

**Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
KATEDRA INŻYNIERII POWIERZCHNI I ANALIZ MATERIAŁÓW**

**Dr hab. inż. Sławomir KAĆ, prof. AGH
Kierownik Katedry**

Kraków, dnia 31 maja 2024 r.

Sz. P. Dr hab. inż. Sławomir Błasiak, prof. PŚk
Dyrektor Naukowy Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechnika Świętokrzyska
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki Soboń
pt. Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych
zimnym gazem

Promotor: dr hab. inż. Wojciech Żórawski, prof. PŚk
Promotor pomocniczy: dr hab. Medard Makrenek, prof. PŚk

1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą do wykonania recenzji rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Dominiki Soboń było pismo nr MAA-511/18/2024 z dnia 12 lutego 2024 r. p. Dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej.

2. Opis sylwetki naukowej Doktorantki

W latach 2012 - 2017 p. Dominika Soboń studiowała na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej na kierunku Inżynieria Bezpieczeństwa w specjalności: przemysłowe systemy bezpieczeństwa, uzyskując tytuł inżyniera, a następnie na kierunku Transport w specjalności: logistyka i spedycja, uzyskując tytuł magistra. Od marca do września 2018 pracowała w Katedrze Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych Politechniki Świętokrzyskiej na stanowisku starszy referent techniczny. W 2018 podjęła studia doktoranckie na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej. Magister inżynier Dominika Soboń brała udział w 7 konferencjach naukowych oraz seminarium obróbki laserowej. Jest autorem lub współautorem 13 publikacji, w tym 6 publikacji w czasopiśmie wymienionym w wykazie MNiSzW (Część A) wydanych za granicą, 2 publikacji w materiałach z konferencji międzynarodowej (zarejestrowanych w Web of Science), 3 publikacji w recenzowanych czasopismach wymienionym w wykazie ministra MNiSzW (część B), 1 publikacji w pozostałych czasopismach oraz 1 publikacji w monografii. Magister inżynier Dominika Soboń jest członkiem zespołu badawczego: "Badania właściwości materiałów pod wpływem wymuszeń zewnętrznych". Brała udział w pracy przy projektach: NCBiR INNOLOT „Additive Manufacturing Processes and Hybrid Operations Research for Innovative Aircraft Technology Development” 2013-2018; Opus “Kształtowanie obróbką laserową natryskanych

**Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 38 17; e-mail: Slawomir.Kac@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl,



zimnym gazem powłok cermetalowych zawierających smar stały” 2018-2022, oraz „Opracowanie technologii obróbki aluminiowych oraz kompozytowych struktur pierwszo i drugorzędowych. [TECHNIKS]” (15-30.09.2022). Doktorantka ubiega się po raz pierwszy o przyznanie stopnia doktora nauk technicznych.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska p. mgr inż. Dominiki Soboń dotyczy modyfikacji laserowej powłok Ti oraz Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem. Tematyka pracy ma charakter interdyscyplinarny i wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna oraz inżynieria materiałowa, gdyż dotyczy procesu wytwarzania (wraz z optymalizacją parametrów nakładania powłok, jak i modyfikacji laserowej), charakterystyki morfologii, składu chemicznego i fazowego oraz analizy właściwości (głównie mechanicznych), jak również odporności na zużycie tribologiczne powłok. Praca ma klasyczny dla prac doktorskich układ. Podzielona jest na dwie główne części.

Część I, zatytułowana „Analiza literatury”, obejmująca 24 strony, zawiera analizę literatury, będącą wprowadzeniem do badań własnych. Autorka opisała krótko technologię wytwarzania powłok metodą natryskiwania zimnym gazem. Opisała również proces modyfikacji powłok natryskiwanych poprzez obróbkę laserową przetopieniową oraz wpływ parametrów obróbki na morfologię i własności powłok. Na podstawie literatury Autorka przeanalizowała również wykorzystanie laserów na różnych etapach procesu natryskiwania powłok, czyli przed natryskiwaniem, w trakcie oraz po procesie natryskiwania. Rozdział dotyczący wykorzystania laserów w procesie natryskiwania powłok podsumowano wybranymi przykładami modyfikacji przetopieniowej powłok o różnym składzie chemicznym natryskiwanych zimnym gazem. Ostatni rozdział części pierwszej pracy dotyczy modelowania laserowej modyfikacji powłok. W rozdziale tym Doktorantka przedstawiła podstawy teoretyczne oraz ogólny opis matematyczny zjawisk fizycznych zachodzących podczas przetapiania powłok. Autorka opisała dwa modele numeryczne źródeł ciepła: źródło elipsoidalne objętościowe oraz objętościowe źródło walcowe. Część pierwszą pracy zakończono wnioskami z analizy literatury, które można traktować, w pewnym stopniu, jako wytyczne do realizacji badań własnych.

Część II pracy doktorskiej, zamieszczona na 103 stronach, zatytułowana „Część doświadczalna”, zawiera wyniki badań własnych. W tej części pracy Autorka zamieściła tezę, cele pracy oraz zakres przeprowadzonych badań. W rozdziale pod tytułem „Metodyka badań” Doktorantka opisała szczegółowo zastosowane metody badawcze wraz z opisem parametrów technik badawczych. Na uwagę zasługuje fakt, że Autorka przy opisie większości technik badawczych zamieściła numery norm, zgodnie z którymi przeprowadzono badania. Wyniki badań własnych zakończono rozdziałem „Podsumowanie i wnioski”. W pracy doktorantka zamieściła również rozdział nr IV, w którym nakreśliła dalsze kierunki badań. Praca zawiera także spis literatury (rozdział V), zawierający 152 pozycje. Ponadto na początku pracy umieszczono, bardzo przydatny dla czytelnika, rozdział zatytułowany „Wykaz skrótów i oznaczeń”. Cała praca liczy 152 strony.

3. Ocena trafności wyboru tematyki

Praca doktorska ma charakter interdyscyplinarny. Tematyka podjęta i opracowana przez Doktorantkę wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju inżynierii mechanicznej jak i inżynierii materiałowej i w dalszym ciągu istnieje duże zainteresowanie tą tematyką, przede wszystkim ze względu na ciągły rozwój technik wytwarzania proszków (np. proszków kompozytowych metodą mechanicznej syntezy), które są materiałem wyjściowym do procesu natryskiwania. Technika natryskiwania zimnym gazem (szczególnie natryskiwanie wysokociśnieniowe), m.in. ze względu na wysokie koszty procesu, nie jest jeszcze powszechnie stosowana w przemyśle (szczególnie w Polsce), ale jest technologią o dużym potencjale aplikacyjnym. Ze względu na znikomy wpływ na podłoże jest w wielu zastosowaniach, jak np. lotnictwo czy energetyka, jedną z nielicznych, a często jedyną techniką, którą można wykorzystać do wytwarzania czy regeneracji elementów maszyn. Dlatego też, szczególnie, że w tej technice istnieje wiele parametrów procesu, których wpływ na mikrostrukturę i właściwości wytworzonych powłok nie jest jeszcze dostatecznie poznany i opisany w literaturze, bardziej powszechne stosowanie techniki natryskiwania zimnym gazem w przemyśle wymaga szczegółowego poznania wpływu ww. parametrów na mikrostrukturę i własności wytworzonych powłok. Tym bardziej, że technika natryskiwania zimnym gazem jest coraz częściej z powodzeniem stosowana nie tylko do wytwarzania powłok, ale również jako technika przyrostowego wytwarzania całych części maszyn (cold gas additive manufacturing, np. firma Impact Innovations GmbH).

Wg SciVal (Scopus) w ciągu ostatnich 10 lat liczba publikacji na świecie dotycząca badań natryskiwania zimnym gazem ciągle i dynamicznie rośnie z 62 pozycji w 2015 r do 127 pozycji w 2023 r., a liczba cytowań wynosi w tym okresie ponad 2640 (wg Web of Science).

W świetle powyższego, podjęcie przez Doktorantkę realizacji prac badawczych w tym zakresie uważam za celowe, zarówno ze względów poznawczych, jak i aplikacyjnych.

4. Merytoryczna ocena pracy doktorskiej

W rozdziale pierwszym pracy, zatytułowanym „Natryskiwanie cieplne” Autorka, w czytelny sposób, scharakteryzowała krótko proces natryskiwania zimnym gazem. Opisała wpływ parametrów procesu natryskiwania na morfologię wytwarzanych powłok oraz ich przyczepność do podłoża. W kolejnym rozdziale pracy Doktorantka przedstawiła cel i sposoby modyfikacji laserowej natryskiwanych powłok. Na podstawie analizy literatury przedstawiła przykłady laserowej obróbki powłok natryskiwanych i jej wpływ na uzyskaną morfologię powłok i właściwości. Ostatni rozdział pierwszej części pracy dotyczy analizy literatury z zakresu modelowania numerycznego procesów przetapiania laserowego. Na podstawie analizy literatury Doktorantka wykazała, że do modelowania procesu laserowej obróbki przetopieniowej wykorzystywane są zasadniczo dwa rodzaje źródeł ciepła: podwójne elipsoidalne objętościowe źródło ciepła oraz objętościowe walcowe źródło ciepła. Na podstawie

**Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 38 17; e-mail: Slawomir.Kac@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

analizy literatury modelowanie numeryczne procesu przetapiania wykonano za pomocą oprogramowania Simufact Welding. Symulacja procesu obróbki laserowej jest niezwykle użyteczna, ponieważ pozwala na ograniczenie ilości eksperymentów, co znacząco obniża koszty obróbki oraz skraca czas doboru parametrów.

Część pierwszą pracy kończy rozdział 4 zatytułowany „Wnioski z analizy literatury”. Część pierwsza pracy, a w szczególności wnioski z analizy literatury płynnie wprowadzają czytelnika w drugą, eksperymentalną część pracy i logicznie uzasadnia założony tok przyjętych do realizacji badań.

Na początku drugiej, eksperymentalnej części pracy, Autorka postawiła tezę oraz cel naukowy i utylitarny pracy. Krótko przedstawiła również zakres prowadzonych w pracy badań, co jest dobrym pomysłem, ponieważ jasno kreśli tok rozumowania przy planowaniu i realizacji prowadzonych badań. Na uwagę zasługuje ilość eksperymentów wykonana przez Doktorantkę oraz ich uporządkowanie.

W rozdziale 6, pt.: „Metodyka badań” Doktorantka szczegółowo, łącznie z opisem parametrów, opisała proces wytwarzania powłok metodą natryskiwania zimnym gazem, proces ich modyfikacji poprzez przetapianie laserem CO₂ oraz opisała sposób przygotowania próbek do badań i wykorzystane metody badawcze. Doktorantka zastosowała szereg uzupełniających się, zaawansowanych technik badawczych:

- elektronowa mikroskopia skaningowa;
- mikroskopia świetlna;
- dyfraktometria laserowa do badań wielkości cząstek proszku do natryskiwania;
- pomiary nanotwardości cząstek proszku;
- pomiary mikrotwardości powłok;
- dyfraktometria rentgenowska;
- profilometria optyczna;
- analiza adhezji powłok do podłoża;
- badanie współczynnika tarcia i intensywności zużycia;
- badanie odporności na zużycie luźnym ścierniwem;
- badanie odporności na erozję w strumieniu cząstek stałych.

Jak wcześniej wspomniano, przy opisie technik badawczych opisano precyzyjnie najważniejsze parametry pracy urządzeń, jak również przedstawiono, jeżeli to było możliwe numery norm, wg których prowadzono pomiary i badania.

Kolejne rozdziały monografii (od 7 do 10) zawierają wyniki badań własnych. W podrozdziale 7.1 Autorka przedstawiła wyniki analizy wielkości cząstek komercyjnie dostępnych proszków czystego tytanu oraz stopu Ti-6Al-4V jako materiałów wyjściowych do natryskiwania. W wyniku badań określono skumulowany rozkład udziałów objętościowych jako średnice cząstek odpowiadające 10%, 50% i 90% objętości cząstek proszku oraz rozkład procentowy gęstości. Pomiary wykazały, że zakres granulacji cząstek proszku, zarówno Ti jak i Ti-6Al-4V nie jest zgodny z deklaracjami producentów, dlatego też tym bardziej było zasadne

przeprowadzenie szczegółowej analizy materiału do natryskiwania. W podrozdziale 7.2 Doktorantka przedstawiła wyniki badań morfologii cząstek proszków, za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej oraz wyniki mikroanalizy składu chemicznego proszków. Analiza wykazała, że badane proszki posiadają nieregularne kształty, przy czym proszek stopu tytanu ulega silnej aglomeracji oraz posiada liczne pory i ma charakter gąbczasty. W podrozdziale 7.3 Doktorantka przedstawiła wyniki badań składu fazowego proszków czystego tytanu oraz stopu tytanu przeprowadzone metodą dyfrakcji rentgenowskiej. W obydwu proszkach zidentyfikowano dwie fazy: dominującą fazę α – o strukturze krystalicznej heksagonalnej zwartej (HCP – hexagonal close-packed) oraz niewielkie ilości fazy β – posiadającej strukturę krystaliczną regularną przestrzennie centrowaną (BCC – body center cubic). Podrozdział 7.4 zawiera wyniki badań mechanicznych cząstek proszku. Autorka przedstawiła w nim wyniki pomiarów twardości oraz pomiary modułu sprężystości podłużnej (modułu Younga) wykonane za pomocą nanoindentera, przy różnych siłach obciążających węgłbnik.

W rozdziale 8. pracy Doktorantka zawarła wyniki badań mikrostruktury oraz własności powłok natryskiwanych. W podrozdziale 8.1 zamieszczono wyniki analizy morfologii powierzchni powłok natryskiwanych zimnym gazem. Obserwacje powłok za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej wykazują obecność porowatości w powłokach, z tym, że powłoka z czystego tytanu charakteryzuje się zdecydowanie bardziej spójną budową, posiada mniejszą ilość porów, a ponadto na powierzchni powłok ze stopu tytanu zaobserwowano nieliczne, nieodkształcone ziarna proszku. Na powierzchniach obydwu powłok nie zaobserwowano pęknięć. W podrozdziale 8.2. zamieszczono wyniki mikroanalizy składu chemicznego powłok, wykonane metodą spektroskopii energodispersyjnej (EDS – Energy Dispersive Spectroscopy), na przekrojach poprzecznych powłok. Analiza przekrojów powłok za pomocą SEM wykazuje, że powłoki ze stopu tytanu mają bardziej porowatą budowę niż powłoki z czystego tytanu, chociaż Autorka wyraźnie tego faktu nie artykułuje. Stwierdza natomiast, że w powłoce ze stopu tytanu występują pory będące konsekwencją gąbczastej budowy oraz mniejszej zdolności do odkształceń plastycznych cząstek proszku Ti-6Al-4V w stosunku do proszku Ti. Na podstawie analizy map rozmieszczenia pierwiastków Autorka stwierdza, że powłoki, co jest szczególnie istotne w przypadku powłok ze stopu tytanu są jednorodnie pod względem składu chemicznego. Zaskakujące jest natomiast, że w wynikach mikroanaliz składu chemicznego zarówno powłok, jak i samych proszków (podrozdział 7.2) nie zidentyfikowano obecności tlenu, którego obecności można byłoby się spodziewać, chociażby na skutek utlenienia powierzchniowego proszku. W podrozdziale 8.3 Autorka zaprezentowała wyniki pomiarów grubości natryskiwanych powłok, wykonanych na podstawie obserwacji SEM na przekrojach powłok. Wyniki pomiarów wykazują, że średnia grubość powłok z czystego tytanu jest o ok. 40% większa niż grubość powłok ze stopu tytanu. Wyniki wydają się być zaskakujące ze względu na fakt, że powłoki były natryskiwane przy takich samych parametrach procesu natryskiwania, a cząstki proszku ze stopu tytanu są o ok. 22% twardsze niż cząstki proszku z czystego tytanu. Z drugiej strony cząstki proszku ze stopu tytanu są bardziej porowate, łatwiej

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 38 17; e-mail: Slawomir.Kac@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

mogą ulegać odkształceniu i zagęszczeniu, ale też w powłokach ze stopu tytanu obserwuje się większą porowatość (podrozdziały 8.1 i 8.7). Jest więc kilka czynników, które mogą wpłynąć na ten stan rzeczy i warto byłoby wyjaśnić, a przynajmniej przedyskutować co jest przyczyną znaczącej różnicy w grubościach otrzymanych powłok. Podrozdział 8.4 zawiera wyniki badań topografii powierzchni, wykonanych za pomocą profilometru optycznego. Analiza wyników badań wykazuje, że powłoki z czystego tytanu były mniej rozwinięte, posiadały bardziej gładką powierzchnię niż powłoki natryskiwane ze stopu tytanu. W podrozdziale 8.5 Doktorantka przedstawiła wyniki badań składu fazowego, wykonanych techniką dyfrakcji rentgenowskiej, powłok natryskiwanych zimnym gazem. Podobnie jak dla materiałów wyjściowych, w postaci proszków, zidentyfikowano dwie fazy: fazę α – o strukturze HCP oraz niewielkie (badania ilościowe wskazują, że ilość tej fazy jest w granicach błędu pomiarowego) ilości fazy β – posiadającej strukturę krystaliczną BCC. W rozdziale tym, można byłoby pokusić się o wyjaśnienie dlaczego skład fazowy powłok w stosunku do materiału wyjściowego miałby się różnić. Czy wpływ na zmianę składu fazowego mogłaby mieć temperatura gazu nośnego, czy silna deformacja powłok, a może utlenienie cząstek proszku w czasie procesu natryskiwania, co obniża adhezję pomiędzy poszczególnymi cząstkami tworzącymi powłokę. Podrozdział 8.6 przedstawia wyniki pomiarów porowatości powłok. Wyniki badań wykazują, że powłoki z czystego tytanu mają porowatość na poziomie 0,5%, natomiast porowatość powłok ze stopu tytanu jest ok. trzykrotnie większa (ok. 1,65%). Jednocześnie Autorka monografii odniosła poziom porowatości wytworzonych przez siebie powłok do porowatości powłok opisywanych przez innych autorów publikacji i wykazała, że otrzymane powłoki posiadają wysoką gęstość, a ich porowatość plasuje się przy dolnej granicy porowatości powłok prezentowanych w przytoczonej literaturze. W podrozdziale 8.7 Doktorantka zamieściła wyniki pomiarów twardości powłok, które wykonano na przekrojach powłok w trzech różnych obszarach: przy podłożu, w części środkowej oraz przy powierzchni, jak również na wypolerowanej powierzchni powłok. Niestety wyniki zamieszczone na wykresie (rys. 8.14) nie do końca zgadzają się z opisem wyników zamieszczonym na str. 73, nad wykresem. Obserwując budowę powłok natryskiwanych można się spodziewać, że najniższą twardość posiadają powłoki w części przypowierzchniowej, ponieważ cząstki natryskiwane w ostatniej fazie procesu nie są już silnie odkształcane przez kolejne natryskiwane cząstki proszku. Niestety przedstawione wyniki nie potwierdzają tej zależności, a brak spójności opisu zamieszczony w rozdziale 8.7 z wynikami zamieszczonymi na wykresie utrudnia interpretację wyników. Pomiary chropowatości powierzchni natryskiwanych powłok wykonano za pomocą profilometru mechanicznego, stykowego, a wyniki pomiarów zamieszczono w rozdziale 8.8. Podobnie jak w przypadku analizy topografii powierzchni (podrozdział 8.4) wykazano, że powłoki natryskiwane proszkiem z czystego tytanu mają nieznacznie mniejszą chropowatość (niższe wartości parametrów R_a oraz R_z) niż powłoki natryskiwane proszkiem ze stopu tytanu. Autorka interpretuje to zjawisko jako efekt bardziej nieregularnego kształtu oraz większej porowatości cząstek proszku ze stopu tytanu.

Niezmiernie istotnym parametrem w ocenie jakości i przydatności powłok jest ich adhezja do podłoża. Pomiar adhezji przeprowadzono metodą oceny wytrzymałości na odrywanie (pull-of). Wyniki badań przyczepności wytworzonych powłok do podłoża, które Doktorantka zamieściła w rozdziale 8.9 wskazują, że zdecydowanie większą adhezją charakteryzują się powłoki natryskiwane zimnym gazem z czystego tytanu. W przypadku tych powłok oderwanie grzybka pomiarowego następowało przy średnim naprężeniu 33,35 MPa, i występowało w warstwie kleju, co oznacza, że powłoka w ogóle nie została zniszczona i odporność na odrywanie samej powłoki jest jeszcze większa (większe jest naprężenie przy którym następuje zniszczenie powłoki). W przypadku powłok natryskiwanych ze stopu tytanu oderwanie powłoki następowało przy średnim naprężeniu 23,91 MPa, przy czym w każdym przypadku badanej powłoki ze stopu tytanu występowała całkowita delaminacja powłoki od podłoża, co potwierdzają fotografie uszkodzonych powłok na rys. 8.16. W podrozdziale 8.10 Doktorantka przedstawiła wyniki badań odporności powłok na zużycie ściernie typu kulka-tarcza. W testach tych wyznaczono współczynnik tarcia powłok oraz ich intensywność zużycia jako ubytek objętości materiału powłoki w określonych warunkach tarcia. Wyniki badań wykazują, że nieznacznie większy współczynnik tarcia zanotowano dla powłoki z czystego tytanu (0,58), natomiast dla powłoki ze stopu tytanu współczynnik tarcia wynosił 0,54. Intensywność zużycia była o ok. 27% większa dla powłok z czystego tytanu niż dla powłok natryskiwanych ze stopu tytanu. Powłoki po testach zużycia poddano obserwacjom za pomocą elektronowej mikroskopii skaningowej w celu identyfikacji mechanizmów zużycia, co jest niezmiernie istotne, z punktu widzenia projektowania powłok ochronnych do pracy w określonych warunkach eksploatacji. Na podstawie obserwacji śladów zużycia, Autorka zidentyfikowała mechanizmy zużycia zmęczeniowego oraz zużycia adhezyjnego. Niestety niewielkie mikrofotografie SEM z badanych powierzchni, które zamieszczono w monografii utrudniają czytelnikowi identyfikację mechanizmów zużycia. Ponadto obserwując ślady zużycia za pomocą SEM, przydatne byłoby wykonanie mikroanalizy składu chemicznego produktów zużycia w celu ich identyfikacji. Obrazy SEM (Rys. 8.23) sugerują bowiem, że na powierzchni mogą występować tlenki jako produkty zużycia, które jako faza twarda i krucha mogą istotnie wpływać na procesy zużycia. W podrozdziale 8.11 Autorka przedstawiła wyniki badań powłok natryskiwanych poddanych procesowi zużycia przez ścieranie luźnym ścierniwem. Na podstawie analizy wyników badań oszacowano, że całkowite zużycie powłoki, wyrażone jako ubytek masy powłoki po określonym czasie testu było zdecydowanie wyższe dla powłok z czystego tytanu (202 mg po 50 min. testu), niż dla powłok ze stopu tytanu (176,6 mg, po 50 min. testu). Ślady zużycia poddano obserwacjom za pomocą mikroskopii skaningowej, jednak Autorka nie pokusiła się o szczegółowy opis powierzchni powłok po zużyciu oraz identyfikację mechanizmów zużycia, co byłoby bardzo interesujące z naukowego jak i użytkowego punktu widzenia. Podrozdział 8.12 zawiera wyniki badań odporności powłok na erozję w strumieniu cząstek stałych (ścierniwa korundowego). Powłoki natryskiwane, stosowane w przemyśle lotniczym czy energetycznym bardzo często są narażone na zużycie pod wpływem dynamicznie oddziałujących cząstek ścierniwa, stąd

przeprowadzenie testów odporności na erozję jest mocno uzasadnione i wartościowe. W badaniach zastosowano dwa rodzaje ścierniwa o różnej granulacji korundu. Wyniki badań wykazują, że powłoki z czystego tytanu ulegają bardziej intensywnemu zużyciu erozyjnemu niż powłoki ze stopu tytanu, niezależnie od wielkości cząstek korundu. Ponadto ścierniwo o większej granulacji powoduje zdecydowanie bardziej intensywne zużycie niż ścierniwo o drobnych cząstkach. Autorka tłumaczy to zjawisko tym, że cząstki ścierniwa o większej średnicy i masie posiadają większą prędkość i tym samym większą energię kinetyczną, co wydaje się słuszną interpretacją, chociaż do pełnego opisu oddziaływania cząstek ścierniwa z powłokami przydatne byłyby obserwacje mikroskopowe powłok po zużyciu erozyjnym.

W rozdziale 9. monografii Doktorantka przedstawiła zagadnienia związane z numeryczną symulacją procesu modyfikacji laserowej powłok natryskiwanych zimnym gazem. Opisała szczegółowo założenia, jakie przyjęła dla symulacji numerycznej oraz przedstawiła w jaki sposób sformułowano model numeryczny oparty o metodę elementów skończonych. W rozdziale tym Autorka przedstawiła wyniki symulacji numerycznych dla przetapiania powłok ze stopu tytanu, w których podjęła próbę optymalizacji parametrów procesu przetapiania laserowego. W symulacjach uwzględniano różną prędkość przemieszczania wiązki laserowej oraz różną moc wiązki. W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu przetapiania laserowego powłok otrzymano różne profile przetopów w powłokach z rozkładem temperatury oraz mapami rozkładu naprężeń na przekroju modyfikowanych warstw. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji wybrano trzy zestawy optymalnych parametrów obróbki laserowej (stała moc wiązki 2 kW oraz trzy różne prędkości przemieszczania źródła ciepła), dla których możliwe było uzyskanie przetopienia powłok na głębokość do ok. 1/3 grubości powłok natryskiwanych, unikając jednocześnie delaminacji powłok od podłoża, na skutek naprężeń powstających na skutek krzepnięcia materiału. Symulacje numeryczne procesu przetapiania opisane w rozdziale 9. są niezmiernie użyteczne z utylitarne punktu widzenia, ponieważ w znaczący sposób ograniczają liczbę czasochłonnnych i kosztochłonnnych eksperymentów i pozwalają na przewidywanie budowy warstw zmodyfikowanych laserowo oraz ułatwiają dobór optymalnych parametrów obróbki.

Rozdział 10. zawiera wyniki badań powłok natryskiwanych zimnym gazem i modyfikowanych przez przetapianie laserem CO₂, z wykorzystaniem parametrów obróbki zoptymalizowanych dzięki symulacjom numerycznym. Podrozdział 10.1 zawiera opis obserwacji powierzchni powłok natryskiwanych i przetapianych laserowo. Na podstawie obserwacji Autorka stwierdza, że na skutek przetopienia laserowego uzyskano redukcję porowatości powłok natryskiwanych. Ponadto w większości powłok po modyfikacji laserowej nie obserwowano pęknięć. Jedynie dla powłok ze stopu tytanu dla prędkości przemieszczania wiązki 1 m/min. obserwowano mikropęknięcia. W podrozdziale 10.2 Autorka przedstawiła wyniki analiz mikrostruktury powłok natryskiwanych po przetapianiu laserowym. Obserwacje prowadzono za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego, na przekrojach poprzecznych powłok. Wyniki obserwacji SEM wykazują, że w powłokach po przetapianiu

**Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 38 17; e-mail: Slawomir.Kac@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

laserowym w znaczący sposób zredukowano porowatość powłok oraz uzyskano w powłokach materiał lity, bez nieciągłości na granicach poszczególnych lameli powstałych przy natryskiwaniu cząstek proszku. W rozdziale tym Doktorantka szczegółowo analizowała mikrostrukturę powłok natryskiwanych po przetapianiu laserowym. We wszystkich powłokach wyodrębniono obszar po całkowitym przetopieniu wiązką lasera (przy powierzchni powłok), strefę wpływu ciepła oraz obszar powłoki niezmieniony oddziaływaniem wiązki laserowej. W rozdziale tym Doktorantka zamieściła również wyniki badań mikroanalizy składu chemicznego wykonane w różnych obszarach powłok po modyfikacji laserowej. Wykonano mikroanalizy punktowe, analizy liniowego rozmieszczenia pierwiastków, jak również mapy rozmieszczenia pierwiastków na przekroju powłok. Zarówno analizy liniowego rozmieszczenia jak i mapy rozkładu pierwiastków wskazują na homogenizację składu chemicznego w obszarach przetopionych wiązką lasera. Podrozdział 10.3 monografii zawiera wyniki obserwacji mikroskopowych (SEM) prowadzonych w celu analizy grubości strefy przetopionej w modyfikowanych laserowo powłokach. Pomiary głębokości przetopienia dokonano analizując, za pomocą SEM, przekroje poprzeczne modyfikowanych laserowo powłok. Jak widać na obrazach SEM głębokość przetopienia jest dość niejednorodna. Wyniki pomiarów są nieco zaskakujące. Logiczne wydawałoby się, że największą głębokość przetopienia powinno się uzyskać dla najmniejszej prędkości przemieszczania wiązki. Dla powłok z czystego tytanu tak nie jest. Przydatna byłaby krytyczna ocena wyników i próba wyjaśnienia tego stanu rzeczy. W podrozdziale 10.4 Autorka, podobnie jak dla powłok natryskiwanych, zaprezentowała wyniki badań topografii powierzchni powłok natryskiwanych po modyfikacji laserowej. Jest to działanie uzasadnione, ponieważ przetapianie laserowe istotnie zmienia topografię powierzchni na skutek gwałtownego ruchu ciekłego metalu w ciekłym jeziorce i jego gwałtownego krzepnięcia. Za pomocą profilometru optycznego, na obrazach trójwymiarowych zwizualizowano powierzchnię powłok oraz wyliczono parametry chropowatości powierzchni. Ciekawym i bardzo charakterystycznym jest fakt, że nie można znaleźć prostej korelacji pomiędzy prędkością przemieszczania wiązki, a parametrami chropowatości. W większości przypadków, wartość parametrów chropowatości dla średniej prędkości przemieszczania wiązki (1,5 m/min) znacząco odbiega od pozostałych i jest wartością maksymalną bądź minimalną. Wartościowym elementem pracy byłaby próba wyjaśnienia tego zjawiska. Podrozdział 10.5 zawiera wyniki badań składu fazowego powłok modyfikowanych laserowo. O ile przy badaniach składu fazowego proszku przed natryskiwaniem i po natrysku (w postaci powłok) można było się spodziewać, że skład fazowy nie ulegnie zmianie, to analiza powłok po modyfikacji laserowej (po przetapianiu) jest jak najbardziej zasadna. Wyniki badań wykazały, że w powłokach po modyfikacji pojawiły się fazy tlenkowe, na skutek utlenienia. Piki od tlenku tytanu, widoczne na dyfraktogramach, są wyraźne, można więc było pokusić się o bardziej szczegółową analizę mikrostruktury powłok po utlenieniu, w celu zbadania czy tlenek pojawił się jedynie w postaci warstwy powierzchniowej, czy tlenki znajdują się również wewnątrz (w głębi) strefy przetopionej, co może być spowodowane wirowaniem cieczy w ciekłym jeziorce podczas

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 38 17; e-mail: Slawomir.Kac@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

obróbki laserowej. Może to być zagadnienie istotne z punktu widzenia odporności na zużycie powłok. Z drugiej strony, przy tak dużej ilości eksperymentów i badań, jakie w pracy wykonano, zrozumiałe jest, że w pewnym stopniu należy ograniczać ilość kolejnych badań. Wyniki analizy chropowatości powłok modyfikowanych laserowo zamieszczono w podrozdziale 10.6. Analiza wyników badań wskazuje, że ponownie, charakterystyczne są (zarówno w przypadku powłok z czystego tytanu jak i dla powłok ze stopu tytanu) powłoki modyfikowane wiązką przemieszczaną ze średnią szybkością. W tym jednak przypadku, przy interpretacji wyników badań należy uwzględnić fakt, że błąd pomiaru jest porównywalny z wielkościami mierzonymi. W podrozdziale 10.7 Doktorantka zamieściła wyniki pomiarów mikrotwardości powłok natryskiwanych i modyfikowanych laserowo. Pomiary wykonano zarówno na powierzchni jak i na przekroju powłok w obszarze przetopionym, w strefie wpływu ciepła oraz w materiale niemodyfikowanym, czyli w powłoce natryskiwanej. Po analizie wyników Autorka pisze, że twardość mierzona na powierzchni oraz na przekroju w strefie przetopionej jest ponad dwukrotnie większa niż materiału natryskiwanego. Podrozdział 10. 8. zawiera wyniki pomiarów chropowatości powierzchni powłok po modyfikacji laserowej. W większości przypadków parametry chropowatości wykazywały mniejszą wartość w stosunku do parametrów powłok natryskiwanych. Jedynie w przypadku powłoki ze stopu tytanu, przy maksymalnej szybkości przemieszczania wiązki chropowatość nieznacznie wzrosła. Kolejne podrozdziały, czyli 10.9 – 10. 11 zawierają wyniki badań odporności powłok na zużycie. Doktorantka zamieściła wyniki badań odporności na zużycie ściernie w węźle tarcia typu kulka-tarcza, zużycie pod wpływem działania luźnego ścierniwa oraz zużycie pod wpływem działania dynamicznego cząstek ścierniwa, czyli odporności na zużycie przez erozję. Wyniki pomiarów wykazały, że dla wszystkich powłok przetapianych laserowo (zarówno Ti jak i Ti-6Al-4V) uzyskano nieznaczny spadek wartości współczynnika tarcia, przy czym, co znowu charakterystyczne, najniższy współczynnik tarcia mają powłoki natryskiwane i modyfikowane laserowo wiązką przemieszczaną ze średnią prędkością (1,5 m/min). Podobnie w przypadku odporności na zużycie luźnym ścierniwem. W tym przypadku, również najmniejsze zużycie, wyrażone przez ubytek masy próbki zarejestrowano dla powłok natryskiwanych i modyfikowanych wiązką lasera o średniej prędkości przemieszczania.

Wobec takiego zestawienia wyników pomiarów odczuwa się pewien niedosyt, że Autorka monografii nie próbowała wyjaśnić, dlaczego powłoki modyfikowane właśnie wiązką lasera o średniej prędkości przemieszczania posiadają najbardziej korzystne właściwości.

Część badawczą pracy Doktorantka zakończyła rozdziałem III „Podsumowanie i wnioski”, zawierającym syntetyczny opis uzyskanych wyników oraz dziewięć wyraźnie wypunktowanych wniosków.

W rozdziale IV pracy Autorka nakreśliła plany dalszych badań nad modyfikacją laserową powłok natryskiwanych zimnym gazem. W planach założono, że w dalszych badaniach zostanie wykorzystany inny laser (światłowodowy, o znacznie krótszej długości fali). Doktorantka stwierdza nawet, że już pierwsze eksperymenty w tym kierunku zostały wykonane.

**Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 38 17; e-mail: Slawomir.Kac@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

W rozdziale V „Literatura” Autorka zamieściła spis źródeł, liczący 152 pozycje, na podstawie których dokonała przeglądu stanu zagadnienia oraz częściowo nakreśliła kierunek swoich badań. W zdecydowanej większości są to bardzo aktualne pozycje literaturowe, dobrane logicznie i w sposób uzasadniony.

Całość pracy Doktorantka zwięździła podsumowaniem w języku polskim i angielskim.

5. Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Pomimo wysokiego poziomu recenzowanej pracy, można w niej znaleźć pewne uchybienia i zagadnienia dyskusyjne.

1. W pracy można znaleźć błędy literowe, interpunkcyjne oraz gramatyczne, co delikatnie utrudnia czytanie pracy, np. na s. 11 napisano: „...obróbką bez dyfuzyjną...”, a powinno być „...obróbką bezdyfuzyjną...”, lub na s. 17 „...aby odpowiadały one małym, średnim i dużym cząstką...” a powinno być: „...aby odpowiadały one małym, średnim i dużym cząstkom...” W kilku przypadkach można znaleźć błędy stylistyczne, czy niepoprawny szyk wyrazów w zdaniach (zapewne wynikające z tłumaczenia z j. angielskiego), np. na s. 25 „Analiza obrazu odkształcenia wykazała brak zachodzącego wiązania w środkowym obszarze [41]”, lub na s. 13 „Od rodzaju zastosowanej techniki natryskiwania oraz użytego urządzenia wydajność procesu może wynosić ok. 50 kg/h, lub na s. 17 „...a jednocześnie następuje wtedy jego gwałtowny spadek temperatury (rys. 1.3).”

Wszystkie błędy literowe, stylistyczne itp. zostały zaznaczone w pracy i przekazane do wiadomości Autorce.

2. Ważniejsze skróty literowe zostały wymienione na początku pracy. To dobra praktyka, można jednak byłoby się pokusić o rozwinięcie tych skrótów w j. angielskim, ponieważ nazwy pochodzą właśnie od nazw z j. angielskiego, np. PVD (Physical Vapour Deposition), czy LPPS (rys. 1.1). Ponadto w pracy można znaleźć skróty, które nie zostały umieszczone w spisie, np. LST (na s. 30, chociaż w tym przypadku w tekście zamieszczono rozwinięcie w j. angielskim); we wzorach 3.5 i 3.6 występuje oznaczenie T_w i T_E , jednak nie są one opisane w tekście ani nie są zamieszczone w wykazie.

3. W wykazie skrótów i oznaczeń można znaleźć pewne nieścisłości. V_{er} – opisano jako „prędkość erozji” i wyrażono w jednostce m/s. Można byłoby sprecyzować, że jest to prędkość cząstek uderzających o badany materiał.

Oznaczenie T_α – opisano jako „temperatura otoczenia”, sugerowałbym używanie określenia temperatura pokojowa (z ang. room temperature), pomimo, że dość powszechnie używa się tych określeń wymiennie, jednak temperatura otoczenia w specyficznych warunkach eksperymentu może być inna (zdecydowanie wyższa lub niższa) od temperatury pokojowej, która zawiera się w zakresie od 10 do 25 °C.

Oznaczenie T_R – opisano jako temperatura odniesienia (i podano jej wartość 293 K, czyli ok. 20°C), czy nie jest to temperatura pokojowa?

Oznaczenia $\Delta(t)$ – opisano jako przyrost czasowy temperatury. Temperatura oznaczana jest zazwyczaj wielką literą „T” (małą literą „t” oznaczamy czas), czy nie powinno być więc napisane $\Delta(T)$.

4. Zdaniem recenzenta bardziej poprawnym określeniem stanu (sposobu wytworzenia) powłok powinno być określenie „natryskiwanych”, a nie „natryskanych”. W słowniku języka polskiego nie znajduję bowiem określenia „natryskać”, a jedynie „natryskiwać”. Z drugiej jednak strony określenie „natryskiwanych” oznacza tryb niedokonany, a określenie „natryskanych” można traktować jako tryb dokonany. Uwaga ta nie ma znaczenia dla merytorycznej oceny pracy, ale może być przyczynkiem do tego, żeby w gronie osób zajmujących się technologiami natryskiwania ujednoczyć nazewnictwo. Może to również być kwestią regionalizmu.
5. Na str. 17 napisano: „Eksperyment zakładał temperaturę procesu 800°C i ciśnienie 3 MPa” Dla jednoznacznego opisu parametrów eksperymentu warto byłoby precyzyjnie napisać o jaką temperaturę chodzi. Prawdopodobnie o temperaturę gazu nośnego przy wlocie dyszy, ale brak precyzji może budzić niepewność, że może to być np. temperatura gazu po przejściu przez przewężenie w dyszy, temperatura podłoża itp.
6. Na str. 19 w opisie procesu osadzania (i na rys. 1.5) Autorka pisze, że jeżeli cząstki osiągają prędkość niższą od krytycznej V_{kr} , to zachodzi proces erozji podłoża. Po osiągnięciu i przekroczeniu tej prędkości następuje osadzanie powłoki. Zdaniem recenzenta, typowy proces erozji podłoża zachodzi przy dużych prędkościach cząstek, powyżej drugiej (wyższej) prędkości krytycznej, kiedy uderzające cząstki na skutek dynamicznego oddziaływania powodują mikroskrawanie lub wykruszanie materiału podłoża. To zresztą jest poprawnie zaznaczone na rys. 1.6 oraz 1.7, gdzie ta druga (wyższa) prędkość krytyczna jest oznaczona jako V_{er} – czyli prędkość erozji. Przy niskiej prędkości cząstek, pomimo braku ich przyczepności do podłoża, one mogą uszkadzać podłoże, odkształcać je plastycznie, ale nie jest to typowy proces erozji. Zresztą na oryginalnym rysunku z pozycji literatury [30], na który powołuje się Doktorantka, poniżej pierwszej (niższej) prędkości krytycznej zaznaczono proces zużycia abrazyjnego, a to jednak jest inny proces zużycia niż zużycie erozyjne.
7. Na str. 27 autorka wymieniając rodzaje obróbki laserowej użyła określenia „hartowanie uderzeniowe”, ponadto na rys. 2.1 zaznaczono obszar parametrów obróbki o nazwie „hartowanie udarowe”. Jaki proces obróbki Autorka ma na myśli? Być może to skrót myślowy. Być może chodzi o proces laserowego umacniania udarowego (inaczej kulowanie laserowe). Określenia „hartowanie uderzeniowe” w literaturze się nie spotyka.
8. Na str. 39, w tab. 6.1, przy opisie parametrów procesu natryskiwania napisano „temperatura – 775°C”. Dla ścisłości należałoby podać jaka temperatura jest tu podana. Prawdopodobnie temperatura gazu nośnego. Podobnie określenia: „odległość natryskiwania” – należałoby sprecyzować, że jest to odległość dyszy od natryskiwanego podłoża. Podobnie określenie „skok” – należałoby sprecyzować, że prawdopodobnie jest to odległość pomiędzy poszczególnymi ścieżkami (ściegami) przy natryskiwaniu.

9. W tabeli 6.3 na str. 41 podano parametry obróbki laserowej. Bardzo przydatne z praktycznego punktu widzenia byłoby podanie gęstości mocy wiązki (albo powierzchni plamki laserowej na powierzchni materiału). Co prawda w eksperymencie zapewne przyjęto stałą wielkość plamki (zatem przy stałej mocy gęstość mocy była stała), więc eksperymenty rzeczywiście różniły się tylko prędkością przemieszczania wiązki, ale z podanych informacji czytelnik nie jest w stanie określić jaka była zastosowana gęstość mocy.
10. Na str. 54 przy opisie parametrów testu odporności na zużycie luźnym ścierniwem napisano, że parametry pracy testera przedstawiono w tab. 6.6, natomiast w tabeli 6.6 zamieszczono parametry testu zużycia typu kulka-tarcza.
11. Na str. 54, w rozdz. 6.11 napisano: „Masę próbek mierzono w odstępach czasowych wynoszących 5 sekund”, to określenie jest trochę niejasne. Prawdopodobnie chodzi o to, że masę próbek mierzono po każdym 5 sekundach oddziaływania ścierniwa na materiał.
12. Na str. 56 w rozdz. 7. napisano: „Obejmuje to własności takie jak: skład granulometryczny, morfologia ziarna, skład chemiczny oraz fazowy”. Skład chemiczny, czy fazowy wpływają bezpośrednio na własności materiału, ale raczej nie określa się ich własnościami materiału.
13. W podrozdziale 7.2 „Badanie morfologii ziaren” napisano: „Morfologie ziaren proszków Ti i Ti-6Al-4V przedstawiono na rys. 7.2 i 7.3. Kształt ziaren proszku określono za pomocą mikroskopu optycznego metodą opisową...”. Jednak na rys. 7.2 i 7.3 są zamieszczone obrazy proszków obserwowane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego, a nie za pomocą mikroskopu optycznego (światłnego).
14. Na stronie 59 przedstawiono wyniki mikroanalizy składu chemicznego proszków. Na spektrogramach nie obserwuje się w ogóle obecności tlenu czy azotu. Czy rzeczywiście te proszki nie były w ogóle utlenione powierzchniowo? Podobnie na str. 68, przy badaniu składu chemicznego natryskiwanych powłok.
15. W tab. 7.1, gdzie podano wyniki mikroanalizy składu chemicznego proszków, zawartość pierwiastków podano z dokładnością 0,01, a należy pamiętać, że dokładność pomiarowa przy mikroanalizie energo-dyspersyjnej jest co najwyżej 0,1, a często mniejsza, więc różnice na drugim miejscu po przecinku nie mają znaczenia. Podobnie na str. 112.
13. W rozdziale 7.4, na str. 61 wartości modułu Younga dla proszku czystego Ti podano bez jednostek, należy dopisać [GPa].
14. Na str. 70, w tab. 8.2, podano średnią grubość powłok z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku, kiedy pomiary wykonywano z dokładnością do 1 mikrometra. Podobnie na str. 116.
15. Na str. 73 Autorka napisała, że najwyższą twardość we wszystkich powłokach zarejestrowano w obszarze przy powierzchni. Czym można byłoby wytłumaczyć to zjawisko? Zazwyczaj strefa przypowierzchniowa powłoki posiada większą porowatość, ma mniejszą gęstość niż np. centralna część powłoki, ze względu na fakt, że część powłoki powstająca w końcowej fazie natryskiwania nie jest zagęszczona poprzez kolejne padające cząstki proszku.

16. Na str. 80 i 81, rys. 8.23 na, mikrofotografii powierzchni po testach odporności na zużycie ściernie obserwuje się, widoczne jako białe, produkty zużycia. Prawdopodobnie mogą to być tlenki powstałe w trakcie badania odporności na zużycie ściernie. W celu ich identyfikacji przydatnym byłoby wykonanie mikroanalizy EDS w tych obszarach, co ułatwiłoby też interpretację mechanizmów zużycia.
17. Na str. 98, napisano, że w powłokach ze stopu tytanu, po modyfikacji laserowej, zaobserwowano mikropęknięcia. Czy na przekrojach poprzecznych również obserwowano te pęknięcia i zmierzono jak daleko w głąb powłok one sięgają?
18. W podpisach rysunków 10.5 – 10.10 w podpunktach a) napisano „mikrostruktura”, a w podpunktach kolejnych „strefa wpływu ciepła”, czy „strefa przejściowa”. W rzeczywistości na wszystkich mikrofotografiach SEM przedstawiona jest mikrostruktura, tylko mikrostruktura różnych obszarów.
19. Na rys. 10.10 w podpunkcie c) i d) wstawiono omyłkowo tę samą mikrofotografię.
20. Na str. 101 napisano, że na przekroju powłoki po modyfikacji laserowej można wyróżnić trzy strefy: „ a) obszar przetopiony, b) obszar przejściowy (strefa wpływu ciepła SWC) oraz c) obszar powłoki nieprzetopionej”. Należy więc rozumieć, i słusznie, że obszar c) to jest już materiał, który nie uległ przemianom na skutek działania ciepła pochodzącego od wiązki lasera (bo jest już poza SWC). Jednak na stronie 106 jest napisane: „W strefie powłoki nieprzetopionej (rys. 10d) zauważalny jest wpływ wiązki laserowej w postaci osnowy oraz pojedynczych wydzieleni fazy iglastej.” Co jest sprzeczne z poprzednim sformułowaniem, ponieważ obszar oznaczony jako d) na rys. 10.10 jest już poza strefą przejściową czyli SWC.
21. Przy opisie mikroanalizy składu chemicznego powłok modyfikowanych (rys. 10.13 – 10.14) nie jest widoczne (ani nie jest zaznaczone w opisie, w tekście) w jakich obszarach wykonano badania. Tylko na rys. 10.13 c) i 10.14 a) widoczna jest powierzchnia powłoki a na pozostałych tego nie widać. Można się domyślać, że dla wszystkich powłok analizy wykonano w podobnych obszarach (np. przy powierzchni), ale dla porządku należałoby to napisać w opisie lub wybrać mikrofotografie, gdzie widoczne są charakterystyczne elementy powłoki (np. powierzchnia).
22. Na str. 112, na rys. 10.15 analiza (podobnie jak przy analizie proszków) na spektrogramach nie zarejestrowano obecności tlenu, chociaż dalsze analizy (XRD) składu fazowego powłok modyfikowanych wykazują obecność faz tlenkowych.
23. Na str. 113 napisano: „Analiza wykazała, że poziom nasycenia koloru odpowiadający danemu pierwiastkowi jest taki sam jak w przypadku powłok po natryskiwaniu zimnym gazem. Uzyskany rezultat jest zgodny z otrzymanymi wartościami pierwiastków z analizy punktowej”. Jednakowy poziom nasycenia koloru odpowiadającego za sygnał od danego pierwiastka świadczy o jednorodności składu chemicznego, rzeczywiście nie widać segregacji pierwiastków, która objawiałaby się różnym natężeniem kolorów. Natomiast samego poziomu nasycenia koloru odpowiadającego określonemu pierwiastkowi nie

możemy odnieść do zawartości pierwiastków z analizy punktowej. Zapewne użyte sformułowanie jest skrótem myślowym, ale nieznacznie utrudnia interpretację wyników.

24. W rozdz. 10.3 analizowano grubość (głębokość) obszaru powłok zmodyfikowanego wiązką laserową. Jak widać na mikrofotografiach (szczególnie rys. 10. 18 b) i 10.19 c)) głębokość przetopienia jest niejednorodna. Co jest odzwierciedlone w wartości odchylenia standardowego pomiarów (tab. 10.2). Jak zatem dokonano wyboru miejsc wykonania pomiarów głębokości? Losowo, czy przyjęto jakąś metodykę? Wpływa to zapewne na wyniki prezentowane w tab. 10.2.
25. Na stronie 120, przy opisie składu fazowego (XRD) powłok modyfikowanych napisano: „...wyraźnie różnią się od powłok natrykiwanych zimnym gazem w wyniku powstania nowych faz związanych z szybkim ich chłodzeniem podczas przetopu laserowego”. Tymi nowymi fazami są tlenki tytanu i wanadu. Tlenki te rzeczywiście powstają w warunkach gwałtownego chłodzenia, ale powstają przede wszystkim na skutek utleniania (dzięki obecności tlenu z atmosfery, albo będącego zanieczyszczeniem gazów osłonowych), a nie na skutek szybkiego chłodzenia.
26. Po analizie wyników testów odporności na zużycie (rozdz. 10.9 – 10.11) nasuwa się pytanie ogólne, wspólne, dla tych wyników. Mianowicie w większości pomiarów wyniki dla powłok modyfikowanych wiązką lasera o średniej z zastosowanych prędkości przemieszczania wiązki (1,5 m/min) odbiegają od pozostałych wyników. Z reguły powłoki obrabiane wiązką 1,5 m/min posiadają najbardziej korzystne własności. Czy Doktorantka mogłaby skomentować ten fakt, spróbować wyjaśnić co jest powodem takiego stanu rzeczy?

Powyższe uwagi oraz komentarze nie umniejszają dużej wartości merytorycznej recenzowanej pracy, a wiele z nich ma charakter dyskusyjny.

6. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Ważnymi osiągnięciami w pracy, które są istotnym wkładem w rozwój dyscyplin inżynieria mechaniczna i inżynieria materiałowa jest:

1. Analiza i szczegółowy opis wpływu wybranych parametrów osadzania techniką natrykiwania zimnym gazem na mikrostrukturę i własności powłok Ti i Ti-6Al-4V.
2. Analiza i szczegółowy opis wpływu wybranych parametrów przetapiania laserowego na mikrostrukturę i własności powłok natrykiwanych.
3. Opracowanie, analiza i opis wyników symulacji numerycznych procesu obróbki laserowej powłok natrykiwanych pozwalające na optymalizację parametrów procesu modyfikacji laserowej.
4. Opracowanie parametrów natrykiwania i modyfikacji laserowej powłok pozwalających na poprawę własności mechanicznych powłok oraz wzrost ich odporności na zużycie.

Na uwagę zasługuje duża ilość eksperymentów wykonanych w ramach realizacji pracy doktorskiej, jak również to, że badania wykonano w oparciu o konkretne normy, co ułatwia interpretację wyników.

7. Wniosek końcowy

Recenzowaną pracę doktorską oceniam jednoznacznie pozytywnie. Autorka zrealizowała poprawnie zaplanowany cykl badań, rozwiązując ciekawy problem badawczy o potencjale aplikacyjnym, zrealizowała założone cele oraz udowodniła postawioną tezę.

Doktorantka wykazała się znajomością podstaw teoretycznych dotyczących zagadnień poruszanych w pracy oraz solidnym warsztatem badawczym. Udowodniła, że potrafi zaplanować i dobrać odpowiedni cykl badań naukowych potrzebnych do rozwiązania konkretnego zadania badawczego. Wykazała, że potrafi poprawnie wykorzystać szereg zaawansowanych technik badawczych.

Na podstawie analizy rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Dominiki Soboń pt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskanych zimnym gazem” stwierdzam, że zawiera ona wartościowe i oryginalne wyniki badań i stanowi twórczy wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Ponadto stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz ustawie z dn. 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.).

Niniejszym wnioskuje do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony oraz o dopuszczenie p. mgr inż. Dominiki Soboń do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.