



Politechnika Wroclawska

Wydział Mechaniczny

ZAŁĄCZNIK NR 3A

AUTOREFERAT

Dr inż. Tomasz Kurzynowski

Wyb. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek B-4

T: +48 71 320 20 75
+48 71 320 27 55
+48 71 320 27 57
F: +48 71 320 42 02

wydz.mech.sekr@pwr.edu.pl
<http://www.wm.pwr.edu.pl>

NIP 896-000-58-51

Konto bankowe:
Bank Zachodni WBK S.A.
16 Oddział we Wrocławiu
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434

Wrocław, kwiecień 2019r.

Spis treści

1. Dane osobowe	2
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu.....	3
4. Osiągnięcie naukowe.....	3
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	3
4.2. Wykaz i omówienie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe	4
4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	12
4.3.1. Motywacja	12
4.3.2. Zakres prac	15
4.3.3. Wnioski	25
4.3.4. Wykorzystanie.....	26
4.3.5. Podsumowanie.....	28
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, organizacyjnych i dydaktycznych .	30
5.1. Wstęp i ogólny opis pozostałej działalności habilitanta.....	30
5.2. Działalność naukowo-badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora.....	31
5.3. Działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia doktora.....	34
5.4. Opieka naukowa nad doktorantami	38
5.5. Projekty badawcze.....	39
5.6. Współpraca z przemysłem.....	39
5.7. Patenty i zgłoszenia patentowe.....	39
5.8. Staże	40
5.9. Działalność dydaktyczna	40
5.10. Pełnione funkcje	41
5.11. Nagrody i wyróżnienia	41
5.12. Zestawienie dorobku naukowego	42

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: Tomasz Kurzynowski

Stopień naukowy: doktor nauk technicznych

Miejsce zatrudnienia: Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

29.01.2016

Kurs Dydaktyczny Szkoły Wyższej

Politechnika Wroclawska, Studium Nauk Humanistycznych i Społecznych

24.06.2013

Podyplomowe Studia Menedżer Innowacji

Szkoła Główna Handlowa

Kolegium Zarządzania i Finansów

Tytuł pracy dyplomowej: „Komercjalizacja warstwowych technologii laserowych bazujących na proszkach metali do wytwarzania przestrzennego”

Promotor: Dr Maciej Wieloch

Dyplom obroniony na ocenę bardzo dobrą

28.06.2011 r.

Doktor nauk technicznych

Politechnika Wroclawska

Wydział Mechaniczny

Dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn

Tytuł pracy doktorskiej: „Wpływ parametrów technologicznych i właściwości proszkowych materiałów na własności mechaniczne elementów wykonywanych metodą SLM”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Edward Chlebus

Praca doktorska obroniona z wyróżnieniem.

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Niezgoda - Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny

07.07.2005 r.

Magister inżynier

Politechnika Wroclawska

Wydział Mechaniczny

Kierunek: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

Specjalność: Organizacja Produkcji

Tytuł pracy magisterskiej: „**Kompleksowe zarządzanie rozwojem produktu w Dziale Rozwoju Produktu firmy Whirlpool na podstawie wybranego komponentu**”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Edward Chlebus

Dyplom obroniony na ocenę bardzo dobrą

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu.

Miejsce	Wymiar etatu	Stanowisko	Okres zatrudnienia	
Politechnika Wrocławska	1/1	adiunkt naukowo-dydaktyczny	01.10.2011	aktualnie
Politechnika Wrocławska	3/10	asystent naukowy	01.11.2010	30.09.2011
Politechnika Wrocławska	7/10	asystent naukowy	01.02.2010	30.09.2011
Politechnika Wrocławska	1/4	specjalista	01.02.2010	30.10.2010
Politechnika Wrocławska	1/2	starszy referent	10.06.2009	31.01.2010
Politechnika Wrocławska	1/4	starszy referent	01.03.2009	31.10.2010
Politechnika Wrocławska	1/2	starszy referent	01.12.2007	28.02.2009
Politechnika Wrocławska	1/2	starszy referent	15.07.2007	30.11.2007
Whirlpool Corporation	1/1 (umowa zlecenie, następnie umowa o pracę)	konstruktor	01.09.2004	30.08.2005

4. Osiągnięcie naukowe

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako moje osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) przedstawiam cykl powiązanych tematycznie 8 publikacji, w tym:

- 1 autorską monografię,
- 5 artykułów indeksowanych w bazie JCR,
- 2 publikacje konferencyjne SPRINGER (indeksowane w SCOPUS, zgłoszone do WoS).

Sumaryczny Impact Factor publikacji przedstawionych w osiągnięciu wynosi **IF=15,62** (całościowy **IF=26,549**; **H=6**; **cytowania według WoS=300**, bez autocytowań na dzień **20.03.2019r**). Tytuł osiągnięcia naukowego:

Projektowanie i ocena procesu wytwarzania z proszków metalicznych w technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii

Monografia:

- [1]. **Kurzynowski T.** „Metoda projektowania i implementacji technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków”, 2019, ISBN 978-83-7493-066-6, 187s. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

Recenzenci wydawniczy:

Prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, Politechnika Wrocławska

Dr hab. inż. Andrzej Nowotnik, prof. PRz, Politechnika Rzeszowska

Monografia jest autorską pracą zawierającą wyniki własnych opracowań, badań i analiz. Napisana została w języku polskim. Dotyczy technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (ang. Selective Laser Melting – SLM) należącej do grupy technologii wytwarzania przyrostowego (ang. Additive Manufacturing – AM). Głównym celem naukowym monografii było opracowanie czynnikowej metody projektowania i implementacji technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (SLM) do wytwarzania części z nowych lub już stosowanych materiałów, uwzględniającej dobór parametrów technologicznych, konstrukcyjnych i materiałowych silnie oddziałujących na jakość gotowego wyrobu. Opisana metoda obejmująca materiał, technologię, proces, konstrukcję i jakość produktu (w tym właściwości mechaniczne i materiałowe), porządkuje działania związane z rozwojem materiałów i badaniem technologii przyrostowych ze szczególnym uwzględnieniem technologii SLM, ze względu na otrzymywane rezultaty i wysoką jakość wyrobów końcowych, jakim są demonstratory produktowe.

Mój udział w powstaniu tej pracy wynosi 100%.

Publikacje w czasopismach z bazy JCR, wymienione wg roku opublikowania:

- [2]. **Kurzynowski, T.**, Stopyra, W., Gruber, K., Ziółkowski, G., Kuźnicka, B., Chlebus, E. „*Effect of scanning and support strategies on relative density of SLM-ed H13 steel in relation to specimen size*” Materials, 2019, vol. 12, nr 2, s. 1-18, punktacja **MNiSW: 35pkt , IF 2,467**

Celem pracy było uzupełnienie metody optymalizacji parametrów SLM, według kryterium minimalizacji porowatości, na przykładzie stali narzędziowej AISI H13. W pracy określono metodę doboru strategii skanowania próbek (części) zapewniającą im gęstość względną powyżej 99% niezależnie od ich wymiarów. Próbki wytworzono stosując różne warianty struktur wspierających. W ramach badań przeprowadzono:

- Analizę materiału wsadowego (proszku stali H13) pod kątem jego przydatności w technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii (skład chemiczny, rozkład frakcji, morfologia).

- Badania wpływu strategii skanowania wiązką laserową, na uzyskiwaną porowatość próbek w zależności od ich pola przekroju.
- Badania mikroskopowe oraz tomograficzne (CT), wyznaczając korelację wpływu strategii skanowania oraz zastosowanych struktur wspierających na wynikową porowatość wytworzonych próbek oraz zaproponowano model powstawania porów kolumnowych, zależnych od zastosowanych strategii skanowania.
- Analizę literaturową badań prowadzonych nad korelacją parametrów procesu SLM oraz porowatości próbek dla stali H13.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- Zastosowanie stałych parametrów procesu dla wytwarzanych elementów o różnym polu przekroju może wiązać się z powstawaniem defektów w formie porowatości.
- Strategia skanowania wpływa na ilość, wielkość oraz rozmieszczenie porów w zależności od wielkości skanowanego przekroju. Za pomocą strategii skanowania można zniwelować wpływ wielkości skanowanego przekroju na porowatość wytwarzanych elementów.
- Odległość pomiędzy strukturami wspierającymi oraz ich kąt względem osi X wpływają na powstawanie porów kolumnowych, z kolei ich zagęszczenie oraz odpowiednie pochylenie pozwala zredukować ilość porów kolumnowych.
- Zastosowanie warstwy pośredniej pozwala na znaczne zredukowanie porów kolumnowych, a odpowiedni dobór parametrów „down-skin” może poprawić porowatość w całej objętości próbki.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji uzupełnienia opracowanej metody poprzez rozbudowany eksperyment dotyczący strategii skanowania wiązką lasera wytwarzanych próbek aby uzyskać gęstość powyżej 99% niezależnie od wymiarów wytwarzanego elementu. Wykonałem analizę literaturową, analizę wyników badań dotyczącą materiału wsadowego jakim był proszek stali H13, analizę samej strategii skanowania oraz edycję pracy. Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 60%.

[3]. **Kurzynowski, T.,** Gruber, K., Stopyra, W., Kuźnicka, B., Chlebus, E. „*Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting*” Materials Science and Engineering. A, 2018. vol. 718, s. 64-73, punktacja **MNiSW: 35pkt , IF 3,414**

W pracy przedstawiono i wyjaśniono zjawiska zachodzące w czasie procesu selektywnej laserowej mikrometalurgii dla zmiennych parametrów procesowych, na przykładzie proszku stali nierdzewnej 316L, wpływające na wynikową mikrostrukturę oraz właściwości materiału.

W ramach artykułu przedstawiono:

- Analizę materiału wsadowego (proszku stali 316L) pod kątem jego technologiczności (skład chemiczny, rozkład frakcji, morfologia).
- Warunki wytworzenia litych próbek ze stali 316L dla różnych wariantów parametrów procesu SLM, tj. przy zmiennej mocy lasera oraz strategii skanowania.

- Badania mikroskopowe stali 316L wytworzonej przy zmiennych warunkach procesowych, analizę fazową oraz przeanalizowano procesy zachodzące w czasie obróbki odprężającej.
- Badania orientacji kryształów metodą EBSD, określające wpływ parametrów procesu SLM na powstające tekstury, orientację i kształt ziaren stali 316L poddanej procesowi SLM.
- Badania właściwości mechanicznych stali 316L wytwarzanej z różnymi wariantami procesu SLM oraz przy różnych orientacjach próbek względem osi wytwarzania.
- Analizę literaturową dotyczącą badań nad właściwościami stali 316L przetwarzanej z wykorzystaniem technologii SLM.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- Zwiększanie prędkości chłodzenia materiału prowadzi do zwiększania tendencji kierunkowego wzrostu ziaren, zwiększania stopnia tekstury, długości ziaren, ilości granic nisko-kątowych oraz redukcji ferrytu szczątkowego.
- Wysoki poziom naprężeń własnych oraz obecność ferrytu delta w przetworzonym materiale prowadzi do wydzielania faz niespotykanych w stali 316L przetwarzanej konwencjonalnie w czasie odprężania materiału.
- Wytrzymałość mechaniczna stali 316L jest znacząco wyższa, niż dla materiału przetwarzanego konwencjonalnie.

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji i struktury pracy. Zaprojektowałem eksperyment badawczy, którego celem była analiza wpływu mocy lasera i strategii skanowania na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne próbek wykonanych w technologii SLM z proszku stali 316L. Wykonałem analizę literaturową, analizę wyników badań dotyczących materiału wsadowego jakim był proszek stali 316L oraz analizę właściwości mechanicznych przy różnych orientacjach wytwarzania. Wyniki badań zostały uzyskane w ramach projektu PBS1/A5/12/2012, którego byłem koordynatorem. **Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 60%.***

[4]. **Kurzynowski, T.**, Smolina I., Kobiela K., Kuźnicka, B., Chlebus, E. „*Wear and corrosion behaviour of Inconel 718 laser surface alloyed with rhenium*” *Materials & Design*, 2017, vol. 132, s. 349-359, punktacja **MNiSW: 35pkt , IF 4,525**

W pracy przedstawiono rezultaty laserowego stopowania (LSA, LC, ang. *Laser Surface Alloying lub Laser Cladding* – jako technologia przyrostowa umożliwiająca nakładanie poszczególnych warstw z dyszy) renum warstwy wierzchniej próbek ze stopu Inconel 718. Ren został wybrany ze względu na jego atrakcyjność jako modyfikatora stopu IN718. Celem badań było poznanie zależności między wpływem zawartości renum (ponad 6% wagowych), mikrostrukturą i właściwościami w celu zagwarantowania przydatności modyfikowanych powierzchniowo komponentów w przemyśle lotniczym, nuklearnym lub chemicznym.

W ramach oceny właściwości funkcjonalnych powierzchniowo stopowanych warstw IN718, przeprowadzone zostały badania uwzględniające warunki eksploatacyjne:

- Zweryfikowano poprawny dobór parametrów LSA na podstawie obserwacji mikrostruktury, analizy EDS zawartości renu i pomiarów twardości (HV0.3).
- Dokonano analizy wpływu renu na zużycie i zachowanie korozyjne wytworzonych warstw stopowych na podstawie badań przeprowadzonych w warunkach suchego tarcia poślizgowego i ściernego: (1) ścieranie materiału warstwy stopowej w obecności luźnego ścierniwa przy stałej prędkości ślizgania i sile docisku, w której utrata masy była miarą zużycia, (2) „ball-on-disc”, bez udziału ścierniwa, w której przy stałej prędkości ślizgania i sile docisku miarą zużycia były: zmniejszenie grubości warstwy stopowej i utrata masy; pomiarów elektrochemicznych i badań mikrostruktury (po badaniach na zużycie).

Przeprowadzone badania wykazały, że laserowe stopowanie renowaniem wierzchniej warstwy stopu IN718 jest skuteczną metodą modyfikacji powierzchni w celu zwiększenia odporności na zużycie i korozję. Przy użyciu lasera diodowego o dużej mocy (1100 i 1300W) oraz wybranej strategii skanowania (50% tzw. overlapping), można uzyskać warstwy stopowe o jednolitej grubości, które charakteryzują się bardzo wąską strefą niemieszania i brakiem rozrostu ziaren w strefie wpływu ciepła w strefie przypowierzchniowej. Ponadto, w wyniku badań stwierdzono, że:

- Całkowite rozpuszczenie proszku renu w podłożu zwiększa odporność na korozję elektrochemiczną.
- Powierzchniowe stopowanie renowaniem (14% wag. Re) zwiększa potencjał korozyjny materiału o 100 mV i potencjał wżerowy o 270 mV.
- Częściowe rozpuszczenie proszku renu w podłożu IN718 poprawia odporność na zużycie.
- Powierzchniowe stopowanie renowaniem (28% wag. Re) zmniejsza szybkość zużycia przy poślizgu o 82%.

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji wykonania odpornej na korozję części wykonanej z stopu Inconel 718 wykorzystując dodatek w postaci renu. Zaproponowałem wykonanie nie całej części (objętościowo) z modyfikowanego materiału wykorzystując technologię SLM (jak w przypadku artykułu [6]) a wykonanie testów z wykorzystaniem przyrostowej technologii napawania laserowego (z ang. LSA, LC) ze względu na cel jakim była analiza właściwości korozyjnych (powierzchniowych) części stosowanych w przemyśle lotniczym, nuklearnym czy też chemicznym. Wykonałem analizę literaturową, opracowałem strukturę pracy, dobrałem technologie do wykonania próbek. Wyniki badań zostały uzyskane w ramach projektu PBS1/A5/12/2012, którego byłem koordynatorem. **Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 60%.***

- [5]. Chlebus E., Gruber K., Kuźnicka B., Kurzac J., **Kurzynowski T.**, „Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting” Materials Science and Engineering. A, 2015, vol. 639, s. 647-655, punktacja MNiSW: **35pkt , IF 2,647**

W artykule przedstawiono rezultaty badania mikrostruktury i właściwości mechanicznych superstopu na bazie niklu (Inconel 718), wytworzonego metodą selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (SLM) oraz obrabianego cieplnie według zaproponowanego w pracy schematu. W ramach pracy wykonano:

- Próbki cylindryczne o wysokiej gęstości rzeczywistej (pow. 99,8%) zbudowane w 4 kierunkach (0° , 45° , $45^\circ \times 45^\circ$ i 90°) w stosunku do płaszczyzny przetapiania.
- Analizę mikrostruktury stopu w stanie surowym (bezpośrednio po procesie SLM) oraz obrobionym cieplnie (przesykanie + starzenie).
- Badania mechaniczne stopu Inconel 718 dla różnych orientacji kierunku rozciągania względem kierunku budowy próbek, zmierzono twardość stopu dla różnych stanów OC oraz wykonano badania fraktograficzne.
- Analizę literaturową porównując wyniki z innymi badaniami nad przetwarzaniem stopu w technologii SLM oraz materiału przetwarzanego konwencjonalnie.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- Ze względu na kierunkowy charakter procesu wytwarzania oraz dendrytyczno-komórkowy wzrost ziaren, zaobserwowaną mikrostrukturę cechowały kolumnowe ziarna przesyconego roztworu stałego (austenit niklowy) z wewnętrzną mikrosegregacją Nb i Mo, oraz zdegenerowaną eutektyką w postaci faz Laves'a w regionach między-dendrytycznych.
- Niejednorodna mikrostruktura nie jest odpowiednia do bezpośredniego starzenia po procesie. W stanie homogenizowanym i starzonym otrzymano bardzo dobry zestaw właściwości mechanicznych (w porównaniu do materiału kutego). Opracowany w ramach badań proces obróbki cieplnej, pozwala na wytwarzanie elementów ze stopu Inconel 718 w technologii SLM, które spełniają wymagania wytrzymałościowe stawiane przez przemysł lotniczy.

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na optymalizacji parametrów zmiennych procesu SLM, doborze mocy lasera, prędkości i strategii skanowania, grubości nanoszonej warstwy oraz analizy materiału wsadowego. Dodatkowo zaproponowałem podwójne skanowanie poszczególnych warstw w trakcie procesu w celu zredukowania naprężeń wewnętrznych. Opracowałem podsumowanie i wnioski. Wyniki badań zostały uzyskane w ramach projektu PBS1/A5/12/2012, którego byłem koordynatorem. **Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 50%.***

[6]. Chlebus E., Kuźnicka B., Dziejczak R., **Kurzynowski T.**, „Titanium alloyed with rhenium by selective laser melting”, Materials Science and Engineering. A, 2014. vol. 620, s. 155-163, punktacja **MNiSW: 35pkt , IF 2,567**

W artykule przedstawiono wyniki badań modyfikowania właściwości materiałowych tytanu renum (0,5, 1,0 i 1,5% at.) z wykorzystaniem selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków. Wyniki badań oceniano biorąc pod uwagę minimalną porowatość oraz maksymalny stopień rozpuszczenia cząstek renu. Wśród najważniejszych badań przedstawionych w pracy należy wymienić:

- Charakterystykę proszków Ti oraz Re użytych w pracy, a także sposób przygotowania mieszaniny proszków.
- Analizę mikroskopową oraz XRD w celu dokonania analizy fazowej struktur.
- Ocenę stopnia rozpuszczenia cząstek renu oraz ocenę porowatości z wykorzystaniem tomografii technicznej.
- Badania wytrzymałościowe oraz badania fraktograficzne określające wpływ dodatku renu na wytrzymałość oraz kinetykę pęknięcia w statycznej próbie rozciągania.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- Technologia SLM może być z powodzeniem wykorzystywana do przetwarzania mieszanin proszków znacznie różniących się właściwościami (m.in. gęstością, temperaturą topnienia).
- W celu uzyskania znacznego rozpuszczenia renu (85-90%) należy zastosować pięciokrotnie wolniejsze skanowanie w stosunku do typowych parametrów używanych podczas przetwarzania tytanu.
- Dodatek 1,3% at. renu podniósł granicę plastyczności tytanu o 125%, wytrzymałość na rozciąganie o 96%, twardość o 85%, powodując zmniejszenie wydłużenia o 90%.
- Pięciokrotne zmniejszenie prędkości skanowania zwiększyło stopień absorpcji tlenu oraz azotu oraz znacznie wydłużyło czas potrzebny do wytworzenia próbek.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na doborze proszków materiałów podstawowych Ti oraz Re oraz parametrów technologicznych topienia przygotowanej mieszaniny proszków. Opracowałem wyniki dotyczące sferoidyzacji plazmowej nieregularnych cząstek proszku renu oraz wyniki badań porowatości wytworzonych próbek z wykorzystaniem tomografii komputerowej. Wyniki badań zostały uzyskane w ramach projektu PBS1/A5/12/2012, którego byłem koordynatorem. Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 40%.

Publikacje konferencyjne SPRINGER

- [7]. **Kurzynowski T.**, Gruber K., Chlebus E., „*The Use of Selective Laser Melting as a Method of New Materials Development*”, E. Rusiński and D. Pietrusiak (Eds.): CAE 2018, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing, ISBN 978-3-030-04974-4, pp. 403–410, https://doi.org/10.1007/978-3-030-04975-1_47 (indeksowana w SCOPUS, zgłoszona do WoS)

W artykule przedstawiono opracowaną metodę postępowania przy rozwoju nowych materiałów z wykorzystaniem technologii SLM. Procedura została zobrazowana przykładem rozwoju nowego materiału opartego o stop Inconel 718 i dodatek renu. W ramach pracy:

- Wykonano analizę wymagań stawianych przed nowym materiałem oraz dobrano skład mieszanin.
- Przygotowano oraz przebadano proszki wsadowe.
- Przeprowadzono badania doboru parametrów procesu SLM.

- Wykonano badania mikroskopowe i analizę wytworzonego materiału pod kątem właściwości mechanicznych.
- Dobrano odpowiedni rodzaj obróbki po procesowej (OC, HIP, CNC).
- Wytworzono części demonstracyjne.

Ze względu na cechę charakterystyczną technologii SLM związaną z przetwarzaniem materiału w postaci proszku możliwe jest mieszanie różnych proszków oraz ich bezpośrednie stopowanie w trakcie przetapiania w procesie SLM. Zgodnie z wyżej przedstawioną koncepcją opracowano stop Inconel 718-Ren i wyciągnięto następujące wnioski:

- Przedstawiona metoda umożliwia wytworzenie niemal jednorodnego stopu Inconel 718-Ren.
- Mikrostruktura nowego stopu jest bardzo zbliżona do czystego stopu Inconel 718.
- Dodatek renu poprawia wysokotemperaturowe właściwości stopu Inconel 718.

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji i struktury pracy oraz zaadoptowaniu opracowanej metody do modyfikacji stopu Inconel718 proszkiem renu. Wykonałem przegląd literaturowy, wybrałem materiał, przeprowadziłem jego charakterystykę, zaproponowałem wartości wagowe dodatku renu, dokonałem optymalizacji i analizy parametrów procesu SLM oraz sporządziłem wnioski wynikające z badań. Wyniki badań zostały uzyskane w ramach projektu PBS1/A5/12/2012, którego byłem koordynatorem. **Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 80%.***

[8]. **Kurzynowski T.**, Pawlak A., Chlebus E., „*Processing of Magnesium Alloy by Selective Laser Melting*”, E. Rusiński and D. Pietrusiak (Eds.): CAE 2018, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing, ISBN 978-3-030-04974-4, pp. 411–418, https://doi.org/10.1007/978-3-030-04975-1_48 (indeksowana w SCOPUS, zgłoszona do WoS)

W artykule przedstawiono procedurę optymalizacji procesu SLM dla stopu magnezu AZ31, pod kątem minimalizacji porowatości w materiale oraz ocenę właściwości mechanicznych uzyskanego w procesie SLM materiału. Optymalizację procesu SLM, celem eliminacji porowatości w materiale, prowadzono z wykorzystaniem statystycznych metod planowania eksperymentów (Design of Experiments). W ramach badań przeprowadzono:

- Optymalizację procesu pod kątem eliminacji porowatości wykorzystując kolejno pełny 3-czynnikowy oraz centralny rotalny plan eksperymentu.
- W pełnym 3-czynnikowym planie eksperymentu wyznaczono istotność wpływu badanych parametrów procesowych (odległość między punktami skanowania, czas ekspozycji lasera w punkcie oraz moc wiązki lasera) na uzyskiwane zmiany w porowatości materiału.
- Centralny plan rotalny eksperymentu, umożliwił analizę dwóch parametrów (moc wiązki lasera i prędkość skanowania), wyznaczając okno procesowe pozwalające uzyskać najwyższą względną gęstość przetwarzanego materiału.

- Badania materiałowe, celem oceny składu chemicznego materiału po procesie oraz opis mikrostruktury.
- Badania mechaniczne materiału przetapianego w technologii SLM, obejmujące badania twardości, statyczną próbę ściskania oraz rozciągania.

Na podstawie przeprowadzonych badań wysunięto następujące wnioski:

- W całkowitym 3-czynnikowym eksperymencie wykazano, że najmniejszy wpływ na osiąganą porowatość ma czas ekspozycji wiązki w punkcie.
- Wyznaczony zakres wartości parametrów procesowych, pozwala uzyskać porowatość mniejszą niż 0,5% w przetopionym w technologii SLM stopie AZ31.
- Mikrostrukturę przetopionego materiału charakteryzowały równoosiowe ziarna roztworu stałego, co przełożyło się na bardzo dobre, izotropowe własności mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 207÷212 MPa, przy odkształceniu 7,7÷7,9%) Twardość materiału po procesie SLM, odpowiada wartościom zmierzonym dla materiału w tradycyjnej postaci walcowanej blachy (69 HV0,1).
- Proces przetapiania proszku stopu magnezu w technologii SLM jest procesem utrudnionym, ze względu na bardzo wąskie okno procesowe wynikające z niewielkiej różnicy pomiędzy temperaturą topnienia i wrzenia.
- Tendencje do utleniania magnezu i szybkiego formowania warstwy tlenkowej o podwyższonej temperaturze topnienia oraz wysoka refleksyjność (>40%), zmusza do stosowania dużych mocy wiązki lasera.
- Konieczne jest wydajne wentylowanie komory procesowej z produktów parowania magnezu, które osiadają na ścianach komory procesowej, w szczególności na układzie optycznym.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, zaadoptowaniu opracowanej metody do przetwarzania stopu magnezu w technologii SLM poprzez statystyczne metody planowania eksperymentu. Wykonałem analizę optymalizacji parametrów procesu SLM, analizę wyników badań mechanicznych oraz opracowałem wnioski. Wyniki badań zostały uzyskane w ramach projektu LIDER/8/0109/L-7/15/NCBR/2016, którego jestem kierownikiem. Mój udział w powstaniu tej pracy szacuję na 70%.

4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

4.3.1. Motywacja

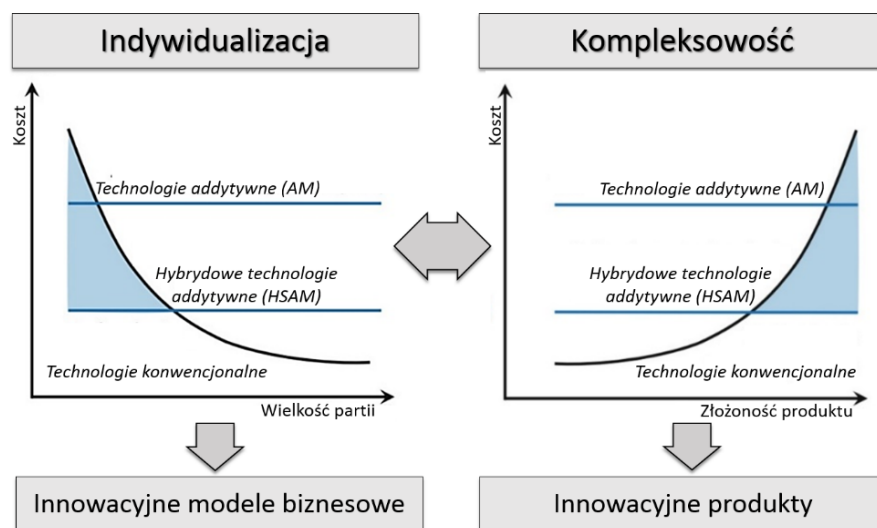
Technologie wytwarzania przyrostowego (ang. Additive Manufacturing - AM) oferują możliwość wytwarzania indywidualnie projektowanych wyrobów, dostosowanych do pełnienia funkcji spełniających specyficzne wymagania eksploatacyjne. Wytwarzanie przyrostowe polega na przestrzennym „generowaniu” części, warstwa po warstwie, bez użycia narzędzi (form, matryc itp.). Według Gartner Inc., w ciągu kilku najbliższych lat znaczna część przedsiębiorstw z każdej branży zainwestuje w technologie przyrostowe [1]. Przewiduje się, że do 2021 roku:

- 75% nowych samolotów komercyjnych i wojskowych będzie budowanych z zastosowaniem części silników, elementów konstrukcyjnych i innych elementów wytwarzanych w technologii przyrostowej,
- 25% chirurgów będzie ćwiczyć przed operacją (przeprowadzać symulacje zabiegów operacyjnych) na wytwarzanych przyrostowo modelach narzędzi.
- 20% spośród 100 największych na świecie firm produkujących dobra konsumpcyjne wykorzysta wytwarzanie przyrostowe do opracowywania niestandardowych produktów,
- 20% przedsiębiorstw zainwestuje w wewnętrzne startupy, aby opracować nowe produkty i usługi oparte na technologiach przyrostowych,
- 40% przedsiębiorstw produkcyjnych utworzy centra doskonałości technologii przyrostowych (COE).

W związku z powyższym obecnie panujące trendy na rynku technologii wytwórczych oraz rosnące wymagania rynku odbiorców (szczególnie przemysłu specjalistycznego takiego jak lotnictwo) stawiają nowe wyzwania przed konstruktorami i wytwórcami. Wskutek tego koniecznością stało się skuteczniejsze polepszanie właściwości fizycznych i mechanicznych materiałów i elementów konstrukcyjnych. Jedną z możliwości wpływania na te właściwości jest stosowanie technologii przyrostowych do wytwarzania modeli prototypowych, serii przedprodukcyjnych i produkcyjnych, gotowych produktów, a także przestrzennych struktur wewnętrznych i pokryć funkcjonalnych na materiałach rodzimych. Zastosowanie tych technologii w znaczny sposób zmienia i poprawia twardość i jakość powierzchni elementów, właściwości tribologiczne, odporność na obciążenia mechaniczne podwyższając tym samym trwałość eksploatacyjną oraz odporność na niekorzystne i ciężkie warunki pracy. Istotnymi czynnikami, determinującymi określenie danej technologii jako przyszłościowej i wartej rozwijania, są uzyskiwane cechy obrabianych kształtów i powierzchni, koszty jej wdrożenia i użytkowania, elastyczność oraz dbałość o środowisko naturalne.

Efektom zmian w podejściu do produkcji jest potrzeba silnego uelastyczenia procesów produkcyjnych. Zaletą tych technologii jest możliwość szybkiego dostosowywania parku maszynowego do nowych produktów i ich modyfikacji, w połączeniu z automatyzacją wytwarzania i kontroli jakości wyrobów (Rys. 1.) [1].

Wiele jednak zależy od determinacji i zaangażowania zespołów badawczych w badania prowadzone nad technologiami przyrostowymi przetwarzającymi proszki metaliczne. Reprezentantami tych technologii są: selektywna laserowa mikrometalurgia proszków (ang. Selective Laser Melting – SLM) oraz technologia elektronowa (ang. Electron Beam Melting - EBM) szeroko rozpowszechnione w działach B+R przedsiębiorstw i ośrodków naukowych. Technologie te mają wspólną zasadę działania, jaką jest warstwowe wytwarzanie z materiałów metalicznych poprzez topienie proszku skoncentrowanym źródłem energii (SLM – laser, EBM – wiązka elektronów).

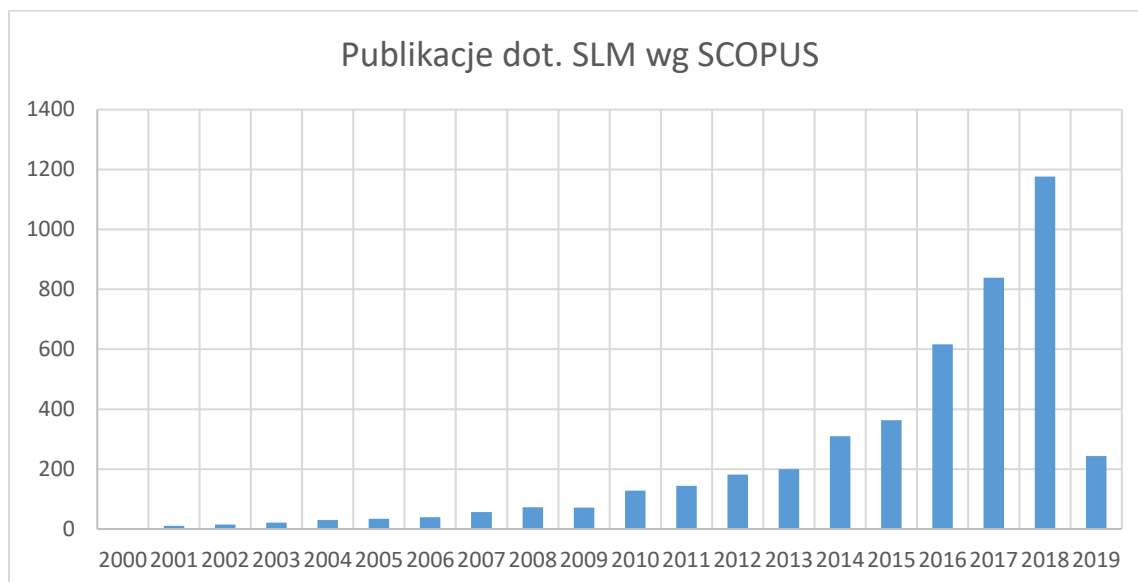


Rys. 1. Innowacyjne modele biznesowe i produkty dostępne dzięki technologiom przyrostowym [1]

W pracach [1-8] przedstawiłem wyniki badań, które dotyczą technologii laserowej ponieważ technologia elektronowa (którą również się zajmuję) jest zbliżona pod względem efektu (procesu wytwórczego) do procesu laserowego i możliwości wytwarzania skomplikowanych geometrycznie części z proszków metalicznych.

Postęp w rozwoju technologii przyrostowych przetwarzających proszki metaliczne pozwala na wytwarzanie części z różnych materiałów, w tym m.in. z nadstopów niklu, stopów tytanu, aluminium, magnezu oraz stali. Zwiększa to zapotrzebowanie na implementację technologii przyrostowych w przemyśle lotniczym, medycznym, samochodowym, energetycznym i militarnym. Zastosowanie technologii przyrostowych do wytwarzania elementów z proszków różnych materiałów istotnie rozszerza możliwości nadawania im złożonych kształtów oraz gradientowo zmieniającego się składu chemicznego i mikrostruktury, stosownie do warunków pracy. Nowa technologia daje szansę przetwarzania materiałów trudnych technologicznie oraz otrzymywania funkcjonalnych produktów przy zastosowaniu najnowszej generacji materiałów o modyfikowanych właściwościach, dostosowanych do wymagań eksploatacyjnych wytwarzanych części. Cechą charakterystyczną tej technologii jest zależność właściwości mechanicznych gotowego wyrobu od opracowanych parametrów procesu topienia (tzw. okna procesowego) oraz od podatności materiału wsadowego na ten rodzaj przetwarzania [2-8]. Wymaga to kompleksowych badań wpływu czynników determinujących efektywność procesu AM, tj. właściwości proszków, parametrów procesu, strategii wytwarzania, dokładności odwzorowania geometrii zaprojektowanej części [1].

Badania nad tą technologią prowadzone są zaledwie od kilkunastu lat (Rys. 2). Według przeprowadzonej przeze mnie analizy w bazie SCOPUS dnia 15.02.2019 roku z wykorzystaniem zwrotu kluczowego: „selective laser melting”, uzupełnionego o „3D printers”, „melting”, „Additive Manufacturing”, „microstructure” na świecie było opublikowanych 4 627 prac związanych z tą tematyką. W Polsce jest to 96 prac, w tym 23 opublikowane przez dr Grzesiaka z ZUT (1 miejsce), 21 prac opublikowanych przez profesora Chlebusa z PWr (2 miejsce) oraz 12 prac opublikowanych przez habilitanta (3 miejsce).



Rys. 2. Liczba publikacji dotyczących technologii SLM wg bazy SCOPUS (na dzień 15.02.2019r.)

Jednak pomimo rosnącej z roku na rok liczby prac związanych z tą technologią jedynie w nielicznych publikacjach skupiono się na metodycznym podejściu do badań nad tymi technologiami (Tabela 1, kolumna „Metodyka”).

Tabela 1. Analiza literatury dotycząca metodyki w badaniach technologii SLM

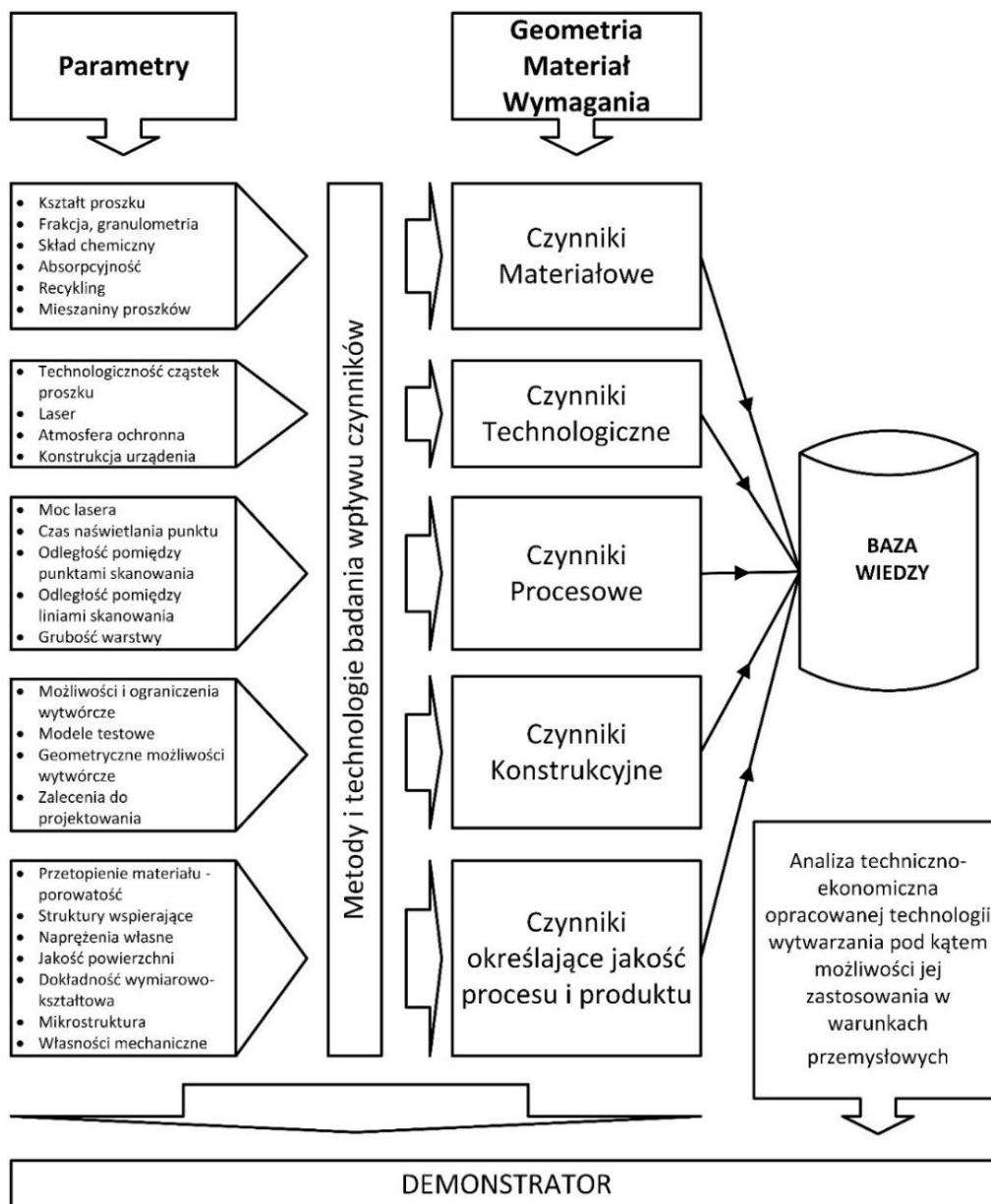
Zakres prac	Liczba	Mikrostruktura	Własności mechaniczne	Naprężenia własne	Modele biznesowe	Modelowanie CAD	Proces	Metodyka	Aplikacje
Stopy Ti	807	Thijs 2010 Chlebus 2011, 2014 Leuders 2013	Vrancken 2012 Leuders 2013 Günther 2017	Ahmad 2018 Vastola 2016					
Stal nierdzewna/narzędziowa	510	Yasa 2011 Liverani 2017 Ziętala 2016 Kurzynowski 2018	Ziętala 2016 Liverani 2017	Bartlett 2018	Chlebus 2000 Gebhardt 2011 Fera 2016	Kruth 2003 Leutenecker 2016	DebRoy 2018 Kurzynowski 2017 Geisert 2018 Beal 2008	Aboulkhair 2014 Sames 2016	Armillotta 2014 Szymczyk 2018 Mazur 2016
Stopy Al.	421	Schmidtke 2011	Schmidtke 2011	Li 2018	Bogue 2013 Bak 2003	Calignano 2014	Kurzynowski 2012		
Stopy Ni	224	Parimi 2014 Chlebus 2015 Kurzynowski 2017 Deng 2018 Wang 2012	Deng 2018 Jia 2014 Wang 2012	Ahmad 2018	Basilire 2017 Bernhard 2013 Bogers 2016	Adam 2014 Kajima 2018 Gan 2016	Boley 2015 Bidare 2018 Pawlak 2015 Yadroitsev 2017		Eyers 2017 Dehoff 2013 Clark 2008
Parametry procesu	212			Mercelis 2006					
Projektowanie / metodologia / podejście	78			Mukherjee 2017					

Przeprowadzając analizę przedmiotowej literatury oraz obowiązujących norm, nie znalazłem opracowania obejmującego kompleksową i adaptowalną dla różnych materiałów metodę projektowania procesu AM, która uwzględniałaby przy

projektowaniu czynniki począwszy od charakterystyk materiału wejściowego, poprzez projekt samego procesu, a skończywszy na właściwościach użytkowych gotowego demonstratora. Brak takiego opracowania stał się motywacją do przedstawienia własnej propozycji metody projektowania procesu AM na przykładzie technologii SLM [1].

4.3.2. Zakres prac

W celu wytworzenia funkcjonalnego demonstratora w technologii SLM (o właściwościach użytkowych spełniających założone wymagania) z materiału konwencjonalnego [2, 3, 5, 8], nowo opracowanego [6, 7] lub konwencjonalnego, modyfikowanego przez stopowanie powierzchniowe [4], opracowałem metodę czynnikową projektowania procesu SLM [1], w której uwzględniłem pięć grup czynników: materiałowe, technologiczne, procesowe, konstrukcyjne oraz jakościowe (Rys.3).



Rys. 3. Metoda czynnikowa projektowania i implementacji technologii AM na przykładzie SLM [1].

W badaniach, na podstawie których opracowałem metodę [1], wykorzystałem proszki następujących materiałów: stopów tytanu (Ti6Al4V oraz Ti6Al7Nb) omówionych w pracach [1 i 6], stali (316L oraz H13) omówione w pracach [2 i 3], nadstopu niklu (Inconel 718) omówionego w pracach [4, 5 i 7] oraz stopu magnezu (AZ31) omówionego w pracy [8].

W pracy [2] uzupełniłem sposób optymalizacji parametrów SLM (zawarty w czynnikach procesowych metody głównej [1]), według kryterium minimalizacji porowatości, na przykładzie stali narzędziowej AISI H13. W pracy określono metodę doboru strategii skanowania próbek (części) zapewniającą im gęstość względną powyżej 99% niezależnie od ich wymiarów. W pracy [3] przedstawiłem i wyjaśniłem zjawiska zachodzące w czasie procesu SLM dla zmiennych parametrów procesowych, na przykładzie proszku stali nierdzewnej 316L, wpływające na wynikową mikrostrukturę oraz właściwości materiału. W pracy [5] przedstawiłem rezultaty badania mikrostruktury i właściwości mechanicznych superstopu na bazie niklu (Inconel 718), wytworzonego w procesie SLM oraz obrabianego cieplnie według zaproponowanego w pracy schematu. W pracy [7] przeprowadziłem przykładowy proces rozwoju nowego materiału na przykładzie mieszaniny nadstopu Inconel 718 z renem. Przeprowadziłem również próby ulepszania właściwości materiałów (stopy tytanu oraz niklu) dodatkiem renu wprowadzanym w postaci proszku bezpośrednio w procesie topienia i stopowania powierzchniowego (zarówno w technologii SLM [6], jak i napawania laserowego – LC/LSA) [4]. Natomiast w pracy [8] przedstawiłem procedurę optymalizacji procesu SLM dla stopu magnezu AZ31, pod kątem minimalizacji porowatości w materiale oraz ocenę właściwości mechanicznych uzyskanego w procesie SLM materiału. Optymalizację procesu SLM, celem eliminacji porowatości w materiale, prowadzono z wykorzystaniem statystycznych metod planowania eksperymentów (Design of Experiments). Natomiast w pracy [1] opracowałem czynnikową metodę projektowania i implementacji technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (SLM).

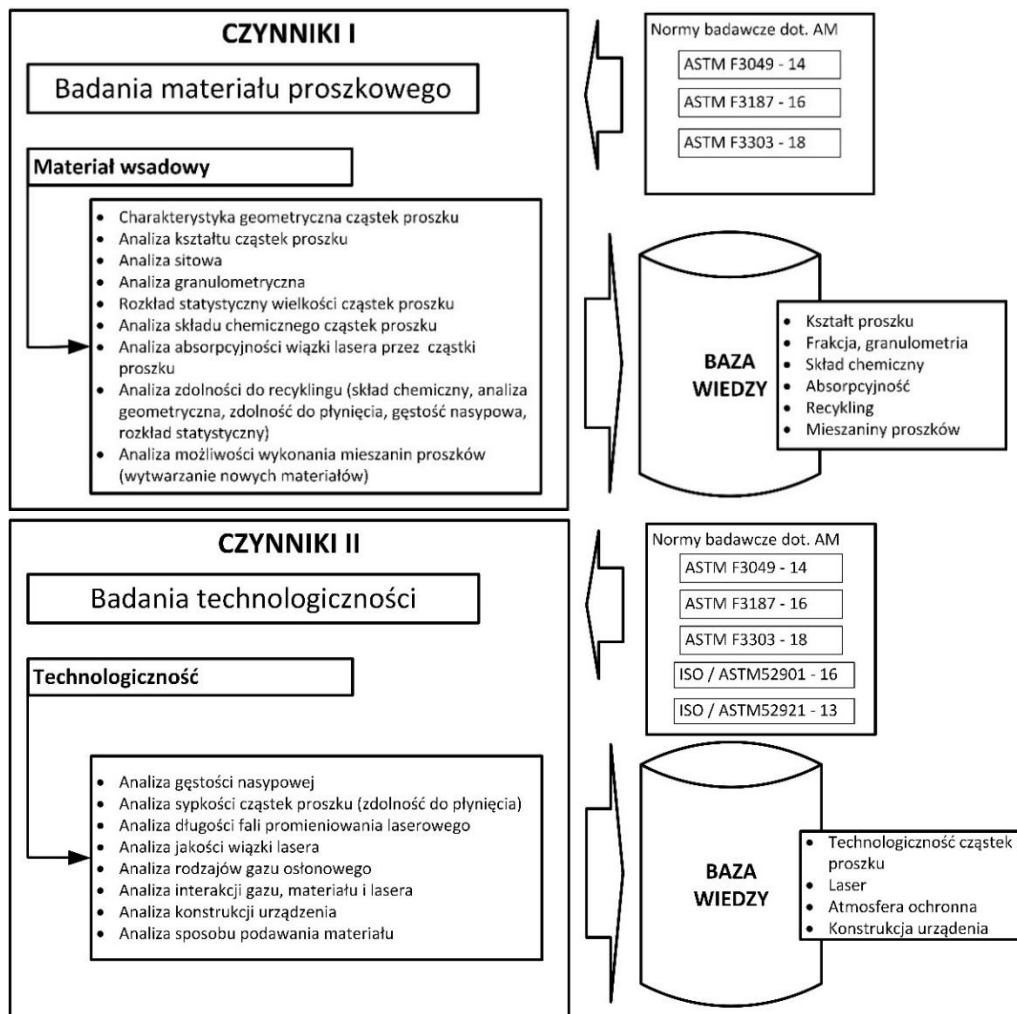
Główny cel został osiągnięty poprzez realizację następujących wyzwań badawczych:

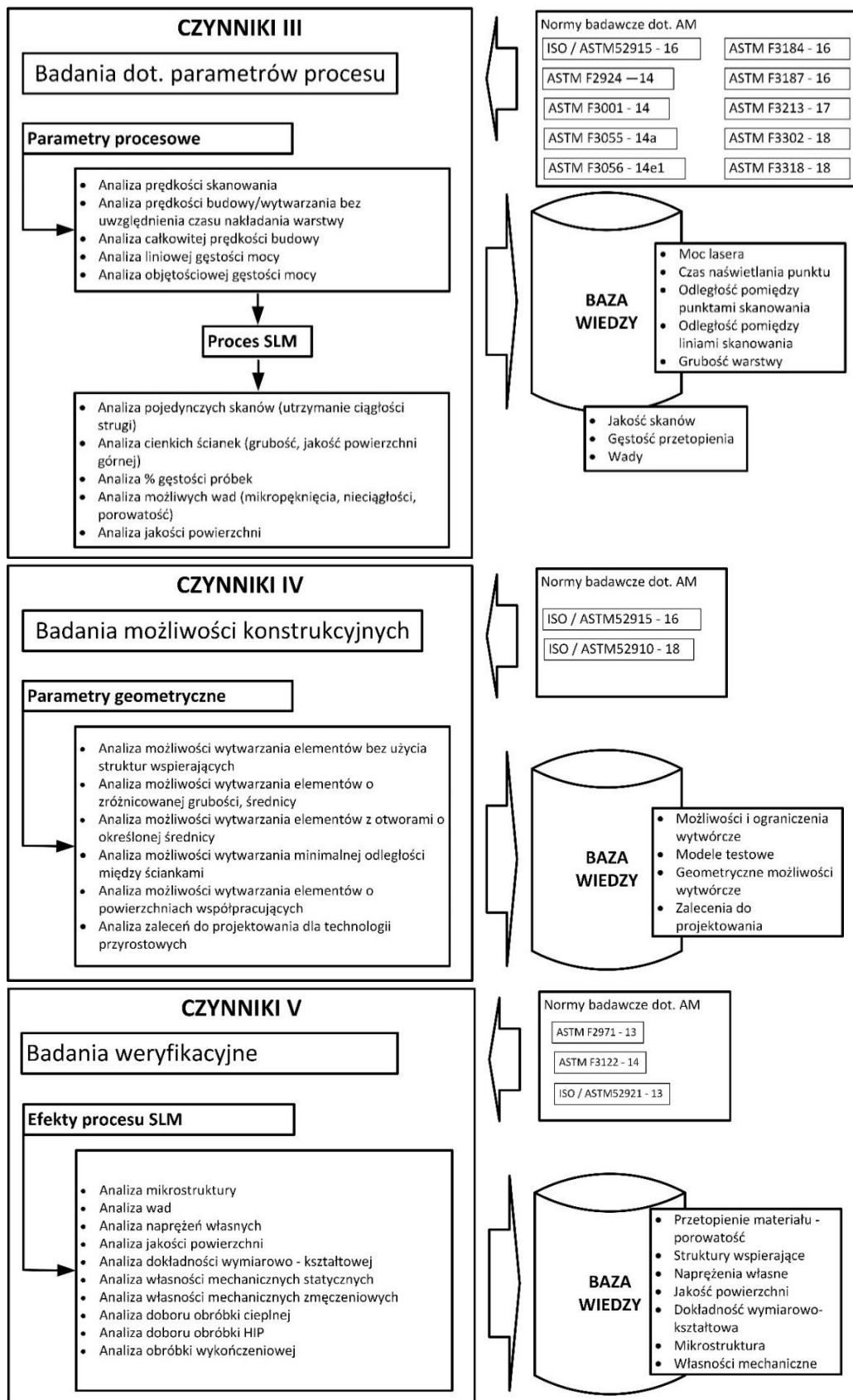
- Kompleksową analizę problemu, w tym określenie ograniczeń technologicznych związanych z wybranym materiałem oraz gabarytami i geometrią wytwarzanych detali.
- Dobór materiałów, wytypowanie geometrii detali demonstratorów, opracowanie danych wejściowych do kolejnych zadań (parametry zmienne procesu, geometria próbek testowych, rodzaje badań weryfikacyjnych, itd.).
- Kompleksową analizę materiałów proszkowych przeznaczonych do przetwarzania w technologii SLM, które determinują już na początku procesu możliwości technologiczne, a także właściwości końcowe wytwarzanego demonstratora.
- Opracowanie parametrów procesu wytwarzania dla wytypowanych materiałów, próbek testowych i demonstratorów. Parametry procesu wytwarzania zostały opracowane w odniesieniu do założonych kryteriów technologicznych (mikrostruktura, porowatość, dokładność odwzorowania geometrii, itd.).
- Wyznaczenie podstawowych właściwości mechanicznych, materiałowych i specjalnych materiałów przetwarzanych opracowywaną technologią wytwarzania, pozwalające na porównanie uzyskanych właściwości z obiektami wytwarzanymi

w sposób konwencjonalny i określenie adekwatności ich stosowania w przypadku detali demonstracyjnych.

- Zaprojektowanie procesu technologicznego w odniesieniu do geometrii detali demonstratorów z określeniem limitów i ograniczeń technologii oraz wytycznych dla projektantów.
- Wytworzenie oraz badania funkcjonalne demonstratorów, analiza techniczno-ekonomiczna opracowanej technologii wytwarzania pod kątem możliwości jej zastosowania w warunkach przemysłowych.

Metodyczne postępowanie jest ważne z punktu widzenia prawidłowego opracowania parametrów i warunków procesu SLM. Metoda, która obejmuje podejście czynnikowe pozwala opracować kompleksową i stabilną technologię wytwarzania przyrostowego z proszków metali. Zaproponowana metoda czynnikowa procesu pozwala na uwzględnienie parametrów wpływających na pełną optymalizację procesu selektywnej mikrometalurgii laserowej pod kątem otrzymania jednolitej struktury pozbawionej wad. Jednocześnie zachowuje uniwersalny charakter, ponieważ daje możliwość zastosowania jej dla wszystkich materiałów (także dla tych nowo opracowywanych materiałów, o nie przebadanych dotychczas właściwościach), które można przetwarzać w technologiach przyrostowych (również w technologii EBM)(Rys. 4).





Rys. 4. Szczegółowa mapa czynników procesu technologii SLM [1]

Zaproponowana przeze mnie metoda projektowania procesu wytwarzania w technologii SLM składa się z pięcioletowego czynnikowego planu badawczego, według którego każdy etap

obejmuje badania i analizy skupione na wyodrębnionej grupie czynników, a ich wyniki mają wpływ na zakres a także wyniki kolejnego etapu badań. Plan badawczy budowany jest w kontekście funkcji pchającej a nie ciągnącej, która ogranicza liczbę badań do minimum aby uzyskać konkretny cel dla danego materiału (zastosowanie aplikacyjne) [7]. Metoda czynnikowa (pchająca) uwzględnia wszystkie możliwe czynniki dzięki temu kompleksowo buduje pełną bazę wiedzy o danym procesie i materiale (Rys.4).

I. Czynniki materiałowe

Celem analizy czynników materiałowych jest wyznaczenie charakterystyk materiału wsadowego do procesu SLM. Proszek powinien być w pełni scharakteryzowany pod kątem jego właściwości optycznych (absorpcja promieniowania laserowego), granulometrycznych (kształt cząstek proszku, względny udział wagowy i objętościowy poszczególnej frakcji w całej partii proszku, rozmiar cząstek), fizycznych, chemicznych, reologicznych i metalurgicznych. Podstawowe charakterystyki proszków, mające wpływ na jakość wytworzonego produktu, które definiują to:

- **Kształt cząstek powinien być kulisty a co najmniej globularny.**
- **Średnice największych cząstek proszku nie powinny przekraczać grubości nanoszonej warstwy (zazwyczaj 50 μm).**
- Niezależnie od składu chemicznego materiału jego postać proszkowa i jego gęstość nasypowa nie powinny zmniejszać zdolności do absorpcji proszku [8].
- **Skład chemiczny materiałów powinien nie tylko spełniać normy dla danego materiału, ale skład ten powinien być utrzymywany w górnych lub dolnych (dla elementów z maksymalnymi wartościami) granicach dopuszczalnej zawartości poszczególnych składników stopowych. Powinien również uwzględniać ubytek pierwiastków stopowych o niskiej temperaturze wrzenia [8].**
- W przypadku projektowania materiałów o modyfikowanym w procesie SLM składzie chemicznym, przygotowanie mieszanin proszków dwóch lub więcej materiałów (np. Ti + Re, In718 + Re) wymaga zapewnienia braku segregacji cząstek. Można to zapewnić poprzez odpowiednie przygotowanie mieszaniny [4, 6, 7].

II. Czynniki technologiczne

Proces laserowej mikrometalurgii proszków jest procesem złożonym, na którego przebieg wpływa wiele czynników, które decydują o wykorzystaniu danego materiału oraz możliwości wytworzenia gotowego wyrobu. Czynniki technologiczne procesu SLM zostały podzielone następująco:

- Technologiczność cząstek proszku.

Odpowiednia wielkość, kształt i sytkość cząstek proszku mają ogromny wpływ na parametry procesu wytwarzania dające pozytywne rezultaty przetapiania, czyli minimalizację w budowanych detalach niepożądaną porowatość [2, 3]. W miarę zmniejszania się wielkości cząstek proszku, zwiększa się jego zdolność do przetopienia. Również rozkład wielkości proszku, zarówno lokalny jak i globalny, ma duże znaczenie. Lokalny rozkład wielkości cząstek

proszku wpływa na stopień zagęszczenia proszku, ponieważ mniejsze cząsteczki wypełniają puste przestrzenie pomiędzy cząstkami większymi. Globalny rozkład wielkości cząstek (różnice pomiędzy proszkiem znajdującym się w różnych rejonach komory roboczej) wpływa niekorzystnie na proces przetapiania, ponieważ może powodować różnice w szybkości chłodzenia obiektu i nierównomierny skurcz materiału. Rozkład kształtu proszku również ma duże znaczenie w jego podatności na przetwarzanie. Regularny, kulisty kształt korzystnie wpływa na płynięcie proszku podczas nakładania warstwy.

- Źródło promieniowania – laser.

SLM jest procesem charakteryzującym się skłonnością do niestabilności, co spowodowane jest:

- występowaniem plazmy podczas przetapiania,
- długookresową niestabilnością samego lasera (uzyskana jakość wiązki M^2 w zakresie 2,82 – 4,38),
- niejednorodnością wielkości cząstek proszków (zakres wielkości cząstek proszków w zakresie 10-90 μ m),
- zanieczyszczeniami proszku (odpryski, zbrylenia, pułapkowany tlen),
- niejednorodnością podłoża (struktur wspierających tzw. supportu),
- wysoką dynamiką oddziaływań zjawisk cieplnych (gradienty temperatur wynoszące lokalnie powyżej 1000°C w czasie poniżej 1s).

Przejawia się to niejednorodną chropowatością powierzchni lub porowatością przetwarzanych materiałów. Ponadto dynamika procesu utrudnia rejestrowanie zmian warunków procesu bez wykorzystania specjalizowanych rozwiązań.

- Rodzaj zastosowanego gazu osłonowego.

W celu wykluczenia obecności tlenu podczas procesu SLM w komorze utrzymywana jest atmosfera ochronna, którą najczęściej stanowi argon, rzadziej hel lub azot [1]. Reaktywność metalu topionego w stosunku do atmosfery, jak i tworzenie chmury plazmy muszą być kontrolowane przez zastosowanie odpowiedniej strategii stosowania gazów osłonowych. Środowisko w komorze roboczej powinno charakteryzować się odpowiednio dobranym dla rodzaju materiału:

- składem atmosfery ochronnej: gaz powinien być inertny w stosunku do wysokich temperatur i składu chemicznego topionego metalu,
- potencjałem jonizacyjnym: wysoki potencjał składników gazu pozwala zredukować ilość plazmy,
- przepływem: energia kinetyczna strumienia gazu powinna być wystarczająco wysoka aby odchylić chmurę ze ścieżki wiązki, zapewnić osłonę podawanego proszku,
- dystrybucją: obszar wokół topionego materiału musi być osłonięty od atmosfery otoczenia lub komora procesowa musi być wypełniona gazem o wysokiej czystości.

Analiza wpływu zastosowanych w procesie SLM atmosfer helu i argonu wykazała ich skuteczne działanie ochronne podczas realizacji procesu SLM. Argon jest bardziej preferowany niż hel, ze względu na jego gęstość większą od powietrza (co ułatwia wypchnięcie powietrza z obszaru topienia) oraz niską cenę.

Stosowanie gazów reaktywnych, takich jak azot, powoduje ich absorpcję i rozpuszczenie w ciekłym metalu, a w konsekwencji silny wpływ (w stopniu zależnym od rodzaju topionego metalu) na przemiany fazowe podczas krzepnięcia, mikrostrukturę i w efekcie właściwości wytworzonego materiału.

Podobnie działa tlen, ale ze względu na jego silniejsze powinowactwo chemiczne do metali, jego obecność w komorze roboczej może doprowadzić do powstania płomienia, zwłaszcza w przypadku takich metali jak: tytan, magnez i aluminium. Stąd konieczne jest prowadzenie systematycznej kontroli zawartości tlenu w komorze podczas realizacji procesu topienia.

Czynniki te raz dobrane, nie powinny być zmieniane dla tego samego gatunku materiału podczas całego cyklu technologicznego.

III. Czynniki procesowe

Czynniki procesowe należą do grupy najważniejszych czynników w procesie SLM. W zależności od materiału dobrany został zestaw podstawowych pięciu parametrów zmiennych w taki sposób, aby zachować ciągłość przetopionej ciekłej strugi metalu oraz uzyskać produkt finalny o wysokiej gęstości względnej (maksymalnym przetopieniu). Ich konfiguracja ma decydujący wpływ na jakość końcowego produktu począwszy od parametrów geometrycznych po materiałowe. Są to parametry bezpośrednio odpowiedzialne za jakość gotowego produktu i wydajność procesu SLM. Zestaw zmiennych parametrów procesu SLM obejmował [1]:

- moc lasera - P_{laser} [W],
- czas naświetlania punktu - t_{expo} [μs],
- odległość pomiędzy punktami skanowania - P_{dist} [μm],
- odległość pomiędzy liniami skanowania - L_{dist} [μm],
- grubość warstwy - L_T [μm].

Na podstawie pięciu zmiennych parametrów procesowych, wymienionych powyżej, wyznaczono również parametry wynikowe [1]:

- prędkość skanowania: V_S [mm/s],
- prędkość budowy bez uwzględnienia czasu nakładania warstwy V_P , [mm^3/min],
- całkowitą prędkość budowy (produktywność) V_{CP} , [mm^3/min],
- liniową gęstość energii E_L , [J/mm],
- powierzchniową gęstość energii E_A , [J/ mm^2],
- objętościową gęstość energii E_V , [J/ mm^3].

Optymalizacja parametrów procesowych, polegała na realizacji następujących kroków:

1. Wytwarzanie próbek liniowych, tj. ściągów, na podstawie których dobrałem parametry zapewniające ciągłość strugi przetopionego metalu.
2. Wytwarzanie próbek płaskich, tj. cienkich ścianek, na podstawie których, z parametrów z 1 kroku, wybrałem te za pomocą których wytworzyłem pełną wysokość ścianki, bez wad (typu: rozwarstwienia, wysoka chropowatość $>Ra=50$, nieciągłości lub wady kropelkowania).

3. Wytwarzanie próbek prostopadłościennych, tj. sześciątów, na podstawie których dobrałem parametry zapewniające największą wartość przetopienia (>99%). Dążyłem w optymalizacji parametrów do osiągnięcia pełnej gęstości przetopienia materiału.

Na tej podstawie, dla pięciu gatunków stopów, opracowałem zestawy parametrów procesu SLM, zapewniające otrzymanie gęstości względnej powyżej 99,9% przy możliwie najkrótszym czasie wytwarzania. (Tabela 2).

Tabela 2. Opracowane parametry wytwarzania zapewniające gęstość względną materiału powyżej 99,9%, przy możliwie najkrótszym czasie wytwarzania

Material	Moc lasera P_{laser} [W]	Grubość warstwy L_T [μm]	Odległość pomiędzy punktami skanowania P_{dist} [μm]	Odległość pomiędzy liniami skanowania L_{dist} [μm]	Czas naświetlania punktu t_{expo} [μs]
Stal 316L	200	50	80	100	360
Stal H13	200	50	80	180	800
Inconel 718	100	50	60	160	700
Ti6Al4V Ti6Al7Nb	200	50	20	210	60

Material	Prędkość skanowania V_s [mm/s]	Liniowa gęstość energii E_L , [J/mm]	Powierzchniowa gęstość energii E_A , [J/mm ²]	Objętościowa gęstość energii E_V , [J/mm ³]
Stal 316L	222,22	0,90	9,00	180,00
Stal H13	100,00	2,00	11,11	222,22
Inconel 718	85,71	1,17	7,29	145,83
Ti6Al4V Ti6Al7Nb	333,33	0,60	2,86	57,14

IV. Czynniki konstrukcyjne

Aby móc w pełni wykorzystać możliwości technologii SLM należy znać jej ograniczenia i możliwości technologiczne. W tym celu przeprowadziłem badania na dwóch urządzeniach SLM dla dwóch gatunków stopów (Ti6Al7Nb oraz stali 316L). W wyniku analiz wyznaczyłem wartości cech geometrycznych decydujące o poprawnej budowie:

- grubość ścianki możliwa do wybudowania (0,2 mm dla SLM250 i 0,15 mm dla SLM50),
- szerokość szczeliny, którą można wytworzyć pomiędzy dwoma elementami (0,4 mm dla SLM250 i SLM50),
- kąt nachylenia nawisu geometrycznego, który nie wymaga podparcia strukturami wspierającymi (70° dla SLM250 i 65° dla SLM50),
- minimalna średnica otworu możliwa do wytworzenia (\varnothing 0,75mm dla SLM250 i \varnothing 0,5mm dla SLM50).

Opracowałem również 18 zaleceń do projektowania dla technologii SLM, które zamieściłem w monografii [1].

V. Czynniki jakościowe

W związku ze złożonością procesu SLM, zarówno od strony materiałowej, jak i technologicznej ważne jest zwrócenie uwagi na efekt końcowy jakim jest wytworzona część w procesie przyrostowym (próbka do badań, demonstrator, gotowa część). Efekt końcowy powinien być scharakteryzowany mierzalnymi czynnikami, które w jednoznaczny sposób zdeterminują przydatność i możliwość zastosowania tej technologii w wybranych gałęziach przemysłu. Najbardziej istotnymi czynnikami określającymi jakość części wytworzonej w procesie SLM są:

- Przetopienie materiału – wynikowa porowatość (gęstość względna).

Porowatość, w przypadku elementów wytwarzanych technologiami przyrostowymi, może występować w całej ich objętości lub lokalnie. Kształt występujących porów jest powiązany z parametrami procesu oraz strategią skanowania; może występować porowatość otwarta lub zamknięta. Porowatość elementów wykonanych w procesie SLM ma bardzo duży wpływ na właściwości mechaniczne produktu. **Jako dopuszczalną przyjąłem porowatość mniejszą niż 0,1%. Oznaczało to osiągnięcie gęstości względnej wytworzonej części większej niż 99,9%.**

Poza odpowiednim doбором parametrów, które bezpośrednio wpływają na przetopienie, w pracy [2] stwierdzam, że wprowadzenie warstwy pośredniej oraz odpowiednia geometria struktur wspierających i ich rozmieszczenie istotnie wpływa na powstawanie porów kolumnowych.

- Poziom naprężeń szczątkowych (naprężenia własne).

Jedną z charakterystycznych cech technologii SLM jest powstawanie, podczas szybkiego krzepnięcia cienkich warstw stopionego metalu, wysokiego gradientu temperatury, odkształceń cieplnych i w konsekwencji naprężeń własnych [3]. Głównymi czynnikami fizycznymi odpowiedzialnymi za ich powstawanie, które definiuję w pracy [3], są:

- Wysoki gradient temperatury spowodowany lokalnym nagrzewaniem i chłodzeniem przez przemieszczające się źródło energii.
- Rozszerzalność cieplna i skurcz materiału wskutek cyklicznego nagrzewania i chłodzenia oraz nierównomierny rozkład odkształceń plastycznych, zachowanie równowagi naprężenie-odkształcenie, zwłaszcza podczas ciągłego topienia.
- Przemiany fazowe, np. przemiana martenzytyczna, w przypadku takich materiałów jak stal H13 oraz stopy tytanu Ti6Al4V i Ti6Al7Nb.

Skuteczne sposoby redukcji naprężeń własnych, które omówiłem w pracy [1], to:

- Podwójne skanowanie laserem każdej warstwy.
- Skanowanie krótkimi wektorami małych pól (strategia typu szachownica).
- Podgrzewanie platformy roboczej.
- Stosowanie struktur wspierających.

- Wyżarzanie odprężające wytworzonych elementów w procesie SLM z platformą lub po odcięciu wytworzonej części od platformy.

Z uwagi na charakter procesu SLM znaczne naprężenia własne są czynnikiem, który zawsze będzie obecny w wytwarzanych elementach w stanie surowym (tj. bezpośrednio po procesie).

- Jakość powierzchni (chropowatość).

Powierzchnia obiektów wytworzonych w technologii SLM cechuje się stosunkowo wysoką chropowatością, co wynika z postaci materiału wsadowego – proszku. Jej wartość zawiera się w przedziale 5-50 μ m (skorelowana jest z granulacją użytego proszku). Niezależnie od rodzaju materiału najlepszą jakość powierzchni otrzymano w płaszczyźnie przetapiania części. Związane jest to z tym, że laser ostatnią warstwę przetapia dwukrotnie niwelując wszelkie przytwierdzone cząstki proszku oraz nierówności. Natomiast powierzchnie boczne, dolne oraz pochylone charakteryzują się znaczną ilością przytwierdzonych, nieprzetopionych cząstek proszku, co obniża ich jakość i podnosi wartość parametru chropowatości.

- Dokładność wymiarowo-kształtowa.

Dokładność wymiarowo-kształtowa w technologiach SLM jest istotna z punktu widzenia ostatecznej wersji produktu, który ma być wytworzony. Z racji tego, że technologia SLM daje możliwość wytwarzania skomplikowanych geometrii, niejednokrotnie tzw. trudnych lub niemożliwych do wytworzenia przy zastosowaniu technologii klasycznych, istotne jest jak dokładnie można odwzorować zaprojektowany model CAD. Jak stwierdzam w pracy [1], w zależności od geometrii i użytego materiału odchyłka ta mieści się w zakresie 0,15-0,5mm.

- Mikrostruktura.

Mikrostruktura elementów wytworzonych technologią SLM ma złożoną budowę o cechach zależnych od rodzaju materiału i zastosowanych parametrów wytworzenia. Na mikrostrukturę zakrzepniętego materiału decydujący wpływ mają: gradient temperatury, szybkość krzepnięcia i przechłodzenie. Ponieważ podczas procesu SLM bardzo małe objętości proszku są topione wiązką przy wysokiej gęstości energii, krzepnięcie ciekłego metalu przebiega przy prędkościach chłodzenia rzędu 10⁵-10⁸K/s oraz kierunkowo odprowadzanym ciepłem. Kierunek odprowadzania ciepła, prostopadły do zakrzepniętej już dolnej warstwy, jest odchylany przez przemieszczającą się wiązkę lasera. Skutkiem takich warunków krzepnięcia jest silnie drobnoziarnista mikrostruktura, zbudowana z kolumnowych ziaren rozciągających się przez od kilku do kilkudziesięciu warstw, jak pokazałem w pracach [3, 5] dla nadstopu niklu, stopu tytanu oraz stali. Ponadto stwierdzam, że ziarna kolumnowe zbudowane są z subziaren oddzielonych granicami małego kąta (< 15°). Subziarna natomiast stanowią pakiety (kolonie) komórko-dendrytów zdeorientowane względem siebie o kąt < 5° [1, 3].

- Właściwości mechaniczne.

W pracach [1, 3, 5, 7] wykazałem, że właściwości mechaniczne próbek wytwarzanych w technologii SLM są porównywalne z właściwościami próbek wytwarzanych przy

zastosowaniu technologii konwencjonalnych, a niejednokrotnie znacznie je przewyższają. Jest to zrozumiałe ponieważ bardzo szybkie chłodzenie wpływa na znaczne rozdrobnienie ziaren i tym samym podwyższa granicę plastyczności materiału kosztem wydłużenia. **Charakterystyczna jest anizotropia mikrostruktury i właściwości zależne od strategii skanowania i kierunku narastania warstw. Najniższe właściwości mechaniczne obserwowane dla próbek w kierunku osi Z, dodatkowo osłabiane płaskimi defektami budowy niekorzystnie zorientowanymi względem kierunku rozciągania. Potwierdziłem tym samym, że próbki do próby rozciągania (zarówno płaskie jak i okrągłe) powinny być wytwarzane kontrolnie w kilku wariantach orientacji ich długich osi względem kierunku wytwarzania [5].**

- Oś próbki pozioma względem płaszczyzny XY i równoległa do osi Y.
- Oś próbki pionowa (normalna) względem płaszczyzny XY.
- Oś próbki pod kątem 45° względem płaszczyzny XY, oraz równoległa do osi Y.
- Oś próbki pod kątem 45° względem płaszczyzny XY, oraz pod kątem 45° względem osi Y.

Właściwości mechaniczne elementów wytworzonych w technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii (SLM) są silnie zależne od parametrów procesu wytwarzania, które determinują morfologię, skład fazowy, mikrostrukturę oraz powstawanie wad. Oznacza to, że również mają wpływ na dobór parametrów obróbki cieplnej, przynajmniej odprężania, zalecanej przez normy dla poszczególnych gatunków materiałów.

4.3.3. Wnioski

Zrealizowane badania pozwoliły uzyskać następujące osiągnięcia główne:

- Opracowanie czynnikowej metody projektowania i implementacji laserowej technologii mikrometalurgii proszków (SLM) wytwarzania części z nowych lub już stosowanych materiałów. Istotą metody jest uwzględnienie doboru parametrów technologicznych, konstrukcyjnych i materiałowych silnie oddziałujących na jakość gotowego wyrobu (demonstratora).
- Opracowanie czynników ryzyka, związanych z wykorzystywaną technologią, obejmujących wpływ przetwarzanego materiału i geometrii demonstratora technologii.
- Przeprowadzenie optymalizacji parametrów procesu wytwarzania części w technologiach przyrostowych (SLM), które pozwolą na osiągnięcie zadowalających właściwości materiałowych (m.in. wytwarzanie elementów pozbawionych porów, pęknięć, rozwarstwień) oraz właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych (dla detali trudnoobrabialnych mechanicznie).

Wnioskami poznawczymi są:

- Zaproponowana metoda pozwala na opracowanie nowych, niestandardowych, niemożliwych do wytworzenia technologiami konwencjonalnymi części, zespołów, narzędzi lub przyrządów.

- Efektywność metody polega na zdecydowanym skróceniu czasu wdrożenia nowych części lub całych elementów do produkcji.
- Metoda oferuje możliwości wytwórcze gwarantujące wysoką elastyczność oraz znaczące obniżenie kosztów wytwarzania.
- Metoda odpowiada na zapotrzebowanie przemysłu na wprowadzenie innowacji w zakresie procesów i wyrobów stymulujących wzrost konkurencyjności.

Wnioskami szczegółowymi (użytecznymi) są:

- Elementy wytwarzane technologią SLM charakteryzuje drobnoziarnista mikrostruktura o krystalograficznej i geometrycznej teksturze.
- Właściwości mechaniczne materiałów wytwarzanych w technologii SLM są porównywalne (+/-10%) z właściwościami materiałów wytwarzanych w technologiach konwencjonalnych, a niejednokrotnie znacznie je przewyższają.
- Dla elementów wytwarzanych w technologii SLM charakterystyczna jest anizotropia mikrostruktury i właściwości zależne od strategii skanowania i kierunku narastania warstw.
- Porowatość jest fundamentalną cechą determinującą przenoszenie obciążeń (zwłaszcza zmęczeniowych) przez elementy wytwarzane technologią SLM. Proponowana graniczna wartość to 0,1%.
- Możliwe jest wytworzenie w technologii SLM litego materiału o strukturze typu kompozytowego bezpośrednio z mieszaniny sferycznych proszków np. tytanu i renu o porowatości poniżej 1%.
- Zagrożeniem podczas procesu SLM jest niewłaściwie dobrana struktura wspierająca, która powinna przenieść naprężenia własne osiągające poziom nawet 80% R_{0,2}.
- Atmosfera ochronna, w której odbywa się proces ma znaczny wpływ na jego przebieg i ostateczną jakość wytworzonej struktury.
- Powierzchnią o najmniejszej chropowatości (Ra8μm) jest powierzchnia otrzymywana w płaszczyźnie przetapiania modelu.
- Technologia SLM daje możliwość oszczędności poprzez ponowne wykorzystanie nieprzetworzonego proszku materiału.

4.3.4. Wykorzystanie

Selektywna laserowa mikrometalurgia proszków, jest technologią umożliwiającą przetwarzanie proszków metali w sposób nieporównywalny do technologii konwencjonalnych. Technologia ta wymaga odmiennego podejścia zarówno do wykorzystania finalnych właściwości przetwarzanego metalu, jak i do procesu projektowania elementów w celu optymalnego wykorzystania jej możliwości. Zidentyfikowanie czynników procesu SLM, które mają największy wpływ na rezultaty przetwarzania materiału jest kluczowe dla świadomego wykorzystania tej technologii w zadaniach aplikacyjnych.

Przewiduje się, że trzy gałęzie przemysłu związane z lotnictwem, produkcją wyrobów medycznych oraz towarów konsumpcyjnych, dokonają znacznych postępów we wdrażaniu

zaawansowanych praktyk produkcyjnych z wykorzystaniem technologii AM. Najbardziej perspektywiczną branżą jest przemysł lotniczy, gdzie powszechnie wykorzystywane technologie wytwórcze, charakteryzują się bardzo dużymi odpadami materiału, które mogą sięgać nawet 97%. Tak duże straty wynikają ze znacznego skomplikowania geometrii wytwarzanych części, co w połączeniu z wysoką ceną wykorzystywanych materiałów negatywnie wpływa na koszty wytwórcze. Konkurencyjne w tym przypadku okazują się technologie przyrostowe, które pozwalają ograniczyć współczynnik *buy-to-fly* do 5% odpadu, co w tym przypadku okazuje się czynnikiem bardzo korzystnym. Wykorzystanie technologii przyrostowej zwiększa również możliwość kształtowania geometrii wyrobów, pozwalając na większą swobodę niż w przypadku tradycyjnych metod wytwórczych. Większa swoboda w kształtowaniu geometrii pozwala na zmniejszenie masy elementów bez obniżania właściwości wytrzymałościowych, co w przypadku przemysłu lotniczego lub kosmicznego jest niesłychanie istotne.

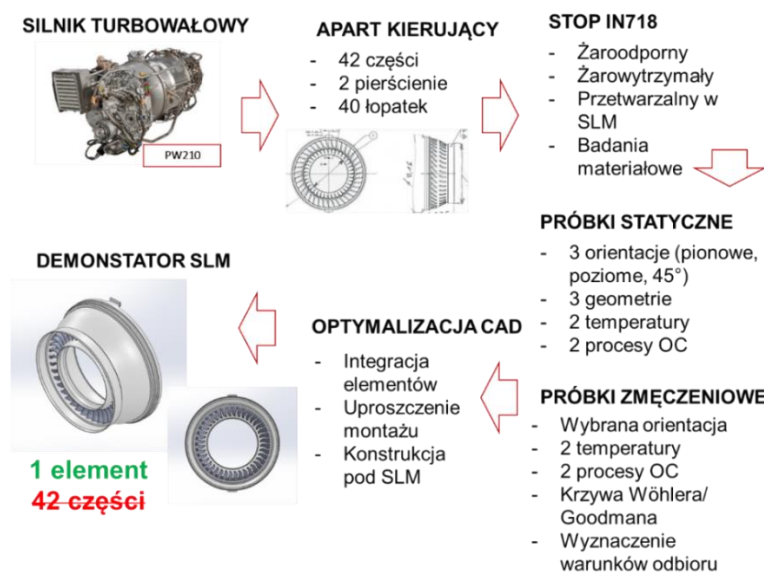
Firma doradcza KPMG, we współpracy z habilitantem, na zlecenie Politechniki Wrocławskiej (w ramach projektu *RenMaTech - PBS1/A5/12/2012*) opracowała raport pt.: „*Analizy potrzeb i potencjału innowacyjnego, potencjału rynkowego i studium komercjalizacji*”, który dla technologii SLM wskazuje, że w Polsce największy potencjał aplikacyjny posiada poza medycznym (stopy tytanu) i lotniczym (stopy niklu), przemysł energetyczny (nowe materiały modyfikowane renem) oraz wydobywczy (nowe materiały modyfikowane renem) [4]. Analiza rynku wskazała również, że istnieje znaczące zapotrzebowanie firm z wyżej wymienionych gałęzi przemysłu na potencjalne efekty przedstawionych prac. Szczególnie interesującymi podmiotami z uwagi na nawiązaną przez habilitanta współpracę wydają się być m.in. następujące jednostki: Hamilton Sundstrand, Pratt & Whitney Kalisz, Pratt & Whitney Rzeszów, PZL Mielec (Lockheed Martin Helicopter Company), czy UTC Aerospace Systems. Wiele z tych podmiotów jest już zaznajomiona z korzyściami jakie niesie wdrożenie do systemów produkcyjnych procesów przyrostowych, a na świecie istnieją już funkcjonujące parki maszynowe, wytwarzające z powodzeniem elementy samolotów właśnie w technologiach przyrostowych (np. silnik LEAP – General Electric, który jest pierwszym seryjnie produkowanym silnikiem, zawierającym certyfikowane elementy metalowe wytworzone z wykorzystaniem technologii przyrostowej. Silnik ten, ze względu na oszczędność materiału wynikającą z optymalizacji topologicznej, pozwala na oszczędność paliwa sięgającą nawet 15%).

Z uwagi na specyfikę technologii SLM, wszystkie możliwe jej zastosowania wiążą się z produkcją części, które muszą się charakteryzować dostosowaniem do eksploatacji w zdefiniowanych warunkach termicznych, mechanicznych i korozyjnych. W stosunku do takich części zazwyczaj wymagane jest przeprowadzenie gruntownych testów lub, jak np. w branży lotniczej, przejście przez proces certyfikacyjny potwierdzający właściwości wytwarzanych podzespołów. Zaproponowana przez habilitanta metoda odpowiada na te zapotrzebowania.

Testy gotowych wyrobów odbywają się zazwyczaj we współpracy z przedsiębiorstwami branżowymi, dlatego też kluczowym dla powodzenia aplikacyjności technologii SLM jest pozyskanie partnera branżowego, który umożliwi dokładne przetestowanie stworzonych

podzespołów w środowisku przemysłowym i będzie gotów podjąć współpracę nad dalszymi krokami rozwoju produktu. Tak dzieje się w przypadku przedstawionych przez habilitanta pracach, gdzie wytwarzane elementy czy demonstratory są walidowane przez partnerów przemysłowych z którymi współpracuje (m.in. PZL Mielec - Lockheed Martin Helicopter Company, Pratt&Whitney Kalisz, Pratt&Whitney Rzeszów).

Przykładem wykorzystania zrealizowanych prac (w tym opracowanej metody czynnikowej), jest aktualny projekt koordynowany przez habilitanta, gdzie celem jest wdrożenie do praktyki przemysłowej możliwości wytwórczych technologii SLM dla wytwarzania elementów cienkościennych dla firmy z branży lotniczej (INNSLOT - „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania złożonych geometrycznie, cienkościennych komponentów silników lotniczych ze stopów na bazie niklu” - TECHMATSTRATEGI/347514/7/NCBR/2017 (lata realizacji 2018 - 2020)).



Rys. 5. Schemat przedstawiający plan wykonania demonstratora w technologii SLM według autorskiej metody.

Zakres realizowanych prac ma na celu skrócenie czasu wytwarzania aparatu kierującego 2-krotnie, przy redukcji liczby elementów z 42 do 1.

4.3.5. Podsumowanie

Prace zrealizowane i przedstawione w dorobku, dotyczą aktualnej problematyki badawczej podejmowanej przez ośrodki naukowe na całym świecie. W związku z krótkim czasem rozwoju opisywanych technologii i bardzo dużą liczbą czynników wpływających na proces, technologia SLM na chwilę obecną nie jest w pełni poznany procesem wytwórczym. Poruszone zagadnienia naukowo-badawcze miały na celu poszerzenie wiedzy o procesie wytwarzania techniką przyrostową poprzez analizę wpływu zastosowanego materiału, parametrów procesu, geometrii i gabarytów obiektu, aż do uzyskania wyrobu gotowego w postaci demonstratora technologii. **Uzyskane osiągnięcia pozwalają na zwiększenie wiedzy związanej z selektywną laserową mikrometalurgią proszków (SLM), dając wymierny efekt w postaci opracowanej metody, procedur, rozwiązań technicznych oraz wyników szczegółowych.**

Reasumując przedstawiona w monografii **czynnikowa metoda projektowania i implementacji technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (SLM) stanowi moje główne osiągnięcie naukowe.**

Metoda ta dotyczy wytwarzania części z nowych lub już stosowanych materiałów, przy uwzględnieniu kompromisowego doboru parametrów technologicznych, konstrukcyjnych i materiałowych silnie oddziałujących na jakość gotowego wyrobu i obejmuje materiał, technologię, proces, konstrukcję oraz jakość wyrobu gotowego (w tym właściwości mechaniczne). **Porządkuje także działania związane z badaniem rozwoju materiałów i technologii przyrostowych**, szczególnie SLM ze względu na jakość otrzymywanych rezultatów, jakim są demonstratory produktowe.

Jak stwierdziłem w pierwszych rozdziałach monografii, a szczególnie definiując cel badawczy, **bez zastosowania czynnikowej metody, uzyskanych wyników badań nie można rzetelnie odnieść do już istniejących opracowań** czy też porównać z wynikami badań produktów otrzymywanych przy zastosowaniu technologii konwencjonalnych. **Według mnie, zaproponowana metoda, jest pierwszą, która traktuje zagadnienie globalnie.** Biorę w niej pod uwagę wszystkie etapy kompletnego procesu wytwarzania przyrostowego, poczynając od idei, poprzez model 3D i jego optymalizację topologiczną (wytyczne dla konstruktora, które zdefiniowałem) a także projekt dla wytwarzania przyrostowego, przez wybór materiału i jego charakterystykę, optymalizację parametrów procesu i środowiska w jakim jest prowadzony, po szczegółową analizę efektu końcowego (badania właściwości mechanicznych, dokładności wymiarowej, eksploatacyjne i specjalne) na badaniach możliwości recyklingu kończą.

Jako swój istotny wkład w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn uważam:

- **Usystematyzowanie wiedzy w zakresie prowadzenia badań nad technologią SLM poprzez przyporządkowanie poszczególnych cech, parametrów, wielkości w 5 grupach czynnikowych w opracowanej metodzie.**
- **Opracowanie 18 zaleceń dla konstruktorów do projektowania części przeznaczonych do wytworzenia w technologii SLM, które zamieściłem w monografii w rozdziale 9.4**
- **Zidentyfikowanie zagrożeń powstających podczas procesu SLM ze wskazaniem, że największym zagrożeniem jest niewłaściwe dobranie konstrukcji struktur wspierających, co może doprowadzić do porowatości, niewłaściwego transferu ciepła, braku przeciwdziałania naprężeniom wewnętrznym oraz niewłaściwej pozycji elementu na platformie (oderwanie się modelu), co może prowadzić do zatrzymania procesu.**
- **Zidentyfikowanie istotnych czynników na podstawie których można ocenić jakość efektu końcowego procesu SLM jakim jest wytworzona część. Są to: przetopienie materiału, poziom naprężeń wewnętrznych, jakość powierzchni, dokładność wymiarowo-kształtowa, właściwości mechaniczne.**
- **Opracowanie zestawu parametrów procesu SLM dla pięciu gatunków stopów, zapewniających otrzymanie gęstości względnej powyżej 99,9% przy możliwie najkrótszym czasie wytwarzania (Tabela 2).**

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, organizacyjnych i dydaktycznych

5.1. Wstęp i ogólny opis pozostałej działalności habilitanta

Od początku mojej pracy na Politechnice Wrocławskiej (na początku jako doktorant, później już jako pracownik – szczegółowy opis działalności w pkt. 5.2 i 5.3 Autoreferatu) angażuję się w naukowe i organizacyjne życie uczelniane oraz pozauczelniane. W ramach Katedry K3 (Centrum Zaawansowanych Systemów Produkcyjnych – CAMT) od 2011 roku **prowadzę (kierownik) pracownię mikrometalurgii laserowej i elektronowej oraz badań materiałowych i wytrzymałościowych** a także **12-to osobowy zespół badawczy**. Oprócz technologii laserowej która jest przedmiotem dorobku naukowego, zajmuję się również technologią Electron Beam Melting (EBM), dla której wyniki prac wielokrotnie również opublikowałem (Załącznik 4, pkt. II.A. publikacja 1, pkt. II.E. publikacje 14, 15, 16). W ramach pracowni realizuję również wiele prac z zakresu badań materiałowych, analiz wytrzymałościowych, ekspertyz naukowych. Byłem współautorem 102 tego typu prac (Załącznik 4, pkt. III.F.). Z racji realizacji tych badań dla firm przemysłowych nie wszystkie są raportowane do repozytorium Biblioteki PWr (w sumie wykonanych zostało ok. 400 prac). Moje zainteresowania naukowe obejmują również inżynierię odwrotną a szczególnie metrologiczną tomografię komputerową, za pomocą której analizuję jakość elementów wytworzonych technologiami AM technologiami AM (SLM, EBM, SLS, FDM i innymi należącymi do grupy technologii przyrostowych) (Załącznik 4, pkt. II. E, artykuły 1 i 2). W ostatnim roku zaangażowałem się również we współpracę z Instytutem Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego (umowa w trakcie podpisywania, dlatego też projekt nie widnieje na liście tych w które jestem zaangażowany), gdzie w projekcie pt.: *„Sztuka mezolityczna w Polsce: znaczenie społeczne i rytualne artefaktów w świecie ich biografii” (NCN, OPUS 15, HS3, lata realizacji 2018-2020)* realizuję prace związane z wykonaniem w technologii Rapid Tooling wiernych kopii (replik) zdobionych ornamentem przedmiotów datowanych na ok. 10 tys. lat wykonanych z kości i poroży. Prace obejmują wykonanie wiernych kopii dla 7 zabytkowych przedmiotów z wykorzystaniem odlewania próżniowego, następnie przeprowadzenie digitalizacji 3D tych przedmiotów z użyciem metody tomograficznej oraz wykonanie szczegółowej analizy ornamentyki za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Projekt ten jest możliwy do wykonania ponieważ kompetencje i wiedzę w tym zakresie zdobyłem podczas realizacji podobnego projektu pt.: *„Replika - Opracowanie metody replikacji śladów kryminalistycznych” - Nr O ROB 0019 01/ID 19/1 (lata realizacji 2012 – 2014)*, którego celem było wykonanie wiernych kopii łusek i pocisków (opis w pkt.5.3 Autoreferatu).

Angażuję się również w rozwój Katedry i Uczelni poprzez aplikowanie o projekty nie tylko badawcze (załącznik 4 pkt. II.J) ale także infrastrukturalne oraz organizacyjne służące rozwojowi naukowemu i badawczemu Uczelni. Jestem inicjatorem i autorem wniosków projektowych, których celem jest rozbudowa zaplecza naukowo – badawczego Katedry i Centrum (załącznik, 4 pkt. III.A oraz III.F). Aktualnie prowadzę m.in. infrastrukturalny

projekt **ICEMTA** o budżecie wynoszącym 21mln zł którego celem jest rozbudowa o aparaturę naukową laboratoriów CAMT, a także jestem członkiem zespołu opracowującego **strategię rozwoju Politechniki Wrocławskiej** (załącznik, 4 pkt. III.F). Od 2012 roku jestem **członkiem Rady Wydziału Mechanicznego** Politechniki Wrocławskiej oraz członkiem komisji skrutacyjnej w poprzedniej i obecnej kadencji Rady. **Jestem ekspertem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju** do oceny projektów badawczo-rozwojowych (załącznik, 4 pkt. III.O) a także przedstawicielem NCBR w funduszach inwestycyjnych BridgeAlfa (załącznik 4, pkt. III.N) i ekspertem Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego do oceny projektów B+R. **Prowadzę szeroką współpracę z przemysłem** realizując zarówno projekty przemysłowe jak i ekspertyzy oraz usługi badawcze (załącznik 4 III.F oraz III.M). Rozwijam swoje kompetencje poprzez szkolenia i staże zagraniczne (załącznik 4 III.L) m.in. na **Stanford University** oraz w **IBM Watson Research Center**. Biorę również czynny udział w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych i międzynarodowych (załącznik 4 III.C).

5.2. Działalność naukowo-badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora

Działalność swoją opisuję w kontekście realizowanych projektów naukowo-badawczych.

Jestem absolwentem kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej z 2005 roku. W latach 2004 – 2005 pracowałem również jako konstruktor w Dziale Rozwoju Produktu w firmie Whirlpool, gdzie miałem praktyczną styczność z technologiami przyrostowymi oraz szybkim prototypowaniem (technologią Selective Laser Sintering - SLS). Po obronie pracy magisterskiej rozpocząłem studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej pod opieką prof. dr. hab. inż. Edwarda Chlebusa. Swoje zainteresowania ukierunkowałem, ze względu na zdobyte doświadczenie przemysłowe, na technologie przyrostowe które intensywnie były rozwijane w zespole profesora Edwarda Chlebusa w Centrum Zaawansowanych Systemów Produkcyjnych. W związku z tym zostałem zaangażowany w bieżące prace laboratorium, które silnie współpracowało z przemysłem realizując szereg prac polegających na wytwarzaniu prototypów, serii prototypowych i przedprodukcyjnych. Od samego początku również uczestniczyłem w międzynarodowych projektach badawczych i edukacyjnych. Byłem wykonawcą 3 projektów finansowanych z 6 programu ramowego:

- **Custom-Fit „Rapid Manufacturing of Custom-Fit products – interacting with the body to enhance the well-being of citizens – by integration of ICT and multifunctional materials”.**
- **Eurotooling 21 „SMEIP to prepare the European tooling industry for the 21st century”.**
- **Hipermoulding „Extreme Cycle Time Reduction of Injection Moulding Processes by using High Performance Injection Moulds and Moulding Processes”.**

Uczestniczyłem również w 2 projektach edukacyjnych z programu Leonardo da Vinci:

- **VETMAN „Centre of Vocational and Education Training for Manufacturing Industry”**

gdzie opracowałem 86 stronicowy materiał szkoleniowy pt. „*Rapid Prototyping – zastosowanie systemów CAD*” (wersja PL i EN)

- **MINOS** „Europäischen Konzeptes für die Zusatzqualifikation Mechatronik für Fachkräfte in der globalisierten industriellen Produktion”** DE/08/LLP-LdV/TOI/147110/2008-1-DE2-LEO05-00148 w ramach którego opracowałem 77 stronicowy materiał szkoleniowy dotyczący komunikacji CAD-RP, Rapid Prototyping, i zabiegów przed-procesowych RP.

W 2006 roku zostałem zaangażowany w realizację projektu infrastrukturalnego współfinansowanego w 75% ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (EFRR):

- **„Rozbudowa laboratorium CAMT o urządzenia do szybkiego wytwarzania wyrobów prototypowych”,** realizowanego w ramach projektu SPO-WKP, działanie 1.4.3. (lata realizacji 2006 – 2008)

W ramach tego projektu laboratorium CAMT nabyło technologię wytwarzania przyrostowego z proszków metalicznych Selective Laser Melting - SLM, technologię do prototypowego odlewania Metal Part Casting - MPC, technologię do wytwarzania przyrostowego z tworzyw sztucznych – PolyJet oraz skaner optyczny Atos-GOM. Moim głównym zadaniem w tym projekcie była analiza rynkowa dostępnych laserowych technologii do wytwarzania przyrostowego z proszków metalicznych (źródło promieniowania laserowego, sposób nakładania warstw, rodzaj przetwarzanych materiałów, jakość otrzymywanej geometrii). **Te prace ukierunkowały mój profil badawczy i od tego czasu swoje zainteresowania naukowe zorientowałem na technologię selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków SLM.**

Na podstawie powyższych doświadczeń złożyłem z powodzeniem wnioski do MNiSW o grant promotorski:

- **„Analiza wpływu parametrów procesu selektywnego przetapiania proszków metali na właściwości mechaniczne obiektów wytwarzanych metodą addytywną”,** N503 1170 33 (lata realizacji 2007 - 2010)

W ramach projektu, który był w całości ukierunkowany na ukończenie pracy doktorskiej, zbadałem możliwości wytwarzania złożonych struktur geometrycznych i konstrukcji hybrydowych (powłokowo-prętowych i powłokowo-wewnętrznie złożonych – profilowych – odpowiedników struktur wewnętrznych kości i tzw. „plastra miodu”) w technologii selektywnego przetapiania proszków metali laserem. Przebadałem właściwości mechaniczne wybranych struktur wykonanych tą metodą z proszków metalicznych, a także wpływ różnych parametrów procesu na właściwości mechaniczne wytwarzanych obiektów.

W latach 2007 - 2009 byłem zaangażowany jako wykonawca do realizacji projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego:

- **„Nowe materiały i technologie w inżynierii biomedycznej, w tym dla wytwarzania implantów zindywidualizowanych”** 0634/R/1/P01/07/02. (lata realizacji 2007 – 2009)

W projekcie byłem odpowiedzialny za realizację prac badawczych związanych z wytwarzaniem próbek i modeli implantów ze stopu tytanu w technologii SLM.

W 2008 roku powierzono mi przygotowanie wniosku oraz studium wykonalności do projektu infrastrukturalnego z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, 2 osi priorytetowej „Infrastruktura sfery B+R” pt.

- **„Technologie laserowe i optomechatroniczne w zastosowaniach przemysłowych i medycznych”** (lata realizacji 2009 - 2010).

Celem projektu było podniesienie konkurencyjności polskich ośrodków badawczych poprzez rozbudowę aparaturową laboratorium CAMT. W projekcie byłem odpowiedzialny za opracowanie koncepcji wniosku, jego przygotowanie oraz weryfikację formalną a także finansową. Projekt uzyskał finansowanie w kwocie 16 530 006,00 zł. Po jego uzyskaniu byłem odpowiedzialny za rozliczenia finansowe, postępowania przetargowe oraz realizację wskaźników projektu.

W tym samym roku (2008r.) byłem również głównym autorem wniosku badawczego do Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego:

- **„RM - Technologie szybkiego wytwarzania (Rapid Manufacturing-RM) w produkcji krótkich serii wyrobów indywidualizowanych”** N R07 0015 06 (lata realizacji 2009 – 2012).

Po jego pozytywnej ocenie i uzyskaniu finansowania w kwocie 3 499 600,00 zł została mi powierzona rola koordynatora projektu. Byłem odpowiedzialny za realizację prac badawczych związanych z technologią SLM.

Rok później (2009r.) byłem inicjatorem i głównym pomysłodawcą projektu badawczego:

- **„LasTech - Technologie laserowego wytwarzania przestrzennych i powłokowych struktur funkcjonalnych”**, POIG.01.03.01-02-160/09, (lata realizacji 2009 – 2012),

Projekt uzyskał finansowanie w kwocie 3 996 000,00 zł a jego głównym celem była determinacja i optymalizacja istotnych parametrów procesów laserowej mikrometalurgii proszków stosowanych do wytwarzania struktur przestrzennych i powierzchniowych. W projekcie byłem odpowiedzialny za koordynację prac badawczych, opracowanie planu badawczego, wytwarzanie próbek w technologii SLM oraz sporządzanie raportów.

Byłem również wykonawcą projektu badawczego z zakresu bezpieczeństwa i obronności państwa w ramach 8 konkursu:

- **„Projekt, badania i wykonanie demonstratora Zintegrowanego Systemu Kierowania Akcją Ratowniczą z wykorzystaniem technologii Rapid Manufacturing”** O R00 0035 08 (lata realizacji 2009 - 2011)

Jako doktorant uczestniczyłem również w programowych konkursach dedykowanych rozwojowi młodej kadry naukowej organizowanych przez Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego, Politechnikę Wrocławską oraz Miasto Wrocław które to starania zaowocowały:

- **Stypendium naukowym** samorządu Wrocławia dla najlepszych doktorantów miasta Wrocław (2009 - 2010).
- **Dwukrotnie stypendium naukowym** w ramach konkursu ROZWÓJ POTENCJAŁU DYDAKTYCZNO-NAUKOWEGO MŁODEJ KADRY AKADEMICKIEJ POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ za projekt: „Identyfikacja problemów oraz zagrożeń podczas procesu selektywnej mikrometalurgii laserowej proszków metali”. Finansowane z POKL, Poddziałanie 4.1.1: Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni (2009 -2010).
- **Dwukrotnie stypendium naukowym** z Urzędu Marszałkowskiego woj. dolnośląskiego w konkursie "GRANT – WSPARCIE PRAC BADAWCZYCH

POPRAZ STYPENDIA NAUKOWE DLA DOKTORANTÓW" za projekt „*Analiza wpływu parametrów procesu selektywnego przetapiania proszków metali na właściwości mechaniczne obiektów wytwarzanych metoda addytywną*”. Finansowanie z POKL, Priorytet VIII, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji (2008 - 2009).

- **Dwukrotnie stypendium naukowym** Prorektora ds. Nauczania Politechniki Wrocławskiej dla najlepszych doktorantów w ogólnouczelnianym konkursie finansowanym przez własny fundusz stypendialny Politechniki Wrocławskiej (2008 i 2009).

Podsumowując, moja działalność naukowo-badawcza w latach 2005 – 2011, kiedy byłem uczestnikiem studiów doktoranckich, a jednocześnie zatrudnionym do realizacji ww. projektów w różnej formie (referent techniczny, specjalista, asystent naukowy) zaowocowała:

- 1 artykułem z listy JCR,
- 4 artykułami z Listy MNiSW,
- 6 rozdziałami w książkach,
- 5 referatami konferencyjnymi,
- 2 pracami niepublikowanymi (zarejestrowanymi w bibliotece Politechniki Wrocławskiej).

Okres działalności naukowo-badawczej przed uzyskaniem stopnia doktora zakończyłem broniąc z wyróżnieniem 28 czerwca 2011 roku pracę doktorską pt.: „**Wpływ parametrów technologicznych i właściwości proszkowych materiałów na własności mechaniczne elementów wykonywanych metodą SLM**”.

5.3. Działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia doktora

Działalność swoją opisuję w kontekście realizowanych projektów naukowo-badawczych.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta naukowo – dydaktycznego (01.10.2011r.) i kontynuowałem prace badawcze rozpoczęte w dwóch projektach:

- „**RM - Technologie szybkiego wytwarzania (Rapid Manufacturing-RM) w produkcji krótkich serii wyrobów indywidualizowanych**” *N R07 0015 06 (lata realizacji 2009 – 2012)*
- „**LasTech - Technologie laserowego wytwarzania przestrzennych i powłokowych struktur funkcjonalnych**” *(lata realizacji 2009 – 2012)*,

W ramach projektu *RM*, opracowałem wstępne założenia metody optymalizacji procesu SLM uwzględniając głównie stałe i zmienne parametry procesu. Badania oparłem głównie na stalach (316L oraz H13) uzupełniając je wynikami uzyskanymi dla stopu aluminium (AlSi12) oraz czystego srebra (Ag).

W projekcie *LasTech* badania ukierunkowane były na stopy tytanu. W ramach jego realizacji scharakteryzowałem źródło promieniowania laserowego, rodzaj materiałów które mogą być wykorzystane w procesie SLM, problemy i zagrożenia, a także rozpoznałem możliwość hybrydyzacji procesu dla wytwarzania przyrostowego.

W 2011 roku zostałem zaangażowany, jako specjalista w zakresie technologii SLM, do realizacji strategicznego projektu badawczego koordynowanego przez Politechnikę Warszawską (Politechnika Wroclawska była konsorcjantem) pt.

- **„Bioimplant - Bioimplanty dla potrzeb leczenia ubytków tkanki kostnej u chorych onkologicznych”** - *POIG.01.01.02- 00-022/09 (lata realizacji 2010 - 2014).*

W ramach projektu realizowałem prace związane z możliwością otrzymania w technologii SLM złożonych struktur przestrzennych o kontrolowanej geometrii wewnętrznej z biozgodnych stopów tytanu. Założenia te wynikały głównie z możliwości zastosowania tej technologii do wytwarzania implantów medycznych z porowatą strukturą wewnętrzną ułatwiającą przerost tkanek przez wytworzony w technologii SLM implant.

W tym samym roku (2011) nawiązałem współpracę z Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym Policji z Zakładem Broni i Mechanoskopii, którego specjaliści poszukiwali rozwiązania umożliwiającego wierne kopiowanie łusek i pocisków (jako dowodów popełnionych przestępstw). Tematyka ta odbiega od głównego nurtu moich habilitacyjnych zainteresowań, ale dalej mieści się w zakresie technologii szybkiego prototypowania i wytwarzania. Współpraca zaowocowała wspólnym projektem, który uzyskał finansowanie, koordynowanym przez Politechnikę Wroclawską pt.:

- **„Replika - Opracowanie metody replikacji śladów kryminalistycznych”** - *Nr O ROB 0019 01/ID 19/1 (lata realizacji 2012 – 2014).*

Byłem pomysłodawcą wykorzystania technologii Rapid Tooling (odlewanie próżniowe Vacuum Casting w formach silikonowych) do wiernego odzwierciedlenia kształtu dowodu przestępstwa (łuska i/lub pocisk). Dodatkowym wyzwaniem było odzwierciedlenie koloru powierzchni skopiowanego przedmiotu (CLKP prowadzi badania łusek i pocisków na mikroskopie porównawczym, gdzie kolor 2 przedmiotów – oryginału i kopii - musi być zbliżony do siebie). Zaproponowałem w tym przypadku wykorzystanie napylarki PVD i targetu na bazie złota do pokrywania powierzchni replik, umożliwiając tym samym realizację badań porównawczych.

W roku 2012 podjąłem rozmowy z KGHM Polska Miedź S.A. o możliwości współpracy dotyczącej prowadzenia prac badawczych w zakresie domieszkowania materiałów konwencjonalnych renem wykorzystując technologię przyrostową SLM (spółka KGHM jest największym producentem renu z własnych źródeł) w celu podniesienia właściwości użytkowe wyrobów gotowych, głównie w podwyższonych temperaturach. Po przeprowadzeniu rozpoznania literaturowego okazało się, że nie było prac prowadzonych w tym obszarze, co utwierdziło mnie w zasadności podjęcia tego wyzwania badawczego. Efektem rozmów było nawiązanie współpracy z Politechniką Warszawską, Wydziałem Inżynierii Materiałowej i wspólnie złożony projekt, w którym objąłem funkcję koordynatora i lidera prac części PWr, pt.:

- **„RenMaTech - Opracowanie i zastosowanie laserowej technologii mikrometalurgii proszków do wytwarzania materiałów o specjalnych właściwościach modyfikowanych renem”** *PBS1/A5/12/2012 (lata realizacji 2012 - 2015)*

W wyniku realizacji projektu opracowałem sposób projektowania i wytwarzania, z użyciem technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków, materiałów modyfikowanych renem o właściwościach funkcjonalnych stanowiących kryteria ich doboru na powłoki

i elementy urządzeń stosowanych w przemyśle lotniczym, kosmicznym i nuklearnym. Badania prowadzone w projekcie umożliwiły mi przebadanie takich materiałów jak: tytan i jego stopy, stal 316L, Inconel 718, wolfram, stop na bazie kobaltu CoCr12 zarówno w technologii SLM jak i LC/LSA (napawanie laserowe) [1, 4, 6, 7].

W roku 2013 zostałem włączony w prace zespołu w celu przygotowania projektu do konkursu INNOLOT wspólnie z przedsiębiorstwem PZL Mielec pt.:

- **„AMpHOra - Additive Manufacturing Processes and Hybrid Operations Research for Innovative Aircraft Technology Development”**
INNOLOT/I/6/NCBR/2013 (lata realizacji 2013 – 2018)

W projekcie, który uzyskał finansowanie, objąłem funkcję lidera zadań związanych z laserową (SLM) i elektronową (Electron Beam Melting - EBM) proszkową technologią przyrostową. Celem tych zadań było opracowanie demonstratorów obu technologii dla materiałów: Ti6Al4V, VT-22, Ti5553, Al7075, Al5083, AlSi12, H13. W ramach jego realizacji zostały opracowane:

- parametry procesu wytwarzania dla wymienionych materiałów,
- strategię obróbki cieplnej,
- warunki obróbki HIP (Hot Isostatic Pressing),
- bazy danych zawierające wyniki badań mikrostrukturalnych i mechanicznych,
- wytyczne dla konstruktorów i technologów w przypadku projektowania pod wytwarzanie AM (optymalizacja topologiczna),
- demonstratory technologii (części dla samolotu M28 oraz helikoptera Black Hawk).

W ramach realizacji projektu wykorzystana została wcześniej już opracowana czteroetapowa metoda procesowa [1, 7], która po zakończeniu projektu stała się podstawą do opracowania kompleksowej metody czynnikowej projektowania i implementacji technologii SLM [1].

W 2014 roku z inicjatywy KGHM Cuprum sp. z o.o. Centrum Badawczo - Rozwojowe, zostałem włączony w przygotowanie zakresów badawczych dla nowopowstającego programu CuBR, w ramach którego jednym z tematów miały być supertwarde powłoki wytwarzane z wykorzystaniem renu. Efektem tych działań był projekt:

- **„ReCOVER – Warstwy i powłoki renu, jego związków lub stopów – ich właściwości, zastosowania oraz metody nanoszenia”** – *CuBR/II/4/NCBR/2015 (lata realizacji 2015 – 2018)*

W projekcie objąłem funkcję kierownika zadań PWR (liderem był IMN w Gliwicach). Podczas jego realizacji, partner przemysłowy (KGHM) wykazał duże zainteresowanie technologią SLM, która pierwotnie nie była uwzględniona w harmonogramie projektu. Po podpisaniu aneksu i w wyniku prowadzonych prac opracowana została metoda wytwarzania proszku stopu Inconel 718 pokrytego nanometryczną warstwą renu, przeznaczonego do przetwarzania za pomocą technologii SLM, co zagwarantowało m.in. brak segregacji pierwiastków podczas samego procesu. Dla tych materiałów zostały również opracowane parametry technologiczne oraz wytworzony został demonstrator, który następnie był poddany weryfikacji przez Pratt&Whitney Rzeszów (aktualnie trwają prace nad ulepszeniem demonstratora). W związku z podpisaną z KGHM klauzurą o poufności, wyniki badań nie zostały opublikowane w żadnej formie.

W 2016 roku rozpocząłem prace mające na celu opracowanie możliwości przetwarzania, za pomocą technologii SLM, materiałów proszkowych ze stopów magnezu. W tym celu podjąłem

starania o uzyskanie finansowania w ramach konkursu LIDER, w którym po pozytywnym zaopiniowaniu, objąłem funkcję kierownika:

- **„AMgAVIO Stopy na bazie magnezu przetwarzane technologią selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków do zastosowań lotniczych”** - LIDER/8/0109/L-7/15/NCBR/2016 (lata realizacji 2017 - 2019)

Projekt ten pozwolił mi dokończyć budować kompletny 12 osobowy zespół badawczy którego obecnie jestem liderem. Do współpracy zaprosiłem PZL Mielec oraz Pratt&Whitney Kalisz (jako partnerów, a nie konsorcjantów) w celu weryfikacji uzyskiwanych wyników. W wyniku dotychczasowej realizacji projektu opracowane zostały parametry technologiczne do przetwarzania stopu magnezu AZ31 w technologii SLM, wykonane zostały badania mikrostrukturalne, oraz mechaniczne [8]. Również w ramach tych prac, opracowany został wynalazek, który zgłoszony został do ochrony patentowej:

- *Zgłoszenie patentowe nr P 426657 z 13.08.2018, „Sposób zabezpieczenia przed zanieczyszczeniami układu optycznego urządzenia do przyrostowego wytwarzania obiektów geometrycznych oraz urządzenie do realizacji tego sposobu”. Edward Chlebus, Andrzej P. Pawlak, Tomasz Kurzynowski*

Również w 2016 roku z inicjatywy firmy Pratt&Whitney Kalisz podjęta została współpraca badawcza w zakresie wytwarzania cienkościennych elementów silnika lotniczego w technologii SLM. Skutkiem rozmów jest aktualnie realizowany we współpracy z Pratt&Whitney Kalisz oraz Instytutem Lotnictwa projekt (w którym Politechnika Wrocławska jest liderem konsorcjum) pt.:

- **INNSLOT - „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania złożonych geometrycznie, cienkościennych komponentów silników lotniczych ze stopów na bazie niklu”** - TECHMATSTRATEG1/347514/7/NCBR/2017 (lata realizacji 2018 - 20)

W projekcie objąłem funkcję lidera grupy PWr odnośnie technologii SLM. Celem prac jest przebadanie, w warunkach laboratoryjnych, możliwości wykonywania skomplikowanych geometrycznie części ze stopów lotniczych (Inconel 718) oraz opracowanie wniosków i wytycznych pomocnych w fazie wdrożenia innowacyjnej technologii przyrostowej do praktyki przemysłowej. Cel naukowy stanowi uzyskanie odpowiedzi na pytanie, dotyczące optymalnego zestawu parametrów procesu SLM), który pozwoli na uzyskanie prawidłowej morfologii i struktury metalicznej (m.in. pozbawionej por, pęknięć, rozwarstwień) detali trudnoobrabialnych mechanicznie (ze względu na fakt, że materiał badawczy stanowią lotnicze gatunki stopów niklu).

Od 2018 roku jestem zaangażowany w realizację europejskiego projektu:

- **„AMable – AdditiveManufacturABLE”** (lata realizacji 2017 - 2021)

Celem projektu jest przełamanie barier – w postaci braku odpowiednio wykształconych kadr oraz łatwego dostępu do know-how, sprzętu, infrastruktury i rynku – dla europejskich małych i średnich przedsiębiorstw pragnących wdrażać technologie przyrostowe (Additive Manufacturing, AM). Moją rolą w projekcie jest rozwijanie platformy w zakresie projektowania, konstruowania oraz nauczania, aby przyspieszyć przyrostowy proces produkcyjny (AM), ze szczególnym uwzględnieniem technologii SLM i EBM.

Również od 2018 roku jestem głównym wykonawcą międzynarodowego projektu CORNET:

- „ClusterMat - Powder production of iron-based high-performance materials for generative manufacturing processes” - CORNET/24/2/2018 (lata realizacji 2018-20)

W projekcie odpowiadam za część związaną z technologią SLM, doбором parametrów technologicznych dla proszków szkieł metalicznych (stopy żelaza m.in. $Fe_{44,63}Cr_{4,93}Co_{4,93}Mo_{12,61}Mn_{11,03}C_{15,56}B_{5,81}Y_{1,5}$), badaniami mikrostrukturalnymi oraz wytrzymałościowymi.

Od marca 2019 roku jestem zaangażowany w realizację rozpoczynającego się międzynarodowego projektu:

- „AM-Crash - Additive Manufacturing Technologies for Crash loaded structural Components” – M-ERA.NET Call 2018 (lata realizacji 2019 -2022).

Jako Młody Doktor uczestniczyłem również w programowych konkursach dedykowanych rozwojowi młodej kadry naukowej, które to starania zaowocowały:

- **Dwukrotnie rocznym stypendium naukowym dla Młodego Doktora (PostDoc)** w ramach projektu „Młoda kadra 2015 plus. Wzbogacenie oferty dydaktycznej Politechniki Wrocławskiej w zakresie ogólnouczelnianych przedmiotów wybieralnych oraz wdrożenie nowych Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich” za badania pt. „Zjawiska technologiczno-materiałowe zachodzące podczas selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków metali” (w latach 2012 – 2014).
- **Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (decyzja nr 0190/E-366/9/2014)** za dotychczasowe wyniki naukowe dla wybitnych młodych naukowców (w latach 2014 - 2017).
- **Dwukrotnie Nagrodami Rektora** za osiągnięcia organizacyjne, dydaktyczne i naukowe.

Podsumowując, moja działalność naukowo-badawcza w latach 2011 – 2019, zaowocowała:

- 1 monografią,
- 12 artykułami z listy JCR,
- 2 artykułami z Listy MNIŚW,
- 15 referatami konferencyjnymi (w tym 3 z WoS + 2 zgłoszone do WoS),
- 2 streszczeniami,
- 1 patentem,
- 2 zgłoszeniami patentowymi,
- 100 pracami niepublikowanymi (zarejestrowanymi w bibliotece Politechniki Wrocławskiej).

5.4. Opieka naukowa nad doktorantami

Jestem promotorem pomocniczym w 3 przewodach doktorskich (Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska) (jeden już obroniony):

1	Dr inż. Iryna Smolina	„Zastosowanie selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (SLM) do wytwarzania stopu CoCrMo modyfikowanego renem” - DOKTORAT OBRONIONY
---	-----------------------	---

2	Mgr inż. Konrad Gruber	„Adaptacja procesu selektywnej laserowej mikrometalurgii do wytwarzania elementów o funkcjonalnych własnościach specjalnych ze stopów niklu modyfikowanych renem” – przewidywana obrona 2020
3	Mgr inż. Wojciech Stopyra	„Symulacja procesu wytwarzania w technologii Selektywnej Laserowej Mikrometalurgii proszków metali” – przewidywana obrona 2021

5.5. Projekty badawcze

Brałem udział w 23 projektach badawczych.

Rola w projekcie	Liczba projektów
Kierownik*	3
Koordinator**	7
Główny wykonawca	3
Wykonawca	10
SUMA	23

* Odpowiedzialność merytoryczna i formalna administracyjna, wymieniony w umowie o dofinansowanie

** Odpowiedzialność merytoryczna, zarządzanie zespołem, kierowanie zadaniami w projekcie

Szczegółowy spis projektów badawczych znajduje się w załączniku 4 pkt. II.J

5.6. Współpraca z przemysłem

Jako koordynator Centrum KET oraz DIH (załącznik 4, pkt. III.A) w CAMT współpracuję z wieloma przedsiębiorstwami świadcząc im usługi badawcze, eksperckie oraz doradcze. Od 2011 roku, kiedy objąłem funkcję kierownika pracowni w CAMT wykonałem wraz z zespołem ponad 400 prac na rzecz przemysłu na łączną kwotę bliską 4 mln zł. Szczegółowy spis projektów przemysłowych (tylko tych wyodrębnionych formalnie poprzez zawarte umowy), których byłem kierownikiem, znajduje się w załączniku 4 pkt. III.F

Rodzaj współpracy	Rola	Liczba
Projekt (podpisana umowa)	Kierownik	14
Usługa badawcza (zlecenie)	Kierownik	ok. 400

5.7. Patenty i zgłoszenia patentowe

Patent:

- Szymczyk P., Ziółkowski G., **Kurzynowski T.**, Chlebus E., Patent. Polska, nr 226984. „Sposób akwizycji obrazu cząstek proszku”, Int. Cl. G01B 15/02, G01N 23/04. Zgłosz. nr P 401360 z 26.10.2012. Opubl. 31.10.2017. 8 s.

Zgłoszenie patentowe:

- Chlebus E., Karoluk M., Szymczyk M., **Kurzynowski T.**, „Sposób wytwarzania kompozytów o osnowie polimeru PLA (PLLA) lub kopolimeru na bazie PLLA/PGA zbrojonego strukturami metalowymi”, Zgłosz. pat. nr P 410680 z 30.12.2014. 8 s.
- Chlebus E., Pawlak A., **Kurzynowski T.**, „Sposób zabezpieczenia przed zanieczyszczeniami układu optycznego urządzenia do przyrostowego wytwarzania

obiektów geometrycznych oraz urządzenie do realizacji tego sposobu” Zgłoszenie patentowe nr P 426657 z 13.08.2018.

5.8. Staże

- **IBM Watson Research Center, USA** - Science Infrastructure Management Support (SIMS) - 08-22.03.2014
- **Max Planck Institute, TU Dresden, GER** - Science Infrastructure Management Support (SIMS) - 23-28.02.2014
- **Fraunhofer MOEZ and IZI, GER** - Science Infrastructure Management Support (SIMS), 16-22.02.2014
- **IBM Warsaw** - Science Infrastructure Management Support (SIMS) – 09-15.02.2014
- **Stanford University, USA** – TOP500 Innovators - 21.10-20.12.2013
- **Whirlpool Corporation** – półtoraroczna praktyka zawodowa (01.2004 – 09.2005) jako konstruktor w dziale rozwoju produktu firmy Whirlpool, Ul. Gen. T. Bora-Komorowskiego 6, 51-210 Wrocław

5.9. Działalność dydaktyczna

Od początku mojej pracy na Politechnice Wrocławskiej angażuję się w działalność dydaktyczną. Jestem odpowiedzialny za dydaktykę w swoim 12-to osobowym zespole.

Prowadziłem i prowadzę następujące przedmioty:

	Wykłady w języku polskim
1	• Studium przypadku
2	• Eksploatacja systemów produkcyjnych
3	• Komputerowe zarządzanie eksploatacją i utrzymaniem ruchu maszyn i urządzeń
4	• Zarządzanie produkcją
	Wykłady w języku angielskim
5	• Case Study
6	• Technology planning CAD/CAM
	Projekty/ćwiczenia/laboratoria w języku polskim
7	• Zaawansowane modelowanie i projektowanie procesów wytwórczych CAD
8	• Innowacyjne Technologie Mechaniczne
9	• Symulacja Procesów Produkcyjnych CAD/CAM
10	• Praca przejściowa
11	• Seminarium dyplomowe
	Projekty/ćwiczenia/laboratoria w języku angielskim
12	• Innovative mechanical technologies
13	• Informatics IV - CAD/CAM

Jestem promotorem 75 prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich.

Szczegółowy opis osiągnięć dydaktycznych i popularyzujących naukę w załączniku 4, pkt. III.I

5.10. Pełnione funkcje

- Rada Wydziału Mechanicznego 2012 – obecnie – członek oraz członek komisji skrutacyjnej
- Stowarzyszenie TOP500 Innovators – członek
- Stowarzyszenie SIMS – założyciel i członek zarządu (z wyboru)
- Europejska Platforma Additive Manufacturing przy KE – członek (jeden z 3 reprezentujących Polskę)
- Polskie Stowarzyszenie Mechaniki Eksperymentalnej – członek
- Ekspert Narodowego Centrum Badań i Rozwoju do oceny projektów
- Przedstawiciel Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w komitetach inwestycyjnych Bridge Alfa
- Ekspert Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego do oceny wniosków
- Ekspert w CRIDO Business & Innovation Consulting Sp. z o.o. w projekcie Sieć Otwartych Innowacji

5.11. Nagrody i wyróżnienia

- **Nominacja do Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju 2019** pod patronatem Prezes Urzędu patentowego RP, dr Alicji Adamczak, w kategorii Naukowiec Przyszłości (z dnia 05.12.2018r.)
- **Polska Nagroda Innowacyjności 2016r.** (zespołowo) za realizację projektu „AMpHOr – badanie technologii przyrostowych i procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej”, Polska Agencja Przedsiębiorczości, 2016.
- **Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (decyzja nr 0190/E-366/9/2014)** za dotychczasowe wyniki naukowe **dla wybitnych młodych naukowców** (w latach 2014 - 2017).
- **(Dwukrotnie) Roczne stypendium naukowe dla Młodego Doktora (PostDoc) w ramach projektu „Młoda kadra 2015 plus. Wzbogacenie oferty dydaktycznej Politechniki Wrocławskiej w zakresie ogólnouczelnianych przedmiotów wybieralnych oraz wdrożenie nowych Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich” za badania pt. „Zjawiska technologiczno-materiałowe zachodzące podczas selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków metali”** (w latach 2012 – 2014).
- **(Dwukrotnie) Nagroda Rektora** za osiągnięcia organizacyjne, dydaktyczne i naukowe.
- **Stypendium naukowe samorządu Wrocławia** dla najlepszych doktorantów miasta Wrocław (2009 - 2010).
- **(Dwukrotnie) Stypendium naukowe** w ramach ROZWÓJ POTENCJAŁU DYDAKTYCZNO-NAUKOWEGO MŁODEJ KADRY AKADEMICKIEJ POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ za projekt: „*Identyfikacja problemów oraz zagrożeń podczas procesu selektywnej mikrometalurgii laserowej proszków metali*”. Finansowane z POKL, Poddziałanie 4.1.1: Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni (2009 -2010).
- **(Dwukrotnie) Stypendium naukowe** z Urzędu Marszałkowskiego woj. dolnośląskiego w konkursie "GRANT – WSPARCIE PRAC BADAWCZYCH POPRZEZ STYPENDIA NAUKOWE DLA DOKTORANTÓW" za projekt „*Analiza wpływu parametrów procesu*

selektywnego przetwarzania proszków metali na właściwości mechaniczne obiektów wytwarzanych metoda addytywną”. Finansowanie z POKL, Priorytet VIII, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji (2008 - 2009).

- **(Dwukrotnie) Stypendium naukowe** Prorektora ds. Nauczania Politechniki Wrocławskiej dla najlepszych doktorantów w ogólnouczelnianym konkursie finansowanym przez własny fundusz stypendialny Politechniki Wrocławskiej (2008 i 2009).
- Stypendium naukowe Politechniki Wrocławskiej 2007 - 2011.
- Stypendium doktoranckie Politechniki Wrocławskiej 2005 – 2011.

5.12. Zestawienie dorobku naukowego

Rodzaj pracy	Przed Doktoratem	Po Doktoracie	RAZEM
Prace naukowe ogółem	16	32	48
W tym artykuły z listy JCR	1	12	13
W tym artykuły z listy MNiSW	4	2	6
W tym artykuły konferencyjne	5	15	20
W tym streszczenia	0	2	2
W tym monografie	0	1	1
W tym rozdziały w książkach i monografiach	6	0	6
Pozostałe prace (raporty SPR)	2	100	102
Projekty badawcze*	8	15 (3 jako kierownik)	23
Projekty celowe, rozwojowe, wdrożeniowe	0	14 (kierownik)	14
Projekty infrastrukturalne i organizacyjne	2	4 + 3 złożone	6 + 3
Patenty	0	1 patent + 2 zgłoszenia	1 + 2
Cytowania ** (bez autocytowań),	0	WoS 300 Scopus 363	WoS 300 Scopus 363
Wskaźnik Hirscha**	0	WoS H=6 , Scopus H=6	WoS H=6 , Scopus H=6
Sumaryczny Impact Factor	1,572	24,977	26,549

* Projekty przyporządkowane wg daty zakończenia, tj. zakończenie do 2011r. to projekt przed doktoratem, zakończenie od 2012r. to projekt po doktoracie

** Na dzień 20.03.2019r.

Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy w postaci tabeli znajduje się w Załączniku 4 na końcu dokumentu.

Analiza dorobku wg bazy SCOPUS oraz Web of Science (WoS):

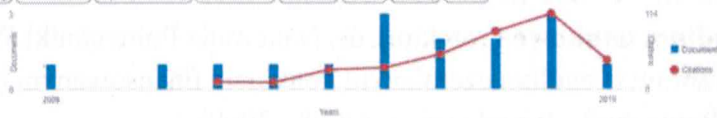
1) SCOPUS (Na dzień 20.03.2019r.):

Kurzynowski, Tomasz

Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Author ID: 37102076700
Other name formats: Kurzynowski, T.

Subject area: [Engineering](#) [Materials Science](#) [Physics and Astronomy](#) [Computer Science](#) [Mathematics](#) [Medicine](#) [Chemistry](#) [Diversity](#)

Document and citation trends



[Get citation alerts](#) [Add to ORCID](#) [Request author detail corrections](#) [Export profile to Scopus](#)

[Follow this Author](#)

[View potential author matches](#)

1x Kurzynowski, Tomasz

Wrocław University of Science and Technology

[Is this you?](#)

[h-index](#) **6**

[View h-graph](#)

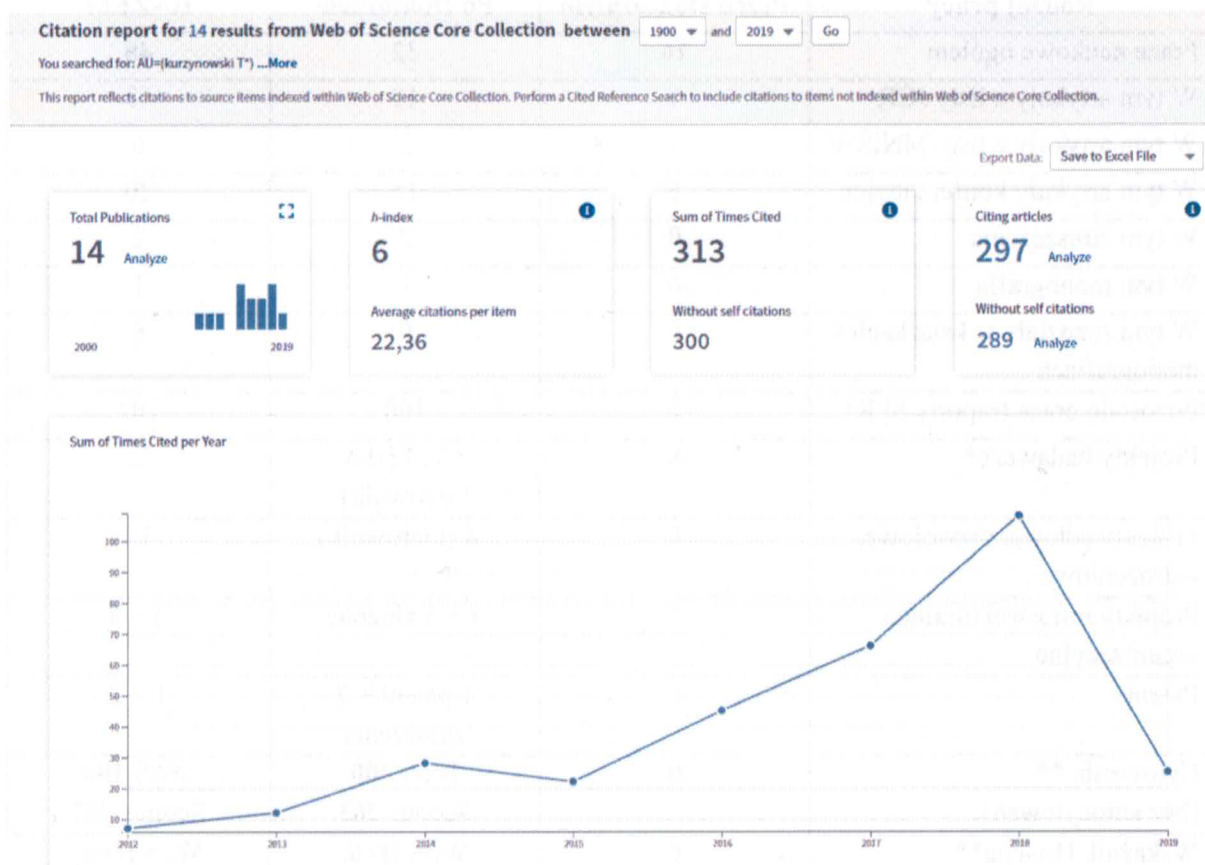
[Documents by author](#) **16**

[Analyze author output](#)

[Total citations](#) **378** by 354 documents

[View citation overview](#)

2) Web of Science (Na dzień 20.03.2019r.):



Tomasz Kurzynowski