

Prof. dr hab. inż. Tomasz Lipiński
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn

Olsztyn, dnia 12.04.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Dominiki Soboń
nt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok
Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem”**

opracowana na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Pana
dr hab. inż. Sławomira Błasiak, prof. PŚk (MAA-511/19/2024 z dnia 12.02.2024 r.)
w związku z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Świętokrzyskiej
z dnia 25.01.2024 r.

1. Informacja o rozprawie

Rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Dominiki Soboń została wykonana na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej pod kierunkiem Pana dr. hab. inż. Wojciecha Żórawskiego, prof. P.Śk. Podjęty przez Autorkę problem dotyczący opisu wpływu obróbki skupionym źródłem ciepła na mikrostrukturę i właściwości powłok powstałych z proszków Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem. Stosowanie powłok nakładanych na materiały konstrukcyjne cieszy się dużym zainteresowaniem zarówno w środowisku naukowym jak i przemysłowym. Rozwój tych technologii niesie za sobą duże możliwości kształtowania właściwości mechanicznych, fizycznych, chemicznych itd. warstwy powierzchniowej elementów konstrukcyjnych. Jedną z metod nakładania warstwy wierzchniej jest natryskiwanie cieplne. Obecnie znanych jest szereg sposobów natryskiwania cieplnego. Jest to stosunkowo nowa technologia osiągająca dobre rezultaty co skłania badaczy do ciągłego jej doskonalenia, w szczególności natryskiwania zimnym gazem. Podejmowane są również liczne badania nad podwyższeniem właściwości warstw naniesionych poprzez natryskiwanie

cieplne za pomocą obróbki cieplnej. Obróbka ta przeprowadzana jest z zastosowaniem różnych źródeł ciepła, w tym skupionymi źródłami ciepła do których zalicza się również obróbkę laserem. Dlatego podjęcie powyższego tematu pracy przez Doktorantkę uważam za trafne i celowe. Tematyka opiniowanej pracy dobrze odpowiada problemom zarówno naukowym jak i aplikacyjnym. Wpisuje się również dobrze w coraz częściej podejmowaną problematykę symulacji komputerowej procesów wytwarzania. Przedstawione w rozprawie wyniki badań i rozważania mogą stanowić materiał porównawczy do udoskonalania procesów komputerowych, a wytworzony nowy materiał o przedstawionych właściwościach może zyskać zastosowanie praktyczne.

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy obróbki cieplnej za pomocą lasera CO₂ wytworzonych metodą natryskiwania zimnym gazem powłok Ti i Ti-6Al-4V na podłoże ze stopu aluminium oraz badań wpływu zastosowanej obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne i tribologiczne, a tym samym mieści się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa ma typowy układ pracy doktorskiej. Rozprawa jest zapisana na 152 stronach maszynopisu formaty A4 i zawiera cztery główne rozdziały, spis treści, wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp, literaturę oraz streszczenia w językach polskim i angielskim. Monografia afiliowana jest do Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej i wydana drukiem. We wstępie, na stronach 11 i 12, Autorka wprowadza w tematykę rozprawy wykorzystując rys historyczny obrazujący rozwój metod wytwarzania warstwy wierzchniej. W pierwszym rozdziale obejmującym część literaturową (strony 13 do 37), w których Doktorantka przedstawiła metody natryskiwania cieplnego. Bazując na opracowaniu Davis'a dokonała autorskiego podziału metod natryskiwania cieplnego, stanowiącego rozwinięcie oraz połączenie metod opisanych w różnych pozycjach literaturowych (rozdział 1 - rys. 1.1). Przedstawiła problemy natryskiwania zimnym gazem (rozdział 1.1) skupiając się na charakterystyce procesu, prędkości krytycznej osadzania cząstek, budowie otrzymanej w wyniku natryskiwania warstwy wierzchniej, którą nazwała powłoką oraz mechanizmie jej budowy. W rozdziale 2 Autorka omówiła modyfikację laserową wytworzonych powłok metodą natryskiwania zimnym gazem zwracając uwagę na rodzaje obróbki laserowej z uwzględnieniem charakterystyki procesu i parametrów przetapiania laserowego oraz wykorzystania laserów do przetapiania wytworzonych powłok, który to rozdział nietrafnie nazwała „Wykorzystanie laserów w procesie natryskiwania zimnym gazem”. W rozdziale 3

Doktorantka przedstawiła zasady modelowania procesu przetapiania laserowego oraz przykład rozwiązania numerycznego powłok natryskiwanych zimnym gazem po modyfikacji laserowej. Całość dość skromnego przeglądu literatury dotyczącego dwóch zakresów tematycznych: natryskiwania cieplnego wraz z modelowaniem numerycznym procesu oraz obróbki cieplnej natryskiwanych powłok przedstawionego na 24 stronach Autorka zakończyła na stronie 37 rozprawy rozdziałem 4 zatytułowanym „Wnioski z analizy literatury”. Do opracowania przeglądu literatury Autorka wykorzystała 98 pozycji literaturowych z lat 1975 do 2020. Szkoda, że przy występującym dynamicznym rozwoju opisywanych metod Doktorantka nie uwzględniła literatury z ostatnich trzech lat.

Badania własne Doktorantka przedstawiła na stronach 38 do 140 w części drugiej rozprawy pt.: „Część doświadczalna”. Autorka przedstawiła w niej:

- tezę, cel pracy, cel użyteczny i zakres pracy (rozdział 5)
- metodykę badań (rozdział 6),
- charakterystykę materiałów użytych do natryskiwania (rozdział 7),
- analizę właściwości powłok natryskiwanych zimnym gazem (rozdział 8),
- analizę numeryczną modyfikacji laserowej powłok (rozdział 9),
- badania właściwości powłok zmodyfikowanych laserowo (rozdział 10).

W części tej Autorka przytoczyła niektóre pozycje literaturowe wymienione w przeglądzie literatury oraz pozostałe pozycje zestawione w rozdziale: „V Literatura”.

Łącznie praca zawiera 123 rysunki (z czego 14 zamieszczone w rozdziale Analiza literatury i 123 w rozdziale Część doświadczalna) i 28 tabel (1 w części Analiza literatury i 27 w części doświadczalnej). Literatura obejmuje 152 pozycje zawierające wydawnictwa książkowe i publikacje w czasopiśmie wydane w latach 1959 – 2022 oraz normy i materiały zamieszczone na stronach internetowych. Najstarsze pozycje dotyczą ogólnych właściwości materiałów. Wykorzystana literatura powiązana bezpośrednio z tematyką badań pochodzi z lat 1994 do 2022 z której 23 wymienione pozycje (za wyjątkiem norm w stron www) datowane są z ostatnich 5 lat (od 2018 r.). W wykazie literatury znajdują się jedna pozycja współautorska Doktorantki, 3 odniesień do stron internetowych. Tak szeroki przedział czasowy pozycji literaturowych świadczyć może, o wyłonieniu przez Doktorantkę najistotniejszych doniesień dotyczących tematu pracy, bez względu na datę przeprowadzonych badań. Szkoda jedynie, że Autorka wykorzystała tak niewiele opracowań z ostatnich lat. Przedstawienie przeglądu literatury budzi pewien niedosyt. Moim zdaniem za mało i nazbyt pobieżnie, wręcz encyklopedycznie, zostały przedstawione zagadnienia związane z tematem i celem rozprawy.

Największy niedosyt budzi rozdział 3.2 pracy. Brakuje w nim przedstawienia i porównania przedstawionych w literaturze poglądów dotyczących modelowania numerycznego. Reasumując można stwierdzić jest dobrze, ale nazbyt skromnie. Na plus dla Autorki należy zaznaczyć dokonanie podsumowania rozdziału Analiza literatury. Podsumowanie to stanowi ciągłość z częścią doświadczalną i jest spójne z wynikających z przeglądu literatury tezy, celu i zakresu badań własnych oraz wykazuje rozeznanie Doktorantki w zakresie tematyki rozprawy. Kolejność zamieszczonych rozdziałów nie budzi zastrzeżeń. Autorka w sposób zwięzły przedstawiła problem badawczy oraz umieściła go w sprecyzowanym obszarze badawczym. W tym celu trafnie dobrała metodykę badawczą, wybrała materiał badawczy, zaplanowała i przeprowadziła badania, zaprezentowała wyniki badań ich analizę i dyskusję oraz wnioski podsumowujące wyniki eksperymentu wraz ze wskazaniem dalszych kierunków badań.

Doktorantka prawidłowo sformułowała problem badawczy w postaci tezy: „Modyfikacja laserem CO₂ natryskiwanych zimnym gazem powłok Ti i Ti-6Al-4V umożliwi podwyższenie ich własności mechanicznych i tribologicznych.” W tezie Autorka zastosowała dyskusyjne określenie „własności”, podczas gdy w pozostałych zapisach pracy stosuje już prawidłowe określenie „właściwości”. Jak sądzę jest to typowy dla manuskryptów błąd edytorski.

Cele pracy Autorka postawiła w postaci celu naukowego:

„Opracowanie modelu numerycznego przetapiania laserowego służącego do określenia kształtu przetopienia za pomocą wiązki laserowej oraz zbadanie wpływu wartości parametrów obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem”

i celu użytecznego:

„Opracowanie technologii modyfikacji powłok natryskiwanych zimnym gazem w celu poprawy właściwości mechanicznych i tribologicznych. Identyfikacja oraz porównanie składu fazowego materiału wyjściowego z otrzymanymi powłokami”.

Teza i cel rozprawy, dobrze formułują problem naukowy w oparciu o przeprowadzoną analizę aktualnego stanu wiedzy naukowej z zakresu przedstawionego tematu. Po przeanalizowaniu tezy i spójnego z nią celu pracy stwierdzam, że rozprawa ma charakter naukowy i zmierza do rozwiązania oryginalnego problemu naukowego. Uważam, że Autorka oceniającej rozprawy potrafi właściwie sformułować problem naukowy, a z lektury następnych rozdziałów rozprawy wynika także, że potrafi zaproponować odpowiednie metody jego rozwiązania.

Do zrealizowania postawionego celu badań Doktorantka opanowała i wykorzystwała wiele metod badawczych, szczegółowo opisanych w rozprawie w rozdziale 6 rozprawy Metodyka badań. Autorka przedstawiła dokumentację fotograficzną całej użytej aparatury począwszy od przecinarki metalograficznej, a skończywszy na Urządzeniu do badań erozyjnych. Niektóre z przedstawionych obrazów urządzeń uważam za typowe i nie do końca rozumiem idee ich prezentacji. Nie rozumiem również potrzeby przedstawienia np. na rys. 6.11 schematu odcisku wgłębnika, mam nadzieję, że Doktorantka wyjaśni to w trakcie obrony rozprawy. Niestety w niektórych opisach zabrakło informacji o zastosowanych parametrach, np. przy laserze nieznana jest ogniskowa. Brakuje również ujednoczenia jednostek niektórych parametrów, np. prędkość liniowa podawana jest m/min i mm/s. Utrudnia to analizę wyników badań. Doktorantka na str. 46 rozprawy przedstawia mikroskop optyczny, podając jego możliwości powiększenia obrazu. Rodzi się dwa pytanie: czy istotne są możliwości optyczne mikroskopu, czy też zastosowane powiększenia? Charakterystykę stopu aluminium Autorka zamieściła w tabelach 6.4 i 6.5 na stronie 42., składy chemiczne proszków w tabeli 7.7 na stronie 60., parametry natryskiwania w tabeli 6.1 na stronie 39, zaś parametry obróbki cieplnej w tabeli 6.3 na stronie 41. rozprawy.

Charakterystykę materiałów użytych do natryskiwania Autorka przedstawiła w rozdziale 7. rozprawy. Na str. 56 znowu pojawia się pojęcie własności, a w następnym zdaniu właściwości po czym znowu własności. Nie wiadomo jaką różnicę Autorka ma na myśli pomiędzy pojęciem własność, a właściwość. Doktorantka nie podała w jaki sposób określała rozkłady skumulowany i gęstości proszków. Czy zastosowane proszki można zaliczyć do jednorodnych pod względem przedstawionych parametrów? Generalnie w rozprawie brakuje podania ilości powtórzeń dla poszczególnych badań. Z analizy rozprawy wynika jednak, że badania prowadzono przy pewnej ilości powtórzeń ponieważ na niektórych wykresach określono odchylenia (nie podano natomiast jakie to są odchylenia ani jak je określono). Generalnie charakterystyka proszku została przedstawiona w sposób umożliwiający pozyskanie niezbędnych informacji.

Przed badaniem wpływu obróbki cieplnej Autorka wytworzyła warstwy wierzchnie i przeprowadziła ich badania, str. 63 do 83. Udokumentowała badania warstwy naniesionej na powierzchni ze wskazaniem porów, co jest typowym zjawiskiem w metalurgii proszków. Wytworzenie elementów konstrukcyjnych o dobrych właściwościach wymusza stosowanie drobnoziarnistych proszków o precyzyjnie dobranym składzie chemicznym i dedykowanych im parametrach procesu. Pory przy opanowanej technologii nakładania zazwyczaj stanowią około jednego procenta objętości, przy natryskiwaniu zimnym gazem porowatości mogą być

znacznie większe. Doktorantka nie przedstawiła wyników objętości porów w poszczególnych badaniach ograniczając się do podania po jednej wielkości dla każdego z proszków (str. 72 i 73). Przedstawiła w rozdziale 8.6 przegląd literatury dotyczący tego problemu. Nie wiadomo również czy przedstawione na rys. 8.1 i 8.2 warstwy analizowano w kierunku poprzecznym czy wzdłużnym do kierunku ich nakładania. Doktorantka przedstawiła również między innymi mikrostruktury natryskiwanych powłok, rozkłady pierwiastków stanowiących składniki proszków, grubości powłok, topografie powierzchni powłok, pomiary mikrotwardości: powierzchni, strefy przy powierzchni, centralnej części powłoki i strefy przy podłożu (zabrakło określenia położenia stref przy powierzchni i przy podłożu), pomiary przyczepności, badania tribologiczne metoda kulka-tarcza oraz przy ścieraniu w ośrodku sypkim. Na str. 81 Doktorantka użyła określenia ścinania w miejsce ścierania.

Autorka w rozdziale 9.1 na str. 84 przedstawiając analizę MES warstwy natryskiwanej po obróbce laserowej słusznie podaje, że wyniki analizy numerycznej zależą w szczególności od rodzaju analizy i warunków brzegowych, nie przedstawiła jednak zastosowanych warunków brzegowych decydujących o wynikach analizy MES. Rzeczywista weryfikację przeprowadzonej analizy MES Doktorantka zaprezentowała w rozdziale 10 rozprawy. Przedstawiła na rys. 10.1 i 10.2 morfologie powierzchni (nie podając miejsca analizy względem głębokości ani kierunku nakładania powłoki, załączone na rys. 10.3 i 10.4 mikrostruktury są nieczytelne), rozkłady pierwiastków (liniowe, punktowe i mapy), głębokości przetopienia wiązką promieni laserowych, topografię powierzchni, pomiary porowatości po obróbce cieplnej, mikrotwardości warstw (jak poprzednio), niektóre parametry chropowatości, zużycie ściernie kula-tarcza i w ośrodku sypkim oraz badania erozyjne. Przedstawione wyniki badań zostały omówione na str. 98 do 135 oraz w podsumowaniu na str. 136-139.

Pomimo uwag zamieszczonych powyżej uważam, że na szczególną uwagę zasługuje wkład Doktorantki w opracowanie przedstawione w rozdziale 10 rozprawy. We wszystkich przedstawionych w rozprawie wynikach badań i ich syntetycznej analizie zauważam dążenie Doktorantki do osiągnięcia postawionych na wstępie części drugiej rozprawy tezy i celów rozprawy. Na stronie 140 Autorka zamieściła 9 stwierdzeń podsumowujących rozprawę. Są one słuszne w odniesieniu do uzyskanych wyników badań oraz są skorelowane z tezą i celami rozprawy. Stwierdzam, że Autorka dowiodła postawioną tezę oraz osiągnęła zamierzone cele przedstawiony na str. 38 ocenionej rozprawy. Za szczególne osiągnięcie w realizacji pracy uważam również opracowanie analizy numerycznej obróbki cieplnej warstwy natryskiwanej zimnym gazem, co nie było zadaniem łatwym. Przedstawiona analiza MES wraz z analizą stanowią bardzo cenny materiał aplikacyjny zarówno do wykorzystania w przemyśle jak

i aplikacjach komputerowych w celu optymalizacji procesów wytwarzania materiałów metodą spiekania.

Rozumiem, że przy tak bogatym eksperymencie, biorąc pod uwagę ograniczona objętość rozprawy doktorskiej, Autorka nie była w stanie zamieścić i wyczerpująco opisać wszystkich otrzymanych w trakcie badań wyników. Wykazała jednak, że potrafi nie tylko zaplanować i przeprowadzić eksperyment, ale również potrafi przeprowadzić prawidłową jego analizę i wyciągnąć właściwe wnioski.

Mimo przedstawionych drobnych uwag, które mogą mieć charakter polemiczny, należy stwierdzić, że nie umniejszają one zasadniczej wartości pracy, w której zrealizowano bardzo szeroki program badań. Autorka przedstawiła również szereg bardzo interesujących aspektów aplikacyjnych.

3. Wniosek końcowy

Opiniowaną przeze mnie rozprawę doktorską Pani mgr inż. Dominiki Soboń nt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem” oceniam pozytywnie. Wykazuje ona ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna z zakresu wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem, stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego oraz wykazuje umiejętność i dobre przygotowania Autorki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Dominiki Soboń nt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem” spełnia wymagania ustawy z dnia 20. lipca 2018 r. (Dz. U. 2023.742) jednolity tekstu ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stawiane rozprawom doktorskim. **Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Dominiki Soboń do publicznej obrony.**



Prof. dr hab. inż. Tomasz Lipiński
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn

Olsztyn, dnia 12.04.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Dominiki Soboń
nt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok
Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem”**

opracowana na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Pana
dr hab. inż. Sławomira Błasiak, prof. PŚk (MAA-511/19/2024 z dnia 12.02.2024 r.)
w związku z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Świętokrzyskiej
z dnia 25.01.2024 r.

1. Informacja o rozprawie

Rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Dominiki Soboń została wykonana na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej pod kierunkiem Pana dr. hab. inż. Wojciecha Żórawskiego, prof. P.Śk. Podjęty przez Autorkę problem dotyczący opisu wpływu obróbki skupionym źródłem ciepła na mikrostrukturę i właściwości powłok powstałych z proszków Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem. Stosowanie powłok nakładanych na materiały konstrukcyjne cieszy się dużym zainteresowaniem zarówno w środowisku naukowym jak i przemysłowym. Rozwój tych technologii niesie za sobą duże możliwości kształtowania właściwości mechanicznych, fizycznych, chemicznych itd. warstwy powierzchniowej elementów konstrukcyjnych. Jedną z metod nakładania warstwy wierzchniej jest natryskiwanie cieplne. Obecnie znanych jest szereg sposobów natryskiwania cieplnego. Jest to stosunkowo nowa technologia osiągająca dobre rezultaty co skłania badaczy do ciągłego jej doskonalenia, w szczególności natryskiwania zimnym gazem. Podejmowane są również liczne badania nad podwyższeniem właściwości warstw naniesionych poprzez natryskiwanie

cieplne za pomocą obróbki cieplnej. Obróbka ta przeprowadzana jest z zastosowaniem różnych źródeł ciepła, w tym skupionymi źródłami ciepła do których zalicza się również obróbkę laserem. Dlatego podjęcie powyższego tematu pracy przez Doktorantkę uważam za trafne i celowe. Tematyka opiniowanej pracy dobrze odpowiada problemom zarówno naukowym jak i aplikacyjnym. Wpisuje się również dobrze w coraz częściej podejmowaną problematykę symulacji komputerowej procesów wytwarzania. Przedstawione w rozprawie wyniki badań i rozważania mogą stanowić materiał porównawczy do udoskonalania procesów komputerowych, a wytworzony nowy materiał o przedstawionych właściwościach może zyskać zastosowanie praktyczne.

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy obróbki cieplnej za pomocą lasera CO₂ wytworzonych metodą natryskiwania zimnym gazem powłok Ti i Ti-6Al-4V na podłoże ze stopu aluminium oraz badań wpływu zastosowanej obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne i tribologiczne, a tym samym mieści się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa ma typowy układ pracy doktorskiej. Rozprawa jest zapisana na 152 stronach maszynopisu formaty A4 i zawiera cztery główne rozdziały, spis treści, wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp, literaturę oraz streszczenia w językach polskim i angielskim. Monografia afiliowana jest do Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej i wydana drukiem. We wstępie, na stronach 11 i 12, Autorka wprowadza w tematykę rozprawy wykorzystując rys historyczny obrazujący rozwój metod wytwarzania warstwy wierzchniej. W pierwszym rozdziale obejmującym część literaturową (strony 13 do 37), w których Doktorantka przedstawiła metody natryskiwania cieplnego. Bazując na opracowaniu Davis'a dokonała autorskiego podziału metod natryskiwania cieplnego, stanowiącego rozwinięcie oraz połączenie metod opisanych w różnych pozycjach literaturowych (rozdział 1 - rys. 1.1). Przedstawiła problemy natryskiwania zimnym gazem (rozdział 1.1) skupiając się na charakterystyce procesu, prędkości krytycznej osadzania cząstek, budowie otrzymanej w wyniku natryskiwania warstwy wierzchniej, którą nazwała powłoką oraz mechanizmie jej budowy. W rozdziale 2 Autorka omówiła modyfikację laserową wytworzonych powłok metodą natryskiwania zimnym gazem zwracając uwagę na rodzaje obróbki laserowej z uwzględnieniem charakterystyki procesu i parametrów przetapiania laserowego oraz wykorzystania laserów do przetapiania wytworzonych powłok, który to rozdział nietrafnie nazwała „Wykorzystanie laserów w procesie natryskiwania zimnym gazem”. W rozdziale 3

Doktorantka przedstawiła zasady modelowania procesu przetapiania laserowego oraz przykład rozwiązania numerycznego powłok natryskiwanych zimnym gazem po modyfikacji laserowej. Całość dość skromnego przeglądu literatury dotyczącego dwóch zakresów tematycznych: natryskiwania cieplnego wraz z modelowaniem numerycznym procesu oraz obróbki cieplnej natryskiwanych powłok przedstawionego na 24 stronach Autorka zakończyła na stronie 37 rozprawy rozdziałem 4 zatytułowanym „Wnioski z analizy literatury”. Do opracowania przeglądu literatury Autorka wykorzystowała 98 pozycji literaturowych z lat 1975 do 2020. Szkoda, że przy występującym dynamicznym rozwoju opisywanych metod Doktorantka nie uwzględniła literatury z ostatnich trzech lat.

Badania własne Doktorantka przedstawiła na stronach 38 do 140 w części drugiej rozprawy pt.: „Część doświadczalna”. Autorka przedstawiła w niej:

- tezę, cel pracy, cel użyteczny i zakres pracy (rozdział 5)
- metodykę badań (rozdział 6),
- charakterystykę materiałów użytych do natryskiwania (rozdział 7),
- analizę właściwości powłok natryskiwanych zimnym gazem (rozdział 8),
- analizę numeryczną modyfikacji laserowej powłok (rozdział 9),
- badania właściwości powłok zmodyfikowanych laserowo (rozdział 10).

W części tej Autorka przytoczyła niektóre pozycje literaturowe wymienione w przeglądzie literatury oraz pozostałe pozycje zestawione w rozdziale: „V Literatura”.

Łącznie praca zawiera 123 rysunki (z czego 14 zamieszczone w rozdziale Analiza literatury i 123 w rozdziale Część doświadczalna) i 28 tabel (1 w części Analiza literatury i 27 w części doświadczalnej). Literatura obejmuje 152 pozycje zawierające wydawnictwa książkowe i publikacje w czasopiśmie wydane w latach 1959 – 2022 oraz normy i materiały zamieszczone na stronach internetowych. Najstarsze pozycje dotyczą ogólnych właściwości materiałów. Wykorzystana literatura powiązana bezpośrednio z tematyką badań pochodzi z lat 1994 do 2022 z której 23 wymienione pozycje (za wyjątkiem norm w stron www) datowane są z ostatnich 5 lat (od 2018 r.). W wykazie literatury znajdują się jedna pozycja współautorska Doktorantki, 3 odniesień do stron internetowych. Tak szeroki przedział czasowy pozycji literaturowych świadczyć może, o wyłonieniu przez Doktorantkę najistotniejszych doniesień dotyczących tematu pracy, bez względu na datę przeprowadzonych badań. Szkoda jedynie, że Autorka wykorzystwała tak niewiele opracowań z ostatnich lat. Przedstawienie przeglądu literatury budzi pewien niedosyt. Moim zdaniem za mało i nazbyt pobieżnie, wręcz encyklopedycznie, zostały przedstawione zagadnienia związane z tematem i celem rozprawy.

Największy niedosyt budzi rozdział 3.2 pracy. Brakuje w nim przedstawienia i porównania przedstawionych w literaturze poglądów dotyczących modelowania numerycznego. Reasumując można stwierdzić jest dobrze, ale nazbyt skromnie. Na plus dla Autorki należy zaznaczyć dokonanie podsumowania rozdziału Analiza literatury. Podsumowanie to stanowi ciągłość z częścią doświadczalną i jest spójne z wynikających z przeglądu literatury tezy, celu i zakresu badań własnych oraz wykazuje rozeznanie Doktorantki w zakresie tematyki rozprawy. Kolejność zamieszczonych rozdziałów nie budzi zastrzeżeń. Autorka w sposób zwięzły przedstawiła problem badawczy oraz umieściła go w sprecyzowanym obszarze badawczym. W tym celu trafnie dobrała metodykę badawczą, wybrała materiał badawczy, zaplanowała i przeprowadziła badania, zaprezentowała wyniki badań ich analizę i dyskusję oraz wnioski podsumowujące wyniki eksperymentu wraz ze wskazaniem dalszych kierunków badań.

Doktorantka prawidłowo sformułowała problem badawczy w postaci tezy:

„Modyfikacja laserem CO₂ natryskiwanych zimnym gazem powłok Ti i Ti-6Al-4V umożliwi podwyższenie ich własności mechanicznych i tribologicznych.” W tezie Autorka zastosowała dyskusyjne określenie „własności”, podczas gdy w pozostałych zapisach pracy stosuje już prawidłowe określenie „właściwości”. Jak sądzę jest to typowy dla manuskryptów błąd edytorski.

Cele pracy Autorka postawiła w postaci celu naukowego:

„Opracowanie modelu numerycznego przetapiania laserowego służącego do określenia kształtu przetopienia za pomocą wiązki laserowej oraz zbadanie wpływu wartości parametrów obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem”
i celu użytkowego:

„Opracowanie technologii modyfikacji powłok natryskiwanych zimnym gazem w celu poprawy właściwości mechanicznych i tribologicznych. Identyfikacja oraz porównanie składu fazowego materiału wyjściowego z otrzymanymi powłokami”.

Teza i cel rozprawy, dobrze formułują problem naukowy w oparciu o przeprowadzoną analizę aktualnego stanu wiedzy naukowej z zakresu przedstawionego tematu. Po przeanalizowaniu tezy i spójnego z nią celu pracy stwierdzam, że rozprawa ma charakter naukowy i zmierza do rozwiązania oryginalnego problemu naukowego. Uważam, że Autorka oceniającej rozprawy potrafi właściwie sformułować problem naukowy, a z lektury następnych rozdziałów rozprawy wynika także, że potrafi zaproponować odpowiednie metody jego rozwiązania.

Do zrealizowania postawionego celu badań Doktorantka opanowała i wykorzystwała wiele metod badawczych, szczegółowo opisanych w rozprawie w rozdziale 6 rozprawy Metodyka badań. Autorka przedstawiła dokumentację fotograficzną całej użytej aparatury począwszy od przecinarki metalograficznej, a skończywszy na Urządzeniu do badań erozyjnych. Niektóre z przedstawionych obrazów urządzeń uważam za typowe i nie do końca rozumiem idee ich prezentacji. Nie rozumiem również potrzeby przedstawienia np. na rys. 6.11 schematu odcisku wgłębnika, mam nadzieję, że Doktorantka wyjaśni to w trakcie obrony rozprawy. Niestety w niektórych opisach zabrakło informacji o zastosowanych parametrach, np. przy laserze nieznana jest ogniskowa. Brakuje również ujednoczenia jednostek niektórych parametrów, np. prędkość liniowa podawana jest m/min i mm/s. Utrudnia to analizę wyników badań. Doktorantka na str. 46 rozprawy przedstawia mikroskop optyczny, podając jego możliwości powiększenia obrazu. Rodzi się dwa pytanie: czy istotne są możliwości optyczne mikroskopu, czy też zastosowane powiększenia? Charakterystykę stopu aluminium Autorka zamieściła w tabelach 6.4 i 6.5 na stronie 42., składy chemiczne proszków w tabeli 7.7 na stronie 60., parametry natryskiwania w tabeli 6.1 na stronie 39, zaś parametry obróbki cieplnej w tabeli 6.3 na stronie 41. rozprawy.

Charakterystykę materiałów użytych do natryskiwania Autorka przedstawiła w rozdziale 7. rozprawy. Na str. 56 znowu pojawia się pojęcie własności, a w następnym zdaniu właściwości po czym znowu własności. Nie wiadomo jaką różnicę Autorka ma na myśli pomiędzy pojęciem własność, a właściwość. Doktorantka nie podała w jaki sposób określała rozkłady skumulowany i gęstości proszków. Czy zastosowane proszki można zaliczyć do jednorodnych pod względem przedstawionych parametrów? Generalnie w rozprawie brakuje podania ilości powtórzeń dla poszczególnych badań. Z analizy rozprawy wynika jednak, że badania prowadzono przy pewnej ilości powtórzeń ponieważ na niektórych wykresach określono odchylenia (nie podano natomiast jakie to są odchylenia ani jak je określono). Generalnie charakterystyka proszku została przedstawiona w sposób umożliwiający pozyskanie niezbędnych informacji.

Przed badaniem wpływu obróbki cieplnej Autorka wytworzyła warstwy wierzchnie i przeprowadziła ich badania, str. 63 do 83. Udokumentowała badania warstwy naniesionej na powierzchni ze wskazaniem porów, co jest typowym zjawiskiem w metalurgii proszków. Wytworzenie elementów konstrukcyjnych o dobrych właściwościach wymusza stosowanie drobnoziarnistych proszków o precyzyjnie dobranym składzie chemicznym i dedykowanych im parametrach procesu. Pory przy opanowanej technologii nakładania zazwyczaj stanowią około jednego procenta objętości, przy natryskiwaniu zimnym gazem porowatości mogą być

znacznie większe. Doktorantka nie przedstawiła wyników objętości porów w poszczególnych badaniach ograniczając się do podania po jednej wielkości dla każdego z proszków (str. 72 i 73). Przedstawiła w rozdziale 8.6 przegląd literatury dotyczący tego problemu. Nie wiadomo również czy przedstawione na rys. 8.1 i 8.2 warstwy analizowano w kierunku poprzecznym czy wzdłużnym do kierunku ich nakładania. Doktorantka przedstawiła również między innymi mikrostruktury natryskiwanych powłok, rozkłady pierwiastków stanowiących składniki proszków, grubości powłok, topografie powierzchni powłok, pomiary mikrotwardości: powierzchni, strefy przy powierzchni, centralnej części powłoki i strefy przy podłożu (zabrakło określenia położenia stref przy powierzchni i przy podłożu), pomiary przyczepności, badania tribologiczne metoda kulka-tarcza oraz przy ścieraniu w ośrodku sypkim. Na str. 81 Doktorantka użyła określenia ścinania w miejsce ścierania.

Autorka w rozdziale 9.1 na str. 84 przedstawiając analizę MES warstwy natryskiwanej po obróbce laserowej słusznie podaje, że wyniki analizy numerycznej zależą w szczególności od rodzaju analizy i warunków brzegowych, nie przedstawiła jednak zastosowanych warunków brzegowych decydujących o wynikach analizy MES. Rzeczywista weryfikację przeprowadzonej analizy MES Doktorantka zaprezentowała w rozdziale 10 rozprawy. Przedstawiła na rys. 10.1 i 10.2 morfologie powierzchni (nie podając miejsca analizy względem głębokości ani kierunku nakładania powłoki, załączone na rys. 10.3 i 10.4 mikrostruktury są nieczytelne), rozkłady pierwiastków (liniowe, punktowe i mapy), głębokości przetopienia wiązką promieni laserowych, topografię powierzchni, pomiary porowatości po obróbce cieplnej, mikrotwardości warstw (jak poprzednio), niektóre parametry chropowatości, zużycie ścierne kula-tarcza i w ośrodku sypkim oraz badania erozyjne. Przedstawione wyniki badań zostały omówione na str. 98 do 135 oraz w podsumowaniu na str. 136-139.

Pomimo uwag zamieszczonych powyżej uważam, że na szczególną uwagę zasługuje wkład Doktorantki w opracowanie przedstawione w rozdziale 10 rozprawy. We wszystkich przedstawionych w rozprawie wynikach badań i ich syntetycznej analizie zauważam dążenie Doktorantki do osiągnięcia postawionych na wstępie części drugiej rozprawy tezy i celów rozprawy. Na stronie 140 Autorka zamieściła 9 stwierdzeń podsumowujących rozprawę. Są one słuszne w odniesieniu do uzyskanych wyników badań oraz są skorelowane z tezą i celami rozprawy. Stwierdzam, że Autorka dowiodła postawioną tezę oraz osiągnęła zamierzone cele przedstawiony na str. 38 ocenionej rozprawy. Za szczególne osiągnięcie w realizacji pracy uważam również opracowanie analizy numerycznej obróbki cieplnej warstwy natryskiwanej zimnym gazem, co nie było zadaniem łatwym. Przedstawiona analiza MES wraz z analizą stanowią bardzo cenny materiał aplikacyjny zarówno do wykorzystania w przemyśle jak

i aplikacjach komputerowych w celu optymalizacji procesów wytwarzania materiałów metodą spiekania.

Rozumiem, że przy tak bogatym eksperymencie, biorąc pod uwagę ograniczoną objętość rozprawy doktorskiej, Autorka nie była w stanie zamieścić i wyczerpująco opisać wszystkich otrzymanych w trakcie badań wyników. Wykazała jednak, że potrafi nie tylko zaplanować i przeprowadzić eksperyment, ale również potrafi przeprowadzić prawidłową jego analizę i wyciągnąć właściwe wnioski.

Mimo przedstawionych drobnych uwag, które mogą mieć charakter polemiczny, należy stwierdzić, że nie umniejszają one zasadniczej wartości pracy, w której zrealizowano bardzo szeroki program badań. Autorka przedstawiła również szereg bardzo interesujących aspektów aplikacyjnych.

3. Wniosek końcowy

Opiniowaną przeze mnie rozprawę doktorską Pani mgr inż. Dominiki Soboń nt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem” oceniam pozytywnie. Wykazuje ona ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna z zakresu wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem, stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego oraz wykazuje umiejętność i dobre przygotowania Autorki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Dominiki Soboń nt.: „Analiza wpływu obróbki laserowej na właściwości powłok Ti i Ti-6Al-4V natryskiwanych zimnym gazem” spełnia wymagania ustawy z dnia 20. lipca 2018 r. (Dz. U. 2023.742) jednolity tekstu ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stawiane rozprawom doktorskim. **Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Dominiki Soboń do publicznej obrony.**



