

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Instytut Inżynierii Materiałowej

Autoreferat

Załącznik nr 3 do wniosku o przeprowadzenie postępowania
habilitacyjnego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych
w dyscyplinie inżynieria materiałowa

dr inż. Aneta Bartkowska

Poznań 2021

Spis treści

1. Dane personalne.....	3
2. Dyplomy i stopnie naukowe.....	4
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	5
4. Omówienie osiągnięć stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego.....	6
4.1. Tytuł oraz publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.....	6
4.2. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników.....	9
4.2.1. Wprowadzenie.....	9
4.2.2. Cel naukowy.....	10
4.2.3. Szczegółowe omówienie prowadzonych badań i osiągniętych wyników.....	11
4.2.4. Podsumowanie.....	32
4.2.5. Dalsze plany naukowe.....	33
4.2.6. Literatura.....	33
5. Informacje o wykazaniu się istotną aktywnością naukową.....	35
6. Informacje o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.....	39
6.1. Dorobek dydaktyczny.....	39
6.2. Dorobek organizacyjny.....	49
6.3. Popularyzacja nauki.....	50

1. Dane personalne

Imię i nazwisko: Aneta BARTKOWSKA

Miejsce pracy: Instytut Inżynierii Materiałowej,
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej
Politechnika Poznańska
adres: ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
adres korespondencyjny: ul. Jana Pawła II nr 24, 61-138 Poznań

Stanowisko: adiunkt

Nr ORCID: 0000-0002-4081-9358

Data i miejsce urodzenia: 

Telefon kontaktowy: 

adres e-mail: aneta.bartkowska@put.poznan.pl

2. Dyplomy i stopnie naukowe

07.06.2013 r.

Doktor nauk technicznych w zakresie **inżynieria materiałowa**, uchwałą Rady Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej

Tytuł rozprawy doktorskiej:

„Wpływ wybranych pierwiastków oraz obróbki laserowej na strukturę i właściwości warstwy borowanej wytwarzanej na stali konstrukcyjnej”

Promotor:

dr hab. inż. Aleksandra Pertek-Owsianna, prof. PP
(Politechnika Poznańska)

Recenzenci:

dr hab. Ewa Kasprzycka, prof. nadzw. PW
(Politechnika Warszawska)

dr hab. inż. Andrzej Młynarczak, prof. PP
(Politechnika Poznańska)

24.06.2008 r.

magister inżynier, studia na kierunku **inżynieria materiałowa**, w zakresie materiałów metalowych i tworzyw sztucznych; Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania,

Tytuł pracy dyplomowej:

„Mikrostruktura i właściwości warstw boroazotowanych”

Promotor:

dr hab. inż. Aleksandra Pertek-Owsianna

Studia Podyplomowe:

2014

„Podstawy rzeczoznawstwa w technice samochodowej”
Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu;
świadectwo nr 11821, wydane dn. 26.08.2014 r.

2013

„Menedżer projektu badawczo-rozwojowego”
Wyższa Szkoła Bankowa w Poznaniu;
świadectwo nr 23635, wydane dn. 06.07.2013 r.

2010 „Kompetencje edukacyjne w obszarze przedmiotów
politechnicznych“
Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania;
świadectwo nr 8799, wydane dn. 16.03.2011 r.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01.01.2020 – obecnie **adiunkt**
Politechnika Poznańska,
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej,
Instytut Inżynierii Materiałowej

01.10.2015 – 31.12.2019 **adiunkt**
Politechnika Poznańska,
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania,
Instytut Inżynierii Materiałowej

01.03.2011 – 30.09.2015 **asystent**
Politechnika Poznańska,
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania,
Instytut Inżynierii Materiałowej

18.10.2008 – 17.09.2012 **doktorant**
Politechnika Poznańska,
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania,
Instytut Inżynierii Materiałowej

4. Omówienie osiągnięć stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

4.1. Tytuł oraz publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) jest jednotematyczny cykl 14 artykułów naukowych, zatytułowany:

„Mikrostruktura i właściwości laserowo modyfikowanych warstw powierzchniowych zawierających borki metali wytwarzanych na stalach oraz superstopach”

Cykl 14 publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego [A1-A14] obejmuje 2 oryginały autorskie artykuły opublikowane w czasopismach z listy JCR posiadające współczynnik wpływu Impact Factor, 9 oryginalnych współautorskich artykułów opublikowanych w czasopismach z listy JCR posiadających współczynnik wpływu Impact Factor oraz 3 oryginalne artykuły współautorskie opublikowane w czasopismach bez współczynnika wpływu Impact Factor.

Ze względu na zastosowane i opisane techniki wytwarzania warstw powierzchniowych zawierających borki metali publikacje podzielono na 2 grupy zawierające artykuły dotyczące:

1. Wytwarzania warstw powierzchniowych zawierających borki metali na drodze obróbki hybrydowej.
2. Wytwarzania warstw powierzchniowych zawierających borki metali na drodze laserowego stopowania powierzchni przy znaczącym udziale boru w materiale stopującym.

1. Wytwarzanie warstw powierzchniowych zawierających borki metali na drodze obróbki hybrydowej

[A1] Bartkowska A.*, Swadźba R., Popławski M., Bartkowski D.: Microstructure, microhardness, phase analysis and chemical composition of laser remelted FeB-Fe₂B surface layers produced on Vanadis-6 steel. Optics & Laser Technology 86 (2016) 115 - 125, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.010>

IF = 2.109; 30 pkt. MNiSW – 2016

[A2] Bartkowska A.*, Bartkowski D., Swadźba R., Przestacki D., Miklaszewski A.: Microstructure, chemical composition, wear, and corrosion resistance of FeB-Fe₂B-Fe₃B surface layers produced on Vanadis-6 steel using CO₂ laser. International Journal

of Advanced Manufacturing Technology 95 (2018) 1763 - 1776, DOI: 10.1007/s00170-017-1304-z

IF = 2.496; 30 pkt. MNiSW – 2018

- [A3] **Bartkowska A.***, Jurči P., Hudáková M., Bartkowski D., Kusý M., Przestacki D.: The Influence of the Laser Beam Fluence on Change in Microstructure, Microhardness and Phase Composition of FeB-Fe₂B Surface Layers Produced on Vanadis-6 Steel. Archives of Metallurgy and Materials 63 (2) (2018) 791-800, DOI: 10.24425/122405

IF = 0.697; 30 pkt. MNiSW – 2018

- [A4] **Bartkowska A.***: Production and Properties of FeB-Fe₂B-Fe₃(B,C) Surface Layers Formed on Tool Steel Using Combination of Diffusion and Laser Processing. Coatings 10 (11) (2020) 1130-1 - 1130-15, DOI: 10.3390/coatings10111130

IF = 2.881; 100 pkt. MNiSW – 2020

- [A5] **Bartkowska A.***, Bartkowski D., Przestacki D., Hajkowski J., Miklaszewski, A.: Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatigs formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. Coatings 11 (5) (2021) 608-1 - 608-19, DOI: 10.3390/coatings11050608

IF = 2.881; 100 pkt. MEiN – 2021

2. Wytwarzanie warstw powierzchniowych zawierających borki metali na drodze laserowego stopowania powierzchni przy znaczącym udziale boru w materiale stopującym

- [A6] **Bartkowska A.***, Pertek-Owsianna A., Bartkowski D.: Odporność korozyjna stali C45 po borowaniu dyfuzyjnym i laserowym. Inżynieria Materiałowa Materials Engineering 204 (2) (2015) 78 - 81, DOI: 10.15199/28.2015.2.6

IF = 0; 13 pkt. MNiSW – 2015

- [A7] **Bartkowska A.***, Pertek-Owsianna A., Popławski M., Bartkowski D.: Zastosowanie boru i miedzi do laserowej modyfikacji powierzchni stali C45. Inżynieria Materiałowa Materials Engineering 207 (5) (2015) 276 - 280, DOI: 10.15199/28.2015.5.16

IF = 0; 13 pkt. MNiSW – 2015

- [A8] **Bartkowska A.***, Popławski M., Kinal G., Przestacki D.: Laser alloying of Vanadis-6 steel by using powders containing boron and tungsten. Inżynieria Materiałowa Materials Engineering 216 (2) (2017) 93 - 97, DOI: 10.15199/28.2017.2.6

IF = 0; 13 pkt. MNiSW – 2017

- [A9] Bartkowski D., **Bartkowska A.**, Popławski M., Przestacki D.: Microstructure, Microhardness, Corrosion and Wear Resistance of B, Si and B-Si Coatings Produced on

C45 Steel Using Laser Processing. Metals 10 (6) (2020) 792-1 - 792-17, DOI: 10.3390/met10060792

IF = 2.351; 70 pkt MNiSW – 2020

[A10] **Bartkowska A.***, Bartkowski D., Popławski M., Piasecki A., Przestacki D., Miklaszewski A.: Microstructure, Microhardness, Corrosion Resistance and Chemical Composition of Mo, B and Mo-B Coatings Produced Using Laser Processing. Materials 13 (15) (2020) 3249-1 - 3249-17, DOI: 10.3390/ma13153249

IF = 3.623; 140pkt MNiSW – 2020

[A11] **Bartkowska A.***: Characteristic of Cr-B coatings produced on Vanadis® 6 tool steel using laser processing. Materials 14 (10) (2021) 2621-1 - 2621-22, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14102621>

IF = 3.623; 140 pkt. MEiN – 2021

[A12] Kukliński M., **Bartkowska A.**, Przestacki D.: Microstructure and selected properties of Monel 400 alloy after laser heat treatment and laser boriding using diode laser. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98 (2018) 3005 - 3017, DOI: 10.1007/s00170-018-2343-9

IF = 2.496; 30 pkt. MNiSW – 2018

[A13] Kukliński M., **Bartkowska A.**, Przestacki D.: Laser alloying Monel 400 with amorphous boron to obtain hard coatings. Materials 12 (21) (2019) 3494-1 - 3494-14, DOI: 10.3390/ma12213494

IF = 3.057; 140 pkt. MNiSW – 2019

[A14] Kukliński M., **Bartkowska A.**, Przestacki D., Kinal G.: Influence of microstructure and chemical composition on microhardness and wear properties of laser borided Monel 400. Materials 13 (13) (2020) 5757-1 - 5757-15, DOI: 10.3390/ma13245757

IF = 3.623; 140 pkt. MNiSW – 2020

Legenda:

* - autor korespondencyjny

MNiSW - Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

MEiN - Ministerstwo Edukacji i Nauki

Podsumowanie punktacji publikacji wchodzących w skład osiągnięcia:

Sumaryczna wartość współczynnika Impact Factor wg. Journal Citation Reports z cyklu 14 publikacji zgodny z latami publikacji	29,837
Sumaryczna wartość punktacji MNiSW (z cyklu 14 publikacji zgodny z latami publikacji)	989
do 2018 r.:	159
od 2019 r.:	830

4.2. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników

4.2.1. Wprowadzenie

Na przestrzeni ostatnich lat zainteresowanie metodami modyfikacji powierzchni ciągle wzrasta. Jest to związane z dążeniem do stosowania materiałów, których powierzchnia charakteryzuje się znacznie lepszymi lub po prostu innymi właściwościami, niż podłoże. Inżynieria powierzchni rozwija się intensywnie w takich gałęziach przemysłu, jak motoryzacja, budowa maszyn i urządzeń, elektronika czy w przemyśle wydobywczym ropy i gazu. Ze względu na możliwość uzyskania nowych i unikalnych właściwości powierzchni w sposób szczególnie rozwojowe są metody modyfikacji materiałów wykorzystujące wiązkę promieniowania laserowego [1-5].

Istnieje kilka dobrze rozpoznanych i masowo stosowanych procesów modyfikacji powierzchni materiałów. Są to przede wszystkim procesy dyfuzyjne, które odgrywają bardzo ważną rolę w przemyśle. Najbardziej znane z nich to nawęglanie, azotowanie czy kombinacja tych dwóch metod. Warstwy powierzchniowe wytwarzane na drodze tych procesów uzyskują zwiększoną twardość oraz odporność na zużycie przez tarcie. Procesem, który pozwala uzyskać równie dobre, a często lepsze właściwości jest proces borowania dyfuzyjnego. Nie znalazł on jednak szerszego zastosowania przemysłowego. Faktem jest, że kilka dużych firm na świecie zajmuje się procesem borowania głównie metodą gazowo-kontaktową, jednak nie jest to powszechnie wytwarzana warstwa na częściach maszyn czy narzędziach. Główną przyczyną są trudności w doborze warunków i parametrów wytwarzania [6-11]. Problemy te prowadzą do wad powierzchni takich jak kruchość czy pogorszenie odporności na zużycie przez tarcie. Odpowiednie kształtowanie mikrostruktury może przyczynić się do zmniejszenia lub całkowitego usunięcia tych wad. Warstwa borowana, wytwarzana na stopach żelaza, zbudowana jest z dwóch rodzajów borków żelaza FeB oraz Fe₂B. Borek żelaza FeB znajduje się przy powierzchni. Zawiera on więcej boru, co przyczynia się do jego większej twardości. To właśnie ze względu na twardość osiągającą wartość 1800 HV może dochodzić do łuszczenia oraz kruchości w obszarze jego występowania. Borek Fe₂B z kolei znajduje się bliżej podłoża i charakteryzuje się mniejszą twardością, a naprężenia występujące w tej części warstwy są bardziej korzystne. W najczęściej uzyskiwanych warstwach, tj. takich, które wytwarza się metodą borowania gazowo-kontaktową (proszkową), obserwuje się strukturę dwufazową. Wytworzenie warstw jednofazowych zawierających tylko borek żelaza Fe₂B jest bardziej korzystne. Można uzyskać takie warstwy stosując proces borowania w ośrodkach gazowych. Najczęściej w warunkach laboratoryjnych borowanie gazowe prowadzi się w atmosferze gazów boronośnych BCl₃, BF₃ i B₂H₆ [7, 12]. Gazy te przed wprowadzaniem do komory roboczej pieca są rozcieńczane wodorem który zmniejsza szybkość ich rozkładu [8]. Aby poprawić warunki bezpieczeństwa wodór został zastąpiony bardziej bezpieczną mieszkanką azotowo-wodorową [7, 12]. Na obecną chwilę procesy borowania gazowego są raczej mało stosowaną praktyką przemysłową.

Innym sposobem zmniejszenia negatywnych skutków wytwarzania dwufazowej warstwy borowanej jest połączenie jednoczesnego lub następującego po sobie nasycania dyfuzyjnego z udziałem boru i dodatkowego pierwiastka [12-15]. Znane są także metody wykorzystujące obróbkę plazmową [16] czy obróbkę galwaniczną [17]. Procesy te są

stosunkowo wysokoenergetyczne i czasochłonne jednak przyczyniają się do uzyskania dobrych właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych. Większość opublikowanych prac badawczych dotyczyła procesów technologicznych wykonywanych na stalach nisko- i średniowęglowych.

Udoskonalenie procesu borowania, a co za tym idzie zwiększenie możliwości aplikacyjnych można osiągnąć poprzez zastosowanie metod fizycznych [7, 9]. Głównymi kierunkami rozwoju procesów borowania są technologie wykorzystujące wiązkę lasera. To wysokoenergetyczne źródło energii można wykorzystać zarówno do modyfikacji uprzednio wytworzonej warstwy borowanej dyfuzyjnie (laserowe przetapianie) [17-20] jak i do stopowania powierzchni borem poprzez przetapianie materiału stopującego w postaci wstępnie nałożonej powłoki z borem, np. pasty zawierającej bor, z podłożem (t.zw. borowanie laserowe) [21-23]. Jedna i druga metoda laserowej modyfikacji powierzchni prowadzi do otrzymania warstwy wzbogaconej w bor, co zazwyczaj skutkuje występowaniem w niej borków metali oraz zapewnia nowe i unikalne jej właściwości. Przyczyny podjęcia tej tematyki badawczej to szerokie zastosowanie stali i nadstopów w przemyśle oraz zapotrzebowanie na zwiększenie właściwości mechanicznych w warstwie przypowierzchniowej tych materiałów. Dociekliwość naukowa zawsze prowadzi do nowych odkryć, dlatego ciągle rozwijanie oraz opracowywanie zarówno technik eksperymentalnych jak i technologii wytwarzania jest niezwykle ważne i niesie za sobą ogromne walory poznawcze.

4.2.2. Cel naukowy

Głównym celem naukowym badań było opracowanie nowych metod obróbki powierzchniowej z wykorzystaniem wiązki lasera. Wiązką laserową modyfikowano warstwy dyfuzyjne oraz przeprowadzano procesy laserowego stopowania, w których podstawowym materiałem stopującym był bor. Zastosowane metody miały skutkować poprawą właściwości fizykochemicznych, mechanicznych i użytkowych warstwy wierzchniej. Zakres realizowanych prac obejmował szereg badań materiałowych oraz porównanie uzyskanych właściwości wytworzonych warstw powierzchniowych w odniesieniu do tradycyjnych metod i technik inżynierii powierzchni. Niniejsze opracowanie wskazuje na unikatowość stosowanych metod wytwarzania warstw powierzchniowych.

W ramach podjętych badań zastosowano nowoczesne metody badawcze. Wykonane badania i osiągnięte wyniki są oryginalne i unikatowe w skali międzynarodowej, co potwierdza obszerna analiza literaturowa przeprowadzona dla monotematycznego cyklu prac będącego podstawą opisanego osiągnięcia.

Celem podjętych badań było:

- opracowanie metod laserowej modyfikacji powierzchni badanych materiałów z zastosowaniem obróbki hybrydowej oraz laserowego stopowania ze znaczącym udziałem boru w materiale stopującym oraz dobór parametrów tych procesów w celu otrzymania na stalach i superstopach warstw powierzchniowych charakteryzujących się korzystnymi właściwościami,
- określenie zależności między składem chemicznym i fazowym wytworzonych warstw powierzchniowych zawierających borki metali oraz ich właściwościami użytkowymi,

- zwiększenie twardości oraz odporności na zużycie przez tarcie warstw przy ich zadowalającej odporności na korozję.

W związku z powyższym zastosowano dwie techniki modyfikacji warstw powierzchniowych:

1. ***Wytwarzanie warstw powierzchniowych zawierających borki metali na drodze obróbki hybrydowej*** – metoda ta polega na modyfikacji istniejącej warstwy dyfuzyjnej w wyniku oddziaływania wiązki lasera. W ramach prowadzonych badań, **metoda ta została zastosowana po raz pierwszy do wytwarzania warstw powierzchniowych na narzędziowych stalach proszkowych (Vanadis)**. Efekty zastosowania **obróbki hybrydowej** polegającej na przetopieniu warstwy borowanej dyfuzyjnie na stalach narzędziowych zostały opisane we współautorskich publikacjach [A1-A3, A5] oraz autorskiej publikacji [A4].
2. ***Wytwarzanie warstw powierzchniowych zawierających borki metali na drodze laserowego stopowania powierzchni przy znaczącym udziale boru w materiale stopującym*** – metoda ta polega na laserowym stopowaniu warstwy wierzchniej materiału przy użyciu samego boru lub mieszaniny boru i dodatkowego pierwiastka [A6 - A14]. **Metoda ta została po raz pierwszy zastosowana do modyfikacji powierzchni proszkowej stali narzędziowej**, a efekty tych badań opisano we współautorskiej publikacji [A8] oraz autorskiej publikacji [A11]. **Nowością jest również modyfikacja nadstopu Monel przy zastosowaniu lasera diodowego**. Efekty tych prac opisano we współautorskich publikacjach [A12-A14].

Podczas zastosowania każdej z wymienionych technik modyfikacji warstwy wierzchniej, bor był mieszany z materiałem podłoża, dzięki czemu można było uzyskać **kompozytowe warstwy borków metali w osnowie metalicznej, zapewniające** drobnokrystaliczną mikrostrukturę o nowych właściwościach nieosiągalnych stosowanymi do tej pory metodami.

4.2.3. Szczegółowe omówienie prowadzonych badań i osiągniętych wyników

Proces borowania dyfuzyjnego jest tematem wielu publikacji naukowych, co jest związane z charakterystycznymi cechami warstwy wytworzonej w czasie tego procesu. Jest to przede wszystkim bardzo duża twardość osiągająca wartość do ok. 1800 HV, ale także dobra odporność na zużycie przez tarcie czy dobra odporność na korozję [7-9]. Rozpatrując warstwę borowaną w aspekcie jej zastosowań przemysłowych, niestety nie można znaleźć wielu informacji. Chociaż istnieją na świecie firmy, które oferują borowanie dyfuzyjne (metodą proszkową), to jednak warstwy te nie są powszechnie stosowane [24, 25]. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest stosunkowo duża kruchość warstwy borowanej w strefie przypowierzchniowej, która może objawiać się odpryskiwaniem i łuszczeniem od podłoża. Stan powierzchni, na którym zidentyfikowane są tego typu wady może mieć wpływ na dyskwalifikowanie zastosowania warstw borowanych do wytwarzania precyzyjnych narzędzi i części maszyn narażonych na duże naciski powierzchniowe. W związku z tym poszukuje się metod modyfikacji dyfuzyjnie wytwarzanej warstwy borowanej lub nowych metod polegających na wprowadzeniu boru do powierzchni materiału podłoża. Na przestrzeni lat prowadzone były badania naukowe, które skupiały się na modyfikacji wytworzonej warstwy borowanej za pomocą wiązki lasera. Proces był zatem dwuetapowy. W pierwszym etapie

wykonywano borowanie dyfuzyjne wraz z obróbką cieplną, natomiast w drugim etapie przetopienie takiej warstwy powierzchniowej wiązką laserową. Istnieją doniesienia literaturowe, w których takie zestawienie obróbek powierzchniowych jest określane jako korzystnie wpływające na uzyskiwane właściwości. Należy jednak mieć na uwadze, że przedstawiane wyniki dotyczyły głównie stali nisko- i średnio-węglowych [6-9, 14-16].

Prowadzone przeze mnie badania naukowe, które wchodzą w skład jednotematycznego cyklu artykułów naukowych w pierwszej kolejności skupiały się na laserowej modyfikacji stali. Badania dotyczyły zarówno stali niestopowej (C45 i CT90) jak i stopowej (Vanadis 6), które mają szerokie zastosowanie w przemyśle. W celu modyfikacji powierzchni tych materiałów, zastosowałam dwa rodzaje laserów technologicznych tj. molekularny laser CO₂ oraz laser diodowy.

Na podstawie przeprowadzonej przeze mnie analizy literatury można było stwierdzić, że najczęściej stosowanym podłożem poddawanym procesowi borowania i jej laserowej modyfikacji (przetapianie laserowe warstwy borowanej lub borowanie laserowe wstępnie nałożonej powłoki boru) była stal średniowęglowa. Prace związane z borowaniem takich stali publikowane były między innymi przez Safonova (borowanie laserowe) [22], Morimoto (borowanie laserowe) [23], Pertek i Kulę (przetapianie warstwy borowanej) [18]. Część z tych prac, mniej lub bardziej szczegółowo opisuje zalety i wady procesu modyfikacji warstwy zawierającej bor z udziałem wiązki lasera względem borowania dyfuzyjnego [18].

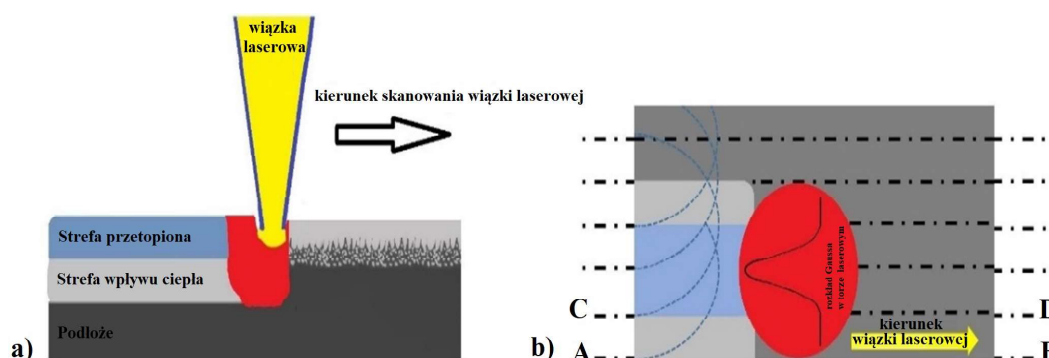
W związku z chęcią poznania wpływu boru wprowadzanego dyfuzyjnie i laserowo na właściwości modyfikowanego podłoża, początkowe badania związane z wytwarzaniem warstw borowanych prowadziłam na stali średniowęglowej.

Uzyskane wyniki badań dotyczące kształtowania mikrostruktury i właściwości warstw borowanych dyfuzyjnie i laserowo na stali średniowęglowej oraz dalsza analiza literatury zainspirowały mnie do prowadzenia badań związanych z zastosowaniem różnych metod borowania w celu uszlachetniania warstwy wierzchniej stali narzędziowych.

W mojej pracy naukowej zajmowałam się porównaniem metod borowania dyfuzyjnego, modyfikacją laserową (obróbka hybrydowa) oraz laserowym stopowaniem powierzchni stopów metali przy udziale boru (laserowe borowanie). Wyniki tych badań oraz dalsza analiza literatury przyczyniły się do ukierunkowania moich zainteresowań naukowych na borowanie stali narzędziowych oraz superstopów, a głównymi celami tych badań było opracowanie metod wytwarzania warstw zawierających borki oraz określenie wpływu zastosowanych metod i parametrów na właściwości uzyskanych warstw powierzchniowych. Badania obejmowały wytworzenie warstwy borowanej dyfuzyjnie na proszkowej stali narzędziowej Vanadis® 6 przy użyciu mieszaniny borującej EKabor® i Durborid® [A1, A2, A3]. Do tej pory nie prowadzono badań dotyczących laserowej modyfikacji warstwy borowanej na proszkowej stali Vanadis, a ilość doniesień literaturowych o warstwie borowanej dyfuzyjnie na tego typu stali jest bardzo ograniczona. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń badawczych dobrałam parametry borowania dyfuzyjnego. Procesy te prowadzono w zakresie od 900°C [A1, A2] do 1030°C [A3] w czasie od 45 min [A3] do 5 h [A1, A2] w zależności od zastosowanej metody nasycania dyfuzyjnego. W celu scharakteryzowania warstw borowanych zastosowano między innymi mikroanalizę WDS wykorzystującą pomiar długości fali promieniowania rentgenowskiego. Na podstawie uzyskanych wyników oraz przy pomocy dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) stwierdzono

obecność dwóch faz borków żelaza FeB i Fe_2B wytworzonych na stali Vanadis® 6. Mikrotwardość tych faz mieściła się w zakresie od 1800 do 1400 HV.

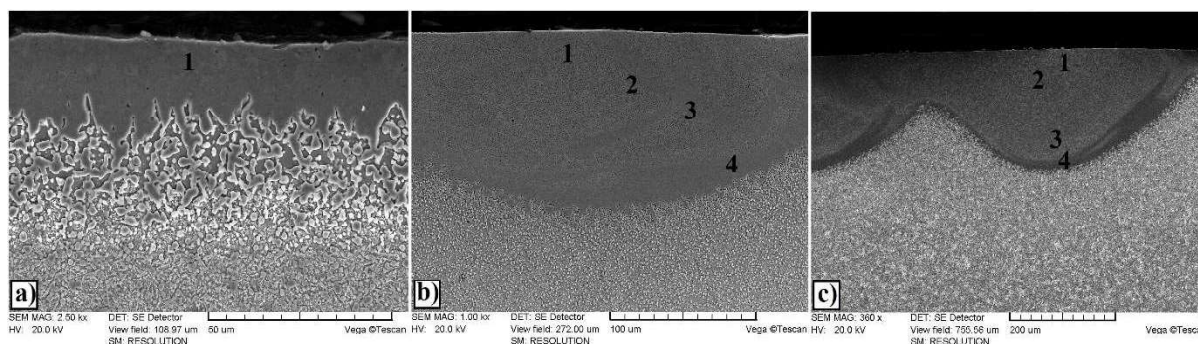
Problemem jaki towarzyszy wytwarzaniu i eksploatacji warstw borowanych dyfuzyjnie jest duża kruchość, która może prowadzić do powstawania odprysków oraz łuszczenia się warstwy od podłoża. Istnieją publikacje naukowe wskazujące na to, że warstwy borowane dyfuzyjnie o budowie jednofazowej, a dokładniej takie, które są zbudowane tylko z fazy borków Fe_2B mają mniejszą podatność na kruchość [8, 9]. Zmniejszenie kruchości można także uzyskać poprzez modyfikowanie warstwy dyfuzyjnej dodatkowymi pierwiastkami chemicznymi, najczęściej wprowadzanymi na drodze procesów dyfuzyjnych [14, 15]. Jednym z możliwych wariantów zmniejszania negatywnych skutków procesu dyfuzyjnego, który powoduje powstanie niekorzystnej fazy FeB , jest modyfikacja tych warstw przy użyciu wiązki lasera. Proces ten zmienia mikrostrukturę warstwy w strefie przypowierzchniowej i prowadzi do ograniczenia lub całkowitego wyeliminowania pęknięć w strefie przypowierzchniowej. Na rysunku 1 przedstawiono schemat stosowanej obróbki hybrydowej polegającej na przetopieniu wiązką lasera uprzednio wytworzonej warstwy borowanej.



Rys.1. Schemat procesu laserowej obróbki cieplnej: a) oddziaływanie wiązki lasera na strukturę warstwy borowanej dyfuzyjnie, b) przemieszczanie się wiązki lasera na powierzchni obrabianej [A2]

Kontynuowałam zatem badania w zakresie modyfikacji warstw borowanych wiązką lasera. Do przeprowadzenia obróbki hybrydowej zastosowałam molekularny laser technologiczny CO_2 . Celem tych badań była analiza mikrostruktury, składu fazowego i chemicznego, mikrotwardości, a także odporności na zużycie przez tarcie czy odporności korozyjnej [A1, A2]. W wyniku oddziaływania wysokoenergetycznego źródła energii jakim jest laser, warstwa borowana dyfuzyjnie uległa przetopieniu, a w mikrostrukturze próbki można było wyróżnić strefę przetopienia (przy powierzchni), strefę wpływu ciepła oraz podłoże stalowe, które nie uległo zmianom. Mikrostruktura strefy przetopionej składała się z eutektyki borkowo-martenzytycznej, której udział zależał od zastosowanych parametrów obróbki laserowej. W strefie tej wykryto fazy równowagowe borków żelaza (FeB i Fe_2B), jak i nierównowagowe fazy Fe_3B , $\text{B}_{0.7}\text{C}_{0.3}\text{Fe}_3$. Zidentyfikowano także obecność węglików pochodzących od podłoża (Cr_7C_3 i Cr_{23}C_6). Przeprowadzono badania składu chemicznego metodą WDS, które potwierdziły obecność oraz wskazały zawartość boru odpowiadającą wykrytym fazom (Rys. 2, Tabela 1).

Jako pierwsza zastosowałam metodę WDS do analizy składu chemicznego warstw borowanych dyfuzyjnie i modyfikowanych wiązką lasera na tego typu stali (obróbka hybrydowa), co było ważne dla rozwoju dyscypliny inżyniera materiałowa.



Rys. 2. Mikrostruktura warstwy na stali Vanadis-6: a) borowanej dyfuzyjnie, b) borowanej dyfuzyjnie po laserowym przetapieniu $P = 1.04 \text{ kW}$ $v = 4,48 \text{ m/min}$, c) borowanej dyfuzyjnie po laserowym przetapieniu $P = 1.04 \text{ kW}$ $v = 2,88 \text{ m/min}$ [A1]

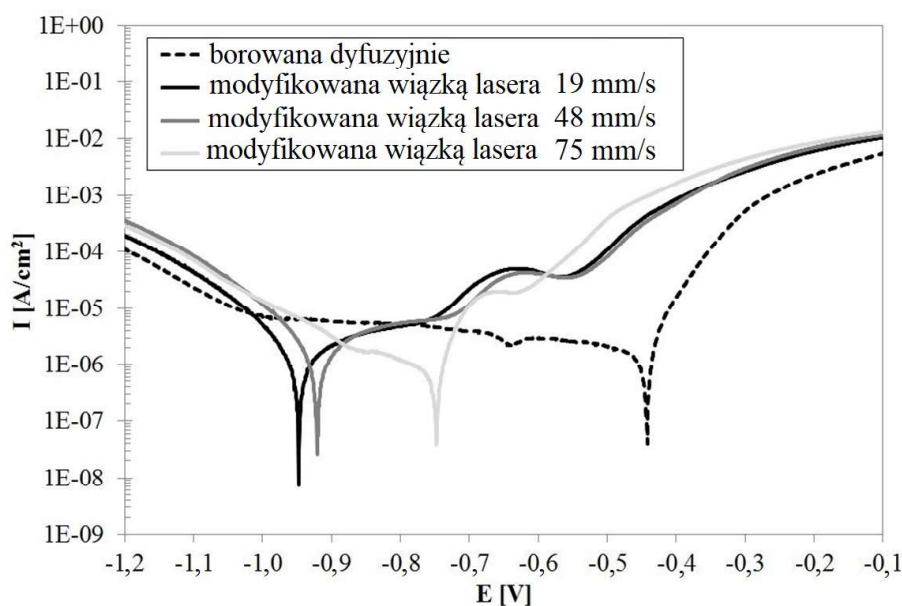
Tabela 1. Skład chemiczny (WDS) warstwy borowanej (B) i warstw borowanych modyfikowanych laserowo (LOC – Laserowa Obróbka Ciepła) w mikroobszarach zaznaczonych na rysunku 2 [A1]

Nazwa procesu	Miejsce pomiaru	B	Si	Mo	V	Cr	Mn	Fe
		[% wag.]						
B	1	15,2	-	-	-	-	-	84,8
B & LOC; LOC: $P = 1,04 \text{ kW}$, $v = 4,48 \text{ m/min}$	1	14,8	-	2,0	7,2	6,1	0,5	69,4
	2	12,9	-	2,2	7,5	6,7	0,6	70,2
	3	6,9	0,1	2,2	6,7	5,9	0,5	77,7
	4	1,6	0,1	2,7	7,4	8,0	0,7	79,6
B & LOC; LOC: $P = 1,04 \text{ kW}$, $v = 2,88 \text{ m/min}$	1	5,6	0,1	2,4	8,0	6,8	0,5	76,7
	2	7,0	0,1	2,3	8,8	6,7	0,5	74,7
	3	6,2	0,1	2,2	8,0	6,8	0,6	76,1
	4	1,0	0,1	2,0	6,7	6,4	0,6	83,3

W pracy wykazano istotny wpływ zastosowanych parametrów obróbki laserowej na mikrostrukturę wytwarzanych warstw powierzchniowych, a co za tym idzie na uzyskane właściwości. Przykładowo duża prędkość skanowania wiązką lasera ($4,48 \text{ m/min}$), ze względu na krótki czas oddziaływania ciepła na materiał, przyczyniła się do otrzymania niewielkiego przetopienia, którego grubość była zbliżona do grubości warstwy borowanej dyfuzyjnie (ok. $50 \mu\text{m}$). Otrzymana eutektyka borkowo-martenzytyczna charakteryzowała się dendrytycznym kształtem, a jej mikrotwardość znacznie przekraczała wartości uzyskiwane dla warstw borowanych wytwarzanych na stali Vanadis® 6 [A1]. Z kolei czterokrotne zmniejszenie prędkości skanowania ($1,12 \text{ m/min}$) przy zachowaniu tej samej mocy wiązki lasera ($1,04 \text{ kW}$) spowodowało otrzymanie ścieżek laserowych charakteryzujących się

pięciokrotnie większą grubością niż ta, którą uzyskuje się dla warstw borowanych dyfuzyjnie na stali Vanadis® 6. Większe przetopienie spowodowało jednak zmniejszenie udziału eutektyki borkowo-martenzytycznej. Stwierdzono także, że nieodpowiedni dobór parametrów wytwarzania może powodować brak równomiernego przetopienia oraz pęknięcia w strefie przetopionej, które propagują od powierzchni przez całą głębokość tej strefy [A1].

Ważnym osiągnięciem były, prowadzone w kolejnym etapie, badania odporności korozyjnej i odporności na zużycie przez tarcie warstw borowanych poddanych laserowej modyfikacji. Wyniki tych badań odniesiono do warstw, które nie zostały poddane obróbce laserowej [A2]. Dotąd nie prowadzono takich badań z użyciem stali Vanadis. Stwierdzono, że proces przetapiania wiązką lasera, który powoduje wymieszanie faz FeB i Fe₂B z żelazem pochodzącym z podłoża, jest przyczyną pogorszenia odporności na korozję (Rys. 3).

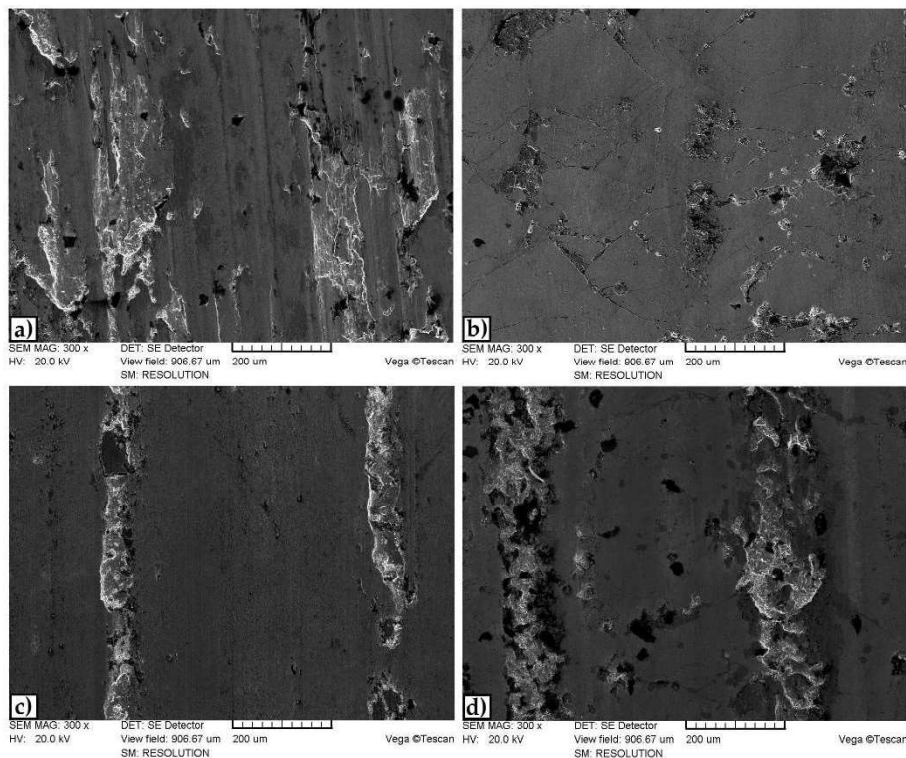


Rys. 3. Krzywe polaryzacji otrzymane podczas testów odporności korozyjnej warstwy borowanej przed i po laserowej modyfikacji [A2]

Spośród modyfikowanych laserem warstw, lepszą odporność na korozję miały warstwy, które zostały wytworzone przy użyciu większej prędkości skanowania (75 mm/s). Wynikało, to z mniejszego przetopienia, co z kolei przełożyło się na mniejszą zawartość żelaza z podłoża. Zawartość eutektyki borkowej w uzyskanej mikrostrukturze była zatem większa. Powstała hipereutektyka. Z kolei mniejsza prędkość skanowania ($v = 48$ mm/s) powodowała większe przetopienie oraz wolniejszy przebieg procesu krzepnięcia wytwarzanej warstwy. Tworzyła się mikrostruktura podeutektyczna. Dalsze zmniejszanie prędkości skanowania do 19 mm/s doprowadziło do uzyskania strefy przetopionej o dużej grubości, a tym samym zawierającej małą zawartość boru i dużą zawartość żelaza. Powstała w ten sposób mikrostruktura hypoeutektyczna.

Istotnym osiągnięciem jest to, że modyfikacja laserowa warstwy borowanej dyfuzyjnie wytworzonej na stali Vanadis® 6 umożliwiła uzyskanie zwiększenia odporności na zużycie przez tarcie [A2]. Na zjawisko to wpłynęła mikrostruktura złożona z obszarów o łagodnym, malejącym od powierzchni do podłoża gradiencie mikrotwardości. Zastosowanie mocy wiązki lasera $P = 1040$ W oraz prędkości skanowania wiązką $v = 75$ mm/s, prowadziło do

uzyskania stosunkowo dużej zawartości boru w wytworzonej warstwie powierzchniowej. Tym samym warstwy wytwarzane przy tych parametrach charakteryzowały się korzystną odpornością na zużycie. Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że dominującymi mechanizmami zużycia były ścieranie nierówności i mikroskrawanie. W niektórych przypadkach zaobserwowano tendencję do wgniatania obszarów warstwy charakteryzujących się mniejszą twardością (Rys. 4).



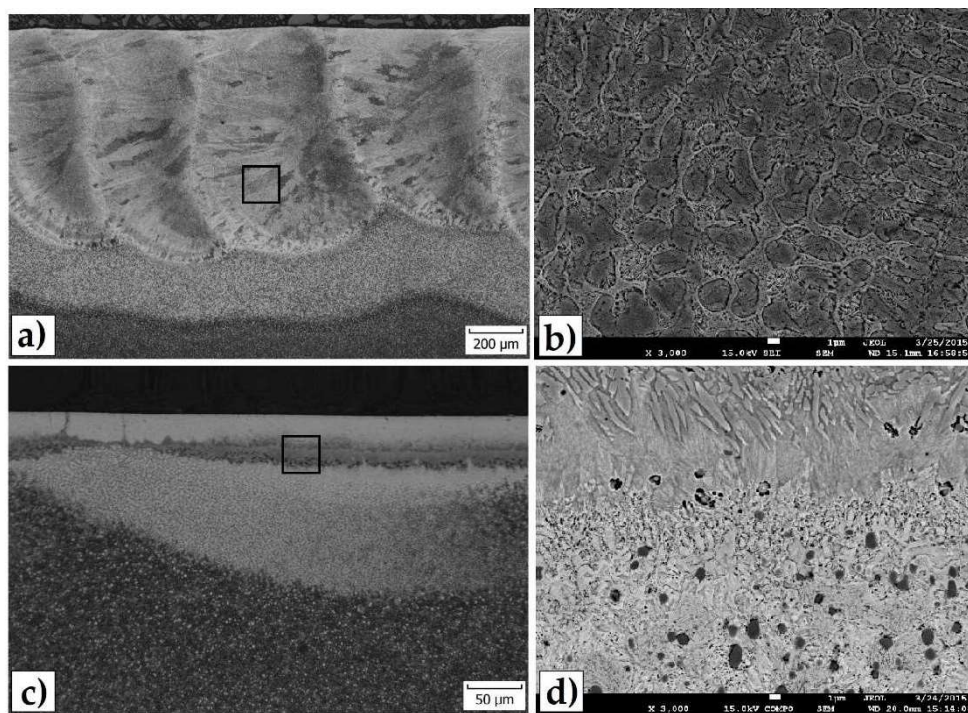
Rys. 4. Stan powierzchni po testach odporności na zużycie: a) warstwa borowana; warstwa borowana po modyfikacji laserowej: $v = 19$ mm/s (b); $v = 48$ mm/s (c); $v = 75$ mm/s (d) [A2]

W przypadku najmniejszej prędkości skanowania równej 19 mm/s, na powierzchni zaobserwowano siatkę pęknięć, która wynikała z dłuższego czasu oddziaływania wiązki na materiał i wielokrotnego nagrzewania i chłodzenia materiału [A2]. Potwierdza to wpływ odpowiedniego doboru parametrów wytwarzania, a często ich subtelnych różnic na właściwości wytwarzanych warstw powierzchniowych.

Dalsze badania prowadzone przeze mnie na stali Vanadis[®] 6 również dotyczyły borowania dyfuzyjnego i laserowej modyfikacji wytworzonych warstw powierzchniowych. W pracy [A3] proces borowania przeprowadzono w mieszaninie borującej Durborid[®], a do następującego po nim procesu przetapiania zastosowano wiązkę lasera diodowego o mocy nominalnej 3 kW. Analizowano wpływ parametrów wytwarzania na mikrostrukturę i mikrotwardość wytwarzanych warstw powierzchniowych. Podobnie jak we wcześniejszych badaniach mikrostruktura warstwy przechodziła w miarę zmiany parametrów od hypoeutektycznej po hipereutektyczną (Rys. 5).

W przypadku zastosowania lasera diodowego, przy parametrach zbliżonych do tych, które stosowałam przy laserze CO₂ uzyskałam większe przetopienie. Zastosowano moc wiązki lasera 1000 W oraz prędkość skanowania wiązką lasera 50 mm/s. Uwzględniając te parametry, a także średnicę wiązki lasera wyznaczono fluencję laserową, czyli parametr

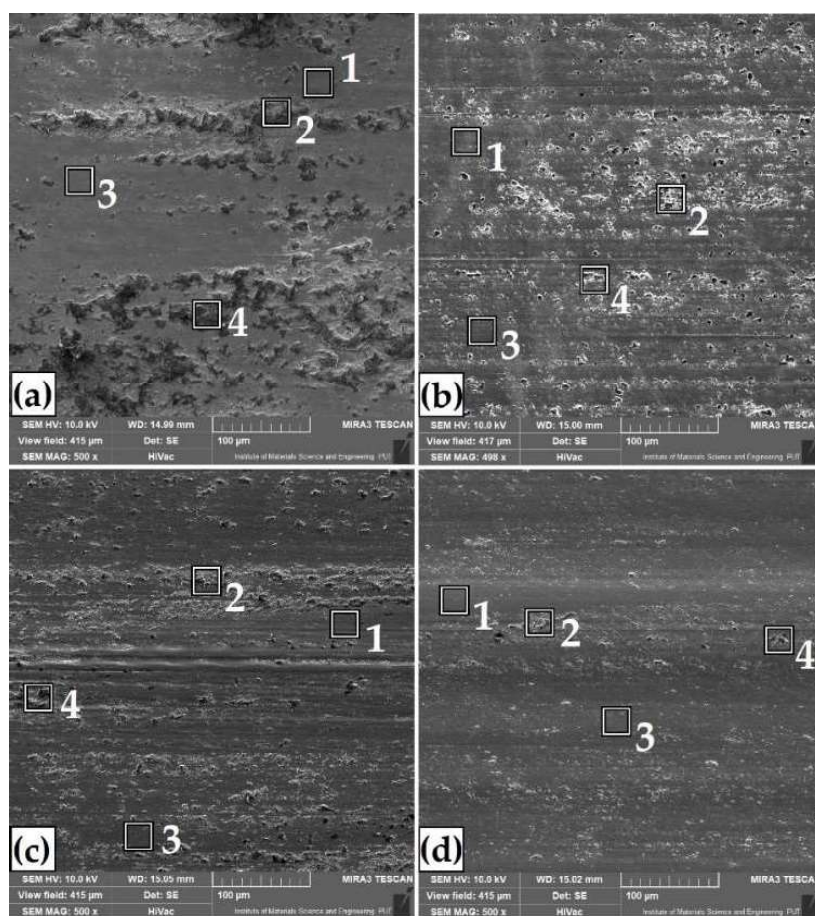
opisujący wartość energii dostarczonej na jednostkę powierzchni. Najkorzystniejsze parametry w analizowanym przypadku to takie, które pozwalają uzyskać fluencję wiązki laserowej równą $12,7 \text{ J/mm}^2$ [A3]. Mikrotwardość wytworzonych warstw zależała od parametrów wiązki lasera, a uzyskane wartości mieściły się w zakresie od 1000 HV_{0,1} do 1800 HV_{0,1}.



Rys. 5. Mikrostruktura warstwy borowanej po laserowej modyfikacji: $76,4 \text{ J/mm}^2$ (a, b), $7,6 \text{ J/mm}^2$ (c, d); widok ścieżek laserowych (a, c) oraz powiększonego obszaru strefy przetopionej (b, d) [A3]

Dostępne publikacje naukowe dotyczące modyfikacji laserowej warstw borowanych wytwarzanych na stalach niestopowych dotyczą głównie analizy mikrostruktury i mikrotwardości [26]. Autorzy tych prac nie analizowali problemu odporności korozyjnej czy odporności na zużycie przez tarcie. Dlatego zdecydowałam się przeprowadzić kompleksowe badania laserowych warstw borowanych na tego typu stali. Zastosowałam stal narzędziową do pracy na zimno CT90 [A4]. Warstwę borowaną wytworzono w procesie dyfuzyjnym w temperaturze 950°C . Zastosowano mieszaninę proszkową zawierającą węgiel boru B_4C jako źródło boru. Przygotowane w ten sposób warstwy dyfuzyjne poddano obróbce laserowej przy użyciu lasera diodowego. Zastosowano trzy wartości mocy wiązki lasera tj. 600, 900 i 1200 W. Przeprowadzono badania mikrostruktury, określono skład chemiczny i fazowy, a także wykonano pomiary mikrotwardości oraz oceniono odporność na korozję i zużycie przez tarcie nowo powstałych warstw powierzchniowych $\text{FeB-Fe}_2\text{B-Fe}_3(\text{B,C})$. Podobnie jak w przypadku stali Vanadis[®] 6, w wyniku oddziaływania wiązki lasera iglaste borki występujące w strefie przypowierzchniowej, powstałe w procesie dyfuzyjnym, zostały przetopione, a na przekroju próbki uzyskano trzy charakterystyczne obszary, czyli strefę przetopioną, strefę wpływu ciepła oraz stalowe podłoże o niezminionej mikrostrukturze. Na podstawie wyników badań, stwierdzono, że większość właściwości nowo powstałych warstw uległy polepszeniu w porównaniu z warstwami dyfuzyjnymi. Jedynym wyjątkiem była odporność na korozję, która zmniejszyła się po procesie przetapiania. Zaobserwowano także

niewielkie zmniejszenie odporności na zużycie przez tarcie wytworzonych warstw powierzchniowych, ale tylko w przypadku zastosowania największej mocy wiązki lasera. Wyraźny brak publikacji naukowych dotyczących wpływu obróbki hybrydowej na odporność korozyjną i zużycie przez tarcie stali niestopowej narzędziowej przyczyniło się do podjęcia badań nad tym tematem. Prowadzone przeze mnie prace badawcze pozwoliły lepiej poznać przyczyny oraz mechanizmy niszczenia wytworzonych warstw powierzchniowych. Zmniejszona odporność na korozję i zużycie spowodowane było większym przetopieniem stalowego podłoża, a co za tym idzie zwiększoną zawartością żelaza w utworzonej warstwie [A4]. Wzrost gęstości mocy wiązki lasera, podobnie jak w poprzednio opisanych przypadkach, przyczynił się do zmiany mikrostruktury z hipereutektycznej na hypoeutektyczną i zmniejszenia mikrotwardości na przekroju warstwy z 1200 HV do ok. 900 HV. Przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej EDS określono zmiany związane z odpornością korozyjną i odpornością na zużycie przez tarcie. W przypadku warstwy borowanej wytworzonej metodą obróbki laserowej, produkty tlenkowe pojawiały się na całej powierzchni, a rozkład tlenu na powierzchni próbki był równomierny w przeciwieństwie do powierzchni uzyskanej w wyniku borowania dyfuzyjnego (Rys. 6, Tabela 2). Warstwa dyfuzyjna charakteryzowała się większą ilością dużych wżerów korozyjnych pomimo tego, że badanie potencjodynamiczne nie potwierdziło, że jest ona bardziej podatna na korozję.



Rys. 6. Stan powierzchni po testach odporności na ścieranie warstwy borowanej dyfuzyjnie (a) i warstw FeB-Fe₂B-Fe₃(B,C) wytworzonych metodą obróbki laserowej z wykorzystaniem 76 kW/cm² (b), 115 kW/cm² (c), 153 kW/cm² (d) [A4]

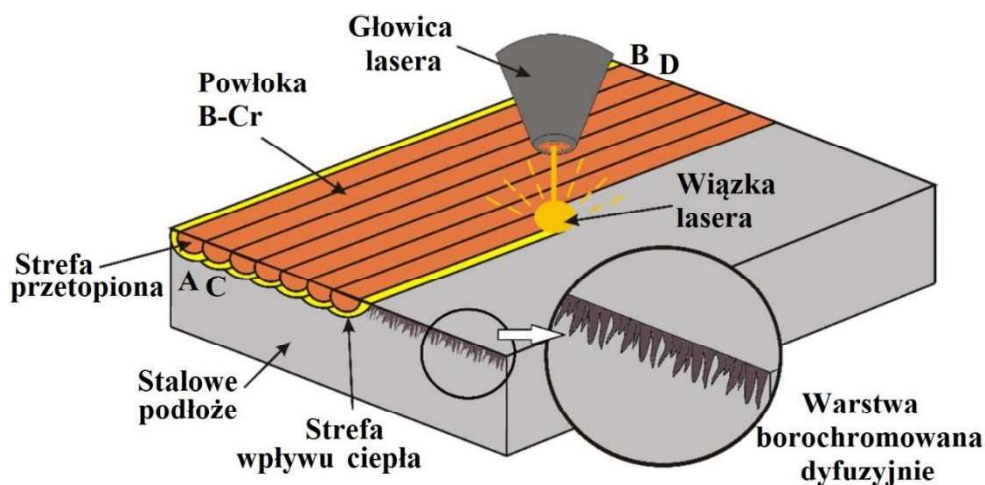
Na podstawie przeprowadzonych badań można było stwierdzić, że wzrost mikrotwardości oraz jej łagodny gradient od powierzchni do podłoża przyczyniły się do zwiększenia odporności na zużycie przez tarcie. W wyniku badań odporności na zużycie, we wszystkich analizowanych przypadkach na powierzchni wytworzonych warstw zaobserwowano charakterystyczne ślady zużycia ściernego z rowkami. W obszarach powstałych rowków zaobserwowano zwiększoną zawartość produktów utleniania [A4] (Rys. 6, Tabela 2).

Tabela 2. Wyniki EDS obszarów zaznaczonych na rysunku 6 [A4]

Nazwa procesu	Miejsce pomiaru	Fe	B	C	O
		[%wag.]			
B	1	88,3	9,0	1,8	0,9
	2	57,3	0,9	12,5	29,3
	3	88,7	7,9	2,0	1,4
	4	58,7	1,4	11,5	28,4
B+L 76 kW/cm ²	1	95,4	1,3	2,7	0,6
	2	76,0	1,3	7,9	14,9
	3	95,3	1,1	2,9	0,8
	4	61,8	0,9	10,7	26,7
B+L 115 kW/cm ²	1	96,0	1,4	2,0	0,6
	2	72,8	0,2	4,2	22,8
	3	95,2	1,2	2,7	0,9
	4	93,1	0,7	2,2	4,0
B+L 153 kW/cm ²	1	94,0	2,3	2,6	1,1
	2	88,2	1,5	3,6	6,7
	3	93,9	0,8	2,5	2,8
	4	78,7	1,1	6,3	14,0

Kolejnym krokiem w modyfikacji warstwy zawierającej bor z udziałem wiązki lasera było wytworzenie w pierwszej kolejności warstwy borochromowanej, a następnie przetopienie jej wiązką lasera. Badania takie nie były wcześniej opisywane w dostępnej literaturze. Publikacje obejmowały jedynie przetapianie warstwy borowanej dyfuzyjnie na stalach średniowęglowych czy przetapianie warstwy chromowanej dyfuzyjnie lub powłoki galwanicznej na stalach narzędziowych. W artykule [A5] przedstawiono wyniki badań mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych i fizykochemicznych dla powłok B-Cr

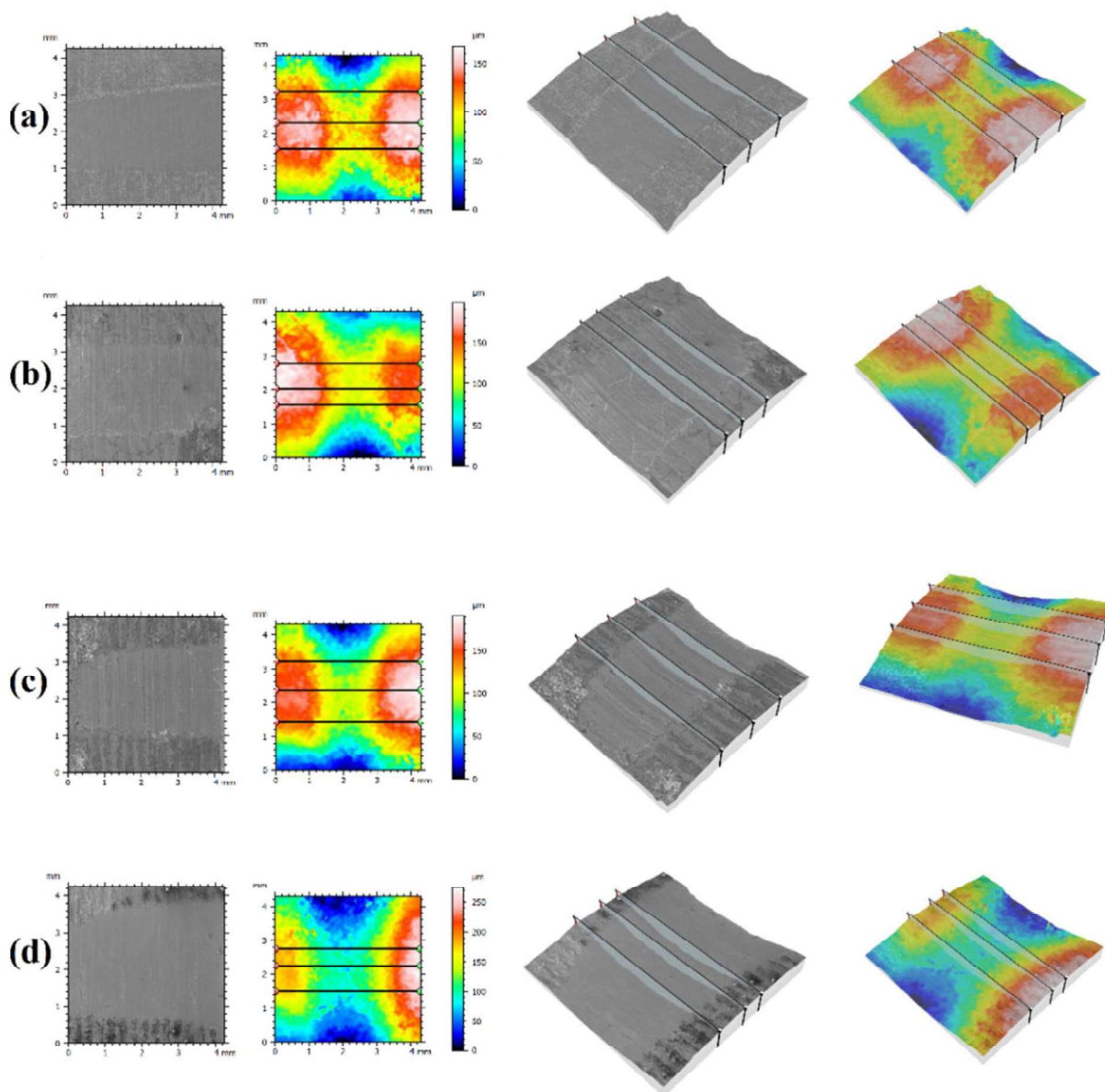
otrzymanych w wyniku modyfikacji dyfuzyjnych warstw borochromowanych za pomocą wiązki lasera diodowego. Schemat procesu wytwarzania pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat obróbki laserowej dyfuzyjnej warstwy borochromowanej [A5]

Badania przeprowadzono na stali narzędziowej 145Cr6. Warstwy borochromowane dyfuzyjnie wytworzono w temperaturze 950 °C w mieszaninie proszkowej zawierającej węgliki boru jako źródło boru oraz żelazochrom jako źródło chromu. W kolejnym kroku warstwy te zostały przetopione za pomocą wiązki laserowej. Podczas tych procesów wykorzystano trzy wartości mocy wiązki lasera: 600 W, 900 W i 1200 W. Określono mikrostrukturę, mikrotwardość, skład chemiczny oraz odporność na korozję i zużycie przez tarcie wytworzonych powłok B-Cr.

W wyniku oddziaływania wiązki laserowej, warstwa borochromowana dyfuzyjnie została wymieszana ze stalowym podłożem. Badania wykazały, że zbyt mała moc wiązki lasera powoduje pęknięcia w nowo powstałej powłoce B-Cr. Z drugiej strony zbyt duża moc wiązki lasera powoduje głębokie przetopienie skutkujące utratą mikrotwardości. Zmniejszona odporność korozyjna nowopowstałych warstw powierzchniowych w porównaniu z warstwami borochromowanymi dyfuzyjnie była spowodowana występowaniem pęknięć lub głębokim przetopieniem. W przypadku powłok B-Cr wytwarzanych przy użyciu wiązki laserowej o mocy 600 W zaobserwowano niewielki spadek odporności na zużycie, ale powłoka ta była znacznie grubsza niż warstwy borochromowane dyfuzyjnie. Z drugiej strony zastosowanie mocy wiązki laserowej równej 1200 W spowodowało znaczny spadek odporności na zużycie. Nowo utworzone powłoki B-Cr miały korzystny gradient mikrotwardości między warstwą, a podłożem. W pracy przedstawiono wyniki topografii powierzchni 3D po badaniach odporności na zużycie przez tarcie (Rys. 8). Warstwa borochromowana dyfuzyjnie charakteryzowała się najmniejszą szerokością śladu zużycia i najmniejszą jego głębokością. Największy ślad zużycia zaobserwowano dla powłoki B-Cr wytworzonej przy użyciu wiązki lasera o mocy 1200 W.



Rys. 8. Topografia powierzchni po badaniach odporności na zużycie dla (a) dyfuzyjnej warstwy borochromowanej, (b) Powłoki B-Cr wytworzone przy użyciu 600 W, (c) powłoki B-Cr produkowane przy użyciu 900 W oraz (d) powłoki B-Cr wytworzone przy użyciu mocy 1200 W [A5]

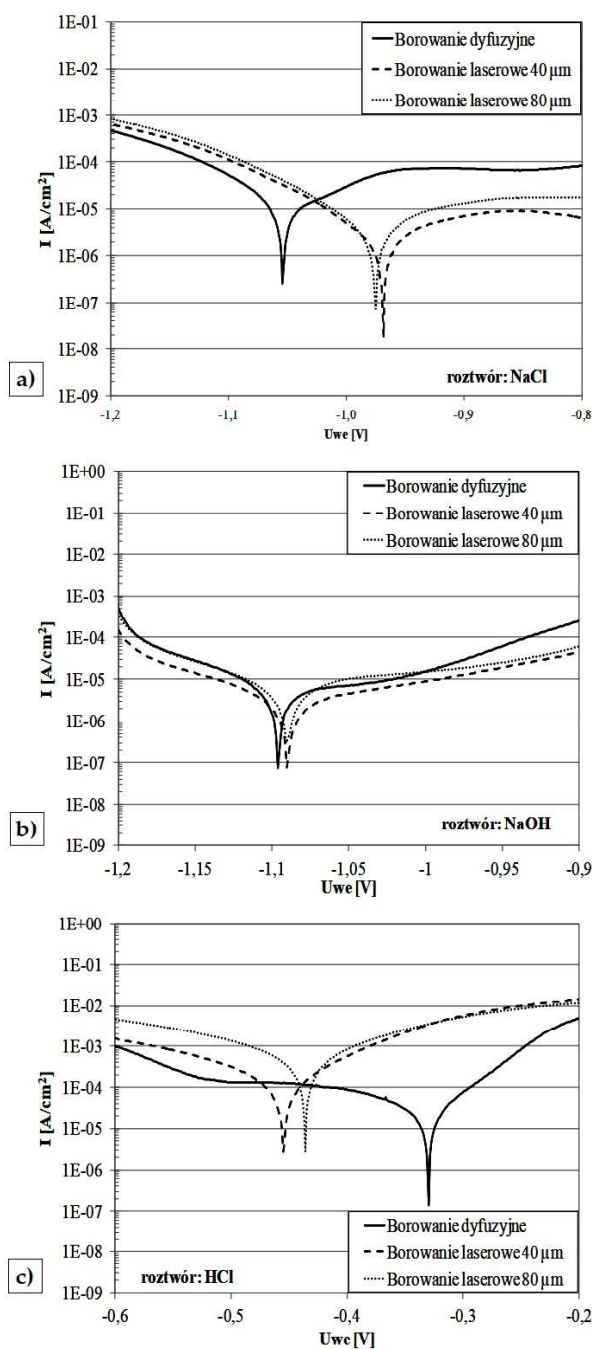
Zaproponowana hybrydowa technika modyfikacji powierzchni łącząca proces dyfuzyjny z laserowym jest ciekawą kombinacją obróbki powierzchniowej. W wyniku takiego procesu uzyskuje się warstwę powierzchniową o zmienionej mikrostrukturze i nowych właściwościach, które w niektórych przypadkach przewyższają właściwości uzyskiwane tradycyjnymi metodami modyfikacji powierzchni.

Z punktu widzenia rozwoju dyscypliny inżynieria materiałowa taka obróbka ma charakter poznawczy i potencjał aplikacyjny. Należy jednak szukać mniej energochłonnych procesów. Niewątpliwie kombinacja dwóch obróbek generuje dodatkowe koszty. W związku z tym równocześnie prowadziłam badania w których wyeliminowałam proces dyfuzyjny i zastosowałam technikę laserowego stopowania powierzchni stopów metali przy udziale boru. W zaproponowanej metodzie na powierzchnię metalowego podłoża nanoszona była

powłoka wstępna w postaci pasty zawierającej bor. Pierwsze badania prowadziłam z zastosowaniem stali średniowęglowych, gdzie porównywałam procesy energochłonne (borowanie dyfuzyjne) z energooszczędnym (laserowe stopowanie).

Celem pracy [A6] była analiza wpływu procesów borowania dyfuzyjnego i borowania laserowego na odporność korozyjną stali C45. Stal ta ma zastosowanie w produkcji średnio obciążonych części maszyn i urządzeń, przez co powierzchnia wzbogacona w bor mogłaby wydłużyć czas ich eksploatacji. Proces borowania dyfuzyjnego wykonano metodą gazowo-kontaktową w mieszaninie borującej zawierającej bor amorficzny. Proces był prowadzony w temperaturze 950°C w czasie 4 godzin. Proces borowania laserowego polegał natomiast na naniesieniu na powierzchnię stali powłoki wstępnej w postaci pasty zawierającej bor amorficzny, a następnie przetopieniu jej wiązką lasera molekularnego CO₂. Zastosowano dwie grubości wstępnej powłoki boru amorficznego, 40 µm i 80 µm oraz stałe parametry obróbki laserowej takie jak: gęstość mocy wiązki lasera $q = 33,12 \text{ kW/cm}^2$, prędkość skanowania wiązką lasera $v = 2,88 \text{ m/min}$, średnica wiązki lasera $d = 2 \text{ mm}$ oraz odległość między ścieżkami $f = 0,50 \text{ mm}$. W pracy prowadziłam badania odporności korozyjnej wytworzonych warstw w różnych roztworach charakteryzujących się różnymi odczynami. Nie znalazłam publikacji w których autorze opisywaliby wyniki takich badań. Odporność korozyjną wytworzonych warstw borowanych badano w trzech ośrodkach: 5% roztworze NaCl, 5% roztworze HCl oraz 5% roztworze NaOH. W wyniku borowania dyfuzyjnego uzyskano charakterystyczną iglastą mikrostrukturę borków żelaza FeB i Fe₂B o twardości 1600÷1800 HV_{0,1}. Mikrostruktura uzyskana w wyniku borowania laserowego była natomiast złożona ze strefy przetopionej, zawierającej eutektykę borkowo-martenzytyczną, strefy wpływu ciepła oraz rdzenia. Mikrotwardość warstwy borowanej laserowo była uzależniona od grubości wstępnej powłoki zawierającej bor amorficzny i wynosiła w strefie przetopionej od 1200 HV_{0,1} do 1800 HV_{0,1}. Na podstawie potencjodynamicznych testów korozyjnych przeprowadzonych w roztworach NaCl i NaOH stwierdzono, że warstwy borowane laserowo charakteryzują się większą odpornością na korozję niż warstwy borowane dyfuzyjnie (Rys. 9).

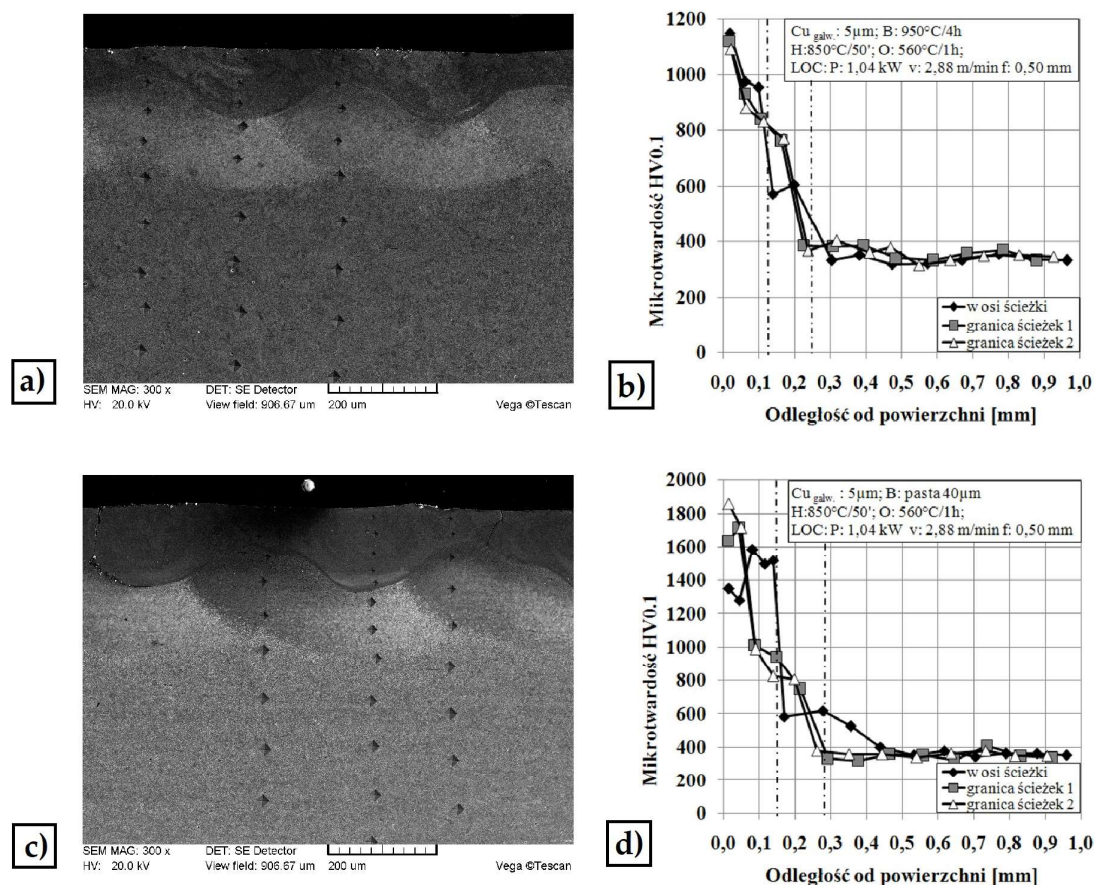
Spośród warstw powierzchniowych uzyskanych w wyniku obróbki laserowej większą odporność na korozję stwierdzono dla tych, wytworzonych przy użyciu powłoki wstępnej o grubości 40 µm. Dwukrotne zwiększenie grubości powłoki wstępnej nieznacznie zmniejszyło odporność korozyjną, co mogło wynikać z pęknięć, które zidentyfikowano w obszarze strefy przetopionej. Po raz pierwszy stwierdzono, że w roztworze o odczynie zasadowym warstwy borowane laserowo wykazują zbliżoną odporność korozyjną do warstw borowanych dyfuzyjnie. Natomiast w roztworze o odczynie obojętnym warstwy borowane laserowo lepiej chronią materiał podłoża przed korozją.



Rys. 9. Odporność korozyjna warstwy borowanej dyfuzyjnie i warstw borownych laserowo w 5% roztworze: a) NaCl, b) NaOH, c) HCl [A6]

Warstwy borowane, bez względu na to, czy wytwarzane przy użyciu metod gazowych, gazowo-kontaktowych, czy w złożu fluidalnym można dodatkowo poddawać modyfikacjom. W literaturze najczęściej opisywane jest jednoczesne [9, 14, 15] lub następujące po sobie [12-14] nasycanie dyfuzyjnie borem i dodatkowym pierwiastkiem chemicznym. Badacze skupiali się także na łączeniu procesów dyfuzyjnych z metodami bezprądowego powlekania [16] czy z procesami galwanicznymi [17]. Pomimo dużej energochłonności i potrzeby stosowania rozbudowanej aparatury, procesy hybrydowe mają wiele zalet związanych z uzyskiwanymi właściwościami. Zawsze należy jednak pamiętać o minimalizowaniu zużycia energii oraz mieć na uwadze ochronę środowiska naturalnego. W związku z tym, tematyką

kolejnego artykułu wchodzącego w skład jednotematycznego cyklu publikacji było porównanie dwóch hybrydowych procesów wytwarzania warstw powierzchniowych zawierających bor, przy czym procesy charakteryzowały się różną energochłonnością. Jako pierwiastek modyfikujący zastosowano miedź. W artykule opisano wpływ tego pierwiastka zarówno na proces borowania dyfuzyjnego jak i borowania laserowego [A7]. Pierwszy proces przebiegał w trzech krokach. Najpierw na próbkach ze stali C45 wytworzono powłokę galwaniczną miedzi. Następnym krokiem było przeprowadzenie procesu borowania dyfuzyjnego, natomiast w trzecim kroku, tak przygotowaną wstępnie warstwę przetopiono wiązką lasera molekularnego CO₂. Drugi opisany w artykule proces również składał się z trzech kroków, z tym że w kroku drugim zminimalizowano energochłonność, co przyczyniło się do tego, że proces stał się bardziej ekologiczny. Pierwszy krok również polegał na wytworzeniu powłoki galwanicznej miedzi. W kolejnym etapie na wytworzonej wcześniej powłoce wytworzono powłokę w postaci pasty zawierającej bor amorficzny. Wytworzenie pasty i jej naniesienie na próbkę nie wymaga długotrwałego procesu dyfuzyjnego. Tak przygotowane próbki zostały następnie poddane procesowi przetapiania wiązką lasera CO₂. Parametry modyfikacji laserowej były takie same dla wszystkich próbek. Zastosowano moc wiązki lasera $P = 1,04 \text{ kW}$, prędkość skanowania $v = 2,88 \text{ m/min}$ oraz średnicę wiązki lasera $d = 2 \text{ mm}$. Na podstawie wcześniejszych badań dotyczących grubości powłok wstępnych stwierdzono, że powłoka wstępna w postaci pasty zawierającej bor o grubości $40 \text{ }\mu\text{m}$ będzie najbardziej odpowiednia. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie boru i miedzi oraz laserowej modyfikacji prowadzi do uzyskania warstw powierzchniowych o mikrotwardości w zakresie $1200 \div 1800 \text{ HV0,1}$. Warstwy te charakteryzowały się dobrym połączeniem z podłożem stalowym. W artykule wykazano, że uzyskane właściwości były zależne od zastosowanego procesu wytwarzania. Stwierdzono znaczne polepszenie właściwości przy jednoczesnym zmniejszeniu energochłonności procesu wytwarzania. Wyeliminowano energochłonny proces borowania dyfuzyjnego i zastąpiono go wytworzeniem powłoki wstępnej w postaci pasty zawierającej bor amorficzny (Rys. 10). Zaprezentowane wyniki ukazują, że poprzez odpowiedni dobór parametrów można uzyskać zadawalające wyniki przy znacznie mniejszych kosztach wytwarzania. Wcześniej miedź wykorzystywana była głównie jako powłoka lub podpowłoka w procesach galwanicznych. Tutaj w kombinacji z borem i wiązką lasera miedź pozwoliła na uzyskanie ciekawych i dobrze rokujących na przyszłość wyników badań.



Rys. 10. Mikrostruktura i mikrotwardość warstwy: boromiedziowanej galwanicznie-dyfuzyjnie po laserowym przetapianiu (a, b), boromiedziowanej po laserowym stopowaniu powłoki galwanicznej borem (c, d) [A7]

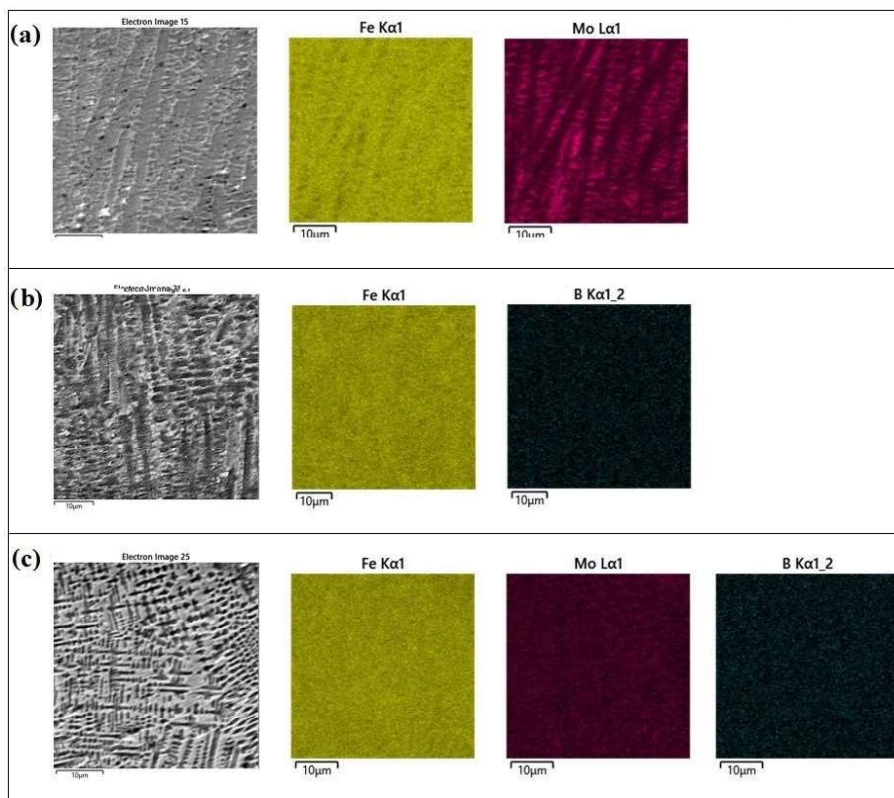
Kolejnym etapem badań, których wyniki zostały uwzględnione w spisie powiązanych tematycznie artykułów naukowych była modyfikacja warstwy powierzchniowej z udziałem boru oraz wysokotopliwego pierwiastka chemicznego [A8]. Proces ten polegał na naniesieniu na powierzchnię stali trzech rodzajów powłok wstępnych w postaci past. Pierwsza zawierała bor, druga wolfram, natomiast w skład trzeciej wchodził bor wraz z wolframem. Wytworzone powłoki wstępne poddano przetopieniu wiązką lasera. Badania przeprowadzono na stali narzędziowej Vanadis® 6. Stwierdzono, że jednoczesne stopowanie borem i wolframem przyczynia się do otrzymania warstwy powierzchniowej wolnej od pęknięć i charakteryzującej się mikrotwardością w zakresie od 1000 HV0,1 do 1200 HV0,1. Mimo zastosowania grubości powłoki wstępnej w postaci pasty zawierającej bor, wynoszącej 40 μm (ustalonej w czasie wcześniejszych badań), dla stali narzędziowej wysokostopowej Vanadis® 6 nie uzyskano zadowalających efektów. Pojawiły się pęknięcia, które prawdopodobnie były związane z pojemnością i przewodnością cieplną zastosowanych pierwiastków. Dopiero wytworzenie powłoki wstępnej na bazie połączenia boru oraz wolframu wpłynęło korzystnie na uzyskane właściwości [A8]. Można przypuszczać, że kombinacja boru z dowolnym dodatkowym pierwiastkiem wpływa pozytywnie na uzyskane właściwości.

W dalszych badaniach przeprowadzałam analizę wpływu krzemu, boru oraz mieszaniny tych dwóch pierwiastków na właściwości wytworzonych warstw powierzchniowych [A9]. Pierwiastki te zostały dodane do powierzchni stali przy użyciu

stopowania laserowego. Badania obejmowały analizę mikrostruktury, składu fazowego i chemicznego, mikrotwardości oraz odporności na korozję i zużycie warstw powierzchniowych. Głównym celem tych badań było sprawdzenie, czy zastosowanie krzemu, boru lub mieszaniny tych pierwiastków wpłynie na poprawę właściwości mechanicznych zmodyfikowanej powierzchni stali. Przygotowano proszek boru, krzemu oraz ich mieszaninę w różnych proporcjach, a następnie wytworzono pasty przy użyciu szkła wodnego i nakładano je na stalowe podłoże. Wytworzono powłoki wstępne o grubości 80 μm , a następnie poddano je obróbce przy użyciu wiązki lasera molekularnego CO_2 . Otrzymane warstwy powierzchniowe przeanalizowano i porównano. Po stopowaniu laserowym mikrostruktura składała się ze strefy przetopionej, strefy wpływu ciepła oraz niezmienionego pod względem mikrostruktury podłoża stalowego. Nowo utworzone warstwy powierzchniowe B-Si charakteryzowały się lepszymi właściwościami niż te wytwarzane przy użyciu tylko powłoki wstępnej boru lub krzemu. Połączenie tych dwóch pierwiastków skutkowało uzyskaniem wysokiej mikrotwardości w zakresie od 1430 HV do 1870 HV, a także dobrą odpornością na korozję i zużycie przez tarcie. Powłoki B-Si łączą zatem zalety powłok B i Si. Stwierdzono, że mikrostruktura uzyskanych warstw powierzchniowych ma decydujący wpływ na uzyskane właściwości. Powłoki B-Si zawierające 50% B i 50% Si charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi. Uzyskano dla nich mikrotwardość o wartościach wyższych niż 1800 HV oraz największą odporność na zużycie przez tarcie. W mikrostrukturze tej warstwy zidentyfikowano mikroporowatość, w której może gromadzić się smar. Stosowanie różnych rodzajów smarów wypełniających taką mikroporowatość może przyczynić się do jeszcze większej odporności na zużycie przez tarcie. Mikroporowatość ma niestety negatywny wpływ na odporność korozyjną. W przypadku powłok B-Si zawierających 20% B i 80% Si stwierdzono lepszą odporność korozyjną, jednak inne właściwości mechaniczne uległy pogorszeniu. Podsumowując, powłoki B-Si mogą być stosowane w wyrobach wymagających odporności na zużycie oraz w celu zwiększenia odporności na korozję. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę na odpowiedni dobór składu chemicznego powłok wstępnych w postaci pasty poddanych obróbce laserowej. Borki odpowiadają za zwiększenie mikrotwardości oraz odporności na zużycie przez tarcie, natomiast krzemki wpływają na zwiększenie odporności korozyjnej.

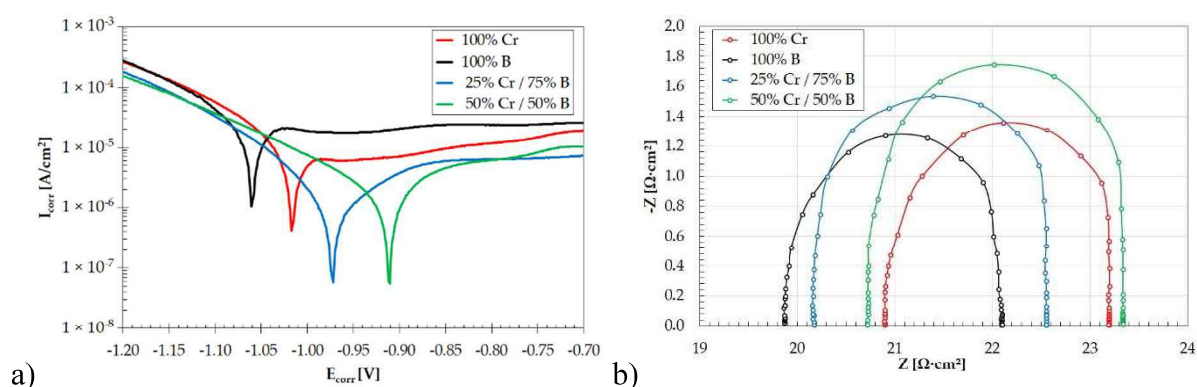
Pierwiastki modyfikujące będące składnikiem powłoki wstępnej w postaci pasty mają istotny wpływ na uzyskane właściwości warstw zawierających bor. W czasie badań nad różnymi rodzajami powłok z borem prowadziłam równocześnie badania nad wpływem dodatkowych pierwiastków modyfikujących na stal. Jednym z takich pierwiastków, który później wykorzystałam do modyfikowania warstw zawierających bor był molibden. Badania te posłużyły do oceny możliwości zastosowania molibdenu jako pierwiastka stopującego [27]. Stwierdziłam, że warstwy uzyskane poprzez laserowe przetopienie powłoki wstępnej w postaci pasty z molibdenu charakteryzują się mikrotwardością w obszarze strefy przetopionej w zakresie od 500 HV_{0,1} do 900 HV_{0,1}. Wartości te były zależne od zawartości węgla w podłożu stalowym, ponieważ badania były wykonywane na różnych gatunkach stali. Wiedza zdobyta podczas badań związana z zachowaniem się boru i molibdenu w trakcie przetapiania wiązką lasera pozwoliła na przeprowadzenie kolejnych badań polegających na stopowaniu laserowym stali narzędziowej CT90 z nałożoną powłoką wstępną boru, molibdenu lub mieszaniny tych pierwiastków [A10]. W badaniach tych poddano analizie

mikrostrukturę, skład chemiczny i fazowy oraz mikrotwardość i odporność na korozję. Podczas badań zastosowano moc wiązki laserowej 900 W i prędkość skanowania 48 mm/s. Zastosowano laser diodowy. W wyniku procesu stopowania laserowego mikrostruktura na przekroju próbki składała się z trzech charakterystycznych obszarów to jest: strefy przetopionej, strefy wpływu ciepła oraz niezmienionego pod względem struktury podłoża. Mikrostruktura strefy przetopionej uzyskana w wyniku laserowego stopowania molibdenem składała się ze roztworu stałego Mo w Fe. Mikrotwardość tej strefy wynosiła 800 HV_{0,1} i charakteryzowała się lepszą odpornością na korozję niż stalowe podłoże. Warstwa powierzchniowa wytwarzana poprzez stopowanie laserowe borem miała mniejszą grubość niż warstwa Mo, ale charakteryzowała się większą mikrotwardością osiągającą wartość 1000 HV_{0,1}. W przypadku tej warstwy, mikrostruktura strefy przetopionej składała się z eutektyki borkowo-martenzytycznej. Połączenie boru wraz z molibdenem wpłynęło pozytywnie na właściwości nowopowstałych warstw powierzchniowych. Mikrostruktura strefy przetopionej w warstwie powierzchniowej wytworzonej przy użyciu powłoki wstępnej zawierającej bor i molibden składała się z eutektyki borków żelaza i molibdenu z martenzytem. Grubość tej strefy była większa od powłoki z samym borem, a cieńsza od powłoki z samym molibdenem. Połączenie tych dwóch pierwiastków wpłynęło pozytywnie na mikrotwardość, która osiągała wartość około 1200 HV_{0,1} i łagodnie zmniejszała się w kierunku podłoża oraz na uzyskanie dobrej odporności na korozję (najlepszej spośród wszystkich badanych wariantów) [A10]. Podczas badań przeprowadzono analizę składu chemicznego obszaru strefy przetopionej oraz powierzchni po badaniach korozyjnych (Rys. 11).



Rys. 11. Mapy rozkładu stężenia pierwiastków metodą EDS w wyniku laserowego stopowania: a) Mo, b) B, c) Mo-B [A10]

Kolejnym zastosowanym przeze mnie pierwiastkiem tworzącym wysokotopliwe związki i fazy był chrom. Analizowałam jednoczesny wpływ chromu i boru na wyniki badań mikrostruktury, składu chemicznego, mikrotwardości oraz odporności korozyjnej powłok Cr-B wykonanych na stali narzędziowej Vanadis® 6 [A11]. W tym badaniu chrom i bor zostały dodane do powierzchni stali za pomocą procesu stopowania laserowego. Chrom i bor oraz ich mieszaniny przygotowano w różnych proporcjach, a następnie naniesiono na podłoże stalowe w postaci powłoki wstępnej o grubości 100 μm . W zależności od rodzaju zastosowanej powłoki wstępnej i parametrów obróbki laserowej zaobserwowano zmiany w mikrostrukturze i właściwościach. Powłoki wytworzone z użyciem powłoki wstępnej zawierającej mieszaninę chromu i boru charakteryzowały się dużą mikrotwardością (900 HV_{0,05} - 1300 HV_{0,05}) przy zachowaniu dobrej odporności korozyjnej. Stwierdzono również, że zbyt mała moc wiązki lasera przyczynia się do powstawania pęknięć i porowatości. Rysunek 12 przedstawia krzywe Tafela po testach odporności na korozję z wykorzystaniem metody potencjodynamicznej (Rys. 12a) oraz wyniki badań z wykorzystaniem spektroskopii impedancji elektrochemicznej (Rys. 12b). Powłoka 50%Cr/50%B wykazuje najlepszą odporność na korozję. Najgorszą odporność korozyjną wykazała natomiast powłoka borowa, która charakteryzowała się wyższym potencjałem korozji i wyższymi wartościami prądu korozyjnego. Koncepcja dodawania chromu do powłoki z boru wydaje się obiecująca. Chrom nie tylko zwiększa odporność korozyjną stali, ale, jak dowiodłam, poprawia odporność korozyjną otrzymanych powłok.



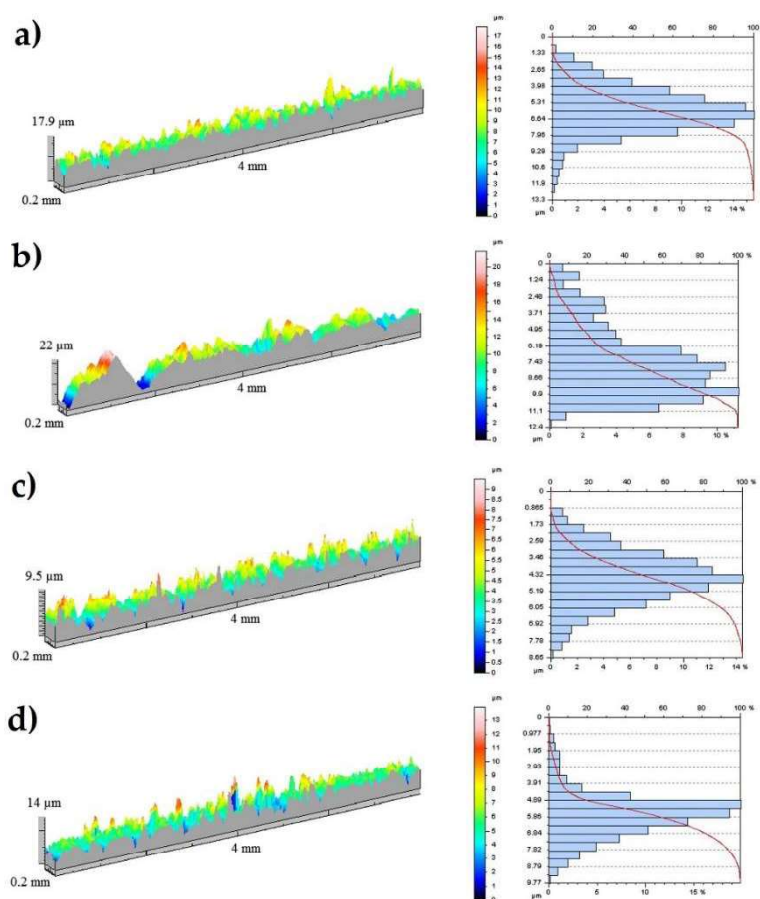
Rys. 12. Wyniki badań odporności korozyjnej powłok wykonanych metodami stopowania laserowego (750 W): a) krzywe polaryzacji, b) diagramy elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej wytworzonych powłok (wykresy Nyquista) [A11]

Prowadzone przeze mnie badania nad wpływem laserowego stopowania z udziałem boru i dodatkowego pierwiastka (Cu, Si, Mo, Cr, W) są perspektywiczne. Wykazałam, że laserowa modyfikacja powierzchni stali borem i dodatkowym pierwiastkiem przyczynia się do poprawy nie tylko właściwości mechanicznych, ale zapewnia strukturę pozbawioną pęknięć. Jako jedna z pierwszych podjęłam tematykę modyfikacji stali w ten sposób.

Kolejnym etapem moich badań było zastosowanie borowania laserowego do modyfikacji powierzchni stopów innych niż stal. Wielu badaczy skupiało się w swoich badaniach na modyfikacji superstopów na bazie niklu. Stosowali oni głównie Inconel, Nimonic, Hastelloy czy Waspaloy. Grupą materiałów wchodzących w skład superstopów, która nie została dokładnie przebadana pod kątem wytwarzania na niej warstw zawierających bor były stopy niklowo-miedziowe – monele. W prawdzie istnieje jedna publikacja

o stopowaniu laserowym borem stopów miedzi o różnej zawartości Cu i Ni, jednak badania te nie wyczerpują zagadnienia [28]. Podjęłam zatem temat wytwarzania warstw powierzchniowych zawierających bor na tym materiale. Prace te realizowane są we współpracy z doktorantem którego objęłam opieką jako promotor pomocniczy [A12, A13, A14].

Badania koncentrowały się na opisie efektów laserowej obróbki cieplnej Monelu 400 oraz laserowego wytwarzania warstw powierzchniowych zawierających bor. Po raz pierwszy próbki wykonano przy użyciu lasera diodowego. Stosowano dwie różne grubości wstępnej powłoki w postaci pasty zawierającej bor (100 i 200 μm). Parametry wytwarzania zmieniały się w zakresie prędkości skanowania wiązką lasera. Stosowano cztery różne prędkości: 5, 25, 50 i 75 m/min. Gęstość mocy wiązki lasera była natomiast stała i wynosiła 178,3 kW/cm². Parametry laserowego stopowania dobrano w taki sposób, aby bezpośrednio po tym procesie można było prowadzić obróbkę skrawaniem wspomaganą laserowo (LAM – Laser Assisted Machining).

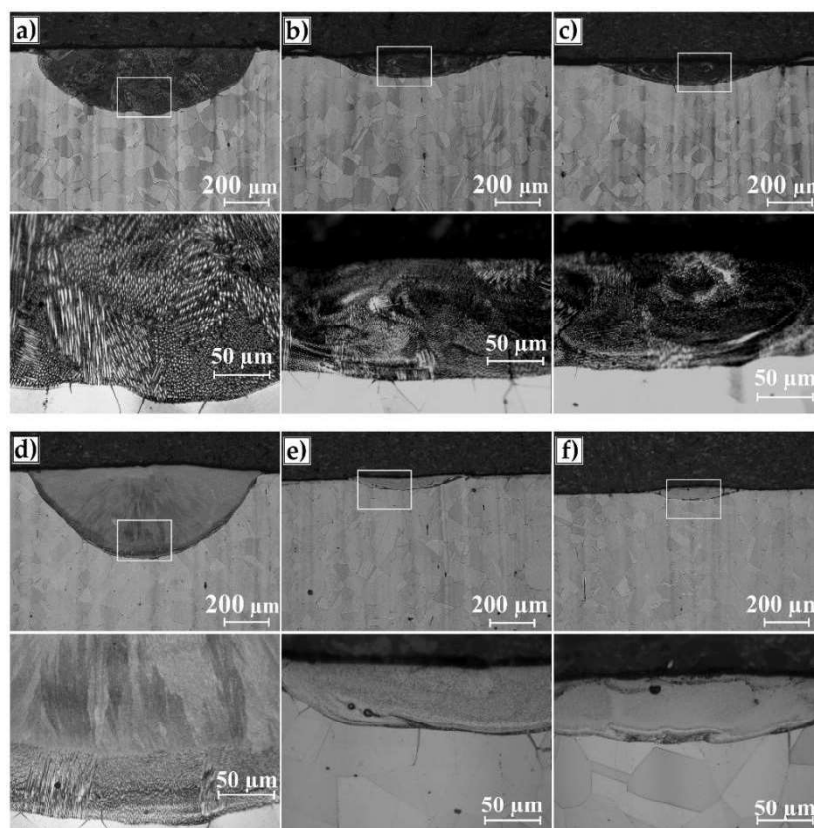


Rys. 13. Trójwymiarowe profile chropowatości powierzchni poddanych obróbce cieplnej laserowej z prędkością skanowania 5 m/min (a, b) i 50 m/min (c, d) dla Monelu 400 przetopionego laserowo (a, c) i Monelu 400 borowanego laserowo z początkową grubością powłoki 200 μm (b, d) [A12]

Dodatek boru do powierzchni stopu Monel 400 spowodował zwiększenie mikrotwardości. Zmiana ta jest tym większa im większa jest grubość powłoki wstępnej w postaci pasty z borem, a także im większa jest prędkość skanowania wiązką lasera. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że zastosowanie najgrubszej powłoki wstępnej oraz największej

prędkości skanowania powoduje rozległe pęknięcia od powierzchni aż do podłoża. Prędkość skanowania wpływa jednak korzystnie na chropowatość powierzchni, która zmniejsza się wraz z jej wzrostem [A12]. W ramach badań wykonano trójwymiarowe profile chropowatości powierzchni i porównywano uzyskane wyniki (Rys. 13).

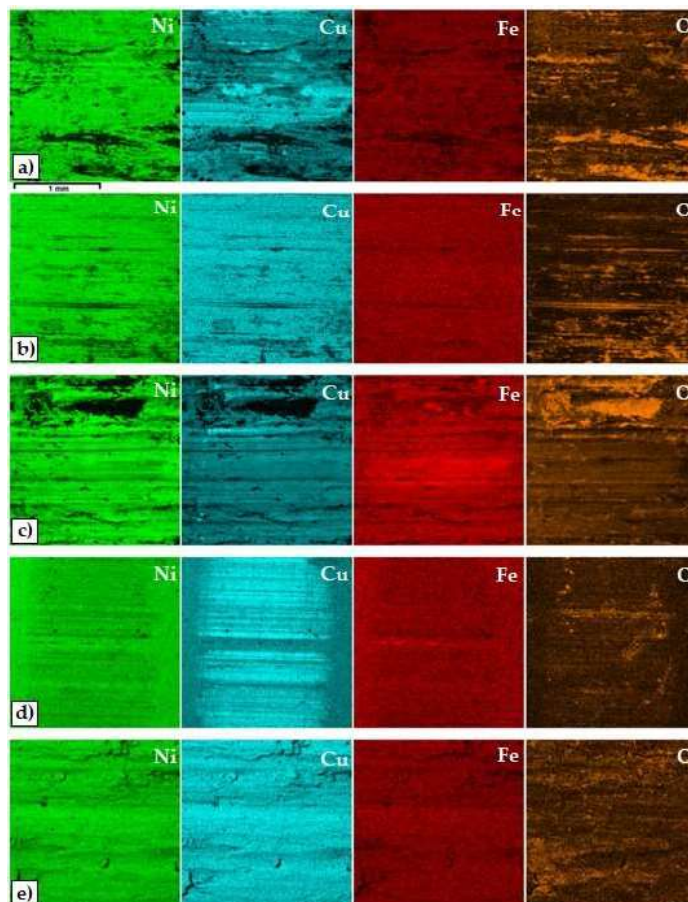
Po zapoznaniu się z literaturą w dostępnym bazach naukowych postanowiłam przeprowadzić badania laserowego borowania stopu Monelu 400 dla ścieżek pojedynczych [A13]. Badań takich nie opisywano do tej pory. Stwierdzono, że początkowa zawartość boru w powłoce wstępnej nanoszonej w postaci pasty (Rys. 14) ma wpływ na głębokość przetopienia.



Rys. 14. Przekroje poprzeczne ścieżek laserowo borowanych z wstępną powłoką boru o grubości 100 µm (a, b, c) oraz 200 µm (d, e, f) wytworzone przy prędkości skanowania wiązki laserowej: 5 m/min (a, d), 25 m/min (b, e), 75 m/min (c, f) [A13]

Głębokość strefy przetopienia zmniejszyła się z 360 µm do 310 µm na skutek wytworzenia na Monelu powłoki wstępnej boru o grubości 100 µm. Oznacza to, że małe stężenie borków w jeziorce topionego metalu zmniejsza przewodnictwo cieplne w układzie Monel 400 – bor. Głębokość strefy przetopienia wzrosła do 420 µm gdy zastosowano powłokę wstępną boru o grubości 200 µm. Można zatem wnioskować, że wystarczająco duża ilość boru w jeziorce zwiększa przewodnictwo cieplne, co skutkuje uzyskaniem głębszych ścieżek. Przetopienie laserem diodowym powierzchni Monelu 400 nie wpłynęło na zmianę mikrotwardości niezależnie od prędkości skanowania, natomiast dodanie boru spowodowało jej wzrost. Im większa zawartość boru oraz większa prędkość skanowania, tym twardość warstwy powierzchniowej jest większa. Zatem największy, bo aż sześciokrotny wzrost mikrotwardości (od 160 HV_{0,1} do 980 HV_{0,1}) zaobserwowano dla ścieżek laserowych

wytworzonych z początkową warstwą boru o grubości 200 μm przy prędkości skanowania wiązki laserowej równej 75 m/min [A13].



Rys. 15. Mapa EDS powierzchni po teście zużycia Monelu 400 laserowo borowanego: a) $v = 5$ m/min i $t_b = 100$ μm , b) $v = 5$ m/min i $t_b = 200$ μm , c) $v = 50$ m/min i $t_b = 100$ μm , d) $v = 50$ m/min i $t_b = 200$ μm oraz Monelu 400 nieobrobionego cieplnie (e) [A14]

W pracy [A14] dokładniej opisano warstwy borowane laserowo na Monelu 400 wytwarzane przy dwóch prędkościach skanowania wiązką laserową: 5 m/min i 50 m/min. Badania skupiły się głównie na testach odporności na zużycie przez tarcie, wyznaczeniu momentu tarcia oraz temperatury w obszarze współpracującej pary cieiernej, jak również określeniu mechanizmu zużycia badanych warstw powierzchniowych (Rys. 15). Badania tych właściwości warstwy borowanej na Monelu po raz pierwszy przeprowadzono w przytoczonej pracy.

Stwierdzono, że odporność na zużycie wzrosła od czterech do kilkudziesięciu razy, w zależności od parametrów procesu borowania laserowego. Dla warstw laserowo stopowanych borem przy użyciu powłoki wstępnej o grubości 100 μm dominującym mechanizmem zużycia było zużycie adhezyjne. Wraz ze wzrostem zawartości boru i prędkości skanowania wiązką lasera podczas badań zużycia można było zaobserwować ścieranie [A14]. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przetapianie laserowe borem jest skuteczną metodą poprawy odporności Monelu 400 na zużycie przez tarcie, a jego poziom jest silnie zależny od mikrostruktury i mikrotwardości otrzymanych warstw, a tym samym od zastosowanych parametrów borowania laserowego.

Laserowe stopowanie stali i nadstopów z udziałem boru może być stosowane w celu zwiększenia twardości oraz odporności na zużycie narzędzi i części maszyn. Należy mieć na uwadze, że na finalnie uzyskane właściwości uwarunkowane są zastosowanymi parametrami obróbki laserowej takimi jak moc, średnica oraz prędkość skanowania wiązki lasera.

4.2.4. Podsumowanie

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy podjęte badania są nowe, oryginalne i ważne w kontekście technologii wytwarzania warstw powierzchniowych na stopach metali, zarówno na stalach jak i superstopach. Za najważniejsze osiągnięcia i element nowości naukowej zawarte w jednotematycznym cyklu publikacji naukowych pt.: **„Mikrostruktura i właściwości laserowo modyfikowanych kompozytowych warstw powierzchniowych zawierających borki metali wytwarzanych na stalach oraz superstopach”** można uznać przede wszystkim:

- określenie wpływu parametrów laserowego przetapiania warstwy borowanej dyfuzyjnie wytworzonej na stalach wysokowęglowych na jej mikrostrukturę i właściwości [A1-A4]
- określenie wpływu parametrów laserowego przetapiania warstwy borowanej dyfuzyjnie modyfikowanej chromem wytworzonej na stalach wysokowęglowych na jej mikrostrukturę i właściwości [A5]
- określenie wpływu parametrów laserowego stopowania przy znaczącym udziale boru w materiale stopującym na mikrostrukturę i właściwości wytwarzanych warstw kompozytowych [A6-A14]
- dobór parametrów laserowego stopowania z udziałem boru i dodatkowego pierwiastka (Cu, Si, Co, Cu, W), który przyczynia się do poprawy właściwości mechanicznych i zapewnia strukturę pozbawioną pęknięć [A7-A11]
- poszerzenie wiedzy w zakresie modyfikacji powierzchni stopów żelaza przy zastosowaniu obróbki hybrydowej (warstwy dyfuzyjne modyfikowane laserowo) pod kątem badań korozyjnych oraz odporności na zużycie [A2, A4, A6, A9 - A11, A14]
- zastosowanie po raz pierwszy stali narzędziowej typu Vanadis do modyfikacji powierzchni przy udziale boru i wiązki lasera [A1-A3, A8, A11]
- wykazanie wyższości stopowania laserowego nad obróbką hybrydową w odniesieniu do minimalizacji zużycia energii [A7]
- określenie parametrów modyfikacji powierzchni oraz właściwości nadstopów niklowo-miedziowych w wyniku laserowego stopowania [A12-A14]
- określenie dominującego mechanizmu zużycia ściernego powierzchni nadstopów niklowo-miedziowych poddanych laserowemu borowaniu [A14].

Zebrane i omówione wyniki badań opublikowane w jednotematycznym cyklu 14 publikacji naukowych pt. **„Mikrostruktura i właściwości laserowo modyfikowanych kompozytowych warstw powierzchniowych zawierających borki metali wytwarzanych na stalach oraz superstopach”** stanowią istotne osiągnięcie, wnosząc wkład w rozwój dyscypliny

inżynieria materiałowa. Prezentowane dane są oryginalne w skali międzynarodowej, czego potwierdzeniem jest opublikowanie ich w renomowanych, recenzowanych czasopismach z listy Ministerstwa Edukacji i Nauki w tym obejmujących publikacje JCR. Wyniki te były również przedmiotem kilku wystąpień na konferencjach o zasięgu międzynarodowym i krajowym.

4.2.5. Dalsze plany naukowe

W ramach dalszych planów naukowych będę kontynuować prace badawcze związaną z modyfikacją laserową warstwy wierzchniej materiałów. Chciałabym rozszerzyć swoje badania o zastosowanie wysokotopliwych pierwiastków i związków takich, jak borki czy węgliki, celem wytwarzania warstw o dużej twardości, które można dodatkowo eksploatować w podwyższonej temperaturze (np. podczas procesów odlewniczych czy obróbki plastycznej na gorąco).

Inspiracją do dalszych badań jest ciągle zapotrzebowanie przemysłu na materiały i warstwy powierzchniowe charakteryzujące się dużą trwałością. Odbываяc staże w ośrodkach krajowych i zagranicznych miałam możliwość współpracy przy badaniach oraz obserwacji nowoczesnych technologii wytwarzania materiałów, warstw i powłok, która mają duży potencjał aplikacyjny. Mam nadzieję, że warstwy, które aktualnie opracowuje lub opracuję w przyszłości zostaną wykorzystane w przestrzeni produkcyjnej. Możliwość opracowywania i być może perspektywa wdrożenia wyników swoich badań jest dla mnie bardzo dużą motywacją.

4.2.6. Literatura

1. Steen, W.M.: Laser material processing – an overview. J Opt A:Pure Appl Opt **2003**;5:S3 - 7.
2. Napadłek, W.; Przetakiewicz, W.: The researches of laser treatment influence on tribology properties of 40H steel. Poland: Scientific Papers of the Institute of Machine Design and Operation of the Technical University of Wrocław; **2002**, 249 - 54.
3. Kusiński, J.P.: Modification of structure and properties of materials by laser surface processing. Proc SPIE – Int Soc Opt Eng 3187, **2005**, 2 - 14.
4. Major, B.: Laser technology in generating microstructure of functionally gradient materials. Arch Metall Mater 50, **2005**, 35 - 46
5. Bonek, M.; Dobrzański, L.A.; Hajduczek, E.; Klimpel, A.: Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool steel. J Mater Process Technol 175, **2006**, 45 -4.
6. Krukovich, M.G.; Prusakov, B.A.; Sizov, I.G.: Plasticity of Boronized Layers; Springer Series in Materials Science; Springer: Berlin, Germany, **2016**; p. 237, ISBN 978-3-319-40012-9.
7. Kulka, M.: Current Trends in Boriding; Springer Series in Materials Science; Springer: Berlin, Germany, **2019**; ISBN 978-3-030-06782-3.
8. Pertek, A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymanych w procesie borowania gazowego, Rozprawa nr. 365, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, **2001**.

9. Przybyłowicz, K.: Teoria i praktyka borowania stali. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce **2000**.
10. Erdoğan, A.: Investigation of high temperature dry sliding behavior of borided H13 hot work tool steel with nanoboron powder. *Surf. Coat. Technol.* 357, **2019**, 886 - 895.
11. Jurči, P.; Hudáková, M.: Diffusion boronizing of H11 hot work tool steel, *J. Mater. Eng. Perform.* 20, **2011**, 1180 - 1187.
12. Kulka, M.; Pertek, A.; Makuch, N.: Two-stage gas boriding of carburized steel in N₂-H₂-BCl₃ atmosphere, *Inżynieria Materiałowa* 4, **2011**, 521 - 524
13. Pertek, A.; Kulka, M.: Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surf. Coat. Technol.* 173, **2003**, 309 - 14.
14. Balandin, Yu. A.: Surface hardening of die steels by diffusion boronizing, borocopperizing, and borochromizing in fluidized bed. *Metal Science and Heat Treatment*, 47, **2005**, 103 - 106.
15. Grachev, S.V.; Mal'tseva, L.A.; Mal'tseva, T.V.; Kolpakovf, A.S.; Dmitriev, M.Yu.: Boronizing and borochromizing in a vibrofluidz bed. *Met Sci Heat Treat* 41, **1999**, 465 – 468.
16. Sikorski, K.; Wierzchon, T.; Bielinski, P.: X-ray microanalysis and properties of multicomponent plasma-borided layers on steels. *J. Mater. Sci.* 33, **1998**, 811 - 5.
17. Bartkowska, A.; Pertek, A.; Jankowiak, M.; Jóźwiak, K.: Laser surface modification of borochromizing C45 steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 57, **2012**, 211 - 214.
18. Pertek, A.; Kulka, M. Characterization of single tracks after laser surface modification of borided 41Cr4 steel. *Appl. Surf. Sci.* 205, **2003**, 137 - 142.
19. Bartkowska A., Pertek A., Kulka M., Klimek L.: Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel. *Optics & Laser Technology* 74, **2015**, 145 – 157.
20. Bartkowska, A.; Pertek, A.; Popławski, M.; Bartkowski, D.; Przestacki, D.; Miklaszewski, A.: Effect of laser modification of B-Ni complex layer on wear resistance and microhardness. *Optic & Laser Technology* 72, **2015**, 116-124.
21. Bartkowska, A.; Pertek, A.: Laser production of B-Ni complex layers. *Surface and Coatings Technology* 248, **2014**, 23 – 29.
22. Safonov, A.N. Special features of boronizing iron and steel using a continuous-wave CO₂ laser. *Met. Sci. Heat Treat.* 40, **1998**, 6–10.
23. Morimoto, J.; Ozaki, T.; Kubohori, T.; Morimoto, S.; Abe, N.; Tsukamoto, M.: Some properties of boronized layers on steels with direct diode laser. *Vacuum* 83, **2009**, 185 - 189.
24. <https://bortec.de/> (aktualne dn.: 31.03.2020)
25. <https://www.diffusion-alloys.com/boronising> (aktualne dn.: 31.03.2020)
26. Pertek-Owsianna, A.; Kulka, M.; Jankowiak, M.: Badania struktury i właściwości borowanej stali konstrukcyjnej 41Cr4 i narzędziowej 102Cr6. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji* 26, **2006**, 167 - 176.
27. Bartkowska A.: Właściwości tribologiczne laserowo stopowanych molibdenem warstwy powierzchniowych stopów żelaza o różnej zawartości węgla. *Tribologia* 4, **2015**, 9 - 20
28. Nakata, K.; Tomoto, K.; Matsuda, F.: Laser boronizing of copper alloy. *Trans. JWRI* 25, **1996**, 37 - 41.

5. Informacje o wykazaniu się istotną aktywnością naukową

Osiągnięcia naukowo-badawcze przed doktoratem

W roku 2008 ukończyłam studia na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej z tytułem magistra inżyniera na kierunku Inżynieria Materiałowa w specjalności materiały metalowe i tworzywa sztuczne broniąc pracę pt. „Mikrostruktura i właściwości warstw boroazotowanych”. W tym samym roku rozpoczęłam studia doktoranckie na macierzystym wydziale. Podczas trwania studiów rozwijałam swoją wiedzę na studiach podyplomowych i szkoleniach m.in. z zakresu mechanizmów zużycia części maszyn oraz zarządzania projektami badawczo-rozwojowymi, z których wiedzę wykorzystuję w pracy naukowo-dydaktycznej.

W roku 2009 byłam stypendystką projektu systemowego „Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski” jak również otrzymałam stypendium Rektora dla najlepszych doktorantów.

W tym samym roku byłam jednym z wykonawców w projekcie finansowanym przez MNiSW w drodze konkursów (MNiSW nr N N507 452537).

Uczestniczyłam także w ekspertyzach dla przemysłu obejmujących badania mikrostruktury, twardości i hartowności dostarczonych wyrobów i próbek.

W roku 2011 podjęłam pracę na stanowisku asystenta w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Poznańskiej. Prowadzone przez mnie badania naukowe dotyczyły technologii wytwarzania warstw powierzchniowych metodami obróbki galwanicznej, dyfuzyjnej oraz laserowej, a także łączenia tych metod w technologie hybrydowe przy użyciu lasera technologicznego CO₂ na stali średniowęglowej.

O ile właściwości warstw borowanych dyfuzyjnie są znane, to na temat warstw będących połączeniem boru z innymi pierwiastkami chemicznymi nie ma wielu publikacji. W związku z tym podczas prowadzonych przeze mnie badań w ramach pracy doktorskiej analizowałam wpływ typowych metali stosowanych w galwanotechnice (Ni, Cr, Cu) na właściwości warstw borowanych. Skupiałam się nad opracowaniem procesów technologicznych związanych z wytwarzaniem hybrydowych warstw powierzchniowych galwaniczno-dyfuzyjnych i galwaniczno-dyfuzyjno-laserowych. Ponadto proponowałam metody wytwarzania warstwy galwaniczno-powłokowo-laserowej, gdzie na wstępnej powłoce galwanicznej wytwarzana jest dodatkowa powłoka z pasty borującej. W odniesieniu do wytworzonych warstw powierzchniowych opracowałam skalę wzorców służącą do oceny ich kruchości. Skala ta jest o tyle istotna, że wyraźnie pokazuje pozytywny wpływ wprowadzanych pierwiastków i obróbki laserowej na zmniejszenie kruchości w odniesieniu do tradycyjnych warstw borowanych przy jednoczesnym zachowaniu dobrych właściwości eksploatacyjnych. Na podstawie prowadzonych badań naukowych związanych z wytwarzaniem warstw hybrydowych udowodniłam, że bez względu na zastosowaną metodę wytwarzania istnieje możliwość uzyskania takich samych lub podobnych wybranych właściwości warstw pod warunkiem, że w sposób odpowiedni dobierze się parametry obróbki laserowej. Dlatego należy zawsze brać pod uwagę technologie mniej energochłonne. Ogranicza to w znacznym stopniu zużycie energii potrzebnej do długotrwałych procesów dyfuzyjnych. W związku z bardzo dużym zainteresowaniem przemysłu stalami narzędziowymi, które znajdują

zastosowanie na stemple, matryce czy formy, postanowiłam wytwarzać warstwy powierzchniowe z udziałem boru na stalach narzędziowych.

W roku 2013 obroniłam rozprawę doktorską pt. „Wpływ wybranych pierwiastków oraz obróbki laserowej na strukturę i właściwości warstwy borowanej wytwarzanej na stali konstrukcyjnej”.

W ramach realizacji badań stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej byłam kierownikiem i głównym wykonawcą projektu badań prowadzonych w ramach działalności statutowej dla Młodych Naukowców i Doktorantów w roku 2012. Byłam także wykonawcą w badaniach z dotacji statutowej na macierzystym wydziale.

Począwszy od realizacji pracy magisterskiej do chwili obecnej prowadzę prace badawcze z zakresu inżynierii powierzchni. Badania obejmują kompleksowe obróbki powierzchniowe stopów żelaza, na które składają się procesy dyfuzyjne (borowanie, azotowanie, boroazotowanie, boromiedziowanie), galwaniczne (niklowanie, chromowanie, miedziowanie), galwaniczno-dyfuzyjne oraz modyfikacja laserowa (hartowanie laserowe, przetapianie laserowe, stopowanie laserowe).

Wyniki prowadzonych przeze mnie badań miałam przyjemność przedstawić na seminariach i konferencjach o zasięgu krajowym.

W roku 2012 na zaproszenie przewodniczącego Komisji Nauki o Materiałach PAN Oddział w Poznaniu miałam zaszczyt przedstawić wyniki moich osiągnięć z zakresu modyfikacji powierzchni stopów metali.

Osiągnięcia naukowo-badawcze po doktoracie

Po uzyskaniu stopnia doktora prowadzone przeze mnie badania naukowe i prace rozwojowe skupiły się wokół zagadnień modyfikacji warstwy wierzchniej zarówno konwencjonalnych stali narzędziowych jak i stali proszkowych typu Vanadis. Celem prowadzonych przeze mnie badań jest wytworzenie warstw powierzchniowych wzbogaconych w fazy borkowe, które będą na powierzchni materiału tworzyć twardą i odporną na zużycie i korozję warstwę powierzchniową.

W roku 2014 byłam stypendystką stypendium celowego dla doktorantów i młodych doktorów w ramach projektu: Inżynier przyszłości. W ramach tego stypendium odbyłam staże naukowe w następujących ośrodkach: Politechnika Śląska (14 dni), Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy (14 dni), Slovak University of Technology in Bratislava (14 dni).

W tym samym roku zostałam zaproszona przez Dyrektora Instytutu Technik Wytwarzania Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy na Seminarium Instytutu na którym wygłosiłam referat „Zastosowanie wybranych metod obróbki powierzchniowej do modyfikacji stopów metali”.

W latach 2015, 2018 i 2020 byłam kierownikiem tematów badawczych finansowanych z dotacji celowej MNiSW, służącej rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich.

W 2017, 2018 oraz 2021 roku odbyłam staże w ramach programu Erasmus plus oraz CEEPUS dzięki którym zdobyła dodatkowe doświadczenie dydaktyczne oraz nawiązała współpracę naukową z ośrodkami przyjmującymi: Technical University of Kosice (2x 7 dni),

University of Žilina (7 dni), Czech Technical University in Prague (30 dni), Slovak University of Technology in Bratislava (2x 7 dni).

W roku 2018 uzyskałam stypendium krajowego programu stypendialnego Republiki Słowackiej w trakcie którego odbyłam 10-miesięczny staż trwający od 01.10.2018 r. do 31.07.2019 r. Podczas stażu realizowałam badania z zakresu obróbki kriogenicznej stali Vanadis 6, gdzie analizowałam wpływ różnych temperatur obróbek podzerowych oraz temperatur odpuszczania na mikrostrukturę i wybrane właściwości porównując je z konwencjonalną obróbką cieplną tej stali.

Za osiągnięcia naukowe uzyskane w roku akademickim 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 otrzymałam nagrody zespołowe JM Rektora Politechniki Poznańskiej. Prace badawcze których miałam znaczący udział zostały doceniona na konferencjach krajowych gdzie przyznano III miejsce w sesji posterowej (rok 2016 – VI Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni”; Spała) oraz wyróżnienie za najlepszą fotografię naukową (rok 2018 – VII Krajowa Konferencja Nowe Materiały - Nowe Technologie w Przemysle Okrętowym i Maszynowym; Szczecin -Ystad).

Posiadane umiejętności badawcze i analityczne zaowocowały podjęciem współpracy na arenie międzynarodowej czego efektem są publikacje w czasopismach posiadających współczynnik Impact Factor oraz udział w realizacji projektu poza granicami kraju (Słowacja).

Moje zaangażowanie i sumienność, dociekliwość naukowa i umiejętność pracy w zespole pozwoliły mi na nawiązanie współpracy w ramach projektów badawczych, naukowo-dydaktycznych oraz ekspertyz, gdzie pełniłam rolę kierownika i wykonawcy. Czynnie uczestniczyłam w projektach realizowanych z dotacji Narodowego Centrum Badań i Rozwoju NCBR (Lider V, Lider VI, PBS3, POIR). Badania te związane były z tematyką inżynierii powierzchni i obróbką kompozytowych warstw powierzchniowych.

Bardzo sobie cenię udział w projektach, które uzyskały dotacje w ramach konsorcjum między uczelnią, a przemysłem. Miałam możliwość uczestniczenia w badaniach nad „Opracowaniem nowej generacji pieców do azotowania z technologią ZeroFlow Feedback Control, gdzie liderem projektu była firma SECO/WARWICK S.A. (POIR.04.01.04-00-0010/16) oraz w projekcie „Laserowe wspomaganie obróbki skrawaniem nadstopów i stopów tytanu stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych”, gdzie jednym ze współwykonawców była firma PRATT & WHITNEY (PBS3/B5/36/2015).

Również cenię sobie nawiązaną współpracę z ośrodkami naukowymi m. in. Slovak University of Technology in Bratislava, Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach, Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu, które zaowocowały publikacjami.

Wyniki prowadzonych przeze mnie badań miałam możliwość przedstawić na konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym odbywających się w Polsce, Czechach, Bułgarii oraz Rumunii.

W obszarze moich zainteresowań badawczych po doktoracie potwierdzonych publikacjami są:

- wysokotopliwe związki węglików wytwarzane technikami wysokoenergetycznymi do których należy laserowe napawanie (laser cladding),
- modyfikacja warstwy wierzchniej z udziałem boru stali mających zastosowanie w rolnictwie (stal Hardox, stal borowa),

- modyfikacja powierzchni superstopów takich jak niklowo-chromowy superstop Waspaloy, Inconel,
- laserowe wspomaganie toczenia trudnoskrawalnych materiałów i powłok (ang. LMA – Laser Assisted Machining),
- obróbka kriogeniczna stali narzędziowych.

Jestem redaktorem gościnnym w czasopiśmie Crystals (ISSN 2073-4352) i Coatings (ISSN 2079-6412), członkiem rady recenzentów w czasopiśmie Materials (ISSN 1996-1944) oraz redaktorem tematycznym w czasopiśmie Crystals. Czynnie udzielam się jako recenzent w czasopismach zagranicznych (JCR) oraz w artykułach zgłaszanych na konferencje.

Jestem autorką lub współautorką ponad 80 publikacji naukowych (17 przed doktoratem i 67 po doktoracie) w tym 22 w czasopismach indeksowanych na liście JCR (1 przed doktoratem i 21 po doktoracie). Wyniki swoich prac badawczych przedstawiłam w ramach konferencji krajowych (8 referatów, 8 sesji posterowych) i międzynarodowych (3 referaty, 3 sesje posterowe).

Szczegółowe zestawienie m.in. współpracy naukowej z ośrodkami krajowymi i zagranicznymi, udziału w projektach badawczych, publikacji, wygłoszonych referatów zostało przedstawione w załączniku nr 4 (Wykaz osiągnięć naukowych).

6. Informacje o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

6.1. Dorobek dydaktyczny

Z pełnym zaangażowaniem prowadzę zajęcia z zakresu materiałoznawstwa i obróbki cieplnej realizowanych na kierunkach inżynieria materiałowa, inżynieria biomedyczna, mechanika i budowa maszyn, mechatronika, zarządzanie i inżynieria produkcji. Szczegółowe dane zamieściłam w formie tabeli z okresu przed i po uzyskaniu stopnia doktora uwzględniając przedmiot, rodzaj zajęć, kierunek i stopień studiów jak również ilość zrealizowanych godzin z poszczególnych zajęć dydaktycznych.

Zajęcia dydaktyczne prowadzone przed uzyskaniem stopnia doktora

W okresie studiów doktoranckich i przed uzyskaniem stopnia doktora aktywnie brałam udział w pracach organizacyjnych na rzecz Uczelni/Wydziału oraz w zajęciach dydaktycznych.

Prowadziłam zajęcia laboratoryjne z zakresu obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, nauki o materiałach na studiach I stopnia na kierunkach: inżynieria materiałowa, mechanika i budowa maszyn, mechatronika i inżynieria biomedyczna. Na studiach II stopnia prowadziłam zajęcia laboratoryjne pt. „Modelowanie struktury i właściwości warstw dyfuzyjnych” na kierunku inżynieria materiałowa. Miałam również swój udział we współprowadzeniu zajęć laboratoryjnych pt.: „Termodynamika techniczna”, „Ekomateriały”.

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora miałam znaczący wkład w tworzenie i przygotowanie instrukcji do zajęć laboratoryjnych z przedmiotów obieralnych „Ekomateriały” oraz „Modelowanie struktury i właściwości warstw dyfuzyjnych”.

*Studia stacjonarne, studia niestacjonarne (N)

Rok akademicki	Nazwa przedmiot	Rodzaj zajęć	Kierunek studiów	Stopień studiów/semestr	Liczba godzin*
2013/2014	Podstawy techniki wytwarzania: Podstawy obróbki cieplnej	laboratorium	Inżynieria materiałowa/ inżynieria biomedyczna	I / 3	120
	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	120
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	45

	Inżynieria wytwarzania I: Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	45
2012/2013	Inżynieria wytwarzania I: Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechatronika	I / 2	75
	Wprowadzenie do nauki o materiałach	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 4	60
	Nauka o materiałach z elementami chemii	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	30
	Inżynieria wytwarzania I: Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechatronika	I / 2	37,5
	Inżynieria wytwarzania I: Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	45
2011/2012	Wprowadzenie do nauki o materiałach	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	150
	Wprowadzenie do nauki o materiałach	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 4	
	Obróbka cieplna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	30
	Inżynieria wytwarzania: obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechatronika	I / 2	75
	Nauka o materiałach z elementami chemii	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	28
2010/2011	Inżynieria wytwarzania: obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechatronika	I / 2	37,5

	Nauka o materiałach z elementami chemii	laboratorium	Zarządzanie i inżynieria produkcji	I / 2	30 16 (N)
	Nauka o materiałach z elementami chemii	laboratorium	Mechatronika	I / 2	30
	Modelowanie struktury i właściwości warstw dyfuzyjnych	laboratorium	Inżynieria materiałowa	II / 3	15
	Obróbka cieplna (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	15
	Termodynamika techniczna (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	30
2009/2010	Obróbka cieplna (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	15
	Ekomateriały (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 7	7,5
	Ekomateriały (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 6	15
2008/2009	Nauka o materiałach z elementami chemii (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Logistyka	I / 1	18
	Nauka o materiałach z elementami chemii (współprowadzenie zajęć)	laboratorium	Zarządzanie i inżynieria produkcji	I / 21	60
Suma godzin dydaktycznych przed uzyskaniem stopnia doktora					1149,5

Zajęcia dydaktyczne prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora z pełnym zaangażowaniem prowadzę zajęcia dydaktyczne na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej oraz na Wydziale Inżynierii Mechanicznej. Prowadzę wykłady z zakresu podstaw obróbki cieplnej na kierunku Inżynieria Materiałowa i Inżynieria Biomedyczna na studiach stacjonarnych I stopnia oraz nauki o materiałach na studiach niestacjonarnych I stopnia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn. Również prowadzę zajęcia laboratoryjne pt. „Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna”, „Podstawy nauki o materiałach II” na kierunku inżynieria materiałowa oraz „Podstawy obróbki cieplnej” na kierunkach inżynieria materiałowa i inżynieria biomedyczna. Prowadzę lub prowadziłam w latach poprzednich zajęcia pt. „Nauka o materiałach z elementami chemii”, „Obróbka cieplna i spawalnictwo” na kierunku mechanika i budowa maszyn.

Po uzyskaniu stopnia doktora przygotowałam autorskie instrukcje wraz z próbkami do zajęć laboratoryjnych z zakresu materiałoznawstwa i obróbki cieplnej dla kierunku inżyniera materiałowa.

Jestem osobą odpowiedzialną za moduł kształcenia przedmiotu realizowanego na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn „Nauka o materiałach z elementami chemii” oraz na kierunku Inżynieria Materiałowa i Inżynieria Biomedyczna „Podstawy obróbki cieplnej”.

- „Nauka o materiałach z elementami chemii” na studiach niestacjonarnych I stopnia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn prowadzonych na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej) decyzja nr 613/03/2016 Dziekana WBMiZ z dn 30.03.2016
- „Podstawy obróbki cieplnej” na studiach stacjonarnych I stopnia na kierunku Inżynieria Materiałowa i Inżynieria Biomedyczna prowadzonych na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej (Wydział Inżynierii Mechanicznej – kierunek Inżynieria Biomedyczna oraz Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej – kierunek inżynieria materiałowa) decyzja nr 457/03/2016 Dziekana WBMiZ z dn. 30.03.2016 r.

Swoją wiedzę i doświadczenie dydaktyczne staram się również pogłębiać podczas stypendiów naukowo-dydaktycznych. Staram się brać czynny udział w działalności na rzecz umiędzynarodowienia procesu kształcenia poprzez występowanie z referatami (prezentacje multimedialne) i wymianę doświadczeń naukowo-dydaktycznych podczas wyjazdów realizowanych w ramach programów Erasmus Plus i CEEPUS.

*Studia stacjonarne, studia niestacjonarne (N)

Rok akademicki	Nazwa przedmiot	Rodzaj zajęć	Kierunek studiów	Stopień studiów/semestr	Liczba godzin*
2020/2021	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	60
	Podstawy obróbki cieplnej	wykład	Inżynieria materiałowa	I / 3	15
	Podstawy obróbki cieplnej	laboratorium	Inżynieria biomedyczna	I / 3	60
	Podstawy obróbki cieplnej	wykład	Inżynieria biomedyczna	I / 3	15
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	30
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 1	34 (N)
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	8 (N)
	Nauka o materiałach z elementami chemii	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	30
2019/2020	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	60
	Podstawy obróbki cieplnej	laboratorium	Inżynieria biomedyczna	I / 3	45
	Podstawy obróbki cieplnej	wykład	Inżynieria materiałowa/ Inżynieria biomedyczna	I / 3	15
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	wykład	Inżynieria materiałowa	I / 5	30
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 1	34 (N)
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	8 (N)
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	30

2018/2019	staż naukowy				
2017/2018	Podstawy obróbki cieplnej	wykład	Inżynieria materiałowa/ inżynieria biomedyczna	I / 3	15
	Podstawy obróbki cieplnej	laboratorium	Inżynieria biomedyczna	I / 3	45
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	45
	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	90
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 1	34 (N)
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechatronika	I / 3	12 (N)
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	15
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	8 (N)
2016/2017	Podstawy obróbki cieplnej	wykład	Inżynieria materiałowa/ inżynieria biomedyczna	I / 3	15
	Podstawy obróbki cieplnej	laboratorium	Inżynieria biomedyczna	I / 3	45
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	45
	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	90
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 1	34 (N)
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 3	16
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	75

	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	8 (N)
2015/2016	Podstawy obróbki cieplnej	wykład / laboratorium	Inżynieria materiałowa/ inżynieria biomedyczna	I / 3	15/60
	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	120
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	45
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	90
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 1	34 (N)
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechatronika	I / 3	16
	Materiałoznawstwo	laboratorium	Mechatronika	I / 1	12
	Nauka o materiałach z elementami chemii	wykład	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	8 (N)
2014/2015	Podstawy obróbki cieplnej	laboratorium	Inżynieria materiałowa/ inżynieria biomedyczna	I / 3	105
	Podstawy nauki o materiałach II	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 3	90
	Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna	laboratorium	Inżynieria materiałowa	I / 5	60
	Obróbka cieplna i spawalnictwo	laboratorium	Mechanika i budowa maszyn	I / 2	60
Suma godzin dydaktycznych po uzyskaniu stopnia doktora					1737

Promotorstwo prac dyplomowych

Byłam promotorem 22 prac dyplomowych inżynierskich oraz 11 prac dyplomowych magisterskich. Obecnie jako promotor prowadzę 1 pracę magisterską i jestem opiekunem naukowym 3 studentów prac inżynierskich.

Jestem współautorem pracy naukowej ze studentką realizującą dyplom inżynierski pod moim kierunkiem, który został opublikowany w polskim czasopiśmie anglojęzycznym: Bartkowska A., Bartkowski D., Przestacki D., Talarczyk M. (studentka): „Microstructure and selected properties of boronized layers produced on C45 and CT90 steel after modification by diode laser” Archives of Mechanical Technology and Materials, 36 (2016) 51-58.

Jestem promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Kuklińskiego na temat: „Laserowe wspomaganie procesu toczenia stopu niklowo-miedziowego z warstwą borowaną” pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. nadzw. PP z dn. 14.03.2019 r.

Rodzaj studiów	Rok obrony pracy dyplomowej	Student/ Kierunek/ Numer albumu	Temat pracy dyplomowej
I stopnia (inżynierskie)	2021	Gabriela Jóźwiak/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowa obróbka stali narzędziowej przy użyciu pierwiastków boru i molibdenu
	2021	Paweł Sidor/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ gęstości mocy wiązki lasera na mikrostrukturę i wybrane właściwości warstwy borowanej dyfuzyjnie
	2021	Klaudia Cygańska/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Zmiany mikrostruktury i wybranych właściwości w wyniku oddziaływania wiązki lasera na warstwę borowaną dyfuzyjnie
	2020	Mikołaj Rutkowski/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Modyfikacja warstwy borowanej dyfuzyjnie za pomocą wiązki lasera na stopach żelaza
	2020	Jakub Jercha/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Modyfikacja borem podłoża stalowego za pomocą wiązki lasera
	2019	Daria Pacholek/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ mocy wiązki lasera na mikrostrukturę i wybrane właściwości warstw dyfuzyjnych B-Cr wytwarzanych na stali narzędziowej
	2019	Magdalena Iwaniuk/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ podłoża na mikrostrukturę i wybrane właściwości warstw zawierających bor modyfikowanych wiązką lasera

2018	Dominika Jasik / Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Mikrostruktura i wybrane właściwości kompleksowych warstw B-Ni
2018	Anita Mertka / Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ parametrów laserowej obróbki cieplnej na mikrostrukturę i wybrane właściwości warstw zawierających bor i chrom
2018	Aleksandra Świdarska/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ parametrów laserowej obróbki cieplnej na mikrostrukturę i wybrane właściwości warstw zawierających bor i nikiel
2018	Hanna Michalska/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Mikrostruktura i wybrane właściwości kompleksowych warstw B-Cr
2017	Ewa Przybył/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Mikrostruktura i wybrane właściwości mechaniczne borowanych stali narzędziowych po laserowej modyfikacji
2017	Monika Kamińska/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie wybranymi pierwiastkami stali wysokowęglowej
2017	Magdalena Paruch/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie borem i molibdenem stali narzędziowej Vanadis
2016	Bartosz Zając/ Mechanika i budowa maszyn/ [REDACTED]	Modyfikacja laserowa warstwy powierzchniowej na stali CT90 za pomocą lasera CO ₂
2016	Małgorzata Talarczyk/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ zawartości węgla na właściwości warstwy borowanej po przetapianiu wiązką lasera
2016	Marta Grzelak/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ parametrów wiązki laserowej na powierzchnię stali narzędziowej po procesie borowania
2016	Edyta Frantczak/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe napawanie wybranymi proszkami na stali C45
2015	Rafał Fordoński/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ modyfikacji laserowej tlenkiem Ni ₂ O ₃ na strukturę i wybrane właściwości stali C45
2015	Michał Zieliński/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowa modyfikacja warstw borowanych i boroniklowanych
2015	Bartosz Sipiak/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie stali C45 borem i chromem
2015	Wioleta Chmielecka/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie borem

		Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	i molibdenem stali narzędziowej CT90
II stopnia (magisterskie)	2020	Marta Pawlic/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ laserowej obróbki cieplnej na wybrane właściwości warstw po różnych obróbkach powierzchniowych
	2020	Magdalena Iwaniuk/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Analiza mikrostruktury i wybranych właściwości stali przed i po procesie azotowania dyfuzyjnego
	2019	Magdalena Paruch-Pszczółka/ Mechanika i budowa maszyn/ [REDACTED]	Wpływ wybranych parametrów laserowej obróbki cieplnej na mikrostrukturę i wybrane właściwości stali narzędziowej po borowaniu dyfuzyjnym
	2018	Monika Kamińska/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ wybranych parametrów laserowej obróbki cieplnej na mikrostrukturę i wybrane właściwości stali 1.4550
	2018	Ewa Przybył/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Wpływ wybranych parametrów laserowej obróbki cieplnej na mikrostrukturę i wybrane właściwości stopu Inconel X-750
	2017	Edyta Frantczak/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie stali narzędziowej CT90 wybranymi pierwiastkami chemicznymi
	2017	Małgorzata Talarezyk/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie proszkowej stali narzędziowej borem i molibdenem
	2016	Katarzyna Pływaczyk/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Powłoki ochronne wytwarzane na wyrobach stalowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym
	2016	Wioleta Chmielecka/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie borem i chromem stali narzędziowej Vanadis
	2016	Jakub Zarzyński/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Mikrostruktura i wybrane właściwości mechaniczne stali narzędziowej CT90 laserowo stopowanej molibdenem i borem
	2016	Bartosz Sipiak/ Inżynieria materiałowa/ [REDACTED]	Laserowe stopowanie borem i wolframem stali narzędziowej Vanadis

6.2. Dorobek organizacyjny

W okresie przed jak i po uzyskaniu stopnia doktora brałam i biorę czynny udział w życiu mojej macierzystej uczelni, Politechniki Poznańskiej:

Działalność organizacyjna prowadzona w Politechnice Poznańskiej

- Członek zespołu przygotowującego raport samooceny kierunku Inżynieria Materiałowa w roku akademickim 2015/2016 na cele wizytacji zespołu oceniającego Polskiej Komisji Akredytacyjnej.
- Sekretarz na obronie doktoratu:
 - mgr inż. Dorota Kapcińska-Popowska „Wpływ borowania dyfuzyjnego i laserowego na strukturę i właściwości stali konstrukcyjnej stosowanej na części maszyn rolniczych” (2015); promotor: dr hab. inż. A. Pertek-Owsianna, prof. PP
 - mgr inż. Krzysztof Wiśniewski „Struktura i właściwości warstw wierzchnich stali zawierających bor kształtowanych metodami dyfuzyjno-laserowymi” (2013); promotor: dr hab. inż. A. Pertek-Owsianna, prof. PP
- Przewodnicząca Koła Inżynierii Materiałowej w latach 2010-2012
- Przygotowanie posteru przedstawiającego badania realizowane w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Poznańskiej w ramach XXII Seminarium Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego; 18-21.06.2017, Poznań
- Nadzór nad terminami prowadzonych zajęć i konsultacji w Zakładzie Metaloznawstwa i Inżynierii Powierzchni (od 2010 roku)
- Nadzór nad laboratorium badań odporności korozyjnej w szczególności dbanie o stan techniczny urządzenia potencjostat-galwanostat Atlas-Solich 0531 EU&IA. Szkolenia i nadzór użytkowników (od 2014 roku).
- Nadzór nad stanowiskiem do badań odporności na zużycie przez tarcie MBT-01 (od 2012 roku).

Członkostwo w organizacjach i towarzystwach naukowych

- Członek Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego od dn. 30.01.2020 r.
- Członek PZITB (Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa) od dn. 14.12.2016 r.; legitymacja członkowska nr 9129
- Członek zwyczajny SIMP (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich) od dn. 21.02.2013 r.; legitymacja członkowska: seria CD Nr 007058

6.3. Popularyzacja nauki

W okresie przed jak i po uzyskaniu stopnia doktora brałam i biorę czynny udział w popularyzacji nauki na festiwalach, które mają na celu zaznajomienie młodych słuchaczy z szeroko pojętą inżynierią:

- Popularyzacja nauki w ramach Edycji Poznańskiego Festiwalu Nauki i Sztuki POLIFESTIWAL
 - XVIII Festiwal Nauki i Sztuki POLIFESTIWAL 2015: wykład „Lot w kosmos - wczoraj a dziś” dn. 16.04.2015 r.
 - XV Festiwal Nauki i Sztuki: wykład „Czy znasz metody badań materiałów?” dn. 29.03.2012 r.
 - XIV Festiwal Nauki i Sztuki: wykład „Warstwy galwaniczne i dyfuzyjne stosowane w przemyśle motoryzacyjnym” dn. 31.03.2011 r.
 - XIII Festiwal Nauki i Sztuki: wykład „Zastosowanie lasera technologicznego CO₂ w kształtowaniu warstwy wierzchniej po zabiegach obróbki galwanicznej i cieplno-chemicznej” dn. 29.04.2010 r.
- Targi Edukacyjne – reprezentowanie Wydziału oraz Instytutu; dn. 14.03.2009 r. oraz dn. 19.02.2010 r.
- Noc Naukowców - Materiałoznawstwo szyte na miarę – cykl konkursów dla dzieci w wieku przedszkolnym i szkolnym; dn. 25.09.2009 r.
- II konferencja Studentów i Doktorantów BalCon2018 organizowana przez Katedrę Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie Politechniki Gdańskiej (20.04.2018 – 23.04.2018) - opieka merytoryczna nad doktorantem M. Kuklińskim, który prezentował wyniki wspólnych badań: „Kukliński M., Bartkowska A., Przestacki D.: Investigation of laser heat treated Monel 400. MATEC Web of Conference 219, 02005 (2018).


(podpis wnioskodawcy)