

Prof. dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK
Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

31.08.2022 r.

Recenzja

dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego

dra inż. Marcina Wachowskiego

ze szczególnym uwzględnieniem osiągnięcia pt.:

**„Analiza wpływu obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej
na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę
połączeń stopów metali lekkich wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego”,**

w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego
nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Recenzja została wykonana na podstawie decyzji Rady Doskonałości Naukowej oraz uchwały Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej nr 45/RDN IM/2022 z dnia 13 lipca 2022 r. i w zw. z art. 221 ust.5 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U.2022r. poz.1668 z późniejszymi zmianami) oraz dokumentacji merytorycznej przygotowanej przez dra inż. Marcina **Wachowskiego**, którą stanowiły: *wniosek przewodni, dane wnioskodawcy, autoreferat do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego (wraz z załącznikiem nr 8 stanowiącym uzupełnieniem do pkt.5 autoreferatu) kopię dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora, wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny, oświadczenia współautorów poszczególnych prac, wykaz prac ujętych w powiązonym tematycznie cyklu publikacji naukowych. Dokumentacja wraz z załącznikami dostarczona została również w wersji papierowej w języku polskim i angielskim.*

Charakterystyka ogólna

Pan dr inż. Marcin Wachowski jest absolwentem Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, kierunku inżynieria materiałowa, gdzie we wrześniu 2010 roku obronił pracę magisterską pt.: „Badania właściwości i mikrostruktury złączy bimetalicznych tytan-stal austenityczna wytwarzanych metodą wybuchową” w ramach specjalności projektowanie materiałów, a w marcu 2015 r. na tymże Wydziale uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa na podstawie rozprawy doktorskiej

pt.: „Wpływ obróbki cieplnej na mikrostrukturę oraz odporność zmęczeniową blach tytan-
stal wytwarzanych metodą wybuchowego łączenia”, która została wyróżniona w konkursie o
Nagrodę Pratt & Whitney imienia Zbigniewa Grabowskiego (Nagroda III stopnia). Pan Marcin
Wachowski pracę magisterską, a następnie doktorską realizował pod opieką prof. dra hab.
inż. Krzysztofa Jana Kurzydłowskiego z Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki
Warszawskiej.

Przed uzyskaniem stopnia doktora Habilitant:

- opublikował 8 publikacji, z których 7 dotyczyło badań struktury i właściwości złączy
stal-tytan zgrzewanych wybuchowo,

- uczestniczył w realizacji 4 projektów naukowo-badawczych, m.in. w realizacji projektu
badawczego zawartego z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju „Innowacyjna metodyka
diagnozowania trwałości eksploatacyjnej warstwowych materiałów metalicznych w stanie
dostawy, w warunkach obciążeń mechanicznych, otrzymywanych w technologii platerowania
wybuchowego”, w ramach którego wykonywał szereg badań związanych z analizą
mikrostrukturalną oraz oceną właściwości mechanicznych materiałów platerowanych
metodą wybuchową,

- odbył sześciomiesięczny zagraniczny staż naukowy w Niemczech w Max-Planck
Institut für Plasmaphysik, gdzie wykonywał badania degradacji materiałów używanych do
budowy wewnętrznych ścian reaktorów termojądrowych (grafit z wolframem), a ich wyniki
zostały opublikowane w czasopiśmie Nuclear Fusion;

- brał udział w międzynarodowym projekcie „*NanoBRIDGES – Building bridges
between specialists in computational and empirical risk assessment of engineered
nanomaterials*” finansowanego z siódmego ramowego programu europejskiego, w ramach
którego odbył dwumiesięczny staż naukowy w National Institute for Environmental Studies
w Japonii, gdzie prowadził badania nad toksycznością hydroksyapatytu na żywe komórki;

- brał czynny udział w przedsięwzięciu naukowym z dziedziny geologii, realizowanym
na zamówienie Ministra Środowiska i NFOŚiGW pt. „Badania mineralogiczne i
mikrostrukturalne dla osadów jezior Dąbie, Jamno oraz zbiornika Turawa”, w ramach
którego wykonywał badania z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej.

W rozprawie doktorskiej, w publikacjach oraz w prowadzonych badaniach stosował
takie metody badawcze jak badania mikrotwardości, badania statycznej próby rozciągania,
badania zmęczeniowe, mikroskopia świetlna, skaningowa mikroskopia elektronowa,
transmisyjna mikroskopia elektronowa, skaningowa mikroskopia jonowa. Wynikiem pracy
doktorskiej był zgromadzony wartościowy materiał badawczy i doświadczalny oraz
poznawczy.

Po uzyskaniu stopnia doktora, od października 2015 roku do chwili obecnej jest
zatrudniony na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej, początkowo na
stanowisku adiunkta naukowego, a od października 2019 r. na stanowisku adiunkta
badawczo-dydaktycznego, pełniąc od momentu zatrudnienia w 2015 r funkcję kierownika
Pracowni Mikroskopii Elektronowej Wydziału Inżynierii Mechanicznej WAT. Z
przedstawionego dorobku naukowo-badawczego po osiągnięciu stopnia doktora wynika, że

dr inż. Marcin Wachowski kontynuuje rozpoczętą wcześniej na Politechnice Warszawskiej tematykę badań materiałów warstwowych wytwarzanych metodą wybuchowego łączenia, oraz realizuje nową dotyczącą materiałów kompozytowych z układu ceramika-metal jak i zaawansowanych technik spajania FSW, LBW.

Ocena osiągnięcia naukowego jednotematycznego cyklu publikacji

Jako osiągnięcie naukowe stanowiące znaczny wkład w rozwój nauki wynikający z ustawy - *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (j.t. Dz.U.2021r. poz.1668) dr inż. Marcin Wachowski wskazał cykl ośmiu (8) publikacji naukowych powiązanych tematycznie artykułów naukowych pod wspólnym tytułem **„Analiza wpływu obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę połączeń stopów metali lekkich wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego”**, a które obejmują 6 artykułów w punktowanych czasopismach z listy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego i 2 publikacje w recenzowanych zagranicznych materiałach konferencyjnych.

Powyższe publikacje ukazały się w latach 2016-2020 z procentowym udziałem Habilitanta odpowiednio: Journal of Alloys and Compounds [A1 – 2016, 60%], Manufacturing Review [A2-2019, 80%], Materials and Technology [A3-2019, 55%; A7-2019, 55%], Procedia Structural Integrity [A4-2017, 70%], Proceedings of 1st International Scientific Conference and Live Firing Show on Challenges to National Defence in the Contemporary Geopolitical Situation (CNDCGS) [A5-2018, 60%], MATEC Web of Conferences [A6-2019, 55%], Materials [A8-2020, 55%].

Wszystkie publikacje są współautorskie przy szacowanym od 80% do 55% procentowym udziałem Habilitanta, przy czym w 4 publikacjach jest on głównym autorem [A5-A8]. Sumaryczny *impact factor* (IF) jednotematycznego cyklu publikacji wynosi 8,150.

Jak wynika z tytułu przedstawionego osiągnięcia naukowego będącego podstawą oceny dorobku w postępowaniu o stopień naukowy doktora habilitowanego zainteresowania Habilitanta, rozpoczęte już podczas realizacji pracy dyplomowej, obejmują przede wszystkim badania złącz bimetalicznych stopów wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego z uwzględnieniem ich ewentualnych aplikacji.

Wytworzenie złączy metodą wybuchowego zgrzewania następuje wskutek detonacji materiału wybuchowego powodującej zderzenie z dużą prędkością ułożonych na siebie powierzchni materiałów i uzyskanie między nimi połączenia metalicznego. W zależności od potrzeb, można zgrzewać ze sobą tą technologią dwa lub więcej różnych materiałów, w tym głównie o zróżnicowanych grubościach, uzyskując materiał warstwowy (platerowany). W wytworzonych materiałach warstwowych występuje silne umocnienie, które jest zróżnicowane na przekroju, a największe w obrębie połączenia. Taka struktura, chociaż zwiększa ich właściwości wytrzymałościowe, powoduje problemy technologiczne podczas dalszych procesów m.in. gięcia, tłoczenia, cięcia. Dlatego materiały warstwowe wytworzone poprzez zgrzewanie wybuchowe poddaje się często obróbce cieplnej (np. wyżarzanie

odprężające, normalizowanie), stosowaną także m.in. dla złączy spawanych, która powoduje przede wszystkim znaczne zmniejszenie naprężeń własnych. Obróbka cieplna może jednak prowadzić do wielu innych, najczęściej niepożądanych zmian w mikrostrukturze złącza. Możliwe jest bowiem wystąpienie procesów dyfuzyjnych na granicy połączenia, prowadzące do tworzenia faz międzymetalicznych (najczęściej kruchych i o dużej twardości), powodujących zmniejszenie właściwości mechanicznych materiału.

Należy nadmienić, że tematyka zgrzewania wybuchowego jest rozwijana w WAT od wielu lat, m.in. w latach 70. XX wieku przez zespół prof. W. Babuła, tak więc podjęta przez dr inż. Marcina Wachowskiego, dobrze wpisuje się w profil badawczy Uczelni.

Habilitant na podstawie przeglądu literatury stwierdza, że zagadnienia wpływu obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej złączy bimetalicznych stopów wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego są zbadane dotąd w sposób niepełny i słusznie formułuje 2 tezy badawcze:

1. *Zmiany mikrostruktury wynikające z zachodzących podczas wyżarzania rekrytalizujących procesów cieplnych przy jednoczesnym uformowaniu się faz międzymetalicznych nie wywierają pozytywnego wpływu na wytrzymałość zmęczeniową materiałów warstwowych otrzymywanych metodą wybuchowego łączenia.*

2. *Uformowanie faz międzymetalicznych w obrębie złącza materiału warstwowego w wyniku obróbki cieplnej bądź cieplno-plastycznej przyczynia się do polepszenia jego odporności balistycznej.*

Celem badań własnych opisanych w cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe jest ocena wpływu obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę materiałów warstwowych wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego do zastosowań w przemyśle chemicznym i zbrojeniowym.

Materiały zgrzewane wybuchowo, przyjęte do celów badawczych przez Habilitanta można zakwalifikować do 3 grup:

1. Materiały platerowane stosowane w przemyśle z grupy połączeń **tytan-stal konstrukcyjna** (tytan Grade 1 – stal St52-3N) oraz **tytan-stal austenityczna** (tytan Grade 1 – stal 316L), poddane następnie wyżarzaniu,

2. Materiały platerowane stosowane w przemyśle z grupy połączeń **tytan - aluminium** dwuwarstwowe (tytan Ti6Al4V – aluminium AA1050) i trójwarstwowe tytan (Ti6Al4V – aluminium AA1050 – aluminium AA2519) poddawane obróbkom cieplnym (wyżarzaniu rekrytalizującemu lub umacnianiu wydzieleniowemu), a badanie także na odporność balistyczną,

3. Materiały wielowarstwowe, z grupy **tytan-aluminium-magnez** (Ti6Al4V – aluminium AA1050 – aluminium AA2519 – AZ31), poddane po zgrzewaniu wybuchowym procesowi obróbki cieplno-plastycznej (walcowania), w celu wytwarzania faz intermetalicznych, stanowiące potencjalne osłony balistyczne.

Materiały do badań zostały dostarczone przez Zakład Technologii Wysokoenergetycznych „EXPLOMET”, który jako jedyny w Polsce stosuje technologię wybuchowego łączenia metali na skalę przemysłową i zajmuje wysoką pozycję na rynku

światowym w sprzedaży materiałów platerowanych, a z którym dr inż. Marcin Wachowski współpracuje badawczo od wielu lat.

Tematyka osiągnięcia naukowego została przedstawiona przez Habilitanta w 8 publikacjach.

Publikacja [A1]: M. Gloc, M. Wachowski, T. Płociński, K.J. Kurzydłowski, 2016, Microstructural and microanalysis investigations of bond titanium grade1/low alloy steel st52-3N obtained by explosive welding, Journal of Alloys and Compounds, 671, 446-451, doi:10.1016/j.jallcom.2016.02.120 (IF = 3,133; pkt. wg MNiSW/MEiN: 35; cytowań w WoS: 76).

W pracy przedstawiono wyniki porównawcze badań właściwości mechanicznych i mikrostrukturalnych materiału bimetalicznego tytan Grade 1 – stal St52-3N, złącza po procesie łączenia metodą zgrzewania wybuchowego, z wynikami badań dla materiału poddanego dodatkowo wyżarzaniu rekrytalizacyjnemu. Właściwości mechaniczne określano na podstawie rozkładów mikrotwardości, które zestawiano z wynikami badań mikrostrukturalnych: mikroskopia świetlna, skaningowa (SEM) i transmisyjna (TEM) oraz spektroskopię dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS).

Istotnym osiągnięciem pracy jest wyjaśnienie przyczyn wzrostu wartości mikrotwardości w obszarze odkształconym w materiale po procesie zgrzewania wybuchowego, w odniesieniu do mikrotwardości materiałów wyjściowych, a następnie jej obniżenia po obróbce cieplnej, która oddziałuje niekorzystnie na właściwości mechaniczne (zmęczeniowe) połączenia. Zaawansowane badania materiałoznawcze pozwoliły stwierdzić m.in. zanik adiabatycznych pasm ścinania, a także obecność przetopień w obszarze złącza i ich rozrost spowodowany obróbką cieplną, a na granicach ziaren wydzielenia węgla tytanu (TiC) spowodowane dyfuzją węgla z obszarów stali.

Publikacja [A2]: M. Małek, M. Wachowski, R. Kosturek, 2019, Research on microstructure and mechanical properties of explosively welded stainless steel/commercially pure Ti plate, Manufacturing Review, 6, 28-32, doi:10.1051/mfreview/2019028 (IF = n/d; pkt. wg MNiSW/MEiN: 70; cytowań w WoS: 0).

Praca dotyczy badań nad określeniem wpływu obróbki cieplnej (wyżarzania odprężającego) blach ze stali austenicznej platerowanych tytanem na wytrzymałość zmęczeniową bimetalicznego połączenia pomiędzy tytanem i stalą austeniczną (tytan Grade 1 – stal 316L) określaną próbą zginania trójpunktowego. Analiza wyników ujawniła niekorzystny wpływ obróbki cieplnej na wytrzymałość zmęczeniową połączenia. W celu określenia przyczyn obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej materiału po obróbce cieplej, Habilitant przeprowadził pomiary mikrotwardości, które następnie poparł badaniami mikrostrukturalnymi.

Publikacja [A3]: R. Kosturek, M. Wachowski, L. Śnieżek, A. Kruk, J. Torzewski, K. Grzelak, J. Mierzyński, 2019, Research on the microstructure of a Ti6Al4V-AA1050 explosive-welded bimetallic joint, Materials and Technology (Materiali in tehnologije), 53/1, 109-113, doi:10.17222/mit.2018.153 (IF = 0,697; pkt. wg MNiSW/MEiN: 40; cytowań w WoS: 1).

W pracy przedstawiono wyniki badań mikrostrukturalnych złączy zgrzewanych wybuchowo stop tytanu Ti6Al4V – aluminium AA1050 z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Obserwacje SEM wykazały znaczną deformację plastyczną materiałów w strefach obu złączy, wykazano obecność ciągłych stref przetopionych w obszarze złącza powstałych w wyniku lokalnego wymieszania obu połączonych materiałów, dokonano identyfikacji związków międzymetalicznych występujących w strefach przetopionych (badania przeprowadzono z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej i dyfrakcji elektronów), stwierdzono obecność drobnych wydzieleni faz międzymetalicznych z układu tytan-aluminium ($TiAl_3$, $TiAl$ i $TiAl_2$). Wykorzystując technikę tomografii komputerowej przeprowadzono analizę mikrostruktury strefy połączenia ze szczególnym uwzględnieniem obszarów przetopionych.

Publikacja [A4]: L. Śnieżek, I. Szachogluchowicz, M. Wachowski, J. Torzewski, J. Mierzyński, 2017, High cycle fatigue properties of explosively welded laminate AA2519/AA1050/Ti6Al4V, Procedia Structural Integrity, 5, 422-429, doi:10.1016/j.prostr.2017.07.191 (IF = n/d; pkt. wg MNiSW/MEiN: 15; cytowań w WoS: 10).

W pracy przedstawiono obszerne badania właściwości zmęczeniowych w warunkach stałego amplitudowego rozciągania, dla próbek zgrzewanych wybuchowo materiału trójwarstwowego Ti6Al4V/AA1050/AA2519, dla materiału w stanie przed i po dwuetapowej obróbce cieplnej umacniania wydzieleniowego stopu AA2519 (przesycanie 530°C/2h i starzenie 165°C/10h). Analiza wyników badań pozwoliła stwierdzić pozytywny wpływ obróbki cieplnej na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej (przy dużych naprężeniach wytrzymałość zmęczeniowa próbek po obróbce cieplnej jest ponad dwukrotnie wyższa w porównaniu do materiału nieobrobionego cieplnie). Przyczyny wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej w próbach wysokocyklowego rozciągania są odniesione do wyników badań mikrostrukturalnych. Wykazano, że w wyniku obróbki cieplnej następuje wydzielenie fazy θ' , która znacząco wpływa na poprawę właściwości użytkowych stopu AA2519.

Publikacja [A5]: M. Wachowski, I. Szachogluchowicz, L. Śnieżek, V. Hutsaylyuk, W. Koperski, 2018, Experimental Study on Ballistic Resistance Test of AA2519/AA1050/Ti6Al4V Laminate According to STANAG 4569 Level 2, CHALLENGES TO NATIONAL DEFENCE IN CONTEMPORARY GEOPOLITICAL SITUATION (CNDCGS'2018) – Proceedings of 1st International Scientific Conference and Live Firing Show on Challenges to National Defence in the Contemporary Geopolitical Situation (CNDCGS), 25-27.04.2018, Podbrodzie, Litwa, doi: n/d (IF = n/d; pkt. wg MNiSW/MEiN: 15; cytowań w WoS: 1).

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych prób balistycznych modelu pancerza wykonanego z kompozytu Ti6Al4V/AA1050/AA2519 dla materiałów przed i po obróbce cieplnej. Badano wpływ energii uderzenia pocisku karabinkowego (BZ 7,62x39 mm) na strukturę kompozytu dla trzech różnych konfiguracji (grubości warstw, zastosowanej obróbki cieplnej i strony uderzenia pocisku). Przeanalizowano występujące w pancerzu w wyniku ostrzału perforacje i odkształcenia. Stwierdzono, że płyty wykonane z laminatów w

stanie obrabionym cieplnie wykazują większą odporność balistyczną niż płyty nie poddane obróbce, które wynika z uformowania twardych i kruchych fazy międzymetalicznych (TiAl i TiAl₃) oraz umocnienia wydzieleniowego stopu AA2519.

Publikacja [A6]: M. Wachowski, T. Frasz, R. Kosturek, L. Śnieżek, I. Szachogłuchowicz, K. Grzelak, 2019, The Effect of Hypervelocity Impact Loading on Explosively Welded Ti/Al/Al Plate, MATEC Web of Conferences, 253, 01007, doi:10.1051/mateconf/201925301007 (IF= n/d; pkt. wg MNiSW/MEiN: 5; cytowań w WoS: 1).

Praca dotyczy badań balistycznych także panelu trójwarstwowego AA2519 / AA1050/ Ti6Al4V, wykonanego przez zgrzewanie wybuchowe i po przeprowadzonej obróbce cieplnej, ale poddanego ostrzałowi w warunkach hiperprędkości prostopadle do powierzchni ostrzeliwanej próbki (ze względu na potencjalne zastosowanie materiału w aplikacjach konstrukcji kosmicznych). Badano stopień penetracji pancerza, a przeprowadzone badania fraktograficzne wykazały ścinanie jako dominujący proces prowadzący do perforacji. Stwierdzono rozwarstwienie złącza Ti6Al4V/AA1050 po próbie balistycznej, które było spowodowane między innymi obecnością związków międzymetalicznych zlokalizowanych w obrębie złącza.

Publikacja [A7]: M. Wachowski, R. Kosturek, L. Śnieżek, S. Mróz, M. Gloc, A. Krawczyńska, M. Małek, 2019, Analysis of the microstructure of an AZ31/AA1050/AA2519 laminate produced using the explosive-welding method, Materials and Technology (Materiali in tehnologije), 53/2, 239-243, doi:10.17222/mit.2018.151 (IF = 0,697; pkt. wg MNiSW/MEiN: 40; cytowań w WoS: 3).

W celu zmniejszenia masy właściwej wielowarstwowego kompozytu o podwyższonej odporności balistycznej wprowadzono dodatkową warstwę materiału w postaci stopu magnezu AZ31, odznaczającego się niską gęstością (1,77 g/cm³) i dobrymi właściwościami mechanicznymi. Praca dotyczy badań mikrostrukturalnych materiału wielowarstwowego zgrzewanego wybuchowo w konfiguracji bezpośredniej AZ31/AA2519 oraz z warstwą pośrednią wykonaną ze stopu AA1050. Wyniki badań wykazały, że połączenia wolne od faz międzymetalicznych mogą być wytworzone tylko przy zastosowaniu warstwy pośredniej ze stopu AA1050. Laminat AZ31/AA1050/AA2519 może być wytwarzany przez walcowanie stopu AA2519 ze stopem AA1050, a następnie zgrzewany ze stopem AZ31.

Publikacja [A8]: M. Wachowski, R. Kosturek, L. Śnieżek, S. Mróz, A. Stefanik, P. Szota, 2020, The Effect of Post-Weld Hot-Rolling on the Properties of Explosively Welded Mg/Al/Ti Multilayer Composite, Materials, 13/8, 1930-1944, doi:10.3390/ma13081930 (IF = 3,623; pkt. wg MNiSW/MEiN: 140; cytowań w WoS: 11).

Badano właściwości laminatu Ti6Al4V/AA1050/AA2519/AA1050/AZ31, wytworzonego przy wykorzystaniu metody wybuchowego łączenia, a który następnie poddano walcowaniu na gorąco (zgniot następował od strony stopu magnezu). Zastosowanie takiego dwuetapowego procesu pozwoliło uzyskać materiał warstwowy w jednym procesie zgrzewania wybuchowego, zredukować grubość pancerza oraz wytworzyć w sposób

kontrolowany (różna temperatura, stopień i prędkość odkształcenia) ciągłe warstwy kruchych faz międzymetalicznych. Właściwości mechaniczne materiału określono poprzez próby monotonicznego rozciągania mini próbek pobranych z obszarów złączy, pomiary mikrotwardości oraz mikrostrukturę połączeń badanych z wykorzystaniem technik SEM/EDS i TEM.

Walcowanie na gorąco po zgrzewaniu spowodowało wzrost o 10% wartości wytrzymałości na rozciąganie złącza AA1050/AZ31, a złącza Ti6Al4V/AA1050 o 45%, przy czym nastąpiło zwiększenie twardości stopów AZ31 i AA2519. Analizy fraktograficzne przełomów wykazały, że próbki poddane obróbce cieplno-plastycznej wykazują wyższy udział kruchego charakteru pęknięcia.

Habilitant do wniosku dołączył odpowiednie oświadczenia współautorów publikacji, potwierdzające ich wkład naukowy i oszacowanie procentowego udziału. Z przedłożonej dokumentacji wynika, że wkład dr inż. M. Wachowskiego w powstanie poszczególnych publikacji polegał na:

[A1]: sformułowaniu i określeniu nadrzędnych celów oraz założeń badawczych, dokonaniu przeglądu literatury, zaplanowaniu oraz koordynowaniu wszystkimi koniecznymi eksperymentami, realizacji badań mechanicznych (badania twardości) i strukturalnych (skaningowa mikroskopia elektronowa – SEM) oraz przygotowaniu opublikowanego artykułu, w tym krytyczny przegląd, komentarz i korekta - łącznie z etapami przed i po publikacji **[udział 60 %, 4 autorów]**,

[A2]: sformułowaniu hipotez badawczych, dokonaniu przeglądu literatury, opracowaniu i zaprojektowaniu metodologii, zaplanowaniu koniecznych eksperymentów, przeprowadzeniu procesu badawczego: w szczególności: realizacja badań mechanicznych (badania zmęczeniowe, badania twardości) i strukturalnych (mikroskopia świetlna i skaningowa), przygotowanie publikacji, w tym napisanie ostatecznej wersji tekstu pracy **[udział 80 %, 3 autorów]**,

[A3]: na opracowaniu i wizualizacji uzyskanych wyników badań, udziale w przygotowaniu wniosku oraz na uczestnictwie w dyskusjach nad ostatecznym kształtem publikacji, na sformułowaniu wstępnych wniosków, przygotowaniu fragmentu tekstu manuskryptu i naniesieniu poprawek sugerowanych przez recenzentów oraz wszystkich czynnościach związane z korespondencją z redakcją czasopisma **[udział 55%, 7 autorów]**,

[A4]: na opracowaniu i wizualizacji uzyskanych wyników badań, udziale w przygotowaniu wniosku i opracowaniu wyników (określenie wytrzymałości zmęczeniowej) oraz na udziale w dyskusjach nad ostatecznym kształtem publikacji, a także na sformułowaniu wstępnych wniosków i napisaniu ostatecznej wersji tekstu pracy oraz naniesieniu poprawek sugerowanych przez recenzentów **[udział 70 %, 5 autorów]**,

[A5]: na opracowaniu i zaprojektowaniu metodologii oraz obróbce otrzymanych

wyników balistycznych, a także na przeprowadzeniu procesu badawczego, w szczególności realizacja badań fraktograficznych i przygotowanie publikacji, w tym krytyczny przegląd, komentarz i korekta - łącznie z etapami przed i po publikacji **[udział 60 %, 4 autorów]**,

[A6]: na opracowaniu i zaprojektowaniu metodologii oraz obróbce otrzymanych wyników balistycznych, a także na przeprowadzeniu procesu badawczego, w szczególności: realizacja badań fraktograficznych z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej i sformułowanie wniosków oraz napisanie ostatecznej wersji tekstu pracy **[udział 55 %, 6 autorów]**,

[A7]: na współudziale w opracowaniu koncepcji, sformułowaniu i określeniu nadrzędnych celów oraz założeń badawczych, dokonaniu przeglądu literatury, zaplanowaniu koniecznych eksperymentów, przeprowadzeniu procesu badawczego, w szczególności: realizacja badań mechanicznych (badania statycznego rozciągania mini-próbek, badania fraktograficzne) i strukturalnych (skaningowa i transmisyjna mikroskopia elektronowa) oraz opracowaniu ostatecznych wyników, a także na przygotowaniu publikacji, w tym krytyczny przegląd, komentarz i korekta - łącznie z etapami przed i po publikacji **[udział 55 %, 7 autorów]**,

[A8]: na opracowaniu i zaprojektowaniu metodologii oraz obróbce otrzymanych wyników balistycznych; przeprowadzeniu procesu badawczego, w szczególności: realizacja badań fraktograficznych z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej i sformułowanie wniosków oraz napisanie ostatecznej wersji tekstu pracy **[udział 55 %, 6 autorów]**.

W oparciu o przedłożoną dokumentację i oświadczenia współautorów można uznać, że rola Habilitanta w powstaniu publikacji była wiodąca i istotna. Niektóre prace mają wyraźny charakter interdyscyplinarny, zawierają oprócz zagadnień z inżynierii mechanicznej aspekty badawcze z zakresu dyscypliny inżynieria materiałowa, a współudział innych osób w realizacji specjalistycznych badań (m.in. balistycznych, procesu walcowania, TEM) wynika z ich zakresu i jest całkowicie zrozumiałą.

Parametry bibliometryczne jednotematycznego cyklu 8 publikacji są stosunkowo niskie (sumaryczny *impact factor* (IF) wynosi 8,150); 3 publikacje nie są cytowane w WoS, a 3 cytowane 1 raz). Za przyczyny tak małej cytowalności uważam niszowość tematyki jakim są badania połączeń zgrzewanych wybuchowo, a także krótki okres jaki upłynął od opublikowania części z nich, oraz publikacje w materiałach konferencyjnych.

Tematyka osiągnięcia naukowego przedstawiona przez Habilitanta w 8 publikacjach jest interesująca pod względem poznawczym i aplikacyjnym.

W mojej ocenie prezentowany cykl publikacji stanowi spójną całość. Celem naukowym przedstawionych w nim badań było określenie wpływu obróbki cieplnej na właściwości materiałów warstwowych wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego, poprzez implementację połączonych metod eksperymentalnych wykorzystujących techniki zaawansowanej mikroskopii elektronowej, badania właściwości mechanicznych i próby

balistyczne.

Analizując tematykę cyklu publikacji można zauważyć, że już w pracach powstałych na etapie doktoratu pojawiło się zagadnienie wpływu postprocesowej obróbki cieplnej na mikrostrukturę oraz odporność zmęczeniową blach zgrzewanych wybuchowo, a które stanowią główną tematykę także w cyklu publikacji składających się na osiągnięcie habilitacyjne. Jeżeli badania materiałów zgrzewanych wybuchowo z grupy pierwszej (stal-tytan) [A1, A2], są jedynie rozszerzeniem badań przeprowadzanych w ramach pracy doktorskiej dla nieznacznie innych materiałów, to w dalszych publikacjach zostały twórczo poszerzone w szczególności o materiały warstwowe z metali lekkich. Pod tym względem wskazane w ramach wniosku habilitacyjnego osiągnięcie naukowe stanowi kreatywne rozwinięcie doktoratu zarówno pod kątem badanych materiałów jak i analizy wpływu stosowanego procesu obróbki cieplnej (w tym walcowania na gorąco) na ich właściwości wytrzymałościowe oraz aplikacyjne (próby balistyczne).

Dr inż. M. Wachowski w swoich pracach skupiał się na badaniach makro i mikrostrukturalnych struktur materiałów warstwowych w zależności od zastosowanej obróbki postprocesowej, a które umożliwiły wyjaśnienie przyczyn zmian właściwości mechanicznych badanych materiałów warstwowych po obróbkach cieplnych i ciepłoplastycznych. Przeprowadzone badania eksperymentalne poszerzyły wiedzę w zakresie właściwości zmęczeniowych materiałów warstwowych wytwarzanych metodą wybuchowego łączenia, a także odporności balistycznej.

W mojej opinii cykl powiązanych ze sobą tematycznie publikacji stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w obszarze właściwości materiałów zgrzewanych wybuchowo. Zaprezentowane w publikacjach badania pozwoliły na uzyskanie wyników istotnych z punktu widzenia badań podstawowych, jak i aplikacyjnych.

Za najważniejsze osiągnięcie Dr. M. Wachowskiego w przedstawionym cyklu 8 publikacji, uważam opracowanie podstaw technologii kształtowania właściwości użytkowych materiałów warstwowych poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki postprocesowej.

Ocena aktywności naukowej

Dr inż. Marcin Wachowski jest współautorem łącznie 86 publikacji naukowych, w tym 78 po uzyskaniu stopnia doktora, przy czym sumaryczny Impact Faktor wynosi 156,305; łączna liczba punktów publikacji według wykazu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego wynosi **5889**, indeks Hircha 10 wg bazy Web of Science, a liczba cytowań tych publikacji - 390 wg bazy Web of Science (338 po uzyskaniu stopnia doktora).

Liczbę publikacji, ich jakość oraz uzyskane wskaźniki bibliometryczne, oceniam bardzo wysoko. Osiągnięcia publikacyjne potwierdzają przygotowanie merytoryczne i predyspozycje Habilitanta do prowadzenia badań naukowych.

Z przedstawionej dokumentacji wynika, że po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych dr inż. Marcin Wachowski był kierownikiem dwóch projektów naukowych z zakresu tematyki badania kompozytów z układu ceramika-metal (Miniatura od 2019 r. i Uczelniany Grant Badawczy od 2021 r.), w ramach których współpracował badawczo z

Wydziałem Inżynierii Materiałowej oraz z Wydziałem Chemii Politechniki Warszawskiej. Brał także czynny udział w realizacji 2 projektów we współpracy z Wydziałem Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z zakresu hybrydowych kompozytów ceramika – metal o umocnieniu gradientowym (OPUS 13) oraz kompozytów gradientowych formowanych metodą odlewania odśrodkowego (Centra Badawcze – Priorytetowe Obszary Badawcze, 2021).

Od roku 2019 bierze udział w projekcie w ramach programu TECHMATSTRATEG II („Opracowanie nisko – odpadowej technologii platerowania wybuchowego oraz technologii przetwarzania wielowarstwowych, wysokowytrzymałościowych materiałów lekkich i superlekkich z warstwami reaktywnymi i funkcjonalnymi oraz blach platerowanych wybuchowo metalami reaktywnymi i ich stopami”), złożonym wraz z firmą EXPLOMET oraz pięcioma krajowymi, wiodącymi jednostkami naukowymi (Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Politechnika Warszawska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Politechnika Opolska, Politechnika Częstochowska). W ramach tego projektu jest kierownikiem i głównym wykonawcą zadania realizowanego w Wojskowej Akademii Technicznej, które dotyczy opracowania technologii łączenia materiałów warstwowych wytwarzanych metodą wybuchową. W ramach tej grupy prac badawczych Habilitant przeprowadza próby i badania zmierzające do opracowania podstaw hybrydowych technologii spajania pozwalających pomiędzy materiałami wielowarstwowymi metodą Friction Stir Welding (FSW) oraz spawania wiązką lasera (LBW).

Habilitant współpracował w badaniach połączeń zgrzewanych wybuchowo z wieloma krajowymi jednostkami naukowymi, a jej wynikiem jest szereg wspólnych publikacji. Badania połączeń bimetalicznych zgrzewanych wybuchowo stopów tytanu – stop AA1050 prowadził wspólnie z Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie oraz z Wydziałem Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Akademii Górniczo-Hutniczej, a złączy stopu Inconel 625 – stal P355NH wspólnie z Wydziałem Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Badania dotyczące określenia wpływu obróbki plastycznej na mikrostrukturę i właściwości użytkowe materiałów warstwowych wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego tytanu prowadził w ramach współpracy z jednostką Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mechaniki Precyzyjnej oraz z Katedrą Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej.

W trakcie działalności naukowej po uzyskaniu stopnia doktora Kandydat uczestniczył w realizacji **12** projektów naukowo-badawczych (w tym pięciokrotnie jako kierownik projektu/zadania na WAT).

Habilitant podejmował współpracę badawczą udokumentowaną wspólnymi publikacjami także w zakresie innej tematyki niż materiały warstwowe wytwarzane metodą zgrzewania wybuchowego. Badania struktur kompozytowych o osnowie betonu realizował we współpracy z Wydziałem Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT i Instytutem Techniki Budowlanej, a z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej Politechniki Bydgoskiej badania fraktograficzne próbek z blachy stalowej po próbach oceny ich trwałości zmęczeniowej; brał udział we współpracy z Wydziałem Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w badaniach wpływu

obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne śrub wykonanych ze stali 32CrB3; wykonał także zamawiane ekspertyzy oraz opracowania dotyczące określenia przyczyn uszkodzenia śruby mocowania głowicy silnika 2,0 TDI samochodu Volkswagen oraz określenia przyczyny uszkodzenia uszczelnień pomp układów chłodzenia samochodów osobowych.

W ramach współpracy z National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kijów, Ukraina) przeprowadzał analizy fraktograficzne próbek stopów aluminium badanych w warunkach obciążenia kombinowanego, a współpraca z instytutem badawczym French-German Research Institute of Saint-Louis (Saint-Louis, Francja) umożliwiła badania materiału warstwowego Ti-Al-Al pod kątem odporności balistycznej w warunkach hiperprędkości.

Oceniam bardzo wysoko zaangażowanie Habilitanta w prace badawcze dotyczące szerokiej problematyki i przy współpracy z innymi ośrodkami naukowymi. Obszary badawcze obejmują szerokie spektrum zagadnień z obszaru inżynierii mechanicznej między innymi materiałów warstwowych, materiałów kompozytowych z układu ceramika-metal czy zaawansowanych technik spajania materiałów metalicznych. Tematyka prac po uzyskaniu stopnia doktora jest istotna pod względem naukowym, poznawczym i aplikacyjnym. Pozytywnie oceniam interdyscyplinarność prowadzonych prac z dyscypliny inżynierii mechanicznej uzupełnianych badaniami z zakresu inżynierii materiałowej.

Z analizy dorobku dr inż. Marcina Wachowskiego wynika, że nie jest autorem ani współautorem patentu, zgłoszenia patentowego lub wzoru użytkowego.

Habilitant aktywnie uczestniczył w 26 konferencjach naukowych, przy czym w jednej (International Conference on Recent Advances in Materials & Manufacturing Technologies - Dubaj, 2019) brał udział jako przewodniczący sesji tematycznej dotyczącej zaawansowanych metod łączenia materiałów.

Przed obroną pracy doktorskiej Habilitant odbył sześciomiesięczny zagraniczny staż naukowy w Niemczech w Max-Planck Institut für Plasmaphysik oraz dwumiesięczny staż naukowy w National Institute for Environmental Studies w Japonii. Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora odbył 6 zagranicznych staży szkoleniowych realizowanych w ramach Erasmus+ HE Staff Mobility Agreement for Training (Klaipeda University, Litwa; French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), Francja; Technological Educational Institute of Crete, Grecja; University of Porto, Portugalia; University of Defence, Czechy. Staż w University of Defence w Brnie zaowocował podpisaniem umowy bilateralnej z Wojskową Akademią Techniczną, a staż w French-German Research Institute of Saint-Louis badaniami i publikacją.

Stwierdzam aktywny udział dr inż. Marcina Wachowskiego w zakresie współpracy współpracy i wymiany międzynarodowej.

Habilitant uczestniczy w procesie recenzowania publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych. W latach 2017 – 2022 zrecenzował łącznie **43** publikacje naukowe w czasopismach m.in. Materials i Metals MDPI, Journal of Materials Engineering and Performance, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Alloys and Compounds. W czasopiśmie Materials MDPI pełni funkcję Topic Editor i Reviewer Board Member oraz jako główny edytor sprawuje nadzór nad wydaniem specjalnym pt. "Manufacturing, Heat Treatment and Forming of Advanced Metallic and Ceramic Materials". W czasopiśmie Applied Science jest edytorem wydania specjalnego pt. "Research on the Production and Mechanical Properties of Multilayer Materials". **Oceniam wysoko działalność recenzencką Habilitanta.**

W trakcie działalności naukowo-badawczej po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, Habilitant dwukrotnie (2019, 2020) uzyskał indywidualne stypendium publikacyjne Rektora-Komendanta WAT w grupie pracowników posiadających stopień naukowy doktora, a w roku 2021 otrzymał nagrodę zespołową III stopnia Rektora Politechniki Częstochowskiej za osiągnięcia publikacyjne. W konkursie fotografii mikroskopowej organizowanej przez firmę Pik Instruments, Polskie Towarzystwo Mikroskopii i Micro-Shop otrzymał indywidualną nagrodę II stopnia.

Podsumowując stwierdzam, że dorobek naukowy ilościowy i jakościowy Habilitanta wskazuje na dużą aktywność w wielu obszarach: publikacyjnym, współpracy z ośrodkami naukowymi krajowymi i zagranicznymi, badawczym, recenzenckim i oceniam go jako **dobry**.

Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

Dr inż. Marcin Wachowski działalność dydaktyczną na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej rozpoczął od października 2019 roku, kiedy zmienił stanowisko z adiunkta naukowego na adiunkta badawczo-dydaktycznego. Prowadzi wszystkie formy dydaktyczne z przedmiotów: podstawy grafiki inżynierskiej, grafika inżynierska, techniki wytwarzania 2; jest promotorem dwóch prac inżynierskich. Dla studentów Szkoły Doktorskiej WAT prowadzi ćwiczenia i wykłady z przedmiotu wysokoenergetyczne metody spajania materiałów konstrukcyjnych oraz zaawansowane metody badania materiałów. Nie pełni funkcji promotora pomocniczego w przewodach doktorskich.

Habilitant od 2015 roku jest kierownikiem Pracowni Mikroskopii Elektronowej Wydziału Inżynierii Mechanicznej WAT, dla której pozyskiwał środki na modernizację wyposażenia laboratorium (m.in. cyfrowa kamera do TEM, systemu do czyszczenia plazmą).

W 2017 roku pełnił funkcję sekretarza komitetu organizacyjnego XVI Krajowej Konferencji Mechaniki Pękania, a w 2019 roku sekretarza ds. informatycznych XXIX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn. Od 2020 roku jest członkiem międzynarodowego komitetu naukowego konferencji International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS, która odbywa się regularnie na Litwie.

Podsumowując dorobek dydaktyczny i organizacyjny dr inż. Marcina Wachowskiego można stwierdzić, że w każdym z tych obszarów wykazał swoje zaangażowanie.

Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z treścią wniosku stwierdzam, że przedłożone do oceny materiały dotyczące postępowania habilitacyjnego dr. inż. Marcina Wachowskiego są przygotowane w sposób umożliwiający ocenę głównego osiągnięcia naukowego, jak również Jego aktywności naukowej i całokształtu dorobku.

Na podstawie dokonanej oceny osiągnięcia naukowego „Analiza wpływu obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę połączeń stopów metali lekkich wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego”, przedstawionego w cyklu ośmiu publikacji naukowych stwierdzam, że stanowi istotny wkład do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Zaprezentowane osiągnięcie habilitacyjne dowodzi biegłości Habilitanta w zakresie badania połączeń zgrzewanych wybuchowo. Dr inż. Marcin Wachowski wykazał się wiedzą praktyczną i teoretyczną w wyjaśnianiu obserwowanych zjawisk oraz naukową dojrzałością w zakresie rozwiązywanych problemów badawczych. Po uzyskaniu stopnia doktora wykazał się aktywnością i znacząco powiększył swój dorobek naukowy. Stwierdzam, że dr inż. Marcin Wachowski wykazał się kompetencją i dojrzałością w stopniu uzasadniającym uzyskanie samodzielności naukowej i spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U.2021r. poz.1668). **Popieram wniosek o nadanie dr inż. Marcinowi Wachowskiemu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

