

dr hab. inż. Volodymyr Hutsaylyuk, prof. WAT

Warszawa, 20.02.2024r.

Wojskowa Akademia Techniczna

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

00-908 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Derdy
p.t. „**Wpływ strefy spojenia na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt
otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego**”.

Podstawa:

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Piotra Niesłonego - pismo z dnia 06 grudnia 2023 r.

1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

W przedstawionej do recenzji pracy, autor porusza zagadnienie trwałości zmęczeniowej płyt wielowarstwowych, wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego, skupiając swoją uwagę na naturalnym koncentratorze, czyli obszarze strefy spajania. Z racji tego, że zgrzewania wybuchowe zawsze powoduje zmiany strukturalne w obrębie strefy spajania w postaci lokalnych zmian struktury, wytwarzania defektów w szczególności przetopień i mikropęknięć oraz kruchych faz międzymetalicznych, zbadanie wpływu zmian strukturalnych strefy spojenia wielowarstwowych płyt wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego na trwałość zmęczeniową całego wyrobu, stanowi obecnie istotny problem naukowy. Dla tego w pracy główne skupiono uwagę na zbadaniu szczególnych cech geometrycznych i strukturalnych obszaru strefy spajania z punktu widzenia ich wzajemnych relacji z ogólną trwałością zmęczeniową badanych płyt wielowarstwowych. Problematyka przedstawiona w pracy, również dotyczy badania mechanizmu uszkodzenia struktur wielowarstwowych i identyfikacji inicjacji pęknięć zmęczeniowych na podstawie ewolucji niejednorodnego pola odkształcenia w poszczególnych warstwach kompozytu metalowego. Powoduje to potrzebę opracowania opisu analitycznego sumarycznie uwzględniającego relacji pomiędzy oryginalnymi charakterystykami strefy spajania, a ogólną trwałością zmęczeniową badanych materiałów z ujęciem ewolucji niejednorodnego pola odkształcenia w poszczególnych warstwach kompozytów wielowarstwowych. Realizacja całościowa przedstawionej problematyki wymagają stosowania odpowiednich metod i narzędzi pomiarowych dla określenia stanu struktury i poziomu odkształcenia w obrębie złącz warstw kompozytu. W pracy autor proponuje podejście dotyczące możliwości oceny doświadczalnej stanu struktury i identyfikacji

inicjacji pęknięć zmęczeniowych tak w bezpośredni sposób jak i pośrednio za pomocą mikroskopii optycznej, pomiarów niejednorodności pola odkształcenia z wykorzystaniem systemu korelacji obrazu, czy pomiarów mikrotwardości w strefie łączenia poszczególnych warstw kompozytu wielowarstwowego. Analizując mechanizmy propagacji uszkodzenia w warunkach zmiennego obciążenia cyklicznego wzięto pod uwagę poszczególne cykle uszkodzenia od zarodkowania uszkodzenia, aż do procesu gwałtownego wzrostu i całkowitego niszczenia próbki. Podjęta tematyka wpisuje się w nurt prac o charakterze eksperymentalnym z uwzględnieniem możliwości zastosowania uzyskanych wyników oceny strukturalnej elementów do oszacowania trwałości zmęczeniowej metalowych kompozytów wielowarstwowych.

Autor zaprezentował swoje dokonania w formie pisemnej notatki na 120 stronach zawierając w opisie dziewięć zasadniczych rozdziałów, spis oznaczeń i skrótów, streszczenie i wykaz literatury.

W **wprowadzeniu** autor zwraca uwagę na zapotrzebowanie przez przemysł jednolitych materiałów konstrukcyjnych o różnych właściwościach użytkowych często wzajemnie niekompatybilnych w ramach jednego materiału. Tworzenie nowych materiałów wielowarstwowych przez wykonanie trwałych połączeń, szczególnie między materiałami o znacząco różniących się charakterystykach, staje się coraz bardziej pożądane ze względu na osiągalne przez nich parametry pracy oraz potencjalne obniżenie kosztów produkcji i eksploatacji. Jedną z technologii umożliwiających trwałe połączenia materiałów w kompozyty wielowarstwowe jest właśnie zgrzewanie wybuchowe. Wprawdzie ta metoda pozwala na łączenie materiałów o różnych właściwościach, jednak, że generuje także niepożądane efekty, takie jak lokalne zmiany w strukturze materiału, które mogą prowadzić do koncentracji naprężenia i potencjalnie zwiększać ryzyko pęknięć zmęczeniowych. Wymaga to głębszej analizy wpływu strefy połączenia na wytrzymałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych uzyskanych za pomocą tej technologii.

Autor przybliży szczegóły technologii zgrzewania wybuchowego w **rozdziale drugim**. Rozpoczyna od przedstawienia historii i rozwoju tej metody, sięgając do jej początków w okresie I wojny światowej, a kończąc na współczesnych zastosowaniach. Następnie, dokładnie opisuje procedurę zgrzewania wybuchowego oraz omawia kluczowe parametry procesu, które mają istotny wpływ na jakość i trwałość uzyskanych połączeń. Jednym z istotnych elementów omawianej technologii jest przedstawienie okna technologicznego procesu zgrzewania wybuchowego. Określa ono optymalne warunki dla skutecznego połączenia materiałów, co jest kluczowe dla osiągnięcia pożądanych efektów. Omówienie kryteriów, jakie muszą spełniać materiały wybuchowe, pozwala zrozumieć możliwości i ograniczenia tej technologii.

W miarę dokładnie analizuje również mechanizm formowania kształtu falistego połączeń, co stanowi istotne wyzwanie dla dalszych badań i doskonalenia tej technologii. Przedstawienie aktualnych norm i dokumentów dotyczących testów mechanicznych materiałów zgrzewanych wybuchowo oraz wskazanie brakujących elementów w regulacjach podkreślają potrzebę dalszego rozwoju w tej dziedzinie.

Rozdział trzeci zawiera przegląd prac z obszaru badań zmęczenia materiałów warstwowych wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego. Autor pracy skupia się na analizie kompleksowej cech charakterystycznych strefy spojenia materiałów wielowarstwowych, prezentując jej w podziale na podrozdziały związane z różnymi rodzajami

i sposobami obciążenia kompozytów. W podrozdziale pierwszym omówiono badania dotyczące obciążenia próbek kompozytów wielowarstwowych siłą cyklicznie zmienną w kierunku prostopadłym do powierzchni połączenia. Rozpatrzono wyniki badań zmęczeniowych łączników spawalniczych oraz połączeń stali i aluminium. Ujawniono, że pęknięcia zmęczeniowe często powstawały w materiale słabszym, takim jak aluminium, jednak identyfikacja przyczyn inicjacji napotyka wielu trudności. Podrozdział drugi zawiera wyniki badań dotyczące obciążenia siłą cyklicznie zmienną w kierunku równoległym do powierzchni połączenia. Przeanalizowane wyniki badań trójwarstwowego kompozytu metalowego, w tym trwałość zmęczeniowa przed i po obróbce cieplnej. Jak wynika z analizy prac, obróbka cieplna ma pozytywny wpływ na zwiększenie trwałości zmęczeniowej kompozytu, zwłaszcza w warunkach obciążenia niskocyklowego. Badania dotyczące obciążenia próbek cyklicznie zmiennym momentem gnącym przeanalizowano w podrozdziale trzecim. W przytoczonych pracach analizowano wpływ obróbki cieplnej na trwałość zmęczeniową bimetalu oraz różnice w trwałości próbek przed i po obróbce cieplnej. Badania wykazały, zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na trwałość zmęczeniową obróbki cieplnej, w zależności od konkretnego przypadku badanego materiału. Ostatni podrozdział czwarty zawiera gruntowną analizę różnych aspektów związanych z zgrzewaniem wybuchowym, koncentrując się na różnych typach prób badawczych i metodach analizy. Autor rzetelnie omawia problemy związane z wyliczaniem stanu naprężenia oraz stosowanie odpowiednich metod w przypadku materiałów niejednorodnych, takich jak metalowe kompozyty wielowarstwowe. Przedstawia także dane dotyczące wpływu trwałości poszczególnych warstw z różnych materiałów na trwałość całego kompozytu wielowarstwowego oraz zjawiska występujące w obrębie złącz. W tekście poruszono również kwestię różnic w trwałości warstw materiałów w zależności od ich lokalizacji w próbce oraz wykorzystania różnych podejść badawczych, takich jak metody numeryczne czy badania metalograficzne, w celu zrozumienia zachodzących procesów zmian strukturalnych zwłaszcza w obrębie złącz. Autor analizuje także problematykę testów wytrzymałości zmęczeniowej i konieczność przebadania większej ilości próbek do sporządzenia dokładnych charakterystyk właściwości zmęczeniowych. W oparciu o posiadana wiedzę autor wskazuje na niewielką ilość, a wręcz brak wystarczającej ilości badań dotyczących wpływu strukturalno-geometrycznych cech strefy spojenia na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych kompozytów metalowych, co sugeruje potrzebę kontynuacji badań w tej dziedzinie. Równolegle autor odwołuje się do badań własnych, w których przedstawia wyniki eksperymentalne oraz analizuje mechanizmy uszkodzenia kompozytów wielowarstwowych z zastosowaniem warstw wykonanych z różnych metali.

Rozdział czwarty w którym autor przedstawia cel, zakres badawczy i tezy pracy. Praca naukowa skoncentrowana jest na ocenie wpływu strukturalno-geometrycznych cech strefy spojenia płyt wielowarstwowych wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego na ich trwałość zmęczeniową. Realizacja tego celu przewiduje eksperymentalne testy mające na celu określenie trwałości zmęczeniowej próbek pobranych z płyt wielowarstwowych przy różnych poziomach obciążenia cyklicznego oraz identyfikację miejsc inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Wyznaczenie umocnienia materiału będą dokonano poprzez pomiar rozkładu mikrotwardości i analizę cech geometrycznych powierzchni spojenia. Przewidziano również opracowanie modelu do oceny wpływu cech strefy spojenia na trwałość zmęczeniową oraz ocenę jednorodności pola odkształcenia. Tezy przyjęte w pracy, zakładają, że defekty w postaci lokalnych stref przetopień z mikropęknięciami mogą być inicjatorami pęknięć zmęczeniowych,

a wysokość fali powierzchni spojenia może być efektywnym i miarodajnym parametrem dla oceny wpływu niejednorodności złącza na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych.

Opis badanych metalowych kompozytów wielowarstwowych wraz z charakterystykami próbek do badań doświadczalnych przedstawiono w **rozdziale piątym**. Badano łącznie 11 kompozytów wielowarstwowych które pogrupowano w zależności od sposobu realizacji obciążenia zmęczeniowego, ilości warstw, obecności dodatkowej międzywarstwy technologicznej. Dla wszystkich badanych materiałów przedstawiono charakterystyki mechaniczne materiałów składowych, niezbędne informacje o wytwarzaniu kompozytów i obróbce cieplnej. Poza tym zaprezentowano podstawowe wymiary i kształty próbek do badań w poszczególnych grupach badanych metalowych kompozytów wielowarstwowych.

Rozdział szósty zawiera informacji dotyczące opisu metodyki badań doświadczalnych zwłaszcza badań zmęczeniowych przy różnych współczynnikach asymetrii cyklu, realizacji pomiarów geometrycznych parametrów struktur strefy spojenia oraz mikrotwardości. Także autor omawia metodyki optycznej obserwacji inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych za pomocą optycznej mikroskopii oraz monitorowania w czasie rzeczywistym pola odkształcenia i propagacji pęknięcia za pomocą cyfrowej korelacji obrazu. Układ pomiarowy używany do realizacji pomiarów za pomocą korelacji obrazu oparty o system firmy Dantec Dynamic Q-400. Ostatni podrozdział zawiera opis nieparametrycznej metody probabilistycznej umożliwiającej odwzorowanie nieliniowej i wielowymiarowej funkcji określanej jako proces gaussowski. Na podstawie prezentowanej metody w pracy do analizy danych doświadczalnych wykorzystano model GP (Gaussian Process) do ustalenia zależności pomiędzy trzema zmiennymi: amplitudą odkształcenia osiowego ε_a , wysokością fali zidentyfikowaną w połączeniu z warstwą ze stali danego kompozytu H oraz zlogarytmowaną liczbą cykli do zniszczenia N i możliwości przewidywania zachowania kompozytu na podstawie wartości amplitudy odkształcenia osiowego, wysokości fali oraz liczby cykli do zniszczenia.

Rozdział siódmy zawiera przede wszystkim wyniki badań doświadczalnych otrzymanych autorem w trakcie realizacji pracy. Rezultaty testów w postaci, wartości parametrów geometrycznych charakteryzujących strefę spajania, wartości mikrotwardości w obrębie złącz między warstwowych, liczby cykli do zniszczenia, obrazów analizy metalograficznej dotyczącej identyfikacji oraz propagacji pęknięć zmęczeniowych zarówno obrazów ewolucji pola odkształcenia zaprezentowano w formie zbiorowych tabel, wykresów oraz zdjęć. Wyniki dla różnych typów kompozytów wielowarstwowych przedstawiono zgodnie z podziałem na grupy, dokonany w rozdziale 5. Oprócz tego, autor dołączył do zbioru uzyskanych danych odpowiednie opisy, które właściwe zawierają analizę dotyczącą geometrycznych charakterystyk strefy spajania, rozkładów mikrotwardości poszczególnych materiałów wielowarstwowych, obrazów metalograficznych złącz i obrazów fraktograficznych powierzchni niszczenia i propagacji pęknięcia zmęczeniowego, a także interpretacji wyników pomiaru ewolucji pola odkształcenia.

Rozdział ósmy zatytułowany przez autora jako "Analiza wyników" zawiera szczegółową analizę grup badanych materiałów kompozytów metalowych w głównej mierze pod kątem oceny trwałości zmęczeniowej. Charakterystyka wyników realizowana w oparciu o zależności amplitud naprężenia i odkształcenia materiałów wielowarstwowych do ilości cykli do zniszczenia. Porównanie wyników doświadczalnych badanych materiałów między sobą dodatkowo zweryfikowano według rekomendacji ASME, za pomocą średniej i projektowej

krzywych. Jak wynika z opracowanego przez autora wykresu, obszar zbioru danych eksperymentalnych jest stosownie ulokowany nad projektowa krzywa, co potwierdza spełnienie wymagań do trwałości przez badane kompozyty wielowarstwowe. Wpływ parametrów geometrycznych strefy spojenia na trwałość zmęczeniowa kompozytu wielowarstwowego autor ocenia za pomocą modelu opartego na procesach gaussowskich. Zasilając proponowany model danymi doświadczalnymi autor ujawnia nieliniowy charakter zależności pomiędzy amplituda odkształcenia, a liczba cykli do zniszczenia. Natomiast wysokość fali w strefie spajania wykazuje zależność liniowa z trwałością zmęczeniową. Także przeanalizowana została cykliczna stabilność badanych kompozytów wielowarstwowych z przeprowadzeniem dokładnej analizy cyklicznego pełzania materiałów. Wyniki badania ewolucji pola odkształcenia za pomocą systemu korelacji obrazu przedstawiono dla próby cyklicznego i monotonicznego obciążenia. Zwrócona została uwaga na różnicę między odkształceniami rzeczywistymi, a inżynierskimi rejestrowanymi jak w próbie cyklicznego tak i monotonicznego obciążenia badanych materiałów.

Rozdział dziewiąty zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wnioski, które wyraźnie uzasadniają i potwierdzają poprawność postawionej tezy. Wraz z tym autor kreuje sugerowane kierunki prowadzenia dalszych badań w celu rozwinięcia wiedzy na temat wielowarstwowych materiałów otrzymywanych metodą wybuchową.

Wykaz cytowanej literatury obejmujący 113 pozycji publikacyjnych, zawierających książki, krajowe i zagraniczne artykuły oraz materiały konferencyjne.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Temat pracy, która została przedstawiona do recenzji, dotyczy wpływu strefy połączenia na wytrzymałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego. Takie formułowanie w zasadzie jest poprawne i istotne z punktu widzenia inżynierii materiałowej oraz konstrukcyjnej, ze względu na rosnącą popularność niekonwencjonalnych metod łączenia materiałów w celu uzyskania połączeń o właściwościach niemożliwych do osiągnięcia za pomocą metod konwencjonalnych.

Cel pracy jest klarowny i koncentruje się na ocenie wpływu strefy spojenia na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych uzyskanych metodą zgrzewania wybuchowego. Realizacja tak zadeklarowanego celu wymagała zbadania wpływu różnych czynników, takich jak parametry procesu zgrzewania, właściwości materiałów łączonych oraz geometria połączenia, na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych. Oprócz tego niezbędna była identyfikacja potencjalnych defektów oraz lokalnych zmian w strefie połączenia, które mogą prowadzić do inicjacji pęknięć zmęczeniowych i zmniejszenia wytrzymałości materiału. Dodatkowo, wymagana była analiza mechanizmów umocnienia odkształceniowego materiału oraz jego wpływu na wytrzymałość zmęczeniową. Także autor pracy przyjmuje hipotezy dotyczące możliwości inicjowania pęknięć zmęczeniowych w płytach wielowarstwowych od defektów w postaci lokalnych obszarów przetopień w strefie spojenia wraz z założeniem, że wysokość fali powierzchni spojenia może być efektywną miarą oceny wpływu niejednorodności złącza na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych. Hipotezy te są zgodne z celem pracy i mogą dostarczyć istotnych wniosków na temat wpływu strefy spojenia na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych.

Zakres pracy obejmuje przegląd literatury dotyczącej zgrzewania wybuchowego, analizę charakterystyk tego procesu, różnorodne aspekty badawcze, takie jak analizę mikrostruktury, cech geometrycznych powierzchni spojenia oraz ocenę jednorodności pola odkształcenia. To podejście pozwala na kompleksową analizę problemu i pozwala na lepsze zrozumienia działania mechanizmów wpływających na trwałość zmęczeniową takich połączeń. Obszar eksperymentalny badań został precyzyjnie zdefiniowany, obejmuje konkretne etapy, takie jak badanie trwałości zmęczeniowej próbek, identyfikację lokalizacji inicjacji pęknięć zmęczeniowych, analizę charakterystyki strefy połączenia oraz stworzenie modelu oceniającego wpływ jej cech na wytrzymałość zmęczeniową.

Ogólnie rzecz biorąc, temat pracy jest dobrze określony i ma szczególne znaczenie dla praktyki inżynierskiej. Obejmuje on wiele interesujących aspektów, które mogą być przedmiotem dogłębnej analizy i badań. Jedyne, można byłoby zastanawiać się nad zbyt ogólnym, w opinii recenzenta, sformułowaniem użytym w temacie: "Wpływ strefy spojenia...". Wydaje się, że bardziej precyzyjnym byłoby uszczegółowienie tego zwrotu poprzez skupienie uwagi na parametrach strukturalnych, geometrycznych strefy spojenia, przykładowo formułując temat w ten sposób: "Analiza wpływu parametrów strukturalno-geometrycznych strefy spojenia na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego". Spostrzeżenie to jest jedynie rozważaniem i nie ma wpływu na temat ani na treść merytoryczną pracy.

Podsumowując, uważam, iż cel i zakres pracy są adekwatne do tematu i pozwalają na przeprowadzenie kompleksowych badań nad wpływem parametrów strukturalno-geometrycznych strefy spojenia na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych uzyskanych metodą zgrzewania wybuchowego.

3. Ocena rozprawy

Zaproponowana przez autora pracy metodologia i zakres pracy całościowo obejmują konkretne działania klasyfikowane jako etapy naukowo-badawcze. W notatce przedstawiono wprowadzenie do problematyki badawczej, zidentyfikowano zagadnienie naukowe oraz dokładnie opisano metodykę przeprowadzenia badań. Wykonane badania doświadczalne wraz z stosowanymi urządzeniami badawczymi zostały szczegółowo opisane. Praca łączy analizę oraz eksperymenty, które są typowe dla dziedziny inżynierii mechanicznej.

Równoległe, wnikliwe przedstawienie przygotowywania dedykowanego stanowiska pomiarowego, które obejmuje część pomiarową, jak i specjalistyczne oprogramowanie do rejestrowania danych, oparte o cyfrowe przetwarzanie obrazu świadczy o bezpośrednim zaangażowaniu i samodzielności autora w zakresie przygotowania i realizacji badań doświadczalnych. Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych stają się podstawą do realizacji autorem analitycznej części pracy, poprzez oszacowanie trwałości zmęczeniowej za pomocą przyjętego przez siebie modelu oraz omówienia spostrzeżeń związanych z otrzymanymi wynikami. Biorąc pod uwagę obecność w notatce pracy stosownych podsumowań oraz wniosków wyciągniętych przez autora w każdym z rozdziałów pracy stwierdzam, że doktorant reprezentuje się jako dojrzały i samowystarczający badacz.

Podsumowując, uważam, że praca całościowo spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zwłaszcza w dyscyplinie inżyniera mechaniczna.

Bezspornymi atutami recenzowanej rozprawy z punktu widzenia opisu przedstawionego problemu, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobu jego rozwiązania uważam:

- a) zasięg naukowy i aplikacyjny problematyki oceny wpływu parametrów geometrycznych i strukturalnych strefy spojenia na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego;
- b) odpowiednio przygotowany i przeprowadzony zakres badań doświadczalnych różnorodnych metalowych płyt wielowarstwowych;
- c) przedstawienie metodyki monitorowania pęknięć zmęczeniowych oraz obszarów ewolucji odkształceń w czasie rzeczywistym przy użyciu techniki cyfrowej korelacji obrazu;
- d) weryfikację wyników uzyskanych badań doświadczalnych w oparciu o rezultaty badań metalograficznych oraz prognozowanie trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem zaproponowanego modelu analitycznego;
- e) uwzględnienie w procesie opracowania wyników badań doświadczalnych problematyki niepewności pomiarowej istotnej dla poprawnej oceny wyników.

4. Uwagi szczegółowe

Biorąc pod uwagę wartość merytoryczną rozprawy, przedstawiam zestaw konstruktywnych sugestii, mających na celu udoskonalenie aspektów metodologicznych oraz ułatwienie przygotowania przyszłych publikacji dotyczących tematu rozprawy i dalszych badań w tej dziedzinie.

Tekst dysertacji, ogólnie rzecz biorąc, napisany jest w sposób zrozumiały. Niemniej jednak, przy ogólnej poprawności językowej pracy doktoranta występują pewne uchybienia, w postaci różnego rodzaju skrótów myślowych, błędów gramatycznych, interpunkcyjnych oraz niejasności interpretacyjnych. Tak przykładowo może być wymieniono:

- Spis treści: „6.5. Zdjęcia przelomów zmęczeniowych” tytuł rozdziału ewidentnie powinien brzmieć jako: „Zdjęcia powierzchni przelomów zmęczeniowych”;
- wykorzystanie w nazwie podrozdziałów jednego słowa lub tylko oznaczenia materiału jest delikatnie mówiąc zbyt minimalistyczne (6.7.1 Podstawy, 7.2.1 Ta-Cu-P355 i Ta-Cu-304L i inne);
- Spis oznaczeń i skrótów: tylko pierwsza kolumna ma nagłówek, należało bynajmniej dodać nagłówek dla jednostek lub w ogóle nie wprowadzać takiego wiersza;
- Nagminne stosowanie w tekście w jakości punktora literki „i” zamiast rzymskiej cyfry I;
- Str. 9:” Na rysunku 2.1 przedstawiono schematycznie ideę zgrzewania wybuchowego...” natomiast poprawnie określono obraz w podpisie pod rysunkowym jako: „Schemat przebiegu zgrzewania wybuchowego płyt w układzie równoległym...”;
- Rys 2.2 jak i większość rysunków zamieszczonych w pracy, niestety nie zawierają w podpisach pod rysunkowych wyjaśnienia oznaczeń i pozycji na nich przedstawionych;

- informacje przedstawione w tabeli 5.2 warto było uzupełnić w kolumnę zawierająca informacje o konkretnym źródle danych którego uzyskano wartości właściwości mechanicznych materiału;
- str. 33: „Badania zmęczeniowe poległy” ewidentna literówka;
- stosowanie dużych literek do oznaczenia rysunków i pozycji tworzy utrudnienie dla zrozumienia obrazu (rys.6.2);
- str.46: liczba cykli do zniszczenia N oznaczona niezgodnie z wykazem na początku pracy;
- str.51: „przy amplitudzie naprężenia równej 21 kN” autor chyba miał na myśli amplitudę siły;
- str.73: „Geometria złącza siedmiowarstwowego...na rysunku 7.28” oraz podpis pod rysunkiem 7.28 nie odpowiada obrazu na rysunku;
- str.101:” Rysunek 8.20 w obszarze powiększenia zastosowano inna skalę;
- str.107:” Wyliczono inżynierskie oraz rzeczywiste odkształcenia z obszaru wirtualnej rozety, a następnie przeliczone zostały naprężenia: rzeczywiste - $\sigma_{eng} = F/A_0$ oraz inżynierskie - $\sigma_{true} = F/A_{true}$,” pomyłono pozycję wzorów.

Spostrzeżenia ogólne

- w tekście całej pracy autor nagminnie grzeszy nieprecyzyjnością formułowań lub dużym uogólnieniem. Przykładowo na str.26 dysertant pisze:” W tabeli 5.3 zamieszczono wszystkie informacje charakteryzujące poszczególne warianty materiałów...” gdyż w rzeczywistości, część parametrów jest niejawna, jednak dalej na str.28 poprawia się pisząc:” Dane dotyczące ... i znane parametry procesu zostały zestawione w tabeli 5.5.”;
- rysunki, zwłaszcza wykresy w części analizy wyników, nie zawsze prezentowane w jednakowym formatowaniu, zdąża się stosowanie różnej skali, zbędnych opisów słownych osi współrzędnych, brak oznaczeń kilku obrazów na jednym rysunku;
- nie do końca zrozumiała jest intencja autora w stosunku do zamieszczenia w pracy rozdziału 6.5. Czemu to jedno zdanie nie można było dołączyć do poprzedniego rozdziału?

Ponadto spodziewam się od autora rozprawy bardziej szczegółowego wyjaśnienia następujących kwestii:

- 1) Z jakiego obszaru platerowanej płyty wielowarstwowej i w jakim kierunku wycinano próbki do badań? W jakim celu frezowano warstwy i jaki grubości zamierzano osiągnąć? Czym spowodowana różna długość i niedokładność podania wymiarów części próbek, mocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej?
- 2) Dla czego jako kryterium zakończenia testu, przyjęto całkowite przerwanie ciągłości materiału, a nie spadek obciążenia?
- 3) Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie twierdzenia, że przy analizie teoretycznych nadmierne dopasowanie do wyników eksperymentalnych przebiegi są nie zgodne z fizycznym aspektem zjawiska.

- 4) Proszę o sprecyzowaniu założenia do kierunku dalszych badań w zakresie rozszerzenia eksperymentalnej weryfikacji wpływu obróbki cieplnej kompozytów na trwałość zmęczeniową.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując moją recenzję, stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Szymona Derdy stanowi znaczące i oryginalne podejście do problemu naukowego dotyczącego wpływu parametrów strukturalnych i geometrycznych strefy spojenia na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego. Doktorant wykazał się dobrą znajomością mechaniki, mechaniki pękania, wytrzymałości materiałów oraz nowoczesnych technik obliczeń analityczno-modelowych, co pozwoliło mu skutecznie osiągnąć cel pracy i potwierdzić tezę. Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz opracowania wyników doświadczalnych wyraźnie zademonstrowana w pracy doktorskiej. Uzyskane rezultaty posiadają zarówno wartość poznawczą, jak i praktyczną, co podkreśla dojrzałość merytoryczną autora w zakresie oceny trwałości zmęczeniowej wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego.

Konkludując, recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymogi formalne i merytoryczne, dlatego oceniam ją jako bardzo dobrą. Uważam, że poziom przedstawionej pracy **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce,, (Dz.U.z 2023r. poz.742 z póź. zm.)**. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Szymona Derdę do publicznej obrony jego rozprawy.



