



Lublin, dn. 2024-04-18

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza pt.:

„Symulacja numeryczna procesu kształtowania lokalnych umocnień za pomocą hartowania laserowego na potrzeby dostosowania funkcjonalności cienkościennych elementów wytwarzanych generatywnie z materiału StaVari”

wykonanej pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Jacka Reinera, prof. uczelni oraz promotora pomocniczego Pana dr inż. Piotra Koruby

Uwaga formalna

Opinię niniejszą opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, na podstawie przesłanego do mnie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 28.02.2024 r.

1. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Radkiewicza przedstawiona została w postaci zwartego opracowania na 186 stronach formatu A4. Struktura opracowania nie odbiega od przyjętych standardów dla tego typu prac i została logicznie podzielona na 10 numerowanych rozdziałów. Wstęp (nienumerowany) został poprzedzony streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem skrótów i symboli odnoszących się m.in. do stosowanych w pracy metod badawczych oraz opisu wielkości fizycznych i właściwości materiałowych. We wstępie obejmującym 2 strony, Autor zawiera wprowadzające informacje do problematyki związanej z selektywną modyfikacją właściwości elementów cienkościennych z wykorzystaniem technologii laserowych oraz zwraca uwagę na dynamicznie rozwijającą się gałąź technologii generatywnych. Ponadto wskazuje na płynące zapotrzebowanie na prace umożliwiające rozszerzenie funkcjonalności oraz obszaru aplikacji wytwarzanych za jej pomocą elementów. Pierwsze cztery rozdziały stanowią przegląd danych literaturowych związanych z problematyką rozprawy. Autor w rozdziale pierwszym charakteryzuje zagadnienia związane z lokalną modyfikacją właściwości elementów cienkościennych, ze szczególnym uwzględnieniem obróbek laserowych i badań symulacyjnych.

Wskazuje przy tym na brak danych literaturowych odnośnie symulacji w warunkach obciążenia elementów cienkościennych zawierających umocnienia o znacznej powierzchni wytworzone w technologii hartowania, a na str. 31 formułuje pierwszy raz cel pracy. W rozdziale drugim przeprowadzono analizę i ocenę wpływu zjawisk mających miejsce podczas procesu hartowania oraz scharakteryzowano dobór parametrów procesu, a także opisano metody jego monitorowania. Kolejny rozdział trzeci zawiera wprowadzenie do modelowania numerycznego procesów hartowania laserowego ze szczególnym uwzględnieniem właściwości termofizycznych i przemian fazowych w materiale. Z kolei rozdział czwarty zawiera charakterystykę stali średniomanganowych wytwarzanych generatywnie. Kolejny rozdział piąty stanowi wprowadzenie do części eksperymentalnej, w której Doktorat określa zakres pracy umożliwiających osiągnięcie postawionego celu. Warto dodać, że w rozdziale tym zamieszczono trafne i właściwe podsumowanie w formie 11-tu wypunktowanych wniosków z przeprowadzonych studiów literaturowych na podstawie, których Autor definiuje raz jeszcze cel pracy. Kolejne rozdziały 6÷8 stanowią rozwinięcie części eksperymentalnej umieszczonej w trzech obszarach tematycznych, w których Autor kolejno we właściwych rozdziałach i podrozdziałach charakteryzuje:

- badania materiałowe (rozd. 6) związane z doświadczalnym gatunkiem stali średniomanganowej;
- badania procesowe eksperymentalne (rozd. 7) związane z opracowaniem technologii hartowania laserowego;
- badania procesowe symulacyjne (rozd. 8) odnośnie numerycznego modelowania lokalnego obszaru umocnienia.

Doświadczana część pracy kończy się rozdziałem dziewiątym, w którym omówiono aplikacyjne aspekty lokalnego hartowania laserowego cienkościennych profili typu crashbox wykonanych w ramach prac projektowych, dotyczących międzynarodowego programu M-ERA.NET2 Cofund. Cel, zakres tematyczny i metodyka badawcza wskazane w rozprawie doktorskiej są dopasowane do dyscypliny *inżynieria mechaniczna*. Ostatni numerowany rozdział dziesiąty, stanowi podsumowanie wyników i wnioski z przeprowadzonych prac badawczych. W dalszej części rozprawy, kolejno umieszczono nienumerowane rozdziały obejmujące bibliografię oraz spis tabel i rysunków, co w przypadku dwóch ostatnich rozdziałów dodatkowo ułatwia analizę treści, a przy tym podnosi jakość opracowania rozprawy.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 158 pozycji i w ocenie recenzenta jest on wystarczający do poprawnie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w obszarze tematu rozprawy. Głównie jest to literatura zagraniczna o zasięgu międzynarodowym, przy czym blisko 72% pozycji literatury jest nie starsza niż 10 lat, co dodatkowo świadczy, że tematyka badawcza jest aktualna i warta podejmowania dalszych badań w tym obszarze. Wszystkie pozycje wyszczególnione w bibliografii zostały przytoczone w treści pracy, przy czym do poz. [24] odwołano się niepoprawnie (patrz str. 20) powołując się na współautorskie prace

Conrads L. Zaznaczyć należy przy tym, że wśród cytowanej literatury odnotowano dwie pozycje współautorskie Doktoranta (tj. poz. 157 i 158).

Układ pracy jest jasny i przejrzysty. Doktorant w sposób prawidłowy opanował stosowanie zwrotów i opisów technicznych, a terminologia i pojęcia stosowane w pracy są stosowane zasadniczo poprawnie.

Tytuł przedstawionej rozprawy „*Symulacja numeryczna procesu kształtowania lokalnych umocnień za pomocą hartowania laserowego na potrzeby dostosowania funkcjonalności cienkościennych elementów wytwarzanych generatywnie z materiału StaVari*” w pełni koresponduje z treścią zawartą w pracy.

Mimo na ogół bardzo starannej redakcji pracy, Doktorant nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć i nieścisłości. Niektóre sformułowania są użyte w pracy niezręcznie lub niewłaściwie, ale nie umniejszają one wartości rozprawy:

- brak konsekwencji w podawaniu oznaczeń gatunków stopów metali, wybrane gatunki oznaczane są wg aktualnych norm PN-EN, inne z kolei wg starych norm PN lub norm AISI. Skoro praca realizowana jest w języku polskim to należy używać oznaczeń stopów metali zgodnie z wymogami aktualnej normy PN-EN;
- str. 16 niepoprawne tłumaczenie z ang. terminologii „*laser shock peening*” jako „*kulowanie laserowe*”, - prawidłowo powinno być „*laserowe nagniatanie impulsowe*” lub „*laserowe umocnienie udarowe*”;
- nieprecyzyjne powołanie się na literaturę na str. 64 czytamy „*Dla materiału będącego przedmiotem niniejszej pracy proces wytwarzania opracowano i przedstawiono w pracy [138].*” – w tym miejscu bardziej zasadnym byłoby powołanie się na pracę Pawlaka i współ. [148], gdzie skład chemiczny i doboru obróbki cieplnej mamy zbliżony do będącej przedmiotem badań w rozprawie doktorskiej;
- na str. 94 czytamy „*Wykonane próbki hartowania analizowano poprzez pomiar profilu twardości w przekroju wzdłużnym...*” – prawidłowo powinno być „*Wykonane próbki hartowania analizowano poprzez pomiar rozkładu twardości w przekroju wzdłużnym...*”;
- Przytaczanie wielokrotnie w pracy terminu „*charakteryzacja*” w kontekście użycia go w następujących zestawieniach: „*charakteryzacja zależności*”, „*charakteryzacja materiałowa*”, „*charakteryzacja kształtu*”, „*charakteryzacja wyników*”, „*charakteryzacja procesu*” itd. w ocenie recenzenta jest niewłaściwe, gdyż termin ten odnosi się do wyglądu osoby, zasadnym byłoby w tym przypadku używanie terminu „*charakterystyka*”;
- niepoprawne podpisy na osi odciętych w przypadku rysunków odnoszących się do pomiaru twardości HV na przekroju poprzecznym wzdłuż osi x, dotyczy to rys. 75, rys. 76 oraz rys.120, gdzie mamy „*głębokość*” a powinno być „*szerokość*”;

- str. 109 równanie (18) w zapisie matematycznym nie stanowi równania, a jedynie iloraz pewnych wielkości;
- Autor stosuje odnośnie wielkości fizycznej jaką jest czas w pracy pojęcia „*moment*” oraz „*chwila*” i tak na str. 109 w opisie zmiennych z równania (18) czytamy „*gdzie t_0, t_1 – moment początku i końca pojedynczej oscylacji*” - powinno być „*...czas początku i końca pojedynczej oscylacji*”, podobnie na str. 123 czytamy „*...wyniki obliczeń modelu symulacyjnego prezentują wartości w dyskretnych chwilach...*” - powinno być „*...wyniki obliczeń modelu symulacyjnego prezentują dyskretne wartości czasu...*”;
- uchybienia z cyklu „*Autor nie zadał sobie trudu*” związane z powtórzeniami tekstu ze str. 88 w niezmienionej postaci, przekopiowane i umieszczone na str. 163 tj.:
„*Na podstawie informacji na temat procesu wytwórczego oraz analizy wyników badań stwierdzono, że strukturę materiału stanowi mieszanina wysokoodpuszczonego martenzytu z zawartością ok. 30% austenitu szczątkowego. Dane z wykresu przemian w warunkach ciągłego chłodzenia (CTPc) wskazują na wysoką podatność materiału na hartowanie przy pomocy wiązki laserowej.*” oraz
„*Kluczowym aspektem dot. wyników rzeczywistych pomiarów, wymagających uwzględnienia w dalszych badaniach, jest różnica w przebiegu pojemności cieplnej w czasie nagrzewania i chłodzenia, spowodowana obecnością austenitu szczątkowego w materiale wejściowym.*”;
- w pracy nie podano ilości powtórzeń przy pomiarach twardości, mając dodatkowo na uwadze podawane rzeczywiste szerokości obszaru umocnionego (Tab. 18) bez informacji czy to są wartości średnie oraz bez odchylenia standardowego może sugerować, że Autor bazował tylko na pomiarach jednej próbki, co z kolei może budzić wątpliwość co do powtarzalności otrzymanych wyników;
- literówki bądź mylenie słów tzw. *przekręcanie znaczenia wyrazów*, które wypacza ich przekaz i tak dla przykładu: str. 38 „*...szarsze...*” a powinno być „*szersze*”, str. 52 jest „*...prawe...*” powinno być „*prawem*”, na str. 61 czytamy „*...nagrania...*” zamiast „*nagrzania*”, str. 76 jest „*ot*” zamiast „*od*” itp.;
- brak jest bezpośredniego odwołania się Autora do rysunków (Rys. 1÷12) prezentowanych w tekście i ten trend utrzymuje się do str. 25. Zamieszczone wykresy i ilustracje wprawdzie luźno korespondują z treścią podrozdziałów i niejednokrotnie trzeba się domyśleć ich przeznaczenia. Umieszczane grafiki powinny być spójnym, zintegrowanym elementem z treścią rozprawy doktorskiej. Natomiast od str. 26 styl powoływania się na rysunki diametralnie się zmienia i prezentowany jest już w pracy prawidłowo.

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, pod względem formalnym praca została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom dla rozpraw doktorskich, a objętość wynika z potrzeby opisu przeprowadzenia obszernego programu badań.

2. Ocena merytoryczna pracy

W ostatnim czasie obserwuje się dynamiczny rozwój technologii addytywnych i związane z tym poszukiwania nowych gatunków materiałów, dla których nie ma jeszcze w pełni określonych charakterystyk materiałowych. Metody addytywne pozwalają na względnie swobodne podejście przy wytwarzaniu wyrobów o złożonej geometrii niemożliwej lub trudnej do uzyskania przy wykorzystaniu konwencjonalnych technologii wytwórczych. Zagadnienie użycia elementów wykonanych w technologiach przyrostowych w aplikacjach bazujących dotychczas na głęboko tłoczonych arkuszach blach ciągle stanowi aktualny obszar badawczy. Metalowe elementy cienkościenne ze względu na przeznaczenie wymagają czasami lokalnej modyfikacji pozwalającej na uzyskanie miejscowych korzystnych właściwości użytkowych. Dane literaturowe wskazują, że zastosowanie procesów lokalnego hartowania laserowego może przyczynić się do umocnienia powierzchni elementów cienkościennych wytwarzanych na potrzeby branży automotive. Ośrodki przemysłowe stawiają coraz to wyższe wymagania w poszukiwaniu niezawodnych metod kształtowania elementów typu crashbox, w celu uzyskania specjalnych właściwości w zadanych obszarach, gdzie kształt lokalnej modyfikacji może oddziaływać na stopień odkształcenia elementu podczas zgniotu. Na wskutek wnikliwie przeprowadzonej przez Autora analizy literatury wynika, że danych o zastosowaniu hartowania laserowego do umacniania elementów cienkościennych jest stosunkowo niewiele. Trudność technologiczną stanowi odpowiedni dobór parametrów, zapewniających odpowiednią temperaturę na powierzchni przez określony czas umożliwiającą nagrzanie na określoną głębokość materiału, tak aby nie dopuścić do jego miejscowego przetopienia. W dobie wytwarzania generatywnego dodatkowo proces projektowania lokalnej modyfikacji może być wspomagany metodami numerycznymi. Przy tym Autor wskazuje we wnioskach z przeglądu literatury, że dotychczasowe opracowania eksperymentalne i symulacyjne oparte są na właściwościach termofizycznych jedynie dla znanych materiałów wytworzonych w technologiach konwencjonalnych. Natomiast brak jest opisu sposobów modelowania dla nowych materiałów uzyskiwanych z technik addytywnych, gdzie właściwości takiego materiału mogą się różnić od ich klasycznych odpowiedników. Taki opis postępowania uwzględniający brak danych o właściwościach termofizycznych nie został dotychczas usystematyzowany i ujęty w obszerniejszym kompleksowym podejściu do problemu. Literatura pod tym względem jest uboga. Doktorant odnajduje więc lukę, dotyczącą braku informacji na temat. Stąd wynikała m.in. potrzeba badań podjętych w powyższym obszarze.

Tematykę badań uważam za aktualną i istotną nie tylko z naukowego punktu widzenia ale również utylitarne. Uzyskane wyniki badań materiałowych i opracowanych symulacji numerycznych mogą stanowić cenną informację dla konstruktorów i technologów przy doborze materiałów oraz projektowaniu elementów dla przemysłu motoryzacyjnego. Dlatego też wybór tematyki pracy jest w pełni uzasadniony, a sformułowanie tematu rozprawy poprawne.

Na podstawie analizy stanu wiedzy Autor sformułował następujący cel:

„Celem niniejszej pracy jest symulacyjne scharakteryzowanie strefy przemian materiałowych reprezentujących umocnienie w eksperymentalnej stali przetwarzanej generatywnie (StaVari) na użytek opracowania sposobu lokalnego umacniania za pomocą hartowania laserowego”.

Przedstawiony przez Doktoranta cel uważam za właściwie sformułowany jasno i klarownie. Przy czym w przypadku użycia zwrotu „StaVari” wymagane byłoby w pracy doprecyzowanie nazwy i poprzedzenie jej odpowiednim komentarzem. Czy jest to nazwa gatunku stali o ściśle określonym składzie chemicznym zastrzeżonym ochroną patentową, czy też nazwa może stanowi jedynie skrót myślowy odnoszący się do materiału doświadczalnego w ramach projektu badawczego „StaVari”? Ten komentarz został uwzględniony w pkt. 3 recenzji i skierowany do wyjaśnienia przez Autora. Dalej Doktorant zestawia cel pracy z wnioskami z przeglądu literatury i określa 10 zadań badawczych, które dobrze korespondują z częścią praktyczną rozprawy.

Przedmiot badań stanowiły próbki doświadczalnej stali średniomanganowej wytworzonej w procesie laserowego przetapiania podłoża proszkowego LPBF (Laser Powder Bed Fusion). Doktorant właściwie zaplanował i zrealizował obszerny program badań. Zakres tematyczny części doświadczalnej podzielono na trzy na trzy obszary obejmujące kolejno badania:

- materiałowe – w zakresie oceny właściwości badanej stali;
- eksperymentalne – dotyczące opracowania technologii hartowania laserowego;
- symulacyjne – związane z numerycznym modelowaniem procesu lokalnego hartowania laserowego.

Autor podaje, że na początku każdego rozdziału obejmującego w/w obszary badawcze sformułowano „*pytania poznawcze*”. Przy czym w rozdziale szóstym dotyczącym badań materiałowych w rzeczywistości nie ma pytań, a jedynie wyszczególniono zagadnienia badawcze, które właściwie prawidłowo powinny być określone jako - *cele poznawcze*.

Doktorant dla osiągnięcia celu głównego pracy wykorzystał szerokie spektrum metod badawczych obejmujących m.in.: mikroskopię świetną, rentgenowską analizę fazową XRD, mikroskopową analizę SEM, pomiary składu chemicznego metodą analizy spalania oraz fluorescencji rentgenowskiej XRF, pomiary twardości metodą Vickersa, statyczną próbę rozciągania, analizę termogravimetryczną, skaningową kalorymetrię różnicową DSC, pomiary masy, badania dylatometryczne, stanowiskowe pomiary stopnia absorpcyjności, stanowiskowe procesy hartowania laserowego oraz analizy symulacyjne

z wykorzystaniem programów JMatPro, TermoCalc i COMSOL Multiphysics 6.0. Metodologia badań i zrealizowany program jest dobrze opisany i świadczy o szerokiej wiedzy oraz bardzo dobrym przygotowaniu Autora w obszarze współczesnych metod pomiarowych i planowania eksperymentu, szczególnie w zakresie modelowania numerycznego i doboru parametrów. Pewien niedosyt stanowi fakt, że w pracy zabrakło opisu metodyki obróbki strumieniowo-ściernej oraz uzasadnienia doboru temperatury wyżarzania międzykrytycznego, tu Autor rozprawy odsyła nas do literatury poz. [138] i [148] bez szerszego komentarza.

W ramach badań materiałowych określono właściwości strukturalne, termofizyczne oraz mechaniczne badanej stali średniomanganowej na potrzeby dalszych prac. Natomiast badania eksperymentalne podyktowane były potrzebą określenia zakresu parametrów procesu hartowania laserowego do lokalnego umocnienia elementów cienkościennych wytworzonych w technologii addytywnej LPBF. Proces ten weryfikowany był dla zmiennych parametrów wartości mocy oraz prędkości prowadzenia wiązki, a ocena umocnienia bazowała na pomiarach twardości na przekroju poprzecznym w osi próbki. To z kolei stało się postawą określenia parametrów procesowych oraz wyboru najkorzystniejszego wariantu dla opracowania modelu numerycznego. Doktorant opracował trzy modele numeryczne:

- model jednoparametryczny – gdzie ocena umocnienia zależna była od temperatury odpowiadającej początkowi lub końcowi procesu austenitizacji;
- model dwuparametryczny – umocnienie określane było zależnością temperatur A_{c1} i A_{c3} w funkcji prędkości nagrzewania;
- model wieloparametryczny – warunek umocnienia określany był na podstawie przemian materiałowych w oparciu o wykresy CTPc.

Przy czym modelem o najwyższej dokładności wyznaczania szerokości obszaru umocnionego okazał się model dwuparametryczny.

Dla potrzeb realizacji rozprawy wykonano obszerne i czasochłonne badania na przekrojach poprzecznych zglądów po procesach hartowania laserowego poparte graficznymi zestawieniami. Stanowią one bardzo silną stronę tego opracowania na podstawie, których Autor dokonał m.in. wnikliwej analizy obszarów umocnienia. Stopień umocnienia został udokumentowany licznymi dobrej jakości kolorowymi graficznymi mapami, co dodatkowo podwyższa walory edycyjne recenzowanej pracy i należy szczególnie docenić.

Niestety, w pracy zabrakło mi dla otrzymanych wyników z „badań materiałowych” naukowej dyskusji w konfrontacji z danymi literaturowymi dla innych gatunków stali średniomanganowych, z uwzględnieniem stali wytwarzanych w technologiach konwencjonalnych jak i addytywnych.

Całość pracy dopełnia rozdział dziesiąty związany z podsumowaniem i wnioskami z przeprowadzonych badań, który dobrze się komponuje z postawionymi celem głównym i celami

poznawczymi (zawartymi w części doświadczalnej). Autor tą część pracy podzielił na podrozdziały związane z osiągnięciami: naukowymi, utylitarnymi i kierunkami dalszych prac, gdzie zamieszcza konkluzje wynikające z przeprowadzonych prac badawczych i symulacyjnych. Przy czym w ocenie recenzenta należałoby tu oczekiwać raczej sformułowania uporządkowanych wniosków w formie wypunktowanej.

Należy podkreślić, że przedstawiona koncepcja przyszłych badań uwzględniająca konieczność rozszerzenia modeli numerycznych o inne czynniki wymienione przez Autora rozprawy w tej części podsumowania są trafne. Ten kierunek badań może być z powodzeniem rozwijany w dalszych pracach Autora i zespołu pod kierunkiem Promotora rozprawy, szczególnie przy analizie modeli z większą ilością zmiennych, z uwzględnieniem hartowania wielościowego oraz złożonej geometrii kształtu modyfikowanego elementu.

Podsumowując rozprawa jest oryginalna i ma charakter zarówno poznawczy, ponieważ wnosi nowe elementy do wiedzy o właściwościach będącej przedmiotem badań doświadczalnej stali średniomanganowej jak i niewątpliwie aplikacyjny, polegający na opracowaniu modeli numerycznych do symulacji lokalnego hartowania laserowego, wspomagających dobór parametrów procesowych dla technologa.

Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej należą (tzw. mocne strony pracy):

1. Doktorant zrealizował bardzo szeroki zakres badań materiałowych, procesowych eksperymentalnych i symulacyjnych związanych z oceną właściwości doświadczalnego materiału z wykorzystaniem nowoczesnych technik i metod badawczych. Co jest zauważalnym uzupełnieniem i rozszerzeniem aktualnego stanu wiedzy obejmującym modyfikację właściwości na drodze lokalnej obróbki cieplnej średniomanganowych stali wytwarzanych w technologii addytywnej.
2. Na szczególne uznanie zasługuje opracowanie w ramach w/w rozprawy doktorskiej stanowiska obróbki laserowej, służącego do badań nad technologią hartowania ze zmiennymi wartościami mocy i prędkości prowadzenia wiązki, z uwzględnieniem parametrów procesowych takich jak: trajektoria i częstotliwość oscylacji lub zmiana średnicy plamki lasera.
3. Ponadto, Doktorant zrealizował szczegółową analizę sposobu postępowania dla symulacji numerycznych doświadczalnego gatunku stali średniomanganowej, o nie poznanych w pełni jeszcze parametrach materiałowych. Z kolei wyniki opracowanych symulacji numerycznych opartych o model dwuparametryczny (bazujący na temperaturze maksymalnej i prędkości nagrzewania)

z uwagi na niskie błędy szacowania rozmiaru strefy umocnionej wydają się dość obiecujące pod względem aplikacji technologicznych i mogą stanowić cenne narzędzie wspomagające podczas doboru parametrów procesowych.

4. Podkreślić należy również aspekt aplikacyjny związany z dużą użytecznością opracowanego przez Doktoranta modelu symulacyjnego, który znalazł zastosowanie przy pracach w ramach międzynarodowego projektu (Grant No. M-ERA.NET2/2018/1/2019) związanego z wytworzeniem cienkościennych profili typu crashbox. Gdzie przy realizacji lokalnych umocnień wykorzystano m.in. parametry obróbki hartowania laserowego dla wariantu $P=300$ W i $v=1$ mm/s opracowane w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej.
5. Wartość dodaną pracy stanowi stworzenie aplikacji symulacyjnej procesu hartowania laserowego na potrzeby realizacji procesów dydaktycznych, umożliwiającej estymację kształtu umocnienia w oparciu o zadane parametry procesowe.

3. Uwagi, wątpliwości i zapytania

Pomimo bardzo dobrego odbioru pracy oraz wysokiej oceny pod względem merytorycznym podczas zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi. Proszę o ustosunkowanie się do wyszczególnionych poniżej:

1. Autor realizując przegląd literatury w rozdz. 2.1 wskazuje jak ważny jest wpływ struktury geometrycznej powierzchni na absorpcję promieniowania oraz charakteryzuje wpływ rozwinięcia powierzchni na wartość współczynnika absorpcyjności, którego wyznaczenie jest również przedmiotem badań opisanym w rozdz. 6.5. Dlatego też, mając na uwadze powyższe w pracy należałoby podać w metodyce procedurę obróbki strumieniowo-ścierniej i scharakteryzować chropowatość powierzchni po procesie, który Autor potocznie określa jako „piaskowanie”.
2. W pracy wymaga wyjaśnienia (doprecyzowanie) stosowanej terminologii odnośnie używanych zamiennie zwrotów „*material StaVari*” lub „*stal StaVari*”. Autor m.in. w celu określa stal o nazwie StaVari jako eksperymentalna. W pracy warto byłoby jednak uściślić informacje, czy jest to nazwa handlowa gatunku Fe-7,3Mn-1,2Al-0,3Si-0,13C - o ściśle określonym składzie chemicznym zastrzeżonym ochroną patentową, czy też nazwa stanowi jedynie skrót myślowy odnoszący się do materiału doświadczalnego w ramach projektu badawczego StaVari. Proszę o komentarz.
3. Przy metodyce dotyczącej analizy XRD brakuje podstawowych informacji z jaką jakim krokiem ($^{\circ}$) realizowano badania oraz czy badania realizowano na powierzchni, czy na przekrojach próbek? Ponadto opis dotyczący metodyki XRD na str. 72, gdzie czytamy: „*Pomiary wykonano w dwóch*

kątach od 30° do 100°...” – jest niepoprawny. Proszę się o ustosunkowanie do powyższego komentarza.

4. W rozdz. 4.3 str. 62 Autor podaje: „Zgodnie z wytycznymi otrzymanymi od projektantów materiałowych oraz wynikami publikacji [138] próbki należy poddać jednostopniowej obróbce cieplnej polegającej na wygrzaniu w piecu w 670 °C przez 1 godzinę oraz chłodzeniu argonem.” Później w części doświadczalnej rozdz. 6.2.1 odnośnie obróbki cieplnej odsyła do pracy Heemanna [138] oraz Pawlaka [148]. W ocenie recenzenta zabrakło w tym miejscu szerszego uzasadnienia zastosowanych parametrów obróbki cieplnej. Szczególnie mając na uwadze fakt, że w przedmiotowej literaturze [138] badano jednak stal o nieco innym składzie chemicznym (Fe-4Mn-2Al-0,5Si-0,2C dla której ustalono $A_{c1}=650$ °C) oraz zakresy temp. obejmowały przedział 630-770 °C to wyniki dla zawartości austenitu szczątkowego ograniczyły się jedynie do trzech temp. i czasu obróbki 10 min. Dopiero w pracy [148] odnajdujemy dla podobnego składu (Fe-7,5Mn-1,8Al-0,46Si-0,15C) omówiony sposób wyznaczenia temperatury wyżarzania tym bardziej, że Doktorant również w oparciu zmierzony skład wykonał w programie Thermo-Calc wykres równowagowy. Dlatego proszę o szerszy komentarz czym był uwarunkowany dobór parametrów obróbki cieplnej.
5. Proszę skomentować z czego wynika słabe pokrycie w otrzymanych wynikach pomiaru twardości na głębokości 0,6 mm dla wariantu $v=0,5$ mm/s i $P=200$ W, w przypadku pomiarów twardości realizowanych w głąb próbki (Rys. 73) oraz na przekroju porzecznym (Rys.75a). Z Rys.73 wynika, że dla głębokości 0,6 mm mamy twardość na poziomie 365HV_{0,3}, z kolei na Rys.75a można odczytać twardość 450HV_{0,3}, co daje różnicę ok. 23%.
6. Autor na str. 151 podaje: „W przypadku procesu hartowania dla głównych parametrów procesu ($P=300$ W, $v=1$ mm/s) lokalny spadek twardości widoczny na linii pomiarowej z głębokości 0,6 mm (oznaczonej czarnymi punktami na Rys. 120 może być spowodowany nieosiągnięciem temperatury pełnej austenitizacji, której wartość została znacznie podniesiona za sprawą wysokiej prędkości ogrzewania.” W ocenie recenzenta w/w wyjaśnienie jest niejasne i wymaga komentarza, szczególnie mając na uwadze podawane wyznaczone na str. 75 temp. $A_1=591,7$ °C i $A_3=788,8$ °C oraz pomiary realizowane za pomocą termopary przedstawione na Rys. 80b.
7. Doktorant niefortunnie wielokrotnie w różnym kontekście w pracy używa terminu „globalna obróbka cieplna” – np. str. 152 podaje: „Globalna obróbka cieplna materiału wytworzonego w technologii LPBF...”. Proszę o wyjaśnienie co Autor miał na myśli używając uogólnienia odnoszącego się do określenia zwianego z ogólnościowymi zabiegami cieplnymi? Czy termin dotyczył wyżarzania odprężającego, może miedzykrytycznego czy też innego rodzaju obróbki?

W tym miejscu chciałbym zaznaczyć, że powyższe pytania oraz uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza, a praca dotyczy zagadnień związanych z dyscypliną - inżynieria mechaniczna.

4. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Pan mgr inż. Przemysław Radkiewicz w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizował obszerny i ciekawy program badawczy. Uzyskane wyniki są **oryginalne i zawierają elementy nowości**. Doktorant wykazał się dużą dojrzałością naukową, samodzielnością w planowaniu i realizacji badań, poprawną analizą i interpretacją ich wyników zmierzającą do rozwiązania problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy. Powyższe cechy pozwoliły na osiągnięcie postawionego celu, sformułowanie wniosków, a w konsekwencji przygotowanie wartościowej rozprawy na **bardzo dobrym poziomie merytorycznym**.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska
Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza

pt.: „*Symulacja numeryczna procesu kształtowania lokalnych umocnień za pomocą hartowania laserowego na potrzeby dostosowania funkcjonalności cienkościennych elementów wytwarzanych generatywnie z materiału StaVari*”

spełnia w pełni wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.). W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Przemysława Radkiewicza i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

