

Dr inż. Jacek Mendala
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Politechnika Śląska

2A.
ZAŁĄCZNIK do WNIOSKU

AUTOREFERAT

Przedstawiający opis osiągnięć naukowych, w szczególności
określonych w art. 16 ust. 2 ustawy w formie papierowej
w języku polskim

Katowice 27.04.2018 r.

SPIS TREŚCI

Wyszczególnienie	Strona
1. Imię i Nazwisko	9
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	9
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	9
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.)	9
5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze	22
5.1 Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych	22
5.2 Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych	23
6. Osiągnięcia zgodnie z wymogami Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165)	29

1. Imię i Nazwisko

Jacek Mendala

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2000 doktor nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa, Wydział Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, Politechnika Śląska.

Temat rozprawy doktorskiej: „Kinetyka wzrostu powłok zanurzeniowych na stopach żelaza w kąpielach aluminiowo – cynkowych oraz ich odporność na korozję”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Adam Gierek – Politechnika Śląska

Opiekun: Dr inż. Piotr Liberski

Recenzenci: Prof. dr hab. Antoni Budniok – Uniwersytet Śląski
Prof. dr hab. inż. Adam Hernas – Politechnika Śląska

1990 magister inżynier technolog materiałów – kierunek „Inżynieria Materiałowa”, specjalność „Inżynieria Powierzchni”, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska,

Temat pracy magisterskiej: „Technologiczne i materiałowe podstawy doboru parametrów wytwarzania warstw adhezyjno – dyfuzyjnych na żarowytrzymałym stopie ŻS6K”

Promotor: Prof. zw. dr hab. inż. Adolf Maciejny - Politechnika Śląska

Opiekun: Dr inż. Lucjan Swadźba - Politechnika Śląska

1985 Śląskie Techniczne Zakłady Naukowe w Katowicach,
Profil: obróbka skrawaniem.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Od 15 lipca 1991 r. do 14 grudnia 2000 r. asystent na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii (dawniej Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej), Politechniki Śląskiej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice
- Równolegle – od 14 lutego 1999 r. do 26 stycznia 1997 r. student trzyletnich studiów doktoranckich na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii (dawniej Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii, Transportu i Zarządzania), Politechniki Śląskiej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice
- Od 15 grudnia 2000 r. do nadal – na stanowisku adiunkta i wykładowcy w Instytucie Technologii Metali (dawniej Katedrze Technologii Metali i Kompozytów) na Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, a po reorganizacji Wydziału w Instytucie Inżynierii Materiałowej, na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechniki Śląskiej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po uzyskaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Materiałowa, określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami **wskazuję autorską monografię pt:**

„Pękanie wyrobów stalowych podczas cynkowania zanurzeniowego”

Gliwice 2018

ISBN 978-83-7880-524-3

Istotny wkład pracy habilitacyjnej do nauki w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa stanowi **uzyskanie wyników badań pękania wyrobów stalowych podczas cynkowania zanurzeniowego. Dotyczy to zarówno badań na wyrobach przemysłowych (łańcuchach ogniowych), jak i badań modelowych. Uzyskane wyniki badań strukturalnych oraz właściwości mechanicznych pozwalają na określenie czynników mających wpływ na występowanie pękania w wyrobach poddanych metalizacji zanurzeniowej, które może powstać już w trakcie trwania procesu wytwarzania powłoki ochronnej lub po krótkim czasie eksploatacji elementu z powłoką. Przeprowadzone badania oraz analiza wyników pozwoliły na przedstawienie hipotetycznego mechanizmu procesu pękania. Ze względu na zróżnicowany charakter oddziaływań w trakcie procesu w opisie mechanizmu uwzględniono rodzaj stali charakteryzowany składem chemicznym, strukturą i właściwościami mechanicznymi.**

Proces cynkowania zanurzeniowego jest jednym z popularniejszych sposobów zabezpieczania elementów konstrukcyjnych przed agresywnym oddziaływaniem środowiska korozyjnego. Około 50% światowej produkcji cynku przeznaczone jest do wytwarzania powłok. Podstawowym celem procesu metalizacji jest wytworzenie powłoki ochronnej o założonej budowie i grubości zgodnej z wymogami norm, która jest ciągła, równomierna, pozbawiona wad i pęknięć. Początkowo do procesu metalizacji przeznaczone były stale konstrukcyjne zwykłej jakości, które charakteryzują się niską zawartością dodatków stopowych. Jednakże postęp technologiczny spowodował, że oprócz wymienionych stali procesowi wytwarzania dyfuzyjnych powłok zanurzeniowych poddaje się elementy konstrukcyjne ze stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości oraz stale o niekorzystnym z punktu widzenia cynkowania składzie chemicznym, także stale reaktywne. Poszerzenie gamy stosowanych do cynkowania stali spowodowało, że wytwórcy powłok poszukiwali uniwersalnych kąpeli o składzie chemicznym pozwalającym na wytworzenie prawidłowej powłoki niezależnie od składu chemicznego metalizowanego elementu. Aby wyeliminować niekorzystny wpływ podłoża, do kąpeli cynkowej stosuje się dodatki technologiczne takie jak nikiel, aluminium, cyna czy bizmut, których działanie opisano obszernie w literaturze oraz w niniejszej monografii. Przykładowo wprowadzono do metalizacji kąpiel cynkową zawierającą w swoim składzie 0,05% mas. Ni, 2% mas. Sn i 0,5% mas. Bi, która poszerzyła zakres efektywnej kontroli reaktywności stali o wysokiej zawartości krzemu w wyniku hamowania reakcji pomiędzy żelazem i cynkiem. Taka zmiana składu chemicznego kąpeli (o znaczącej ilości cyny) wpłynęła na jakość i właściwości wytwarzanych powłok, jednak przyczyniła się do powstania nowych problemów polegających na pękaniu zarówno dużych konstrukcji spawanych jak i silnie odkształconych plastycznie elementów o małych wymiarach, tj. śrub, łańcuchów poddanych metalizacji zanurzeniowej.

Ujawniono, że w procesie metalizacji, w wyniku bezpośredniego kontaktu na granicy metal - metal ciekły, mogą wystąpić zmiany właściwości mechanicznych oraz pęknięcia, a w skrajnych przypadkach przedwczesne zniszczenie elementu konstrukcyjnego już podczas procesu wytwarzania powłoki lub w trakcie jego krótkotrwałej eksploatacji. Pęknięcia stali powstające

w kąpeli cynkowej są często „maskowane” przez cynk powłoki zalewający szczelinę i wtedy stają się niemożliwe do wykrycia w czasie sprawdzania jakości metodą oględzin wzrokowych.

Z przedstawionej analizy danych literaturowych oraz badań własnych wynika, że **proces pękania metali, które były w bezpośrednim kontakcie z ciekłym metalem, może być związany z występowaniem zjawiska Liquid Metal Embrittlement (LME) nazywanym także Liquid Metal Assisted Cracking (LMAC), a definiowanym jako pęknięcie pod wpływem ciekłych metali w warunkach oddziaływania naprężeń własnych bądź obciążeń zewnętrznych wywołujących w elemencie określony stan naprężeń.**

Przyjmuje się, że istnieją trzy zasadnicze czynniki wpływające na możliwość wystąpienia pęknięcia pod wpływem ciekłych metali. Są to: czynniki związane z właściwościami metalu w stanie stałym, czynniki związane z właściwościami cieczy metalicznej oraz stan naprężeń w metalu. Dodatkowe czynniki, które mogą mieć bezpośredni lub pośredni wpływ na wystąpienie zjawiska LME, to: dla materiału w stanie stałym – oprócz jego składu chemicznego, mikrostruktura, wielkość jego energii powierzchniowej, zjawiska na granicach ziarn, twardość; dla ciekłego metalu – oprócz składu chemicznego, wzajemna rozpuszczalność składników stopu, zwilżalność i jego temperatura; dla stanu naprężeń – czy naprężenia są własne czy zewnętrzne, szybkość propagacji pęknięcia i gradient temperatury.

Przeprowadzone badania miały na celu próbę określenia roli poszczególnych czynników ryzyka powstawania pęknięć w zależności od rodzaju materiału podłoża, roli cyny w kąpeli metalizującej oraz wielkości i sposobu „nakładania” naprężeń podczas procesu metalizacji.

Analiza obecnego stanu wiedzy w zakresie technologii cynkowania na drodze metalizacji zanurzeniowej dla ochrony przed korozją oraz zjawisk pęknięcia wywołanych oddziaływaniem ciekłego metalu, a także wyniki wcześniejszych badań własnych dają podstawę do przyjęcia tezy pracy: **Na zjawisko LME, czyli pęknięcia wywołanego oddziaływaniem ciekłej kąpeli cynkowej podczas procesu wytwarzania powłok, wpływa cyna będąca jej składnikiem. Występowanie pęknięcia zależy od stanu naprężeń w wyrobie cynkowanym w kąpeli z udziałem cyny, sposobie jego wywołania oraz od składu chemicznego metalizowanej stali.**

Za cele rozprawy przyjęto:

- 1) analizę przypadków pęknięcia wytwarzanych w praktyce przemysłowej elementów w kontakcie z kąpielą powłokotwórczą,
- 2) określenie przyczyn pęknięcia przemysłowych łańcuchów ogniowych w procesie cynkowania zanurzeniowego w kąpeli zawierającej cynę,
- 3) ocenę wpływu składu kąpeli metalizującej na pęknięcie materiału pod wpływem ciekłego metalu,
- 4) określenie zjawisk pęknięcia wybranych elementów w laboratoryjnych badaniach w kąpeli cynkowej zawierającej dodatek cyny,
- 5) analizę zjawiska pęknięcia wybranych stali w badaniach modelowych w kąpielach cynkowej, cynowej oraz w stopie tych pierwiastków,
 - wpływ stanu naprężeń na wystąpienie zjawiska LME w elementach poddanych metalizacji zanurzeniowej w warunkach modelowych,
 - wpływ sposobu obciążania siłą rozciągającą dla wywołania naprężeń w elemencie poddanym metalizacji zanurzeniowej na proces pęknięcia,
 - analizę jakościową i ilościową w wybranych mikroobszarach próbek z powłokami poddanych naprężeniom rozciągającym podczas metalizacji zanurzeniowej, w których wystąpiło zjawisko pęknięcia pod wpływem ciekłych metali,
 - korelację właściwości mechanicznych i struktury elementów z powłokami poddanych naprężeniom rozciągającym, pod kątem występowania czynników wywołujących zjawisko LME,
- 6) określenie hipotetycznego mechanizmu pęknięcia elementów poddanych metalizacji zanurzeniowej.

Realizacja tak postawionych celów oraz zweryfikowanie tezy rozprawy wymagały przeprowadzenia następującego zakresu badań:

- opracowanie metodyki badania zjawiska pęknięcia podczas badań laboratoryjnych na przemysłowych próbkach łańcuchów,
- przeprowadzenie badań procesów metalizacji zanurzeniowej o różnym składzie chemicznym kąpielii na przemysłowych łańcuchach,
- ocena strukturalna oraz analiza ilościowa i jakościowa elementów łańcucha,
- dobór materiałów przeznaczonych do badań modelowych pod kątem składu chemicznego oraz właściwości mechanicznych,
- dobór składu chemicznego kąpielii metalizujących do badań modelowych,
- wytworzenie stanowiska badawczego pozwalającego na modelowe badania polegające na wprowadzeniu zewnętrznych naprężeń rozciągających w próbkach podczas metalizacji,
- przeprowadzenie statycznych prób rozciągania w środowisku obojętnym dla wybranych materiałów przeznaczonych do badań,
- przeprowadzenie modelowych procesów metalizacji zanurzeniowej próbek przy zmiennych parametrach: typ materiału podłoża, skład chemiczny kąpielii metalizującej, wartość zewnętrznego naprężenia rozciągającego, sposób wprowadzania obciążenia wywołującego naprężenie w próbce,
- ocena struktury oraz analiza ilościowa i jakościowa przy użyciu SEM próbek z powłokami pod kątem zmian pod wpływem wprowadzonych naprężeń,

Przeprowadzenie powyżej przedstawionych prac pozwoliło na ocenę czynników oraz określenie przyczyn i mechanizmu pęknięcia pod wpływem działania ciekłego cynku z udziałem dodatków cyny podczas tworzenia powłok w procesie metalizacji zanurzeniowej.

W monografii przeprowadzono badania nad pękaniem elementów w kontakcie z ciekłym metalem, na próbkach łańcuchów ogniowych dostarczonych przez producenta, a wytworzonych ze stali 23MnNiCrMo5-2 po ulepszeniu cieplnym, o strukturze odpuszczonego martenzytu listwowego, charakteryzującej się równowaznikiem węgla wynoszącym $Ce = 0,62\%$. Jak sugerują dane literaturowe, powyższy parametr, który jest stosowany w spawalnictwie, może być wykorzystany do oceny możliwości wystąpienia niekorzystnego zjawiska LME. Stwierdzono, że ryzyko wystąpienia pęknięć w materiale mającym kontakt z ciekłym metalem można zmniejszyć przez stosowanie do procesu cynkowania stali o $Ce = 0,44\%$ lub mniejszym. W rozdziale 6 monografii, w nawiązaniu do genezy tego wskaźnika w literaturze technicznej, odniesiono się krytycznie do stosowania go w ocenie zjawiska LME, ponieważ stal użyta do procesu metalizacji może mieć różną strukturę i właściwości w stanie dostawy oraz po obróbce cieplnej przy tym samym wskaźniku Ce . Dlatego w ocenie zjawiska LME wskaźnika tego nie można traktować jednoznacznie, natomiast może on sugerować pewne ryzyko wystąpienia pęknięć w metalizowanej stali.

Łańcuchy w końcowej fazie procesu wytwarzania były poddane przez producenta standardowej kalibracji polegającej na obciążeniu 80% siły zrywającej, która dla tego typu łańcucha wynosi 150 kN. Wyrób jest sprzedawany w takiej postaci lub poddawany jest metalizacji zanurzeniowej celem wytworzenia antykorozyjnej powłoki ochronnej. Tak przygotowane próbki łańcuchów poddano metalizacji w kąpielii cynkowej oraz w kąpielii cynkowej z dodatkiem 2% mas. cyny.

Analiza struktury łańcucha na przekrojach poprzecznych próbek pokrytych powłoką wykonaną w „czystej” kąpielii cynkowej wskazała, że powłoka ma charakterystyczną budowę składającą się z faz międzymetalicznych Fe-Zn, jaką obserwuje się na stalach o złożonym składzie chemicznym. Nie stwierdzono pęknięć w obszarze powłoki oraz na granicy rozdziału pomiędzy powłoką a podłożem, charakterystycznych dla zjawiska LME. Analiza powstałego na skutek obciążenia siłą zrywającą przelomu wskazuje na przewężenie przekroju ogniwa, co świadczy o wcześniejszym odkształceniu plastycznym. Przeprowadzona analiza ilościowa i jakościowa składu chemicznego w wybranych mikroobszarach, wykonane na brzegu przelomu po dwóch jego przeciwległych końcach oraz w części środkowej, wykazały, że cynk występuje jedynie w strefie wytworzonej powłoki cynkowej. Powyższe wyniki świadczą o tym, że podczas kontaktu ogniwa

łańcucha z ciekłym cynkiem w trakcie metalizacji nie doszło do penetracji ciekłej kąpieli w głąb materiału.

Analiza struktury na przekrojach poprzecznych próbek odcinka łańcucha wytworzonych w kąpieli Zn + 2% mas. Sn wskazała, że powłoka ma taką samą budowę na całej powierzchni ogniwa. Na ogniwach poddanych naprężeniom wstępnym i procesowi metalizacji zaobserwowano liczne obszary, gdzie powłoka w charakterystycznym, lejowatym kształcie wnika w głąb podłoża. Podczas próby rozciągania łańcucha i obserwacji powstałego na skutek obciążenia siłą zrywającą przełomu na próbkach poddanych metalizacji w kąpieli cynkowej z dodatkiem cyny nie zaobserwowano przewężenia przekroju ogniwa, jak to miało miejsce w przypadku przełomów dla próbek poddanych metalizacji w kąpieli cynkowej. Przeprowadzono analizę ilościową i jakościową w charakterystycznych mikroobszarach na przełomie, w sposób podobny do tego, który miał miejsce dla przełomu próbki po cynkowaniu, czyli na brzegu przełomu, po dwóch jego przeciwległych końcach, oraz w części środkowej. Analiza wykonana na przełomie, w podłożu poniżej obszaru powłoki, wskazała obszary bogate w cynk. Wyniki te potwierdza rozkład powierzchniowy pierwiastków Fe, Zn i Sn. Na tej podstawie można stwierdzić, że obszar podłoża bezpośrednio pod powłoką pokryty jest warstwą zawierającą cynk. Pozwala to sądzić, że w materiale w trakcie metalizacji zanurzeniowej w kąpieli Zn + 2% mas. Sn powstało pęknięcie, w którym penetrował ciekły metal. Analiza składu chemicznego w strefie środka próbki nie wykazała występowania cynku w tym obszarze, a jedynie pierwiastki wchodzące w skład podłoża stalowego. Podczas badań ujawniono również skład chemiczny w obszarze powłoki, który potwierdza występowanie faz układu Fe-Zn odpowiadających standardowej jej budowie. Ponadto stwierdzono, że Sn z kąpieli lokuje się w powłoce głównie w obszarze występowania fazy ζ .

Analizując wyniki badań na próbkach łańcuchów poddanych procedurze polegającej na wprowadzeniu obciążenia wstępnego wynoszącego 80% wartości obciążenia rozrywającego, a następnie poddaniu ich metalizacji zanurzeniowej w kąpielach cynkowej oraz cynkowej z dodatkiem cyny, można stwierdzić różnice w ich sposobie pęknięcia. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań ustalono, że w przypadkach cynkowania łańcuchów w kąpieli zawierającej dodatki cyny ich zrywanie następuje w wyniku pęknięcia, jego propagacji i penetracji metalu ciekłego w głąb materiału podłoża podczas procesu metalizacji. Można zatem określić, że przyczyną pęknięcia były określony skład chemiczny zastosowanej stali, skład chemiczny kąpieli przeznaczonej do metalizacji oraz stan naprężeń w materiale. **Nie określono natomiast udziału tych czynników w procesie pęknięcia, co było przesłanką do podjęcia badań modelowych.**

W celu przeprowadzenia badań modelowych pęknięcia elementów stalowych w kontakcie z ciekłym metalem zaprojektowano i wytworzono stanowisko, które będzie opisane oddzielnie w kolejnym podrozdziale załącznika do wniosku.

Do badań modelowych nad pękaniem elementów w kontakcie z ciekłym metalem wykorzystano dwie stale stosowane w procesie metalizacji zanurzeniowej – S215 oraz C70D. Przy ich wyborze uwzględniono to, aby różniły się składem chemicznym, miały zróżnicowaną zawartość krzemu i fosforu (Si + 2,5·P) istotną z punktu widzenia procesu metalizacji oraz zróżnicowane właściwości mechaniczne. Obliczono dla wytypowanych stali równoważniki węgla wynoszące $Ce_{(S215)} = 0,25\%$ oraz $Ce_{(C70D)} = 0,82\%$. Odnosząc obliczone wartości do sugerowanej w literaturze $Ce_{(i)} < 0,44\%$, można stwierdzić, że są to materiały z różnej grupy ryzyka wystąpienia pęknięć w kontakcie z ciekłym metalem. Sumaryczna zawartość krzemu i fosforu (Si + 2,5·P) na podstawie analizy składu chemicznego wynosi dla stali S215 – 0,095% mas., natomiast dla stali C70D – 0,225% mas. Sugeruje to, że pierwsza stal jest poza zakresem efektu Sandelina, natomiast druga wchodzi w zakres stali wysokokrzemowych. Ponadto obliczona wartość (Si + 2,5·P) dla stali 23MnNiCrMo5-2 stosowanej w produkcji ogniw łańcuchów opisanych we wcześniejszych badaniach pokrywa się z wartością dla stali C70D i wynosi 0,225% mas. Wyniki statycznej próby rozciągania dla obu stali przeznaczonych do badań modelowych wskazują na zróżnicowanie zarówno wytrzymałości na rozciąganie, jak i wydłużenia. Stal C70D ($Ce = 0,82\%$) charakteryzuje się przy dużej wytrzymałości na rozciąganie ($R_m = 1765$ MPa) małą wartością wydłużenia przy maksymalnym obciążeniu (3,81 mm) i wydłużeniem po zerwaniu A wynoszącym 9,25%. Z kolei

próbka ze stali S215 ($Ce = 0,25\%$) charakteryzuje się przy małej wytrzymałości na rozciąganie ($R_m = 456,8$ MPa) dużą wartością wydłużenia przy maksymalnym obciążeniu (9,84 mm) i wydłużeniem po zerwaniu $A = 21,72$ mm.

Kąpiel cynkowa z dużą zawartością cyny wpłynęła na poprawę właściwości powłoki, jednak może być przyczyną pęknięcia elementów poddanych metalizacji. Dlatego w badaniach modelowych nad możliwością oraz przyczynami pęknięcia elementów, które były w kontakcie z ciekłym metalem (w procesie metalizacji zanurzeniowej), zastosowano dla porównania kąpiele: cynkową, cynkową z dodatkiem 2% mas. cyny oraz cynową. W przypadku wszystkich kąpiele przyjęto, że parametrami stałymi będą: czas metalizacji wynoszący 180 s oraz temperatura procesu wynoszącą 450°C , a w przypadku kąpiele cynowej dodatkowo 280°C .

Mając na względzie, że stan naprężeń w cynkowanym elemencie istotnie wpływa na możliwość powstawania pęknięć podczas procesu metalizacji, w badaniach modelowych próbki poddawano obciążeniu wywołującemu naprężenie rozciągające. W procesie metalizacji elementy cynkowane wykazują naprężenia wynikające z przeprowadzonych operacji technologicznych, w tym obróbki cieplnej i przeróbki plastycznej. Należy się liczyć z tym, że naprężenia te mogą powstać również w trakcie procesu zanurzania, głównie na skutek zjawisk rozszerzalności. W związku z powyższym w badaniach, w celu zamodelowania istniejącego w warunkach rzeczywistych stanu, przyjęto, że próbki będą poddawane obciążeniu wywołującemu naprężenie rozciągające i będzie ono wprowadzane w dwóch etapach. W pierwszym etapie próbki poddano obciążeniu wstępnemu siłą rozciągającą przed zanurzeniem w kąpiele, a po ich zanurzeniu w kąpiele metalizującej obciążeniu właściwemu wywołującemu zadane naprężenie. Obciążenie właściwe było realizowane dwoma metodami: przez jednorazowe obciążenie do zadanej wartości naprężenia (metoda I) oraz przez jednorazowe obciążenie i utrzymanie zadanej wartości wywołującej naprężenie przez cały proces metalizacji. Próbki przed wyciągnięciem z kąpiele odciążano, a następnie wynurzano i chłodzono w powietrzu. Na podstawie wyników statycznej próby rozciągania w środowisku obojętnym oraz badań wstępnych przyjęto zakres naprężeń w badaniach modelowych. Przyjęto plan eksperymentu. Dla stali S215 ustalono naprężenie wstępne na poziomie 350 MPa, a zakres badań przy obciążeniu właściwym wywołującym naprężenie w zakresie 250-400 MPa. Z kolei dla stali C70D przyjęto naprężenie wstępne 400 MPa oraz naprężenie właściwe w zakresie 400-800 MPa.

Na podstawie powyższych założeń dokonano oceny wpływu materiału podłoża, składu kąpiele metalizującej i wartości naprężeń wywołanych siłą rozciągającą oraz metody ich wprowadzania na możliwość powstawania pęknięć elementów w badaniach modelowych. Otrzymane wyniki badań modelowych pozwoliły na interpretację wpływu poszczególnych parametrów na możliwość wystąpienia pęknięć elementów w kontakcie z ciekłym metalem w trakcie metalizacji zanurzeniowej.

Wpływ składu chemicznego podłoża na pęknięcie elementów w kontakcie z ciekłym metalem

Wyniki badań modelowych prowadzonych na próbkach poddanych naprężeniom rozciągającym podczas metalizacji zanurzeniowej w kąpielach Zn i Zn + 2% mas. Sn wskazały na różnice w zachowaniu się próbek w zależności od stosowanej stali.

Próbki ze stali S215 ($Ce = 0,25\%$), o strukturze włóknistej ferrytyczno-perlitycznej, po przeróbce plastycznej na zimno, charakteryzujące się w statycznej próbie rozciągania małą wytrzymałością, dużym wydłużeniem oraz twardością $HV1 = 265$, poddane naprężeniom rozciągającym (250-400 MPa) w trakcie metalizacji zanurzeniowej w obu kąpielach zachowywały się podobnie. Podczas testów zarówno w kąpiele cynkowej, jak i w kąpiele cynkowej z dodatkiem cyny próbki ulegały zrywaniu wyłącznie w górnym zakresie przyjętych w badaniach naprężeń (400 MPa – metoda I, 350 MPa – metoda II), jednakże miało to związek z przekroczeniem wytrzymałości materiału próbki w temperaturze procesu metalizacji, na co wskazuje odkształcenie próbki z charakterystycznym przewężeniem. Badania metalograficzne na przekrojach wzdłużnych próbek z powłoką cynkową, które nie uległy zerwaniu, wykazały, że powłoka jest ciągła, równomierna i dobrze przylega do podłoża. W żadnej z poddanych badaniom próbek ze stali S215

nie stwierdzono pęknięć charakterystycznych dla zjawiska LME i to zarówno w obszarze powłoki, jak i w materiale podłoża.

Próbki wykonane ze stali C70D ($Ce = 0,82\%$), o strukturze włóknistej odkształconego perlitu ze śladami ferrytu, po przeróbce plastycznej na zimno, charakteryzujące się dużą wytrzymałością, małym wydłużeniem oraz twardością $HV1 = 441$, poddane jednorazowemu obciążeniu wywołującemu naprężenie rozciągające w zakresie 400-800 MPa podczas metalizacji zanurzeniowej zarówno w kąpeli cynkowej, jak i w kąpeli cynkowej z dodatkiem cyny, przeszły pełny test i żadna z nich nie uległa zerwaniu, nie stwierdzono też pęknięć w podłożu na skutek kontaktu z ciekłym metalem. Rozbieżność w wynikach dla tej stali wystąpiła w przypadku wywołania naprężenia o stałej wartości i utrzymaniu go przez cały czas metalizacji. W kąpeli cynkowej próbki przeszły pełny cykl badawczy i żadna nie uległa zerwaniu, nie stwierdzono też pęknięć w metalizowanym podłożu. Z kolei podczas testu metalizacji w kąpeli Zn + 2% mas. Sn próbki ulegały zerwaniu przy najwyższej badanej wartości wywołanego naprężenia (800 MPa). Analiza struktury na przekrojach wzdłużnych próbek potwierdziła wystąpienie pęknięć charakterystycznych dla zjawiska LME.

Wpływ składu chemicznego kąpeli metalizującej na pękanie elementów w kontakcie z ciekłym metalem

Wyniki badań modelowych prowadzone w kąpielach cynkowej, cynkowej z dodatkiem cyny oraz cynowej pozwoliły na ocenę wpływu składu chemicznego kąpeli na możliwość wystąpienia zjawiska LME w elementach poddanych naprężeniom w trakcie metalizacji zanurzeniowej.

Badania przeprowadzone w kąpeli cynkowej na elementach poddanych naprężeniom zarówno dla stali S215, jak i dla stali C70D wskazują, że w żadnym badanym przypadku nie wystąpiło zjawisko pękania na skutek kontaktu z ciekłym metalem.

Poddane badaniom elementy ze stali o S215 metalizowane w kąpeli Zn + 2% mas. Sn zachowywały się w warunkach przeprowadzonych testów podobnie jak w kąpeli cynkowej. Zjawisko LME nie wystąpiło. Różnice pomiędzy wynikami testów prowadzonych w tej kąpeli a uzyskanymi w kąpeli cynkowej zanotowano w przypadku wywołania naprężenia w elementach ze stali C70D. Próbki, w których wywołano naprężenie jednorazowo (700-800 MPa), wykazywały podczas badań metalograficznych nieliczne, drobne pęknięcia występujące tylko w obszarze powłoki. Z kolei w próbkach, dla których wywołano naprężenie i utrzymywano zadaną wartość w zakresie 600-700 MPa przez okres metalizacji, wystąpiły drobne pęknięcia w obszarze powłoki, a próbki poddane naprężeniu 800 MPa uległy zerwaniu. W próbkach wytworzonych przy tych parametrach stwierdzono liczne pęknięcia prostopadłe w głąb materiału podłoża z wypełnieniem przez materiał powłokotwórczy w sposób charakterystyczny dla występowania zjawiska LME. Analiza prowadzona za pomocą mikroskopii skaningowej wskazała liczne pęknięcia, wąskie i prostopadłe do powierzchni próbki, a większość z nich powstała w pobliżu miejsca zerwania próbki. Przeprowadzona analiza jakościowa EDS w badanych mikroobszarach ujawniła występowanie cynku i cyny. Wyniki analizy ilościowej prowadzone w miejscu powstania pęknięcia, w środkowej części pęknięcia oraz w miejscu najbardziej zbliżonym do wierzchołka pęknięcia, wskazały na zróżnicowanie składu chemicznego. Zawartość cynku w powstałym pęknięciu mieści się w zakresie 85-60% mas., a żelaza w zakresie 14-37% mas. Natomiast zawartość cyny w wierzchołku pęknięcia jest od trzech do sześciu razy większa niż w pozostałych dwóch obszarach analizy – w środku pęknięcia i w miejscu jego powstania. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że dodatek cyny w kąpeli cynkowej w przypadku testów na stali C70D, w których występuje określony stan naprężeń, jest czynnikiem wywołującym pękanie na skutek kontaktu z ciekłym metalem LME.

Badania modelowe elementów ze stali C70D poddanych metalizacji w kąpeli cynowej prowadzono w temperaturze 280°C oraz w temperaturze 450°C. Wybór niższej temperatury metalizacji wynikał z konieczności sprawdzenia zachowania się materiałów w warunkach testu w pobliżu temperatury topnienia cyny, natomiast wyższa temperatura została przyjęta dla zachowania warunków poprzednio prowadzonych testów. Badania prowadzone w zakresie 400-800

MPa w obu wartościach temperatury metalizacji wykazały, że wszystkie próbki przeszły pełny test i w żadnym przypadku nie doszło do zerwania próbek. W badanych próbkach stwierdzono jedynie nieukierunkowane, drobne pęknięcia w obszarze powłoki, które powstały już od naprężenia o wartości 500 MPa, a których intensywność wzrosła wraz ze wzrostem wartości wywołanego naprężenia. Wygląd pęknięć może sugerować, że nie powstały one w trakcie wywołania naprężenia podczas metalizacji zanurzeniowej próbki, a zostały utworzone podczas konstytuowania się powłoki w procesie jej stygnięcia po procesie cynowania. W żadnej z badanych próbek poddanych naprężeniom w określonym zakresie podczas metalizacji w kąpeli cynowej nie stwierdzono pęknięć w głąb podłoża charakterystycznych dla zjawiska LME.

Wpływ wartości naprężenia oraz sposobu obciążania siłą rozciągającą wywołującą naprężenie na pękanie elementów w kontakcie z ciekłym metalem

Naprężenie jest czynnikiem mogącym wywołać pęknięcia oraz niszczenie elementów niezależnie od środowiska, w którym pracują. W badaniach modelowych nad możliwością pękania elementów w kontakcie z ciekłym metalem naprężenie jest czynnikiem inicjującym powstawanie pęknięć, a jego wartość oraz sposób wywołania (określony jako metody I i II), przy niesprzyjających czynnikach (podatny materiał podłoża, niekorzystny skład chemiczny kąpeli metalizującej), mogą być przyczyną powstania zjawiska LME. W zrealizowanych eksperymentach prowadzonych w kąpeli cynkowej oraz w kąpeli cynowej naprężenia w badanym zakresie oraz sposób ich wywołania w elemencie nie spowodowały wystąpienia zjawiska pękania na skutek oddziaływania ciekłego metalu. Nie wystąpiło ono również w przypadku wywołania naprężenia jednorazowym obciążeniem siłą rozciągającą w elementach poddanych metalizacji w kąpeli cynkowej z dodatkiem cyny. Pęknięcie charakterystyczne dla zjawiska LME powstało wyłącznie w przypadku dużych wartości naprężenia (800 MPa) wywołanych i utrzymywanych przez cały okres metalizacji w kąpeli cynkowej z dodatkiem cyny w stali podatnej na pękanie (C70D). Odnosząc powyższe do warunków przemysłowych, można stwierdzić, że taki stan istnieje w przypadku cynkowania wyrobów o złożonej konstrukcji, w których elementy rozszerzają się nierównomiernie podczas procesu metalizacji.

Przeprowadzone badania oraz analiza wyników pozwoliły na przedstawienie hipotetycznego mechanizmu procesu pękania (forma graficzna w monografii). Ze względu na zróżnicowany charakter oddziaływań w trakcie procesu w opisie mechanizmu uwzględniono rodzaj stali charakteryzowany składem chemicznym, strukturą i właściwościami mechanicznymi.

W przypadku stali S215 ($Ce = 0,25\%$) o strukturze włóknistej ferrytyczno-perlitycznej, po przeróbce plastycznej na zimno, charakteryzującej się małą wytrzymałością ($R_m = 456,8$ MPa), dużym wydłużeniem ($A = 21,72\%$) i twardością ($HV1 = 265$), proces pękania pod wpływem wywołanego stanu naprężeń w trakcie procesu metalizacji zanurzeniowej przebiega niezależnie od składu chemicznego badanej kąpeli – cynkowej lub cynkowej z dodatkiem cyny.

Naprężenia z zakresu 250-300 MPa podczas metalizacji w kąpeli o temperaturze 450°C nie powodują wystąpienia wad, rys i pęknięć zarówno w powstałej powłoce, jak i metalizowanym podłożu. Zwiększenie wartości naprężenia do wartości z zakresu 350-400 MPa powoduje, że w trakcie procesu metalizacji materiał wydłuża się i przewęża w postaci charakterystycznej szyjki aż do zerwania. Na powierzchni elementu oraz w powstałej powłoce nie występują żadne dodatkowe rysy i pęknięcia. Potwierdza to fakt, że w stalach takich jak S215, o określonym składzie chemicznym ($Ce = 0,25\%$), małej wytrzymałości i dużym wydłużeniu, poddanych metalizacji zanurzeniowej nie występuje zjawisko LME, a zerwanie powstaje wyłącznie na skutek dekohezji materiału pod wpływem sił przekraczających określone naprężenie graniczne.

Odmienne zachowują się poddane testowi powstawania pęknięć podczas metalizacji zanurzeniowej w kąpeli cynkowej próbki ze stali C70D ($Ce = 0,82\%$), o strukturze włóknistej odkształconego perlitu ze śladami ferrytu, po przeróbce plastycznej na zimno, charakteryzujące się dużą wytrzymałością ($R_m = 1765$ MPa), małym wydłużeniem ($A = 9,25\%$) i twardością ($HV1 = 441$).

Wobec faktu, że naprężenia wywoływane podczas trwania testu stanowią około 50% naprężenia potrzebnego do zerwania próbek, nie obserwuje się podczas testów ich zrywania, a jedynie powstawanie drobnych pęknięć w powłoce. Wynika stąd, że podczas metalizacji w kąpeli cynkowej stali o składzie chemicznym ($Ce = 0,82\%$), określonej strukturze i właściwościach mechanicznych, nawet przy umiarkowanych naprężeniach nie występuje zjawisko pęknięcia pod wpływem ciekłej kąpeli metalizującej podczas procesu cynkowania.

Zmiana składu chemicznego kąpeli podczas procesu metalizacji próbek ze stali C70D ($Ce = 0,82\%$) i poddanie ich naprężeniu rozciągającemu sięgającemu około 50% naprężenia zrywającego powodują już po krótkim czasie metalizacji powstawanie pęknięć charakterystycznych dla występowania zjawiska LME. Na tej podstawie można wnioskować, że podstawową przyczyną występowania opisywanego zjawiska jest skład kąpeli metalizującej. Oczywiście nieodzownymi czynnikami powodującymi opisywane zjawisko są także materiał podłoża oraz wywołany w nim stan naprężeń.

Wydaje się, że bardziej istotne jest naprężenie, które powstaje podczas procesu metalizacji niż to, które element ma przed wprowadzeniem do kąpeli. Wygląd krzywych $\sigma = f(t)$ podczas testów wskazuje, że naprężenia wstępne wywołane obciążeniem siłą rozciągającą w dużym stopniu relaksują się podczas nagrzewania elementu w kąpeli do cynkowania.

Analizując możliwe przyczyny wystąpienia tego zjawiska, można sądzić, że dodatek cyny w kąpeli wpływa na znaczące obniżenie jej energii powierzchniowej. Z danych literaturowych wynika, że energia powierzchniowa ciekłego cynku znacząco różni się od energii powierzchniowej cyny. W temperaturze 450°C energia powierzchniowa cynku wynosi 755 mJ/m^2 , natomiast cyny w tej temperaturze 514 mJ/m^2 . Dodatek cyny będzie oddziaływał w kąpeli cynkowej jak dodatek powierzchniowo aktywny. Poprawia to adsorpcję cieczy do ciała stałego i umożliwia inicjację szczeliny. W myśl rozważań Gordona, który opiera swój model na penetracji atomów ciekłego metalu wzdłuż granic ziarn, faktyczne tworzenie się pęknięć nie jest wielkością kontrolowaną, jest nią natomiast okres inkubacji występujący podczas procesu pęknięcia. Takie podejście wyjaśnia opóźnione pęknięcie, które było obserwowane podczas badań. W czasie inkubacji atomy ciekłego metalu powodującego pęknięcie są adsorbowane i przenikają dyfuzyjnie do granic ziarn metalu, gdzie następuje ich koncentracja. Gdy zostanie zgromadzona dostateczna ilość atomów w strefie penetracji, zachodzi zarodkowanie pęknięć. Można przypuszczać, że zarodkowanie powstanie w miejscu już istniejącego spiętrzenia dyslokacji, gdzie naprężenie osiągnęło wartość nadkrytyczną przy jednocześnie obniżonej odporności na pęknięcie, a to prowadzi do propagacji pęknięcia [5, 177].

Penetracja atomów ciekłego metalu przebiega w dwóch etapach:

- etap 1 – przejście atomów ze stanu adsorbowanego do stanu rozpuszczonego na powierzchni,
- etap 2 – dyfuzja i wnikanie wzdłuż miejsc uprzywilejowanych – zwykle granic ziarn.

Szybkość obu etapów jest przyspieszona przez dwa czynniki:

- wzrost naprężenia,
- wzrost faz międzymetalicznych w szczelinie.

Wykres zależności $\sigma = f(t)$ (próbka C70D/800 MPa/metoda II/kąpiel Zn + 2% mas. Sn) wskazuje, że rozwój rozpoczętego pęknięcia przebiega w bardzo gwałtowny sposób. Propagacja pęknięć LME przebiega z nieustannym dostarczaniem metalu ciekłego do końca szczeliny. Transport w LME polega na przepływie dużej ilości cieczy, czyli ciekłego cynku, który zwilża podstawowy metal, i ma możliwość penetrowania nawet bardzo głębokich szczelin. W szczelinie, podobnie jak na powierzchni elementu, tworzą się fazy żelazo - cynk. Wzrastają one i wypełniają szczelinę, wspomagają jej propagację. Należy sądzić, że odpowiedni stan naprężeń w materiale i zwiększona koncentracja cyny, obniżająca dodatkowo energię powierzchniową w wierzchołku pęknięcia, synergicznie wywołują oraz wspomagają powstawanie pęknięcia.

Podsumowując, w pracy udowodniono, że proces pęknięcia w wyniku oddziaływania ciekłych metali, określane w literaturze jako LME, nie jest zjawiskiem powszechnym w procesie metalizacji zanurzeniowej. Jak dowodzą badania modelowe przedstawione w niniejszej monografii, aby

opisywane zjawisko wystąpiło, muszą zaistnieć równocześnie określone niekorzystne czynniki. Przedstawione wyniki wskazują, że istotnym czynnikiem jest dodatek cyny do kąpeli cynkowej, ponieważ tylko w tym przypadku obserwowano podczas metalizacji w porównywalnych warunkach występowanie zjawiska LME. Jednakże, aby ono wystąpiło, stal przeznaczona do metalizacji musi być podatna na pękanie. Na powstawanie pęknięć intensywnie wpływa również naprężenie powstające podczas cynkowania, np. powstające na skutek różnic rozszerzalności cieplnej cynkowanego elementu. Naprężenia ukonstytuowane podczas procesu wytwarzania elementu przeznaczonego do cynkowania w kąpeli metalicznej ulegają w dużej mierze relaksacji i nie są przyczyną występowania zjawisk LME. Dopiero stan naprężeń w elemencie (po przeróbce plastycznej na zimno oraz zabiegach obróbki cieplnej), który nie może być zredukowany w warunkach procesu cynkowania (temperatura i czas procesu), powoduje powstawanie pęknięć.

Wyniki badań udowadniają, że dopiero równocześnie występujące powyżej wymienione trzy czynniki istotnie zwiększają prawdopodobieństwo pękania wyrobów metalizowanych zanurzeniowo, co potwierdza przyjętą tezę pracy.

Czynniki mogące mieć wpływ na możliwość wystąpienia zjawiska LME uwzględniono w procedurze DAST 022, która weszła w życie jako wytyczna Niemieckiej Komisji Budownictwa Stalowego DAST (Deutscher Ausschuss für Stahlbau). Reguluje ona aspekty planowania, konstruowania, produkcji i cynkowania zanurzeniowego nośnych elementów stalowych obliczanych i wykonywanych na podstawie normy DIN 18800 bądź DIN EN 1993 i DIN 18800-7 lub DIN EN 1090-2. Zgodnie z wymaganiami wytycznej DAST 022 zakłady wysyłające swoje wyroby do cynkowania są zobowiązane w swoim zamówieniu podać cynkowni ustaloną klasę ufności elementu, która uwzględnia m.in. poziom naprężeń w wyrobie. Z kolei cynkownie powinny spełniać wymagania wytycznej DAST 022, zapewniając odpowiedni skład kąpeli cynkowniczej i system gromadzenia danych, a także możliwość wykonywania badania pęknięć proszkiem magnetycznym. Dopuszczalny udział dodatków do kąpeli cynkowej, w tym cyny, został radykalnie obniżony. Należy jednak zaznaczyć, że obowiązująca na rynku niemieckim wytyczna DAST 022 jest stosowana w odniesieniu do elementów wykonanych z materiałów S235, S275, S355, S420, S450 i S460 według normy DIN EN 10025, czyli określonej grupy stali konstrukcyjnych zwykłej jakości.

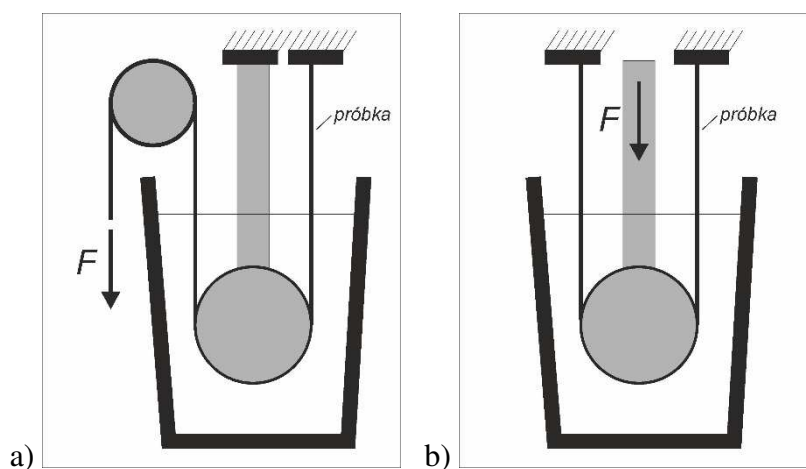
Przedstawione w monografii wyniki badań modelowych dają podstawę do określenia kryteriów oceny ryzyka pękania elementów stalowych podczas cynkowania zanurzeniowego metodą jednostkową. W aspekcie naukowym opracowane hipotetyczne mechanizmy przebiegu omawianego procesu pozwalają na poszerzenie wiedzy o zjawiskach zachodzących podczas krótkotrwałego kontaktu cieczy metalicznej ze stalami o różnych składzie chemicznym, strukturze i właściwościach mechanicznych.

4A. Istotne osiągnięcie naukowe, po uzyskaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Materiałowa

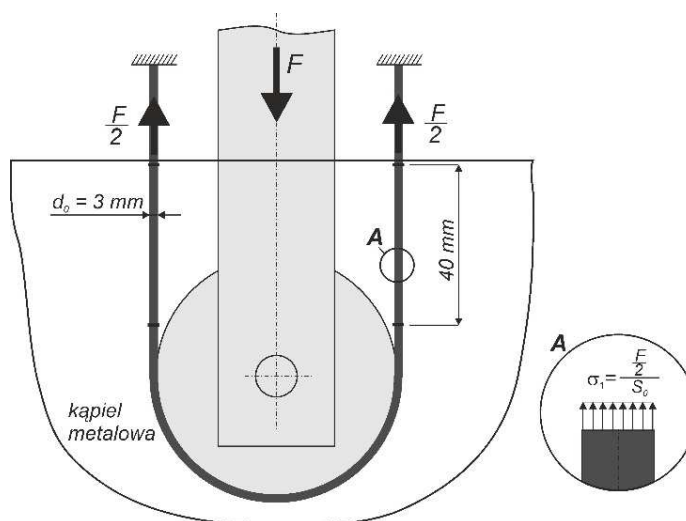
Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska do badań procesu pękania wyrobów stalowych podczas cynkowania zanurzeniowego oraz opracowanie metodyki badań

Podstawowym założeniem przyjętym przed przystąpieniem do badań modelowych nad przyczynami pękania elementów w kontakcie z ciekłym metalem była budowa takiego stanowiska, które umożliwiłoby „wprowadzenie” określonego stanu naprężeń w próbce zanurzonej w ciekłym metalu. Drugie założenie, równie ważne, dotyczyło tego, aby na zbudowanym stanowisku można było prowadzić testy w trakcie klasycznego procesu metalizacji zanurzeniowej metodą jednostkową w warunkach laboratoryjnych. Takie założenia określiły warunki, jakie musiało spełniać stanowisko badawcze. Schematy na rys. 1 przedstawiają rozpatrywane koncepcje, które powstały podczas prac nad projektem.

Projekt stanowiska realizowano według koncepcji przedstawionej na rys. 1. Podczas analizy rozpatrywano różne sposoby mocowania „na sztywno” dwóch końców próbki oraz sposoby zadawania i kontrolowania obciążenia wywołującego pod wpływem siły F naprężenie rozciągające σ_1 , które w obszarze pobierania próbek do badań wyznaczono w sposób przedstawiony na rys. 2.



Rys. 1. Koncepcje budowy stanowiska: a) obciążenie zadawane na jednym końcu próbki (drugi koniec jest zamocowany „na sztywno”), b) obciążenie zadawane na środku próbki (obydwa końce zamocowane „na sztywno”)



Rys. 2. Analiza stanu naprężeń w obszarze pobierania próbek do badań

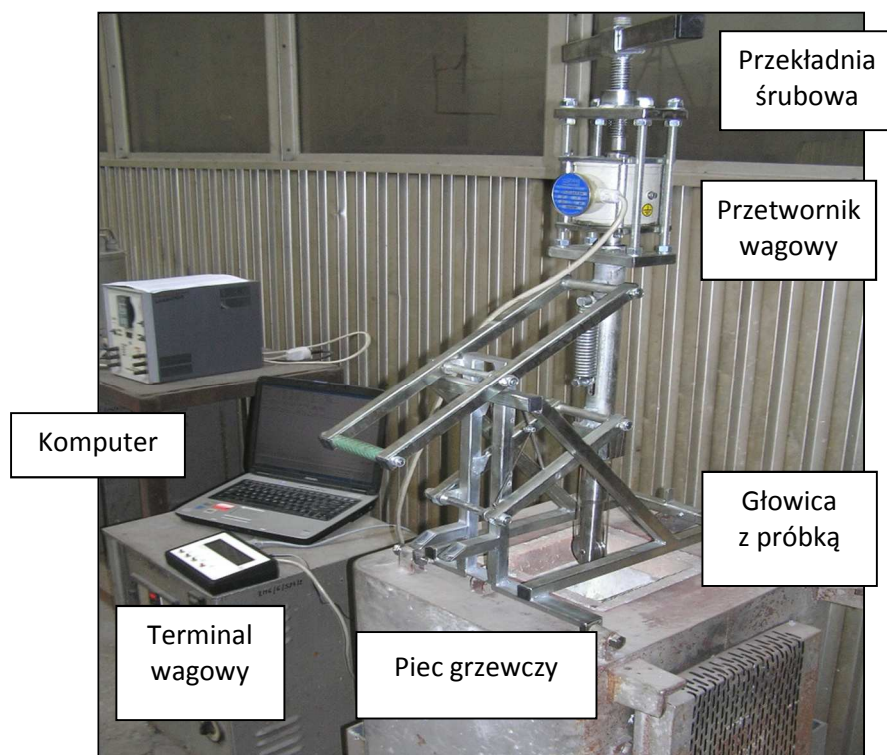
Prace nad projektem obejmowały również dobór materiałów poszczególnych składowych stanowiska. Większość elementów wykonana została ze stali konstrukcyjnej C45E (rama, dźwignia, gniazdo i kliny do zamocowania próbki, przekładnia śrubowa itp.), natomiast głowicę (zanurzaną w kąpiel metalizującej) wykonano ze stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco 55NiCrMoV6.

Stanowisko do badań pęknięcia elementów pod wpływem ciekłych metali składało się z dwóch zasadniczych modułów:

1. pieca grzewczego PET 22/45 wyposażonego w tygiel wykonany z azotanego węgla krzemu o pojemności $3,2\text{ dm}^3$ oraz układu pomiaru i regulacji temperatury pieca z dokładnością $\pm 2^\circ\text{C}$. Górna płyta pieca grzewczego stanowi podstawę do zamontowania drugiego modułu

stanowiska, który służy do zadawania naprężeń rozciągających zanurzonej w kąpeli metalizującej próbki;

- ramienia obciążającego pozwalającego na wprowadzenie określonej wartości naprężenia rozciągającego σ w próbce za pomocą przekładni śrubowej połączonej z przetwornikiem wagowym typu PW1-S-2,5. Przetwornik mechaniczno-elektryczny przetwarza siłę ściskającą na proporcjonalny do niej sygnał elektryczny. Przetwarzanie to odbywa się na podstawie zasady tensometrii oporowej. W skład przetwornika wagowego wchodzi zespół tensometrów połączonych w układ pełnego mostka, naklejonych na element sprężysty przetwornika. Zadawanie obciążenia próbki odbywa się pośrednio za pomocą przekładni śrubowej działającej na element sprężysty przetwornika zakończony główką kulistą. Element ten zamknięto w nierozbieralnej obudowie. Dane z przetwornika wagowego przesyłane są kablem do terminala wyposażonego w wyświetlacz elektroniczny, za pomocą którego pokazywane są aktualne wartości obciążenia próbki – tryb „NORM” lub tryb „P.HLD”, czyli zatrzymanie na maksymalnej wartości obciążenia. Podstawowe funkcje terminala to: włącz – wyłącz, zerowanie, wybór trybu pracy („NORM”, „P.HLD”), zapisywanie ustawień. Terminal wyposażony jest w port szeregowy RS 232. Port ten umożliwia rejestrację i zapis przebiegu badań za pomocą zainstalowanego na komputerze oprogramowania. Do badań korzystano z oprogramowania freewareowego PComm, za pomocą którego rejestrowano wartości obciążenia próbki z częstością 5 razy na sekundę. Stanowisko badawcze wraz z opisem przedstawiono na rys. 3, natomiast kolejną fazę testu na rys. 4.



Rys. 3. Stanowisko badawcze gotowe do badań



Stanowisko ustawione w pozycji umożliwiającej wygodne mocowanie próbki



Założenie próbki (stanowisko w pozycji poziomej)



Wprowadzenie obciążenia wstępnego, zanurzenie próbki w kąpeli metalizującej i zadanie obciążenia właściwego



Próbka po wynurzeniu z kąpeli metalizującej

Rys. 4 Kolejne fazy testu na wykonanym stanowisku badawczym

Zbudowane stanowisko badawcze poddano testom sprawdzającym. Określono, że spełnia ono wszystkie przyjęte założenia, a przede wszystkim możliwe są, poprzez zadanie obciążenia siłą rozciągającą, wywołanie i kontrola wielkości naprężeń w próbce w trakcie procesu metalizacji zanurzeniowej metodą jednostkową.

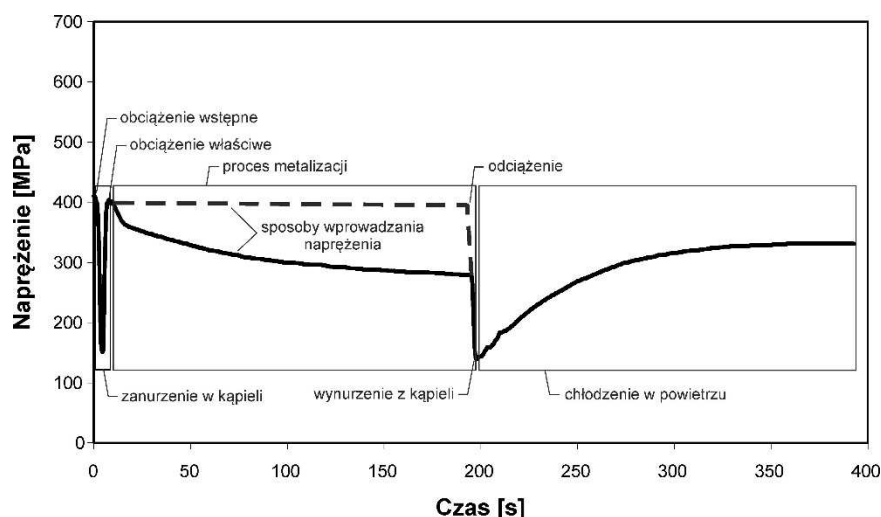
Próbki poddawano obciążeniu, wywołując zadane naprężenie rozciągające w dwóch etapach:

- etap 1 – obciążenie wstępne – zadawane przed zanurzeniem próbki w kąpeli,
- etap 2 – obciążenie właściwe – zadawane po zanurzeniu próbki w kąpeli.

Obciążenie właściwe realizowane było dwoma metodami:

- metoda I – jednorazowe obciążenie do wartości zadanej bezpośrednio po zanurzeniu,
- metoda II – jednorazowe obciążenie i utrzymanie zadanej wartości przez cały proces metalizacji.

Próbki przed wyciągnięciem z kąpeli odciążano (usuwano zadane obciążenie), a następnie wynurzano i chłodzono w powietrzu. Schemat procesu metalizacji próbek poddanych naprężeniu przedstawiono na rys. 5. Każdy proces był rejestrowany na komputerze w układzie: zależność naprężenia w funkcji czasu od momentu zadania obciążenia wstępnego do momentu ustabilizowania naprężenia i schłodzenia próbki. Badania prowadzono na trzech próbkach dla każdego z zadanych zmiennych parametrów.



Rys. 5. Metodyka oraz przebieg procesu metalizacji próbek poddanych napężeniu

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

5.1. Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

Swoją pasję kierunkami technicznymi rozpocząłem w szkole średniej – Śląskie Techniczne Zakłady Naukowe o profilu Obróbka skrawaniem. W trakcie nauki w okresach wakacyjnych odbyłem dwa 4 tygodniowe nieodpłatne staże przemysłowe. Pierwszy staż (1983 r.) odbyłem w Zakładach Wytwórczych Urzędów Sygnalizacyjnych ZWUS w Katowicach (obecnie ABB) na wydziale obróbki skrawaniem oraz na wydziale wytwarzania powłok galwanicznych. Drugi staż (1984 r.) odbyłem w Przedsiębiorstwie FAMUR w Katowicach (obecnie FAMUR S.A.) na wydziale montażu kombajnów górniczych oraz na wydziale hartowania indukcyjnego i azotowania kół zębatych. Powyższe skłoniło mnie aby po ukończeniu szkoły (1985 r.) i zdaniu matury z trzecią lokatą w szkole zdawać egzaminy wstępne na Politechnikę Śląską na Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii (dawniej Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej na kierunku Inżynieria Materiałowa. Po pozytywnym zdaniu egzaminów wstępnych na roku 0 w ramach SPR odbyłem staż przemysłowy (1985 r.) – pod opieką Hutniczego Przedsiębiorstwa Remontowego – 2 tygodnie w Hucie Łabędy i 2 tygodnie Hucie Zygmunt. W 1988 r. odbyłem 4 tygodniowy odpłatny staż przemysłowy w Hucie Jedność na wydziale Innocenti oraz Mannesman. Jako specjalizację na studiach obrałem Warstwę Wierzchnią. Studia magisterskie ukończyłem w 1990 roku z wynikiem bardzo dobrym (kopia w załączniku 5) broniąc pracę magisterską pt. „Technologiczne i materiałowe podstawy doboru parametrów wytwarzania warstw adhezyjno – dyfuzyjnych na żarowytrzymałym stopie ŻS6K” pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Adolfa Maciejnego, a moim opiekunem był dr inż. Lucjan Swadźba. Była to pierwsza praca realizowana na Wydziale z zakresu barier cieplnych TBC, polegająca na doborze materiału na międzywarstwy na bazie Ni-Cr i MeCrAlY, wytwarzaniu powłok na bazie Al_2O_3 oraz ZrO_2 stabilizowanych $8Y_2O_3$ oraz ocenie ich właściwości antykorozyjnych. Po studiach zostałem powołany do odbycia 5. miesięcznego szkolenia wojskowego w ramach SPR w Wyższej Oficerskiej Szkole Samochodowej w Pile (02.1991-06.1991).

15 lipca 1991 roku po propozycji Kierownika Katedry prof. A. Gierka rozpocząłem pracę w Katedrze Technologii Stopów Metali i Kompozytów na Wydziale Inżynierii Materiałowej

i Metalurgii Politechniki Śląskiej, w zespole zajmującym się powłokami ochronnymi, a moim opiekunem został dr inż. Piotr Liberski.

Od początku pracy na Uczelni moje zainteresowania naukowo-badawcze związane były z zagadnieniami inżynierii powierzchni, a zwłaszcza technologiami wytwarzania powłok ochronnych na wyrobach metalowych, ocenie ich właściwości technologicznych i odporności korozyjnej. W pierwszych latach pracy na Uczelni kształtowałem swoje umiejętności dydaktyczne prowadząc ćwiczenia laboratoryjne z zakresu technologii warstwy wierzchniej, technologii uszlachetniania powierzchni wyrobów, powłok zanurzeniowych, korozji i ochrony przed korozją.

Pierwszy artykuł naukowy powstał we współpracy z promotorem i opiekunem mojej pracy magisterskiej, gdzie wykorzystane zostały częściowo wyniki badań mojej pracy [zał. 3, poz. 3]. Moje umiejętności naukowe i badawcze zostały wykorzystane przez dr inż. Lucjana Swadźbę, co miało odzwierciedlenie w projektach badawczych [zał. 3, II.J, poz. 1, 2, 5]. Natomiast kształtowanie mojego warsztatu badawczego i naukowego w zakresie powłok zanurzeniowych, badania ich właściwości technologicznych i antykorozyjnych pod opieką dr inż. Piotra Liberskiego zaowocowało udziałami w seminariach i konferencjach krajowych oraz publikacjami [zał. 3, poz. 4, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Ponadto, jako współautor, prowadziłem badania w ramach działalności statutowej BK/BW [zał. 3, II.J]. Jako współautor wykonywałem projekty naukowo-badawcze NB dla instytucji i przemysłu [zał. 3, poz. 1-4].

Na początku mojej pracy na Uczelni, moje zainteresowanie metodami badawczymi zaowocowało także współpracą z prof. Franciszkiem Binczykiem. Pozwoliło mi to na doskonalenie technik analizy termicznej różnicowej DTA i różniczkowej ATD. Współpraca ta miała odzwierciedlenie w projekcie badawczym [zał. 3, II.J poz. 3] oraz publikacjach [zał. 3, poz. 1, 2, 7, 8, 11, 12, 15, 17].

W lutym 1994 r. rozpocząłem trzyletnie studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii, Transportu i Zarządzania Politechniki Śląskiej które ukończyłem w styczniu 1997 r. [kopia, zał. 5]. W trakcie studiów doktoranckich rozwijałem swoją wiedzę teoretyczną i doskonaliłem znajomość technik badawczych charakteryzujących właściwości i strukturę powłok ochronnych.

W okresie tym moje zainteresowania naukowe skoncentrowały się na metodach zwiększania odporności korozyjnej powłok cynkowych. Zwiększenie odporności można uzyskać stosując dodatek 5% lub 55% aluminium do cynkowej kąpielii metalizującej. Pierwsze powszechnie znane są pod handlową nazwą Galfan, drugie natomiast to Galvalume. W 1998 r. pozyskałem projekt młodego badacza PBU-26/RM-6/98 pt. Kinetyka wzrostu oraz wybrane właściwości użytkowe powłok zanurzeniowych otrzymywanych na stopach żelaza w kąpielach aluminium-cynk-krzem, który pozwolił mi na przeprowadzenie badań do doktoratu. Ponadto częściowo wyniki badań były publikowane w Inżynierii Materiałowej, Problemach Eksploatacji oraz przedstawione na Szkole Inżynierii Materiałowej w Zakopanem (1998 r.) oraz na konferencji Euromat 1999 w Monachium.

Decyzją Rady Wydziału w 1996 roku otwarto mi przewód doktorski, a 17 października 2000 roku obroniłem rozprawę doktorską pt. „Kinetyka wzrostu powłok zanurzeniowych na stopach żelaza w kąpielach aluminiowo-cynkowych oraz ich odporność na korozję” – uzyskując stopień doktora nauk technicznych. Promotorem pracy był prof. dr hab. inż. Adam Gierek, a na jej recenzentów powołano prof. dr hab. Antoniego Budnioka i prof. dr hab. inż. Adama Hernasa.

5.2. Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa zostałem zatrudniony na stanowiskach adiunkta i wykładowcy w Katedrze Technologii Stopów Metali i Kompozytów Politechniki Śląskiej, a po reorganizacji na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii w Instytucie Inżynierii Materiałowej, gdzie pracuję do chwili obecnej.

Moja działalność naukowa związana jest z badaniami dotyczącymi technologii powłok ochronnych, a koncentruje się na zagadnieniach związanych z kształtowaniem właściwości powłok cynkowych, stopowych na bazie cynku oraz powłok typu duplex, wpływie dodatków stopowych w procesie metalizacji, ocenie właściwości technologicznych i aspektach oddziaływań środowisk korozyjnych na powłoki ochronne.

W podejmowanych wówczas pracach naukowo – badawczych koncentrowałam się na wykorzystaniu wyników badań zrealizowanych w pracy doktorskiej oraz ich dyskusji. W ramach zagadnień związanych z kinetyką tworzenia powłok zanurzeniowych wytworzonych w kąpielach cynkowych oraz cynkowo-aluminiowych, badaniu ich właściwości technologicznych i antykorozyjnych powstały publikacje [zał. 3, poz. 25, 27, 30, 31, 36, 37, 45, 46].

Z racji tego, że problematyka antykorozyjnych powłok na bazie cynku i aluminium była w tym okresie nadal aktualna pozostała ona przedmiotem moich zainteresowań. Przeprowadzona seria badań dla powłok 55AlZn nad wpływem sposobu chłodzenia oraz wpływem dodatku Si do kąpeli metalizującej, a także powłok 55AlZn wytwarzanych metodą ciągłą zaowocowała publikacjami [zał. 3, poz. 28, 34, 39, 44, 48, 49].

Powłoki typu duplex są formą zwiększenia odporności korozyjnej elementów konstrukcyjnych na działanie środowiska korozyjnego. Prowadziłem badania właściwości technologicznych metaloorganicznych powłok typu duplex (powłoka cynkowa wytwarzana metodą ciągłą z powłoką organiczną wytwarzaną metodą nawalcowywania). Wyniki badań przedstawiono w publikacji [zał. 3, poz. 50].

W ramach prac naukowo - badawczych prowadzonych w zespole prof. Piotra Liberskiego, realizowanych w zakresie m.in. cynkowania wysokowęglowych stopów żelaza, odporności korozyjnej wysokotemperaturowych powłok cynkowych, określenia roli warstwy zewnętrznej powłoki cynkowej w ochronie stopów żelaza przed korozją, roli zjawiska rozpuszczania w procesie cynkowania powstały publikacje [zał. 3, poz. 26, 29, 30, 32, 33, 35, 41, 43, 57].

W ramach projektu badawczego PBU-78/RM-6/2005 pt. Wpływ dodatków stopowych w kąpeli na właściwości powłok cynkowych przeznaczonych dla ochrony konstrukcji stalowych dr inż. Henryka Kani, którego byłem głównym wykonawcą prowadzone były badania właściwości powłok cynkowych otrzymywanych w kąpeli cynkowej zawierającej Ni, Bi, Sn. Efektem prowadzonych badań było współautorstwo w publikacjach [zał. 3, 38, 42]. Prowadzona równocześnie praca naukowo badawcza NB-279/RM-6/2005 pt. Kinetyka wzrostu powłok oraz określenie przyczyn powstawania pęknięć ogniów łańcuchów podczas cynkowania zanurzeniowego realizowana dla FASING S.A., której byłem współautorem, były inspiracją w podjęciu wyodrębnionego tematu związanego z możliwością wystąpienia zjawiska LME w elementach przemysłowych poddanych metalizacji zanurzeniowej w kąpielach cynkowych oraz cynkowych z dodatkiem cyny.

Przeprowadzona analiza literaturowa oraz badania własne na wyrobach przemysłowych, zainicjowały koncepcję stworzenia stanowiska badawczego pozwalającego na przeprowadzenie badań modelowych nad możliwością wystąpienia zjawiska LME w wyrobach poddanych procesowi metalizacji zanurzeniowej. Opis stanowiska oraz badania wstępne zostały opisane w publikacjach

[zał. 3, poz. 47, 56, 59, 61]. Na podstawie powstałych koncepcji, zaprojektowano i wykonano takie stanowisko oraz określono metodykę badań. Wieloletnie badania pozwoliły na przedstawienie ich wyników w przedłożonej monografii.

Współpraca po doktoracie z prof. Lucjanem Swadźbą

Współpraca polegała na prowadzeniu badań strukturalnych, grawimetrycznych, korozyjnych, cyklicznego utleniania powłok oraz badań analitycznych. W ramach współpracy byłem wykonawcą w 6 projektach badawczych [zał. 3, pkt II.J, poz. 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18].

Współpraca po doktoracie z dr inż. Grzegorzem Moskałem

Współpraca polegała na przygotowaniu próbek do badań, badaniu właściwości użytkowych, badaniach korozyjnych i erozyjnych oraz pracach analitycznych. Wykorzystano moje doświadczenie z zakresu prowadzonych badań powłok adhezyjno-dyfuzyjnych typu TBC. Wynikiem współpracy było uczestnictwo w 1 projekcie badawczym [zał. 3, pkt II.J poz. 13] oraz współautorstwo w 2 publikacjach znajdujących się w bazie JCR [zał. 3, poz. 51, 52].

Współpraca po doktoracie z prof. Kazimierzem Duckim

W latach 2013÷2018 brałem aktywny udział w badaniach statutowych prowadzonych w Instytucie Inżynierii Materiałowej (wcześniej Instytucie Nauki o Materiałach) nad charakteryzacją mikrostruktury oraz właściwości technologicznych i użytkowych wybranych nadstopów żarowytrzymałych z grupy przerabianych plastycznie. Badania prowadzono na żarowytrzymałych nadstopach Fe-Ni i Ni-Fe umacnianych wydzieleniowo fazami międzymetalicznymi typu γ' - Ni₃(Al,Ti) i/lub γ'' - Ni₃Nb. Analizowano zjawiska strukturalne i przemiany fazowe występujące w badanych nadstopach w procesach przeróbki plastycznej na gorąco, obróbki cieplnej oraz eksploatacji. Wynikiem współpracy było współautorstwo w 5 publikacjach w tym 1 znajdującej się w bazie JCR [zał. 3, poz. 54, 55, 66, 67, 68].

Współpraca po doktoracie z dr inż. Joanną Przondziono

W roku 2016 prowadzona była współpraca polegająca na realizacji badań korozji drutów stosowanych w chirurgii twarzowo-szczękowej oraz kardiologii, analizie oraz interpretacji wyników. Wynikiem współpracy było współautorstwo w 2 publikacjach w tym 1 znajdującej się w bazie JCR [zał. 3, poz. 64, 65].

W okresie po doktoracie współpracowałem i/lub nadal współpracuję z przedsiębiorstwami przemysłowymi takimi jak Z.M. Silesia S.A. (producent blach cynkowych Zn(Ti,Cu)), FASING S.A. (producent łańcuchów ogólnego przeznaczenia i dla górnictwa), ArcelorMittal Poland S.A. o/ Świętochłowice (producent blach cynkowanych oraz blach z powłoką typu duplex). Współpraca z ArcelorMittal oparta jest na badaniach oraz konsultacjach w zakresie procesu technologicznego oraz jakości powłok cynkowych, ma też charakter dydaktyczny i promocyjny [zał. 3].

Mój dorobek publikacyjny obejmuje 69 (45 po doktoracie) publikacji w czasopiśmie, monografiach i materiałach konferencyjnych o zasięgu krajowym i międzynarodowym. Łączna ilość punktów obliczonych według MNiSW za dorobek naukowy po otrzymaniu stopnia doktora wynosi **442 (Tabela 1 oraz załącznik 3A)**.

Wykaz publikacji, udział w konferencjach oraz kierowanie i uczestnictwo w projektach badawczych znajduje się w załączniku 3 do wniosku natomiast zestawienie liczbowe przedstawia Tabela 1.

Problematyka naukowo - badawcza jaką realizuję w obszarze Inżynierii Materiałowej obejmuje wieloaspektowe spektrum zagadnień, głównie z obszaru badań dotyczących technologii powłok ochronnych, a koncentruje się na zagadnieniach związanych z kształtowaniem właściwości powłok cynkowych, stopowych na bazie cynku oraz powłok typu duplex, wpływie dodatków stopowych w procesie metalizacji, ocenie właściwości technologicznych i aspektach oddziaływania środowisk korozyjnych na powłoki ochronne. W badaniach stosuję nowoczesne, dostępne techniki oraz doświadczenie zdobyte w trakcie pracy naukowej.

Tabela.1. Zestawienie liczbowe publikacji i najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora

Wyszczególnienie		Liczba		
Rodzaj publikacji		Punkty MNiSW	Liczba publikacji	
Publikacje	a.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR) posiadających współczynnik Impact Factor	165	5
	b.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Web of Science z pominięciem publikacji z punktu a.	69	6
	c.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych indeksowanych w bazie SCOPUS z pominięciem publikacji z punktu a i b	70	8
	d.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach, monografiach, książkach abstraktów zagranicznych z pominięciem publikacji z punktu a, b, i c	0	-
	e.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach punktowanych MNiSW (lista B)	113	17
	f.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w pozostałych czasopismach	0	3
	g.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w monografiach krajowych	0	-
	h.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w materiałach konferencyjnych (z pominięciem publikacji z punktu e)	0	5
	i.	autorstwo lub współautorstwo monografii lub podręczników akademickich	25	1
	j.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych z udziałem studentów w zeszytach Studenckich Prac Naukowych	0	-
Patenty		0	-	
Razem publikacje i patenty		442	45	
Udział w konferencjach naukowych				
Konferencje	krajowe	18		
	międzynarodowe	3		
	zagraniczne	2		
Udział w projektach badawczych				
Kierownik projektów		1		
Projekty	KBN/MNiSW/NCN/NCBiR	18		
	BK/BW	19		
	Finansowane z UE			
	Finansowane z przemysłu	8		
Recenzje artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych JCR		15		
Recenzje artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych krajowych				
Wskaźniki oceny dorobku naukowego				
Źródło	Web of Science	Scopus	Google Scholar	
Liczba cytowań ogółem	71	153	226	
Indeks Hirscha H	4	7	9	
Liczba publikacji w bazie	12	19	47	

Opracowane publikacje naukowe ukazały się między innymi w czasopismach wymienionych w tabeli 2 tj. w czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports, wpływających na sumaryczny Impact Factor.

Tabela 2. Sumaryczny IF według Journal Citation Reports

Czasopismo według JCR	Impact Factor (wg roku publikacji)
Journal of the European Ceramic Society	2,360
Journal of the European Ceramic Society	2,360
Materials Science	0,154
Archives of Metallurgy and Materials	0,571
Archives of Metallurgy and Materials	0,571
Sumaryczny Impact Factor	6,016

Inna aktywność (szczegółowo opisana w załączniku 3A)

Odbyte staże przemysłowe

- 1983 – 4 tygodnie – Zakłady Wytwórcze Urządzeń Sygnalizacyjnych (ZWUS) Katowice, obecnie ABB,
- 1984 – 4 tygodnie – Przedsiębiorstwo Famur – Katowice,
- 1985 – 4 tygodnie – na roku 0 studiów w ramach SPR – pod opieką Hutniczego Przedsiębiorstwa Remontowego – 2 tygodnie w Hucie Łabędy i 2 tygodnie Hucie Zygmunt
- 1988 – 4 tygodnie (odpłatny) – Huta Jedność w Siemianowicach Śl. (Wydział Innocenti i Mannesman)

Udziały/recenzje/członkostwo/ekspertyzy/funkcje:

- udział w realizacji 18 projektów badawczych jako kierownik lub wykonawca (zał. 3 II.J),
- udział w realizacji 19 prac w ramach Badań Statutowych BK/BW w Katedrze a obecnie w Instytucie Inżynierii Materiałowej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej (zał. 3 II.J),
- recenzent publikacji naukowych w czasopismach takich jak: Solid State Phenomena (13 recenzji), Metallurgical and Materials Transactions A (1 recenzja), Surface and Coating Technology (1 recenzja) (zał. 5),
- członek Komitetów Organizacyjnych Konferencji (5 konferencji) (zał. 3),
- członkostwo w organizacjach i towarzystwach 3 (zał.3),
- ekspertyzy i opracowania – 1 (zał. 3),
- pełnomocnik Dziekana ds. Zdalnej Edukacji na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Materiałowej (2 kadencje do nadal) (zał. 3),
- członek Rady Programowej Centrum Zdalnej Edukacji Politechniki Śląskiej (2 kadencje do nadal) (zał. 3),

Działalność organizacyjna prowadzona na Wydziale

- sekretarz Wydziałowej Komisji ds. Egzaminu Dyplomowego
- członek Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej
- członek Wydziałowej Komisji ds. Planów
- członek Zespołu ds. Promocji Wydziału
- członek Wydziałowej Komisji ds. SZJK
- członek Zespołu ds. Współpracy ze Szkołami Ponadgimnazjalnymi

Działalność dydaktyczna

a. Prowadzone przedmioty w swoim wieloletnim doświadczeniu

Przedmioty technologiczne:

- Inżynieria powierzchni,
- Korozja i powłoki ochronne,
- Metalizacja zanurzeniowa,
- Moduł – Technologie metali,
- Procesy i techniki produkcyjne,
- Technologie procesów materiałowych,
- Technologia warstwy wierzchniej,
- Trwałość i niszczenie materiałów,
- Wybrane zagadnienia zużycia korozyjnego,

Przedmioty inżynierskie:

- Ekonometria,
- Logistyka w przedsiębiorstwie,
- Moduł Matematyka – Badania operacyjne,
- Technologie informacyjne,
- Zaawansowane obliczenia inżynierskie

W ramach zajęć dydaktycznych – laboratoryjnych o charakterze technologicznym prowadzę ćwiczenia związane z kształtowaniem właściwości powłok cynkowych, stopowych na bazie cynku i aluminium, powłok typu duplex oraz powłok lakierniczych, wpływie dodatków stopowych w procesie metalizacji, ocenie właściwości technologicznych i aspektach oddziaływań środowisk korozyjnych na powłoki ochronne.

Obsługuję urządzenia do procesu przygotowania powierzchni przed nakładaniem powłok oraz piece do metalizacji zanurzeniowej. Obsługuję aparaturę do zanurzeniowego wytwarzania powłok oraz aparaturę badawczą wykorzystywaną do charakteryzowania otrzymanych powłok:

- urządzenie do pomiaru chropowatości powierzchni,
- urządzenie Calotest do pomiaru grubości powłok,
- mikroskop świetlny z cyfrową analizą i rejestracją obrazu,
- urządzenia do oceny właściwości technologicznych powłok,
- komorę solną do oceny odporności korozyjnej w obojętnej mgłę solnej (NSS),
- komorę Koesternicha do oceny odporności korozyjnej w związkach siarki.
- piece do obróbek cieplnych i cieplno-chemicznych

W ramach zajęć dydaktycznych – o charakterze inżynierskim prowadzę ćwiczenia związane z obliczeniami inżynierskimi oraz ćwiczenia operacyjne związane z podejmowaniem w inżynierii materiałowej decyzji optymalnych w warunkach pewności i niepewności.

b. Przygotowanie i prowadzenie nowych wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotów:

Lata 2004-2008

- Trwałość materiałów – 8 sem. ETI – lab. (30 h)
- Ekonometria – 4 sem. ZIP(T) – ćw. (15 h)
- Obróbka wykończeniowa odlewów – 8 sem. ZIP – lab. (15 h)
- Procesy i techniki produkcyjne – 4 sem. ZIP – lab (30 h)

Lata 2008-2010

- Technologie informacyjne – 1 sem. IM – lab. (15 h)
- Technologie informacyjne – 1 sem. IP – lab. (15 h)
- Procesy i techniki produkcyjne – 7 sem. ZIP – proj. (15 h)

Lata 2011-2013

- Technologie procesów materiałowych – 5 sem. IP – lab. (10 h)
- Procesy i techniki produkcyjne – 7 sem. ZIP – proj. (10 h)

Lata 2014-2015

- Moduł Matematyka – Badania operacyjne – 4 sem. ZIP – w. (10 h), ćw. (10 h)
- Zaawansowane obliczenia inżynierskie – 1L sem. sIIK IM – ćw. (15 h)

6. Osiągnięcia zgodnie z wymogami Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165)

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	TAK	5
Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	TAK	1
Udzielone patenty, zgłoszenia patentowe międzynarodowe i krajowe	NIE	0
Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych	TAK	1
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	TAK	1
Materiały konferencyjne	TAK	5
Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR)	6,016	
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	71	
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	4	
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	TAK	16
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową lub artystyczną	TAK	2
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach / Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	TAK	18/23
Udział w komitetach naukowych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	NIE	0
Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	TAK	5
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	TAK	2
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	TAK	3
Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami	NIE	0
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	TAK	5
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	TAK	2
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki Przygotowanie materiałów dydaktycznych, zajęć laboratoryjnych, projektowych	TAK	11
Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	TAK	42
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	NIE	0
Staż w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich i przemysłowych	TAK	4
Wykonanie ekspertyzy lub innego opracowania na zamówienie	TAK	1
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	NIE	0
Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	NIE	0
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	TAK	15