

Gliwice, dn. 29.04.2024 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej

Pana mgr. inż. Przemysława Radkiewicza

pod tytułem

„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
dr. hab. inż. Jacka Reintera, prof. uczelni,
i promotora pomocniczego
dr. inż. Piotra Koruby

Podstawą opracowania niniejszej recenzji było pismo W10/RDND07/13/2024 Pana Profesora Zbigniewa Gronostajskiego – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej z dnia 28 lutego 2024 r informujące, że uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna nr 876/38/RDND07/2021÷2024 z dnia 27 lutego 2024 r. zostałem powołany na recenzenta w przewodzie doktorskim mgra inż. Przemysława Radkiewicza.

1. Wprowadzenie

Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej podjął się opracowania modeli obliczeniowych procesu hartowania laserowego, mającego na celu wytwarzanie obszarów umocnionych w eksperymentalnych materiałach wytwarzanych generatywnie (w tym przypadku stali średniomanganowej – StaVari). Zaproponowane rozwiązania rozszerzają możliwości prowadzenia analiz z zakresu zagadnień technologii hartowania laserowego nowoczesnych materiałów, ponieważ uzupełniają również zagadnienia dotyczące metodyki tworzenia modeli numerycznych, przygotowania danych wejściowych do obliczeń oraz prowadzenia badań materiałowych. Prace o takim zakresie mają moim zdaniem szczególne znaczenie ze względu na ich interdyscyplinarność. Łączą one bowiem zagadnienia inżynierii materiałowej, obliczeniowej oraz mechanicznej. Precyzyjne oddziaływanie na powierzchnię oraz łatwość w sterowaniu ilością wprowadzanego ciepła do ściśle określonego obszaru stanowi niewątpliwie duże zalety procesu hartowania laserowego. Uzyskanie wysokich własności wytwarzanych warstw utwardzonych oraz mnogość rozwiązań technicznych na rynku



powoduje, że technologie te są obecnie bardzo popularne. Również specyfika spawalniczego cyklu cieplnego w przypadku wiązki laserowej, pozwala na uzyskiwanie często unikalnych struktur o nowych, znacznie lepszych własnościach. Skupiona wiązka światła laserowego, w porównaniu do tradycyjnych metod wytwarzania warstw utwardzonych, pozwala na precyzyjne nagrzewanie wybranych obszarów oraz w pewnym sensie sterowanie tworzeniem nowych struktur o własnościach precyzyjnie zmienianych w wybranych tylko obszarach. Precyzja ta dotyczy nie tylko obszaru na powierzchni obrabianego elementu, ale również głębokości wytwarzanej warstwy zahartowanej. Jest to szczególnie istotne w sytuacji, gdy obrabiany detal wykonany jest również z nowoczesnego materiału konstrukcyjnego. Widoczne to było już niejednokrotnie chociażby w przypadku spawania stali termomechanicznie walcowanych. Materiały wytwarzane generatywnie, po raz kolejny stawiają przed inżynierami spawalnikami nowe, spore wyzwania związane z dostosowaniem do nich technologii spawalniczych.

Zwiększająca się liczba czynników mających wpływ na zachodzące zjawiska fizyczne i metalurgiczne podczas procesów spawalniczych tworzy nowe wyzwania w zakresie badań i opisu zarówno tych zjawisk jak i parametrów mających wpływ na ich przebieg i otrzymane rezultaty. Złożoność zagadnień oraz wzajemne powiązanie tych parametrów powoduje, że prowadzenie badań jedynie eksperymentalnych generuje coraz większe trudności w uzyskaniu wiarygodnych wyników, jak również znacząco ogranicza liczbę możliwych do uzyskania informacji. Coraz częstszym narzędziem wykorzystywanym w celu wyjaśnienia przebiegu mechanizmów i zjawisk zachodzących w trakcie oddziaływania spawalniczego cyklu cieplnego na obrabiane materiały są symulacje numeryczne. Na rynku są dostępne zarówno programy do prowadzenia tzw. wielofizycznych analiz, jak również specjalizowane pakiety służące analizom wybranych procesów wytwarzania tj. spawanie, odlewanie, przeróbka plastyczna czy technologie przyrostowe. Analizy procesów wytwarzania są zwykle tymi najtrudniejszymi do przygotowania i przeprowadzenia. Wynika to z faktu, że w procesie wytwarzania zwykle materiał wejściowy poddany obróbce zmienia swoje własności, strukturę i często dodatkowo rozkład naprężeń i odkształceń będących wynikiem zastosowanego procesu technologicznego. Prawidłowo przygotowana i przeprowadzona analiza numeryczna daje jednak możliwość poznania wielu szczegółów dotyczących samego przebiegu procesu, wyjaśnienia zjawisk i problemów, a także uzyskania wyników, które są trudne do zmierzenia w badaniach eksperymentalnych. Kluczem do tego sukcesu są jednak wysokiej jakości dane wejściowe tj. dane materiałowe, skalibrowane i zwalidowane modele źródeł ciepła oraz przemyślana budowa zagadnienia obliczeniowego. Często opieranie się jedynie o dane literaturowe, bez szerokiego zakresu badań laboratoryjnych, nie prowadzi do prawidłowych rozwiązań. Należy również pamiętać, że symulacje numeryczne procesów spawalniczych nigdy nie będą systemami ekspertowymi udzielającymi jednoznacznej odpowiedzi. Powinno się je traktować dokładnie w ten sam sposób, jak każde inne narzędzie badawcze. Ostatecznej oceny dokonuje inżynier na podstawie uzyskanego wyniku oraz własnej wiedzy.

Biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy z zakresu spawalniczych procesów laserowych oraz produkcji nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, a także po analizie dostępnej literatury stwierdzić należy,



że podjęte przez Doktoranta rozważania na temat możliwości prowadzenia analiz numerycznych procesów hartowania laserowego nowoczesnej grupy materiałów wydają się być celowe i wpisują się w nowoczesne trendy badań.

2. Omówienie rozprawy

Recenzowana 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” posiada klasyczny układ, który w pierwszej części zawiera przegląd dostępnej literatury światowej, a w drugiej części prowadzone badania własne. Badania własne to trzy obszary tematyczne obejmujące: badania materiałowe zastosowanej stali średniomanganowej, badania technologii oraz symulacje numeryczne procesu hartowania laserowego.

Praca złożona jest ze 186 stron, 10 rozdziałów, 28 tablic i 133 rysunków. Spis literaturowy liczy 158 pozycji literatury krajowej oraz zagranicznej. W 2 z nich Doktorant jest współautorem (jedna z nich jest indeksowana w bazie WoS i posiada IF). Układ pracy nie budzi zastrzeżeń, choć formułowanie dodatkowych celów i planów badawczych w rozdziałach dotyczących badań materiałowych, eksperymentów oraz symulacji w pewnym stopniu utrudnia rozeznanie w zakresie prowadzonych rozważań.

Pracę rozpoczyna spis treści, co do którego można mieć pewne wątpliwości, czy potrzebna jest aż tak duża liczba podrozdziałów. Następnie Autor zamieszcza streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis symboli i skrótów, a także wstęp do tematyki podejmowanych rozważań.

W rozdziale 1 dotyczącym przeglądu literatury opisane zostały zagadnienia dotyczące modyfikacji własności elementów cienkościennych za pomocą technologii laserowych tj. hartowania, odpuszczania, przetapiania i napawania laserowego. W rozdziale tym pojawia się również podrozdział dotyczący symulacji wpływu lokalnych modyfikacji w warunkach obciążenia, a także podsumowanie i cel pracy. O ile pojawienie się symulacji w tym rozdziale jeszcze można uznać za zasadne, choć szerzej o nich Autor pisze w kolejnych rozdziałach, to podsumowanie i cel pracy moim zdaniem nie powinny się znaleźć w pierwszym rozdziale pracy, a dopiero po dokonaniu podsumowania przeglądu literatury dotyczącej wszystkich poruszanych zagadnień. Zresztą cel pracy pojawia się w pracy ponownie w części badawczej w rozdziale 5.

Rozdział 2 dotyczy technologii hartowania laserowego. Zawiera on szczegółowy opis zagadnienia oddziaływania wiązki laserowej na obrabiany materiał, warunków opracowania technologii oraz możliwych sposobów kształtowania wiązki laserowej wykorzystywanej w procesach hartowania powierzchniowego. Osobna część tego rozdziału poświęcona jest zasygnalizowaniu możliwości monitorowania procesu, jak również analizy i oceny wyników.

W rozdziale 3 recenzowanej rozprawy doktorskiej Autor opisuje zagadnienia dotyczące modelowania numerycznego procesu hartowania laserowego. Po ogólnym wstępie poruszane są zagadnienia



dotyczące modelowania źródła ciepła, zjawisk wymiany ciepła, opisu parametrów termofizycznych, przemian fazowych w materiale, a także stosowania w analizach modeli jedno-, dwu- i wieloparametrycznych. Pewien niedosyt budzi brak ilustracji w opisach omawianych modeli źródeł ciepła, co niewątpliwie byłoby bardzo ciekawe dla czytelnika. Nie zgodzę się również ze stwierdzeniem, że w przypadku procesów hartowania powierzchniowego, użycie objętościowego modelu źródła ciepła jest niecelowe. W praktyce zawodowej kilka razy z powodzeniem używałem właśnie modelu objętościowego do symulacji procesu hartowania laserowego (choćby w cytowanej w rozprawie pracy [46]). Rozdział kończą informacje dotyczące walidacji wyników oraz podsumowanie.

Ostatnim rozdziałem przeglądu literaturowego jest rozdział 4. Autor opisuje w nim stale średniomanganowe wytwarzane generatywnie, poruszając zagadnienia ich produkcji oraz podstawowych własności, a także obróbki laserowej i technologii wytwarzania generatywnego Laser Powder Bed Fusion (LPBF).

Część literaturowa ogólnie napisana jest poprawnie, zawiera informacje dotyczące zagadnień będących tematem podejmowanych przez Doktoranta rozważań i stanowi dobry wstęp do formułowania zadania badawczego. Zawiera jednak pewne niedoskonałości, o których wspominam w dalszej części recenzji.

Część badawcza pracy rozpoczyna się od rozdziału 5. Autor nie formułuje tezy pracy, co w świetle obowiązujących przepisów nie jest obowiązkiem. Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej formułuje jednak 11 wniosków i ostatecznie za cel pracy stawia: symulacyjne scharakteryzowanie strefy przemian materiałowych reprezentujących umocnienie w eksperymentalnej stali przetwarzanej generatywnie (StaVari) na użytek opracowania sposobu lokalnego umacniania za pomocą hartowania laserowego.

Wnioski zawarte na wstępie rozdziału 5 zdecydowanie bardziej nadawałaby się do zamieszczenia w ostatnim rozdziale części teoretycznej jako jej podsumowania. Porównując cel pracy z jej tytułem, niepotrzebnie zresztą prawie tak samo obszernym, powstaje pytanie czy zgodnie z celem pracy symulowano przemiany materiałowe reprezentujące umocnienie w celu opracowania sposobu lokalnego umacniania, czy też zgodnie z tytułem symulowano proces kształtowania lokalnych umocnień, aby zwiększyć funkcjonalność elementów z materiału StaVari?

Pojawia się w tym miejscu również pewna wątpliwość: czy celem pracy są symulacje kształtowania lokalnych umocnień czy też dostosowanie funkcjonalności cienkościennych elementów i jaką w tym przypadku rolę miałyby spełniać symulowanie kształtowania?

W rozdziale 5 formułowane są również główne zadania badawcze, rozwinięte na zadania szczegółowe w 3 podrozdziałach: badania materiałowe, badania procesowe eksperymentalne i symulacyjne. Plan ten jest wykonany poprawnie i analizując jego składowe, można stwierdzić, że Doktorant świadomie formułuje zadanie badawcze, uwzględniając wyznaczenie w badaniach materiałowych i eksperymentalnych danych wejściowych do modelu numerycznego, jak danych potrzebnych do jego kalibracji i walidacji. Świadczy to o konsekwencji postępowania na etapie przygotowania oraz testowania modelu numerycznego.



W rozdziale 6 Autor prezentuje wyniki badań materiałowych, przeprowadzonych pod kątem przygotowania danych wejściowych do analiz numerycznych. Ta część wyjaśnia podejście badawcze do problemu, określa w jaki sposób zostały wyznaczone własności mechaniczne, termofizyczne badanego materiału oraz współczynnik absorpcyjności powierzchni.

Rozdział 7 dotyczy badań eksperymentalnych procesu hartowania laserowego. Zawiera określenie celu i zakresu tych badań, przedstawia stanowisko badawcze i przyjęte założenia technologiczne. Na podstawie prób wstępnych Autor określił zestawy parametrów, które wybrano w taki sposób, aby uzyskać graniczne wartości, niedopuszczające jeszcze do przetopienia materiału obrabianego. Na podstawie dalszych badań określono kształt strefy umocnienia dla wybranych parametrów. Analizy te oparto o wyznaczenie rozkładów twardości na przekrojach poprzecznych próbek poddanych obróbce laserowej. W rozdziale tym przeprowadzono również badania własności mechanicznych obszaru umocnionego. Dodatkowo na potrzeby planowanych symulacji numerycznych, zarejestrowane zostały cykle cieplne.

W rozdziale 8 przedstawione zostały wyniki analiz numerycznych. Podobnie jak w poprzednim rozdziale, na początku określany jest cel badawczy i zakres tych badań. Autor proponuje analizę z wykorzystaniem trzech modeli: jednoparametrycznego (osiągnięcie temperatur A_{c1} lub A_{c3}), dwuparametrycznego (osiągnięcie temperatur A_{c1} lub A_{c3} zależnych od prędkości nagrzewania) oraz wieloparametrycznego (na podstawie wykresu CTPc). Opis geometrii oraz warunków brzegowych modelu nie budzi większych wątpliwości. Podejście do modelowania źródła ciepła również jest poprawne. Zastąpienie oscylacji wiązki laserowej (o częstotliwości oscylacji 100Hz) modelem reprezentatywnym jest jak najbardziej prawidłowe.

Wątpliwości budzi jednak podrozdział dotyczący analizy wpływu dyskretyzacji modelu. W przypadku analiz numerycznych procesów spawania stosowane są elementy typu HEXA. W analizach tych wszystkie elementy trójkątne, w porównaniu do elementów czworokątnych, powodują obniżenie dokładności obliczeń. Elementy typu TETRA, zostały opracowane głównie do obliczeń odkształceń sprężystych i nie nadają się do obliczeń elastoplastycznych. Największą zaletą elementów typu TETRA jest łatwość tworzenia modeli obliczeniowych, ponieważ można mieć różną liczbę elementów we wszystkich kierunkach, a siatka tworzona jest automatycznie. Generuje to jednak bardzo dużą liczbę elementów (co zresztą Autor zauważył uzyskując wyraźnie dłuższe czasy obliczeń) oraz brak możliwości wykonania poprawnych modeli elementów cienkościennych. W tym miejscu należy stwierdzić, że bardziej wnikliwa analiza dostępnej literatury z zakresu modelowania procesów spawania mogła sprawić, że nie byłoby konieczności wykonywania części z tych analiz.

Nie do końca również przekonuje mnie przedstawione porównanie zarejestrowanych i obliczonych cykli cieplnych oraz bardzo wysoka zbieżność danych obliczonych i zmierzonych. Szczególnie biorąc pod uwagę uproszczenia modelu w budowie zarówno modelu źródła ciepła, jak i różnice w danych termofizycznych materiału (rys. 83-85). Zakładając jednak, że procedura kalibracji została przeprowadzona poprawnie, wyniki modelowania należy uznać za ciekawe i interesujące dla czytelnika.



Dodatkowo mnogość analizowanych wariantów stanowi w tym przypadku pewien zbiór, istotnych danych i informacji dotyczących budowy oraz definicji modeli procesu hartowania laserowego.

Tę część pracy, pomimo wskazanych uwag, oceniam bardzo wysoko. Zakres prowadzonych rozważań, wielowariantowość proponowanych modeli i dyskusja prowadzona w rozdziale 8 jest w tej pracy niewątpliwie dużym osiągnięciem naukowym Doktoranta. Analizy procesów wytwarzania, a w szczególności procesów spawalniczych, ze względu na złożoność zagadnień materiałowych, fizycznych i mechanicznych, są jednymi z najtrudniejszych analiz numerycznych. Sprawne poruszanie się w tych zagadnieniach, mimo wskazanych uwag, świadczy o umiejętności prowadzenia przez Doktoranta prac w tym obszarze wiedzy. Sprawnie weryfikuje on proponowane warianty rozwiązań określając ich możliwości i ograniczenia. Stanowi to również istotne osiągnięcie użytkowe tej pracy, mogące być istotnym źródłem wiedzy o prowadzeniu analiz numerycznych procesów hartowania laserowego.

Oczywiście należy tutaj również zaznaczyć, że proponowane rozwiązania nie stanowią jedynych, dostępnych możliwości. W modelowaniu numerycznym każdy model może być stworzony na wiele różnych sposobów, często zależnie od osoby, która go tworzy. Również interpretacja i ocena otrzymanych wyników w tym przypadku jest mocno subiektywna oraz wymaga sporej wiedzy z zakresu analiz numerycznych a także symulowanego zagadnienia.

Jednak tego typu opracowania są bardzo ważne, ze względu na fakt, że literatury poruszającej te zagadnienia jest stosunkowo niewiele, więc omawiane zagadnienia stanowią niejako uzupełnienie istniejącego stanu wiedzy i stanowią duży wkład Inżynieria Mechaniczna.

Przedostatni rozdział pracy zawiera bardzo istotne informacje dotyczące aplikacyjności proponowanych rozważań. Przedstawione w nim rozważania pozwalają na „umiejscowienie” w praktyce przemysłowej zagadnień będących tematyką recenzowanej rozprawy doktorskiej. Takie podejście jest niezwykle ważne w przypadku prac zawierających dużą liczbę modeli numerycznych, ponieważ wskazuje kierunki rozwoju tych narzędzi, ich ograniczenia, jak i możliwości.

W ostatnim, 10 rozdziale pracy Doktorant dokonuje podsumowania osiągnięć naukowych i użytecznych formułując wnioski i jednocześnie dodatkowo je komentując. Wskazuje w nim również możliwości i kierunki przyszłych badań.

Strona językowa i stylistyczna nie budzi większych zastrzeżeń, jednak Doktorant w tej części rozprawy nie ustrzegł się błędów merytorycznych, terminologicznych, językowych i edytorskich.

Do uwag wymienionych wcześniej należy dołączyć:

1. na stronie 17 pojawia się określenie „efekty obróbki stali tą technologią” – bardziej poprawnym terminem jest technika obróbki,
2. rys. 2 na stronie 18 jest całkowicie niezrozumiały – brakuje jego opisu w tekście rozdziału. To samo dotyczy pozostałych rysunków w rozdziale pierwszym aż do rys. 12 – stanowią ilustrację do tekstu jednak brak ich bezpośredniego wskazania powoduje, że czytelnik „rozpoznaje” je tylko po odnośnikach literaturowych,

3. rys. 24 na stronie 26 – skróty „m. powłokowy” i m. pow. wielowarstwowy” powinny być rozwinięte. Poza tym powstaje się pytanie: czym się różni model powłokowy od powłokowego wielowarstwowego? Nie zostało to wyjaśnione w tekście,
4. na stronie 33 oraz na rys. 25 (strona 38) – użyto terminu „intensywność” w odniesieniu do wiązki laserowej – bardziej poprawnym terminem jest „gęstość mocy wiązki laserowej” wyrażona w jednostkach [W/mm^2],
5. na stronie 35 Autor użył określenia „oddziaływanie wiązki na dany punkt materiału” – poprawne jest w tym przypadku określenie „obszar” ponieważ nawet skupiona wiązka laserowa posiada określone wymiary ogniska,
6. na stronach 34 i 35 Autor wspomina o parametrze „czas impulsu laserowego” – poprawnym jest „czas trwania impulsu laserowego”,
7. na stronie 38 użyto określenia „wiązki gaussowskiej” – poprawne jest „wiązki o rozkładzie gaussowskim”,
8. czy nie lepszym jest stosowanie terminu „kształtowanie obszaru oddziaływania wiązki laserowej” w miejsce użytego „kształtowania wiązki”? Termin użyty w pracy dotyczy całej wiązki, a z materiałem oddziałuje tylko pewien obszar?
9. użycie terminu „wiązka statyczna” i „wiązka oscylacyjna” budzi pewne wątpliwości. W sumie jest to ta sama wiązka lasera, różniąca się jedynie ruchem roboczym jaki wykonuje. Zatem poprawne byłoby użycie „wiązki o ruchu oscylacyjnym”?
10. na stronie 49 Autor stwierdza, że największa ilość prac prowadzona była z wykorzystaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics. Czy to stwierdzenie dotyczy prac Autora czy ogólnie? Po ilości przywołanych źródeł literaturowych nie można tego stwierdzić. Dodatkowo wspomniany dostęp do wszystkich etapów prac symulacyjnych z poziomu jednej aplikacji nie jest unikalną cechą tego oprogramowania, pozostałe również ją posiadają,
11. strona 55 – czy wykorzystanie wykresów CTPc i CTPi w przypadku hartowania laserowego (biorąc pod uwagę cykl cieplny procesu) jest poprawne?
12. strona 58 – Autor formułuje stwierdzenie, że w przytoczonych pracach brakuje analizy poprawności przyjętych parametrów materiałowych, szczególnie na podstawie danych literaturowych lub obliczeń numerycznych. Jaką mamy pewność, że zastąpienie danych zawartych np. w bazie materiałowej programu danymi z literatury lub z obliczeń daje nam wyższą dokładność/wiarygodność wykorzystanych danych? Jeżeli nie są to dane oparte o badania przeprowadzone dla konkretnego materiału (bardzo złożone i kosztowne procedury badawcze), dla którego prowadzone są analizy, to zawsze istnieje ryzyko pewnych rozbieżności.
13. stan materiału podany w tablicy 8 nie jest wyjaśniony w tekście,
14. na stronie 97 rys. 75 i 76 – na osi poziomej jest „głębokość” a powinna być „szerokość”,
15. na stronie 71 w tablicy 3 – użyto określenia „prędkość wiązki” – prawidłowym określeniem jest „prędkość przesuwu wiązki” lub zastosowana później na stronie 94 w tablicy 7 „prędkość posuwu liniowego”,

16. na stronie 71 w tablicy 3 – określenie „hatching” powinno być przetłumaczone na język polski, ponadto nie jest nigdzie wytłumaczone w tekście,
17. na stronie 71 rys. 42 – użyto określenia „stan as-built” – pojawia się również później w tekście i tablicy 8, strona 100 – również należy użyć polskiej nazwy,
18. na stronie 73 w tablicy 5 – brak wyjaśnienia oznaczeń R_m , R_e , A i E,
19. niepotrzebnie na rysunkach porównawczych obliczonych i zmierzonych rozkładów twardości i umocnienia (rys. 96-99, 103-105, 112-115) znalazły się dwujęzyczne opisy wartości („hardness” i „umocnienie”),
20. czym podyktowane jest przeprowadzenie prób statycznego rozciągania wg normy ASTM E8?
21. Na stronie 114 rys. 91 – „wielkość elementu” powinno być „wielkość elementu skończonego”,
22. na stronie 101 wartości temperatury podawane są w stopnia Celsjusza a prędkości chłodzenia w K/s (podobnie w tablicy 19 na stronie 130),
23. na stronie 109 – Autor wspomina o zastosowaniu równania (18) jednak ta zależność nie jest równaniem w przedstawionej formie,
24. na stronie 152 rys. 120 – na osi poziomej jest „głębokość” a powinna być „szerokość”,
25. na stronach 149 i 150 rys. 116 do 119 posiadają nieczytelne legendy i oznaczenia. Brak jest również podpisów co jest na nich przedstawione (te informacje można uzyskać dopiero z tekstu).

W pracy pojawia się również sporo błędów i nieścisłości w zakresie terminologicznym i edycyjnym. Przede wszystkim, należy zwrócić uwagę na:

1. literówki, jak np. na str. 35 „sterowanie stopnie postępu przemian”, braki interpunkcji – nie sposób ich wszystkich szczegółowo wymienić w recenzji, jednak przy tego typu pracach trzeba na to zwracać uwagę,
2. rozprawa jest napisana w języku polskim, jednak część rysunków (nie tylko w części teoretycznej) zawiera opisy języku angielskim (np.: rys. 1, 6, 7, 8, 13, 20, 28, 29, 36, 37, 43,46,59,60, 75, 76),
3. jakość niektórych rysunków jest niska (np.: rys. 2, 7, 8, 11, 34, 46, 75),
4. odwołania do rysunków w tekście raz umieszczane są w nawiasach okrągłych, aby w dalszej części zdania pojawić się bez nich – przykładem jest str. 33,
5. rys. 37, strona 62 - brakuje opisu osi wykresu,
6. przy wypunktowaniu należy stosować konsekwentnie zapis małą literą i z przecinkiem na końcu – str. 16, 25, 34, 42, 44, 55, 56 i 63, 88,89,104,
7. w opisie niektórych wzorów brakuje wyjaśnienia stosowanych oznaczeń (np. na str. 53),
8. w pracy jako znak dziesiętny używany jest przecinek jednak w niektórych miejscach pojawia się kropka – np. tablica 4, strona 71 czy w tekście strona 78 (waga próbki),
9. rys. 86, strona 109 - brakuje wyjaśnień podawanych parametrów (f, aosc, P, v),
10. w pracy pojawiają się oznaczenia temperatury A1, A3 zamiennie z Ac1, Ac3 – należy to ujednoclić,
11. rys. 95, strona 121 – brak opisu osi – są jedynie oznaczenia.



Ponadto w pracy zawarto informację, że materiał eksperymentalny został wytworzony w procesie LPBF gdzie na stronie 75 Autor prezentuje wykres równowagowy i w tekście podpisuje jako materiał StaVari po procesie SLM – akronim SLM, nigdzie w pracy nie jest wyjaśniony – którą wersję należy przyjąć? W pracy brakuje trochę bardziej ogólnego spojrzenia na zagadnienia modelowania. Szczególnie podsumowanie rozdziału 3 bardzo mocno polaryzuje pogląd Autora na prezentowane do tej pory wyniki analiz, zamiast stanowić podstawę do ich rozwinięcia. Brakuje również bardziej dokładnego opisu tworzenia oraz wyników kalibracji i walidacji jedyne obciążenia w modelowanym procesie jakim jest źródło ciepła, jednak zrzucam to na karb własnych zainteresowań naukowych i nie traktuję jako zarzutu. Mam nadzieję, że przekazane uwagi będą pomocne w dalszych badaniach prowadzonych przez Autora oraz publikacjach prezentowanych wyników.

Moja ostateczna ocena opiniowanej pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Przemysława Radkiewicza jest jak najbardziej pozytywna. Doktorant podjął się trudnego zagadnienia modelowania procesów technologicznych, z dodatkowo nowoczesnym materiałem podstawowym i poradził sobie z tym bardzo dobrze. Poziom merytoryczny pracy jest dobry, a prezentowane wyniki badań własnych są oryginalne, stanowią wartościowe uzupełnienie istniejącego już stanu wiedzy w zakresie modelowania procesów spawalniczych i mają niewątpliwie znaczenie aplikacyjne. W mojej opinii przedstawiona praca doktorska Pana mgr. inż. Przemysława Radkiewicza zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną i formalną.

Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana praca doktorska Pana mgr. inż. Przemysława Radkiewicza pod tytułem „Symulacja numeryczna procesu kształtowania lokalnych umocnień za pomocą hartowania laserowego na potrzeby dostosowania funkcjonalności cienkościennych elementów wytwarzanych generatywnie z materiału StaVari” spełnia wymogi formalne stawiane pracom na stopień doktora nauk Inżynierijno-technicznych, w rozumieniu zapisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Przemysława Radkiewicza do publicznej obrony, jak również procedowanie kolejnych etapów w zakresie ubiegania się przez Doktoranta o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk Inżynierijno-technicznych w dyscyplinie: inżynieria mechaniczna.