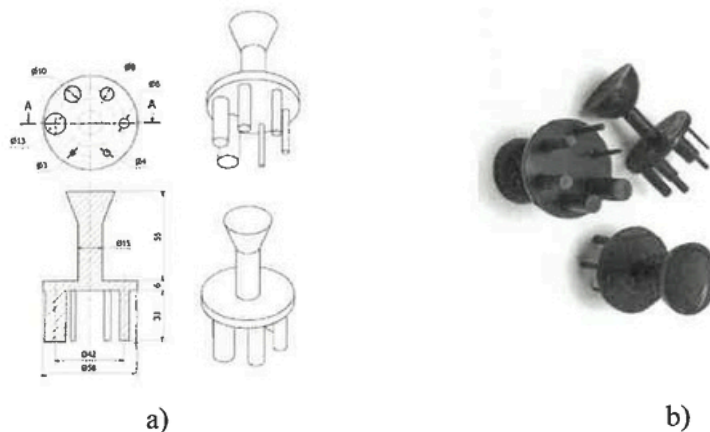
Rys. 5. Mikrostruktura fragmentu łopatki usytuowanej w dolnej części względem wlewu głównego.



Rys. 6. Wybrane obszary odlewu, w których stwierdzono zmniejszony udział fazy zbrojącej.

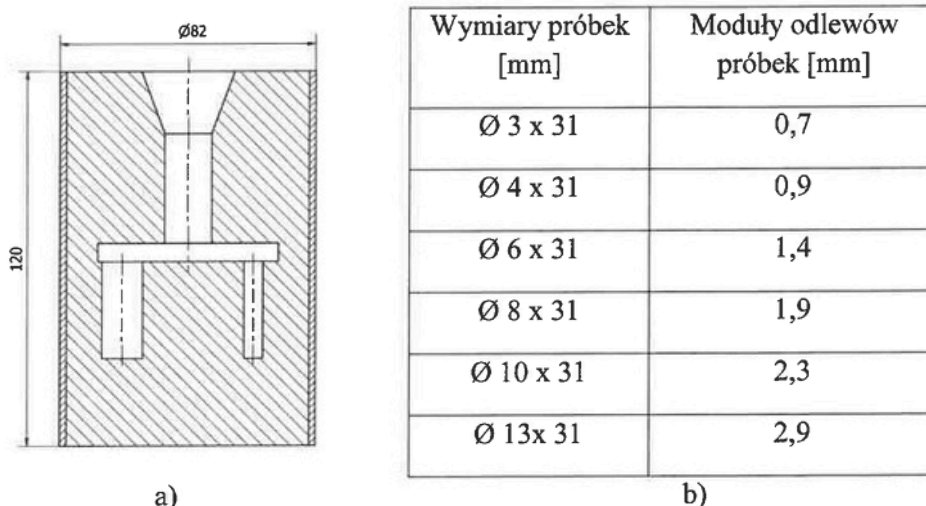
W pracy [A1] wykazano, że odlewanie metodą traconych modeli umożliwia wytwarzanie cienkościennych odlewów z kompozytu A359/20SiCp w formach gipsowych. Jednak proces zalewania z wykorzystaniem siły odśrodkowej wpływa na nierównomierne rozmieszczenie cząstek fazy wzmacniającej w odlewie. Wnioski poznawcze z przeprowadzonych badań mają istotne znaczenie dla przyszłego doskonalenia procesów odlewania kompozytów i poprawy jakości produkowanych odlewów cienkościennych wytwarzanych z zawiesin A359/20SiCp.

Celem pracy [A2] było określenie wpływu warunków zalewania na strukturę odlewu kompozytowego. W badaniach zastosowano technologię odlewania precyzyjnego metodą wytapianych modeli. Badania wpływu metody wypełniania wnęki formy na rozkład cząstek SiC w odlewie wykonano na standardowym materiale kompozytowym o oznaczeniu A359/20SiCp (F3S.20S DurAlcan™). Wykonano trzy układy modelowe z wosku Kerr (rys. 7b) o wymiarach przedstawionych na rys. 7a.



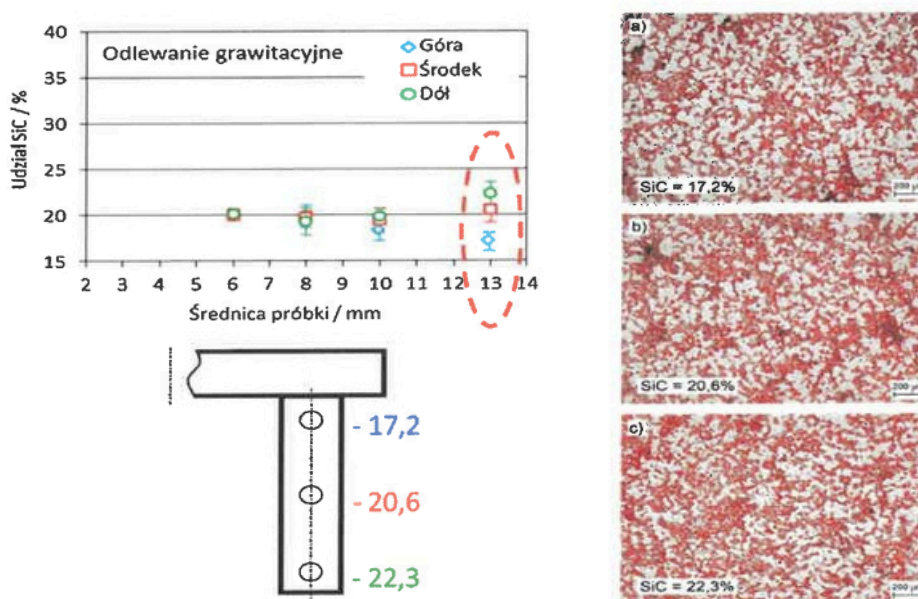
Rys. 7. Wymiary i kształt próbek użytych do badań – a), odlewnicze modele woskowe – b).

Przygotowane formy gipsowe (rys. 8) wyżarzano przyrostowo w temperaturze 720°C przez 12 godzin, a następnie chłodzono z piecem do wartości 300°C. Po uzyskaniu zadanej temperatury zalewano formy zawieszoną kompozytowo grawitacyjnie, podciśnieniowo i z wykorzystaniem siły odśrodkowej.



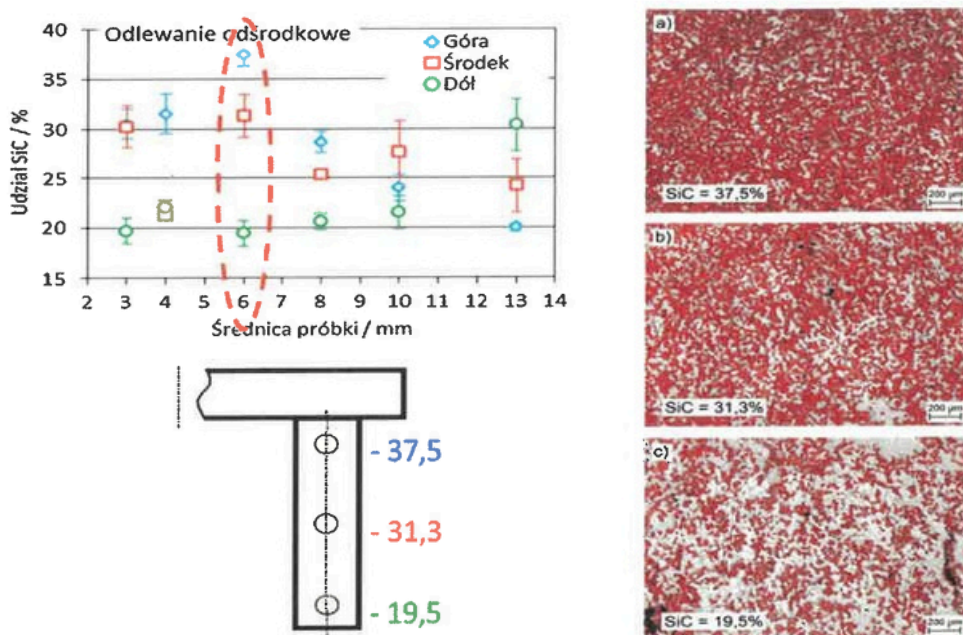
Rys. 8. Widok przekroju formy – a), wyznaczone moduły odlewów – b).

Rysunek 9 przedstawia graficznie udział fazy zbrojącej w badanych próbkach zalewanych grawitacyjnie. W wyniku zbyt małego ciśnienia metalostatycznego próbki o średnicy 3 i 4 mm nie zostały wypełnione natomiast udział procentowy w próbkach 6, 8 i 10 mm wykazuje równomierny rozkład fazy zbrojącej na całej długości odlewu. W największej próbce o średnicy 13 mm wystąpiła sedimentacja cząstek na co wpływ miała temperatura początkowa formy i czas krzepnięcia osnowy kompozytowej.



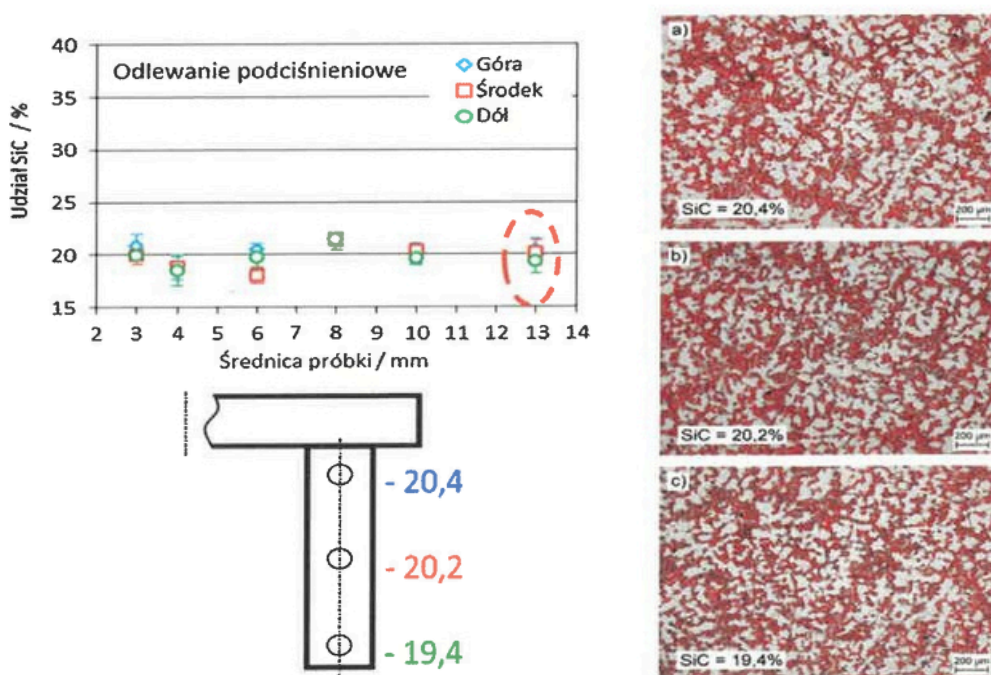
Rys. 9. Udział procentowy SiC w próbkach zalewanych grawitacyjnie.

Wszystkie próbki zalewane odśrodkowo (rys. 10) zostały całkowicie wypełnione ciekłą zawiesiną, wykazały natomiast największe zróżnicowanie udziału SiC w badanych obszarach.



Rys. 10. Udział procentowy SiC w próbkach zalewanych odśrodkowo.

Próbki zalewane w warunkach przeciwcisnienia nie wykazały wad kształtu, a rozmieszczenie cząstek fazy zbrojącej nie wykazuje dużego zróżnicowania w badanych odlewach.



Rys. 11. Udział procentowy SiC w próbkach zalewanych z przeciwcisnieniem.

W pracy [A2] wykazano korzystny wpływ czynników intensyfikujących proces wypełniania wnęki form zawiesiną kompozytową. Grawitacyjne odlewanie zawiesiny kompozytowej ograniczone jest wielkością modułów odlewów, które w analizowanych warunkach doświadczeń nie mogą być mniejsze niż 1,4 mm. Stwierdzono równomierny rozkład cząstek fazy zbrojącej w odlewach uzyskanych z wykorzystaniem podciśnienia, a ponadto bardzo zróżnicowany rozkład cząstek w odlewach z zawiesiny poddanej działaniu sił odśrodkowych. Metoda zalewania odśrodkowego może mieć zastosowanie, kiedy oczekiwane jest uzyskanie odlewów kompozytowych o strukturze gradientowej.

W pracach [A1, A2] stwierdzono, że ruch cząstek w ciekłej osnowie kompozytowej zachodzi do momentu zakrzepnięcia odlewu w formie. W procesach obróbki powierzchniowej kompozytów zawiesinowych za pomocą lasera lub w procesach skrawania ze wspomaganie laserowym (LAM), warstwa wierzchnia jest podgrzewana wiązką lasera, co powoduje nadtapianie powierzchni obrabianego odlewu kompozytowego oraz proces przemieszczania się cząstek fazy zbrojącej. Kierunek ich przemieszczania zależy od sił wypadkowych działających na cząstkę oraz od temperatury ciekłej osnowy, która w przypadku nagrzewania laserowego może przekraczać 1200 °C. W przypadku, kiedy cząstka ma większą gęstość od osnowy metalowej prędkość jej opadania można wyznaczyć wg zależności Stokes'a [9]. Na szybkość opadania cząstki ma wpływ: gęstość cząstki i osnowy, średnica cząstki oraz lepkość osnowy, która zależy od temperatury.

Zależność Stokes'a wyrażona jest:

$$v = \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \eta} \quad [1]$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie

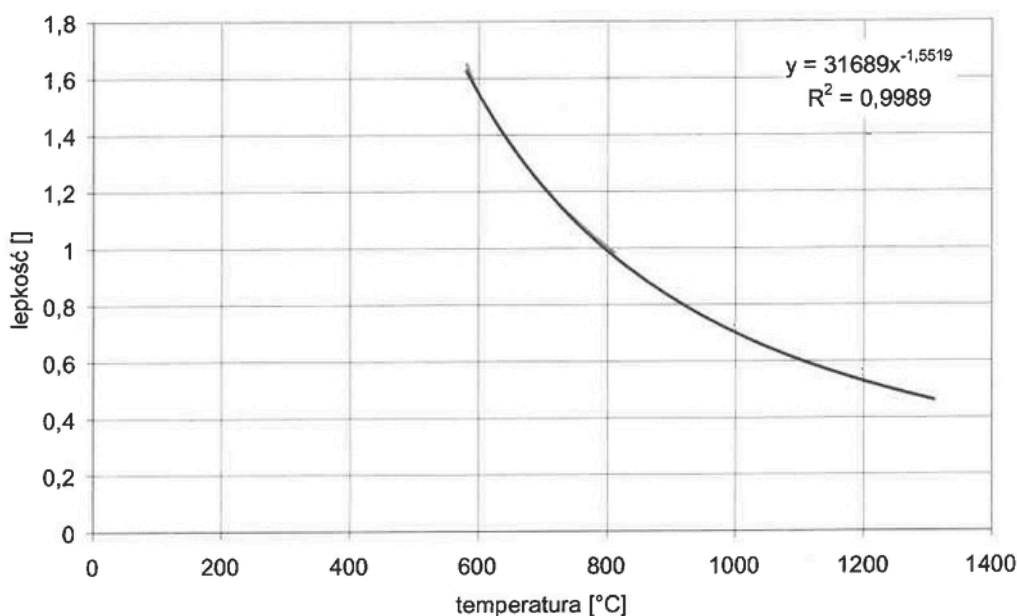
d – średnica cząstki

$\Delta\rho$ – różnica gęstości faz tworzących zawiesinę

η – lepkość dynamiczna fazy ciekłej (osnowy)

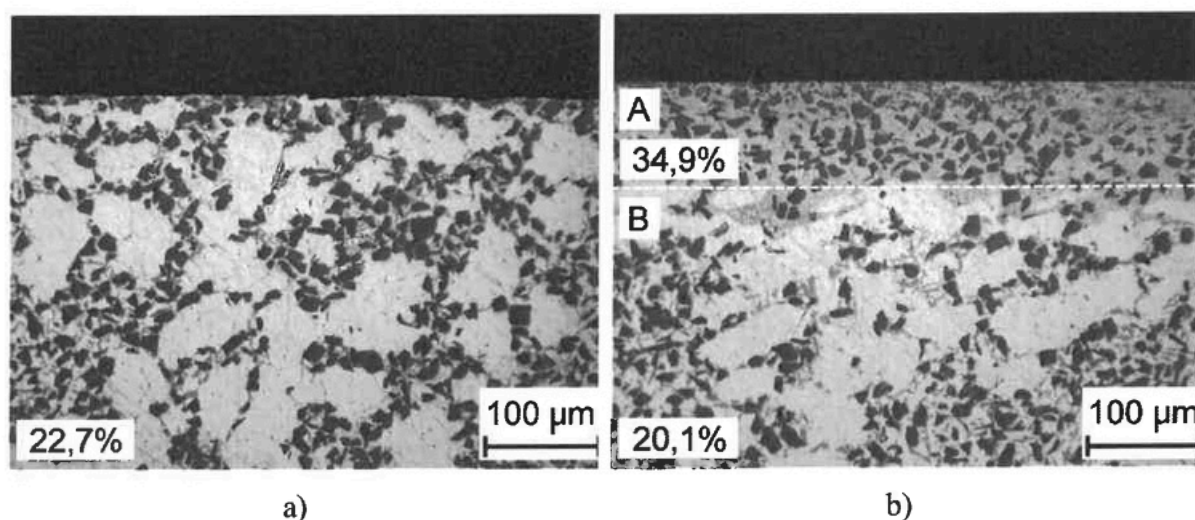
Celem pracy [A3] było określenie wpływu laserowego wspomaganie procesu skrawania na kształtowanie warstwy wierzchniej obrabianego odlewu kompozytowego. Badania obejmowały: wykonanie projektu odlewu wałka kompozytowego przeznaczonego do procesu toczenia ze wspomaganie laserowym (LAM), projekt i wykonanie układów modelowych oraz

przygotowanie form ceramicznych, przeprowadzenie procesu zalewania form zawiesiną A359/20SiCp w warunkach wypełniania grawitacyjnego oraz wyznaczenie czasu sedymentacji cząstek SiC w skrawanej warstwie wierzchniej w warunkach nagrzewania laserowego. Szybkość opadania cząstek SiC w przegrzanej osnowie aluminiowej wyznaczono z zależności Stokes'a. Bazy danych programów symulacyjnych dotyczących lepkości stopów aluminium, w tym Baza ProCast, zawierają dane dotyczące temperatury do 810°C. Lepkość stopu A359 w zakresie temperatur od 900 do 1400 °C została wyznaczona metodą ekstrapolacji (patrz rysunek 12)



Rys. 12. Wpływ temperatury na lepkość osnowy kompozytu A359/20SiCp.

Czas przebiegu procesu sedymentacji można kontrolować parametrami wejściowymi procesu LAM, głównie prędkością obrotową materiału obrabianego n i średnicą d , a także mocą lasera P . Odpowiedni dobór tych parametrów może prowadzić do zmniejszenia zawartości twardych cząstek zbrojenia w warstwie skrawanej, co wpływa na poprawę skrawalności kompozytu MMC. Warstwa wierzchnia pozbawiona twardych cząstek SiC jest łatwiej obrabiana z uwagi na brak lub zmniejszenie oddziaływania zbrojenia na materiał ostrza skrawającego, przyczyniając się do wydłużenia jego trwałości. Dodatkowo, kontrolując proces sedymentacji, można zwiększyć zawartość cząstek zbrojenia w obrabianym wyrobie, co prowadzi do wzrostu odporności tribologicznej warstwy wierzchniej kompozytu w porównaniu do jego rdzenia (rys. 13b).



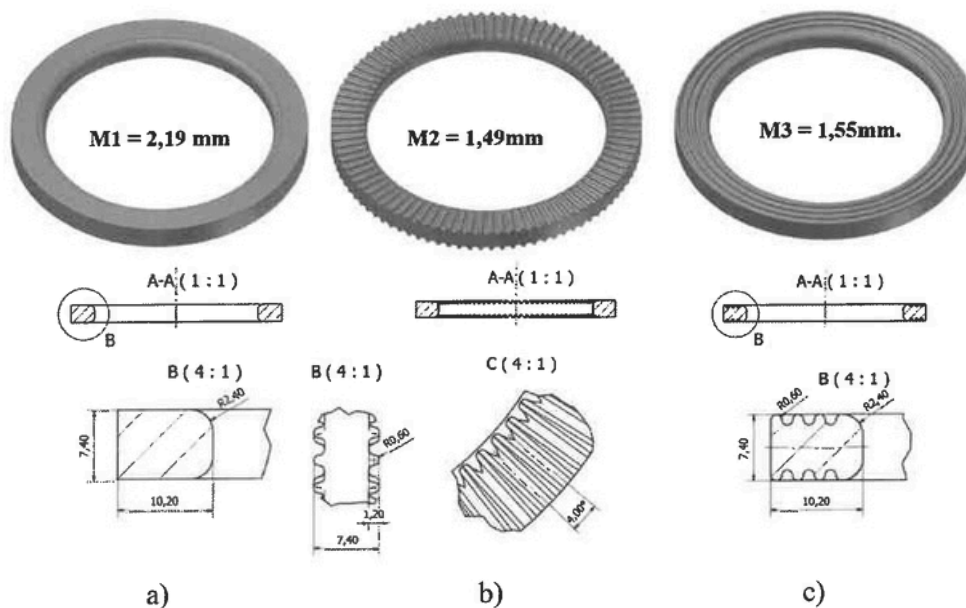
Rys. 13. Struktura warstwy wierzchniej obrabianego odlewu kompozytowego: bez wspomagania laserowego - a), ze wspomaganie laserowym – b).

Wykazano [A3], że zaproponowane podejście można z powodzeniem zastosować do doboru optymalnej głębokości skrawania oraz odległości kątowej narzędzia od wiązki laserowej. Obróbka z tymi efektywnymi parametrami prowadzona jest tylko w strefie wolnej lub ze zmniejszoną zawartością cząstek SiC. W ten sposób profil powierzchni jest formowany regularnie w trybie plastycznym z usunięciem lub bez usuwania ziaren SiC z warstwy powierzchniowej przez ostrze narzędzia.

Cechy użytkowe odlewów kompozytowych wzmocnianych cząstkami ceramicznymi wymagają ich odporności na zużycie w obszarach części maszyn narażonych na intensywną eksploatację [10]. Przykładem jest tłok silnika spalinowego, gdzie największym obciążeniem podlega rowek tłoka w którym osadzony jest pierścień [11]. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem w produkcji tłoków wykonanych ze stopów aluminium jest użycie wkładek stalowych lub żeliwnych, które wymagają specjalnego przygotowania, polegającego na wytworzeniu warstwy przejściowej zapewniającej połączenie z odlewem tłoka [12]. Zastosowanie wkładki z kompozytu aluminiowego wzmocnionego cząstkami zapewniłoby zwiększenie odporności na zużycie tłoka w obszarach jego eksploatacji, jednocześnie usprawniając proces odlewania.

W pracy [P1] przedstawiono możliwości zastosowania precyzyjnych odlewów kompozytowych jako wkładki pod rowek pierścienia wytwarzanej z zawiesiny A359/20SiCp przy produkcji tłoków silnika. Główną koncepcją wynalazku opisanego w [P1] jest wykorzystanie wkładki kompozytowej o kształcie krążka pod rowek pierścienia tłoka silnika spalinowego. Osnowę wkładki stanowi stop aluminium, a jej wzmocnieniem są ceramiczne

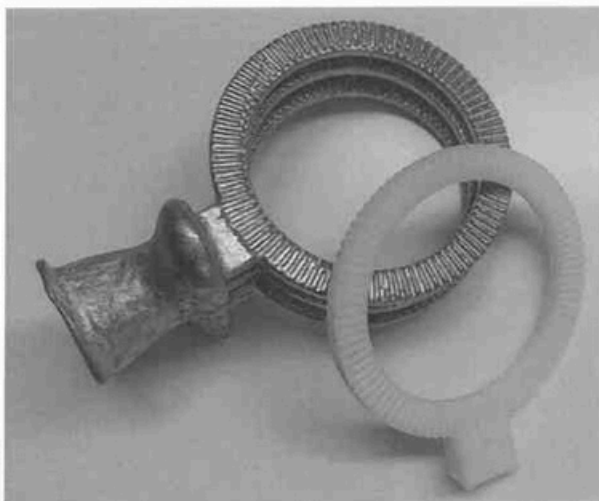
cząstki węgliku krzemu lub cząstki tlenku aluminium. Istotnym aspektem jest to, że średnica ceramicznych cząstek nie przekracza 30 mikrometrów, optymalnie wynosi 20 mikrometrów. Większa średnica cząstek jest niekorzystna ze względu na ich tendencję do wykuszania się podczas procesu obróbki tłoka i w trakcie jego eksploatacji. Wykuszanie się większych cząstek prowadzi do zwiększenia chropowatości powierzchni wkładki, co z kolei ogranicza kontakt z pierścieniem tłoka i zmniejsza efektywne chłodzenie tłoka. Istnieje także ryzyko, że w przypadku wykuszania się cząstek w trakcie pracy tłoka i ich przedostania się do oleju silnikowego, może dojść do zatarcia silnika. Zastrzeżonym rozwiązaniem wkładki jest aby powierzchnia zewnętrzna miała obniżony stosunek objętości do powierzchni odbioru ciepła – moduł M . Zwiększenie powierzchni krążka uzyskujemy przez „karbowanie” w kierunku równoległym albo prostopadłym w stosunku do czoła wkładki. W celu przedstawienia korzyści wynalazek przedstawiono w układzie porównawczym, gdzie przykładowa wkładka pokazana na rys. 14b (z „karbowaniem” w kierunku prostopadłym) ma taki sam wymiar nominalny jak wkładka porównawcza z rys. 14a.



Rys. 14. Kształty wkładek pod rowek pierścienia: konwencjonalna – a), karbowana – b), c).

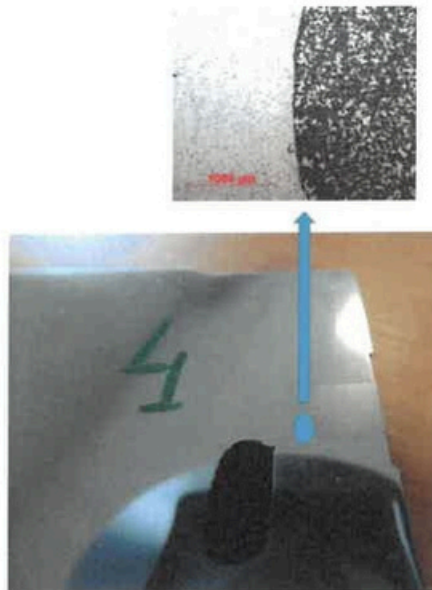
Obie wkładki mają średnicę 90mm oraz maksymalną wysokość 7,4 mm i szerokość 10,2 mm. Różnicę stanowi stosunek objętości V wyrażony w mm^3 do powierzchni A odbioru ciepła wyrażony w mm^2 czyli $M=V/A$ wyrażone w mm. Im mniejsza wartość M tym układ jest korzystniejszy. Wymiary przykładowej wkładki przedstawionej na rys. 14a wynoszą: $D = 90\text{mm}$, $h = 7,4\text{ mm}$, $d = 10,2\text{mm}$, $V = 18373\text{ mm}^3$, $A = 8379\text{mm}^2$. Moduł dla wkładki wynosi $M1 = 2,19\text{ mm}$. Dla porównania wkładka przedstawiona na rys. 13b ma wymiary: $D = 90\text{mm}$, $h = 7,4\text{ mm}$, $d = 10,2\text{mm}$, $V = 15162\text{ mm}^3$, $A = 10164\text{ mm}^2$. Moduł dla wkładki wynosi $M2 =$

1,49mm. Porównanie modułów M ($M_2 < M_1$) ilustruje osiągnięte korzyści. Na rys. 14c przedstawiono wariant wkładki według wynalazku („karbowana” w kierunku równoległym), gdzie zastosowano zwiększenie powierzchni A w stosunku do objętości V . Przedstawiona na rys. 14c wkładka, w celach komparatywnych, ma wymiar nominalny taki jak wkładka z rys. 14a i rys. 14b $D = 90\text{mm}$, $h = 7,4\text{ mm}$, $d = 10,2\text{mm}$, $V = 16115\text{ mm}^3$, $A = 10340\text{ mm}^2$. Moduł dla wkładki przedstawionej na rys. 14c wynosi $M_3 = 1,55\text{mm}$. $M_3 < M_1$. Model i odlew wkładki kompozytowej pod rowek pierścienia tłoka silnika spalinowego w przykładzie realizacji wariantu M_2 przedstawiono na rys. 15. Odlewy wkładek kompozytowych wykonano z zawiesiny kompozytowej $A359/20\text{SiC}_p$ (F3S.20S DurAlcan™) w technologii odlewania precyzyjnego metodą traconych modeli z wykorzystaniem wydrukowanych modeli polistyrenowych.



Rys. 15. Widok oczyszczonych odlewów wkładek kompozytowych wraz z wydrukowanym modelem polistyrenowym.

Zastrzeżeniem wynalazku [P1] jest również zastosowanie wkładki kompozytowej w produkcji tłoków. Odlaną i obrobioną wkładkę kompozytową pod rowek pierścienia podgrzewa się w piecu do temperatury w zakresie $200\text{-}500^\circ\text{C}$, a następnie umieszcza w formie odlewniczej do produkcji tłoków pod przewidywanym rowkiem pierścienia tłoka i zalewa ciekłym stopem aluminium. Temperatura podgrzania wkładki kompozytowej zależna jest od jej masy. Temperatura początkowa wkładki musi być dostatecznie wysoka, aby umożliwić proces połączenia dyfuzyjnego osnowy kompozytu z krzepnącym stopem. Połączenie oparte na adhezji może prowadzić do zerwania się wkładki z korpusem tłoka w trakcie jego eksploatacji. Dzięki odpowiedniemu kształtowi wkładki połączenie między wkładką a tłokiem następuje poprzez nadtopienie powierzchni krawędzi (patrz rysunek 16) w wyniku kontaktu z ciekłym stopem wlewany do formy.



Rys. 16. Widok obszaru połączenia wkładki kompozytowej z odlewem tłoka; mikrografia strefy połączenia (patrz strzałka).

Po zakrzepnięciu i wybiciu odlewu z formy poddaje się go obróbce cieplnej i obróbce skrawaniem polegającej na zdjęciu nadmiaru materiału wraz z wyrównaniem średnicy wkładki kompozytowej do średnicy tłoka. Po uzyskaniu zadanego wymiaru następuje nacięcie rowka pod pierścień w połączonej wkładce kompozytowej. Na rysunku 17 przedstawiono wykonane prototypy tłoków z wkładką kompozytową A359/20SiC_p według zastrzeżonego procesu opisanego w pracy [P1]



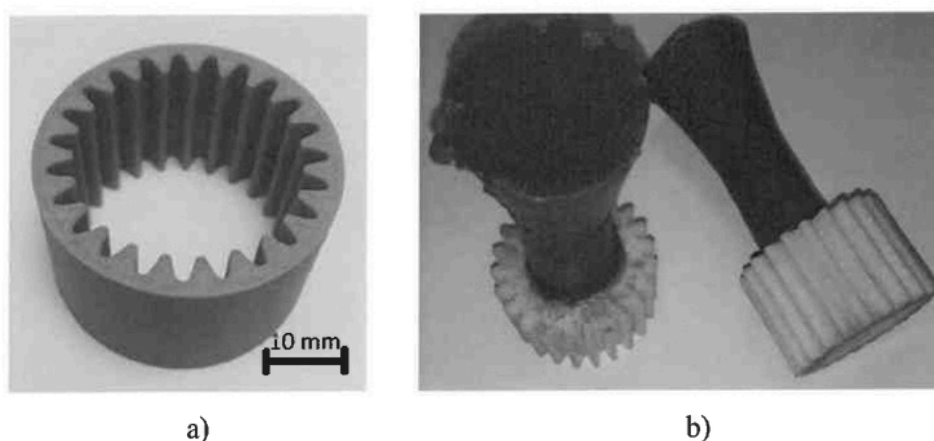
Rys. 17. Tłoki z wkładką kompozytową i naciętymi rowkami pod pierścień po obróbce wykończeniowej.

Proces wytwarzania precyzyjnych odlewów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem różni się znacząco od odlewanych z zawiesin kompozytowych. Precyzyjne odlewy kompozytowe wzmocnione cząstkami jak wykazano w pracach [A1, A2, A3, P1] można kształtować przez zalanie wcześniej przygotowanej formy ceramicznej zawiesiną

kompozytową, a wpływ na ich strukturę ma głównie metoda zalewania. Wytwarzanie odlewów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem jest procesem wieloetapowym. Pierwszym etapem jest przygotowanie zbrojenia. W przypadku przestrzennych struktur szkieletowych zbrojenie wytwarza się często poprzez spiekanie cząstek ceramicznych, prasowanie długich lub krótkich nieuporządkowanych włókien ceramicznych lub włókien węglowych. Tak przygotowane porowate kształtki zbrojące umieszcza się w formie i nasyca pod ciśnieniem ciekłym stopem w celu wytworzenia kompozytu. Słaba zwilżalność zbrojenia oraz ciśnienie gazu w kapilarach kształtki zbrojącej wymuszają stosowania bardzo dużych ciśnień na słup metalu. Wytworzenie ciśnienia na stop może odbywać się różnymi metodami na przykład przez nacisk stempla lub w wyniku działania siły odśrodkowej [13, 14]. Warunkiem niezbędnym do wytworzenia w ten sposób kompozytu jest wprowadzenie do wcześniej wykonanej kształtki umieszczonej w gnieździe formy ciekłego stopu, pod ciśnieniem większym niż ciśnienie kapilarne. Prowadzony w ten sposób proces nasycania można usprawnić przez poprawienie zwilżalności ceramiki, nanosząc na jej powierzchnię różnego rodzaju powłoki metaliczne, ale są to zabiegi złożone i czasochłonne, a przez to często kosztowne [15]. Najistotniejszym jednak problemem podczas nasycania kształtki ciekłym metalem jest powietrze atmosferyczne, które znajduje się w kapilarach zbrojenia. Ciśnienie powietrza w kapilarach w trakcie nasycania zwiększa się proporcjonalnie do ciśnienia działającego na metal, uniemożliwiając całkowite wypełnienie preformy, co skutkuje powstawaniem wad w postaci porowatości. W skrajnych przypadkach zbyt duże ciśnienie gazu wynikające z procesu nasycania może doprowadzić do uszkodzenia zbrojenia [16].

W pracy [A4] wykazano korzystny wpływ nasycania ceramicznych spieków niskotopliwym stopem TBC20 (Stop Lichtenberga) w warunkach próżni. Wytypowane do badań kształtki zbrojenia z proszku Al_2O_3 o ziarnistości 0,46 (355-455 μm) i 100 (125-150 μm) w skali FEPA (Federation of European Producers of Abrasives), formowano i spiekano w temperaturze 1500°C. Umieszczone preformy w przygotowanych wcześniej wyżarzonych formach gipsowych zalewano ciekłym stopem w komorze próżniowej. Pierwszy etap obejmował odgazowanie komory w której znajdowała się zalana forma, a drugi ponowne zapowietrzenie komory, następnie cykl powtórzono. W wyniku odgazowania porowatych kształtek, a następnie działania ciśnienia atmosferycznego na słup przegrzanego stopu do 150°C (temperatura liquidus - 92°C) następowało nasycanie zbrojenia. Badania w pracy [A4] wykazały, że proces infiltracji preform w formach gipsowych nasycanych niskotopliwym stopem TBC20 w warunkach podciśnienia, pozwala na uzyskanie odlewów o wysokim stopniu nasycenia (powyżej 90%).

Kontynuacją dalszych badań obejmujących procesy wytwarzania metalowych kompozytów z nasycanym zbrojeniem była praca [A5], w której przedstawiono proces wytwarzania odlewów kompozytowych wykonanych w technologii odlewania precyzyjnego metodą wytapianych modeli. Celem pracy było wytworzenie kształtowego odlewu kompozytowego wraz z wyznaczeniem parametrów technologicznych procesu nasycania. Zbrojenie kompozytu stanowił spiek ceramiczny Al_2O_3 ukształtowany w wydrukowanej matrycy polistyrenowej (rys. 18a), którą wypalono wraz ze wstępnie utwardzoną ceramiką. Wytworzone kształtki ceramiczne po nasyceniu parafiną (w celu zabezpieczenia porowatej preformy przed penetracją masy formierskiej) i zamontowaniu układu wlewowego (rys. 18b) umieszczano w tulejach i zalewano ciekłą masą gipsową, a następnie po wytopieniu układu wlewowego wyżarzano wraz z formą w temperaturze $720^{\circ}C$.



Rys. 18. Matryca do wykonania preformy ceramicznej – a), Zaimpregnowana kształtka zbrojąca Al_2O_3 z woskowym układem wlewowym – b)

Proces nasycania zbrojenia stopem aluminium przeprowadzono na skonstruowanym do tego celu stanowisku przedstawionym na schemacie (rys. 19). Procedura obejmowała: umieszczenie formy na stanowisku - wytworzenie próżni - zalewanie po uzyskaniu wartości ciśnienia w komorze 5000 Pa.

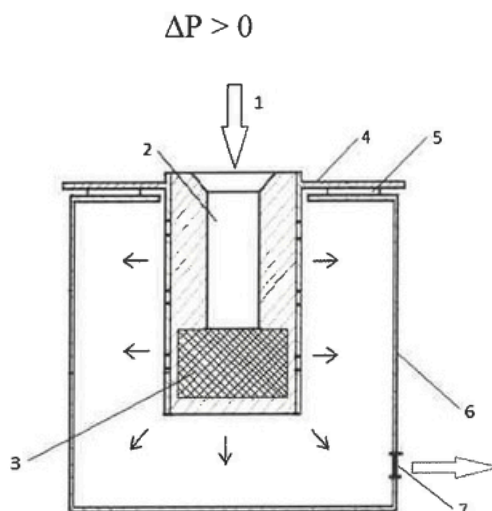
Zamieszczona poniżej zależność (2) przedstawia warunek umożliwiający przeprowadzenie opisanego procesu:

$$\Delta P = P_m + P_p - P_k \quad (2)$$

gdzie:

P – ciśnienie wynikowe, P_m – ciśnienie metalostatyczne, P_k – ciśnienie kapilarne, P_p – ciśnienie powietrza działające na słup metalu wynikające z różnicy ciśnienia między komorą, a atmosferą.

Przy czym proces infiltracji następuje kiedy:

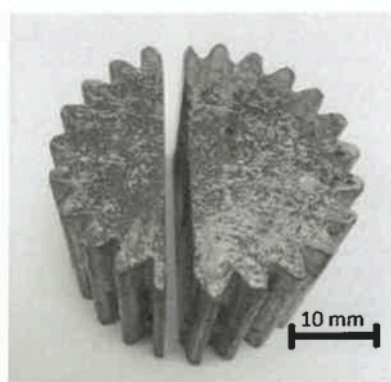


Rys. 19. Schemat procesu zalewania formy: 1 – ciśnienie wypadkowe działające na słup metalu, 2 – wlew główny, 3 – preforma, 4 – pierścień formy, 5 – uszczelka, 6 – komora próżniowa, 7 – zawór króćca ssawnego, strzałki – kierunek działania ciśnienia

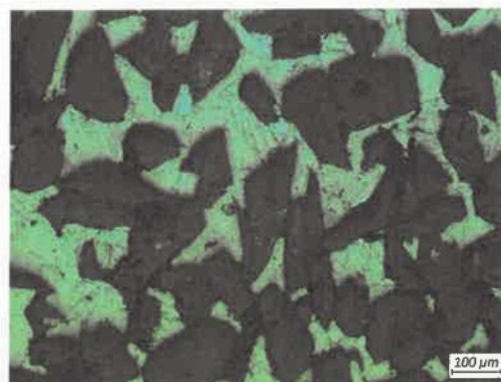
Przeprowadzony proces nasycania oceniano wg dwóch kryteriów:

- geometrii uzyskanych odlewów w stosunku do zadanych parametrów (wymiarów geometrycznych matrycy i kształtki zbrojącej), oraz
- struktury metalograficznej obserwowanej na zglądach wykonanych w dolnej i górnej części odlewu kompozytowego.

Wykonany odlew kompozytowy charakteryzował się jednolitą powierzchnią i dobrym odwzorowaniem kształtu (rys. 20a). Przeprowadzone badania metalograficzne odlewu kompozytowego wykluczyły wady w postaci znacznej porowatości lub uszkodzenia zbrojenia (rys. 20b).



a)

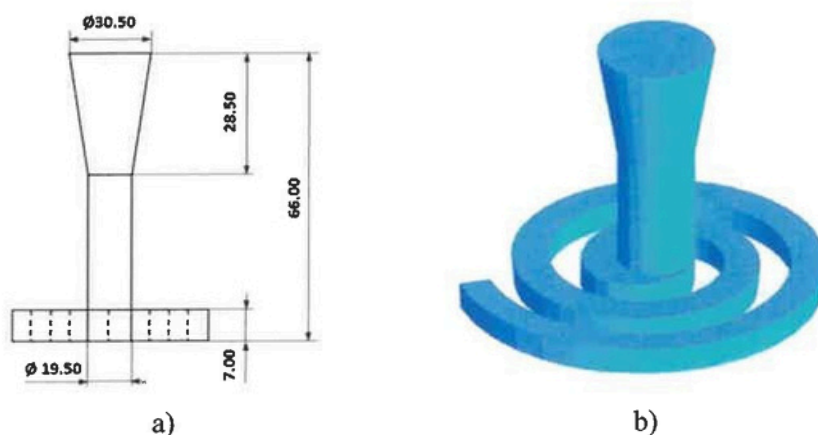


b)

Rys. 20. Odlew kompozytowy przygotowany do badania metalograficznego – a), struktura odlewu kompozytowego – b).

W pracy [A5] wykazano, że proces nasycania zbrojenia z wykorzystaniem przeciwności działającego na słup metalu będącego wypadkową różnicy ciśnień panujących w komorze i poza nią jest procesem skutecznym do wytwarzania kształtowych odlewów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem. Wyznaczone odchyłki wymiarowe pozwolą na precyzyjne wytwarzanie odlewów kompozytowych zastosowaną metodą.

Celem pracy [A8] było wytworzenie metodą infiltracji podciśnieniowej odlewów kompozytowych z osnową aluminiową (AlSi11) zbrojonych preformą ze spieku Al_2O_3 (spirala prób lejności patrz rys. 21), a następnie określenie stopnia nasycenia ciekłym stopem wytworzonych kształtek ceramicznych wraz z wyznaczeniem parametrów procesu.



Rys. 21. Wymiary spirali lejności zaprojektowanej do badań – a), geometria 3D modelu spirali - b)

Badania obejmowały przygotowanie form oraz przeprowadzenie procesu infiltracji wg wyznaczonych i kontrolowanych parametrów procesu. Wydrukowane z polistyrenu (HIPS) matryce wypełniano mieszaniną proszku Al_2O_3 (ziarnistość ok. $100 \mu m$) i krzemianu sodu o udziale masowym 4%. Masę tę wstępnie utwardzono poprzez przedmuch gazem CO_2 , a następnie umieszczono w piecu i wypalano razem z matrycą (rys. 22).



Rys. 22. Przygotowane matryce z masą do wytwarzania spieku przed procesem wypalania.

Po procesie spiekania kształtki spirali impregnowano parafiną i łączono z woskowym modelem wlewu głównego (rys. 23).



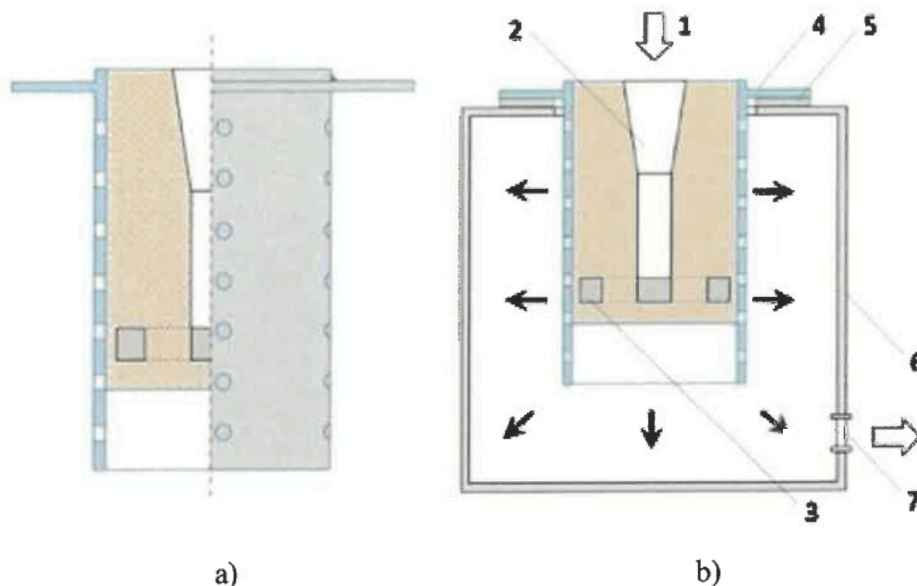
Rys. 23. Układ modelowy z kształtką zbrojenia przygotowany do formowania.

W wytypowanych miejscach do układu modelowego podłączano termoelementy i umieszczano w perforowanych tulejach ze stali żaroodpornej o wymiarach: średnica – 100 mm; wysokość – 200 mm. Tuleje z układem modelowym wypełniano plastyczną masą gipsową firmy Ransom & Randolps, przygotowaną z mieszaniny wody i proszku gipsowego w proporcji 1:2,5. Przygotowane formy po związaniu i wysuszeniu umieszczano w piecu (rys. 24), gdzie w pierwszym cyklu topiono układ wlewowy, a w kolejnym formy wyżarzano w cyklu przyrostowym do temperatury 720°C. W tym czasie parafina znajdująca się w kapilarach zbrojenia uległa całkowitemu zgazowaniu, a forma utwardzeniu. Następnie obniżono temperaturę pieca do 600°C, gdzie formy oczekiwały na zalanie.



Rys. 24. Widok form umieszczonych w piecu przed procesem wyżarzania.

Do badań przygotowano osiem form, które nasycano w warunkach stałego ciśnienia, ale przy zmiennych parametrach temperaturowych. Schemat procesu nasycania przedstawia rys. 25.



Rys. 25. Schemat formy - a), proces zalewania formy - b), gdzie: 1 – ciśnienie wynikowe działające na słup metalu, 2 – wlew główny, 3 – preforma, 4 – pierścień formy, 5 – uszczelka, 6 – komora próżniowa, 7 – zawór rury ssącej; strzałki – kierunek ciśnienia.

Każdorazowo proces nasycania przeprowadzano w następujący sposób: formę umieszczano w komorze, podłączano termoelementy i uruchamiano pompę próżniową. Po uzyskaniu ciśnienia w komorze 5000 Pa formę zalewano. Po zakrzepnięciu stopu w układzie wlewowym pompę wyłączano i wybijano odlew. Wartość ciśnienia poza komorą wynosiła 98000 Pa.

Pierwszym etapem badań było wyznaczenie temperatury zalewania formy ciekłym metalem oraz samej formy, przy której spirala nie nasyci się całkowicie. Formy kolejno umieszczano na stanowisku i zalewano stopem. Zamierzony efekt uzyskano przy temperaturze zalewania stopu 585°C i temperaturze formy 580°C . Po określeniu oczekiwanych parametrów przeprowadzono kolejne badania w stałych warunkach ciśnienia i temperatury stopu, lecz przy sukcesywnym obniżaniu temperatury formy. W tabeli 2 przedstawiono wartości temperatur dla prób procesu infiltracji. Ostatnia kolumna w tabeli 2 dotyczy stopnia nasycenia szkieletu zbrojenia ciekłym stopem aluminium w całym polu przekroju poprzecznego spirali, zmierzona jako odległość od głównego układu wlewowego do punktu nasycenia.

Tabela 2. Wpływ temperatury na stopień infiltracji spirali.

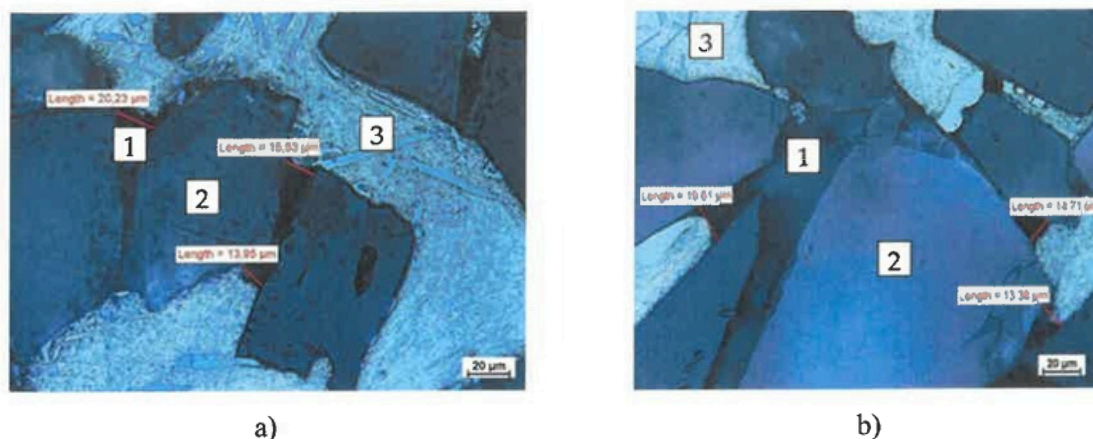
| Nr | Temp. stopu [°C] | Temp. zbrojenia [°C] | Temp. formy [°C] | Infiltracja spirali [mm] |
|----|------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | 680 | 600 | 600 | 350 (max) |
| 2 | 640 | 600 | 600 | 350 (max) |
| 3 | 600 | 599 | 590 | 350 (max) |
| 4 | 590 | 599 | 590 | 350 (max) |
| 5 | 585 | 597 | 580 | 163 |
| 6 | 591 | 582 | 510 | 178 |
| 7 | 589 | 587 | 546 | 164 |
| 8 | 589 | 585 | 514 | 154 |

Odlewy wybijano z form, oczyszczano z masy i przygotowano próbki do badań metalograficznych w wybranych obszarach granicznych infiltracji. W pierwszej kolejności pobrano próbki do oceny metalograficznej z testu nr. 3, gdzie zbrojenie uległo całkowitej infiltracji na całej długości (wg tabeli 2). Próbki pobierano w obszarze $\frac{1}{2}$ długości spirali (rys. 26 obszar oznaczony literą A) oraz jej długości granicznej (rys. 26 obszar oznaczony literą B).



Rys. 26. Odlew po wybiciu z formy i oczyszczeniu z zaznaczonymi obszarami wycięcia próbek w celu oceny stopnia wypełnienia – miejsca pobrania próbek: $\frac{1}{2}$ długości spirali (A), pole graniczne odlewu kompozytowego (B).

Rysunek 27 przedstawia mikrografię całkowicie nasyconej stopem próbki 3 z obszarów A i B.



Rys. 27. Zdjęcie mikroskopowe spieku spirali z próby 3 (1 – kapilara niewypełniona, 2 – zbrojenie Al_2O_3 , 3 – osnowa metalowa): a) - $\frac{1}{2}$ długości spirali (A); b) - granica spirali (B)

Analiza metalograficzna wykazała obszary kapilar zbrojenia niewypełnionych przez osnowę metalową. Ze względu na nieregularną średnicę kapilar można przyjąć, że kapilary o średnicy mniejszej niż $20 \mu m$ nie zostały wypełnione. W celu sprawdzenia poprawności przeprowadzonego procesu dokonano szacunkowych obliczeń, określając minimalną średnicę kapilary, w którą wpłynie metal. Do wyznaczenia ciśnienia kapilarnego P_k przyjęto wartość napięcia powierzchniowego stopu $\sigma = 840 \text{ mN/m}$ oraz skrajny kąt zwilżania ceramiki przez metal $\theta = 136^\circ$ [13, 14].

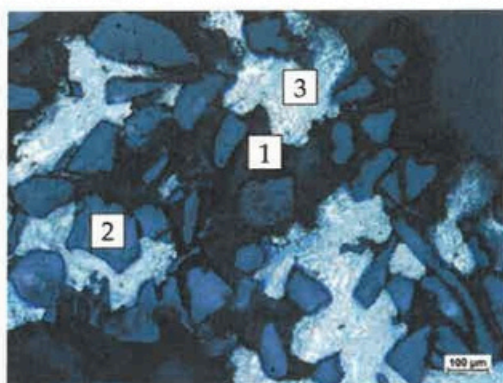
W tabeli 3 przedstawiono wyznaczone wartości ciśnienia dla przyjętych średnic kapilar. Wartość ciśnienia nasycania, P_n , jest sumą ciśnienia metalostatycznego i ciśnienia powietrza na zewnątrz komory pomniejszonego o ciśnienie w komorze. Wynikowe ciśnienie ΔP , które jest sumą ciśnienia kapilarnego P_k i ciśnienia nasycania P_n , określa skuteczność infiltracji dla danej średnicy kapilary. Warunek infiltracji zostanie spełniony, gdy $\Delta P > 0$.

Tabela 3. Wyznaczone wartości ciśnienia dla badanego procesu.

| Wymiar kapilary d [μm] | Wartość ciśnienia, Pa | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | Ciśnienie kapilarne (-) P_k | Ciśnienie nasycania (+) P_n | Ciśnienie wynikowe (infiltracji) $\Delta P = P_k + P_n$ |
| 10 | 241698 | 96380 | - 145318 |
| 15 | 161132 | 96380 | - 64752 |
| 20 | 120849 | 96380 | - 24469 |
| 25 | 96679 | 96380 | - 299 |
| 25.08 | 96370 | 96380 | 10 |
| 30 | 80566 | 96380 | 15814 |
| 35 | 69056 | 96380 | 27324 |

Z obliczeń wynika, że dla analizowanych warunków minimalna średnica kapilary, która zostanie nasycona, wynosi 25,08 μm . Analiza metalograficzna potwierdziła nasycenie kapilar o wymiarach powyżej 20 μm jednakże założenia należy przyjąć jako szacunkowe z uwagi na nieregularny kształt kapilar oraz właściwości powierzchniowe omawianych układów takich jak wartość napięcia powierzchniowego i skrajny kąt zwilżania, gdzie wyznaczone wartości obarczone są zazwyczaj dużym błędem pomiaru [15].

W kolejnym etapie badań określono graniczną temperaturę osnowy, która umożliwiłaby infiltrację zbrojenia. Na rysunku 28 przedstawiono obszar nasycenia spieku Al_2O_3 w próbce 8 (patrz tab. 3), w której przepływ osnowy został zatrzymany na długości 154 mm.



Rys. 28. Zdjęcie mikroskopowe z próby nr. 8 dokumentujący poziom nasycenia. Powierzchnia zbrojenia Al_2O_3 (1 – kapilara niewypełniona, 2 – wzmocnienie i 3 – osnowa metalowa).

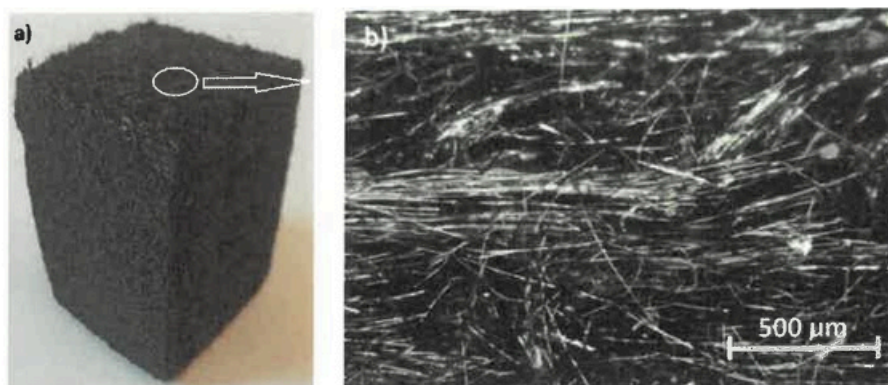
Bilans energetyczny w niniejszym badaniu przeprowadzono wykorzystując dane empiryczne (zarejestrowane wartości temperatury w wybranych obszarach odlewu, zbrojenia i formy) oraz prognozowany rozkład temperatury w formie uzyskany w wyniku symulacji numerycznych. W celu uzyskania danych do obliczeń przeprowadzono badania walidacyjne modelu termicznego w kodzie symulacyjnym, których celem była identyfikacja parametrów termofizycznych układu odlew – forma oraz warunków brzegowych. W przeprowadzonych badaniach walidacyjnych wykorzystano parametry termofizyczne formy gipsowej określone we wcześniejszych badaniach. Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem zastępczych parametrów termofizycznych stopu aluminium w zakresie temperatur 500–600 °C, o przewodności cieplnej 161–100 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], ciepło właściwe 1056–1000 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], gęstość 2556–2356 [kg/m^3], temperatura likwidusu $T_{\text{liq}} = 579,3$ °C i temperatura solidusu $T_{\text{sol}} = 573,9$ °C. Zastępcze parametry termofizyczne formy gipsowej przyjęto jako stałe wartości w zakresie temperatur 350–600 °C: przewodność cieplną 0,12 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] i objętościową pojemność cieplną 1,44e6 [$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]. Zastępcze parametry termofizyczne zbrojenia przyjęto jako stałe wartości w zakresie temperatur 450–600 °C: przewodność cieplną 1,6 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] i

objętościową pojemność cieplną $0,34e6$ [J/(m³·K)]. Początkowa temperatura stopu wynosiła (próba 8) 589°C, a proces napełniania rozpoczęto po 425 sekundach symulacji. Symulowano rozkład temperatury w formie dla różnych czasów po wyjęciu formy z pieca (temperatura początkowa formy i zbrojenia – 600°C). W wyniku procesu oddawania ciepła przez formę do otoczenia, temperatura formy uległa obniżeniu. Ze względu na fakt, że proces nasycania rozpoczął się 425 sekund po wyjęciu formy z pieca, temperatura w zewnętrznych częściach formy spadła poniżej 200°C. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano informację o rozkładzie temperatury w formie po zakończeniu procesu nasycania. Na podstawie danych z eksperymentu zidentyfikowano miejsce zakończenia procesu nasycania (dla odlewu nr 8 jest to 154 mm długości spirali) i w tym miejscu odczytano w programie symulacyjnym temperaturę zbrojenia i ciekłego stopu. Wartości tych zidentyfikowanych temperatur posłużyły do przeprowadzenia bilansu energetycznego.

W pracy [A8] wykazano, że wyznaczenie wartości ciśnienia kapilarnego jest niezbędnym czynnikiem przy określeniu warunków procesu infiltracji. Stwierdzono, że dla procesu nasycania próżniowego oszacowane ciśnienie wypadkowe pozwala na nasycenie kapilar pod warunkiem, że temperatura stopu nie będzie niższa od temperatury infiltracji.

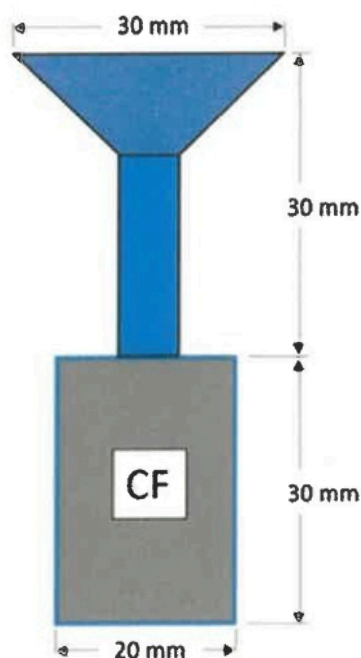
W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono czas i drogę przepływu ciekłego metalu w spirali. Na podstawie uzyskanych wartości przeprowadzono symulację i zweryfikowano wstępne założenia, takie jak: czas nasycania, temperatura stopu, temperatura zbrojenia i formy. Bilans energetyczny wykazał, że graniczna temperatura infiltracji wynosi $T_k = 580,7^\circ\text{C}$ dla temperatury zbrojenia 575°C . W związku z powyższym musi być spełniony warunek, że temperatura metalu po wyrównaniu temperatur składników kompozytu musi być wyższa od temperatury likwidusu ($T_{liq} = 579,3^\circ\text{C}$) dla zastosowanego stopu aluminium.

W pracy [A9] przedstawiono badania związane z wytworzeniem aluminiowego kompozytu zbrojonego krótkimi sprasowanymi włóknami węglowymi (Al/CF). Celem badań było wyznaczenie parametrów procesu nasycania zbrojenia z włókna węglowego oraz określenie warunków dla procesu wyżarzania formy z wkładką CF. Do produkcji odlewów kompozytowych Al/CF wykorzystano metodę odlewania precyzyjnego omówioną w pracach [A1, A2, A5, A8]. Do badań wytypowano włókno węglowe dostarczane w postaci płyt o grubości 30 mm wykonanych z prasowanych krótkich włókien o średnicy ok. 10 μm i średniej długości 2 mm z których przygotowano kształtkę o wymiarach: 20 mm x 20 mm x 30 mm (rys. 29).



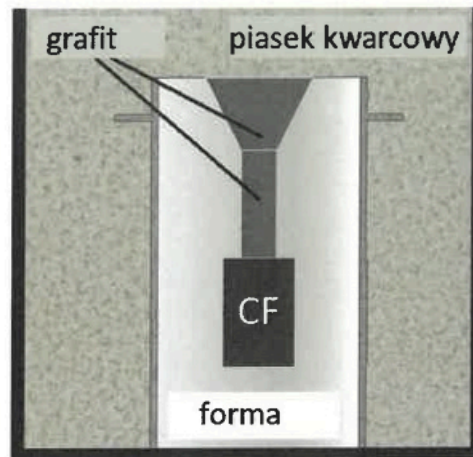
Rys.29. Widok preformy CF - a), oraz mikrostruktura zbrojenia węglowego - b),

Preformę zaimpregnowano woskiem odlewniczym Super Cera metodą zanurzeniową w celu wytworzenia hermetycznej powłoki zapobiegającej wpływaniu masy gipsowej pomiędzy sprasowane włókna. Zabieg ten jednocześnie umożliwia uzyskanie pożądanej powierzchni odlewu kompozytowego. Zaimpregnowaną kształtkę połączono z woskowym modelem wlewu głównego (rys. 30), a następnie całość umieszczono w metalowej perforowanej tulei i zalano masą gipsową.



Rys. 30. Schemat układu modelowego.

Po związaniu formy gipsowej wosk wytopiono w temperaturze 150 °C, następnie układ wlewowy wypełniono grafitem płatkowy w celu zabezpieczenia włókien węglowych, które ulegają utlenianiu w temperaturze 396°C. Formę umieszczono w ceramicznym pojemniku i zasypano całość piaskiem kwarcowym zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 31.



Rys. 31. Schemat zabezpieczenia wnętrza formy w trakcie procesu jej wyżarzania.

Zasypaną grafitem i piaskiem formę umieszczono w piecu i wyżarzano przyrostowo do temperatury 720 °C, a następnie schłodzono z piecem do temperatury 390 °C. Proces trwał 12 godzin. Po wyjęciu formy z pieca chłodzono ją powietrzem do temperatury 350 °C (rys. 32).



Rys. 32. Forma przed procesem zalewania.

Proces infiltracji poprzedzono obliczeniami związanymi z wyznaczeniem wartości ciśnienia kapilarnego. Do wyznaczenia zależności przyjęto wartości napięcia powierzchniowego stopu oraz kąta zwilżania: $\sigma = 865 \text{ mN/m}$ i $\theta = 126^\circ$. Omówiony w [A8] warunek infiltracji będzie spełniony, kiedy ciśnienie wynikowe (infiltracji) - $P_1 > 0$

$$P_1 = p_k - p_g + p_n \quad (3)$$

gdzie:

p_k – ciśnienie kapilarne

p_g – ciśnienie gazu w porach zbrojenia

p_n – suma ciśnień wywieranych na metal

Wartość ciśnienia kapilarnego zgodnie z równania Younga-Laplace'a wyrażona jest zależnością:

$$p_k = \frac{2\sigma}{r} \cos\theta \quad (4)$$

gdzie:

σ – napięcie powierzchniowe metalu [N/m]

θ – skrajny kat zwilżania materiału zbrojenia przez metal [°]

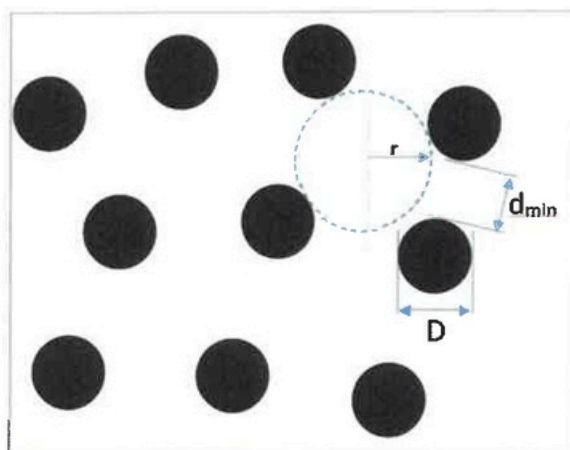
r – promień kapilary

Gdy przestrzeń jest ograniczona włóknami tak jak to ma miejsce w przypadku preform CF zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 33 zależność przyjmie postać:

$$p_c = \frac{2\sigma}{d_{min}} \cos\theta \quad (5)$$

wtedy:

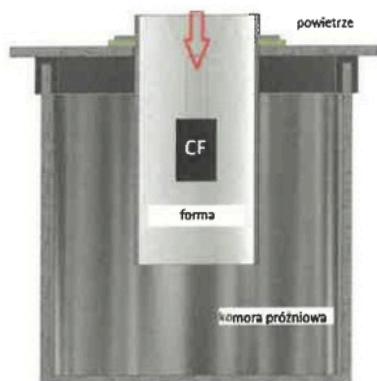
d_{min} – najmniejsza odległość między włóknami



Rys. 33. Przykładowy układ dla przestrzeni ograniczonej włóknami zbrojenia (o średnicy D), w której d_{min} jest najmniejszą odległością między nimi.

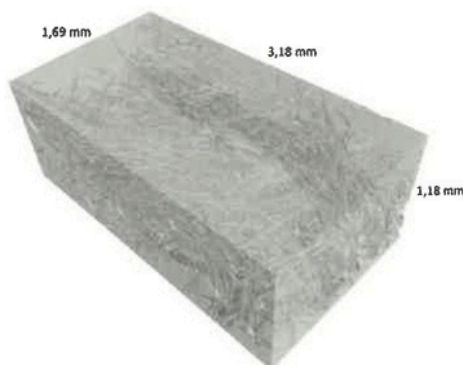
Po schłodzeniu formy do 350°C, usunięciu grafitu z układu wlewowego i umieszczeniu jej w komorze próżniowej (rys. 34), uruchamiano pompę. Po osiągnięciu wartości ciśnienia

2000 Pa zalewano ją ciekłym stopem AlSi12, utrzymując próżnię w komorze aż do momentu zakrzepnięcia odlewu.



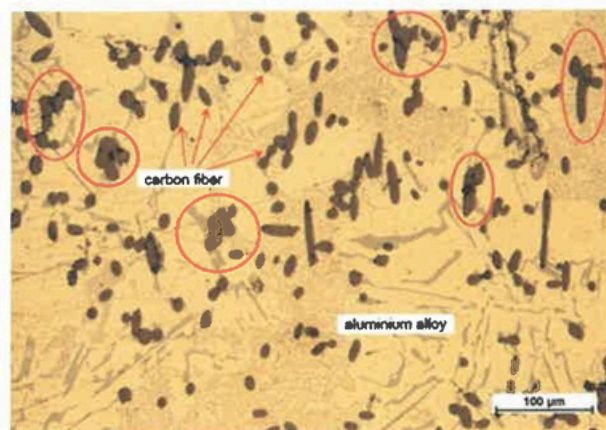
Rys. 34. Schemat stanowiska do odlewania podciśnieniowego: czerwona strzałka wskazuje kierunek zalewania i ciśnienia atmosferycznego działającego na metal.

Po ostygnięciu odlew oczyszczono z pozostałości masy, usunięto układ wlewowy i oceniono wstępnie pod względem występowania wad kształtu. Ocenę kształtu i rozkładu (dystrybucji) włókien w odlewie dokonano za pomocą urządzenia micro-CT. Zastosowano tomograf komputerowy $\nu\text{tome|x}$ s produkcji General Electric. Dla zobrazowania struktury wewnętrznej i rozkładu włókien użyto lampy nanofocus, co pozwoliło na uzyskanie voxela o rozmiarze $2,9\mu\text{m}$. Czas pomiaru wynosił 245 min przy parametrach mocy 70kV i $200\mu\text{A}$. Ocenę dystrybucji włókien przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania Volume Graphics 3.0. Wykonana mikrotomografia komputerowa CT pobranej próbki z odlewu Al/CF (rys. 35) miała na celu określenie, czy przepływający metal nie doprowadził do dyslokacji i uszkodzenia włókien węglowych zbrojenia. Można stwierdzić, że ułożenie i rozmieszczenie włókien zbliżone jest orientacją do struktury materiału wejściowego natomiast ciemniejsze obszary widoczne na fotografii biegnące liniowo wzdłuż włókien oznaczają występowanie porowatości w odlewie.



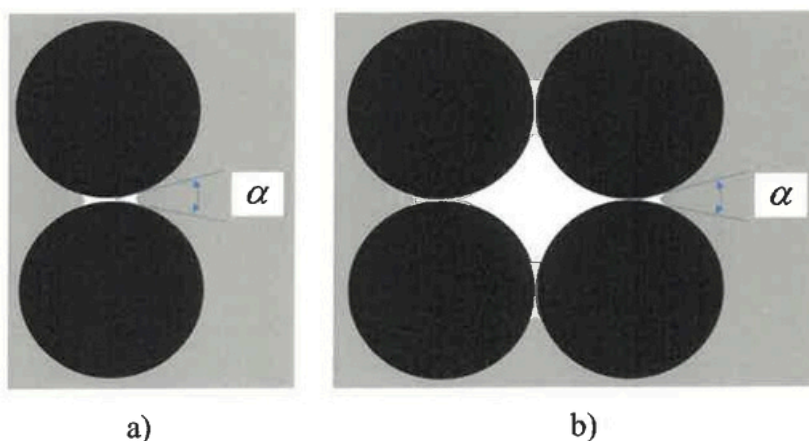
Rys. 35. Mikrotomografia próbki wyciętej z odlewu Al/CF z widocznymi obszarami nieciągłości struktury (ciemny obszar).

Analiza metalograficzna potwierdziła występowanie porowatości, głównie zlokalizowanych w miejscach skupisk włókien i ich splątania (rys. 36). Obszary, gdzie nie występują splątania włókien, a metal ma niezaburzony przepływ, nie wykazują widocznych wad na granicy metalu i zbrojenia.



Rys. 36. Mikrografie kompozytu Al/CF z zaznaczonymi obszarami wystąpienia porowatości.

Wartość ciśnienia infiltracji P_I , przyjęta dla minimalnego wymiaru kapilary $d_{\min}=11\ \mu\text{m}$ w analizowanym przypadku ($\sigma = 865\ \text{mN/m}$ i $\theta = 126^\circ$), wyniosła $P \approx 2500\ \text{Pa}$, co zapewniło przepływ metalu przez kapilary zbrojenia oraz nasycenie preformy CF. W przypadku wystąpienia skupisk włókien, ciśnienie infiltracji w analizowanym przypadku może być niewystarczające (rys. 37a). Natomiast, jak przedstawiono na schemacie (rys. 37b), w przypadku splątania włókien przepływ może zostać całkowicie zablokowany.



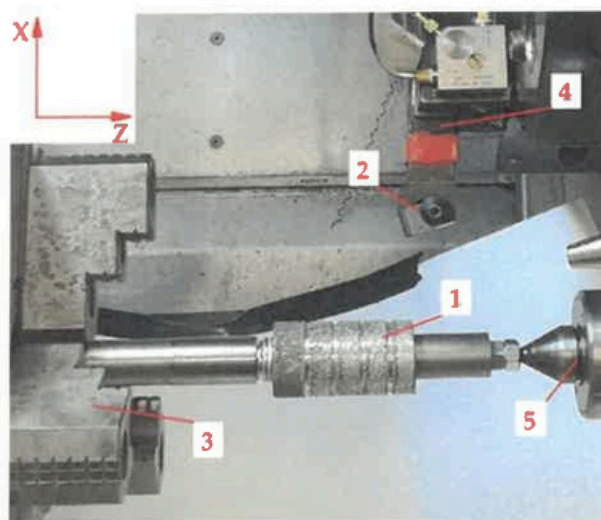
Rys. 37. Włókna tworzące kapilarę trudną do zwilżenia - a), układ włókien blokujących przepływ metalu b).

W badaniach potwierdzono poprawność wyznaczonych parametrów procesu nasycania zbrojenia CF stopem aluminium. W pracy [A9] wykazano, że proces wytwarzania odlewów

kompozytowych Al/CF metodą wytapianych modeli w wyżarzanych formach ceramicznych jest skuteczny pod warunkiem właściwego zabezpieczenia włókien CF przed czynnikami utleniającymi w trakcie obróbki termicznej formy.

Celem pracy [A7] było zbadanie charakterystyki skrawalności aluminiowych odlewów kompozytowych zbrojonych spiekami z Al_2O_3 . Proces wytwarzania odlewów kompozytowych z wykorzystaniem metody wytapianych modeli w znacznym stopniu zmniejsza konieczność przeprowadzania obróbki wykończeniowej, ale jej nie eliminuje. Obróbka skrawaniem takich kompozytów ma istotne znaczenie dla zakończenia procesu produkcyjnego i uzyskania wymaganej dokładności wymiarowej. Do badań wytypowano kompozyty z osnową ze stopu aluminium wzmocniane spiekami Al_2O_3 o różnej ziarnistości. Główną różnicą pomiędzy obiema próbkami była wielkość ziaren ceramiki Al_2O_3 : FEPA 046–355–425 μm i FEPA 100–125–150 μm . Odlewy wałków kompozytowych wykonano z zastosowaniem druku 3D metodą wytapianych modeli w wyżarzanych formach ceramicznych zgodnie z procesem opisanym w pracach [A5 i A8]

Proces toczenia kompozytu z osnową metalową wykonanego ze spieku Al_2O_3 nasyconego stopem EN AC-44000 AC- $AlSi11$ przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w tokarkę CNC DMG CTX 310 ECOLINE firmy DMG Mori Seiki i hamownię piezoelektryczną MW 2006-2. Rysunek 38 przedstawia stanowisko badawcze z zamocowaną próbką po procesie toczenia wraz z wyposażeniem pomiarowym.

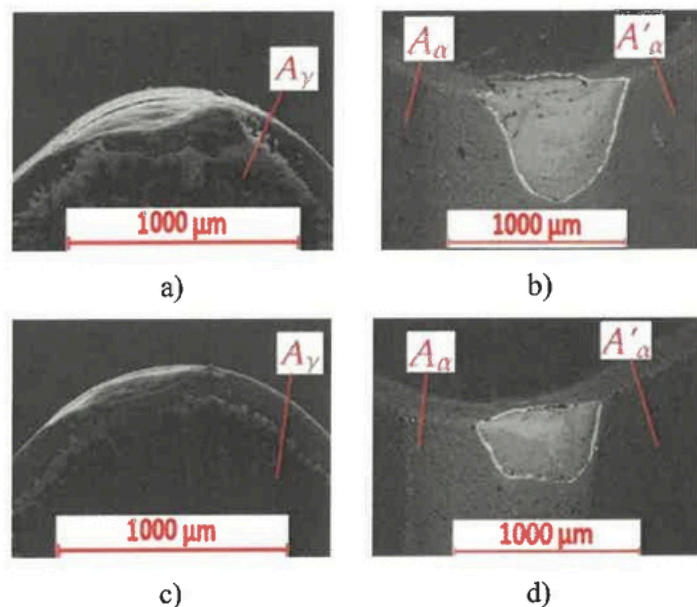


Rys. 38. Widok stanowiska badawczego: 1 – wałek MMC po procesie toczenia, 2 – płytka skrawająca, 3 – uchwyty, 4 – siłomierz tokarski, 5 – konik.

Przygotowano dwie próbki wałka kompozytowego o średnicy $d = 35$ mm i długości $l = 44$ mm zbrojonego spiekami Al_2O_3 FEPA 046 i Al_2O_3 FEPA 100 z pięcioma odrębnymi

odcinkami pomiarowymi. Proces toczenia zatrzymywano po obróbce każdego odcinka pomiarowego. Czas skrawania t wynosił od 10 do 12 s. dla każdego odcinka pomiarowego. Głębokość skrawania a_p i prędkość skrawania v_c były stałymi parametrami technologicznymi. Badanie przeprowadzono przy zmiennych wartościach posuwów $f = 0,05$ mm/obr, $f = 0,1$ mm/obr, $f = 0,125$ mm/obr i $f = 0,15$ mm/obr. Zastosowano ceramiczną płytkę skrawającą Kennametal SNGN 120408 T01020 KYS25. Przed każdym powtórzeniem próby instalowano nowe narzędzie skrawające.

Obserwacje wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego (TESCAN VEGA 5135) płytek skrawających stosowanych do toczenia kompozytu Al/Al₂O₃ FEPA 046 (rys. 39 a, b) i kompozytu Al/Al₂O₃ FEPA 100 (rys. 39 c, d) wykazały znaczące zużycie materiału narzędzia oraz ślady osnowy Al na powierzchniach A_γ , A_α i A'_α .

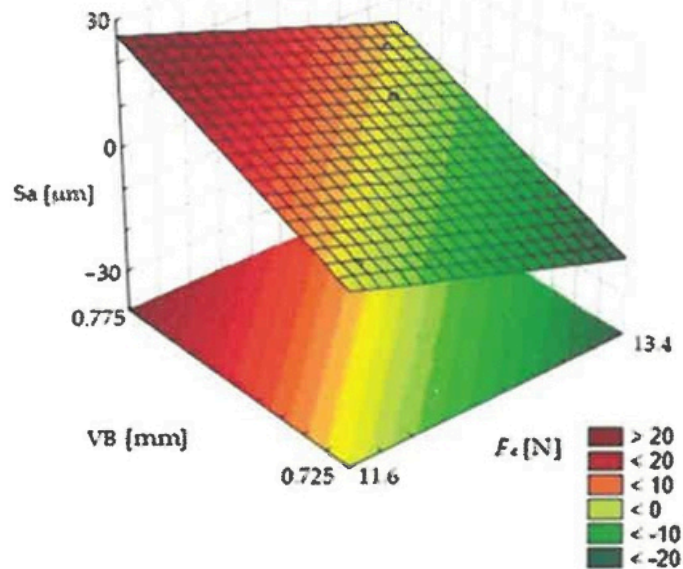


Rys. 39. Analiza SEM płytek skrawających po toczeniu: AlSi/Al₂O₃ FEPA 046 – a), b); AlSi/Al₂O₃ FEPA 100; A_γ – powierzchnia natarcia, A_α – główna powierzchnia przyłożenia, A'_α – pomocnicza powierzchnia przyłożenia.

Zużycie ostrza po toczeniu wałka kompozytowego zbrojonego spiekami o ziarnistości FEPA 046 było większe niż po toczeniu wałka kompozytowego wykonanego ze spieku FEPA 100. Obserwacje wskazują, że wałek wykonany z kompozytu o ziarnistości spieku FEPA 046 wykazuje większe trudności w obróbce niż wałek wykonany z FEPA 100.

W kolejnym etapie badań wykonano pomiary chropowatości powierzchni 3D obrabianego kompozytu Al/Al₂O₃ FEPA 046 gdzie zaobserwowano największe zużycie narzędzi. Pomiary wykonano profilometrem HOMMEL-ETAMIC T-8000 wyposażonym w głowicę TKL 100/17. Parametry chropowatości zestawiono z zastosowaną siłą skrawania (F_c)

w procesie obróbki i stopniem zużycia narzędzi (VB_c). Po analizie wykresu (rys. 40) można zauważyć, że wartość parametru R_a rośnie wraz ze wzrostem VB_c i spadkiem F_c .



Rys. 40. Chropowatość powierzchni kompozytu Al/Al_2O_3 (FEPA 046) po toczeniu w funkcji zużycia narzędzia VB_c i siły skrawania F_c : parametr R_a .

W pracy [A7] wykazano, że konwencjonalna obróbka toczenia kompozytów zbrojonych spiekami Al_2O_3 jest możliwa a sam proces toczenia przyczynił się do obniżenia parametrów R_a i R_z powierzchni obrobionej materiału kompozytowego w porównaniu do powierzchni nieobrobionej.

W pracy [A6] zaprezentowano nowe podejście do wsparcia procesu oceny defektów w kompozytach z osnową metalową (MMC). Głównym celem pracy było stworzenie dostępnej publicznie aplikacji Open Atlas of Casting Defects (OACD), która może być używana zarówno w przemyśle, jak i nauce. To rozwiązanie umożliwia szybką identyfikację różnych rodzajów defektów, uwzględniając nową klasyfikację wad odlewów. Ta klasyfikacja uzupełnia tradycyjne podejście, wprowadzając nową kategorię defektów odlewów, znanych jako wady strukturalne, co jest szczególnie ważne w przypadku kompozytów z osnową metalową. W pracy przedstawiono strukturę aplikacji oraz możliwości jej wykorzystania w procesie oceny wad odlewów. W pracy [A6] omówiono i opisano wady wybranych odlewów kompozytowych, wytworzonych w ramach badań prowadzonych przy użyciu metod przedstawionych w pracach [A1, A2, A5, A8, A9].

Celem pracy [R1] było scharakteryzowanie metod druku 3D i wykazanie ich przydatności w procesach wytwarzania odlewów, włączając w to także metalowe materiały kompozytowe. Opracowanie, które jest wynikiem badań, analiz, i doświadczeń autora w obszarze zastosowania technik druku 3D w odlewnictwie, ma na celu ułatwienie dostępu innym osobom do tego źródła.

Dostępne na rynku metody addytywne różnią się od siebie nie tylko rozwiązaniami technicznymi ale przede wszystkim tworzywami stosowanymi do druku oraz możliwością ich dalszego zastosowania. Do wytwarzania modeli metodami przyrostowymi stosowane są tworzywa sztuczne, ceramika oraz metale i ich stopy. Łączenie tych materiałów może następować poprzez ich stapianie, spiekanie, klejenie czy utwardzanie. W tabeli 4 zestawiono dostępne na rynku metody druku 3D i ich możliwości aplikacyjne w kształtowaniu wyrobów odlewanych.

Tabela 4. Metody addytywne, stosowane materiały i ich możliwości zastosowania w procesach kształtowania odlewów.

| Postać tworzywa | Metoda | Proces wiązania | Materiał | Możliwe zastosowanie w odlewnictwie |
|---------------------------|--|--|---|--|
| CIECZ | SLA (Stereolithography) | Fotopolimeryzacja | Mieszanka monomerów ulegających fotopolimeryzacji | - wytapiane/tracone modele - matryce do modeli woskowych - modele odlewnicze - rdzennice |
| | Druk DLP (Digital Light Processing) | | | |
| | Druk LCD (Liquid-crystal display) | | | |
| | CLIP (Continuous Liquid Interface Production) | | | |
| | PolyJet | | | |
| | MJP (MultiJet Printing) | Modelowanie strumieniowe | ----- Podpory woskowe | - mikromodele |
| | TPP (Two-photon polymerization) | Polimeryzacja dwufotonowa | ----- | |
| PROSZEK | 3DP (Three Dimensional Printing) | Selektywne łączenie proszku spoiwem | - metale i stopy - ceramika - tworzywa sztuczne | - formy i rdzenie piaskowe - modele odlewnicze - rdzennice - wytapiane/tracone modele - matryce do modeli woskowych - matryce do wytwarzania kształtek zbrojących MMC |
| | BJ (Binder Jetting) | | | |
| | UBJ (Universal Binder Jetting) | | | |
| | CJP (Color Jet Printing) | Topienie proszku inicjowane aktywatorem cieplnym | tworzywa sztuczne | - modele odlewnicze - rdzennice - matryce do modeli woskowych - matryce do wytwarzania kształtek zbrojących MMC |
| MJF (Multi Jet Fusion) | | | | |
| | SLS (Selective Laser Sintering) | Selektywne spiekanie laserowe | - ceramika - piasek otaczany - „wosk” | - formy i rdzenie skorupowe - modele odlewnicze - rdzennice - wytapiane/tracone modele |

| | | | | |
|---------------------------|---|--|---------------------|---|
| | | | - tworzywa sztuczne | - matryce do modeli woskowych - matryce do wytwarzania kształtek zbrojących MMC |
| | SLM (Selective Laser Melting) | Selektywne topienie laserowe | metale i stopy | - elementy kokili - wkładki do form ciśnieniowych - wkładki do płyt modelowych - rdzennice |
| | DLMS (Direct Metal Laser Sintering) | Bezpośrednie spiekanie laserowe metali | | |
| | EBM (Electron Beam Melting) | Topienie wiązką elektronów | | - matryce do modeli woskowych |
| FILAMENT LUB ARKUSZ | FDM (Fused Deposition Modeling) | Modelowanie przez napawanie | tworzywa sztuczne | - wytapiane/tracone modele - matryce do modeli woskowych - wypalane modele - modele odlewnicze - rdzennice - matryce do wytwarzania kształtek zbrojących MMC |
| | LOM (Laminated Object Manufacturing) | Warstwowe klejenie folii | - folia - papier | - wytapiane/tracone modele - modele odlewnicze - rdzennice |

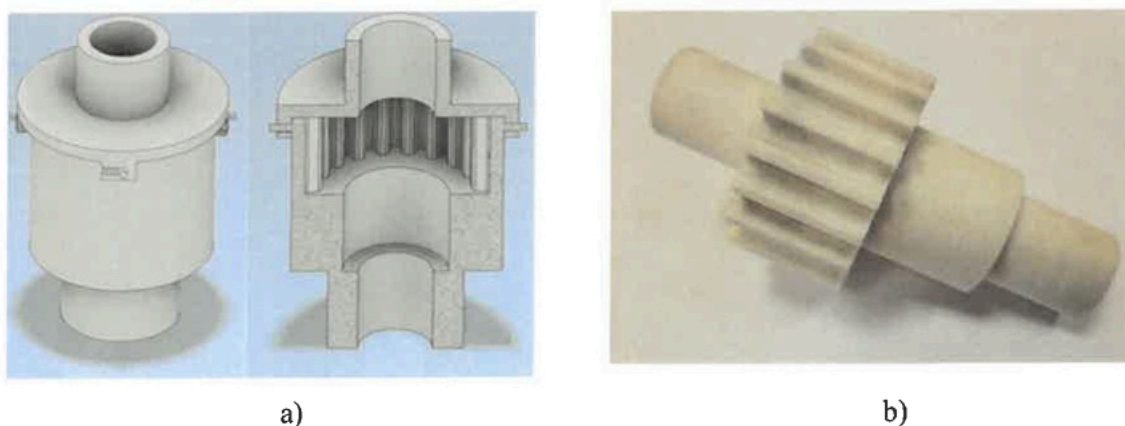
Zastosowanie technik addytywnych do drukowania modeli i matryc pozwala na wytwarzanie odlewów metodą wytapianych modeli w produkcji jednostkowej oraz w krótkich seriach, co wykazano w pracach [A1, P1, A5, A7, A8, A9]. Możliwości zastosowania różnych technik druku 3D w procesie odlewania precyzyjnego zostały wymienione w tabeli 4. Takie możliwości są bardzo pożądane przy opracowywaniu nowych konstrukcji oraz w przypadku uruchamiania produkcji seryjnej, gdzie błędy konstrukcyjne i technologiczne można skorygować już na etapie projektowania.

W tabeli 5 zestawiono metody druku wraz z tworzywami, które można stosować w metodzie wytapianych/traconych modeli. Znak -/+ oznacza, w jakich formach mogą lub nie mogą być wykorzystane. Stosowane tworzywa w procesach światłoutwardzalnych muszą posiadać oznaczenie producenta, które wskazuje, że są odpowiednie do odlewania metodą wytapianych/traconych modeli. Modele wykonane z PMMA (poli(metakrylan metylu)), ze względu na znaczną porowatość, wymagają impregnacji, aby zapobiec wnikaniu ciekłej masy między przestrzenie ziaren podczas procesu formowania. Właściwości mieszanki impregnacyjnej powinny charakteryzować się dobrą zwilżalnością materiału impregnowanego oraz wypalać się w temperaturze obróbki termicznej formy. Modele z polistyrenu PS oferowane na rynku pod nazwą HIPS nie mogą być stosowane w konwencjonalnych formach ceramicznych z uwagi na wysoki współczynnik rozszerzalności cieplnej powodujący pękanie skorupy.

Tabela 5. Możliwości zastosowania tworzyw w procesie wytwarzania odlewów metodą wytapianych/wypalanych modeli.

| Metoda | Tworzywo | Uwagi | Forma klasyczna | Forma gipsowa |
|----------------------|------------------|---|-----------------|---------------|
| SLA/DLP/LCD/CLIP/MJP | fotopolimery | materiały wyłącznie dedykowane do procesu | + | + |
| 3DP/BJ/UBJ | PMMA | konieczna impregnacja | + | + |
| SLS | PS | | - | + |
| SLS | proszki woskowe | | + | + |
| FDM | PS | | - | + |
| FDM | PLA | | + | + |
| FDM | filament woskowy | | + | + |
| LOM | papier | | + | + |

Jedną z metod wytwarzania odlewów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem, omówioną i wykorzystaną podczas badań w pracach [A5, A7, A8, A9], polega na umieszczeniu zaimpregnowanego porowatego zbrojenia w formie gipsowej lub warstwowo wytwarzanej skorupie. Zbrojąca preforma pełni jednocześnie rolę modelu i szkieletu, nadając kształt wytwarzanemu odlewowi kompozytowemu. Po wyżarzeniu formy z umieszczonym wewnątrz zbrojeniem nasycy się go ciekłym stopem. Proces wytworzenia odlewu kompozytowego z nasycanym zbrojeniem rozpoczyna się od wykonania projektu geometrii odlewu oraz geometrii matrycy do tworzenia kształtki zbrojącej (rys. 41a). Po wydrukowaniu matrycy, wypełnia się ją mieszkanką składników zbrojenia, a następnie całość poddaje procesowi wypalania w piecu. W trakcie tego procesu zbrojenie twardnieje, a tworzywo stopniowo ulega wypaleniu. Czas i temperatura procesu zależą od użytych komponentów materiału zbrojenia. Na rysunku 41b przedstawiono przykład hybrydowego spieku ceramicznego (składającego się z krótkiego włókna glinokrzemianowego/ Al_2O_3), który został wykonany w matrycy polistyrenowej za pomocą druku 3D metodą FDM.



Rys. 41 . Projekt wydrukowanej matrycy do wykonania kształtki zbrojenia - a), spiek – włókno glinokrzemianowe/ Al_2O_3 .

Literatura

- [1] Sheraf, Jakie, Darius Gnanaraj, Solomon; Characterization of a functionally graded aluminium metal matrix composite (AMMC), *Materials Letters*, Volume 3521, December 2023, Article number 135110
- [2] Molina-Jorda, José-Miguel, Schneider, Gionata, Mortensen, Andreas; Surface energy contributions to the work of infiltration in metal matrix composite processing, *Scripta Materialia*, Open Access, Volume 2061, January 2022, Article number 114223
- [3] Gobalakrishnan B., Rajaravi C., Udhayakumar, Gobikrishnan, Lakshminarayanan P.R.; A comparative study on ex-situ & in-situ formed metal matrix composites, *Archives of Metallurgy and Materials*, Open Access, Volume 68 (2023), Issue 1, Pages 171 – 1852023
- [4] Javier LLorca; Fatigue of particle and whisker reinforced metal matrix composites, *Progress in Materials Science*, Volume 47, Issue 3, 2002, Pages 283-353
- [5] Gurumurthy, O., Venkateswaran, S.; Experimental studies and regression analysis on mechanical properties of MMCs based zinc-aluminium alloys with graphite particles reinforcement, *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol 49, pp. 913–918
- [6] E. Carreño-Morelli, T. Cutard, R. Schaller, C. Bonjour; Processing and characterization of aluminium-based MMCs produced by gas pressure infiltration, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 251, Issues 1–2, 15 August 1998, Pages 48-57
- [7] Górny Z., Sobczak J.: *Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych*, Kraków 2005
- [8] Barbara Previtali, Dante Pocci, Cataldo Taccardo; Application of traditional investment casting process to aluminium matrix composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 39, Issue 10, October 2008, Pages 1606-1617
- [9] Richard M. Höfer; Convergence of the method of reflections for particle suspensions in Stokes flows, *Journal of Differential Equations*, Volume 297, 5 October 2021, Pages 81-109
- [10] Rajwinder Singh Gill, Partap Singh Samra, Amresh Kumar; Effect of different types of reinforcement on tribological properties of aluminium metal matrix composites (MMCs) – A review of recent studies, *Materials Today: Proceedings*, Volume 56, Part 5, 2022, Pages 3094-3101
- [11] D.J.W. Barrell, M. Priest, C.M. Taylor; The axial motion of the piston ring in the top ring groove of a gasoline engine, *Tribology Series*, Volume 39, 2001, Pages 641-649
- [12] Xiang Rao, Chenxing Sheng, Zhiwei Guo, Xuecheng Zhang, Huabing Yin, Chang Xu, Chengqing Yuan; Effects of textured cylinder liner piston ring on performances of diesel engine

under hot engine tests, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 146, August 2021, 111193

[13] Jackowski, J.; Szweycer, M.; Szymański, P. Assessment of surface properties of liquid metals and alloys in liquid media (In Polish). *Kompozyty (Composites)*, 2006, 2, 60–64.

[14] Nagolska, D.; Szymański, P.; Pędzich, Z. The role of the parameters of reinforcing profile structure in the recycling process of metal composites with saturated reinforcement (In Polish). *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 2006, vol. 26 (1), 77–86.

[15] J.M. Molina a, R. Voytovych b, E. Louis a, N. Eustathopoulos, The surface tension of liquid aluminium in high vacuum: The role of surface conditio, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 27, Issue 5, July 2007, Pages 394-401

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

5.1 Współpraca z krajowymi jednostkami naukowymi

Od 2004 roku współpracuję z Politechniką Morską w Szczecinie (wcześniej Akademia Morska) w obszarze związanym z technologią materiałów kompozytowych. Współpraca ta zaowocowała realizacją wspólnych projektów badawczych oraz wydaniem 10 publikacji w czasopiśmie krajowych i zagranicznych. Zrealizowałem również dwa staże naukowe w tym jeden trzymiesięczny.

| | Okres | Nazwa instytucji, miejscowość | Charakter stażu i realizowane obszary naukowe | Określenie uzyskanego dokumentu |
|---|---|--|---|---------------------------------|
| 1 | 18.08.2014r. 31.08.2014r. (dwa tygodnie) | Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, IPNT | Staż naukowo-badawczy - technologia kompozytów In situ | Zaświadczenie o odbyciu stażu |
| 2 | 15.06.2023r. 22.09.2023r. (trzy miesiące) | Politechnika Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, KPBMiM | Staż naukowy - ocena jakości odlewów kompozytowych, uczestnictwo w projekcie NCBiR /HYDROSTRATEG1/001P/2022 | Zaświadczenie o odbyciu stażu |

5.2 Współpraca z zagranicznymi jednostkami naukowymi

Współpraca z Technische Universität Dresden Niemcy - temat: insert kompozytów metalowych z nasyceniem zbrojeniem z tworzywami sztucznymi (zakończono kwiecień 2016).

Koordinacja Inter-institutional agreement 2014-2021 - kontynuacja współpracy w ramach Erasmus (nowy program) z Technische Universität Dresden (do kwietnia 2016). Ponadto zrealizowałem trzy staże szkoleniowe na których zapoznałem się z technologią wytwarzania kompozytów z nasyceniem zbrojeniem osnową magnezową wytwarzanych w autoklawach. Między innymi dzięki zdobytej wiedzy podczas stażu w Dreźnie uruchomiłem w

Zakładzie Odlewnictwa stanowisko próżniowe do wytwarzania odlewów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem metodą traconych modeli.

| l.p. | Okres | Nazwa instytucji, miejsowość | Charakter stażu | Określenie uzyskanego dokumentu |
|------|--------------------------|---|--|---|
| 1 | 12.08.2013 21.08.2013 | Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Drezno, Niemcy | Program Szkoleniowy LLP -Erasmus - Production of magnesium matrix composites | Zaświadczenie |
| 2 | 23.09.2015 29.09.2015 | Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Drezno, Niemcy | Program Szkoleniowy LLP- Erasmus - Technology of magnesium casting alloys - Technology of metal matrix composites - Three-dimensional analysis of composites materials by means of X-ray computed | Zaświadczenie odbycia szkolenia i raport dla Narodowego Biura ERASMUS |
| 3 | 30.03.2016 06.04.2016 | Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Drezno, Niemcy | Program Szkoleniowy LLP- Erasmus - Symulation of casting proces - Precision casting in autoclav technique - Manufacturing of MMC | Zaświadczenie odbycia szkolenia i raport dla Narodowego Biura ERASMUS |

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1 Działalność dydaktyczna

Prowadzenie zajęć dydaktycznych w Politechnice Poznańskiej

W tabeli wyszczególniono prowadzone przeze mnie zajęcia dydaktyczne w okresie od początku zatrudnienia na stanowisku nauczyciela akademickiego z podziałem na zajęcia prowadzone na studiach pierwszego i drugiego stopnia.

| l.p. | Nazwa przedmiotu | Rodzaj zajęć | Kierunek studiów | Stopień |
|------|--|----------------------------|---|------------|
| 1 | Kierunki rozwoju technologii bezubytkowych | - wykład - laboratorium | Mechanika i Budowa Maszyn | II stopnia |
| 2 | Technologie bezubytkowe | - wykład - laboratorium | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 3 | Metalowe kompozyty odlewane | - wykład - laboratorium | Inżynieria Materiałowa, Mechanika i Budowa Maszyn | |
| 4 | Projektowanie systemów logistycznych | - wykład - projekt | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 5 | Obsługa Zamówień | - wykład - ćwiczenia | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 6 | Praca przejściowa | - projekt | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 7 | Technologie przetwarzania materiałów | - laboratorium | Inżynieria Materiałowa | |
| 8 | Specjalne metody odlewania | - laboratorium | Mechanika i Budowa Maszyn | |
| 9 | Dobór materiałów do wytwarzania wyrobów | - wykład - laboratorium | Mechanika i Budowa Maszyn | |
| 10 | Niekonwencjonalne systemy wytwarzania | - wykład | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 11 | Systemy zarządzania transportem | - wykład | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 12 | Metalurgia i Odlewnictwo | - laboratorium | Mechanika i Budowa Maszyn | I stopnia |
| 13 | Technologia topienia metali i stopów | - laboratorium | Inżynieria Materiałowa | |
| 14 | Biomateriały i ich przetwarzanie | - laboratorium | Mechatronika | |
| 15 | Logistyka w przedsiębiorstwie | - ćwiczenia | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 16 | Opracowanie zamówień i systemy informatyczne | - ćwiczenia | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |
| 17 | Logistyka gospodarki odpadami | - projekt | Zarządzanie i Inżynieria Produkcji | |

Działalność dydaktyczna w jednostkach zagranicznych

Od 2011 roku uczestniczyłem w programach wymiany akademickiej: CEEPUS (Central European Exchange Program for University Studies) oraz Erasmus Plus Staff Mobility of Teaching. Zajęcia lub seminaria realizowane w ramach stażu związane były z prowadzonymi przeze mnie badaniami naukowymi oraz działalnością dydaktyczną realizowaną w Politechnice Poznańskiej.

| I.p. | Okres | Nazwa instytucji, miejscowość, prowadzone wykłady | Program | Określenie uzyskanego dokumentu |
|------|--------------------------|--|----------|---------------------------------|
| 1 | 01.05.2011 31.05.2011 | Technical University of Cluj Napoca (Romania), Foundry Processes (6 hrs per week), Ecology Industry (4 hrs per week) | Ceepus | Letter of Confirmation |
| 2 | 13.06.2011 26.06.2011 | Technical University of Sofia (Bulgaria), Foundry Processes (6 hrs per week), Ecology Industry (4 hrs per week) | Ceepus | Letter of Confirmation |
| 3 | 01.06.2012 22.06.2012 | Technical University of Ruse (Bulgaria), Ecology Industry (2 hrs per week), Foundry Processes (4 hrs per week) | Ceepus | Letter of Confirmation |
| 4 | 01.06.2014 30.06.2014 | Technical University of Sofia (Bulgaria), metal matrix composites - 6 - hrs per week | Ceepus | Letter of Confirmations |
| 5 | 24.06.2019 07.07.2019 | Technical University of Sofia (Bulgaria), Metallurgical processes - 6 hrs per week. | Ceepus | Letter of Confirmations |
| 6 | 21.04.2022 27.04.2022 | Technical University of Kosice (department Presov, Slovakia) - Characteristics of components applied to the production of cast metal composites (6 hours per week) | Erasmus+ | Mobility Agreement |
| 7 | 03.10.2022 16.10.2022 | Slovak University of Technology in Bratislava (Slovakia), MMC - Metal Matrix Composites (6 hours per week) | Ceepus | Letter of Confirmations |

Współpraca z Technische Universitat Dresden Niemcy - przyjęcie na staż dyplomantki z Politechniki Poznańskiej, kierunek ZiP, opiekun w TUV, Dr.Eng. A.Czulak

Działalność promotorska i recenzencka

W swojej działalności dydaktycznej i naukowej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych byłem promotorem 40 prac dyplomowych magisterskich i 44 inżynierskich oraz recenzentem 10 prac magisterskich i 23 inżynierskich. Pełniłem także funkcję przewodniczącego egzaminów dyplomowych inżynierskich. Jestem również promotorem pomocniczym w 2 przewodach doktorskich:

- Promotor pomocniczy **rozprawy doktorskiej** mgr. inż. Magdaleny Suchory-Kozakiewicz na temat „Napięcia międzyfazowe w procesie recyklingu metalowych tworzyw kompozytowych z osnową aluminiową” – decyzja Rady

Wydziału z dnia 03 lipca 2015 r., 14.12.2016 – obrona pracy doktorskiej, **16.12.2016**
– **uzyskanie stopnia doktora**

- Promotor pomocniczy **rozprawy doktorskiej** mgr. inż. Michał Szymański na temat „**Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem**” – uchwała nr 5/V/12/2019 Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 20/12/2019 – **w realizacji**

Współpraca z przemysłem przy realizacji procesu dydaktycznego

- Współpraca z odlewnią precyzyjną Stalkwas w Poznaniu w obszarze: praktyki studenckie, prace dyplomowe
- Współpraca z fabryką armatury Akwa Sp. z o.o. Gniezno w obszarze: praktyki studenckie, prace dyplomowe
- Współpraca z odlewnią Ferrex Sp. z o.o. Poznań w obszarze: praktyki studenckie, prace dyplomowe
- Współpraca z IBP Instal fittings Sp. z o. o. Poznań w obszarze: zajęcia terenowe w zakładach produkcyjnych

6.2 Działalność organizacyjna oraz popularyzująca naukę

Doskonalenie procesu kształcenia i pełnione funkcje organizacyjne

Decyzją Rady Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania zostałem powołany na funkcję **Pełnomocnika Dziekana do spraw jakości kształcenia na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji** - decyzja Rady Wydziału z dnia 25 października 2013 na okres do 31 sierpnia 2016 oraz decyzja Rady Wydziału z dnia 23 września 2016 na okres do 31 sierpnia 2020.

Członek Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej w kadencji 2020 - 2024

W 2008 założyłem wraz ze studentami kierunku Mechaniki i Budowy Maszyn **Koło Naukowe Odlewników** gdzie pełnię funkcję Opiekuna do chwili obecnej. Wpis do rejestru Kół Naukowych (poz.35)

Wykaz publikacji i projektów, w których brali/biora udział studenci

W 2019 roku wyniki prac realizowanych wspólnie ze studentem zostały opublikowane przez wydawnictwo Sprenger oraz zaprezentowane na Międzynarodowej Konferencji Manufacturing 2019 - Evaluation of castings surface quality made in 3D printed sand moulds

using 3DP technology, **Szymański, P., Borowiak, M.**, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Advances in Manufacturing II, Volume 4 - Mechanical Engineering, pp 201-212. (w ramach: Badania teoretycznych podstaw procesów warunkujących jakość odlewów 02/25/DSPB/4311)

Popularyzacja nauki

W latach 2013-2017 byłem Współorganizatorem **Nocy Naukowców** na Politechnice Poznańskiej, gdzie prowadziłem pokazy i warsztaty w Zakładzie Odlewnictwa PP pod hasłem: **„Obróbka metali nie tylko przez kowali”**. W warsztatach brali czynny udział członkowie Koła Naukowego Odlewników. Za projekt i wykonanie formy kokilowej oraz medali z logiem Noc Naukowców otrzymałem podziękowanie od prorektora PP.

W marcu 2013 roku zostałem zaproszony do wygłoszenia prelekcji na temat **"Zastosowanie technik rapid prototyping w odlewnictwie"** (doświadczenia Zakładu Odlewnictwa w wykorzystaniu technik RP przy realizacji grantu "Opracowanie optymalnych konstrukcji typoszeregów sprężarek i dmuchaw promieniowych dużej mocy") na sympozjum odbywającym się w Katowicach zorganizowanym przez firmę **Wichary Technologies i VoxelJet Germany**.

W październiku 2014 roku zostałem ponownie zaproszony do wygłoszenia prelekcji na temat **"Zastosowanie technik rapid prototyping w odlewnictwie"** (**doświadczenia Zakładu Odlewnictwa w wykorzystaniu technik RP oraz edukacji w tym obszarze**). Organizacja: **Wichary Technologies i VoxelJet Germany**.

W październiku 2013 roku brałem udział w organizacji jubileuszu 50-lecia Zakładu Odlewnictwa PP, na otwarciu wygłosiłem referat **"Dlaczego laser wspomaga obróbkę skrawaniem materiału kompozytowego? "**

Nagrody i wyróżnienia

- 29 sierpnia 2012 - Nagroda rektora za osiągnięcia dydaktyczne - Uruchomienie stanowiska do odlewania precyzyjnego.
- 20 czerwca 2013 - Prezydent RP, Medal Brązowy za długoletnią służbę, wręczony 2014
- 6 października 2021 – Nagroda rektora za osiągnięcia organizacyjne. Uczestnictwo w zespole wytwarzającym maski na potrzeby służb medycznych w czasie pandemii.

Członkostwo w towarzystwach naukowych i technicznych

- Od 2009 członek Polskiego Towarzystwo Materiałów Kompozytowych
- Członek Zarządu Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych, kadencja 2018 – 2021
- Członek Zarządu Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych, kadencja 2021 – 2024
- Od 2021 członek Stowarzyszenia Technicznego Odlewników Polskich

7. Informacje dodatkowe**7.1 Staże w przemyśle.**

W roku 2013 odbyłem 3 miesięczny staż w odlewni precyzyjnej Stalkwas S.C. w Poznaniu w ramach projektu: Staże i szkolenia praktyczne pracowników/nic naukowych placówek naukowych i pracowników/nic naukowych i naukowo-dydaktycznych uczelni w przedsiębiorstwach”. Projekt Urzędu Marszałkowskiego Województwa Wielkopolskiego - projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (staż od 01/03/2013 do 31/05/2013).

7.2 Działalność naukowa przed i po doktoracie.

| L.p. | Wykaz osiągnięć | Przed doktoratem | Po doktoracie | Łącznie |
|------|---|---------------------|---------------|---------|
| 1 | Publikacje w czasopismach z bazy JCR | 4 | 16 | 20 |
| 2 | Publikacje w czasopismach innych niż znajdujących się w bazie JCR | 5 | 2 | 7 |
| 3 | Publikacje w materiałach konferencyjnych lub autorstwo w monografii | 6 | 5 | 11 |
| 4 | Udzielone patenty | 0 | 3 | 3 |
| 5 | Skomercjalizowane wyniki badań i know-how | 0 | 3 | 3 |
| 6 | Kierownik w projektach badawczych | 0 | 2 | 2 |
| 7 | Wykonawca w projektach badawczych | 2 | 3 | 5 |

| | | | | |
|----|--|---|----|----|
| 8 | Kierowanie projektami zleconymi | 0 | 10 | 10 |
| 9 | Recenzje w czasopismach naukowych z bazy JCR lub Scopus | 0 | 6 | 6 |
| 10 | Zagraniczne staże naukowe | 0 | 3 | 3 |
| 11 | Zagraniczne staże dydaktyczne | 0 | 7 | 7 |
| 12 | Krajowe staże naukowo badawcze | 0 | 2 | 2 |
| 13 | Staż w zakładach przemysłowych | 0 | 1 | 1 |
| 14 | Udział w konferencjach naukowych | 5 | 18 | 23 |
| 15 | Wykonane opinie o innowacyjności | 0 | 2 | 2 |
| 16 | Nagrody i wyróżnienia za działalność dydaktyczną i organizacyjną | 0 | 2 | 2 |
| 17 | Opieka naukowa nad doktorantami - promotor pomocniczy | 0 | 2 | 2 |
| | Liczba spełnionych kryteriów | 5 | 17 | |

Pełne zestawienie dorobku wraz ze wskaźnikami naukowymi wykazano w załączniku 4.



 (podpis wnioskodawcy)