

dr hab. inż. Anna TIMOFIEJCZUK, prof. PŚ
Politechnika Śląska
e-mail: atimofiejczuk@polsl.pl

Gliwice, 24.03.2024

OPINIA

o pracy doktorskiej mgr. inż. Szymona DERDY

pt. *Wpływ strefy spojenia na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego*

Opinię opracowano na zlecenie Przewodniczącego rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej

1 Wstęp

Obserwowany od kilkudziesięciu lat szybki rozwój technologiczny, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym, pociąga za sobą konieczność tworzenia i stosowania nowych materiałów, którym stawia się wiele wymagań. Do najważniejszych z nich należy niska masa i duża wytrzymałość. Ponadto, w przemyśle motoryzacyjnym ważne są sposoby kształtowania materiałów, ich łączenia, a także ich odpowiednie zachowanie w trakcie wypadku. Wiele z tych wymagań możliwe jest do spełnienia poprzez zastosowanie kompozytów. Technologie wytwarzania kompozytów są obecnie jednymi z głównych kierunków badań naukowych, a przede wszystkim wdrożeniowych. Poszukuje się technologii, które są optymalne pod względem energetycznym i pozwolą na tworzenie niezawodnych materiałów o powtarzalnych własnościach. Rozwój takich procesów technologicznych jest jednym z obszarów Inżynierii Mechanicznej. Różne możliwości łączenia materiałów pozwalają na uzyskiwanie kompozytów o bardzo różnorodnych własnościach. Opracowano wiele metod ich badania oraz określania tych własności. Zaznaczyć należy, że o ile własności wytrzymałościowe są dosyć dobrze opisywane w literaturze, to własności wynikające ze zmęczenia tych materiałów, w wielu przypadkach nie są wystarczająco opisywane. W tym kontekście, tematyka pracy dotycząca określania wpływu łączenia materiałów na trwałość zmęczeniową materiałów wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego jest bardzo aktualna.

2 Opis rozprawy

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów i została opracowana w języku polskim. Na końcu pracy zamieszczono streszczenia w językach polskim oraz angielskim. Na początku pracy zamieszczono spis oznaczeń i skrótów zawartych w pracy. Wraz ze streszczeniami oraz wykazem literatury, zawierającym 113 pozycji, rozprawa liczy 120 stron.

W rozdziale 1. pt. *Wprowadzenie*, liczącym 2 strony, zawarto krótką charakterystykę tematu pracy i wyjaśniono znaczenie wprowadzania nowych materiałów, a także wskazano na główne trendy technologiczne i związane z nimi problemy. Jako jedną z możliwych technologii wskazano zgrzewanie wybuchowe.

Rozdział 2, zatytułowany *Zgrzewanie wybuchowe*, liczący 5 stron, zawiera przegląd literatury dotyczącej tej technologii. Opisano w nim historię zgrzewania wybuchowego, a także jego kolejne etapy wraz z wyjaśnieniem zjawisk, które występują podczas realizacji tego procesu. Opisy zilustrowano bardzo dobrze przygotowanymi schematami zaczerpniętymi z literatury. W rozdziale omówiono badania wytrzymałościowe, które wykonuje się dla materiałów łączonych tą technologią. Opisy zawarte w rozdziale odwołują się do dużego zbioru literatury z tego zakresu.

Rozdział 3, zatytułowany *Przegląd stanu wiedzy*, liczący 9 stron, składa się z czterech części. Rozdział rozpoczyna się od krótkiego omówienia jego zawartości, a następnie przedstawiono przegląd prac dotyczących materiałów wytwarzanych metodą zgrzewania wybuchowego. W szczególności opisano zagadnienia związane ze zmęczeniem materiałów. Przegląd został podzielony ze względu na sposób obciążenia materiałów. W końcowej części rozdziału zawarto podsumowanie, w którym zebrano uwagi dotyczące badań omawianych materiałów i określono takie kierunki badań wytrzymałościowych, które nie są obecnie powszechnie wykonywane.

Rozdział 4, zatytułowany *Cel, zakres i hipoteza badawcza pracy*, który liczy 1 stronę zawiera sformułowany cel pracy, szczegółowo określony zakres, składający się z pięciu zadań wymagających rozwiązania. Bazując na celu oraz zakresie pracy, Autor sformułował dwie tezy:

- *Defekty w postaci lokalnych stref przetopień z mikropęknięciami mogą być inicjatorami pęknięć zmęczeniowych w płytach wielowarstwowych.*
- *Wysokość fali powierzchni spoiny może być efektywną miarą oceny wpływu niejednorodności złącza na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych.*

Sformułowane cel, zakres i tezy pracy uważam za poprawne.

Rozdział 5, zatytułowany *Materiały*, liczący 9 stron zawiera wstęp, w którym zawarto uwagi dotyczące zawartości całej pracy, w tym analizę wyników badań eksperymentalnych wykonanych przez Autora rozprawy dla materiałów w formie płyt, które zostały wytwarzane metodą zgrzewania

wybuchowego. Autor wyjaśnił, że na jedenaście różnych materiałów, tylko w jednym przypadku wyniki badania materiału zaczerpnięto z literatury. Wyniki przeprowadzonych badań pogrupowano zgodnie z kryterium podziału związanym z obciążeniem zadawanym podczas testów zmęczeniowych. W rozdziale omówiono warianty badania z zerową wartością naprężenia średniego oraz warianty związane z różną liczbą warstw. Materiały, które przygotował Autor do badań metodą zgrzewania wybuchowego miały postać płyt kompozytowych, z których wycięto elementy poddawane badaniom mechanicznym i zmęczeniowym. W rozdziale zawarto dane dotyczące badanych materiałów w postaci obszernych tabel. W rozdziale nie zawarto podsumowania.

W rozdziale 6, zatytułowanym *Metody badawcze*, liczącym 14 stron, zawarto opis stosowanych przez Autora wszystkich metod eksperymentalnych, wymagających przeprowadzenia odpowiednich testów, ale także sposobów analizy wyników. W pierwszej kolejności opisano testy zmęczeniowe, a w tym sposoby pomiaru własności spoiny i zagadnienia dotyczące mikrotwardości. Scharakteryzowano sposoby identyfikacji i obserwacji miejsc inicjacji pęknięć zmęczeniowych, a także omówiono interpretację zdjęć przełomów zmęczeniowych. W rozdziale *Metody badawcze* Autor wyjaśnia, że celem opisywanych badań jest określenie trwałości zmęczeniowej przy zadanym poziomie obciążenia, a także wykrycie miejsca inicjacji pęknięcia oraz ścieżki jego propagacji. Testy były prowadzone w sposób ciągły i przerywany. W celu porównania wyników Autor zastosował różne podejścia do testowania materiałów. W badaniach wykorzystano także zestaw do cyfrowej korelacji obrazu zastosowany do obserwacji pęknięć zmęczeniowych oraz pola odkształcenia. Autor opisał także sposoby zastosowania tej metody w badaniach zmęczeniowych, a także scharakteryzował przebieg badań. Rozdział poprzedza krótkie wprowadzenie, ale nie zawarto w nim podsumowania.

Rozdział 7, zatytułowany *Wyniki badań eksperymentalnych* zawiera bardzo obszerny, liczący 32 strony, opis wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Autora, w którym powołano się na rozdział 5 *Materiały*. W rozdziale *Wyniki badań* zawarto bardzo szczegółowe opisy eksperymentów, zawierające takie informacje jak liczba cykli obciążenia do zniszczenia kompozytu dla zadanych poziomów obciążenia, wartości opisujące parametry złącza, wartości mikrotwardości, informacje na temat miejsca inicjacji pęknięcia, opis ścieżki propagacji na podstawie wybranych pęknięć zmęczeniowych. Scharakteryzowano także proces rozwoju odkształcenia zaobserwowany podczas testu zmęczeniowego przy zastosowaniu cyfrowej korelacji obrazu. Rozdział został podzielony na dwie części dotyczące badań materiałów z zerową wartością średnią naprężenia oraz materiały z niezerową wartością średnią naprężenia. W pierwszej grupie badań opisano materiały bez warstwy technologicznej umieszczonej między materiałami bazowymi oraz materiały z taką warstwą. W grupie drugiej opisano materiały składające się z bimetalu stal-tytan, siedmiowarstwowego kompozytu z ARMCO, tytanu i aluminium oraz dwóch wariantów trójwarstwowego plateru z wierzchnią warstwą tantalu. Na podkreślenie zasługuje to, że w rozdziale zawarto bardzo obszerny materiał wynikający

z przeprowadzonych badań i dokumentujący uzyskane wyniki. Są to zdjęcia, schematy i tabele bardzo obszernie opisane w rozdziale. Rozdział poprzedzono krótkim wprowadzeniem, ale nie zawarto w nim podsumowania.

W rozdział 8, zatytułowany *Analiza wyników* liczący 30 stron został ma taką samą strukturę, jak rozdział 7 *Wyniki badań eksperymentalnych*. Kolejne części tego obu rozdziałów są zatytułowane w taki sam sposób, a uzyskane wyniki uporządkowani zgodnie z rozdziałem 5 *Materiały*. W rozdziale 8 zawarto wyniki analizy danych zarejestrowanych podczas testów, a przeprowadzono dyskusję otrzymanych wyników. Efektem tych zestawień i analiz są scharakteryzowane podobieństwa i różnice między poszczególnymi materiałami poddanymi testom. Wyniki podzielono ze względu na stan obciążenia podczas testu zmęczeniowego oraz rodzaj materiału na wzór podziału zastosowanego w rozdziale 5. Rozdział poprzedzono bardzo krótkim wprowadzeniem, ale nie zawarto w nim podsumowania.

Rozdział 9, zatytułowany *Wnioski i podsumowanie*, liczący 3 strony, zawiera podsumowanie wszystkich testów wykonanych w ramach pracy, a także wyników analizy zaobserwowanych danych. W rozdziale zawarto także podsumowanie i ogólne komentarze dotyczące zastosowania metody zgrzewania wybuchowego, ukazując, na tle przeprowadzonych eksperymentów, że problem, którego dotyczy praca jest złożony, ze względu na skomplikowaną geometrię złącza. W rozdziale sformułowano siedem obszernych wniosków, które dotyczą cech materiałowych i zachowania się badanych materiałów w określonych okolicznościach, ale także dotyczą sposobu prowadzenia analizy danych, w tym Autor skomentował możliwości zastosowania analizy obrazów i metod uczenia maszynowego w badaniach analogicznych do tych, jakie przeprowadził Autor. Wniosek siódmy dotyczy kierunków dalszych badań. We wnioskach nie odniesiono się wprost do sformułowanych tez.

W końcowej części pracy zawarto streszczenia w języku polskim i angielskim, każde o długości 1 strony, a następnie wykaz literatury uporządkowany alfabetycznie, liczący 113 pozycji.

Układ pracy jest typowy dla prac doktorskich z dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, w których określa się w pierwszej części zakres badań, definiuje aktualny stan wiedzy na podstawie wyników badań literaturowych, a następnie formułuje się problem badawczy. Jednak układ recenzowanej rozprawy odbiega nieco od większości prac. Pierwsze rozdziały pracy są bardzo krótkie, co nie utrudnia czytania, ale w znacznej większości opracowań takie rozdziały są połączone. W recenzowanej rozprawie skutkuje to dużą, jak na rozprawy doktorskie liczbą rozdziałów. Ponadto, w przypadku niektórych rozdziałów ich tytuły wydają się mieć charakter roboczy, np. rozdział *Materiały* lub *Metody badawcze*. Należy zauważyć, że zawartość rozdziałów w zasadzie oddaje tytuł, ale w treści zawarto znacznie więcej zagadnień niż opisuje to tytuł. Jeżeli Doktorant zamierza wydać rozprawę w formie monografii, sugeruję rozważyć zmiany związane z połączeniem pewnych rozdziałów i zmianą tytułów rozdziałów. W pracy

sformułowano tezy, co nie jest obecnie wymaganym elementem, ale we wnioskach, zawartych w rozdziale 9 nie odniesiono się wprost do sformułowanych tez. Podkreślić należy, że z wniosków wynika udowodnienie tez. Podobnie jak w większości prac, także i w tym przypadku omówiono zaproponowane rozwiązanie problemu badawczego i wyniki weryfikacji tego rozwiązania. Praca została podzielona na rozdziały o bardzo różniących się długościach. Charakterystyka przeglądu literatury została opracowana w sposób bardzo wyważony. W pracy nie zawarto nadmiernych opisów badań wynikających z literatury. Charakterystykę przeglądu literatury udokumentowano poprzez obszerny wykaz literatury. Praca została zredagowana bardzo starannie, natomiast zaważa się pewną liczbę pojęć stosowanych niepoprawnie lub używanych jako skróty myślowe. Przykładami tego są pojęcia dotyczące konstrukcji, własności i właściwości materiałowych, czy metody zgrzewania wybuchowego, która w pracy nazywana jest w wielu miejscach metodą wybuchową. Nie wpływa to jednak na ogólne zrozumienie pracy. Praca jest bardzo bogato zilustrowana poprzez zamieszczenie zdjęć, obrazów, schematów i tabel, które są bardzo dobrze opisane. Jednak ich dodanie spowodowało zapewne duże trudności redakcyjne. Ze względu na dodanie tych materiałów w treści pracy występuje wiele pustych miejsc, co powoduje, że w niektórych przypadkach treść pracy zajmuje połowę strony. W przypadku wydawania pracy w postaci monografii sugeruję zmienić układ tych materiałów.

3 Uwagi dotyczące doboru tematu, celu, tez i zakresu rozprawy

Temat pracy dotyczy procesów technologicznych materiałów kompozytowych wywarzanych metodą zgrzewania wybuchowego. W pracy Autor skupił się na przebadaniu 11 różnych materiałów, o różnej konfiguracji warst bazowych i technologicznych. Badania przeprowadził z zastosowaniem kilku metod i różnych parametrów przeprowadzania testów, co pozwoliło na porównanie własności tych materiałów oraz obserwację ich zachowania, w szczególności mechanizmów powstawania uszkodzeń. Biorąc pod uwagę obecne trendy w stosowaniu materiałów kompozytowych, tematyka pracy jest aktualna, a jej rezultaty mogą być wykorzystane w praktyce przemysłowej.

Celem pracy jest „ocena wpływu strefy spojenia płyt wielowarstwowych wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego na trwałość zmęczeniową”. W świetle opisanej wyżej tematyki pracy, cel pracy został sformułowany prawidłowo.

W pracy sformułowano dwie tezy:

- *Defekty w postaci lokalnych stref przetopień z mikropęknięciami mogą być inicjatorami pęknięć zmęczeniowych w płytach wielowarstwowych.*

- *Wysokość fali powierzchni spojenia może być efektywną miarą oceny wpływu niejednorodności złącza na trwałość zmęczeniową płyt wielowarstwowych.*

Biorąc pod uwagę obecnie realizowane prace doktorskie, sformułowanie tezy nie było konieczne. Należy jednak zauważyć, że Autor pracy w sformułowanych wnioskach nie odniósł się bezpośrednio do tezy.

Zakres rozprawy dobrano prawidłowo, odpowiednio do celu rozprawy, sformułowanego przez Doktoranta. Należy także podkreślić, że zakres pracy określono bardzo przejrzysto, jako szereg zadań wymagających rozwiązania.

4 Ocena merytoryczna

Tematyka pracy, podjęta przez Doktoranta, wpisuje się w trendy rozwoju inżynierii mechanicznej, a w szczególności eksploatacji maszyn, w tym także diagnostyki technicznej. Praca ma charakter eksperymentalny i jest wynikiem wielu testów przeprowadzonych samodzielnie przez Doktoranta. Sposób przeprowadzania eksperymentów, a także uzyskane wyniki zostały bardzo dobrze udokumentowane i omówione. Wyniki pracy mogą być wykorzystane w dalszych pracach Doktoranta, ale także w innych pracach i w praktyce przemysłowej. Należy jednak podkreślić, że czytając pracę odczuwa się pewne zaskoczenie wynikające z tego, co zostało skomentowane w poprzednich częściach recenzji, nieco odbiegającej od innych prac struktury pracy i tytułów rozdziałów. Ponadto należy podkreślić, że realizacja tego tematu wymagała od Doktoranta połączenia wiedzy z zakresu Inżynierii Mechanicznej, ale także Inżynierii Materiałowej, co czyni pracę interdyscyplinarną. Jednak główny nacisk został położony na proces technologiczny i sposoby badania własności materiałów, stąd tematykę pracy i jej umiejscowienie w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oceniam jako poprawne.

4.1 Elementy oryginalne

Na podstawie rozprawy oceniam, że najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta są:

1. sposób eksperymentalnego wyznaczenia trwałości zmęczeniowej materiałów wraz z identyfikacją pęknięć zmęczeniowych i miejsc inicjacji pęknięć
2. wyznaczenie i charakterystyka strefy spojenia materiałów wraz opracowaniem modelu do oceny wpływu tej strefy na trwałość zmęczeniową

4.2 Uwagi dyskusyjne

1. W pracy, także na samym początku, mowa o materiałach, ale także o ich używaniu w projektowaniu i konstruowaniu elementów maszyn. Pojęcie konstrukcji w literaturze jest często niepoprawnie stosowane, co także widoczne jest w pracy Doktoranta. Biorąc pod uwagę

naukowe elementy zawarte w pracy, proszę o wyjaśnienie co Doktorant rozumie pod pojęciem konstrukcja, układ i system.

2. Omawiając materiały badana w ramach pracy Autor używa zamiennie pojęć właściwość i własność, a także cecha, co nie jest poprawne. Proszę o wyjaśnienie tego, czy pojęcia te zostały użyte zamiennie przez przypadek, czy Autor użył je tak celowo. Proszę o wyjaśnienie co Autor rozumie pod pojęciem własność i właściwość.
3. We wnioskach zawartych w pracy nie odniesiono się wprost do sformułowanych tez, choć ich spełnienie jest widoczne w uzyskanych wynikach. Proszę o skomentowanie uzyskanych wyników w kontekście sformułowanych tez.
4. Czy zdaniem Autora byłoby możliwe celowe wprowadzanie wad materiałowych kompozytów i badanie zachowania się materiałów poprzez stosowanie metod opisanych w pracy? Jakiego rodzaju wady byłyby możliwe do wprowadzenia i czy takie badania byłyby uzasadnione?

5 Wniosek końcowy

Podjęty i rozwiązany przez Doktoranta problem badawczy jest ważny z perspektywy rozwoju procesów technologicznych i badania nowych materiałów. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* oraz wymaganą umiejętnością zaplanowania i samodzielnego przeprowadzenia badań naukowych. Sformułowane przeze mnie uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca doktorska Mgr. inż. Szymona Derdy pt. *Wpływ strefy spoiny na trwałość zmęczeniową wielowarstwowych płyt otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego* spełnia wymagania Art. 187 p.1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.

Ponadto, wnoszę o wyróżnienie rozprawy, co motywuję bardzo starannie i szeroko przeprowadzonymi badaniami eksperymentalnymi, a przede wszystkim wzorowo udokumentowanymi wynikami tych badań i ich charakterystyką.



