



Politechnika
Śląska

DATA WPŁYWU

20-06-2024

**Rada Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Mechaniczna**

Wydział Inżynierii Materiałowej

dr hab. inż.
Magdalena Barbara Jabłońska

Katowice, 20 maja 2024

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Radkiewicza

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

Uwagi formalne

Opinię niniejszą wykonałam na podstawie przesłanego do mnie pisma Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 28 lutego 2024 roku.

Podstawą merytoryczną opracowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza, zgodnie z przyjętymi standardami oraz literą i duchem regulacji prawnych, były następujące kryteria:

- trafność wyboru tematyki badawczej oraz umiejętność określenia przedmiotu i zakresu pracy,
- oryginalność rozwiązania problemu naukowego, poprawność ustalenia celów rozprawy, tez rozprawy, strategii i procedur badawczych oraz struktura rozprawy,
- jakość rozprawy z punktu widzenia warsztatu naukowego i poziomu pisarskiego,
- stopień realizacji przyjętego celu rozprawy,
- wykazanie ogólnej wiedzy z zakresu objętego tematyką rozprawy oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia dyskursu naukowego.

Ocena istotności podjętego problemu naukowego i ocena merytoryczna rozprawy

Zasadniczym problemem podjętym w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza, jest skupienie się na zagadnieniu modyfikacji materiału w istniejącej konstrukcji w celu uzyskania nowych wyspecjalizowanych właściwości w wybranych obszarach, tak aby w wyniku zróżnicowania właściwości i mikrostruktury uzyskać nową funkcjonalność dostosowaną do konkretnych potrzeb. Doktorant podjął się zagadnienia symulacji fizycznej i numerycznej zagadnienia lokalnego umocnienia na przykładzie metody hartowania laserowego średniomanganowej stali z grupy wysokowytrzymałych dla opisu i charakterystyki od strony materiałowej strefy przemian, w której zachodzi zmiana właściwości i mikrostruktury badanej stali.

Zagadnienia rozwijania znanych technologii, ich modernizacji i udoskonalania szczególnie obecnie z uwagi na zapotrzebowanie ze strony przemysłu, wytwórców oraz odbiorców są w obszarze istotnego zainteresowania. Dotyczy to głównie technologii, które pozwalają na uzyskiwanie wyrobów o złożonym zestawie właściwości a tym samym zróżnicowanej mikrostrukturze, zdolnych zapewnić zindywidualizowany zestaw cech wyrobu nie osiągalny technologiami klasycznymi. Dla zróżnicowania właściwości materiału w lokalnych obszarach większych konstrukcji, niezbędne jest dysponowanie technologiami, które umożliwiają dobrą funkcjonalność i zdolność do mobilności. Na przykład cienkościennie elementy konstrukcyjne nadwozi pojazdów poprzez użycie, do lokalnej modyfikacji ich właściwości, technologii laserowych z uwagi na sterowany poziom koncentracji energii, mogą istotnie zmienić swoje cechy użytkowe w wyniku oddziaływania na ich mikrostrukturę jedynie w lokalnych obszarach. Jednocześnie technologie laserowe zapewniają wysoką elastyczność i mobilność pod względem ergonomicznym a nadto klasyfikowane są jako tzw. procesy specjalne, z uwagi na samą ich naturę, bowiem ich skutki ujawnione są w wyrobie po ich zakończeniu i stanowią wciąż wyzwanie technologiczne w zakresie doboru parametrów tak aby zapewnić maksymalną ich skuteczność. Zatem uwzględniając powyższe istotnym jest znalezienie możliwości predykcji parametrów takich procesów specjalnych, aby móc wpływać na ich rezultat odpowiednio wcześniej lub przewidywać ich efekty. Do tego celu można wykorzystać narzędzia numeryczne, które w zależności od celu są dostosowane do osiągnięcia założonego rezultatu.

W badaniach uwzględniających wiedzę ekspercką z zakresu modelowania numerycznego ale również wiedzę z obszaru materiałoznawstwa oraz technologicznych aspektów kształtowania materiałów coraz częściej niezbędne jest łączenie wielopłaszczyznowego podejścia do planu, analizy, wykonania i walidacji. Takie też podejście zastosował Doktorant w swojej pracy. Poszukiwanie połączeń pomiędzy podejściami klasycznymi, a wizją wykorzystania tzw. hybrydowych rozwiązań mających na celu jak najpełniejszą wiedzę, predykcję modelowanie i weryfikację założeń technologicznych jest obecnie działaniem najkorzystniejszym i najbardziej właściwym.

W tym przypadku, zagadnienia z jakim mamy do czynienia w dysertacji mgr inż. Przemysława Radkiewicza i tym samym wybór tematyki Jego rozprawy doktorskiej jest w pełni uzasadniony.

Przedłożona do recenzji praca doktorska wpisuje się więc swoją tematyką, w bardzo aktualne obszary badań podstawowych, ale też aplikacyjnych, nad doskonaleniem i przewidywaniem zagadnień w zakresie procesów specjalnych, jednocześnie nakreślając dalsze podstawy aplikacyjne i w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Prezentowane do oceny zwarte, ale i kompleksowe dzieło zostało przygotowane w formie książkowego oprawionego wydruku komputerowego formatu A4 o objętości 186 stron, pisanego w języku polskim. Dużym atutem pracy jest estetyka, przejrzystość, dokładność i spójność opracowania. Struktura rozprawy nie odbiega od przyjętych standardów. Doktorant podzielił pracę na dziesięć głównych rozdziałów.

Rozdziały od 1 do 4 to tzw. Przegląd literatury przedmiotu. Rozdziały 5 do 10 to część eksperymentalna zawierająca wyniki badań oraz wnioski.

Rozdział I zatytułowany „Lokalna modyfikacja własności elementów cienkościennych” składa się z 3 podrozdziałów, które stanowią wprowadzenie i szczegóły dotyczące nowych metod obróbki laserowej, oraz symulacji badań wpływu lokalnych modyfikacji powierzchni na własności materiałów w wybranych krytycznych obszarach elementów cienkościennych. W rozdziale 2 Autor opisuje technologię hartowania laserowego, jego parametry, predykcję warunków technologicznych, wpływ warunków zewnętrznych na przebieg tego procesu oraz możliwości monitorowania procesu. W rozdziale 3 Autor charakteryzuje zagadnienia modelowania numerycznego samego procesu hartowania laserowego z uwzględnieniem zjawisk wymiany ciepła, parametrów termofizycznych, parametrów materiałowych w tym przemian fazowych oraz wprowadza czytelnika w rodzaje modeli służących walidacji procesów w oparciu o przyjęte założenia. Rozdział 4 to rozdział poświęcony badanemu w pracy materiałowi jakim jest stal średniomanganowa z grupy AHSS. Mgr inż. Karol Janus logicznie porusza się w części literaturowej w opisywanych zagadnieniach niemniej jednak nie brakuje w tej części skrótów myślowych oraz wprost z języka angielskiego przeniesionych sentencji nie mających charakteru naukowego bez przeinterpretowania w aspekcie klasycznego podejścia do metaloznawstwa. Na przykład: „Duże obszary austenitu pozostałego po procesie hartowania są niepożądane” (str. 62). W całości przegląd literatury zajmuje 64 strony dysertacji.

Część badawczą rozpoczyna rozdział 5 rozprawy, zatytułowany „Cele i plan badań”. Autor prezentuje w nim wnioski wynikające z przeglądu literatury co zdaniem recenzentki jest bardzo pomocne i stanowi dobre podsumowanie dotychczasowej wiedzy z obszaru tematyki rozprawy, cel rozprawy oraz zadania badawcze jakie zamierza zrealizować. W rozdziale tym znajdujemy szczegółowy plan badań, uwzględniający badania eksperymentalne oraz badania symulacyjne. W tym miejscu co należy podkreślić Autor deklaruje opracowanie wersji symulacji do celów edukacyjnych w obszarze predykcji kształtu

umocnienia w oparciu o zadane parametry procesowe. Jest to niewątpliwie istotna wartość dodana całości pracy.

Autor za Cel pracy przyjął: symulacyjne zdefiniowanie strefy przemian materiałowych reprezentujących umocnienie w eksperymentalnej stali przetwarzanej generatywnie na użytek opracowania sposobu lokalnego umacniania za pomocą hartowania laserowego.

Uważam, że cel pracy jest postawiony właściwie i zarówno wprowadza czytelnika w zadania badawcze jak i wskazuje jego aspekt użytkowy.

W tej samej części rozprawy Autor bardzo sugestywnie przekazuje intencję całej rozprawy doktorskiej. Przede wszystkim na uwagę zasługuje fakt, że rozprawa łączy zagadnienia opracowania technologicznego w tym opracowania stanowiska do realizacji procesu hartowania laserowego, z zagadnieniem modelowania numerycznego procesu hartowania połączonym z wyznaczaniem przebiegu i zakresu przemian fazowych w badanej eksperymentalnie wytworzonej stali średniomanganowej w której przemiany fazowe odgrywają istotną rolę.

W rozdziale 6 Autor charakteryzuje proces wytworzenia stali o nazwie StaVari. Materiał został wytworzony w technologii Laser Powder Bed Fusion inaczej mówiąc z proszku w efekcie stosowania addytywnego druku laserowego (SLM). W kolejnych etapach stal poddano wyżarzaniu międzykrytycznemu, piaskowaniu oraz obróbce laserowej. Scharakteryzowano tak wytworzony materiał wykonując analizę składu chemicznego, badania mikrostruktury, pomiary twardości oraz badania właściwości mechanicznych. Na podstawie danych literaturowych oraz składu chemicznego wyznaczono parametry termofizyczne badanej stali służące dalej jako dane wejściowe do procesu modelowania, które dalej zweryfikowano w badaniach eksperymentalnych z użyciem technik, analizy termogrwoimetrycznej, kalorymetrycznej, badań gęstości metodą grawimetryczną, analizą dylatometryczną, analizą dyfuzyjności cieplnej oraz badań absorpcyjności z użyciem metody odbitego promieniowania laserowego.

Właściwa część eksperymentalna związana z tematyką rozprawy rozpoczyna się rozdziałem 7 i dalej przedstawiona jest w rozdziałach 8, 9 i 10. W nich to bowiem Autor opisuje całokształt działań zaplanowanych i wykonanych w ramach eksperymentu związanego z testowaniem parametrów technologicznych procesu hartowania laserowego mającego na celu lokalne oddziaływanie wiązki na materiał a przez to lokalne jego umocnienie w tym kompleksowe podejście do implementacji modelu numerycznego wieloparametrycznego.

W tym miejscu wskazuję najważniejsze osiągnięcia Autora dysertacji, które zdaniem recenzentki predysponują do wyróżnienia rozprawy:

1. Wyznaczenie parametrów procesu hartowania laserowego pozwalających na uzyskanie w badanej eksperymentalnej stali średniomanganowej kontrolowanej strefy o zwiększonych właściwościach mechanicznych.
2. Dobór metody, skonstruowanie stanowiska badawczego, opracowanie zestawu układów pomiarowych i przeprowadzenie pełnej rejestracji cykli cieplnych wraz z pomiarami

kształtu dla wybranych przekrojów na potrzeby numerycznego modelowania i dostosowywania modelu na poszczególnych etatach prac.

3. Wykonanie eksperymentów hartowania laserowego z uwzględnieniem różnych parametrów wiązki tak aby nie doszło do przetopienia materiału a umocnienie objęło cały planowany obszar, pomiary twardości, badania właściwości mechanicznych i analiza mikrostruktury strefy hartowanej.
4. Opracowanie metodyki badań numerycznych z uwzględnieniem efektów prac eksperymentalnych, opracowanie modelu przepływu ciepła jego walidacja i kalibracja na podstawie doboru charakterystyki geometrii, warunków brzegowych, i implementacji danych materiałowych i dyskretyzacji siatki.
5. Opracowanie jedno- dwu i wieloparametrycznego modelu procesu hartowani laserowego w powiązaniu ze zjawiskami towarzyszącymi umocnieniu obszaru hartowanego wraz z opracowaniem kryteriów porównawczych odniesionych do wyników prac eksperymentalnych.
6. Zaimplementowanie wszystkich uzyskanych wyników prac eksperymentalnych i modelowych do fizycznego modelowania procesu lokalnego umacniania cienkościennego elementu wytworzonego w technologii addytywnej celem zmiany głównie charakterystyk związanych z pochłanianiem energii przez komponent na przykład w trakcie kolizji.

Na podstawie szczegółowej analizy dysertacji Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza, stwierdzam, że Doktorant zrealizował bardzo interesujący, ciekawy poznawczo, warty uwagi i stanowiący nowe powiązane z aplikacją podejście do zagadnienia lokalnej zmiany właściwości w kontekście pochłaniania energii zderzenia materiał z badań.

Zarówno część literaturowa, jak i część eksperymentalna recenzowanej rozprawy została bardzo dobrze przygotowana. Dysertacja jest poprowadzona w sposób logiczny, a Autor dołożył starań, aby zadbać o przemyślany tok realizacji pracy. Na podkreślenie i docenienie zasługuje przygotowanie stanowiska do badań oraz przemyślane przeprowadzenie eksperymentów pod kątem uzyskania danych do modelowania numerycznego i ich walidacja w opracowanym modelu. Załączone rysunki, mikrofotografie, tabele oraz schematy są przejrzyste i dobrze uzupełniają tekst rozprawy. Ułatwieniem dla czytelnika jest przejrzysty wykaz, uwzględniający wszystkie zastosowane w rozprawie oznaczenia i skróty.

Rozprawę kończy wykaz literatury i spis rysunków i tabel prezentowanych w rozprawie. W wykazie literatury spośród 158 pozycji, współautorstwa Doktoranta odnalazłam dwie. W tym miejscu chciałabym podnieść kilka kwestii dyskusyjnych do jakich Doktorant będzie mógł odnieść się na publicznej obronie Swojej rozprawy.

1. Jaki można odnieść wyniki badań termogravimetrycznych realizowanych na próbkach w warunkach powolnego nagrzewania w atmosferze obojętnej helu do wyników badań na dyfuzometrze? Czy Autor spodziewał się jakichkolwiek reakcji chemicznych podczas nagrzewania w atmosferze ochronnej helu? Z założenia termogravimetria nie służy przecież do badania przemian fazowych co Autor sugeruje na stronie 78 dysertacji. Natomiast utlenianie i redukcja również nie mają miejsca w atmosferze obojętnej. Czy proces odparowywania w wysokiej temperaturze miał miejsce i na ile zmniejszyła się masa próbki w rezultacie procesu nagrzewania podczas badań termogravimetrycznych?
2. Na stronie 80 Autor opisuje badania z użyciem różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC jako metodę badania dyfuzyjności cieplnej. Ponadto wskazuje, że kalorymetria bada różnicę temperatury próbki badanej i wzorca. Natomiast jest to metoda, w której określamy zmianę różnicy strumienia cieplnego podczas przemiany fazowej w badanej próbce w odniesieniu do wzorca, w którym z założenia przemiany nie zachodzą. Czy jest to metoda, w której wyznaczamy dyfuzyjność cieplną. Proszę przedstawić jak na potrzeby danych wejściowych do procesu symulacji wyznaczono dyfuzyjność cieplną a następnie ciepło właściwe które to, jak sądzę jest niezbędne jako dana wejściowa do modelowania.
3. Co oznacza przegięcie na krzywej dylatometrycznej na stronie 83 i z czym należy je wiązać w badanej stali. Proszę o wskazanie co według autora oznacza pojęcie przemiany austenitycznej.
4. Czy i jaką metodą określono współczynnik rozszerzalności cieplnej i jakie ma on znaczenie podczas procesu lokalnego hartowania laserowego.
5. Autor wskazuje, że w trakcie procesu lokalnego hartowania w obszarze zahartowanym mikrostruktura stali to wyłącznie martenzyt z pomijalnym udziałem austenitu szczątkowego co wskazuje Autor tylko na obrazach mikroskopowych na rys 77. Czy rzeczywiście udział austenitu szczątkowego jest tak pomijalnie mały i na jakiej podstawie takie wnioski Autor wysuwa. Co z ilością austenitu szczątkowego w strefach przejściowych?
6. Jak Autor odniósłby się do zagadnienia analizy i powstawania lokalnych naprężeń podczas hartowania laserowego w odniesieniu do projektowanego kształtu strefy zahartowanej. Czy możliwe jest przekroczenie dopuszczalnych wartości naprężeń resztkowych cieplnych oraz wynikających z karbu strukturalnego. Czy w efekcie stosowanej technologii powiązanej z niejednorodnym przepływem ciepła naprężenia resztkowe skutkowałyby inicjowaniem lokalnych mikropęknięć?
7. W jaki sposób przemiany fazowe determinują końcowe właściwości mechaniczne badanej stali średniomanganowej po hartowaniu laserowym biorąc pod uwagę szybkość grzania i chłodzenia co ma oczywiście wpływ na końcową mikrostrukturę?

8. W jednym z końcowych stwierdzeń autor wspomina o cyfrowym bliźniaku procesu do sterowania w czasie rzeczywistym parametrami technologicznymi hartowania laserowego.

Czy na tym etapie Autor może podać krytyczne i wspomagające parametry jako dane do ewentualnego stworzenia modelu cyfrowego bliźniaka dla monitorowania procesu hartowania laserowego w czasie rzeczywistym?

9. Czy opracowany model i stanowisko są uniwersalne do innych geometrii obszaru hartowanego?

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza, z uwagi na jej wysoką wartość poznawczą, naukową i aplikacyjną recenzentka z ciekawością chciałaby prowadzić pisemną dalszą dyskusję nad zagadnieniami będącymi przedmiotem dysertacji. Jednakże konkludując, stwierdzam, że Dysertacja stanowi cenny materiał naukowy i badawczo – aplikacyjny. Zdefiniowane w recenzji uwagi w tym pytania dyskusyjne, nie umniejszają mojej wysoko pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Radkiewicza.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi bardzo ciekawy materiał z badań i cenną bazę informacji dla dalszych, celowych prac w analizowanym obszarze co zresztą Autor wskazuje na stronie 166 Swojej dysertacji. Przedstawione i opisane w pracy wyniki badań nakreślają wiele ciekawych kierunków dalszych prac naukowych z tego obszaru.

Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest bardzo pozytywna. Doktorant rozwiązał problemy o znaczeniu materiałowym, analitycznym, poznawczym i naukowym. Wykazał się niezbędną wiedzą z zakresu przedmiotu pracy, tj. zastosowania wiedzy technologicznej, metodycznej, materiałoznawczej, informatycznej w tym modelowania numerycznego wspomagającego projektowanie technologii, łącząc w Swej dysertacji wiele aspektów i zagadnień z obszaru interpretacji eksperymentalnych wyników badań i implementacji ich do symulacji numerycznych. Umiejętnie porusza się w trudnych zagadnieniach logicznie wnioskuje, w tym w powiązaniu z dostępnymi danymi z literatury.

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

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

jest dziełem dysertabilnym i spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r.
– Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późn. zm.).

W związku z tym, **wnoszę o przyjęcie rozprawy** mgr inż. Przemysława Radkiewicza i **dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony**. Ponadto uznaję, że dysertacja posiada wysoką wartość merytoryczną i naukową, stąd też wnoszę o jej wyróżnienie zgodnie z wnioskiem.

Magdalena Jabłońska