



dr hab. inż. Jacek Górka – Prof. PŚ  
Katedra Spawalnictwa  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice



Gliwice, dn. 05.09.2023r.

## Recenzja

dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Pana dra inż. **Pawła Kustronia** w związku z ubieganiem się przez Niego o stopień naukowy doktora habilitowanego w dziedzinie **Nauk Inżynieryjno-Technicznych** w dyscyplinie **Inżynieria Mechaniczna** na podstawie autorskiej monografii habilitacyjnej pt.:  
**„Zgrzewanie hybrydowe warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych”**.

Podstawą przygotowania recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna nr 570/32/RDND07/2021-2024 z dnia 13 lipca 2023r.

Ocenę merytoryczną dorobku dra inż. Pawła Kustronia opracowałem na podstawie następujących materiałów:

1. Wniosek przewodni
2. Dane wnioskodawcy
3. Kopia dyplomu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora nauk technicznych.
4. Autoreferat
5. Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny
6. Dokumenty potwierdzające osiągnięcia wskazane w autoreferacie
7. Autorska monografia pt. „Zgrzewanie hybrydowe warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych”.

### 1. Ogólna charakterystyka Habilitanta

Dr inż. Paweł Kustron jest absolwentem kierunku Mechanika i Budowa Maszyn (ITS) na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. W trakcie drugiego roku studiów na Wydziale Mechanicznym na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, dzięki wyróżniającym wynikom w nauce, otrzymał propozycję przejścia na Indywidualny Tok Studiów. Pozwoliło mu to na rozszerzenie zakresu zajęć, w których brał udział (np. o kursy mechaniki analitycznej, fraktali i innych) oraz realizację dwóch prac dyplomowych w zróżnicowanych specjalnościach (w obrębie kierunku MiBM). Pierwsza z prac dyplomowych "Badania ultradźwiękowe zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym" pod opieką prof. dr hab. inż. Andrzeja Ambroziaka obejmowała szeroko pojętą tematykę monitorowania procesów spawalniczych i była realizowana w obrębie specjalności: Procesy, Maszyny i Systemy Produkcyjne. Druga praca dyplomowa pt. "Tłumienie drgań w konstrukcji mechanicznej z

wykorzystaniem układu adaptacyjnego z kompozytem MRC", była realizowana pod opieką prof. dr hab. inż. Jerzego Kalety. Obejmowała tematykę nowoczesnych materiałów z grupy smart tj.: kompozytów magnetoreologicznych MRC (magnetorheological composites), stosowanych w aktywnym tłumieniu drgań konstrukcji mechanicznych. Ta praca została zrealizowana w ramach specjalności Inżynieria Materiałów Konstrukcyjnych. Finalnie Habilitant uzyskał tytuł zawodowy magistra inżyniera w 2004 roku z dwiema specjalnościami. W październiku 2004 r. podjął studia doktoranckie w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Rozprawę doktorską przygotowywał w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji, a jego zainteresowania naukowe koncentrowały się na monitorowaniu procesów spawalniczych (w tym zgrzewania) z wykorzystaniem wieloprzetwornikowych głowic ultradźwiękowych. W latach 2004 do 2010 odbywał studia doktoranckie na Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Mechanicznym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji. W trakcie trwania studiów doktoranckich pomiędzy 16.07.2008 a 30.04.2010 odbył staż naukowy oraz pracował jako asystent dydaktyczny na Uniwersytecie w Windsor, Ontario, Kanada. Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn został mu nadany w 2010 roku uchwałą Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. Tematem jego rozprawy doktorskiej było „Monitorowanie procesu zgrzewania oporowego punktowego wieloprzetwornikową głowicą ultradźwiękową”. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak a promotorem pomocniczym prof. Roman Gr. Maev, University of Windsor, Ontario, Kanada. W dniu 1.10.2010 roku został zatrudniony jako asystent naukowo-dydaktyczny na Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Mechanicznym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji. W dniu 1.02.2011 roku został zatrudniony jako adiunkt naukowo-dydaktyczny na Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Mechanicznym w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji, obecnie w Katedrze Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii. Przed uzyskaniem stopnia doktora jego prace naukowe koncentrowały się na głównie na procesach zgrzewania rezystancyjnego wraz z oceną uzyskanych połączeń zarówno z wykorzystaniem badań niszczących jak i nieniszczących, w tym badanych ultradźwiękowo. Po uzyskaniu stopnia doktora swoje zainteresowania naukowe skierował na trzy aspekty technologiczno-naukowe. Były to różnego rodzaju procesy zgrzewania (oporowe, ultradźwiękowe), głównie ukierunkowane na łączenie materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle automotive, procesy monitorowania parametrów zgrzewania oraz analiza niezgodności zgrzewalniczych z zastosowaniem nowoczesnych rozwiązań opartych na badaniach ultradźwiękowych. Istotnym kierunkiem jego zainteresowań naukowych były również symulacje numeryczne prowadzone z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Ta zdobyta wiedza z różnych dziedzin naukowych ukierunkowała jego obszar działalności naukowo-badawczej. Głównym obszarem jego zainteresowań stały się materiały o strukturze warstwowej np. MPC (Metal Plastic Composites) i procesy łączenia oparte na zgrzewaniu rezystancyjnym, pozwalające na uzyskanie połączeń o wysokiej jakości i możliwości zastosowania tych rozwiązań w produkcji przemysłowej ukierunkowanej na przemysł motoryzacyjny. W ramach prowadzonych prac skonstruował trzy stanowiska badawcze zgrzewania oporowego materiałów MPC (wspomagane indukcyjnie, bocznikowo oraz ultradźwiękowo), które pozwoliły na porównanie jakości wykonywanych złączy oraz ocenę potencjału wdrożeniowego rozważanych technologii. W 2023 otrzymane wyniki zebrał i opisał w autorskiej monografii habilitacyjnej pt.: „Zgrzewanie hybrydowe warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych”.

## 2. Charakterystyka i ocena autorskiej monografii stanowiącej osiągnięcie naukowe

Wniosek dra inż. Pawła Kustronia do Rady Doskonałości Naukowej o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk Inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna w punkcie 4. Autoreferatu zawiera opis osiągnięcia, o których mowa w art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.). Opis tego osiągnięcia w postaci autorskiej monografii Habilitant zatytułował „Zgrzewanie hybrydowe warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych”, a została ona opublikowana w roku 2023 przez Wydawnictwo Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji, ISBN 978-83-7789-703-4 (wydawnictwo w roku opublikowania monografii ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a ustawy). Kompozyty metalowo-polimerowe MPC (Metal Plastic Composites) to materiały warstwowe, złożone zazwyczaj z polimerowego rdzenia pokrytego z obu stron metalową powłoką. Spajanie tych materiałów jest aktualnie istotnym problemem, który w dużym stopniu hamuje ich rozwój oraz wdrażanie w nowoczesnych konstrukcjach np. samochodowych czy lotniczych. Z uwagi na fakt, że materiały MPC są stosunkowo nowym rozwiązaniem, wiedza na ich temat jest szczątkowa, a dane literaturowe bardzo ograniczone, dlatego uważam za podjęcie badań w tym kierunku za bardzo celowe, potrzebne i wnoszące nową wiedzę w dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna.

Monografia habilitacyjna dra inż. Pawła Kustronia zawiera 176 stron wraz ze spisem treści w języku polskim, wykazem oznaczeń i skrótów, bibliografią) i streszczeniami w języku polskim i angielskim. Recenzentami wydawniczymi monografii byli: prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski z Politechniki Wrocławskiej oraz dr hab. inż. Zygmunt Mikno, Górnośląski Instytut Technologiczny. Przegląd literatury oparty jest na 134 pozycjach literaturowych obcojęzycznych i krajowych, w 11 z nich Habilitant jest współautorem. Przegląd piśmiennictwa obejmuje zarówno artykuły z czasopism naukowych, materiały konferencyjne jak i opracowania książkowe z krajowego i światowego obiegu literatury. Cytowane źródła literaturowe były w większości opublikowane w ostatnich latach, są różnorodne i pozwoliły na prawidłową analizę badanego zagadnienia. Opracowanie ma klasyczny układ, Autor podzielił monografię na siedem głównych rozdziałów: 1. Wprowadzenie, 2. Problematyka spajania materiałów MPC, 3. Metody zgrzewania w aspekcie łączenia materiałów MPC, 4. Charakterystyka metod wspomagania procesu zgrzewania, 5. Modelowanie procesów zgrzewania hybrydowego, 6. Badanie procesów zgrzewania materiałów MPC i 7. Wnioski. Na uwagę zasługuje fakt, że praca napisana jest bardzo poprawnie pod względem językowych i terminologicznym jak również edycyjnym.

Mimo, że układ pracy jest dość typowy dla prac technologicznych, to niestety Habilitant nie zawarł w opracowaniu tezy ani celów badawczych (naukowych), które chciałby osiągnąć. Cele badawcze pojawiają się dopiero w autoreferacie, natomiast brak przyjęcia tezy utrudnia Autorowi przedstawienie osiągnięć, które stanowią wkład naukowy w rozwój obszaru dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Cele naukowe, które założył sobie Habilitant dotyczyły:

- opracowania skutecznej metody łączenia materiałów typu MPC (metal-polimer-composites) z zastosowaniem technologii zgrzewania. W ramach podjętych zadań opracowano i porównano trzy autorskie metody zgrzewania hybrydowego,
- identyfikacja zjawisk i mechanizmów towarzyszących procesowi spajania materiałów MPC. W tym celu przeanalizowano możliwość zgrzewania zróżnicowanych materiałów z grupy MPC, stosując opracowane metody łączenia. Posłużono się tutaj metodami numerycznymi np. MES oraz nowoczesnymi narzędziami badawczymi (skaningową mikroskopią akustyczną oraz elektronową) do obserwacji struktury wewnętrznej oraz oceny jakości wytworzonych połączeń zgrzewanych,
- przeglądu i oceny obecnie stosowanych metod łączenia materiałów z grupy MPC.

Co do dwóch pierwszych nie mam zastrzeżeń, to bardzo wartościowe pod względem naukowym i poznawczym obszary wnoszące nową wiedzę w zakres możliwości łączenia kompozytów metalowo-polimerowych i ich zastosowania w praktyce. Moim zdaniem, ostatni przedstawiony przez Habilitanta cel nie powinien być tutaj wyszczególniony, gdyż w przypadku chęci szukania nowych rozwiązań w zakresie prac naukowych konieczne jest dokonanie rzetelnego przeglądu stanu zagadnienia w kraju i na świecie.

W swojej monografii Habilitant po analizie zagadnienia, z wyszczególnieniem luki w dotychczasowej wiedzy omawiana metodykę badań oraz wyniki przeprowadzonych badań i formułuje wnioski. Niestety nie można ich odnieść do tezy pracy, gdyż nie została ona sformułowana. Monografia składa się z dwóch części. Pierwsza, stanowiąca rozdziały od 1 do 4, opisuje stan wiedzy na temat materiałów MPC oraz problematyki ich spajania. Tą część monografii oceniam wysoko. Dokonana analiza jest dogłębna i opisuje zarówno materiały kompozytowe, stale i stopy aluminium stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, problemy łączenia tych materiałów wraz z dotychczasowymi metodami łączenia. Do głównych metod zaliczyć można tutaj nitowanie, klinczowanie lub łączenie przez kształtowanie plastyczne np. wywijanie, rąbkowanie oraz klejenie. Habilitant wskazuje, że wymienione metody wykazują szereg istotnych wad. Metoda klejenia jest procesem, który wymaga bardzo precyzyjnego przygotowania powierzchni, skomplikowanego i czasochłonnego procesu nakładania i utwardzania klejów, które często musi odbywać się w podwyższonej temperaturze. Wymagane jest tu specjalistyczne oprzyrządowanie do pozycjonowania i zapewnienia odpowiedniego docisku w miejscu łączenia. Ponadto wykazują one wrażliwość na temperaturę i warunki pracy oraz trudny demontaż. Zastosowanie kształtowania poprzez wywijanie lub rąbkowanie stanowi rozwiązanie, które z powodzeniem zastosowano w zewnętrznych panelach drzwi samochodowych. Wadą tej metody jest złożona i kosztowna automatyzacja procesu, co uniemożliwia ich zastosowanie w małych partiach produkcyjnych. Mocowanie mechaniczne przy użyciu śrub lub nitów jest bardzo częstym rozwiązaniem aplikowanym do łączenia materiałów MPC, szczególnie szeroko rozpowszechnione w pojazdach transportowych. Powstałe w ten sposób połączenia można łatwo montować i demontować bez ryzyka uszkodzenia elementów wykonanych z kompozytów warstwowych. Wadę tego rozwiązania są wysokie i skoncentrowane naprężenia. Ponadto mocowanie mechaniczne zwiększa całkowitą masę konstrukcji ze względu na zastosowanie śrub i nitów. Jedną z dobrze rokujących metod łączenia materiałów kompozytowych jest zgrzewanie rezystancyjne jednak proces ten wymaga pewnych modyfikacji poprzez wspomaganie w

pierwszej jego fazie, w celu usunięcia warstwy kompozytu i możliwości zetknięcia się warstw zewnętrznych, które przewodzą prąd elektryczny. Habilitant opisał w części literaturowej obecny stan wiedzy dotyczący możliwości zgrzewania rezystancyjnego materiałów kompozytowych MPC oraz możliwości wspomagania tego procesu w celu uzyskania połączeń o zadawalającej jakości. W szczególności zwrócił tutaj uwagę na zastosowanie zewnętrznego pola magnetycznego, stosowanie nakładek wspomagających oraz zastosowane narzędzia bocznikującego prąd zgrzewania. Przeprowadzony przez Habilitanta przegląd literatury pozwolił na sformułowanie celów pracy (przedstawione w autoreferacie) i przedstawienie programu badań, który niestety również nie jest bezpośrednio wyeksponowany. Druga część opracowania to rozdziały 5 i 6, opisujące badania własne autora oraz wnioski. Część przedstawionych tu rozwiązań oraz wyników została opracowana w ramach krajowych oraz międzynarodowych projektów badawczych jak np. „HYBRISONIC – Wspomaganie ultradźwiękowe procesów łączenia materiałów hybrydowych”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Inicjatywy CORNET 25. Ponadto wybrane rozwiązania są przedmiotem zgłoszeń patentowych. Habilitant wskazał, że brak jednego z istotnych czynników procesu jakim jest skuteczne źródło ciepła, zdolne nagrzać materiały nieprzewodzące do temperatury uplastycznienia, uniemożliwia poprawny przebieg procesu łączenia z wykorzystaniem zgrzewania rezystancyjnego. Ponadto występowanie warstw o ograniczonej przewodności elektrycznej zakłóca proces nagrzewania obszarów styku łączonych materiałów, prowadząc w wielu przypadkach do niekontrolowanego przebiegu procesu, np. ekspulsji. Habilitant wskazał, że rozwiązaniem wspomnianego problemu może być zastosowanie dodatkowych źródeł ciepła, mogących funkcjonować w warunkach ograniczonej przewodności elektrycznej jak np. metody indukcyjnej, dodatkowego elementu bocznikującego lub zastosowania fal ultradźwiękowych i tworzenia metod hybrydowych. W niniejszej pracy rozważono właśnie te trzy metody wspomagania klasycznego procesu zgrzewania rezystancyjnego w pierwszej fazie jego przebiegu, kiedy to nie występuje jeszcze kontakt prądowy pomiędzy warstwami powłokowymi MPC. Wszystkie te metody są zdolne do wstępnego nagrzewania obszaru złącza i umożliwienia formowania (usuwania) nieprzewodzącego rdzenia polimerowego z obszaru zgrzewania. Celem głównym badań podjętych przez Habilitanta było opracowanie skutecznych metod łączenia kompozytów metalowo-polimerowych MPC z zastosowaniem procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego. Do badań przyjęto dwa rodzaje połączeń materiałów MPC występujących na rynku. Pierwsze z nich to połączenia materiału o nazwie handlowej Litecor o grubości 1,3 mm z blachą stalową DP600, o grubości 0,8 mm, która jest szeroko stosowana np. w przemyśle samochodowym. Drugą parę stanowiło połączenie tych samych materiałów Litecor + Litecor o grubości 1,3 mm. Te dwie kombinacje połączeń zgrzewanych pozwoliły porównać potencjał technologiczny trzech proponowanych metod wspomagania procesu rezystancyjnego tj.:

- metody hybrydowej indukcyjno-rezystancyjna, nazywanej dalej indukcyjną,
- metody hybrydowej bocznikowo-rezystancyjna, nazywanej dalej bocznikową,
- metody hybrydowej ultradźwiękowo-rezystancyjna, nazywanej dalej ultradźwiękową.

Osiągnięcie założonych celów pracy wymagały od Habilitanta przygotowania właściwego planu badań w oparciu o zdobyte doświadczenie w zakresie symulacji numerycznych

procesów zgrzewania, budowy stanowisk zgrzewalniczych oraz stanowisk pomiarowych pozwalających na monitorowanie parametrów procesu zgrzewania rezystancyjnego. W ramach badań Habilitant przeprowadził szereg prób mających na celu identyfikację zjawisk i mechanizmów fizycznych towarzyszących istotnym etapom zgrzewania, dobór parametrów procesowych, ocenił jakość powstałych złączy oraz dokonał wyboru właściwej metody wspomagania procesu zgrzewania hybrydowego. W Rozdziale 5, Autor opisuje modelowanie procesów zgrzewania hybrydowego. Próba zastosowania metod numerycznych dobrze świadczy o podejściu naukowym do badanego problemu. Część pracy dotycząca modelowania numerycznego badanego procesu, została umieszczona przed rozdziałem dotyczącym samych badań – jakby miała stanowić wstęp do badań. Autor tłumaczy, że przeprowadzone analizy trzech metod (zastosowania elementów bocznikującego, podgrzewania indukcyjnego oraz wspomagania falami ultradźwiękowymi) stanowią tzw. wstępne analizy fizycznego ła. Jest to dopuszczalna forma, choć obciążona pewnym ryzykiem, ze względu na brak danych do kalibracji i walidacji stosowanego modelu obliczeniowego. W analizie z elementem bocznikującym, podano jako warunki brzegowe i początkowe, natężenie prądu zasilającego elektrody – to akurat jest obciążenie modelu a nie warunek brzegowy czy początkowy. Tablica 5.1 również nie zawiera warunków brzegowych, a raczej wybrane własności zgrzewanych materiałów. Wspomniano również o tym, że analizy miały na celu wskazanie stref złącza szczególnie narażonych na degradację oraz pozwoliły na ustalenie prawidłowych parametrów procesu. Przebieg tych badań oraz wyniki nie zostały jednak w monografii dokładnie opisane, a mogłyby stanowić jej bardzo ciekawą część. Uwaga dotycząca podawania danych materiałowych jako warunków brzegowych dotyczy również drugiego modelu z zastosowaniem podgrzewania indukcyjnego. Sam opis analizy i porównanie z wynikami uzyskanymi w eksperymentach jest już znacznie lepszy. Wątpliwości budzi jedynie prawidłowy dobór ilustracji (rys. 5.9) – w tym miejscu dobrze byłoby porównać pomiar termowizyjny z analogicznym wynikiem przeprowadzonej symulacji. W modelu ze wspomaganie ultradźwiękowym Autor również nie do końca poprawnie i w sposób jasny definiuje warunki brzegowe modelu na rysunku 5.13. Dodatkowo nie przedstawia pełnych parametrów procesu dla analizowanych w modelowaniu przypadków (rys. 5.14), przez co odtworzenie tych analiz jest niemożliwe dla czytelnika. Nie zamieszczono również wyników analizy procesu zgrzewania z użyciem sonotrody opracowanej na podstawie prowadzonych obliczeń opisywanych w rozdziale 5.4. Ogólnie, należy stwierdzić, że zastosowanie aparatu matematycznego w celu określenia przebiegu pewnych zjawisk badanego procesu stanowi o dojrzałości naukowej Autora. Jednak pewien niedosyt pozostawia chaotyczność przedstawienia opisu oraz wyników tych analiz, a także nie do końca poprawne zilustrowanie wyników oraz weryfikacji tych modeli. Rozdział ten stanowi ciekawą część recenzowanej monografii, choć Autor nie ustrzegł się wspomnianych wyżej błędów i nie wykorzystał w pełni potencjału analiz numerycznych. Mimo tych uwag uważam że, ta część pracy jest bardzo ważna i potrzebna, wykazuje skuteczność zaproponowanych rozwiązań jako prostego i jednocześnie skutecznego narzędzia obliczeniowego, pozwalającego na projektowanie właściwości złączy zgrzewanych oraz dostarcza dodatkowej wiedzy na temat przebiegu, zachodzących zjawisk i ostatecznie uzyskanych wyników w procesie zgrzewania rezystancyjnego materiałów kompozytowych MPC. Uzyskane wyniki pozwoliły na dobranie odpowiedniej strategii podgrzewania polimerowego rdzenia MPC oraz wstępny dobór

parametrów zgrzewania rezystancyjnego. Ze względu na obecność polimerowego rdzenia materiału MPC w obszarze zgrzewania nie jest możliwe przeprowadzenie procesu zgrzewania rezystancyjnego do czasu, kiedy nie zostanie on usunięty, a metalowe powłoki nie zostaną doprowadzone do styku. Dlatego w rozdziale 6. Badanie procesów zgrzewania materiałów MPC, Habilitant przedstawił koncepcje trzech metod łączenia materiałów MPC oparte na procesie zgrzewania rezystancyjnego punktowego ze wspomaganiami przy użyciu elementu bocznikującego, indukcyjnego oraz ultradźwiękowego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w celu dokonania weryfikacji wspomnianych metod Autor musiał zbudować odpowiednie stanowiska badawcze oparte na inwertorowej zgrzewarce rezystancyjnej ZGI-10. W skład stanowiska wchodził układ pomiarowy wyposażony w szereg czujników oraz urządzeń do akwizycji danych przeznaczonych do monitorowania poprawności przebiegu procesu. Pozwoliło to na wykrywanie i minimalizację skutków zjawiska ekspulsji. Habilitant dokonał pomiarów prądu zgrzewania, napięcia i rezystancji dynamicznej. Ponadto zarejestrował przemieszczenie, przyspieszenie górnej elektrody oraz siłę docisku. Zbudowane i zweryfikowane stanowiska badawcze stanowią bardzo dużą wartość zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym, mogącym poszerzyć zakres stosowania kompozytów typu MPC w przemyśle samochodowym i lotniczym. Na podkreślenie zasługuje fakt, że stanowiska badawcze zostały skonstruowane tak, aby umożliwiły łatwą realizację wyżej wymienionych procesów. Na stanowiskach dokonano doboru parametrów procesów formowania polimeru, w tym czasu nagrzewania, poziomu dostarczanej energii cieplnej jak również siły docisku elektrod zgrzewarki. Następnie dobrano parametry zgrzewania rezystancyjnego, które pozwoliły na

uzyskanie połączeń zgrzewanych o najwyższej możliwej do uzyskania jakości, średnicy jądra oraz wytrzymałości. W rozdziale 6.3. Specyfikacja metod zgrzewania, Habilitant dokonał optymalizacji parametrów poszczególnych odmian zgrzewania, co pozwoliło mu na wykonanie złączy do badań wytrzymałościowych oraz oceny ich jakości. Wykonane złącza Autor poddał badaniom metalograficznym w celu oceny ich struktury wewnętrznej, w szczególności geometrii jądra zgrzeiny i obecności niezgodności spawalniczych. Ponadto w niektórych przypadkach, gdzie wymagana była bardziej szczegółowa analiza struktury wewnętrznej złącza, zastosowano skaningową mikroskopię elektronową (SEM) na mikroskopie elektronowym TESCAN Vega 3, badaniom topologii powierzchni przy użyciu mikroskopu świetlnego z oprogramowaniem do analizy obrazu, 3D Keyence VHX-6000, próbie ścinania, ponadto dla metody hybrydowej ultradźwiękowo-rezystancyjnej wykonano próby odrywania zgrzein, gdzie przyłożona siła działa w kierunku prostopadłym do powierzchni złącza. Po każdej próbie dokonywano również pomiaru średnicy jądra zgrzeiny w dwóch prostopadłych płaszczyznach oraz oceny sposobu zniszczenia złącza. Ten zakres pracy budzi mój niedosyt. Szkoda, że Habilitant nie wykonał, żadnych badań pozwalających na określenie mikrostruktury połączenia, która ma znaczny wpływ na własności wytrzymałościowe, a dostarczone ciepło podczas zgrzewania istotnie wpływa na zmiany strukturalne i fazowe, które decydują o jakości uzyskanych połączeń. Dodatkowo należało wykonać pomiary twardości, które pozwoliłyby na ocenę oddziaływania cyklu cieplnego zgrzewania na strukturę i własności wytrzymałościowe i plastyczne. Należy pamiętać że poprawne złącze spawane/zgrzewane to nie tylko takie które jest poprawne pod względem geometrycznych, ale również musi się charakteryzować odpowiednią strukturą, która

zapewnia własności wytrzymałościowe i plastyczne. Na uwagę natomiast, zasługuje zastosowana do diagnostyki połączeń zgrzewanych skaningowa mikroskopia akustyczna SAM. Metoda ta pozwala precyzyjnie określić podstawowe parametry złącza, takie jak średnica, głębokość wgniotu a przede wszystkim zweryfikować połączenie pod względem obecności wewnętrznych niezgodności spawalniczych. Możliwe jest wykrycie pęcherzy, porów, wtrąceń oraz innych niezgodności stanowiących reflektor dla propagującej poprzez obszar zgrzeiny fali ultradźwiękowej. W badaniach stosowano urządzenie firmy OKOS NDT CF-330 wyposażone w głowicę ultradźwiękową o częstotliwości środkowej 20 MHz pozwalające na rejestrację obrazu typu B-scan (w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni próbki) i C-scan (w płaszczyźnie leżącej na styku łączonych blach). Habilitant wykazał, że zaproponowana przez niego metoda SAM jest skutecznym narzędziem, w odniesieniu do badania struktury wewnętrznej połączeń zgrzewanych. Pozwala jednoznacznie i nieniszcząco identyfikować istotne niezgodności zgrzewalnicze, a także dokonywać pomiarów geometrii jądra zgrzeiny, co jest istotne z punktu widzenia oceny i kwalifikacji złącza do danej grupy jakościowej. Całość monografii kończą wnioski o charakterze poznawczym i użytkowym w których autor wypunktował najistotniejsze aspekty wynikające z przeprowadzonych badań. Wykazał, że wszystkie z wymienionych metod zgrzewania materiałów MPC pozwalają na uzyskanie złączy o porównywalnych właściwościach wytrzymałościowych. Główną różnicą pomiędzy badanymi procesami jest czas wykonania złącza oraz jakość i estetyka. Złącza o najwyższej jakości uzyskano metodą wspomaganą ultradźwiękowo. Zostały one wykonane w najkrótszym czasie. Metoda ta ma zdecydowanie najwięcej zalet spośród rozważanych trzech technologii zgrzewania.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że Habilitant opracował skuteczną technologię zgrzewania rezystancyjnego materiałów kompozytowych MPC. Skonstruował trzy stanowiska badawcze (wspomagane indukcyjnie, bocznikowo oraz ultradźwiękowo) pozwalające na porównanie jakości wykonywanych złączy oraz ocenił potencjał wdrożeniowy rozważanych technologii. Dodatkowo opracował tabelę podstawowych parametrów w analizowanych procesach zgrzewania hybrydowego. Wykazał, że najwyższym potencjałem technologicznym charakteryzuje się stanowisko oparte na hybrydowej metodzie ultradźwiękowo-rezystancyjnej. Zaprezentował demonstracyjne stanowisko składające się z zgrzewarki inwertorowej prądu stałego, wyposażonej w przetwornik ultradźwiękowy mocy sprzężony z sonotrodą spełniającą również rolę elektrody, generatora z interfejsem do wprowadzania parametrów pracy układu ultradźwiękowego oraz sterownika PLC z dotykowym ekranem, umożliwiającym wprowadzanie parametrów zgrzewania rezystancyjnego (prąd, siła docisku, czasy) i czas działania obróbki ultradźwiękowej. Dzięki przeprowadzonym badaniom można stwierdzić, iż istotne rozwinięto wiedzę na temat problematyki zgrzewania warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych. Przedstawiona do oceny monografia jest bardzo wartościowa, ale w odniesieniu do całości ma się wrażenie, że przypomina ona swoją budową i charakterem pracę doktorską, a Autor trochę zaniedbał podkreślenie roli swoich badań w zakresie poszerzenia wiedzy związanej z rozwojem dyscypliny naukowej Inżynierii Mechanicznej i nowościami naukowymi jakie niewątpliwie ta praca wnosi. Mimo moich pewnych uwag i zastrzeżeń, wyniki badań i analiz przedstawione w monografii moim zdaniem mają dużą wartość poznawczą, zarówno



naukową jak i praktyczną. Przedstawiona przez Habilitanta, autorska technologia łączenia kompozytów MPC zweryfikowana na zbudowanych przez niego stanowiskach stanowi postęp w zakresie możliwości łączenia takich materiałów z wykorzystaniem technologii spawalniczych i wyróżnia się na tle doniesień literaturowych z tego zakresu o zasięgu światowym. Przedstawione przez Habilitanta osiągnięcia naukowe mają charakter interdyscyplinarny zarówno z zakresu Inżynierii Mechanicznej jak i Inżynierii Materiałowej. Biorąc jednak pod uwagę zaprezentowaną metodykę badań, urządzenia i uzyskane wyniki uważam, że powinno być rozpatrywane w zakresie dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

**W moim przekonaniu przedstawione osiągnięcie naukowe wnosi wystarczający wkład w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.**

### **3. Charakterystyka i ocena dorobku naukowo-badawczego**

Oprócz autorskiej monografii habilitacyjnej Habilitant przed doktoratem był współautorem dwóch rozdziałów książek dotyczących tematyki kontroli jakości zgrzein punktowych, a po doktoracie współautorem rozdziału monografii dotyczącej zjawiska ekspulsji w procesie zgrzewania rezystancyjnego oraz rozdziału książki związanej z badaniami nieniszczącymi złączy spajanych, (Załącznik nr 4). Dr inż. Paweł Kustron jest współautorem 35 artykułów naukowych, w tym 23 artykułów przed uzyskaniem stopnia doktora. 10 artykułów zostało opublikowanych w czasopismach posiadających współczynnik wpływu Impact Factor (Lista fildelfijska). Wskaźniki bibliometryczne Habilitanta wskazują (dane na dzień 23.08.2023 r.) wg bazy Scopus na indeks Hirscha  $h = 6$  przy liczbie cytowań 125 i liczbie publikacji 23, a wg Web of Science –  $h = 6$  przy liczbie cytowań 86 (bez samocytowań) i liczbie publikacji 15. Wg dokumentacji habilitacyjnej, sumaryczny współczynnik wpływu wszystkich Jego publikacji wynosi,  $IF=21,695$ . Przedstawiony dorobek naukowy świadczy o aktywności naukowej Habilitanta, jednak liczba jego publikacji w czasopismach o zasięgu światowym (posiadających IF) jest stosunkowo niewielka.

Mimo to dorobek naukowy dra inż. Pawła Kustronia oceniam jako wystarczający do ubiegania się o tytuł doktora habilitowanego w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Na uwagę zasługuje aktywność Habilitanta związana z budową stanowisk badawczych, wykorzystywanych do celów dydaktycznych i eksperymentalnych w laboratorium spawalnictwa w Katedrze Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, opisane w załączniku 4 dokumentacji. Dr inż. Paweł Kustron brał udział w 6 konferencjach, w tym 3 zagranicznych i 1 międzynarodowej oraz był współautorem 23 innych referatów prezentowanych na konferencyjnych krajowych i międzynarodowych. Liczba wystąpień Habilitanta nie jest zbyt imponująca.

Habilitant był kierownikiem i głównym wykonawcą projektu NCN – Miniatura 5 – „Opracowanie metody detekcji i predykcji zjawiska ekspulsji w procesie zgrzewania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych”, DEC-2021/05 / X / ST8 / 00580). Ponadto uczestniczył w realizacji 2 projektów badawczych międzynarodowych: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz, Germany, Belgian Welding Institute, Gandawa, Belgia. Był wykonawcą 5 projektów finansowanych przez NCBiR oraz 1 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Habilitant jest członkiem Dolnośląskiej Sekcji Spawalniczej SIMP - Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich. Był recenzentem artykułów kierowanych do publikacji w czasopismach naukowych, w tym 4 indeksowanych w bazie Journal of Citation Reports (JCR) takich jak: Archives of Civil and Mechanical Engineering, Journal of Process Mechanical Engineering, Design and Applications, Journal of Engineering Manufacture. Był również recenzentem publikacji konferencyjnych oraz innych czasopism krajowych. Habilitant nie był członkiem w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism naukowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje działalność patentowa Habilitanta. Dr inż. Paweł Kustroń jest współautorem 6 patentów i 2 zgłoszeń patentowych, związanych z prowadzoną przez siebie działalnością naukową. Ta działalność niewątpliwie ograniczyła możliwość publikacji uzyskiwanych wyników na bieżąco (co tłumaczy stosunkowo skromny dorobek publikacyjny).

Habilitant wykazał się również współpracą z innymi jednostkami naukowymi w kraju i za granicą, dzięki czemu odbył staże naukowe oraz przygotował wspólne prace naukowe. Habilitant współpracował z takimi jednostkami krajowymi jak: ITIR – Instytut Tele i Radiotechniczny, Warszawa, współpraca w zakresie opracowywania konstrukcji i budowy układów ultradźwiękowych dużej mocy, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Gliwice, realizacja wspólnych projektów badawczych, w tym w ramach konsorcjum 6 jednostek naukowych i firm NCBR – PBS3/B4/12/2015, INWELD, IPPT PAN Zakład Mechaniki Doświadczalnej Pracownia Badań Nieniszczących, Politechnika Warszawska, współpraca w zakresie rozwoju nowoczesnych technik ultradźwiękowej diagnostyki połączeń spajanych, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz, Niemcy oraz Belgian Welding Institute, Gandawa, Belgia, współpraca w ramach międzynarodowego konsorcjum w programie CORNET/25/2/2019 - (Hybrysonic) „Wspomaganie ultradźwiękowe procesów łączenia materiałów hybrydowych”, Firma Harms&Wende z Hamburga, Niemcy, IDIR - Institute for Diagnostic Imaging Research, University of Windsor, Ontario, Kanada. Współpracował również z firmami przemysłowymi takimi jak: ASPA – współpraca w zakresie badania procesów zgrzewania rezystancyjnego, rozwoju stanowisk zgrzewalniczych, metod monitorowania procesów zgrzewalniczych oraz maszyn w technologii inwertorowej, SITECH – rozwój technologii spawania laserowego konstrukcji siedzeń samochodowych oraz metod kontroli jakości połączeń spawanych, Kuźnia JAWOR – rozwój technologii regeneracyjnego napawania matryc kuźniczych, ASTOR i FRONIUS – badania aplikacyjne zrobotyzowanych procesów spawania łukowego. Na podkreślenie zasługuje zagraniczny staż naukowy (6.07.2008-30.04.2010) w University of Windsor, Ontario, Kanada, IDIR - Institute for Diagnostic Imaging Research, który dotyczył badań ultradźwiękowych procesu zgrzewania oporowego, mikroskopii ultradźwiękowej, badań metalograficznych, technologii zgrzewania oporowego punktowego. Habilitant dodatkowo asystował w zajęciach dydaktycznych z zakresu mechaniki i rysunku technicznego. Dodatkowo dr inż. Paweł Kustroń odbył 3 dniowy staż w Firmie Harms&Wende z Hamburga, który dotyczył badaniom procesu zgrzewania tarcowego punktowego RFSSW.

**Stwierdzam zatem, że dr inż. Paweł Kustroń wykazał się dostateczną aktywnością w zakresie działalności naukowo-badawczej realizowanej w więcej niż jednej uczelni i spełnia w tym zakresie wymagania stawiane kandydatom do uzyskania stopnia doktora habilitowanego.**

#### 4. Ocena działalności dydaktycznej, organizacyjnej i popularyzującej naukę

Dr inż. Paweł Kustron prowadzi zajęcia dydaktyczne (wykłady i laboratoria) z takich obszarów jak: urządzenia spawalnicze, materiały dodatkowe, automatyka przemysłowa, programowanie. Zajęcia wykładowe prowadzone są z wykorzystaniem prezentacji multimedialnych, filmów oraz eksponatów i próbek dydaktycznych. Prowadzi również zajęcia w języku angielskim: Non-destructive evaluation in contemporary manufacturing systems. Od 2013 roku prowadzi wykłady i zajęcia laboratoryjne w ramach studiów podyplomowych „Procesy spajania, projektowanie i wytwarzanie struktur spawanych”, przygotowujące do egzaminu Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika IWE. Prowadzone w tym obszarze zajęcia to: Projektowanie konstrukcji przy obciążeniach przeważająco stałych, oraz Zmechanizowane i zrobotyzowane procesy spawalnicze. Podczas stażu naukowego na University of Windsor, Ontario, Kanada, przez 2 semestry aktywnie asystował w zajęciach dydaktycznych z zakresu mechaniki i rysunku technicznego. Ponadto aktywnie uczestniczył w podejmowaniu zadań służących dydaktyce, w tym przygotowania nowych zajęć, opracowywania materiałów wspomagających i stanowisk dydaktycznych. W latach 2017 - 2021 przeprowadził serię zajęcia (ok. 30 godzin) w ramach ZPR\_PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej (POWER) dla najlepszych studentów Wydziału (Zagadnienia robotyzacji w spawalnictwie oraz nowoczesnych systemów bezpieczeństwa na stanowiskach zrobotyzowanych). W latach 2021 – 2022 przeprowadził 40 godzin zajęć w programie 3P – Programowanie Przemysłu Przyszłości – projekt: “Mistrzostwa w Algorytmice i Programowaniu Przemysłu Przyszłości”, prowadzonego przez fundację MANUS. Prowadzone zajęcia dotyczyły programowania nowoczesnych sterowników automatyki przesyłowej z zastosowaniem sterowników PLC oraz środowiska NdeRed. W ramach prowadzonych zajęć prowadził również kursy z poza obszaru działalności spawalniczej jak np. Programowanie w języku C, Sieci Komputerowe i systemy Czasu Rzeczywistego, Algorytmy przetwarzania sygnałów. Aktywnie uczestniczył w pracach związanych z rozwojem infrastruktury dydaktycznej i laboratoryjnej. Do najważniejszych osiągnięć zaliczyć można: projekt i aktywny udział w integracji stanowiska do zrobotyzowanego spawania CMT, opracowanie i uruchomienie stanowiska do zgrzewania tarcowego FSW, opracowanie i uruchomienie 3 osiowego skanera do celów dydaktyki w zakresie badań nieniszczących (ultradźwiękowych i prądów wirowych), budowa i adaptacja do celów dydaktyki hybrydowej zgrzewarki punktowej, budowa stanowiska do nauki obsługi sterowników PLC typu ASTRADA ONE oraz systemów komunikacji z robotami przemysłowymi Kawasaki. Sprawował opiekę nad 124 pracami dyplomowymi, realizowanych w j. polskim oraz j. angielskim. Od 2013 r. uczestniczy w pracach komisji egzaminów dyplomowych. Był promotorem pomocniczym zrealizowanego doktoratu mgr inż. Jacka Leśniewskiego oraz aktualnie jest promotorem pomocniczym doktoratu wdrożeniowego mgr inż. Maciej Karpińskiego. Opracował karty przedmiotów dla 4 kursów: Układy impulsowe, Teoria i technika sterowania, Kontrola jakości wyrobów, Systemy czasu rzeczywistego i Sieci komputerowe na kierunku Robotyka i Automatyzacja Procesów.

W ramach działalności organizacyjnej, Habilitant podejmował działania w zakresie organizowania spotkań z przedstawicielami firm i jednostek naukowych oraz wyjazdów do siedzib firm wraz ze studentami, w celu promowania wiedzy z zakresu nowoczesnych

technologii przemysłowych i technik badawczych np. aktywny udział w organizacji wycieczki studyjnej do firmy ASTOR (Kraków), FRONIUS (Gliwice), Harms&Wende (Hamburg) w celu prezentacji nowoczesnych rozwiązań z zakresu automatyki spawalniczej oraz prowadzenia badań w zakresie prac dyplomowych i doktorskich. pomocy studentom w odnalezieniu interesujących praktyk studenckich oraz pozyskiwaniu doświadczenia zawodowego, np. w firmie ASTOR (kontakt, przekazywanie informacji, kierowanie studentów do przedstawicieli firmy). Organizował kurs badań nieniszczących VT 1 i VT 2 dla studentów Politechniki Wrocławskiej. Kurs ten znacząco podnosi konkurencyjność absolwentów na rynku pracy. Rozwijał infrastrukturę laboratoriów Katedry (pozyskanie w ramach barterów z firmami integratorskimi robota kawasaki BA006, sterownika PLC – Astrada ONE, Horner, materiałów do badań nieniszczących). Modernizował stanowiska dydaktyczne np. do zrobotyzowanego spawania łukowego CMT, zgrzewania punktowego oraz zgrzewania tarcowego FSW. Od 2016 roku pełni funkcję kierownika laboratorium zaawansowanych technik ultradźwiękowych. A okresie 14 – 26.07.2016 pełnił obowiązki w zakresie kierowania gospodarką finansową Katedry Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa.

W zakresie działalności popularyzującej naukę brał udział w przygotowaniu i przeprowadzeniu Wrocławskich Sympozjów Spawalniczych organizowanych przez Katedrę. Był członkiem Komitetu Naukowego podczas X Wrocławskiego Sympozjum Spawalniczego „Innowacje w spawalnictwie”, czerwiec 2022 r. Jest współautorem rozdziałów w książkach i podręcznika dla studentów np. „Techniki wytwarzania spawalnictwo – laboratorium”, pod redakcją Andrzeja Ambroziaka, Wrocław 2010.

Dodatkowo dr inż. Paweł Kustronń uzyskał Nagrodę Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność Uczelni, 2020 r., Pierwszą nagrodę za najlepszy plakat na międzynarodowej konferencji: 2nd International Conference and Exhibition on Automobile Engineering, December, 01-02, 2016 Valencia, Hiszpania, Pierwszą nagrodę za najlepszy plakat na międzynarodowej konferencji: The 5th International Seminar on Advances in Resistance Welding September, 24th – 26th, 2008, in Toronto, Canada.

**Podsumowując stwierdzam, że dorobek dydaktyczny, organizacyjny i popularyzujący naukę wykazany przez dra inż. Pawła Kustronia spełnia w sposób dostateczny wymagania z punktu widzenia jego starań o nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk Inżynieryjno-technicznych.**

## 5. Wniosek końcowy

Dokonując całościowej oceny dorobku naukowo-badawczego, dydaktycznego oraz organizacyjnego i popularyzującego naukę dra inż. Pawła Kustronia stwierdzam, że w mojej opinii główne osiągnięcie naukowe dra inż. Pawła Kustronia w postaci autorskiej monografii zatytułowanej „**Zgrzewanie hybrydowe warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych**” wnosi wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Dotychczasowe osiągnięcia naukowo-badawcze, udokumentowane przedstawioną autorską monografią habilitacyjną, artykułami naukowymi w renomowanych czasopismach z listy JCR (10), wskaźnikami bibliograficznymi, udziałem w projektach badawczych, w konferencjach naukowych oraz współpracą naukową prowadzoną z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi dają podstawę do stwierdzenia, że dr inż. Paweł Kustroń wykazuje wystarczającą aktywność naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni. Habilitant spełnia również kryteria oceny osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych i popularyzujących naukę. W związku z powyższym stwierdzam, że dr inż. Paweł Kustroń spełnia wymagania stawiane ustawowo kandydatom pretendującym do otrzymania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk Inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

**Zatem wnioskuję o dopuszczenie dra inż. Pawła Kustronia do dalszego postępowania przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej w celu nadania mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk Inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**

Opracował:  
Jacek Górka