

Załącznik nr 3

Autoreferat

**Omówienie istotnych osiągnięć naukowych,
przebiegu kariery zawodowej oraz informacja o dorobku
dydaktycznym, organizacyjnym i popularyzującym naukę**

Dr inż. Paweł Kustron

Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczny
Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii
ul. Łukasiewicza 7/9
50-371 Wrocław

Spis treści

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	4
4.1 Wprowadzenie.....	4
4.2 Cele naukowe.....	6
4.3 Materiały MPC	6
4.4 Problematyka łączenia materiałów MPC.....	8
4.5 Opracowane, autorskie metody zgrzewania materiałów MPC	9
4.6 Analiza numeryczna metod zgrzewania materiałów MPC	21
4.7 Wyniki badań złączy zgrzewanych MPC	31
4.8 Podsumowanie i kierunki przyszłych badań	40
4.9 Wnioski	42
4.10 Wykaz wybranych publikacji powiązanych z tematycznie prezentowanym osiągnięciem ...	44
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej... ..	46
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę	48
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	50
8. Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego	51

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Paweł Kustroń

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **Dyplom magistra inżyniera 2004r.**

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny.

Kierunek studiów: Mechanika i Budowa Maszyn (ITS).

Tytuł Pracy dyplomowej: ***Badania ultradźwiękowe zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym***

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak**

Tytuł Pracy dyplomowej: ***Tłumienie drgań w konstrukcji mechanicznej z wykorzystaniem układu adaptacyjnego z kompozytem MRC***

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta**

- **Dyplom doktora nauk technicznych** w dyscyplinie budowa i eksploatacji maszyn - **2010r.**

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny

Tytuł rozprawy doktorskiej: ***Monitorowanie procesu zgrzewania oporowego punktowego wieloprzetwornikową głowicą ultradźwiękową***

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, PWr.**

Promotor pomocniczy: **Prof. Roman Gr. Maev, University of Windsor.**

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

1.02.2011 – obecnie – Adiunkt naukowo-dydaktyczny, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, Aktualnie: Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii,

1.10.2010 – 31.01.2011 – Asystent naukowo-dydaktyczny, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji,

16.07.2008 – 30.04.2010 – Staż naukowy oraz praca jako asystent dydaktyczny na Uniwersytecie w Windsor, Ontario, Kanada,

1.10.2004 – 21.06.2010 – Studia doktoranckie, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Jako osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, wynikające z art. 16 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym przedstawiam **monografię naukową**:

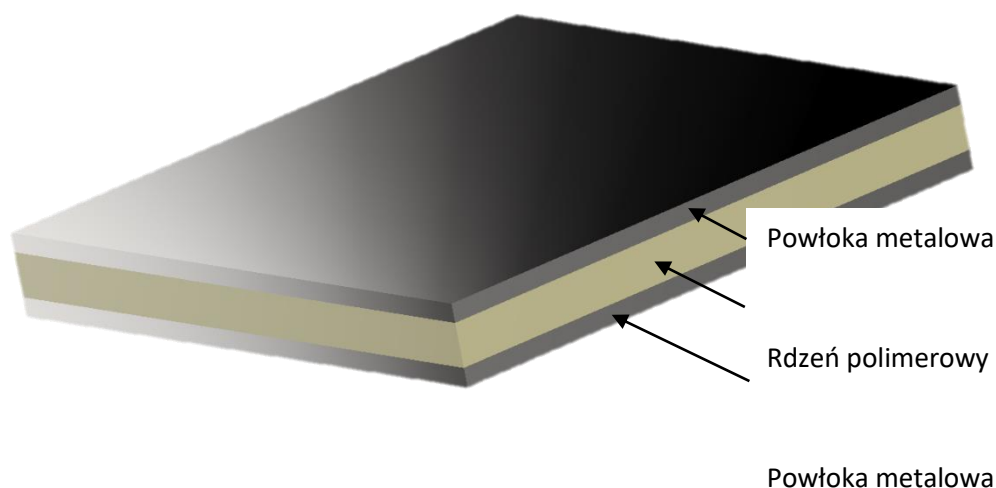
[M1] **Paweł Kustroń, Zgrzewanie hybrydowe warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych**, Monografia, Wydawnictwo Naukowe Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji, Radom, 2023, ISBN 978-83-7789-703-4

4.1 Wprowadzenie

Zgrzewanie elektryczne jest metodą, która na przestrzeni lat, aż do dnia dzisiejszego uległa znacznej ewolucji. Powstały zróżnicowane odmiany zgrzewania (rezystancyjne, tarciove, ultradźwiękowe, łukiem wirującym i inne). Metody te wykazują szereg zalet, zarówno technologicznych jak i ekonomicznych, które sprawiają, że nadal są chętnie i szeroko stosowane w wielu gałęziach przemysłu w tym: motoryzacyjnego, lotniczego, maszynowego, AGD, elektronicznego i wielu innych.

Każda z metod zgrzewania ma swoje wady i zalety, w dużej mierze, determinujące ich zakres stosowalności. Jedne metody pozwalają z łatwością zgrzewać materiały o dużej rezystancji elektrycznej i małej przewodności cieplnej jak zgrzewanie rezystancyjne (ang. RSW), inne pozwalają zgrzewać materiały plastyczne jak np. zgrzewanie ultradźwiękowe (ang. UTW) czy tarciove (np. ang. RFSSW).

Rozwój procesów zgrzewania rezystancyjnego obejmuje również materiały łączone, o coraz bardziej zaawansowanych własnościach eksploatacyjnych. Przykładem takich materiałów są nowoczesne stale konstrukcyjne (Dual Phase, TRIP itp.), stopy aluminium i magnezu, materiały z powłokami (metalowymi lub niemetalowymi) lub **materiały o strukturze warstwowej np. MPC (Metal Plastic Composites)**, które są przedmiotem prezentowanych prac badawczych (rys. 1).



Rys. 1. Schemat budowy kompozytu metalowo-polimerowego

Kompozyty warstwowe MPC to materiały opracowane z myślą o zmniejszeniu masy wytwarzanych konstrukcji, tłumieniu drgań oraz hałasu. Ponadto do istotnych zalet tych materiałów, poza stosunkowo małą wagą w porównaniu np. do stali jest fakt, iż wykazują one stosunkowo wysokie parametry wytrzymałościowe w wielu przypadkach można je formować przy użyciu standardowych procesów obróbki plastycznej na zimno, a także cechuje je niższa cena w porównaniu do konkurencyjnych stopów aluminium. Jest to ważny powód dla którego branża motoryzacyjna i lotnicza interesuje się tą grupą materiałów.

Problemem uniemożliwiającym wdrożenie tych materiałów do produkcji przemysłowej był brak odpowiednich technologii ich łączenia ze sobą, jak również z innymi materiałami jak stal i aluminium. Konwencjonalne techniki łączenia termicznego np. spawanie łukowe, laserowe lub zgrzewanie rezystancyjne nie miały tu zastosowania ze względu na obecność nieprzewodzącej warstwy polimerowego rdzenia. Próby zastosowania takich metod, jak np. tzw. klinczowanie czy nitowanie nie wykazały odpowiednich właściwości wytrzymałości oraz trwałości tych połączeń. Spowodowało to konieczność opracowania efektywnej technologii łączenia, pozwalającej wytwarzać złącza o wysokiej jakości i wytrzymałości mechanicznej. Rezystancyjne zgrzewanie punktowe wydaje się być tutaj bardzo dobrą, tanią i dobrze poznaną techniką, którą warto rozwijać w aspekcie łączenia materiałów MPC.

W odróżnieniu od kompozytów MPC, materiały o wysokiej przewodności cieplnej i elektrycznej (aluminium, miedź, magnezu i ich stopy) są trudno zgrzewalne metodą rezystancyjną, szczególnie ze względu na stosunkowo szybkie odprowadzanie ciepła i ich małą rezystancję właściwą. Podobnie materiały o skrajnie dużej rezystancji, np. mające powłoki lub warstwy niemetaliczne (nieprzewodzące) nie mogą być łączone „tradycyjną” metodą RSW. Brak jednego z istotnych czynników procesu jakim jest skuteczne źródło ciepła, zdolne nagrzać materiały nieprzewodzące do temperatury uplastycznienia, uniemożliwia poprawny przebieg procesu łączenia. Ponadto występowanie warstw o ograniczonej przewodności elektrycznej zakłóca proces nagrzewania obszarów styku łączonych materiałów, prowadząc w wielu przypadkach do niekontrolowanego przebiegu procesu, np. **ekspulsji**.

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 wspomaganie 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. W ramach prowadzonych badań dokonano porównania tych metod oraz oceny właściwości wytwarzanych złączy zgrzewanych, jak również opisano zjawiska i mechanizmy towarzyszące tym procesom technologicznym.

Osiągnięcie w postaci omawianej monografii składa się z dwóch części. Pierwsza, stanowiąca rozdziały od 1 do 4, to stan wiedzy na temat materiałów MPC oraz problematyki ich spajania. Druga, to rozdziały 5 i 6, opisujące badania własne autora. 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.

4.2 Cele naukowe

- **Pierwszym, głównym celem** podjętych prac było opracowanie 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.
- **Drugim celem** była 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 nowoczesnym narzędziami badawczymi (skaningową mikroskopią akustyczną oraz elektronową) do obserwacji struktury wewnętrznej oraz oceny jakości wytworzonych połączeń zgrzewanych.
- **Trzeci cel** obejmował przegląd i ocenę obecnie stosowanych metod łączenia materiałów z grupy MPC.

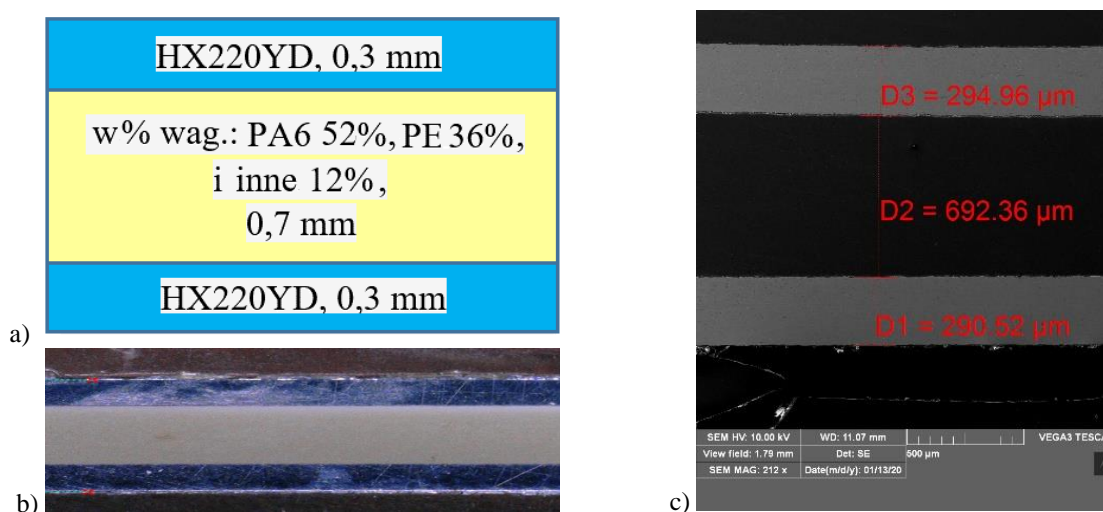
4.3 Materiały MPC

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.**

Struktura tych materiałów składa się z trzech warstw tj. rdzenia wykonanego z tworzywa sztucznego np. PA lub PE oraz dwóch zewnętrznych warstw w postaci blach metalowych np. stalowych lub aluminiowych (rys. 2). Takie połączenie właściwości składników kompozytu zapewnia szereg zalet, takich jak korzystny stosunek masy do wytrzymałości, wysoka sztywność, zdolność tłumienia drgań. Ponadto materiały te mogą być stosowane jako bariera termiczna lub akustyczna. Wymienione cechy stanowią o wysokim potencjale do zastosowania np. w przemyśle samochodowym i lotnictwie.

Jako przykłady zastosowań mogą posłużyć tutaj m. in. materiały o handlowych nazwach Litecor, Bondal, Hylite czy AlucoBond. Materiał Litecor składa się np. z dwóch stalowych lub aluminiowych warstw zewnętrznych o grubości 0,3 mm oraz polimerowego rdzenia o grubości od 0,3 do 1,0 mm. Istotnym problemem w zastosowaniu tych materiałów jest technologia ich łączenia. Polimerowy rdzeń nie przewodzi prądu elektrycznego co ogranicza zastosowanie metody zgrzewania rezystancyjnego.

Materiał o handlowej nazwie Litecor, stanowi jeden z najpopularniejszych materiałów z grupy MPC, mający powłoki stalowe. Jest on produkowany przez firmę ThyssenKrupp Steel Europe. Stanowi kompromis pomiędzy stalą a aluminium pod względem masy i ekonomii. Jest to materiał trójwarstwowy, składający się z polimerowego rdzenia oraz powłok stalowych (rys. 2).



Rys. 2. Materiał MPC Litecor: schemat (a), zgląd metalograficzny (b), obraz SEM (c)

Materiał Litecor łączy w sobie dużą wytrzymałość mechaniczną powłok stalowych oraz małą gęstość tworzywa sztucznego. W porównaniu z blachą stalową o tej samej powierzchni i grubości, waga arkusza Litecor jest mniejsza o ponad 45%. Rdzeń spełnia tu funkcję sztywnego wypełnienia, który zapewnia wysoką sztywność konstrukcji. Jest on stosowany głównie w samochodach do poszyci zewnętrznych oraz podłóg. Jak podaje firma ThyssenKrupp materiał ten ma potencjał do zastosowania w ponad 14 komponentach typowego nadwozia samochodowego przy zachowaniu aktualnie wymaganych norm bezpieczeństwa oraz jednoczesnym obniżeniu jego masy.

Szczegółowe parametry geometryczne, wytrzymałościowe, termiczne oraz skład chemiczny tego materiału podano między innymi w publikacjach [M1 - monografia, H1 i H2].

Tabela 2. Porównanie kosztów i masy komponentów pokrywy silnika samochodu osobowego wg. ThyssenKrupp

Materiał	Cena [€]	Masa [kg]
Stal	44,2	19,3
Powłoka Litecor + stalowy szkielet	53,7	14,9
Powłoka stalowa + magnezowy szkielet	77,1	11,3

Producent materiału Litecor podaje również przykład pokrywy silnika przeciętnego samochodu osobowego. Z danych w tabeli 2 wynika, że zastosowanie materiału Litecor jako powłoki dla pokrywy silnika jest bardzo korzystnym kompromisem pod względem ekonomicznym. W porównaniu z klasycznym rozwiązaniem, stanowiącym lite materiały stalowe lub łączone np. magnezowo – stalowe, rozwiązanie z udziałem materiału Litecor pozwala istotnie zmniejszyć masę elementu (o 4,4 kg) przy stosunkowo niewielkim wzroście ceny elementu.

4.4 Problematyka łączenia materiałów MPC

W literaturze spotykane są różne rozwiązania łączenia materiałów, mających izolujący, polimerowy rdzeń. Do głównych metod zaliczyć można np. nitowanie, klinczowanie lub łączenie przez kształtowanie plastyczne np. wywijanie, rąbkowanie oraz klejenie.

Szczegółowej analizy stanu wiedzy na temat problematyki łączenia dokonano w publikacjach [M1, H1, H2].

Wskazuje się, 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 wskazuje się na wrażliwość połączeń klejowych 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. Jako wadę tego rozwiązania autorzy wskazują, iż kompozyty warstwowe poddawane są tu wysokim i skoncentrowanym naprężeniom. Skutki ich działania zależą m.in. od obciążenia eksploatacyjnego złącza, naprężenia jakie wywierają śruby i nity na materiał oraz zjawiska pełzania polimerowego rdzenia pod wpływem długotrwałych naprężeń i oddziaływań termicznych. Ponadto mocowanie mechaniczne zwiększa całkowitą masę konstrukcji ze względu na zastosowanie śrub i nitów.

Jako obiecujące rozwiązanie opisuje się sposób łączenia materiałów MPC poprzez zagniatanie. Proces ten pozwala na wykonanie złączy o zadowalających właściwościach wytrzymałościowych, wymagają jednak skomplikowanego procesu przygotowania geometrii elementów, usuwania polimerowego rdzenia w miejscu zagniatania blach oraz specjalistycznego oprzyrządowania, dostosowanego do geometrii łączonego elementu.

Znane są przykłady zastosowania MPC w do samochodów ciężarowych SCANIA, w których przeprowadzono próby zastosowania materiału typu Litecor do produkcji pokrywy schowka narzędziowego. Zastosowanie materiałów MPC na różnego rodzaju pokrywy lub powłoki może przynieść wymierne korzyści pod względem zmniejszenia masy pojazdu oraz być skutecznym sposobem na zmniejszenie drgań i hałasu oraz podniesienie izolacyjności termicznej. Istotnym problemem jest tu wymóg stosowania specjalnych technik łączenia (poprzez wywijanie lub

rąbkowanie). Muszą zostać zapewnione tu odpowiednio duże promienie gięcia materiałów łączonych, ponieważ w przeciwnym razie dochodzi do przerwania zewnętrznej powłoki MPC.

Wskazuje się też na możliwość wytwarzania wysokowytrzymałych, warstwowych materiałów kompozytowych, których charakterystyczną cechą jest metalowa siatka zatopiona w polimerowym rdzeniu, pełniąca funkcję umacniającą strukturę materiału. Jej proces wytwarzania jest jednak skomplikowany i kosztowny. Ponadto rozwiązanie to znacząco podnosi masę arkusza MPC.

Pomimo wskazanych trudności producenci kompozytów MPC twierdzą, że ich łączenie jest możliwe co zostało potwierdzone wieloma badaniami naukowymi. Firma ThyssenKrupp zaleca, aby w konstrukcji nadwozi pojazdów samochodowych, stosować zgrzewanie rezystancyjne punktowe w połączeniu z klejeniem. W konstrukcji złącza wytwarzanego poprzez nitowanie czy skręcanie należy uwzględnić, że MPC nie powinien być ostatnim elementem w strukturze złącza. Najkorzystniej jest go umieścić pomiędzy warstwami litego materiału. Ponadto zaleca się stosowanie procesu nitowania w połączeniu z klejeniem.

Istotnym problemem jest zjawisko pełzania, występujące pod wpływem obciążeń termicznych w warstwie rdzenia MPC oraz obciążeń mechanicznych wynikających np. z napięcia wstępnego połączeń śrubowych, co może prowadzić do utraty pierwotnych właściwości wytrzymałościowych złącza.

Spawanie metodą MIG, MAG czy promieniem lasera materiałów MPC nie jest możliwe ze względu na specyficzną ich strukturę. Badania prowadzone w tym zakresie wykazują występowanie znacznej ilości niezgodności spawalniczych oraz niskie właściwości wytrzymałościowe takich złączy.

4.5 Opracowane, autorskie metody zgrzewania materiałów MPC

Głównym celem podjętych badań było opracowanie skutecznych metod łączenia kompozytów metalowo-polimerowych MPC z zastosowaniem procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego. Ze względu na szeroką gamę materiałów MPC występujących na rynku wybrano dwa rodzaje połączeń reprezentatywnych.

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. Druga para stanowi 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.:

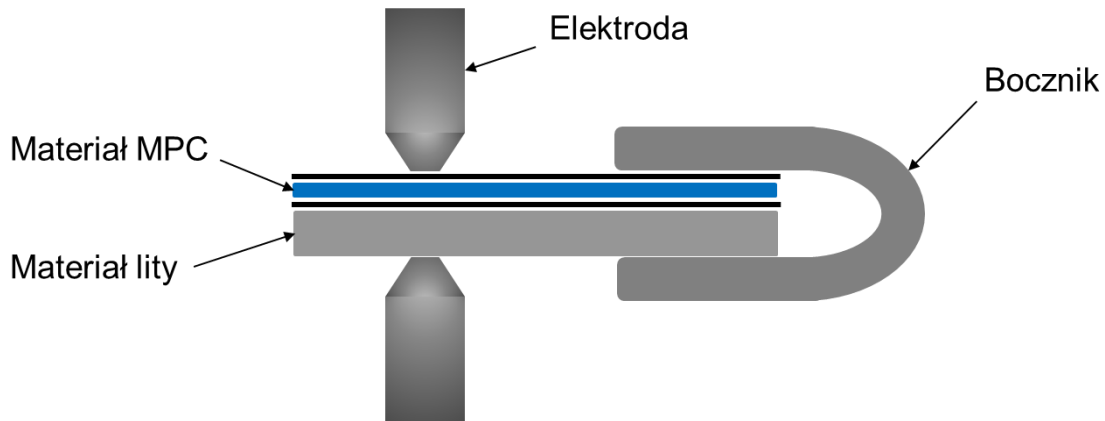
- metody hybrydowej indukcyjno-rezystancyjna, nazywanej dalej indukcyjną,
- metody hybrydowej bocznikowo-rezystancyjna, nazywanej dalej bocznikową,
- metody hybrydowej ultradźwiękowo-rezystancyjna, nazywanej dalej ultradźwiękową.

W ramach podjętych badań przeprowadzono szereg prób mających na celu identyfikację zjawisk i mechanizmów fizycznych towarzyszących istotnym etapom zgrzewania, dobór parametrów procesowych, ocenę jakości powstałych złączy oraz wybór właściwej metody wspomagania procesu zgrzewania hybrydowego.

Metoda bocznikowa

Zgrzewanie z zastosowaniem bocznika prądowego umożliwia nagrzewanie powierzchni styku elektroda – materiał w pierwszej fazie przebiegu procesu zgrzewania, kiedy prąd zgrzewania nie może

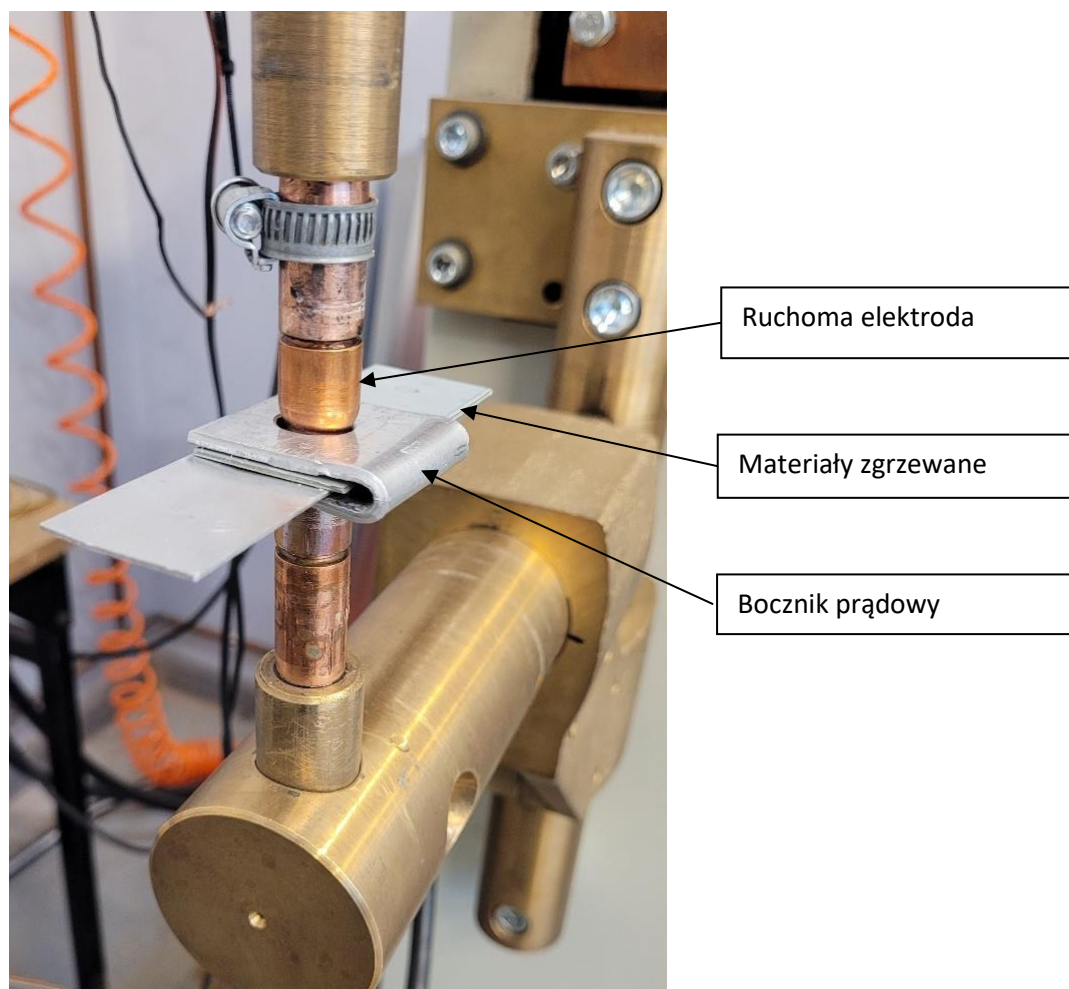
jeszcze przepływać w miejscu docelowego połączenia materiałów. Dzięki wytworzonej energii cieplnej, polimerowy rdzeń nagrzewa się, przechodzi w stan lepko-plastyczny przez co może być formowany i usuwany z obszaru zgrzewania (rys. 3).



Rys. 3. Schemat układu zgrzewania z bocznikiem prądowym

Rysunek 4 przedstawia fragment obwodu wtórnego zgrzewarki, wraz z wykonanym specjalnie do testów bocznikiem prądowym, gdzie przebiega proces zgrzewania materiału MPC Litecor o grubości 1,3 mm ze stalą DP600 o grubości blachy 0,8 mm. Zaproponowana konstrukcja bocznika zapewnia jego powtarzalne pozycjonowanie w odniesieniu do miejsca zgrzewania, równomierny rozkład gęstości prądu wokół elektrody oraz dużą powierzchnię kontaktu z łączonymi elementami.

Jednym z bardzo istotnych problemów zgrzewania materiałów MPC jest wykrycie momentu, w którym zostaje całkowicie usunięty polimerowy rdzeń i dochodzi do zetknięcia się jego zewnętrznych, metalowych powłok. Uzyskiwany jest wtedy kontakt elektryczny w obszarze zgrzewania i możliwe jest przeprowadzenie klasycznego zgrzewania rezystancyjnego. Należy jednak mieć na uwadze, że podczas nagrzewania polimeru może dojść do jego degradacji, w wyniku nadmiernego wzrostu temperatury. Powstałe wówczas związki chemiczne, mogą utrudnić lub całkowicie uniemożliwić przepływ prądu elektrycznego, pomimo pozornego zetknięcia materiałów powłokowych. Dalsze prowadzenie procesu nagrzewania często nie przynosi pozytywnego skutku, ponieważ produkty degradacji polimerów najczęściej nie wykazują właściwości termoplastycznych.



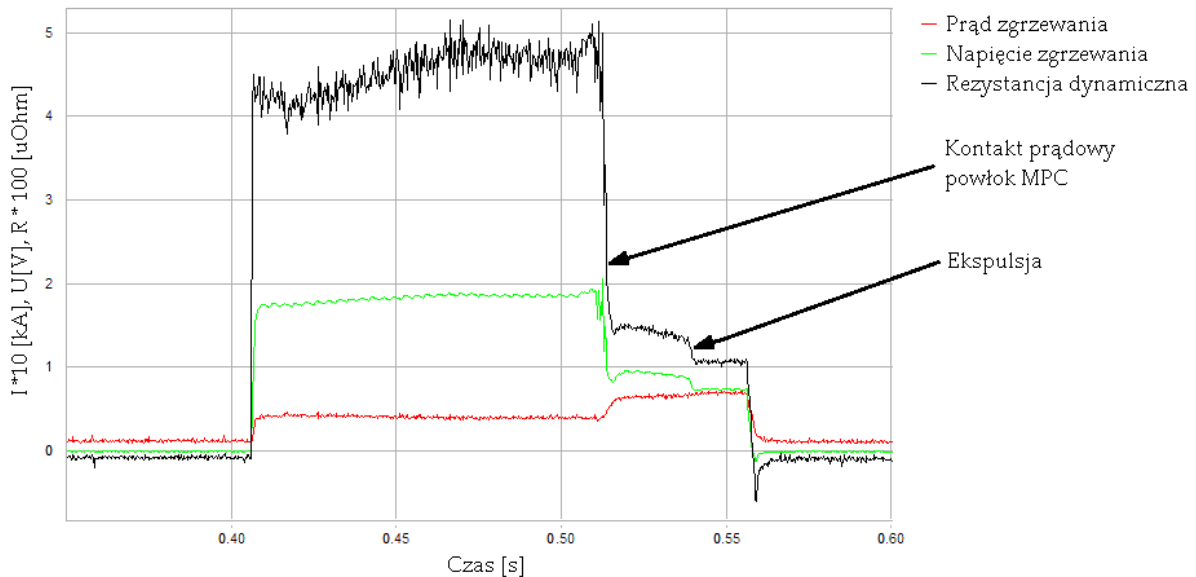
Rys. 4. Widok układu zgrzewania z zastosowanym bocznikiem prądowym

Z tego powodu ważne jest, aby monitorować zarówno proces nagrzewania i formowania warstwy polimerowej, jak również sam proces zgrzewania. Do głównych metod, jakie można zastosować w tym celu należy zaliczyć te oparte na pomiarach:

- napięcia zgrzewania,
- natężenia prądu zgrzewania,
- rezystancji dynamicznej,
- siły docisku elektrod [I2],
- przemieszczenia i przyspieszenia elektrod [R1],
- metody ultradźwiękowe [R3].

Pomiary i analiza tych parametrów pozwala wnioskować o przebiegu procesu zgrzewania np. rezystancji w obwodzie zgrzewania, głębokości penetracji elektrody w materiały zgrzewane czy stabilności przebiegu procesu oraz ryzyku wystąpienia ekspulsji.

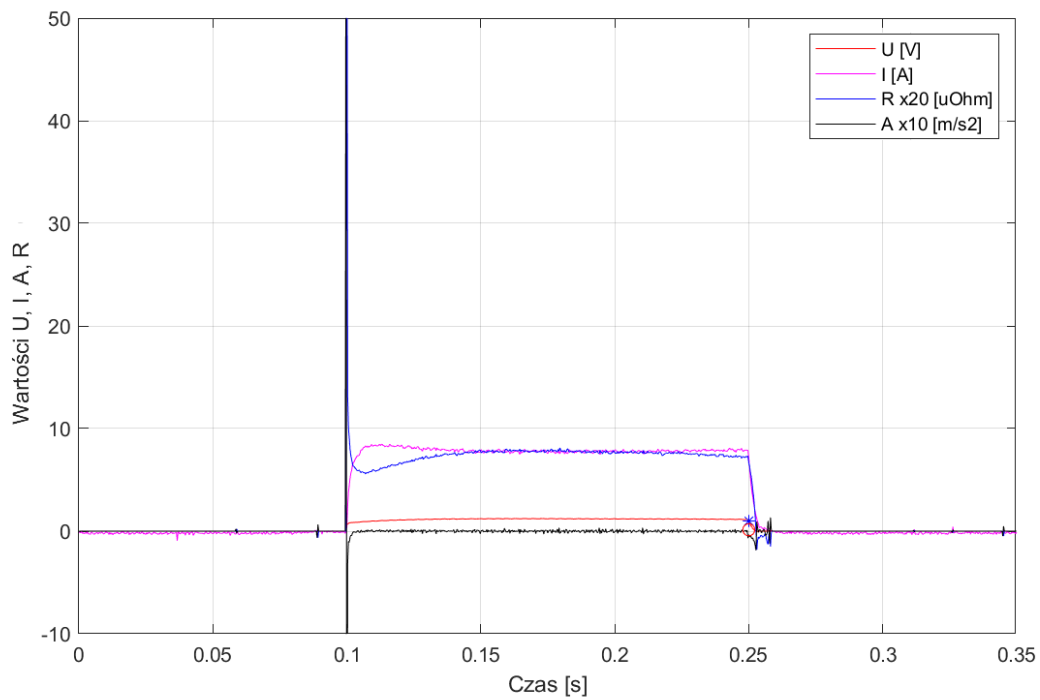
Podczas prób z zastosowaniem metody „bocznikowej” stosowano głównie pomiary rezystancji dynamicznej. Są one stosunkowo łatwe w implementacji oraz pozwalają ocenić najważniejszy czynnik jakim jest kontakt elektryczny w obszarze zgrzewania.



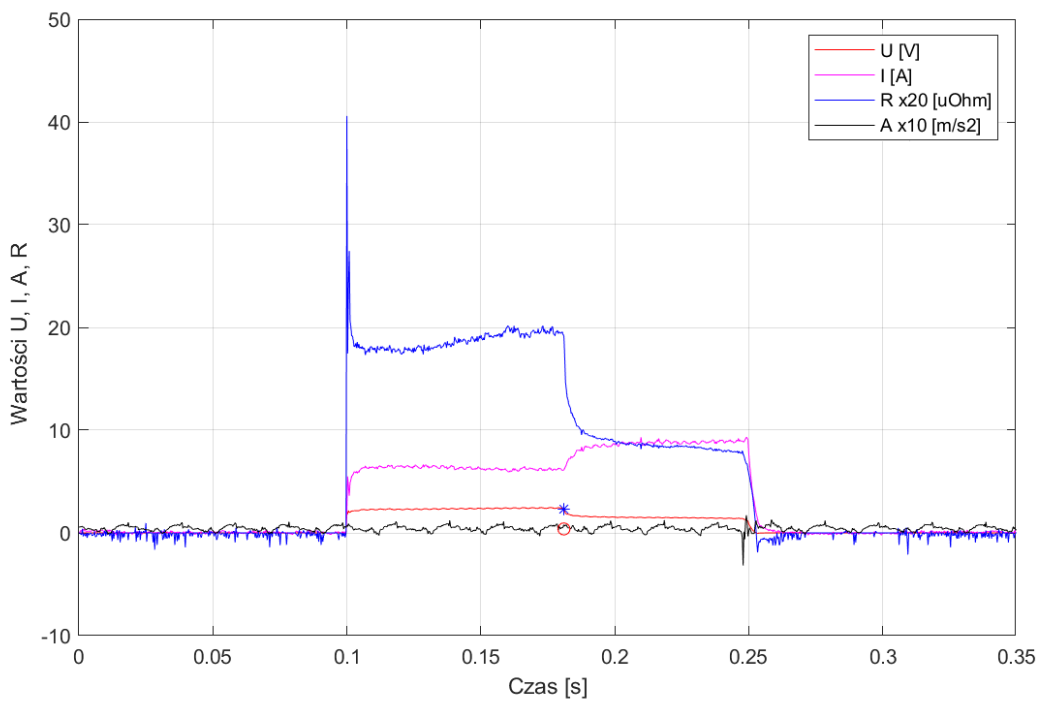
Rys. 5. Przebieg rezystancji dynamicznej, natężenia prądu i napięcia zgrzewania w trakcie procesu zgrzewania z zastosowaniem bocznika prądowego

Wadą tej metody jest fakt, iż w wielu przypadkach trudno odróżnić wskazanie momentu wykrycia kontaktu prądowego oraz zjawiska ekspulsji (rys. 5). Na przebiegu rezystancji dynamicznej objawia się to wyraźnym spadkiem rezystancji. Może to prowadzić do błędów, szczególnie w zautomatyzowanych systemach diagnostyki procesu, ponieważ wielkość zmiany mierzonych parametrów jest silnie zróżnicowana.

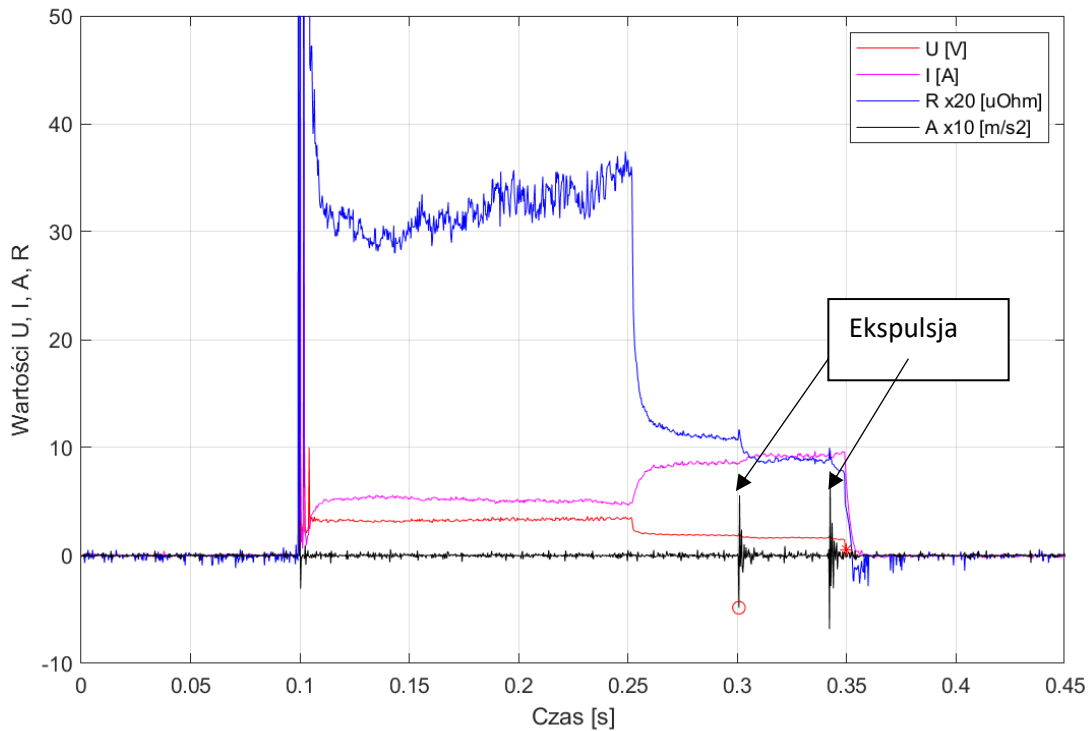
Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie dodatkowych systemów monitorowania procesu zgrzewania jak np. pomiar zmienności siły docisku [12] lub przyspieszenia elektrod [R1]. Parametry te są silnie powiązane ze zjawiskiem ekspulsji, a jednocześnie nie wskazują wyraźnej zmienności w momencie usuwania warstwy polimerowej ze względu na stosunkowo małą dynamikę tego procesu. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie akcelerometru pozwala w łatwy i skuteczny sposób monitorować zakłócenia procesu zgrzewania, w tym wystąpienie ekspulsji. Porównanie przebiegu rezystancji dynamicznej oraz sygnału przyspieszenia dla trzech podstawowych przypadków pokazano na rys. 6 - 8.



Rys. 6. Przebieg sygnałów napięcia, natężenia prądu, rezystancji dynamicznej i przyspieszenia dla materiałów litych – przebieg referencyjny



Rys. 7. Przebieg sygnałów napięcia, natężenia prądu, rezystancji dynamicznej i przyspieszenia dla materiałów MPC – typowy, quasi stabilny przebieg procesu zgrzewania



Rys. 8. Przebieg sygnałów napięcia, prądu, rezystancji dynamicznej i przyspieszenia dla materiałów MPC – proces niestabilny, ekspulsja

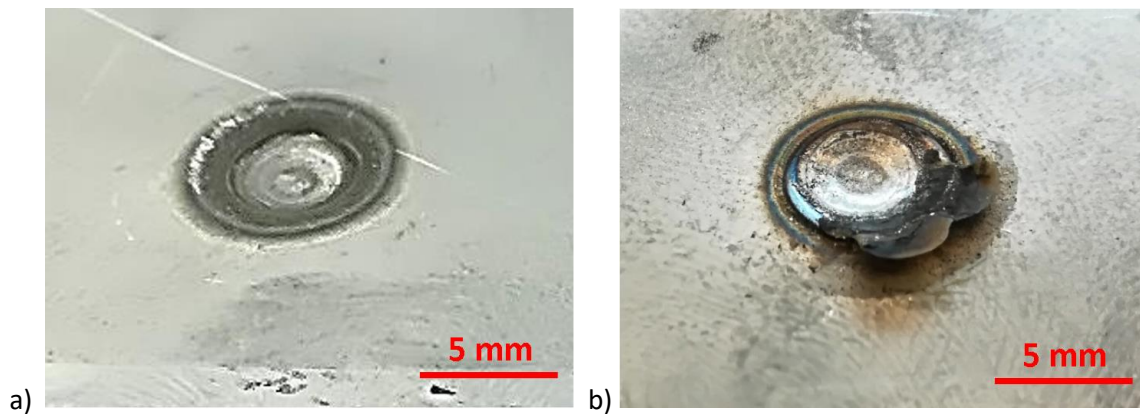
Pierwszy przypadek (rys. 6) stanowi przebieg rezystancji dynamicznej i przyspieszenia kiedy zgrzewane są materiały lite. Jest to przebieg referencyjny, wykonany dla porównania i wyznaczenia docelowych wartości poziomów sygnałów.

Kolejny przypadek (rys. 7) został zarejestrowany podczas zgrzewania materiałów MPC (z warstwą nieprzewodzącą). Widoczny jest wyraźny, pojedynczy spadek rezystancji dynamicznej z poziomu $400 \mu\Omega$ do poziomu poniżej $200 \mu\Omega$. Występuje on w momencie usunięcia warstwy polimerowej z obszaru zgrzewania i uzyskania kontaktu prądowego materiałów powłokowych MPC. W rozważanym przypadku początkowa wartość rezystancji jest silnie zmienna i zależna od warunków przebiegu procesu nagrzewania natomiast końcowa wartość rezystancji powinna być zbliżona do przypadku przedstawionego na wykresie rys. 6, tj. nie większej niż $200 \mu\Omega$. Ponadto poziom oscylacji sygnału przyspieszenia nie powinien przekraczać 20 m/s^2 . Większe oscylacje sygnału przyspieszenia wskazują na możliwość wystąpienia zjawiska ekspulsji (rys. 8). Podane parametry są charakterystyczne dla rozważanej kombinacji materiałów i mogą się w pewnym stopniu różnić dla innych konfiguracji złącza. Ogólna zasada pozostaje jednak taka sama, tj. poziom rezystancji dynamicznej oraz przyspieszenia powinien dążyć do wartości takiej jak zarejestrowana dla litych materiałów, połączonych bez wystąpienia zjawiają ekspulsji.

W badaniach nad detekcją zjawiska ekspulsji podczas zgrzewania materiałów MPC z zastosowaniem akcelerometru, przeprowadzono szereg testów dla dużych populacji próby. Analizy statystyczne (m.in. próba Kruskala-Wallisa) pozwoliły na ustalenie czy badane parametry wykazują statystyczną zdolność do wnioskowania o wystąpieniu zjawiska ekspulsji. Wśród przebadanych metod, pomiary przyspieszenia elektrody zgrzewarki wykazały największą wykrywalność zjawiska ekspulsji.

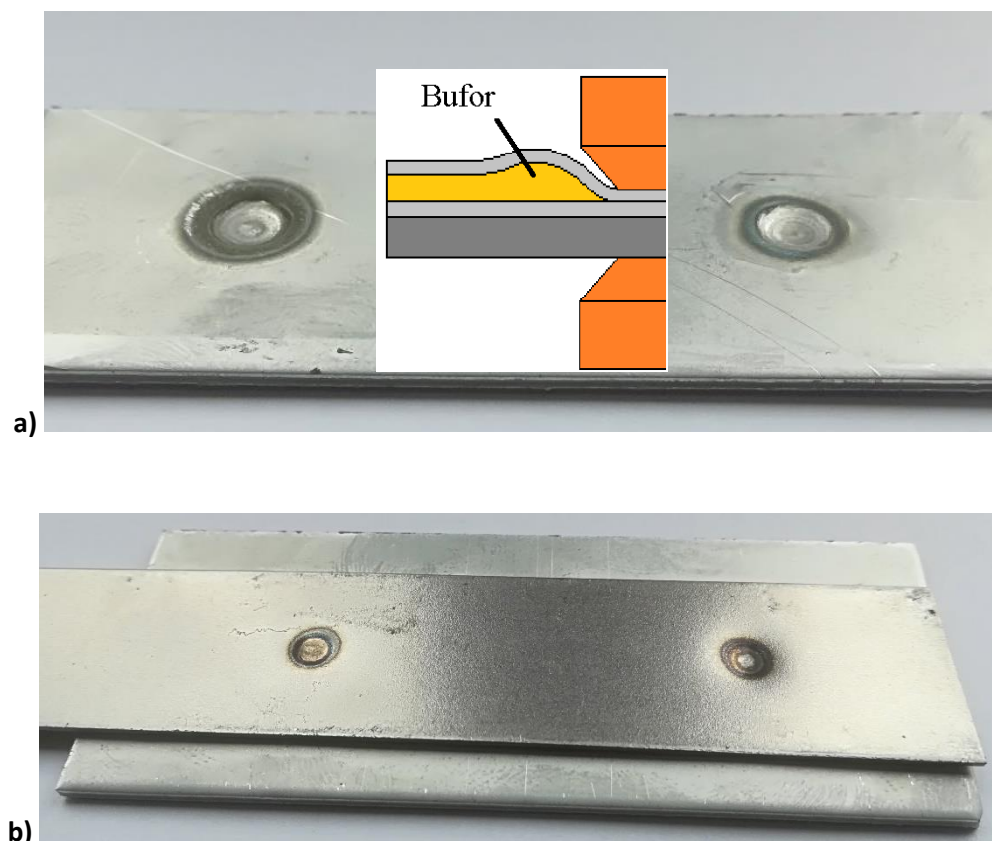
Zastosowanie wyżej opisanych systemów monitorowania procesu zgrzewania pozwala wyeliminować większość negatywnych skutków zakłóceń procesu zgrzewania, jednak nie eliminuje skutków niewłaściwego doboru paramentów procesu.

Wykonanie prawidłowego połączenia zgrzewanego metodą bocznikową wymaga aby nagrzewanie warstwy nieprzewodzącej nie zachodziło zbyt gwałtownie, ponieważ prowadzi to do degradacji warstw powłokowych (rys. 9a) polimerowego rdzenia, a nawet do ekspulsji (rys. 9b).



Rys. 9. Niezgodności powstałe w wyniku zbyt gwałtownego nagrzewania powstającego złącza, pęknięcie warstwy powłokowej wokół zgrzeiny (a), ekspulsja (b)

Widok przykładowego złącza wykonanego omawianą techniką pokazano na rysunku 10.

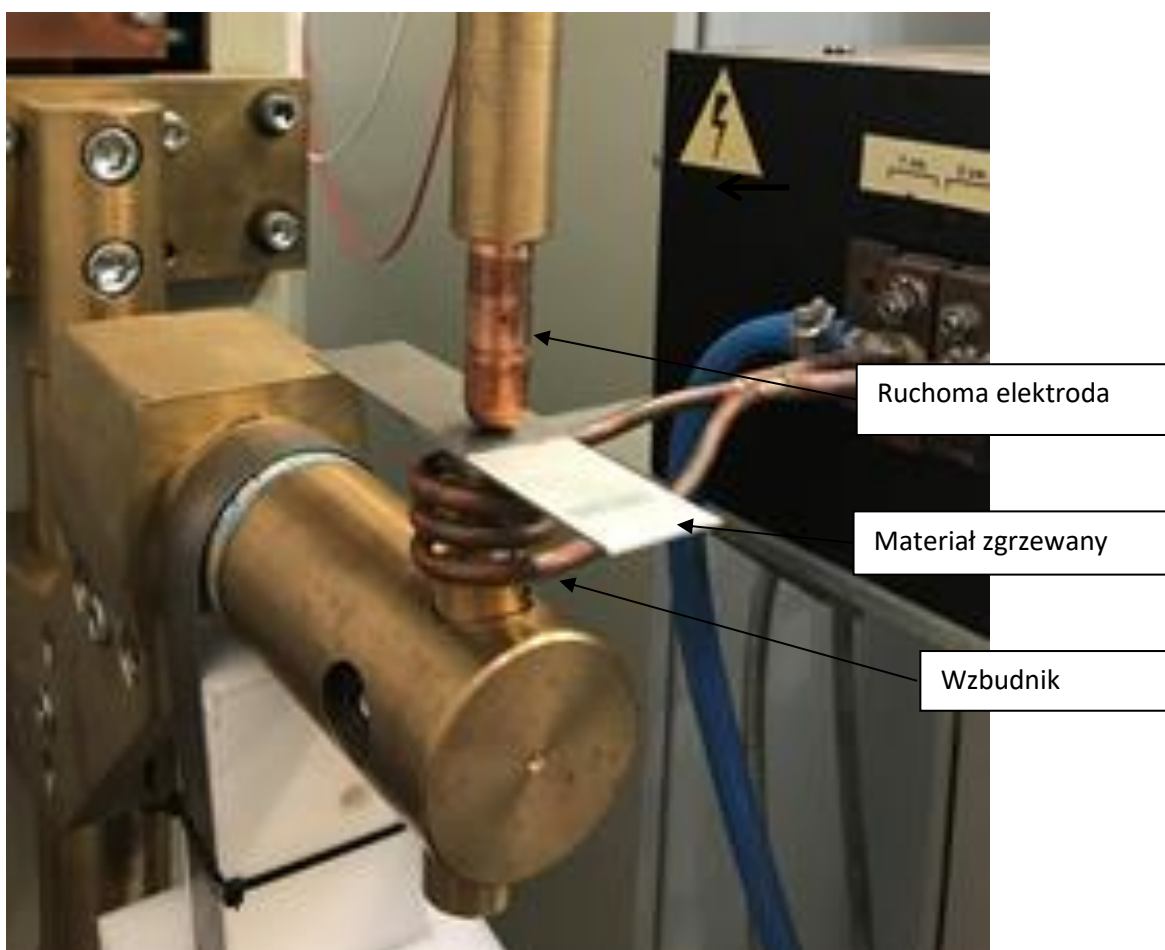


Rys. 10. Przykładowe złącza wykonane techniką bocznikową: strona materiału Litecor (a), strona litego materiału DP600 (b)

Na próbkach wyraźnie widoczna jest strefa o zdegradowanej, ochronnej powłoce cynkowej (rys. 10a). Wynika to z faktu, iż blacha powłokowa MPC ma małą grubość, a podczas przepływu prądu zgrzewania bardzo silnie się nagrzewa. Prowadzi to do nadtopienia i odparowania warstwy cynku z powierzchni materiału. Ponadto widoczny jest tu regularny, okrągły pierścień wokół zgrzeiny będący buforem na usunięty z obszaru zgrzewania polimer. Strona materiału litego (rys. 10b) nie odbiega od typowego wyglądu klasycznego połączenia zgrzewanego.

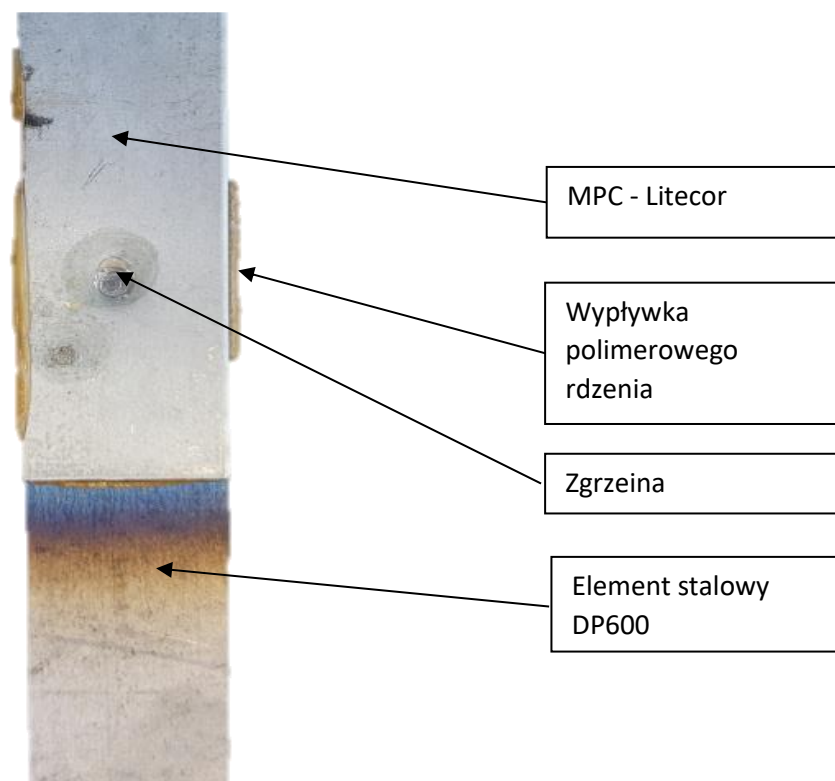
Metoda indukcyjna

W metodzie indukcyjnego nagrzewania polimerowego rdzenia MPC, występuje zjawisko indukowania prądów wirowych w przewodnikach elektrycznych. W badaniach zastosowano nagrzewnicę indukcyjną NG-40, z zainstalowanym wzbudnikiem w postaci pierścieniowej 3-zwojnej, o średnicy wewnętrznej ok. 30 mm. Jego wielkość dobrano tak, aby nie stykał się on w trakcie procesu zgrzewania z żadnymi elementami metalowymi układu zgrzewania oraz elementem łączonym. Zetknięcie spowodowałoby zakłócenie jego pracy tj. doszłoby do zwarcia. Wzbudnik usytuowano wokół dolnej, nieruchomej elektrody zgrzewarki (rys. 11). Na stanowisku wykonano szereg prób, skierowanych głównie na analizę jakości uzyskiwanych złączy, stabilności przebiegu procesu oraz czasu jego realizacji (wydajności). Widok stanowiska wraz z próbką z materiału Litecor oraz stali DP600 pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Widok stanowiska do zgrzewania materiałów MPC, wspomaganego indukcyjnie

Proces zgrzewania punktowego przebiegał dwuetapowo. W pierwszym induktor nagrzewał powłoki materiału MPC. Pole magnetyczne generowane przez cewkę indukcyjną powoduje przepływ prądów wirowych przez dolną elektrodę i lity element stalowy DP600. Następnie ciepło wytworzone w stali DP600 przekazywane jest do materiału MPC, co w efekcie powoduje jego nagrzewanie. Ilość wytworzonej energii cieplnej nagrzewania zależy od zastosowanej mocy wzbudnika. Ciepło wytwarzane przez prądy wirowe i przekazywane do MPC, uplastycznia rdzeń polimerowy, który pod wpływem docisku elektrod zostaje wyciśnięty spomiędzy okładzin (rys. 12). W ten sposób obszar zgrzewania zostaje oczyszczony, a prąd elektryczny może przepływać przez powierzchnie stykowe. Po upływie wymaganego czasu następuje wyłączenie wzbudnika i zostaje rozpoczęty etap zgrzewania rezystancyjnego.



Rys. 12. Próbka zgrzewana rezystancyjnie ze wspomaganie indukcyjnym

Podczas prowadzenia badań zaobserwowano, że częstym przypadkiem dla wąskich elementów (< 25 mm) była wyływka polimeru spomiędzy blach powłokowych. Było to wywołane nagraniem znacznego obszaru próbki. Ponadto na powierzchni litej blachy (DP600) pojawiają się barwy nalotowe wskazujące na przegrzanie tego materiału w okolicy złącza (rys. 12).

Metoda ultradźwiękowa

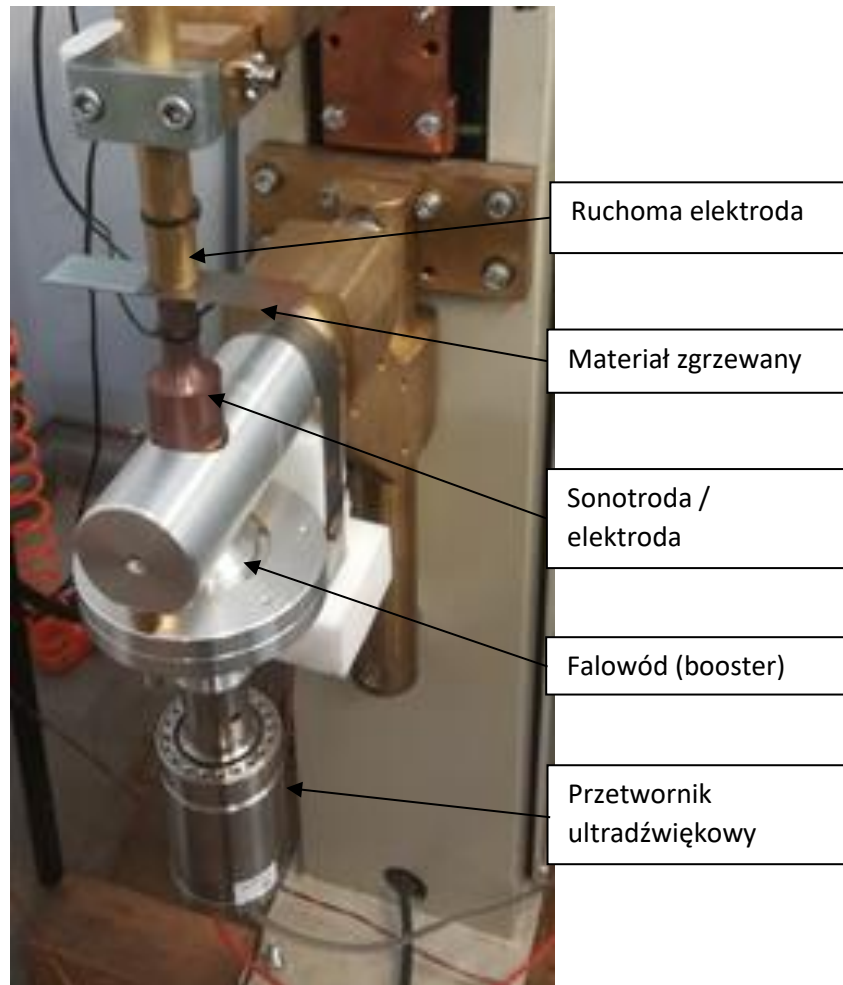
Metoda zgrzewania rezystancyjnego wspomaganą falami ultradźwiękowymi dużej mocy, jest rozwiązaniem, w którym występują dwa różne mechanizmy generowania energii cieplnej. Pierwszy dotyczy nagrzewania z zastosowaniem fal ultradźwiękowych, przy występowaniu zjawiska tarcia wewnętrznych cząsteczek polimeru. W wyniku tego energia cieplna powstaje bezpośrednio w materiale, który w danym momencie ma być obrabiany. Oznacza to, że ten sposób nagrzewania

będzie zapewniał najefektywniejszy, z technologicznego punktu widzenia proces formowania polimerowego rdzenia MPC. Drugi mechanizm, to klasyczne nagrzewanie rezystancyjne, zgodnie z prawem Joula'a Lenza.

Proces zgrzewania omawianą metodą odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym etapie procesu rdzeń polimerowy jest nagrzewany przez aktywne oddziaływanie fal ultradźwiękowych o dużej mocy. Po osiągnięciu temperatury uplastycznienia, polimer jest formowany dzięki przyłożonej sile docisku elektrod zgrzewarki. Poprawnie przeprowadzony proces ultradźwiękowej obróbki polimerowego rdzenia powinien zakończyć się całkowitym usunięciem tego materiału z obszaru zgrzewania. Nadmiar materiału polimerowego gromadzony jest w obszarze wokół zgrzeiny, w komorach powstałych poprzez deformację (wyoblenie) metalowej powłoki MPC. W obszarze zgrzewania dochodzi do powstania kontaktu prądowego wszystkich metalowych warstw zgrzewanych elementów, co umożliwia przeprowadzanie klasycznego procesu zgrzewania rezystancyjnego.

Drugi etap procesu łączenia polega na zastosowaniu odpowiedniego programu zgrzewania rezystancyjnego. Może on się składać z jednego lub więcej impulsów prądowych. Jak wykazały obserwacje, zastosowanie programu jenoimpulsowego zgrzewania często prowadzi do ekspulsji lub nie pozwala osiągnąć odpowiedniej średnicy jądra zgrzeiny. Jest to spowodowane występowaniem czynników zakłócających stabilny przebieg procesu, w tym np. warstw antykorozyjnych lub pozostałości polimeru ulokowanych w nierównościach powierzchni. Znanym sposobem rozwiązania tego problemu jest zastosowanie dwuimpulsowego programu zgrzewania. Pierwszy impuls prądowy o małym natężeniu rozgrzewa obszary styku materiałów zgrzewanych oraz występujące w tym miejscu zanieczyszczenia. W wyniku oddziaływania siły docisku elektrod i wysokiej temperatury powstają warunki dogodne do usunięcia pozostałych zanieczyszczeń z obszaru zgrzewania. Po tym zabiegu możliwe jest bezpieczne zastosowanie drugiego impulsu prądowego, który pozwoli na powstanie ciepłego jądra zgrzeiny i jednorodnego połączenia zgrzewanego.

Prototypowy układ do zgrzewania hybrydowego, ultradźwiękowo - rezystancyjnego zbudowano przy użyciu nowoczesnej, inwertorowej zgrzewarki rezystancyjnej prądu stałego o częstotliwości pracy 10 kHz. Hybrydowy układ zgrzewania materiałów MPC pokazano na rysunku 13. Składa się on z ultradźwiękowego przetwornika dużej mocy sprzężonego z falowodem i sonotrodą. Sonotroda stanowi tutaj zarówno element układu ultradźwiękowego jak i rezystancyjnego. Została ona połączona z systemem ultradźwiękowym o znamionowej mocy elektrycznej 3 kW. Sonotroda jest kluczowym elementem opracowanego układu zgrzewalniczego. Generuje ona drgania wzdłużne, osiągając największą amplitudę przemieszczenia w punkcie szczytowym na powierzchni roboczej. Pod wpływem siły docisku generowana energia fali ultradźwiękowej jest dostarczana do łączonych materiałów kompozytowych. Tarcie wewnętrzne drgających cząstek polimeru powoduje jego szybkie nagrzewanie i uplastycznienie przez co może on być swobodnie formowany i usuwany z obszaru zgrzewania.



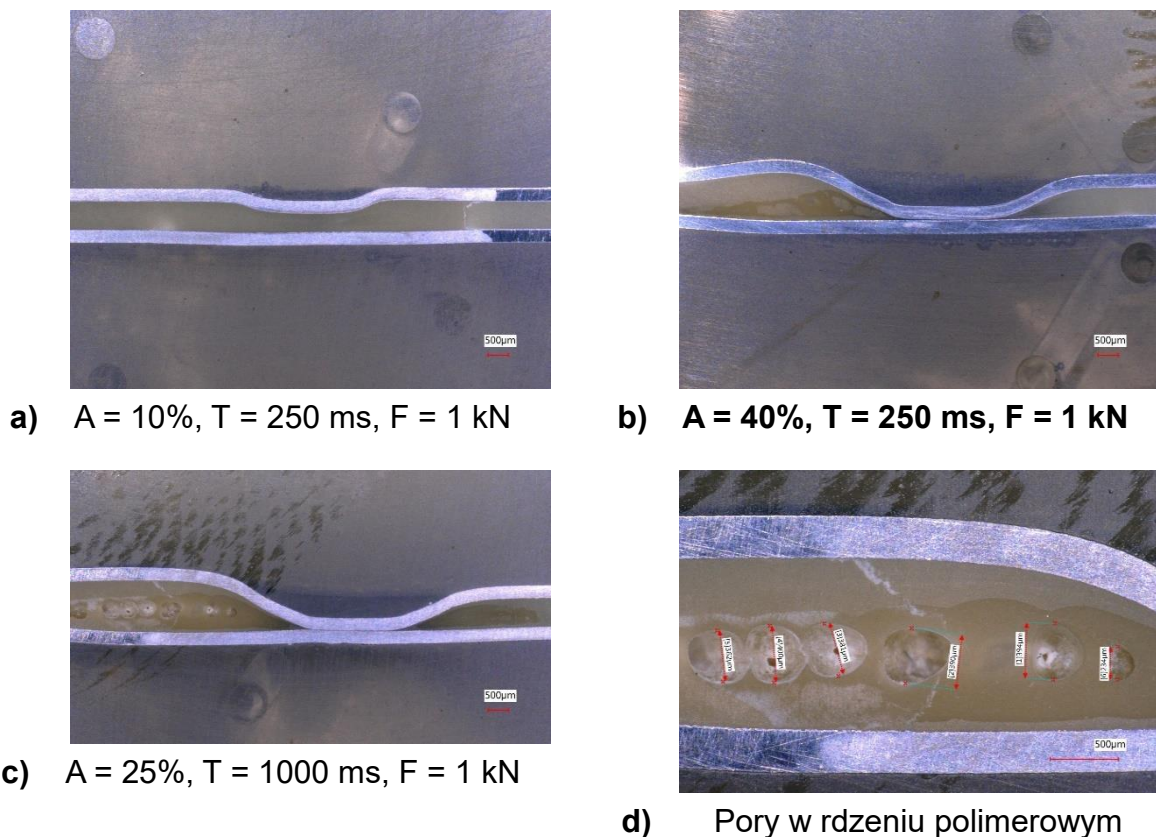
Rys. 13. Stanowisko do zgrzewania materiałów MPC wspomaganie ultradźwiękowo

Oprócz dostarczania energii fali ultradźwiękowej do miejsca zgrzewania, zadaniem sonotrody jest również doprowadzenie tam energii elektrycznej. Z tego powodu, aby zminimalizować straty związane z oporowym nagrzewaniem się sonotrody, do jej wykonania zastosowano materiał typowy dla elektrod zgrzewalniczych tj. stop miedzi z cyrkonem i chromem CRM16.

Realizując badania nad opracowaniem technologii zgrzewania omawianą metodą, w pierwszej kolejności dobrano parametry nagrzewania ultradźwiękowego. Właściwie dobrana amplituda drgań i czas oddziaływania fali ultradźwiękowej na materiał prowadzi do uzyskania kontaktu elektrycznego oraz przepływu prądu zgrzewania przez obszar złącza. Jeśli ten etap nie zostanie wykonany poprawnie, może to wywołać dwa negatywne efekty. W pierwszym przypadku po prostu nie popłynie prąd zgrzewania, a złącze nie zostanie utworzone. Proces można następnie powtórzyć, aby uzyskać prawidłowe połączenie. W drugim przypadku, gdy niektóre połączenia zgrzewane zostały już wykonane lub istnieje nawet niewielki kontakt prądowy poza obszarem zgrzewania, może wówczas wystąpić efekt bocznikowania. Jest to wysoce niekorzystna sytuacja dla łączonych elementów. Prąd zgrzewania przepływa wówczas głównie przez metalowe powłoki MPC. Może to prowadzić do przegrzania, rozwarstwienia, odkształcenia, a nawet całkowitej utraty ciągłości materiału. Ponadto może ulec uszkodzeniu warstwa ochronna pokrywająca MPC, np. cynkowa. Z tego powodu istotne jest skuteczne monitorowanie procesu usuwania polimeru oraz momentu uzyskania kontaktu elektrycznego metalowych warstw MPC. Można tego dokonać przy użyciu klasycznych pomiarów rezystancji dynamicznej przeprowadzanych podczas ultradźwiękowego procesu nagrzewania. Stosowanie

impulsów prądowych o niewielkim natężeniu, w trakcie obróbki ultradźwiękowej, takich aby nie uszkodzić materiałów łączonych lub nie spowodować ich znacznego nagrzania, może pozwolić na skuteczne monitorowanie tego procesu. Możliwe jest również przekazanie informacji zwrotnej do generatora ultradźwiękowego, aby kontrolować, kiedy proces wstępnego podgrzewania jest zakończony i rozpoczyna się proces zgrzewania rezystancyjnego.

Procesy formowania polimerowego rdzenia MPC prowadzono dla trzech czasów nagrzewania 150, 250, 1000 ms oraz dla 5 różnych poziomów amplitudy napięcia wzbudzających przetwornik ultradźwiękowy, tj. 10, 20, 30, 40 i 50 %, gdzie maksymalna amplituda napięcia dla zastosowanego przetwornika wynosiła 1800 V. Przykładowe zdjęcia z analizy metalograficznej połączeń, przy użyciu mikroskopu świetlnego pokazano na rysunku 14.



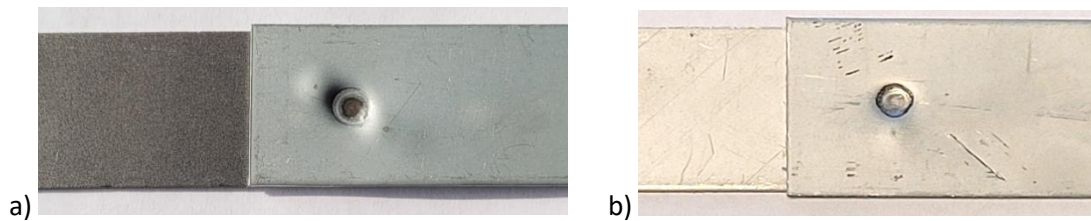
Rys. 14. Wyniki badań metalograficznych próbek po procesie ultradźwiękowego formowania warstwy polimerowej, zbyt małe parametry (a), prawidłowe (b), zbyt długi czas procesu – pęcherze gazowe (c) i (d)

Ponadto rozważano dwie konfiguracje miejsca aplikacji fali ultradźwiękowej, tj. zastosowanie przetwornika ultradźwiękowego od strony materiału litego i druga od strony materiału MPC.

Badania wykazały, że konieczne jest maksymalne skrócenie czasu trwania tego procesu, aby zmniejszyć ryzyko uszkodzenia złącza, rozwarstwienia polimerowego rdzenia MPC lub wystąpienia porowatości (rys. 14c i d). Ostatecznie wykazano, że wspólnymi parametrami dla obydwu rozważanych konfiguracji będą napięcie $U = 720$ V (40%) oraz czas drgań $T = 250$ ms.

W drugim etapie dobrano parametry procesu zgrzewania rezystancyjnego, w którym wprowadzono program dwuimpulsowy. Pierwszy z impulsów ($I_1 = 3,1 \text{ kA}$, $t_1 = 150 \text{ ms}$) miał na celu usunięcie warstwy zanieczyszczeń, m. in. powłok cynkowych z powierzchni styku łączonych materiałów. Ponadto umożliwia również pomiar rezystancji dynamicznej aby upewnić się, że proces zgrzewania rezystancyjnego może być bezpiecznie i prawidłowo przeprowadzony. Drugi impuls ($I_2 = 5,5 \text{ kA}$, $t_2 = 150 \text{ ms}$) został użyty do wykonania poprawnej zgrzeiny, obejmującej wszystkie łączone blachy. Parametry zgrzewania dobrano tak, aby uzyskać maksymalną średnicę jądra zgrzeiny przy jak najkrótszym czasie przebiegu procesu oraz braku niezgodności spawalniczych w postaci wtrąceń, porów, uszkodzeń powierzchni materiału lub powłok czy znacznej deformacji złącza.

Przekładowe próbki wykonane tą metodą pokazano na rysunku 15. Średnica złączy zgrzewanych, zmierzona w tzw. próbie wyłuskiwania osiągała wymiary od 4,5 do 5,0 mm.



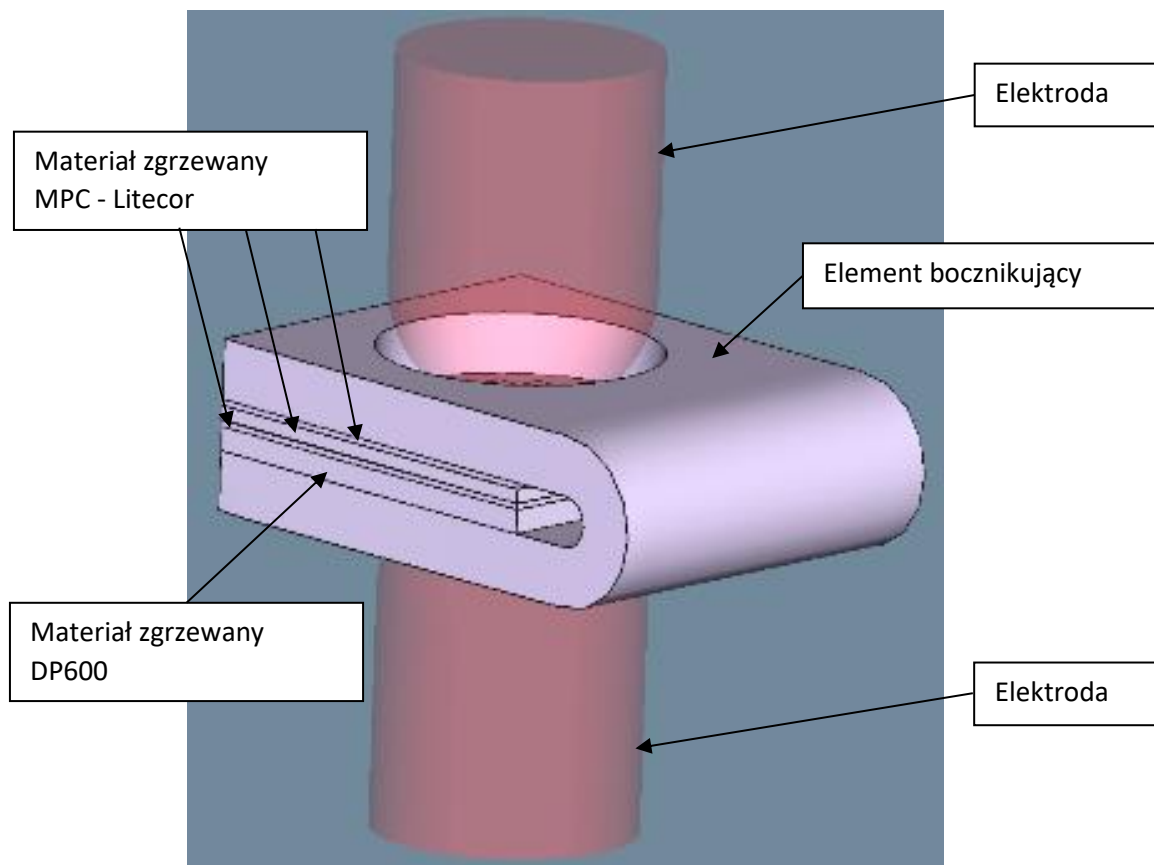
Rys. 15. Widok przykładów złącza wykonanych metodą hybrydową ultradźwiękowo-rezystancyjną, połączenia Litecor + DP600 (a), połączenie Litecor + Litecor (b)

4.6 Analiza numeryczna metod zgrzewania materiałów MPC

W ramach przeprowadzonych badań numerycznych dokonano analizy fizycznego tła trzech procesów wspomaganego zgrzewania rezystancyjnego materiałów MPC. Rozważano trzy metody oparte na zastosowaniu elementu bocznikującego, wprowadzeniu dodatkowego podgrzewania indukcyjnego oraz wspomaganie przy użyciu fal ultradźwiękowych. Dla każdej w wymienionych metod opracowano odpowiedni model numeryczny MES, który zweryfikowano eksperymentalnie. Celem przeprowadzonych badań metodą elementów skończonych była identyfikacja zjawisk i mechanizmów towarzyszących procesowi spajania materiałów MPC, a także dobranie odpowiedniej strategii podgrzewania polimerowego rdzenia MPC oraz wstępny dobór parametrów zgrzewania rezystancyjnego.

Model zgrzewania z udziałem bocznika prądowego

Pierwszą badaną metodą wspomaganie procesu rezystancyjnego łączenia materiałów MPC było zastosowanie elementu bocznikującego, w którym jeden element wykonany z materiału Litecor, łączony jest z jedną warstwą materiału litego gatunku DP600 (rys. 16).



Rys. 16. Model układu zgrzewania z elementem bocznikującym

Wykonany model miał głównie na celu zbadanie pierwszej fazy procesu łączenia tj. nagrzewania polimerowej warstwy izolującej. Zastosowany tu element bocznikujący został tak zaprojektowany aby zminimalizować ryzyko uszkodzenia materiałów łączonych, w tym szczególnie cienkich powłok MPC. Obserwacja rozkładów pól temperatury w obszarze zgrzewania i w jego okolicy pozwoliła na skoncentrowanie procesu generowania energii cieplnej w miejscu powstawania złącza zgrzewanego i wstępny dobór parametrów zgrzewania.

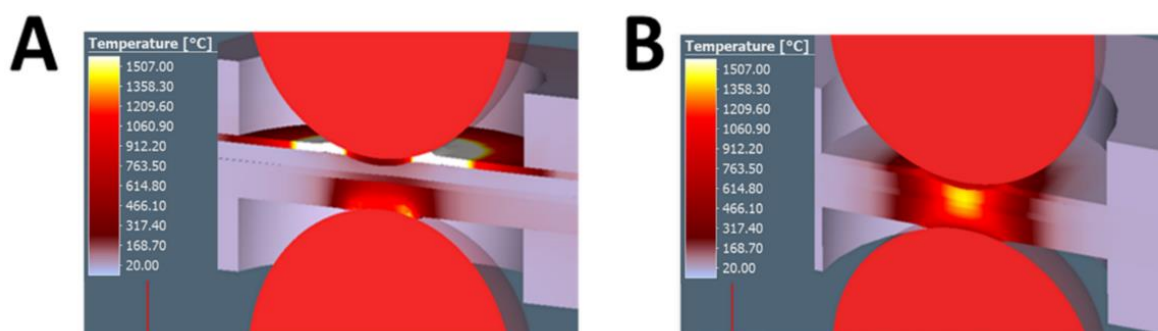
W pierwszej fazie nagrzewania polimerowego rdzenia zastosowano stosunkowo małe wartości prądu płynącego pomiędzy elektrodami zgrzewalniczymi. Miało to na celu wytwarzanie energii cieplnej na powierzchniach styku elektroda-materiał oraz w warstwach powłokowych MPC. Dzięki wytworzonej energii cieplnej rdzeń polimerowy nagrzewa się i osiąga stan lepko-plastyczny, dzięki czemu można go formować i usuwać ze strefy zgrzewania. Proces ten trwa do momentu zetknięcia się metalowych warstw osłonowych MPC. W tym momencie można dalej przeprowadzić typowy proces zgrzewania rezystancyjnego punkowego.

Głównym problemem podczas nagrzewania warstwy polimerowej jest jej bardzo mała przewodność cieplna ($0,28 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). W efekcie czas potrzebny na podniesienie jej temperatury jest stosunkowo długi w porównaniu z czasem przebiegu procesu zgrzewania rezystancyjnego punkowego. Próba przeprowadzenia tego procesu zbyt szybko, często powoduje przegrzanie materiału powłokowego, spalanie polimeru, a nawet wyrzucenie jego fragmentów z obszaru zgrzewania (ekspulsja) z powodu pojawienia się dużych ilości gazów będących produktem degradacji termicznej polimeru.

Przeprowadzona symulacja numeryczna pokazała jakie strefy złącza są szczególnie narażone na degradację podczas procesu oraz pozwoliła wstępnie ustalić prawidłowe parametry nagrzewania

poprzez analizę rozkładu pól temperatury wewnątrz obszaru zgrzewania. Dzięki temu można było znacząco zmniejszyć liczbę niezbędnych eksperymentów i testów. Obliczenia MES wykonano przy użyciu oprogramowania dedykowanego do symulacji procesów spawalniczych, w tym zgrzewania rezystancyjnego - Simufact Welding. Najważniejsze warunki początkowe i brzegowe zastosowane w modelu MES zostały opisane w publikacjach [M1, H1, H2].

Wyniki analizy numerycznej MES procesu zgrzewania pozwoliły na opracowanie odpowiedniej konstrukcji elementu bocznikującego prąd oraz dobór jego wstępnych parametrów. Szczególnie ważne są tu nagrzewanie i formowanie polimerowego rdzenia MPC. Przeprowadzone analizy wykazały, że zbyt szybkie nagrzewanie się łączonych materiałów powoduje silną degradację blach powłokowych MPC, gdyż grubość jednego arkusza jest bardzo mała (0,3 mm). Stąd występuje bardzo szybkie przegrzewanie się tego elementu w porównaniu z grubszą blachą DP600 (0,8 mm). Rysunek 17a pokazuje przypadek, w którym zastosowano zbyt szybkie nagrzewanie. W tym przypadku górna warstwa zewnętrzna MPC ulega silnemu przegrzaniu, odkształceniu i w efekcie rozwarstwieniu materiału MPC. Jest to efekt stosunkowo dużej oporności elektrycznej stalowej powłoki materiału Litecor, niskiej przewodności cieplnej oraz niemożności szybkiego odprowadzenia ciepła poza obszar zgrzewania. Dodatkowo bardzo duże natężenie prądu zgrzewania zastosowane w jednym impulsie powoduje silną degradację materiału powłokowego podczas gdy warstwa polimeru nadal nie osiąga odpowiedniej temperatury niezbędnej do jej usunięcia ze strefy zgrzewania. Prawidłowy proces zgrzewania przedstawiono na rysunku 17b, w którym po usunięciu warstwy polimeru z obszaru zgrzewania dalszy przebieg procesu zgrzewania jest podobny do klasycznego zgrzewania rezystancyjnego.



Rys. 17. Wyniki symulacji MES wspomaganej prądem bocznikowym, proces podgrzewania (a), proces zgrzewania (b)

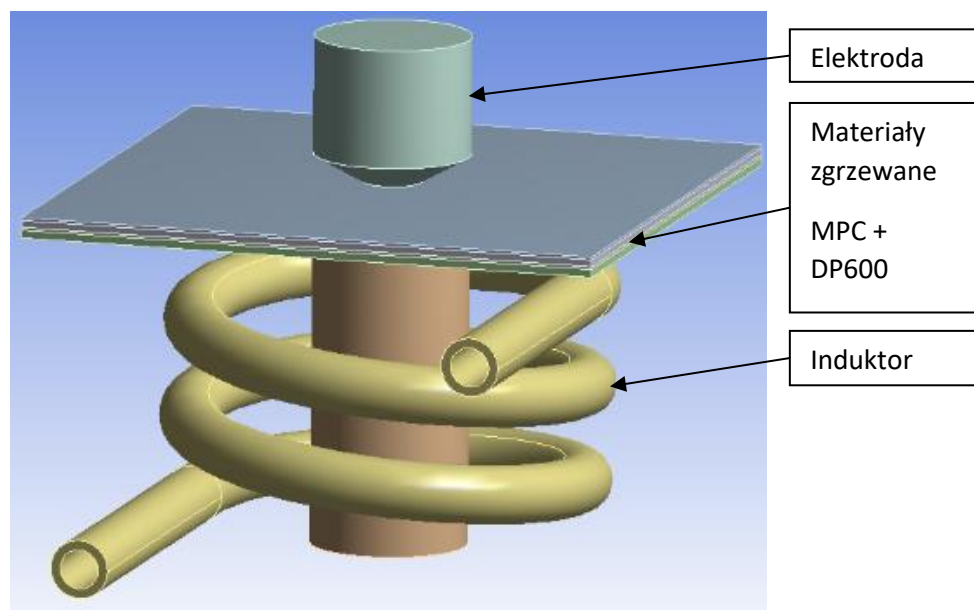
Próbne połączenia zgrzewane punktowo wykonano przy użyciu zaprojektowanego elementu bocznikowego i wybranych parametrów uzyskanych w symulacjach MES. W trakcie prac badawczych zweryfikowano model MES i dokonano ostatecznego doboru parametrów procesu. Umożliwiło to rozwiązanie problemu przegrzewania się materiału MPC przy użyciu programu zgrzewania wieloimpulsowego. Finalnie stwierdzono, że będzie się on składał z 5 do 10 impulsów podgrzewania o małej wartości prądu (ok. 3 - 4 kA). Następnie, po uformowaniu rdzenia polimerowego, przykładany jest końcowy impuls prądowy o dużej intensywności (ok. 6 kA). Taki program zgrzewania zapewnia wydłużenie czasu dystrybucji energii cieplnej w warstwie polimerowej przez co można uzyskać bardziej równomierny rozkład temperatury w strefie zgrzewania. W ten sposób możliwe jest zabezpieczenie materiału MPC przed degradacją termiczną i uzyskanie pożądanej wysokiej jakości zgrzeiny punktowej.

Weryfikacji modelu MES dokonano przy użyciu termopary i pomiarów termowizyjnych. Otrzymane wyniki potwierdzają przydatność opracowanego modelu dla wnioskowania o przebiegu procesu nagrzewania warstwy rdzenia polimerowego oraz ryzyku jego degradacji. Uzyskano wysoki stopień zgodności pomiarów termowizyjnych i przy użyciu termopary z wynikami modelowania [M1].

Model zgrzewania z udziałem wzbudnika indukcyjnego

Proces zgrzewania wspomagany indukcyjnie ma podobne podłoże do opisanej wcześniej metodyki z zastosowaniem elementu bocznikowego. W szczególności należy podkreślić, że mechanizm wstępnego podgrzewania opiera się również na przekazywaniu energii cieplnej z nagrzewanych indukcyjnie, metalowych warstw powłokowych MPC do rdzenia polimerowego. Ze względu na małą przewodność cieplną polimeru, stosunkowo długi czas potrzebny do nagrzania rdzenia MPC oraz stosunkowo dużą powierzchnię niezbędną do podgrzania powoduje, że proces ten stwarza duże ryzyko degradacji materiału kompozytowego.

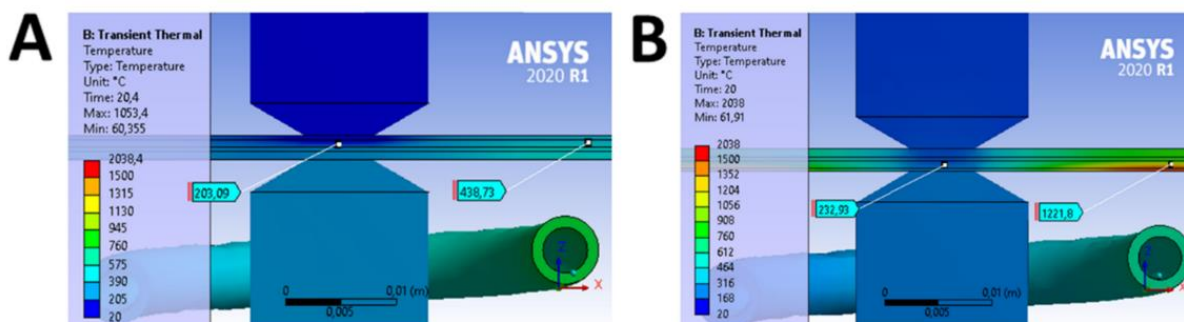
Obliczenia MES wykonano z zastosowaniem modułu Maxwell 3D programu ANSYS. Geometrię modelu pokazano na rysunku 5.6.



Rys. 18. Model układu zgrzewania RSW wspomagany nagrzewaniem indukcyjnym

Analiza ta pozwoliła zilustrować proces nagrzewania, dobrać odpowiednią geometrię i usytuowanie wzbudnika oraz konfigurację złącza, a także wstępne parametry procesu podgrzewania. Rozpatrzono dwa przypadki, pokazane na rys. 18a gdzie lita blacha stalowa została umieszczona od strony cewki oraz na rys. 18b gdzie materiał MPC był od strony cewki indukcyjnej. Głównym celem było określenie korzystniejszej technologicznie konfiguracji wykonania złącza, a przede wszystkim zmniejszenie ryzyka uszkodzenia materiału MPC, jego przegrzania, odkształcenia lub rozwarstwienia podczas procesu łączenia.

Analiza wykazała też, że materiał lity jest rodzajem bufora termicznego, który korzystnie spowalnia nagrzewanie się MPC. Zabieg ten ujednocila rozkład temperatury w obszarze zgrzewania oraz chroni materiał przed przegrzaniem, a polimer przed spalaniem. Oba przypadki zostały przeanalizowane przy tych samych parametrach i warunkach brzegowych. Jedynie pozycje materiałów zostały zmienione tak, aby lity materiał DP600 znajdował się po stronie wzbudnika (rys. 19a) lub aby materiał MPC znajdował się po stronie wzbudnika (rys. 19b).



Rys. 19. Wyniki analizy porównawczej dla dwóch konfiguracji ułożenia materiałów zgrzewanych: materiał lity DP600 po stronie wzbudnika (a), materiał MPC po stronie wzbudnika (b)

Wyniki analiz jednoznacznie wskazują, że położenie materiału MPC od strony wzbudnika powoduje jego bardzo szybkie nagrzewanie, zwłaszcza cenniejszej (0,3 mm) powłoki stalowej. Osiąga ona temperaturę ok. 1500°C po 20 s nagrzewania, natomiast polimer, w obszarze zgrzewania osiąga temperaturę 232°C co odpowiada stanowi lepko-plastycznemu. Taka temperatura jest wystarczająca, aby umożliwić swobodny przepływ polimeru, a przede wszystkim jego usunięcie ze strefy zgrzewania. Należy zauważyć, że w tym przypadku polimer osiąga temperaturę prawie 1221°C na krawędziach łączonych elementów, w pobliżu induktora. Prowadzi to do nieuniknionej degradacji materiału MPC. Oczywiście moc zużywaną do nagrzewania można zmniejszyć, ale wydłuża to czas nagrzewania i proces ten staje się nieracjonalny w odniesieniu do innych metod łączenia.

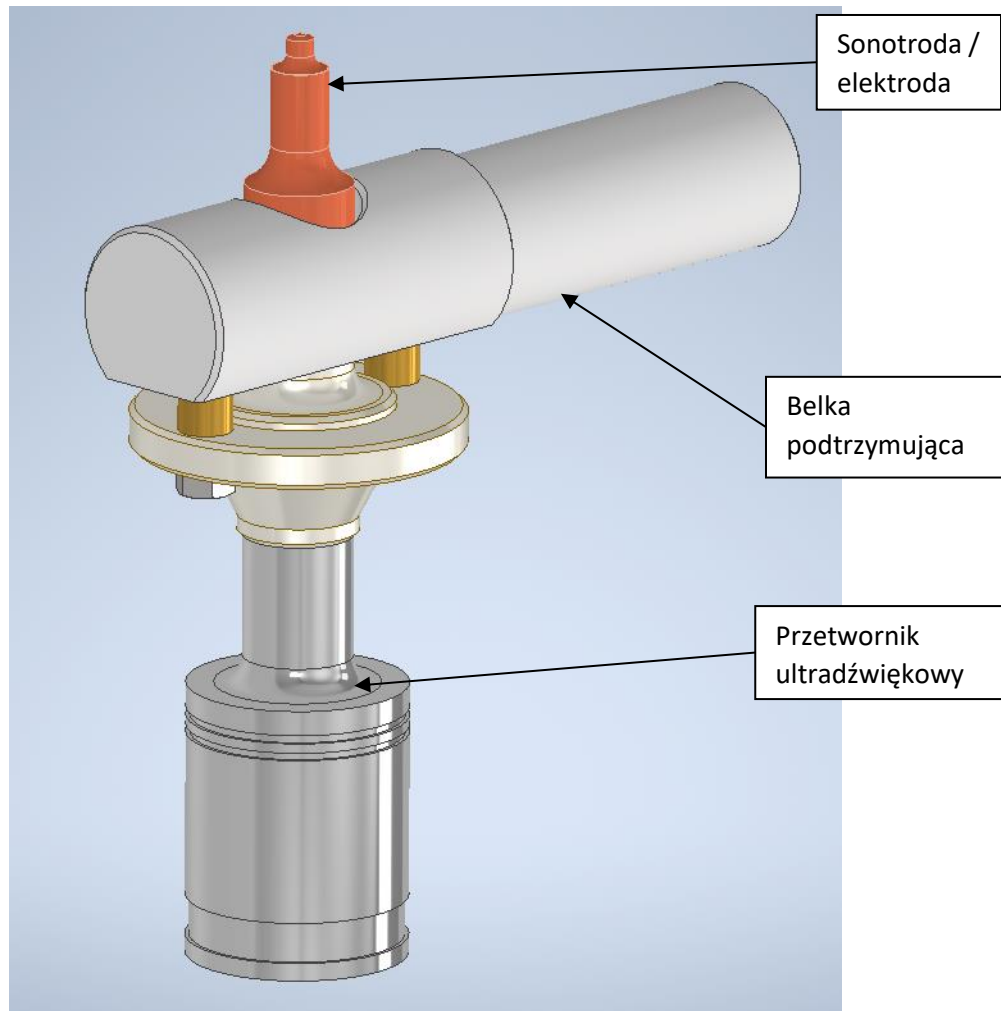
Korzystniejszym rozwiązaniem jest więc zastosowanie źródła ciepła po stronie materiału litego. Jak wykazała analiza porównawcza MES, w tym przypadku stalowa blacha powłokowa MPC nie ulega przegrzaniu. Osiąga temperaturę około 500°C po 20 sekundach nagrzewania, podczas gdy polimer w strefie zgrzewania osiąga temperaturę 203°C, co jest wystarczające do dalszej obróbki. Nie dochodzi również do nadmiernego przegrzewania się polimeru na krawędziach próbki, gdyż osiąga on temperaturę 439°C. W krótkim czasie nagrzewania nie prowadzi to do degradacji polimeru i materiału MPC jako całości. Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że metoda ta nie daje zadowalających wyników ze względu na nagrzewanie się dużej powierzchni łączonych elementów, co często powoduje ich rozwarstwienie i odkształcenie. W prezentowanej konfiguracji nie ma możliwości zmniejszenia powierzchni grzewczej, ze względu na geometrię i położenie wzbudnika.

Wyniki uzyskanych analiz porównano z wynikami eksperymentów i pozytywnie zweryfikowano. Stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 5.8. Podobnie jak miało to miejsce w przypadku modelowania procesu zgrzewania wspomaganego bocznikiem prądowym tak i w tym przypadku dokonano pomiarów weryfikacyjnych w celu oceny poprawności wykonanego modelu MES procesu nagrzewania indukcyjnego materiału MPC.

Otrzymane wyniki wskazują, że uzyskano wysoki stopień zgodności pomiarów termoparowych i termowizyjnych z wynikami modelowania. W symulacji zarejestrowano maksymalną temperaturę, w końcowej fazie nagrzewania indukcyjnego badanej próbki na poziomie 470°C. Z pomiarów przy użyciu termopary na powierzchni blachy uzyskano wartość 495°C. Występuje tu zadowalająca zbieżność wyników. Oznacza to, że poprawnie dobrano punkty pomiarowe, a wykonany model jest przydatny dla celów analizy opisywanego procesu. W szczególności pozwala na prawidłowe wnioskowanie o przebiegu procesu nagrzewania warstwy rdzenia polimerowego oraz ryzyku jego degradacji.

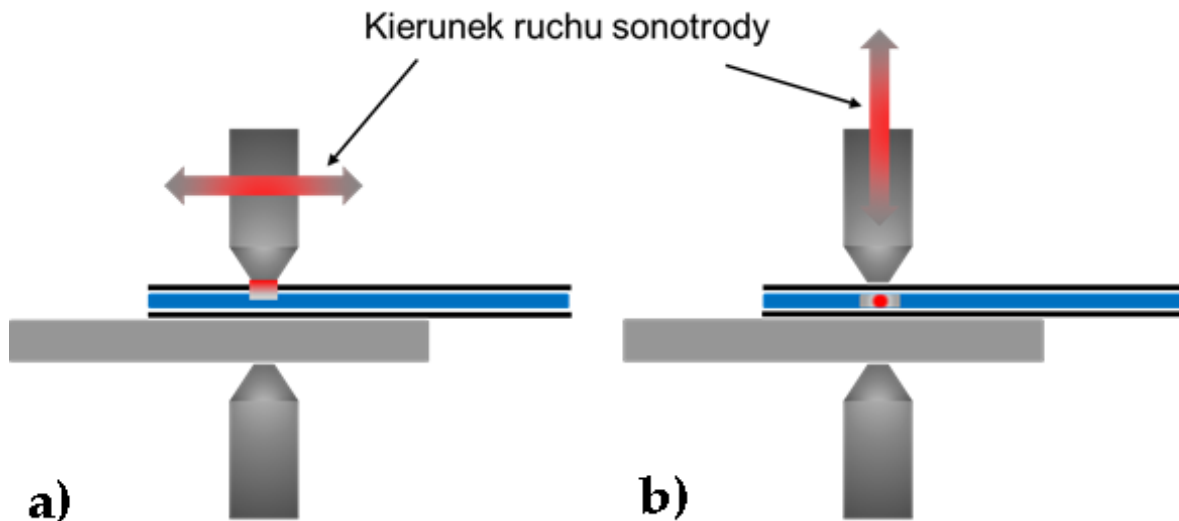
Model zgrzewania z udziałem fal ultradźwiękowych

Metoda zgrzewania hybrydowego oparta jest na systemie ultradźwiękowym, zintegrowanym z rezystancyjną zgrzewarką punktową. Element integrujący obydwie systemy pokazano na rysunku 20. Metoda ta ma na celu wyeliminowanie wad wcześniej opisanych metod tj. skrócenie czasu podgrzewania oraz zmniejszenie stopnia degradacji materiałów MPC, a ponadto poprawę kontaktu elektrycznego elementów zgrzewanych ze sobą oraz z elektrodami.



Rys. 20. Model elementów integrujących zgrzewarkę rezystancyjną z układem ultradźwiękowym

Obliczenia MES miały na celu, w pierwszej kolejności, dobranie odpowiedniego rodzaju drgań (wzdłużne lub poprzeczne), które mogą być zastosowane w procesie podgrzewania polimeru. W obu przypadkach rozważane było zjawisko nagrzewania lepko-sprężystego, wynikające z tarcia wewnętrznego cząsteczek polimeru. Wyjaśnienie tej kwestii wymagało porównania obydwu metod pod względem efektywności procesu i rozkładu temperatury złącza podczas podgrzewania wstępnego. W tym celu zaprojektowano dwa systemy drgające. Pierwszy z nich reprezentuje kierunek poprzeczny drgań (rys. 21a) a drugi kierunek wzdłużny (rys. 21b).



Rys. 21. Analizowane układy drgające, poprzeczny (a), wzdłużny (b)

Model opracowano w środowisku ANSYS Coupled Field Transient, w którym zastosowano złożoną analizę termomechaniczną, pozwalającą na zastosowanie komponentu zwanego nagrzewaniem lepko-sprężystym, opisanym równaniem (1). Szczególnie ważne jest zaimplementowanie modułu Younga w postaci zespolonej (2), złożonej z modułu stratności i modułu zachowawczego, w postaci kompatybilnej z modelem materiałowym Prony-Series, dedykowanym dla materiałów lepko-sprężystych. Dzięki temu możliwe jest określenie ilości energii cieplnej generowanej w rdzeniu polimerowym, wyrażone wzorem:

$$\Phi = \pi f \varepsilon_0^2 E'' \quad (1)$$

w którym:

Φ - gęstość strumienia ciepła [W/m^2],

f - częstotliwość drgań [Hz],

ε_0 - amplituda odkształcenia [-],

E'' - moduł stratności [Pa].

$$E = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) (\sin(\delta) + i \cos(\delta)) = E' + iE'' \quad (2)$$

w którym:

E' - moduł zachowawczy [Pa],

E'' - moduł stratności [Pa],

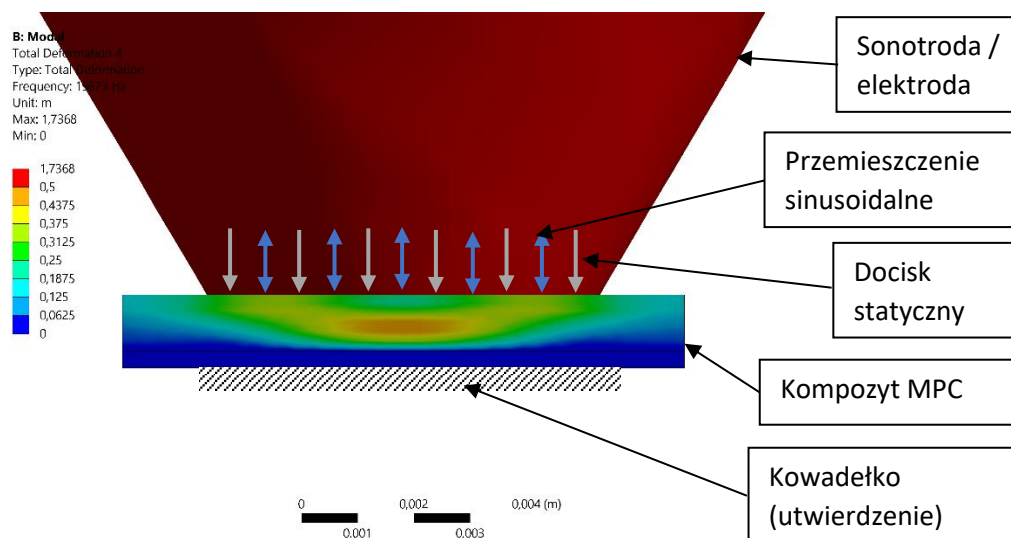
σ_0 - amplituda naprężenia [Pa],

ε_0 - amplituda odkształcenia [-],

δ - kąt przesunięcia w fazie naprężenia od odkształcenia [°],

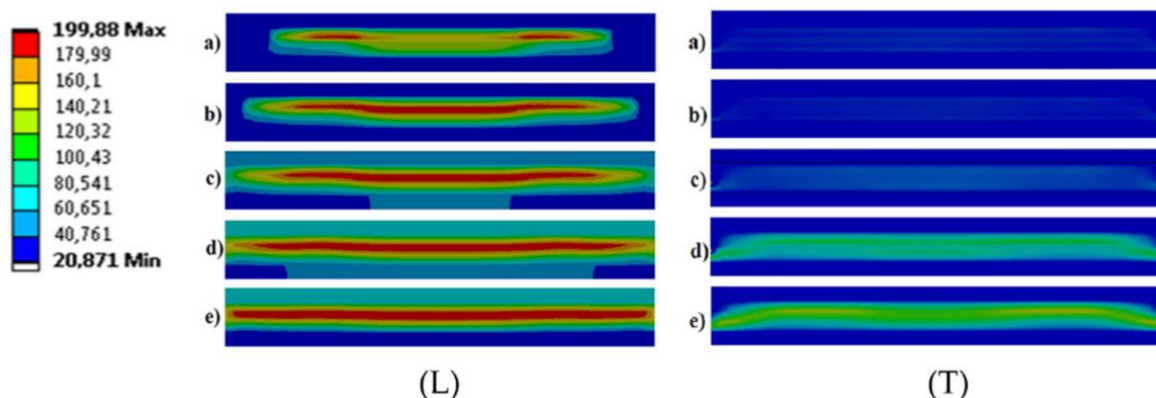
i - jednostka urojona [-].

Jako wymuszenie zastosowano zależne od czasu przemieszczenie sinusoidalne (rys. 22). Częstotliwość drgań wymuszonych wynosiła 20 kHz, a ich amplituda 50 μm . Dodatkowo zastosowano siłę statyczną o wartości 1 kN, jako docisk elektrody i sonotrody. Dolna elektroda jest utwierdzona. Stopnie swobody zostały zablokowane w postaci zerowej translacji w obu, prostopadłych kierunkach.

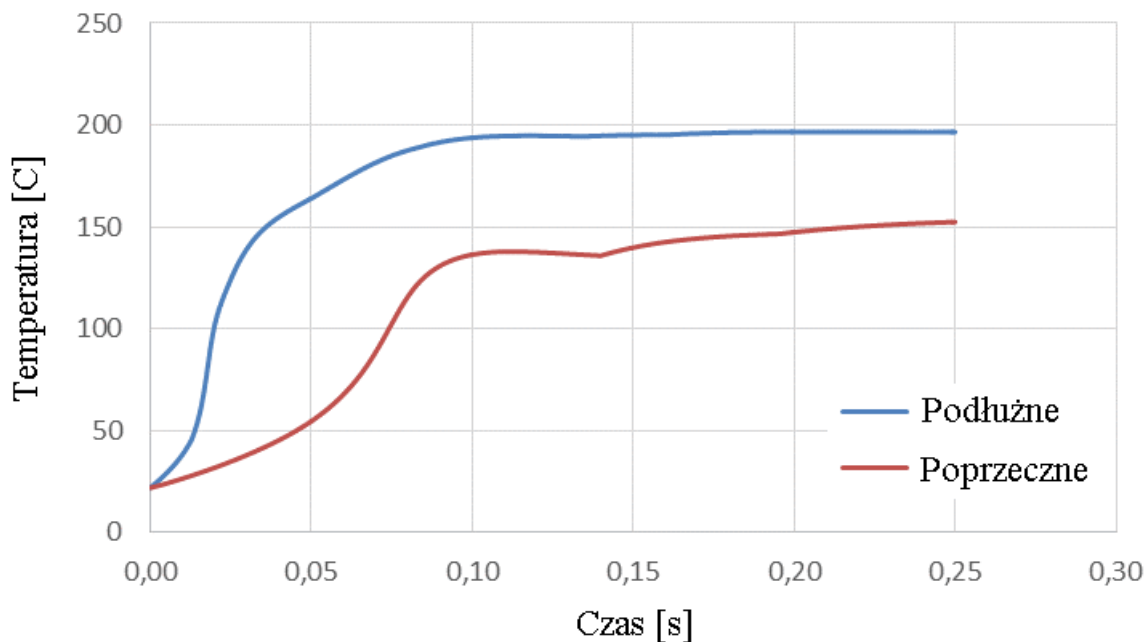


Rys. 22. Model obliczeniowy – najważniejsze warunki brzegowe

Głównym celem analizy MES było porównanie każdej z dwóch metod nagrzewania ultradźwiękowego z zastosowaniem drgań poprzecznych i wzdłużnych. Analizę wyników przeprowadzono pod względem doboru czasu nagrzewania i rozkładu temperatury w kontekście osiągnięcia wymaganej temperatury uplastycznienia rdzenia polimerowego. W obu modelach MES kierunek drgań był jedynym zmiennym parametrem, aby nie wprowadzać dodatkowych zmiennych i zapewnić stałe warunki analizy porównawczej. Wyniki analizy MES procesu nagrzewania ultradźwiękowego wykazały, że najbardziej efektywną metodą nagrzewania jest proces UT o drganiach wzdłużnych. Rozkład temperatury w tym przypadku jest bardziej skoncentrowany w obszarze zgrzewania (rys. 23L) niż w przypadku drgań poprzecznych (rys. 23T).



Rys. 23. Rozkład temperatury podczas ultradźwiękowego nagrzewania rdzenia polimerowego:
L) drgania wzdłużne, T) drgania poprzeczne,
a) $t_a = 10 \text{ ms}$, b) $t_b = 25 \text{ ms}$, c) $t_c = 50 \text{ ms}$, d) $t_d = 125 \text{ ms}$, e) $t_e = 250 \text{ ms}$



Rys. 24. Porównanie czasu potrzebnego do osiągnięcia wartości maksymalnej temperatury dla drgań wzdłużnych i poprzecznych

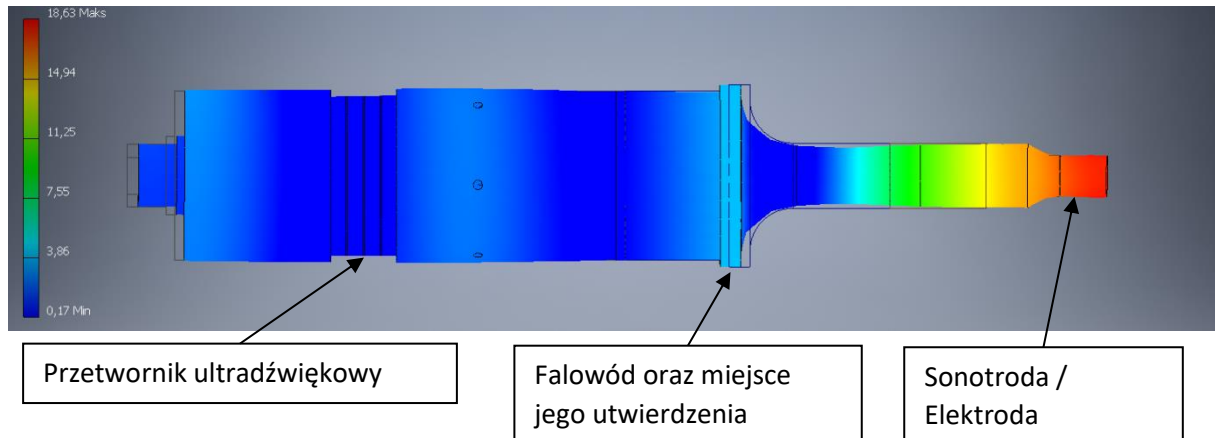
Ten rodzaj wibracji (podłużne) zapewnia najkrótszy czas nagrzewania (rys. 24), bez niepotrzebnego nagrzewania warstw powłokowych MPC.

Weryfikacji modelu MES dokonano na innym stanowisku. Badanie przeprowadzono w Instytucie Fraunhofera w Dreźnie z zastosowaniem klasycznej zgrzewarki ultradźwiękowej wyposażonej w dedykowaną sonotrodę oraz kamerę termowizyjną Infratech ImageIR dzięki czemu możliwe było oszacowanie rozkładu temperatury warstwy polimerowego rdzenia MPC w wybranych fazach procesu formowania polimeru. Badania wykazały, iż w momencie formowania polimerowy rdzeń osiąga temperaturę 200°C, co jest zgodne z wynikami obliczeń numerycznych MES. Dzięki temu pozytywnie zweryfikowano poprawność opracowanego modelu co pozwoliło na prowadzenie dalszych analiz.

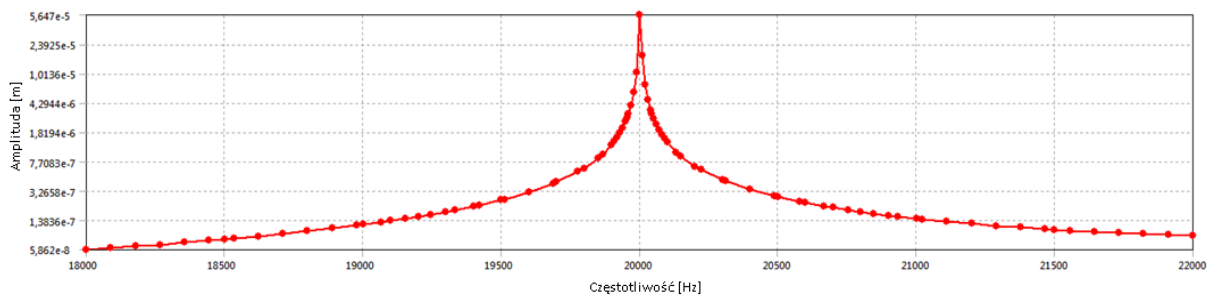
Model układu drgającego

Budowę układu drgającego rozpoczęto od wykonania odpowiednich modeli CAD oraz obliczeń numerycznych z zastosowaniem metody elementów skończonych (rys. 25). Poza typowymi obliczeniami wytrzymałościowymi, statycznymi, dla poprawnego zaprojektowania układu drgającego konieczne było przeprowadzenie analizy modalnej i harmonicznej. Miało to na celu opracowanie odpowiedniej geometrii elementów układu drgającego, która zapewni przede wszystkim niezbędny poziom amplitudy drgań powierzchni roboczej sonotrody przy częstotliwości rezonansowej wynoszącej 20 kHz. W pierwszej kolejności, wykonano obliczenia istotnych elementów układu ultradźwiękowego, w tym sonotrody i falowodu (boostera) łączącego sonotrodę z przetwornikiem. Następnie przeanalizowano złożenie wymienionych elementów w jeden układ drgający o tej samej częstotliwości rezonansowej. Pozwoliło to na odpowiednie dostrojenie układu, uwzględniając jego naprężenia wewnętrzne pochodzące głównie od śrub łączących jego elementy. Niektóre elementy tego układu są nietypowe dla zastosowań ultradźwiękowej obróbki tworzyw sztucznych. Zwykle sonotrody i booster są wykonywane ze stali lub stopów tytanu, ponieważ te materiały mają duże właściwości

wytrzymałościowe, zmęczeniowe oraz wykazują stosunkowo mały poziom tłumienia drgań. W proponowanym rozwiązaniu jednym z dominujących kryteriów doboru materiału na omawiane elementy była duża przewodność elektryczna i cieplna. Z tego względu na sonotrodę postanowiono zastosować materiał dedykowany na elektrody zgrzewalnicze tj. stop miedzi CRM16, charakteryzujący się, poza dobrą przewodnością elektryczną, również stosunkowo wysoką temperaturą mięknięcia (ok. 500°C). Na booster zastosowano stop aluminium AA6061 gdyż materiał ten ma również bardzo dobre właściwości przewodzące (cieplne i elektryczne) jak i wytrzymałościowe.



Rys. 25. Wynik analizy modalnej całościowego modelu układu drgającego



Rys. 26. Wynik analizy harmonicznej układu na powierzchni roboczej sonotrody

Uzyskany wynik potwierdza prawidłowe dostrojenie układu, a także umożliwia projektowanie oraz analizę pracy innych geometrii sonotrod. Jest to bardzo istotne narzędzie, umożliwiające znaczne ograniczenie liczby testów niezbędnych do wytworzenia układu o właściwych parametrach użytkowych. Dzięki opracowanym modelom MES możliwe było znaczące ułatwienie projektowania sonotrod, a także wstępny dobór parametrów obróbki ultradźwiękowej, zapewniających prawidłowe działanie hybrydowego stanowiska do zgrzewania materiałów MPC.

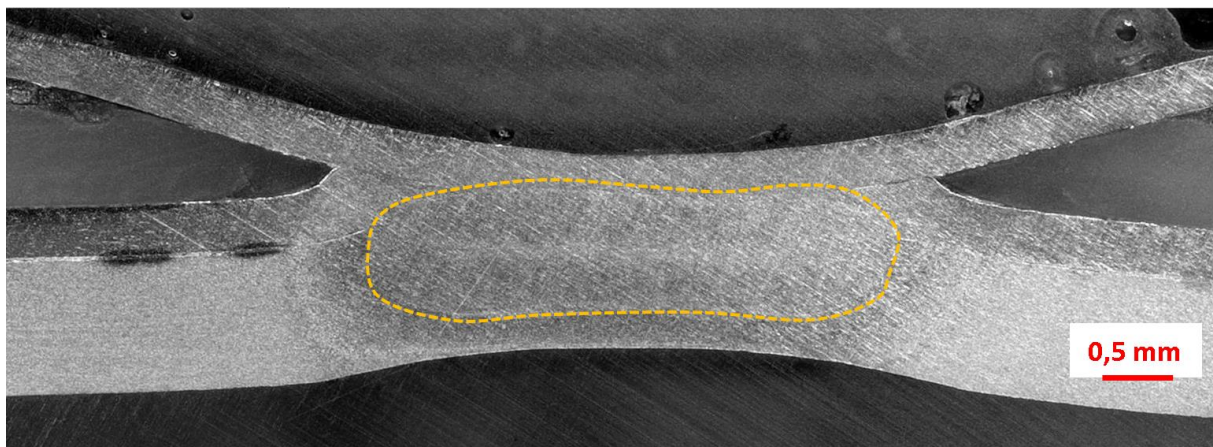
4.7 Wyniki badań złączy zgrzewanych MPC

Badanie metalograficzne i SEM złączy zgrzewanych

Wykonane złącza zostały poddane badaniom metalograficznym w celu oceny ich struktury wewnętrznej, w szczególności geometrii jądra zgrzeiny i obecności niezgodności spawalniczych. Próbki po przecięciu, szlifowaniu i polerowaniu zostały wytrawione 2% Nitałem. Obserwację prowadzono pod mikroskopem świetlnym (Keyence VHX-6000, Keyence). Ponadto, w niektórych przypadkach, gdzie wymagana była bardziej szczegółowa analiza struktury wewnętrznej złącza, zastosowano skaningową mikroskopię elektronową (SEM). W tym celu wykorzystano mikroskop elektronowy TESCAN Vega 3.

Metoda boczniowa

Złącza wykonane z zastosowaniem bocznika prądowego poddano badaniom metalograficznym. Geometrię jądra zgrzeiny pokazano na rysunku 27. Przedstawiona makrostruktura potwierdza, że badane złącze jest jednorodne oraz, że nie są widoczne istotne, wewnętrzne niezgodności zgrzewalnicze. Dzięki odpowiedniemu doborowi parametrów procesu możliwe było wykonanie połączeń zgrzewanych bez niezgodności, takich jak wtrącenia, pory czy pęknięcia. Ponadto, istotne jest, że uzyskano stopienie wszystkich trzech warstw metalowych składających się na złącze. Będzie to świadczyło o zadowalających właściwościach wytrzymałościowych takiego złącza. Średnica jądra zgrzeiny, mierzona podczas badań metalograficznych, na zglądzie wynosiła zwykle około 3,9 mm. Brak również śladów ekspulsji, śladów degradacji którejs z powłok MPC czy zanieczyszczenia obszaru złącza pozostałościami polimerowego rdzenia.

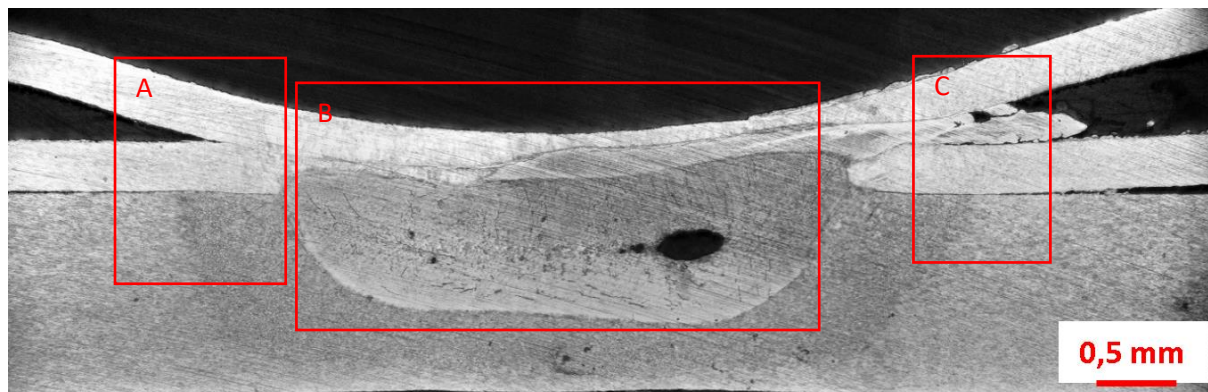


Rys. 27. Makrostruktura złącza wykonanego metodą boczniową przy zastosowaniu elektrod kulistych z zaznaczonym obszarem jądra zgrzeiny

W trakcie badań tej technologii zaobserwowano również różne niezgodności i wady wytwarzanych połączeń zgrzewanych. Proces doboru parametrów pokazał, że przedstawiana metoda bywa wrażliwa na zakłócenia, jak również nieprawidłowe parametry lub niewłaściwą geometrię elektrod. Na rysunku 28 pokazano przykład złącza wykonanego z zastosowaniem płaskiej elektrody od strony materiału litego DP600. Doszło tu do powstania ekspulsji materiału metalicznego pomiędzy powłoki MPC. Zwykle jest to powodowane poprzez zbyt długi lub zbyt intensywny proces nagrzewania obszaru złącza.

Ponadto w centralnej części jądra zgrzeiny widoczne jest pasmo drobnych pęcherzy i wtrąceń prawdopodobnie powstałych w wyniku niepełnego oczyszczenia obszaru zgrzewania podczas

formowania polimerowego rdzenia. Widoczna jest też jama skurczowa, która występuje zazwyczaj gdy podczas krystalizacji nie zostaną zapewnione odpowiednie warunki formowania jądra zgrzeiny. W przypadku zastosowania płaskiej elektrody znacznie trudniej jest odkształcić elementy zgrzewane tak aby ujednorodnić obszar zgrzewania, doprowadzając do zamknięcia powstałych jam skurczowych i usunięcia zanieczyszczeń, niż ma to miejsce w przypadku elektrod kulistych.



Rys. 28. Widok zgrzeiny wykonanej metodą bocznikową z zastosowaniem płaskiej elektrody

Kompensacja tego zjawiska poprzez zwiększanie siły docisku elektrod i czasu ich końcowego docisku, prowadzi często do pęknięcia powłok MPC, a nawet wypłynięcia polimeru na zewnątrz materiału. Nie oznacza to, że prawidłowy dobór parametrów takiej konfiguracji złącza nie jest możliwy ale zastosowane parametry będą znacznie odbiegały od tych stosowanych podczas zgrzewania elektrodami kształtowymi.

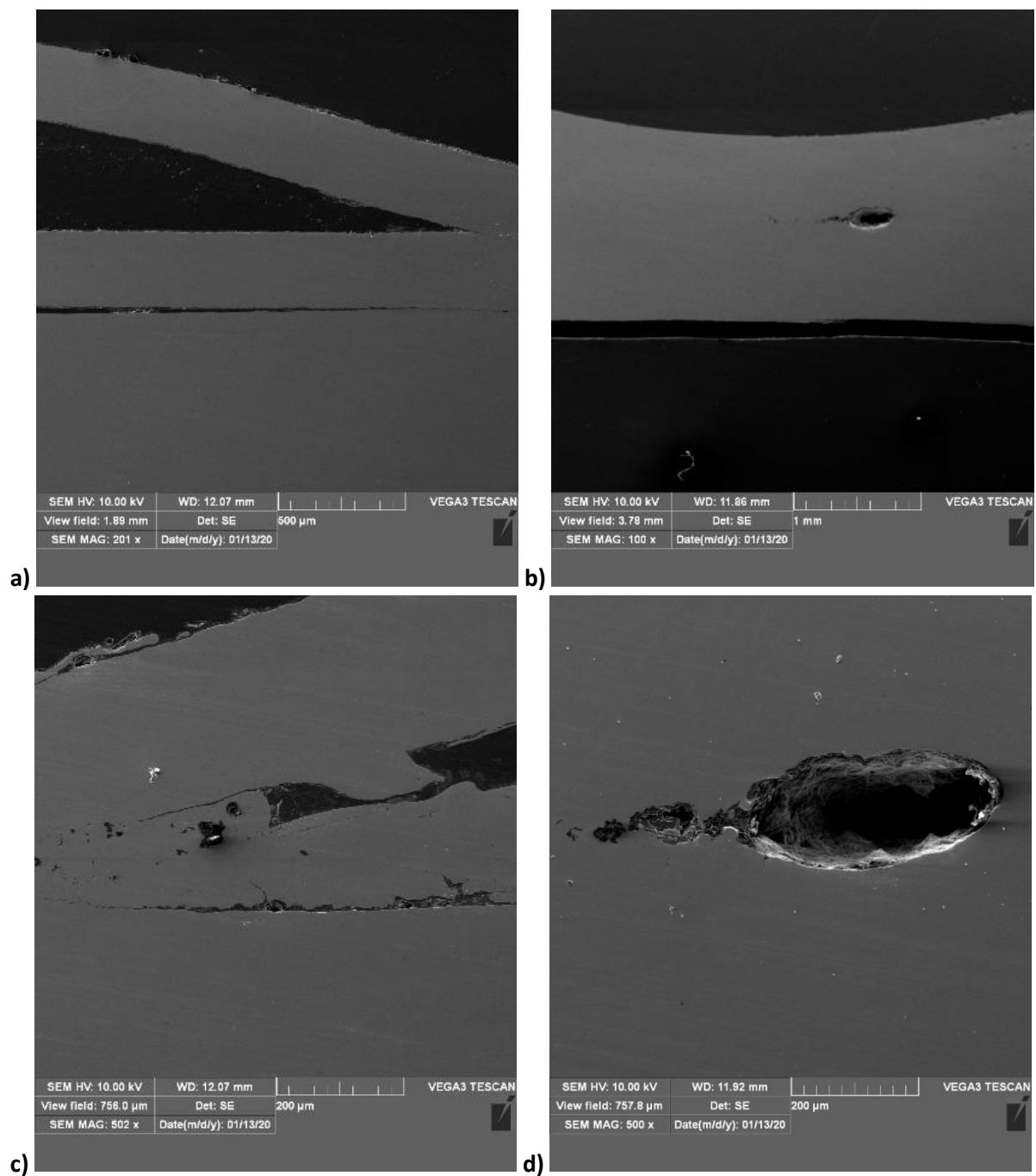
Analizując strukturę wewnętrzną złącza przedstawionego na rysunku 28, warto zwrócić uwagę na wyniki uzyskane ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Pozwalają one zweryfikować informację na temat rodzaju niezgodności jakie występują wewnątrz jądra zgrzeiny oraz jego okolicach, ujawnione przy użyciu np. mikroskopii świetlnej.

W omawianym złączu szczegół A nie wykazuje niezgodności. Zarówno materiały łączone jak i polimerowy rdzeń są jednorodne (rys. 29a).

Szczegół B przedstawia jądro zgrzeiny wraz z niewielkim obszarem porowatości i jamą skurczową (rys. 29b). Badanie potwierdza, że poza stosunkowo małym obszarem zajęтым przez wymienione niezgodności, jądro zgrzeiny jest jednorodne, a w szczególności wszystkie warstwy metaliczne, składające się na złącze zgrzewane, są prawidłowo połączone.

Rysunek 29d przedstawia fragment obszaru jądra zgrzeiny z niezgodnościami. Jest to obraz pozwalający jednoznacznie stwierdzić, iż w tym obszarze występują jedynie śladowe ilości wtrąceń polimerowych. Nie spowodowały one braku kontaktu prądowego pomiędzy łączonymi warstwami MPC ale w wyniku ich termicznej degradacji (spalenia) w wysokiej temperaturze zgrzewania powstały fazy gazowe, które mogły przyczynić się do powstania stref porowatych oraz utrudnić zamykanie jam skurczowych.

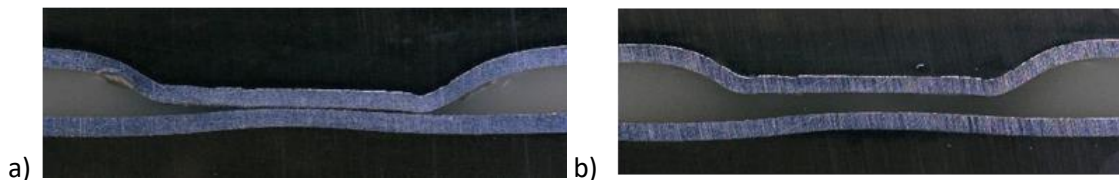
Szczegół C przedstawia skutki ekspulsji materiału metalicznego, skierowanej do przestrzeni znajdującej się pomiędzy warstwami powłokowymi materiału MPC (rys. 29c). Dominują obszary gdzie faza metaliczna miesza się z fazą polimerową. W mniejszym stopniu występują również obszary wolne od fazy polimerowej, głównie w obszarze styku materiału litego i powłoki MPC.



Rys. 29. Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM):
 szczegół A rys. 28 (a), szczegół B rys. 28 (b),
 szczegół C rys. 28 (c), szczegół B rys. 28 (d)

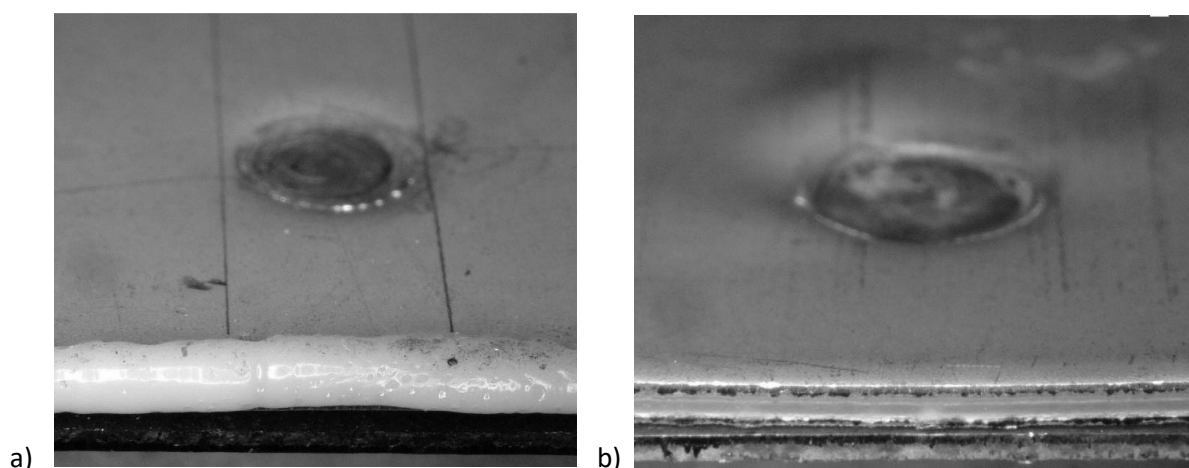
Metoda indukcyjna

Proces zgrzewania wspomagany indukcyjnie prowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie materiał podgrzany był przy użyciu prądów wirowych, indukowanych w powłokach metalowych materiału MPC. Parametry zostały dobrane w taki sposób, aby nie uszkodzić zgrzewanych elementów, nie doprowadzić np. do rozwarstwienia, wypalenia polimeru czy deformacji elementu zgrzewanego. Proces prowadzono przy natężeniu prądu wzбудnika $I_z = 468$ A i czasie nagrzewania $t = 30$ s (rys. 30a). Dla zbyt krótkiego czasu nagrzewania, polimer nie jest usuwany w całości z obszaru zgrzewania (rys. 30b).



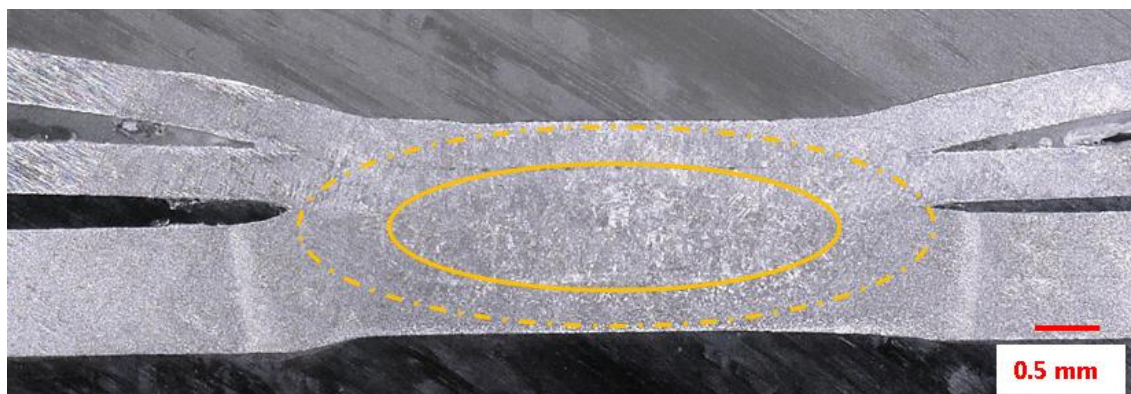
Rys. 30. Dobór parametrów podgrzewania indukcyjnego, poprawny czas nagrzewania 30 s (a), zbyt krótki czas nagrzewania 20 s (b)

Po upływie czasu nagrzewania indukcyjnego, udarowo aplikowano siłę docisku elektrod zgrzewarki o wartości $F = 2$ kN. Zastosowanie siły docisku w sposób quasistatyczny spowodowało wystąpienie znacznej wypłytki materiału polimerowego rdzenia oraz deformację elementu zgrzewanego (rys. 31a). Zastosowanie metody udarowej polegało na chwilowym uniesieniu elektrody na wysokość ok. 20 mm ponad materiał i dynamicznym opuszczeniu jej w końcowym etapie nagrzewania indukcyjnego, powodując uderzenie w materiał zgrzewany. Zabieg ten istotnie zmniejszył ilość wypływającego polimeru. Wynikało to z faktu, iż uplastyczniony polimer przejawia cechy płynu nienewtonowskiego, którego proces płynięcia jest silnie zależny od gradientu przyłożonego naprężenia. W tym przypadku gwałtowne zadziaływanie skoncentrowaną siłą w miejscu zgrzewania powoduje, iż lepko-plastyczny polimer nie może wypłynąć tak szybko na zewnątrz, powodując odkształcenie powłoki MPC i zmagazynowanie nadmiaru substancji wokół zgrzeiny (rys. 31b).



Rys. 31. Proces formowania polimerowego rdzenia w metodzie indukcyjnej, quasistatyczny (a), udarowy (b)

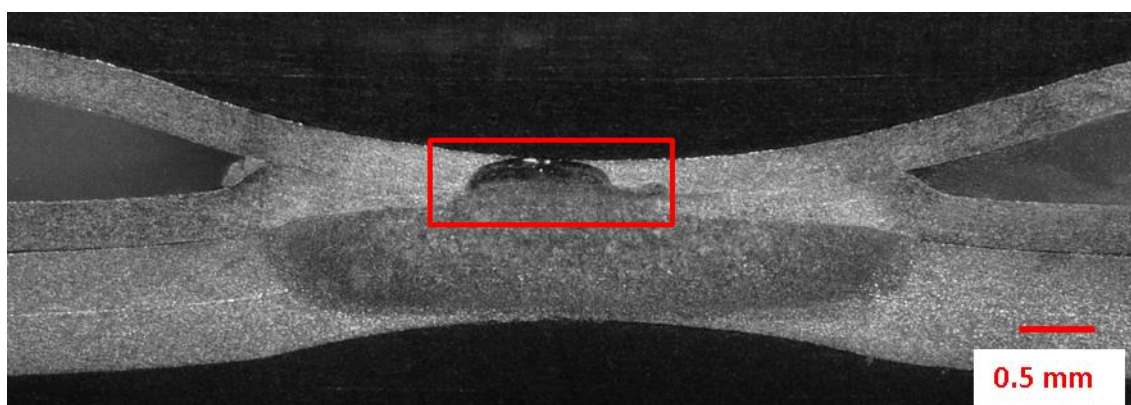
W wyniku przeprowadzonych eksperymentów uzyskano grupę złączy zgrzewanych o zadowalających właściwościach mechanicznych i geometrycznych. Jak wykazała analiza metalograficzna średnica jądra zgrzeiny w tym przypadku wynosiła ok. 4,7 mm. Dobrane parametry pozwalały uzyskiwać połączenia zgrzewane zadowalającej wytrzymałości i stosunkowo małej głębokości wgniotu po elektrodach. Ponadto nie stwierdzono występowania niezgodności, takich jak pęknięcia, pory lub jamy skurczowe. Widoczna jest jednak dość rozległa strefa wpływu ciepła ale jądro zgrzeiny jest poprawnie ukształtowane i obejmuje wszystkie trzy warstwy metaliczne (rys. 32).



Rys. 32. Poprawne złącze zgrzewane w procesie wspomaganym indukcyjnie

Zastosowanie zbyt dużych parametrów procesów nagrzewania wstępnego jak i samego zgrzewania prowadzi tu do drastycznego spadku jakości połączeń. Zbyt silne podgrzewanie wstępne powoduje bardzo szybką degradację materiału MPC w tym rozwarstwienie, deformację elementu zgrzewanego oraz przegrzanie i zniszczenie powłok ochronnych (np. cynkowych), a nawet pory (rys. 33) i pęknięcia metalowych powłok MPC.

Ponadto w skrajnych przypadkach geometria złącza była całkowicie zaburzona w wyniku ślizgania się okładek MPC na stopionym rdzeniu polimerowym.

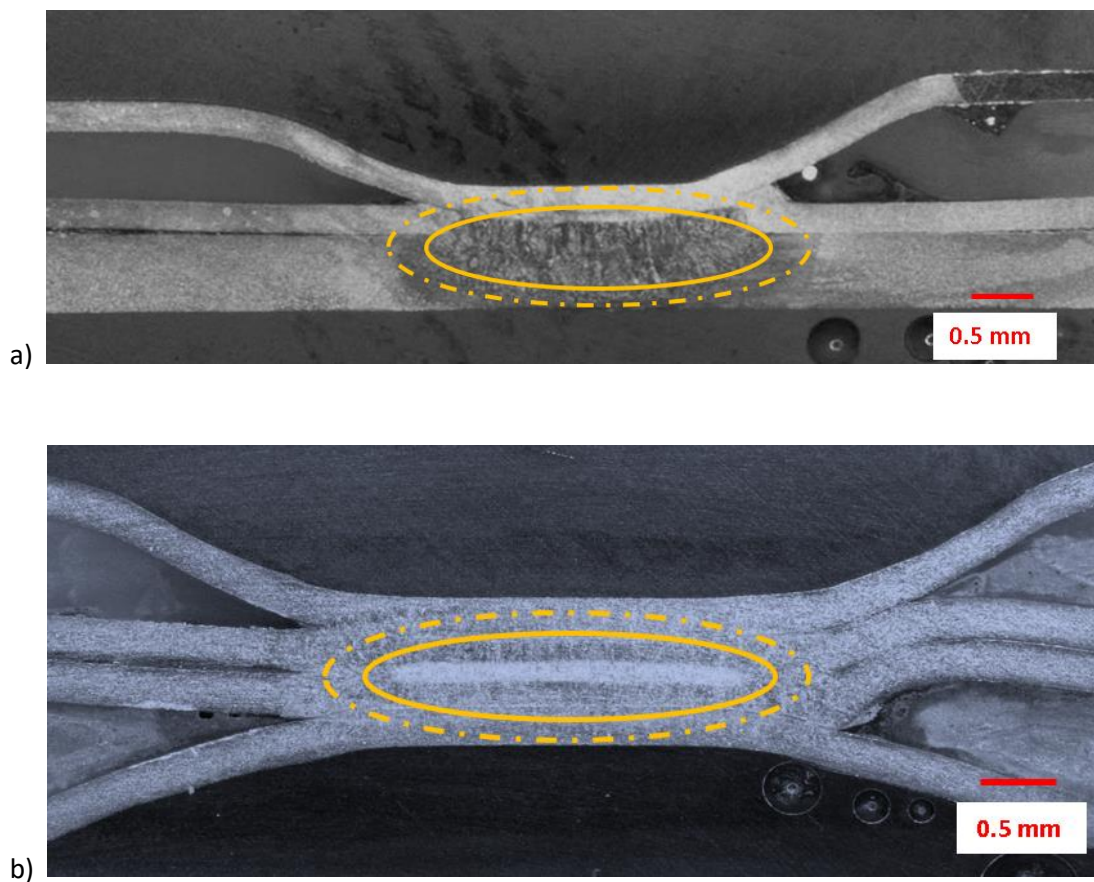


Rys. 33. Złącze zgrzewane w procesie wspomaganym indukcyjnie z niezgodnością (por)

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że metoda ma pewien potencjał wdrożeniowy, wymaga jednak szerszych badań nad procesem podgrzewania wstępnego. Pierwszy etap podgrzewania powinien być każdorazowo precyzyjnie dobrany, tak aby polimer nie wypływał z wnętrza materiału MPC, a jego powłoki nie ulegały niepożądanym odkształceniom.

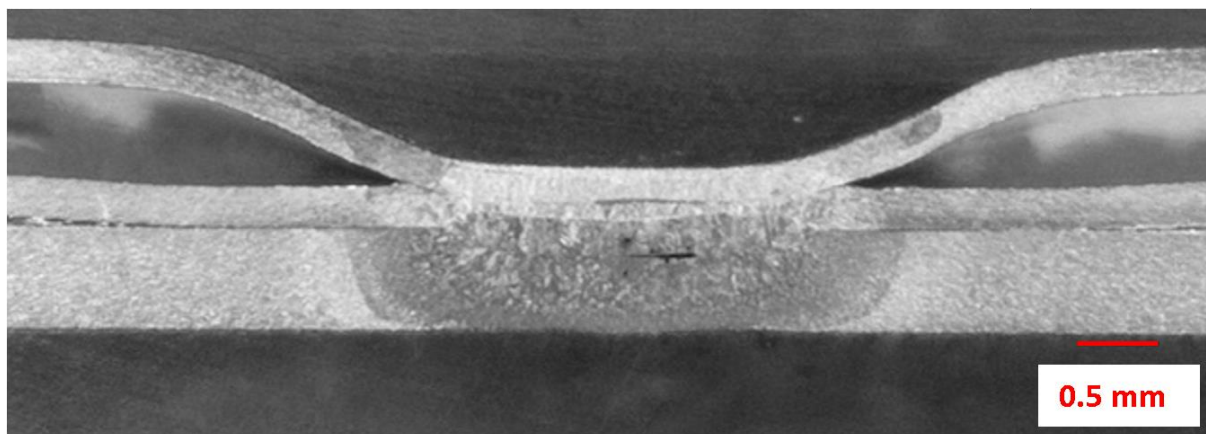
Metoda ultradźwiękowa

Złącza wykonane metodą hybrydową ultradźwiękowo-rezystancyjną przedstawiono na rysunku 34. Metoda ta pozwala na wykonanie złączy z różnych materiałów, jak np. Litecor + DP600 (rys. 34a) oraz tych samych jak np. Litecor + Litecor (rys. 34b). Charakteryzują się one poprawnie ukształtowanym jądrem zgrzeiny, obejmującym wszystkie warstwy metaliczne złącza. Strefa wpływu ciepła jest bardzo wąska, znacznie mniejsza niż w dwóch innych metodach (bocznikowej i indukcyjnej). Rdzeń polimerowy został poprawnie usunięty i nie uległ znaczącej degradacji. Dzięki temu, że polimerowy rdzeń jest nagrzewany lokalnie, w wyniku tarcia wewnętrznego jego cząstek, a nie w wyniku transportu energii cieplnej z powłok MPC, połączenie zgrzewane jest wolne od porów i nieciągłości.



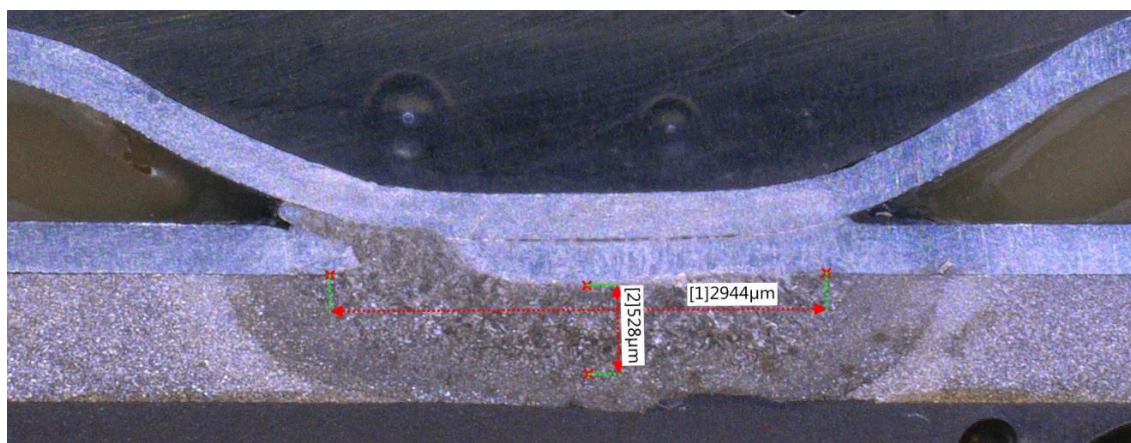
Rys. 34. Poprawne złącze zgrzewane w procesie wspomaganym ultradźwiękowo, kombinacja materiałów Litecor + DP600 (a), kombinacja materiałów Litecor + Litecor (b)

Niezgodności zgrzein punktowych w tej metodzie występują bardzo rzadko. Zdarzały się jednak przypadki takie, jak np. braki wtopienia pomiędzy warstwami metalu (rys. 35). Występują one głównie w wyniku wahań parametrów zgrzewania np. zmian gęstości prądu zgrzewania spowodowanych zużyciem powierzchni roboczych elektrod lub sonotrody.



Rys. 35. Złącze zgrzewane w procesie wspomaganym ultradźwiękowo wykazujące niezgodności

Przykład pokazany na rysunku 35 potwierdza, że zastosowanie zaniżonych parametrów prądowych, w programie jednoimpulsowym, pozwala uniknąć ekspulsji, ale nie prowadzi do powstania prawidłowego jądra zgrzeiny. Zbyt wysokie wartości prądu zgrzewania prowadzą do wystąpienia ekspulsji (rys. 36).



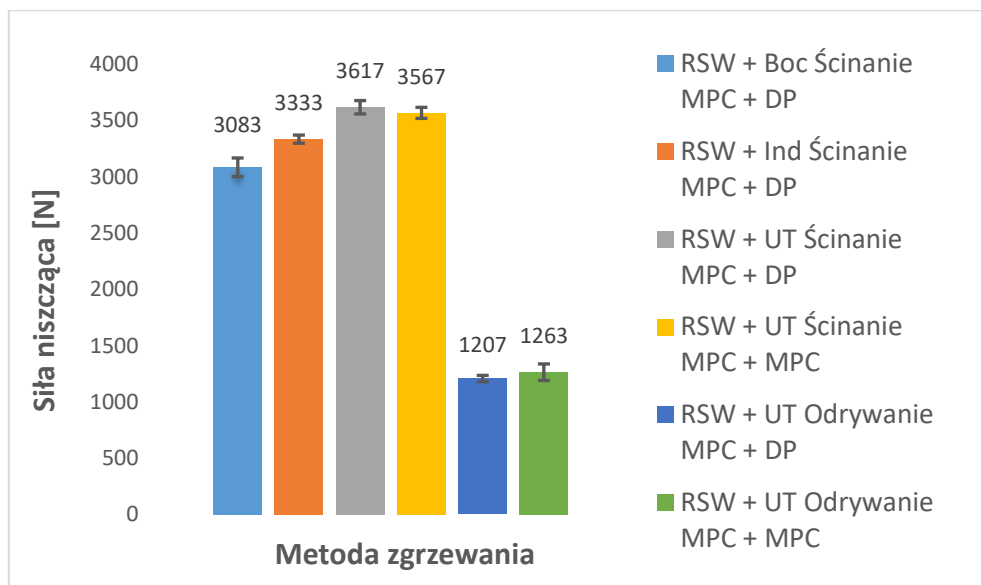
Rys. 36. Struktura złącza wykonanego dla programu jednoimpulsowego $I_z = 4,6$ kA, z ekspulsją

Natomiast zastosowanie programu dwuimpulsowego pozwoliło na usunięcie zanieczyszczeń (warstw ochronnych, resztek polimeru i innych) z obszaru zgrzewania bez wytwarzania zbyt wysokich gradientów temperatury i znacznego przegrzania polimerowego rdzenia (rys. 34). W złączu tym występują również niewielkie nieciągłości warstwy polimerowej ale nie ma to istotnego wpływu na wytrzymałość złącza.

Próby wytrzymałościowe

Próby ścinania przeprowadzono dla wszystkich trzech metod zgrzewania. Ponadto dla metody 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 załącza. Dane te pozwalają wnioskować o prawidłowości przebiegu procesu łączenia daną metodą oraz jej potencjale aplikacyjnym.

W ramach badań zaplanowano sześć testów wytrzymałościowych, w tym próby na ścinanie i rozciąganie poprzeczne (odrywanie). Do każdego testu wykonano po pięć próbek dla których wyznaczono średnie arytmetyczne oraz średnie odchylenie standardowe.



Rys. 37. Porównanie siły niszczącej w badanych metodach łączenia, kombinacji materiałowych oraz rodzaju próby (ścinanie / odrywanie)

Na przedstawionym rysunku 37 dokonano porównania siły niszczącej połączenia. Zestawiono próbki wykonywane różnymi metodami zgrzewania, które oznaczono następująco:

- RSW + Boc – próbka zgrzewana w procesie wspomaganym elementem bocznikującym,
- RSW + Ind – próbka zgrzewana w procesie wspomaganym indukcyjnie,
- RSW + UT – próbka zgrzewana w procesie wspomaganym ultradźwiękowo.

Dla metody wspomaganej ultradźwiękowo zbadano dwie kombinacje materiałowe:

- MCP + DP – próbki złożone z materiału Litecor o grubości 1,3 mm i stali DP600 o grubości blachy 0,8 mm,
- MCP + MPC – próbka złożona z dwóch elementów tego samego gatunku tj. materiału Litecor o grubości 1,3 mm.

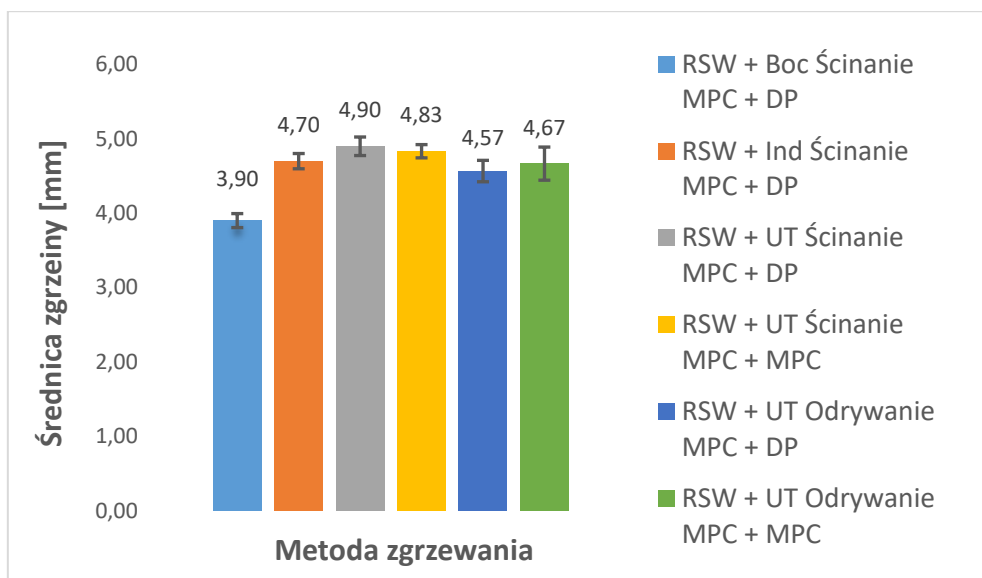
Ponadto dla metody RSW + UT przeprowadzono próby wytrzymałości na ścianie i odrywanie złączy.

Uzyskane wyniki pokazują, że wytrzymałość połączeń zgrzewanych wszystkimi rozważanymi metodami jest zbliżona. W próbie ścinania najmniejszy wynik uzyskano dla próbek zgrzewanych metodą bocznikową, natomiast największy dla metody zgrzewania wspomaganego ultradźwiękowo. Różnice zarejestrowane w próbie ścinania nie przekraczają 15% dla poszczególnych metod.

Dla metody zgrzewania wspomaganego ultradźwiękowo przeprowadzono również testy dla kombinacji materiałowej tego samego gatunku tj. Litecor + Litecor. Zbadano złącza w próbie ścinania oraz odrywania. W próbie ścinania różnica pomiędzy wytrzymałością połączenia różnych gatunków i połączeniami jednego gatunku materiału wyniosła 1,4%, a w przypadku próby odrywania 4,4%. W praktyce pomiarowej należy uznać, że są to wyniki porównywalne.

Po przeprowadzeniu prób wytrzymałościowych, na zniszczonych próbkach dokonano pomiarów średnicy złącza. Należy zaznaczyć, iż wszystkie wykonane złącza zostały zerwane w materiale rodzimym Litecor. W żadnym z badanych przypadków nie doszło do ścięcia połączenia zgrzewanego. Potwierdza to prawidłowy dobór parametrów wszystkich badanych procesach zgrzewania.

Pomiarów dokonano dla wszystkich przebadanych złączy, w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach oraz wyliczono średnie arytmetyczne i średnie odchylenie standardowe. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 38.



Rys. 38. Zestawienie średnic zgrzein zmierzonych po próbach wytrzymałościowych

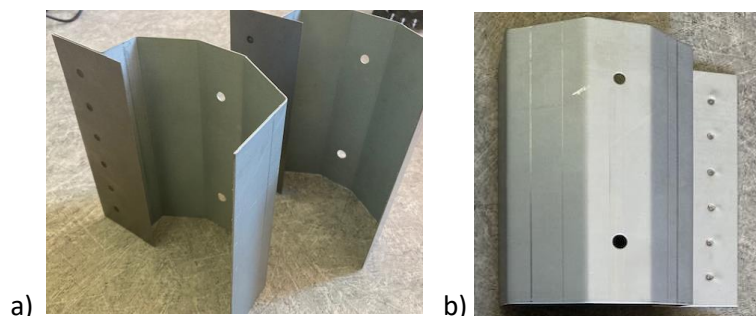
Przeprowadzone pomiary wykazały, że średnice uzyskiwanych połączeń zgrzewanych oscylują w przedziale od 3,9 mm dla metody zgrzewania wspomaganego bocznikiem, aż do 4,9 mm dla metody wspomaganego ultradźwiękowo. Osiągane średnice połączeń zgrzewanych w dużej mierze zależą od parametrów procesu formowania polimerowego rdzenia, gdyż np. niepełne oczyszczenie powierzchni styku łączonych powierzchni, w tym powłok MPC, ogranicza możliwości zastosowania dużych prądów zgrzewania w drugim etapie procesu (zgrzewania rezystancyjnego). Jest to szczególnie widoczne dla procesu zgrzewania wspomaganego bocznikiem, gdzie w pierwszym etapie procesu nagrzewania polimeru, impulsami prądowymi o małym natężeniu proces ten często przebiega niestabilnie i silnie zależy od jakości kontaktu elementu bocznikującego z materiałem zgrzewanym. Powoduje to, iż jest to metoda, w której najtrudniej jest uzyskać połączenia o zadowalającej wytrzymałości. W metodzie, w której zastosowano fale ultradźwiękowe, warstwa polimerowa jest nagrzewana bezpośrednio

poprzez tarcie wewnętrzne cząstek polimeru. Jest to metoda stabilna i w większym stopniu powtarzalna niż ze wspomaganiami bocznikowym lub indukcyjnym. Jak wykazały przeprowadzone badania, pozwala ona uzyskać największe wartości wytrzymałościowe połączeń oraz średnice zgrzein. Z tego względu wydaje się ona najlepiej rokującą metodą z aplikacyjnego punktu widzenia.

4.8 Podsumowanie i kierunki przyszłych badań

Przeprowadzone badania miały na celu opracowanie skutecznej technologii zgrzewania rezystancyjnego materiałów kompozytowych MPC. W ramach przeprowadzonych prac skonstruowano trzy stanowiska badawcze (wspomagane indukcyjnie, bocznikowo oraz ultradźwiękowo) pozwalające na porównanie jakości wykonywanych złączy oraz ocenę potencjału wdrożeniowego rozważanych technologii. Jak wykazały przeprowadzone badania, najwyższym potencjałem technologicznym wykazało się stanowisko oparte na hybrydowej metodzie ultradźwiękowo-rezystancyjnej. Należy jednak zwrócić uwagę na możliwość wprowadzenia dalszych usprawnień zwiększających możliwości stanowiska. Przykładem może być tutaj obecność układu ultradźwiękowego, który jest stosunkowo dużym elementem, co komplikuje potencjalną możliwość robotyzacji stanowiska. Do zastosowań zrobotyzowanych możliwe jest rozważanie przetworników o większej częstotliwości i mniejszych gabarytach. Ponadto należy wziąć pod uwagę kwestie, chłodzenia układu ultradźwiękowego, które na etapie opracowywania technologii zgrzewania nie było tak istotne. W urządzeniu demonstracyjnym zastosowano przetwornik ultradźwiękowy chłodzony powietrzem, który docelowo, w systemie pracującym nieprzerwalnie na linii produkcyjnej powinien być chłodzony cieczą, dla zapewnienia odpowiedniej stabilności i powtarzalności procesu.

Innym istotnym zagadnieniem pozostaje strojenie sonotrody, która ulega zużyciu, a po wykonaniu kilkuset zgrzein wymaga regeneracji. Typowe techniki regeneracji elektrod zgrzewalniczych (np. poprzez frezowanie) nie mają tu zastosowania ponieważ usunięcie zbyt dużej warstwy (ponad 1 mm) materiału spowodowałoby utratę właściwości rezonansowych sonotrody, a nawet zmianę formy drgań. Skutkuje to znacznym zmniejszeniem poziomu energii cieplnej generowanej w polimerowym rdzeniu MPC, a w skrajnym przypadku uniemożliwia przeprowadzenie procesu zgrzewania. Korzystniejszą techniką od ferowania jest szlifowanie powierzchni sonotrody, w celu oczyszczenia jej powierzchni z warstw tlenkowych i zanieczyszczeń oraz wyrównanie jej powierzchni roboczej. Głębokie uszkodzenia kwalifikują sonotrodę do regeneracji lub wymiany.



Rys. 39. Widok elementu demonstrującego technologię hybrydowego zgrzewania ultradźwiękowo-rezystancyjnego, wykonanego z materiału Litecor i stali DP: widok z tyłu (a), widok z przodu (b)

Wykorzystując opracowane stanowisko wykonano elementy demonstrujące możliwości wytwarzania komponentów wykonanych z materiału Litecor oraz stali dwufazowej DP (rys. 39). Pozwoliło to zwalidować opracowaną technologię, co stanowi potwierdzenie efektywnie opracowanej metody zgrzewania hybrydowego.

W ramach przyszłych prac badawczych planowane jest rozszerzenie grupy łączonych materiałów, w tym szczególnie materiałów MPC. Materiały oparte na powłokach aluminiowych stwarzają nowe wyzwania dla procesów łączenia. Oznacza to konieczność poszukiwania nowych, skuteczniejszych rozwiązań tego problemu, pozwalających osiągnąć wysokie parametry wytrzymałościowe złączy oraz wykorzystać potencjał jaki oferują nowe właściwości tej innowacyjnej grupy materiałowej.

Poza rozszerzeniem grupy materiałowej, do głównych kierunków przyszłych badań zaliczyć można:

- Rozwijanie systemów monitorowania procesów łączenia materiałów MPC. Jak wykazano istotnym problemem podczas łączenia jest wykrywanie kontaktu elektrycznego metalowych warstw, świadczącego o prawidłowym oczyszczeniu obszaru złącza.
- Częstym zjawiskiem podczas zgrzewania materiałów MPC jest ekspulsja. Wynika ona z wielu czynników jak np. zanieczyszczenia powierzchni styku w obszarze zgrzewania, uszkodzenia elektrod, niestabilności parametrów procesu zgrzewania i innych. Oznacza to, że bardzo ważnym kierunkiem badań dla tej grupy materiałowej jest opracowanie szybkich i skutecznych systemów detekcji oraz predykcji zjawiska ekspulsji aby możliwe było zapobieganie nieprzewidzianym zjawiskom w czasie rzeczywistym.
- Prowadzenie dalszych badań symulacyjnych i eksperymentalnych w aspekcie podniesienia właściwości wytrzymałościowych wytwarzanych złączy zgrzewanych materiałów MPC.
- Zastosowanie szybkich procesorów sygnałowych do analizy przebiegu procesu zgrzewania (np. na podstawie sygnałów napięcia elektrod, natężenia prądu zgrzewania, rezystancji dynamicznej, przyspieszenia, siły docisku elektrod i innych), może pozwolić na tworzenie znacznie szybszych układów działających w pętli sprzężenia zwrotnego, mogących sprostać wymaganiom monitorowania i kontroli nowoczesnych procesów łączenia np. materiałów MPC.
- Podobnie konieczne jest podniesienie dynamiki układów dociskowych elektrod zgrzewarki np. poprzez zastosowanie układów opartych na precyzyjnych serwo mechanizmach elektrycznych zamiast układów pneumatycznych.
- Zgrzewanie jest procesem realizowanym w głównej mierze na stanowiskach zrobotyzowanych. Bardzo istotnym czynnikiem dla robota jest masa zgrzewadła, która wynika w dużym stopniu z masy transformatora. Zastosowanie techniki inwertorowej (szczególnie 10 kHz) pozwala ograniczyć ten problem, zmniejszając masę transformatora nawet o rząd wielkości. Oznacza to znaczne oszczędności wynikające z zastosowania mniejszego, często szybszego i tańszego robota zgrzewalniczego.

Wymienione wyżej problemy stanowią przykłady możliwych do podjęcia kierunków przyszłych badań. Stanowią one szeroki zakres tematyczny, obejmujący procesy zgrzewalnicze, przetwórstwa tworzyw sztucznych, elektroniki, elektrotechniki, jak i informatyki. Dzięki podejmowaniu współpracy

z wiodącymi ośrodkami badawczymi zarówno w Polsce jak i za granicą, z pewnością opisane zagadnienia będą sukcesywnie rozwijane i prezentowane w kolejnych pracach i artykułach naukowych.

4.9 Wnioski

W niniejszej monografii przedstawiono wyniki badań dotyczących możliwości łączenia nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych tj. warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych (Metal Plastic Composite). **Głównym osiągnięciem jest tu opracowanie skutecznej i stabilnej technologii zgrzewania materiałów MPC oraz wyjaśnienie zjawisk i mechanizmów towarzyszących temu procesowi.** Zebrane, podczas budowy stanowisk badawczych i prac eksperymentalnych, doświadczenia pozwalają sformułować:

a) wnioski **poznawcze** dotyczące zgrzewania rezystancyjnego wspomaganego przez **bocznik**:

- *Istotnym problemem podczas łączenia materiałów MPC jest zjawisko ekspulsji. Stwierdzono, iż występuje ono szczególnie w sytuacjach, kiedy proces łączenia zostanie zakłócony np. poprzez zanieczyszczenia na powierzchni materiałów, nadmierne zużycie elektrod lub inne czynniki wpływające na ilość energii cieplnej generowanej w procesie.*
- *Badania wykazały, że brak kontaktu prądowego w obszarze powstającego złącza doprowadza do wystąpienia zjawiska bocznikowania (jeżeli występują uprzednio wykonane złącza), co w konsekwencji może skutkować degradacją metalowej powłoki MPC.*
- *Analizy metalograficzne oraz zastosowanie mikroskopii elektronowej pozwoliło na stwierdzić, iż najczęściej obserwowanymi niezgodnościami spawalniczymi w wytwarzanych złączach zgrzewanych były: pęknięcia warstw powłokowych MPC, przegrzanie i uszkodzenie cynkowej powłoki ochronnej w otoczeniu złącza oraz ekspulsja polimerowego rdzenia na zewnątrz złącza.*

b) wnioski **użytkarne** dotyczące zgrzewania rezystancyjnego wspomaganego przez **bocznik**:

- *Proces zgrzewania rezystancyjnego, wspomagany prądem bocznikującym wymaga opracowania odpowiedniej konstrukcji elementu bocznikującego prąd, który zapewni skoncentrowanie procesu generowania energii cieplnej w miejscach styku elektroda-materiał i w samym materiale powłokowym MPC, a ograniczy nagrzewanie się stref otaczających obszar zgrzewania.*
- *Zmniejszenie ryzyka uszkodzenia elementów zgrzewanych można uzyskać stosując wieloimpulsowy program zgrzewania, który pozwala na łagodniejszą i bardziej równomierną dystrybucję ciepła w złączu zgrzewanym.*
- *Metoda wymagająca zastosowania dodatkowego obwodu bocznikującego, może być problematyczna dla wielu zautomatyzowanych procesów produkcyjnych. Wynika to m.in. ze względu na ograniczenie obszaru roboczego zgrzewarki oraz konieczność zapewnienia odpowiedniego kontaktu elektrod bocznika z materiałem łączonym.*

c) wnioski **poznawcze** dotyczące zgrzewania rezystancyjnego wspomaganego **indukcyjnie**:

- *Poprzez badania numeryczne oraz eksperymentalne wykazano, że zjawisko indukcji elektromagnetycznej pozwala na skuteczne nagrzewanie materiałów MPC w warstwie powłokowej oraz przekazywanie wytworzonej energii cieplnej do polimerowego rdzenia powodując jego uplastycznienie.*

- *Analiza wizualna oraz metalograficzna złączy wykonanych przy udziale metody indukcyjnej wykazała, że charakteryzują się one stosunkowo rozległą strefą wpływu ciepła oraz dużym stopniem deformacji. Ponadto częstym występowaniem rozwarstwień materiału MPC oraz wpływem materiału rdzenia na zewnątrz próbki.*
- d) wnioski **użyteczne** dotyczące zgrzewania rezystancyjnego wspomaganego **indukcyjnie**:
- Bardzo istotne jest odpowiednie ukształtowanie wzbudnika oraz w jeśli to możliwe umiejscowienie go po stronie materiału litego. Pozwala to na ograniczenie ryzyka przegrzania materiału zgrzewanego oraz ujednoczenie rozkładu temperatury w obszarze zgrzewania.
 - Narzędzie, w postaci cewki indukcyjnej, nie styka się bezpośrednio w elementami zgrzewanymi, a więc jest to znaczące uproszczenie procesu w porównaniu np. z procesem stosującym bocznik prądowy.
- e) wnioski **poznawcze** dotyczące zgrzewania rezystancyjnego wspomaganego metodą **ultradźwiękową**:
- *W ramach badań symulacyjnych MES wykazano, że zastosowanie drgań wzdłużnych jest korzystniejsze od drgań poprzecznych, ze względu na krótszy czas realizacji procesu i bardziej skoncentrowany rozkład temperatury w obszarze zgrzewania.*
 - *Analiza wizualna i metalograficzna wykazała, że formowany materiał polimerowego rdzenia jest w tym procesie buforowany w wyoblonych obszarach materiału powłokowego, otaczającego złącze. Tworzenie wspomnianych obszarów buforujących nie prowadzi do przzerwania warstwy powłokowej MPC.*
- f) wnioski **użyteczne** dotyczące zgrzewania rezystancyjnego wspomaganego metodą **ultradźwiękową**:
- Proces zgrzewania rezystancyjnego wspomagany metodą ultradźwiękową stanowi najbardziej złożoną koncepcję, jednak pozbawioną istotnych wad wcześniej omówionych metod. Ze względu na odmienny mechanizm fizyczny nagrzewania rdzenia MPC, polegający na wykorzystaniu tarcia wewnętrznego materiału polimerowego, metoda ta zapewnia nieporównywalnie krótszy czas przebiegu procesu oczyszczania obszaru zgrzewania.
 - Czasy nagrzewania ultradźwiękowego są porównywalne z czasami przepływu prądu zgrzewania w klasycznym procesie rezystancyjnym co jest szczególnie istotne dla procesów wielkoseryjnych.
 - Metoda ta ma zdecydowanie największy potencjał wdrożeniowy w porównaniu z wcześniej przedstawionymi metodami wspomaganego zgrzewania materiałów MPC. Może ona być stosunkowo łatwo zautomatyzowana, monitorowana i sterowana. Ponadto nie ogranicza przestrzeni wewnętrznej okna zgrzewarki oraz zapewnia najwyższą stabilność i powtarzalność prowadzenia procesu łączenia, a tym samym najwyższą jakość uzyskiwanych połączeń.

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.

Dzięki przeprowadzonym badaniom można stwierdzić, iż istotnie rozwinięto wiedzę na temat problematyki zgrzewania warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych. Proponowane rozwiązania spotkały się z szerokim zainteresowaniem ze strony przedstawicieli przemysłu zarówno w Polsce jak i za granicą. Stanowi to silną motywację do kontynuacji prowadzonych badań szczególnie, wobec faktu pojawiania się na rynku coraz to nowszych rodzajów warstwowych kompozytów metalowo-polimerowych MPC.

4.10 Wykaz wybranych publikacji powiązanych z tematycznie prezentowanym osiągnięciem

Niniejsze publikacje stanowią wybrane pozycje z dorobku autora, które wskazują na wieloletnie doświadczenie w omawianej tematyce. Przedstawione w monografii osiągnięcie posiada duży potencjał patentowy dlatego w pierwszej kolejności skupiono się na opracowaniu stosownych zgłoszeń patentowych. Z tego względu proces publikacyjny został rozpoczęty po dokonaniu zgłoszeń patentowych aby nie wpływać negatywnie na proces oceny wniosków patentowych.

Patenty i zgłoszenia patentowe bezpośrednio powiązane z prezentowaną monografią

(* - autorzy z innych niż Politechnika Wroclawska instytucji naukowych)

- [P1] Zgłoszenie patentowe: Monika Michalak, **Paweł Kustroń**, Marcin Korzeniowski, Paweł S. Sokołowski, Tomasz Piwowarczyk, Aleksandra M. Małachowska: Sposób rezystancyjno-ultradźwiękowego zgrzewania punktowego kompozytów metal-polimer-metal z blachą oraz urządzenie do realizacji tego sposobu. Zgłosz. pat. nr P438142 z 10.06.2021 / Monika Michalak [i in.]. 11 s. : 4 rys.

Wkład: Opracowanie koncepcji stanowiska, przygotowanie części rysunków, redakcja fragmentów treści opisu wynalazku.

- [P2] Zgłoszenie patentowe: **Paweł Kustroń**, Marcin Korzeniowski, Zygmunt Mikno*: Sposób detekcji zjawiska ekspulsji w procesie zgrzewania rezystancyjnego punktowego. Zgłosz. pat. nr P 431658 z 14.11.2019. 8 s. 2019

Wkład: Opracowanie koncepcji metody detekcji ekspulsji, przygotowanie rysunków, redakcja treści opisu wynalazku.

- [P3] Patent: Mikno Z.*, Pilarczyk A.*, Oborski W.*, Kowieski Sz.*, Węglowski M.*, Korzeniowski M., **Kustroń P.**, Sposób sterowania procesem zgrzewania rezystancyjnego punktowego, Urząd Patentowy RP (PL 231902)

Wkład: Aktywny udział w opracowaniu koncepcji sposobu sterowania, redakcja fragmentów treści opisu wynalazku.

- [P4] Patent: Mikno Z.*, Kowieski Sz.*, Pilarczyk A.*, Ambroziak A., Korzeniowski M., **Kustroń P.**, Sposób i zgrzewarka inwertorowa do zgrzewania rezystancyjnego, zwłaszcza punktowego w warunkach ekspulsji, Urząd Patentowy RP (PL 234475)

Wkład: Aktywny udział w opracowaniu koncepcji stanowiska oraz algorytmów detekcji ekspulsji i korekcji parametrów procesu zgrzewania, przygotowanie części rysunków, redakcja fragmentów treści opisu wynalazku.

Ponadto jestem współautorem 4 innych, przyznanych patentów związanych z procesami zgrzewania punktowego.

Publikacje w czasopismach branżowych bezpośrednio powiązane z prezentowaną monografią

[H1] **Kustroń P.**, Korzeniowski M., Piwowarczyk T., Sokołowski P., Development of resistance spot welding processes of metal–plastic composites. *Materials*, 2021, vol. 14, nr 12, art. 3233, s. 1-20.

Wkład: Opracowanie koncepcji stanowisk badawczych, prace projektowo-obliczeniowe w tym MES, przeprowadzenie eksperymentów, badania laboratoryjne dotyczące identyfikacji zjawisk i mechanizmów zachodzących podczas procesów zgrzewania, analiza i opracowanie wyników. Opracowanie części rysunków i fotografii oraz przygotowanie fragmentów treści artykułu.

[H2] **Kustroń P.**, Korzeniowski M., Piwowarczyk T., Sokołowski P., Zgrzewanie hybrydowe kompozytów MPC z polimerową warstwą nieprzewodzącą. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*. 2021, R. 65, nr 4, s. 38-43.

Wkład: Prace obliczeniowe w tym MES, zaplanowanie i przeprowadzenie prac eksperymentalnych, opracowanie wyników i ich szczegółowa analiza, opracowanie wyników oraz redakcja fragmentów treści artykułu.

Publikacje potwierdzające moje doświadczenie w badaniu procesów zgrzewania

[I1] Mikno Z. *, Ambroziak A., Biskup T. *, Grzesik B. *, Jeleń M. *, Kołodziej H. *, Korzeniowski M., Kowieski Sz. *, **Kustroń P.**, Oborski W. *, Pilarczyk A. *, Skiba J. *, Stępień M. *, 2018, Innowacyjne rozwiązania wysokosprawnych zgrzewarek rezystancyjnych prądu stałego, Monografia projektu INWELD, nr PBS3/B4/12/2015, ISBN 978-83-61272-73-1, Instytut Spawalnictwa.

Wkład: Opracowanie i wykonanie sterownika zgrzewarki inwertorowej 10 kHz, aktywny udział w badaniach, opracowywanie wyników pomiarów parametrów zgrzewania, redakcja fragmentów rozdziału „Zjawisko ekspulsji w procesie zgrzewania rezystancyjnego”.

[I2] Mikno Z. *, Pilarczyk A. *, **Kustroń P.**, Korzeniowski M., Ambroziak A., Analysis of resistance welding processes and expulsion of liquid metal from the weld nugget. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, vol. 18, nr 2, s. 522-531.

Wkład: Opracowanie i implementacja algorytmów detekcji i kontroli zjawiska ekspulsji, aktywny udział w badaniach, opracowanie wyników detekcji ekspulsji, redakcja fragmentów treści artykułu.

Ponadto jestem współautorem ponad 20 artykułów dotyczących technologii zgrzewania głównie rezystancyjnego punktowego, monitorowania i kontroli procesów zgrzewania oraz rozwoju nowoczesnych maszyn i urządzeń zgrzewalniczych. Wymienione zostały w załączniku nr 4 – „Wykaz osiągnięć naukowych”, wraz z publikacjami z innych obszarów mojej działalności.

Publikacje w materiałach konferencyjnych

[R1] **Kustroń P.**, Korzeniowski M., Detection of the expulsion phenomenon with use of vibration measurements during the spot welding process. W: 28th International Congress on Sound and Vibration (ICSV28) : the annual congress of the International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Singapore 24-28 July 2022. Singapore : Society of Acoustics, cop. 2022, ref. 589, s. 1-8.

Wkład: Koncepcja i wykonanie stanowiska pomiarowego, zaplanowanie i przeprowadzenie badań, analiza wyników, opracowanie treści artykułu do materiałów konferencyjnych, plakatu i fragmentów prezentacji.

[R2] Korzeniowski M., **Kustroń P.**, Sokołowski P., Piwowarczyk T., Faes K.*, Kraus Ch.*, Riemer M.*, Kott M.*, Potential of using of ultrasound technology to support resistance spot welding of metal - polymer composite. W: 28th International Congress on Sound and Vibration (ICSV28) : the annual congress of the International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Singapore 24-28 July 2022. Singapore : Society of Acoustics, cop. 2022, ref. 588, s. 1-8.

Wkład: Aktywny udział w planowaniu i przeprowadzeniu badań, analizie wyników oraz opracowaniu treści artykułu do materiałów konferencyjnych.

[R3] **Kustron P.**, J. Kocimski, A. M. Chertov*, S. Titov*, M. Korzeniowski, A. Ambroziak, R. Gr. Maev*,: In-Line Ultrasonic Investigation of Spot Weld Quality Using Multi-transducer Set-up, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 29, Kingston, Rhode Island, USA, 26-31.07.2009.

Wkład: Koncepcja i wykonanie stanowiska pomiarowego, zaplanowanie i przeprowadzenie badań, analiza wyników, opracowanie treści artykułu do materiałów konferencyjnych oraz prezentacji.

Ponad to jestem współautorem ponad 15 innych referatów i publikacji w materiałach konferencyjnych, z obszaru zgrzewania rezystancyjnego, prezentowanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych.

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

Współpraca krajowa:

- ITIR – Instytut Tele i Radiotechniczny, Warszawa,
Współpraca w zakresie opracowywania konstrukcji i budowy układów ultradźwiękowych dużej mocy.
Przykład wspólnego referatu konferencyjnego:
Referat konferencyjny
Paweł S. Sokołowski, Marcin Korzeniowski, Paweł Kustroń, Tomasz Piwowarczyk, Paweł Kogut, Łukasz Krzemiński, Lucjan Nafalski
Tool design and mechanical characteristics for ultrasonic vibration supported liquid metal atomization. W: 28th International Congress on Sound and Vibration (ICSV28) : the annual congress of the International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Singapore 24-28 July 2022. Singapore : International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), cop. 2022. ref. 590, s. 1-8.

- 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 - Opracowanie innowacyjnej wysokosprawnej zgrzewarki kompaktowej o podwyższonej częstotliwości), ponadto badania w zakresie nowoczesnych technologii łączenia oraz rozwoju maszyn i urządzeń spawalniczych.

Wspólne patenty:

1. Zygmunt Mikno*, Szymon Kowieski*, Adam Pilarczyk*, Andrzej Ambroziak, Marcin Korzeniowski, Paweł Kustroń, Polska, nr PL 234475, opubl. 28.02.2020. Sposób i zgrzewarka inwertorowa do zgrzewania rezystancyjnego, zwłaszcza punktowego w warunkach ekspulsji / Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Spawalnictwa, Gliwice, PL,
2. Zygmunt Mikno*, Adam Pilarczyk, Wojciech Oborski*, Szymon Kowieski*, Marek Stanisław. Węglowski*, Marcin Korzeniowski, Paweł Kustroń, Polska, nr PL 231902, opubl. 30.04.2019. Zgłosz. nr 421067 z 30.03.2017 . Sposób sterowania procesem zgrzewania rezystancyjnego punktowego / Instytut Spawalnictwa, Gliwice, PL,

Przykładowy artykuł:

Zygmunt Mikno*, Adam Pilarczyk*, Marcin Korzeniowski, Paweł Kustroń, Andrzej Ambroziak, Analysis of resistance welding processes and expulsion of liquid metal from the weld nugget. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, vol. 18, nr 2, s. 522-531.

- IPPT PAN Zakład Mechaniki Doświadczalnej Pracownia Badań Nieniszczących, Politechnika Warszawska.

Współpraca w zakresie rozwoju nowoczesnych technik ultradźwiękowej diagnostyki połączeń spajanych.

Przykład wspólnej publikacji - referat konferencyjny:

Paweł Kustroń, Marcin Korzeniowski, Marcin Lewandowski*, Beata Witek*, Jakub Rozbicki* A high frequency ultrasonic imaging of welded joints. W: 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2016), September 18-21, Tours, France. [Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2016. s. 1-4.

Współpraca międzynarodowa:

- 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”.
Przykładowy referat konferencyjny:
Marcin Korzeniowski, Paweł Kustroń, Paweł S. Sokołowski, Tomasz Piwowarczyk, Koen Faes*, Christian Kraus*, Matthias Riemer*, Mathias Kott*,
Potential of using of ultrasound technology to support resistance spot welding of metal - polymer composite. W: 28th International Congress on Sound and Vibration (ICSV28) : the annual congress of the International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Singapore 24-28 July 2022. Singapore : International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), cop. 2022. ref. 588, s. 1-8.

- Firma Harms&Wende z Hamburga, Niemcy.
 Wizyta naukowo-badawcza w okresie 10 – 12.11.2013, poświęcona badaniom procesu zgrzewania tarcowego punktowego RFSSW.
 Przykładowy artykuł:
 Paweł Kustroń, Jacek Leśniewski, Beata K. Białobrzaska
 Nowoczesne metody zgrzewania tarcowego punktowego materiałów konstrukcyjnych.
 Przegląd Spawalnictwa = Welding Technology Review. 2016, vol. 88, nr 8, s. 43-46.
- IDIR - Institute for Diagnostic Imaging Research, University of Windsor, Ontario, Kanada.
Staż naukowy w okresie 16.07.2008-30.04.2010. Współpraca w zakresie rozwoju metod ultradźwiękowego monitorowania procesów zgrzewania punktowego. Asysta w zajęciach dydaktycznych z zakresu mechaniki i rysunku technicznego .
 Przykładowy referat konferencyjny z pośród 6 wspólnych publikacji:
 Paweł Kustroń, Janusz Kocimski, Andrey M. Chertov*, S. Titov*, Marcin Korzeniowski, Andrzej Ambroziak, Roman G. Maev*
 In-line ultrasonic investigation of spot weld quality using multi-transducer set-up. W: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. Vol. 29, [36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation], Kingston, Rhode Island, 26-31 July 2009 / eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti. Melville, NY : American Institute of Physics, 2010. s. 1615-1622. (AIP Conference Proceedings, ISSN 0094-243X; vol. 1211).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

Działalność dydaktyczna

Prowadzone przeze mnie zajęcia dydaktyczne są corocznie aktualizowane i uzupełniane o nowości związane z tematyką prowadzonego kursu (np. urządzeń spawalniczych, materiałów dodatkowych, automatyki przemysłowej, oprogramowania itp.). Do zajęć wykładowych przygotowywane są prezentacje multimedialne, filmowe oraz eksponaty i próbki dydaktyczne. W zajęciach laboratoryjnych wykorzystywany jest nowoczesny sprzęt.

Zajęcia są prowadzone są w języku polskim i angielskim (np. kurs: **Non-destructive evaluation in contemporary manufacturing systems**).

Od 2013 roku prowadzę wykłady i zajęcia laboratoryjne w ramach studiów podyplomowych „PROCESY SPAJANIA, PROJEKTOWANIE I WYTWARZANIE STRUKTUR SPAWANYCH”, przygotowujących do egzaminu Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika IWE.

Prowadzone kursy to: Projektowanie konstrukcji przy obciążeniach przeważająco stałych, oraz Zmechanizowane i zrobotyzowane procesy spawalnicze. Ponadto sprawuję opiekę nad grupami studentów podczas wizyt w firmach z branży spawalniczej oraz badań nieniszczących.

Podczas stażu naukowego na University of Windsor, Ontario, Kanada, przez 2 semestry aktywnie asystowałem w zajęciach dydaktycznych z zakresu mechaniki i rysunku technicznego.

Ponadto aktywnie uczestniczę w podejmowaniu zadań służących dydaktyce, w tym przygotowanie nowych zajęć, opracowywanie materiałów wspomagających i stanowisk dydaktycznych.

We latach 2017 - 2021 przeprowadziłem serię zajęć (ok. 30 godzin) w ramach ZPR_PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej (POWER) dla najlepszych studentów Wydziału. Przeprowadzone zajęcia i opracowane przeze mnie tematy zajęć to między innymi zagadnienia robotyzacji w spawalnictwie oraz nowoczesnych systemów bezpieczeństwa na stanowiskach zrobotyzowanych.

Ponadto w latach 2021 – 2022 przeprowadziłem 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 (<https://3p.edu.pl/>).

Jestem gotowy do podejmowania nowych zadań dydaktycznych oraz podnoszenia swoich kwalifikacji zawodowych. Aktualnie przygotowuję materiały do kursu Teoria i Technika Sterowania. Do tej pory, w ramach prowadzonych zajęć podejmowałem się prowadzenia kursów z poza obszaru działalności spawalniczej jak np. Programowanie w języku C, Sieci Komputerowe i systemy Czasu Rzeczywistego, Algorytmy przetwarzania sygnałów.

Aktywnie prowadzę prace na rzecz rozwoju 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,

Do tej pory sprawowałem opiekę nad 124 pracami dyplomowymi, realizowanych w j. polskim oraz j. angielskim. Od 2013 r. przystąpiłem do pracy w komisji egzaminów dyplomowych.

Byłem promotorem pomocniczym zrealizowanego doktoratu Pana (obecnie dr inż.) mgr. inż. Jacka Leśniewskiego oraz aktualnie jestem promotorem pomocniczym doktoratu wdrożeniowego Pana mgr. inż. Maciej Karpińskiego.

Ponadto opracowałem karty przedmiotów dla 4 kursów: Układy impulsowe, Teoria i technika sterowania, Kontrola jakości wyrobów, Systemy czasu rzeczywistego i sieci komputerowe na kierunku Robotyka i Automatykacja Procesów.

Działalność organizacyjna

W ramach działalności organizacyjnej aktywnie podejmuję działania w zakresie:

- aranżacji 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 (2-3.12.2019) do firmy ASTOR (Kraków) i 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),
- **organizacji kursów badań nieniszczących VT 1 i VT 2 dla studentów Politechniki Wrocławskiej.**
Kurs ten znacząco podnosi konkurencyjność absolwentów na rynku pracy.
- rozwijania infrastruktury laboratoriów Katedry - dzięki moim staraniom został pozyskany nowoczesny sprzęt do zajęć laboratoryjnych, pozyskiwany w ramach np. barterów z firmami integratorskimi (robot kawasaki BA006, sterowniki PLC – Astrada ONE, Horner, materiały do badań nieniszczących).
- modernizacji stanowisk dydaktycznych np. do zrobotyzowanego spawania łukowego CMT, zgrzewania punktowego oraz zgrzewania tarcowego FSW.

Działalność popularyzująca naukę

Biorę udział w przygotowaniu i przeprowadzeniu Wrocławskich Sympozjów Spawalniczych organizowanych przez Katedrę. Byłem członkiem Komitetu Naukowego podczas X Wrocławskiego Sympozjum Spawalniczego „Innowacje w spawalnictwie”, czerwiec 2022 r.

Jestem współautorem rozdziałów w książkach i podręcznika dla studentów np. TECHNIKI WYTWARZANIA SPAWALNICTWO LABORATORIUM, pod redakcją Andrzeja Ambroziaka WROCŁAW 2010.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej

Uzyskane nagrody i wyróżnienia za działalność naukową:

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

Od 2016 roku pełnię funkcję kierownika laboratorium zaawansowanych technik ultradźwiękowych.

W okresie 14 – 26.07.2016 powierzono mi obowiązki w zakresie kierowania gospodarką finansową Katedry Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa.

8. Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

I.p.	Kryterium według §3 p.4, §4 i §5	TAK (liczba)/BRAK
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR)	Tak/10
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	Tak/5
3.	Udzielone patenty: a) międzynarodowe b) krajowe	a) Brak b) Tak/ 6
4.	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	Brak
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR	Tak/25
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	Tak/6
7.	Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:	21.695
8.	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):	78 (75)
9.	Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	5
10. A	Kierowanie projektami badawczymi: a) międzynarodowymi b) krajowymi	a) Brak b) Tak/1
10. B	Udział w projektach badawczych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/1 b) Tak/6
11.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	Tak/2
12.	Wygłoszenie referatów na tematycznych konferencjach a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/4 b) Tak/2
13.	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	Tak/3

14.	Aktywny udział w konferencjach naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/4 b) Tak/2
15.	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Brak b) TAK/1
16.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	Tak/1
17.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	Tak/2
18.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: a) naukowcami z innych ośrodków polskich, b) naukowcami z ośrodków zagranicznych, c) przedsiębiorcami, innymi niż wymienione wyżej	a) Brak b) Brak c) Brak
19.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	Brak
20. A	Członkostwo w międzynarodowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru	a)Brak b)Brak
20. B	Członkostwo w krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru	a) Brak b) TAK/1
21.	Osiągnięcia dydaktyczne w zakresie popularyzacji nauki	Tak/9
22.	Opieka naukowa nad studentami	Tak/124
23.	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze: a) opiekuna naukowego b) promotora pomocniczego	a)Brak b) Tak/ 2
24.	Staże w ośrodkach naukowych lub akademickich a) zagranicznych b) krajowych	a)Tak/1 b)Brak
25.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	Tak/ 1
26.	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	Brak
27.	Recenzowanie projektów: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Brak b) Brak

28.	Recenzowanie publikacji w czasopismach: a) międzynarodowych b) krajowych	a) Tak/16 b) Tak/1
29.	Inne osiągnięcia / recenzowanie referatów konferencyjnych / zapraszone wykłady	Tak/2
	Łącznie liczba spełnionych kryteriów:	24/29

.....
(podpis wnioskodawcy)