

Białystok, 23.08.2022 r.

prof. dr hab. inż. Michał Kuciej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Skoczylasa

pt. Odporność na pękanie połączeń klejowych materiałów kompozytowych

promotor: dr hab. inż. Sylwester Samborski, profesor uczelni

promotor pomocniczy: dr inż. Mariusz Kłonica

wykonana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego ds. stopni naukowych Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej, dr. hab. inż. Jarosława Bieniasia pismem RDN/IM/285/2022 z dnia 28 czerwca 2022 r.

1. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska została przedstawiona na 108 stronach maszynopisu formatu A4 w języku polskim. Praca składa się z 6 rozdziałów (w tym 3 roboczych), wstępu, podsumowania i wykazu literatury. Zamieszczono w niej 67 rysunków, 4 tabele i 151 cytowanych w pracy pozycji bibliograficznych. Na początku rozprawy został również umieszczony wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń.

Głównym celem pracy doktorskiej autorstwa mgr. inż. Jakuba Skoczylasa było zbadanie zastosowania standardowych prób wytrzymałościowych do wyznaczania odporności na pękanie materiałów inżynierskich, do wybranych utwardzonych żywic epoksydowych stosowanych jako bazy materiałów kompozytowych oraz połączeń klejonych.

W *pierwszym* teoretycznym rozdziale pt. „*Wybrane zagadnienia mechaniki pękania*” Autor przedstawił podstawowe informacje dotyczące mechaniki pękania. Zamieszczono skromne informacje dotyczące zarysu historycznego tej gałęzi nauki, również w kontekście dokonań na tym polu polskich naukowców oraz samą definicję mechaniki pękania wraz z ogólną klasyfikacją w zależności od działających obciążeń. Doktorant w przejrzysty sposób opisał

podstawowe definicje, schematy zniszczenia, mechanizmy kruchego i ciągliwego pęknięcia oraz kryteria pęknięcia.

W rozdziale zatytułowanym „*Materialy kompozytowe*” autor zamieścił podstawowe definicje i informacje dotyczące przeważnie materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej, szczególnie wyróżnił żywice epoksydowe, które są głównym materiałem badań w tej pracy.

Najbardziej rozbudowany rozdział z trzech, tak zwanych teoretycznych, dotyczy metody emisji akustycznej wykorzystywanej do monitorowania uszkodzeń i ich rozwoju w materiałach inżynierskich. W powyższym rozdziale, tak jak w poprzednich, wymieniono podstawowe definicje związane z emisją akustyczną, podano przykłady prac naukowych, gdzie stosowano tę metodę w kontekście badania uszkodzeń w materiałach kompozytowych, wraz z opisem charakterystycznych dla danych uszkodzeń zakresów częstotliwości generowanych w materiale sygnałów. Opisano również dwie najpowszechniej stosowane metody analizy sygnałów, tj. szybką transformację Fouriera (FFT) oraz analizę na podstawie transformacji falkowej (WT).

Kolejny rozdział zawiera charakterystykę problemu badawczego, gdzie zdefiniowano główny cel badawczy, którym jest określenie możliwości bezpośredniego zastosowania wybranych próbek odporności na pęknięcie materiałów inżynierskich oraz analizy akustycznej do materiałów epoksydowych Epidian 5 i 53, które stosowane są jako osnowy np. kompozytów włóknistych oraz na połączenia klejowe. W tej części rozprawy postawiono tezę oraz zamieszczono krótki opis zawartości poszczególnych rozdziałów.

W rozdziale zatytułowanym „*Metodyka badań*” opisano materiały wykorzystane w rozprawie do przeprowadzenia testów wytrzymałościowych. Zaproponowano następujące materiały, tj. żywice epoksydowe Epidian 5 oraz Epidian 53 z utwardzaczami Z1, oraz PAC. Przygotowano cztery materiały, jeden z Epidian 53 (utwardzony Z1 – w stosunku 100/10) oraz trzy z Epidian 5 (utwardzony Z1 – 100/10 i PAC – 100/60 i 100/100). Z powyższych materiałów wytworzono próbki belkowe, wiosełkowe (po dziesięć zestawów), próbki zwarte (nie podano liczby zestawów) oraz połączenia klejone z materiałów M1 i M3 – próbki DCB (Double Cantilever Beam).

W dalszej części rozdziału zamieszczono opisy poszczególnych badań wytrzymałościowych, tj. statyczne rozciąganie zgodnie z ISO 527-1; trójpunktowe zginanie i test udarności Charpiey’ego, Test Compact Tension (TC), test DCB, metodę emisji akustycznej zastosowaną do dwóch ostatnich badań (CT i DCB) oraz obserwacje mikroskopowe badanych próbek.

W ostatnim rozdziale zamieszczono wyniki badań wytrzymałościowych, analizy akustycznej oraz zdjęć mikroskopowych przełomów próbek. Na podstawie otrzymanych wyników Doktorant wykonał rozszerzoną analizę porównawczą badanych materiałów. Koncepcja opisu wyników badań wytrzymałościowych bazuje na porównaniu między sobą poszczególnych materiałów i przedstawianie tych porównań w postaci wykresów i tabel. Dość szeroko i wnikliwie została przedstawiona analiza akustyczna wykonana podczas testów CT i DCB. Rozdział kończy się analizą fraktograficzną przełomów próbek z testów CT.

Kolejną część pracy stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników, a także opis dalszych badań planowanych przez Autora.

Pracę doktorską kończy wykaz literatury, która w całości została zacytowana w jej treści, spis rysunków i tabel.

2. Ocena pracy

Podjęcie tej tematyki można tłumaczyć faktem, że proces inicjacji pęknięcia i propagacji na przykład w kompozytach warstwowych najczęściej ma miejsce w osnowie i prowadzi do osłabienia jej połączenia z włóknami czy matą, tzw. wzmocnieniami. Dlatego podjęty w rozprawie doktorskiej temat badawczy jest interesujący i ważny z naukowego i inżynierskiego punktu widzenia.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Skoczylasa otrzymano wyniki, które mogą wspomóc proces projektowania nowych materiałów kompozytowych oraz połączeń klejowych na bazie żywic epoksydowych.

Do głównych zalet przedstawionej do recenzji pracy zaliczam:

- 1) Wykazanie możliwości bezpośredniego zastosowania testów wytrzymałościowych przedstawionych w pracy do badania utwardzonych żywic epoksydowych stosowanych jako osnowy kompozytów lub do połączeń klejowych.
- 2) Zastosowanie badań emisji akustycznej jako wspomagającej badania wytrzymałościowe i pozwalającej wyodrębnić poszczególne procesy zachodzące wewnątrz próbki podczas testów.
- 3) Przeprowadzenie dogłębnej analizy parametrów fal sprężystych dla badanych próbek oraz uwypuklenie zależności liczby zdarzeń i zliczeń od wybranych właściwości i struktury badanych materiałów.
- 4) Opublikowanie głównych rezultatów rozprawy doktorskiej w postaci artykułów w renomowanym czasopiśmie odpowiadającym dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*, tj. 2 prace w *Composite Structures* (IF 2021 = 6.603).

3. Uwagi i pytania

Po dogłębnej analizie manuskryptu pojawiły się następujące spostrzeżenia:

- 1) W rozprawie doktorskiej brakuje jasnego umieszczenia prezentowanego pomysłu badawczego w kontekście badań dotychczas przeprowadzonych przez innych naukowców. Najbliżej tego „życzenia recenzenta” jest zamieszczona w pracy analiza dotycząca metody i badań emisji akustycznej.
- 2) Zgodnie z zaleceniami producenta, stosunek wagowy utwardzacza Z1 stosowanego z Epidian 5 wynosi 100/12. W rozprawie doktorskiej stosunek ten wynosił 100/10 – materiał oznaczony nr 2 (M2). Czy mogło to mieć wpływ na uzyskane dla materiału M2 wyniki? Zdaniem recenzenta zamiarem Doktoranta było utrzymanie takiego samego stosunku utwardzacza do obu badanych żywic Epidian 5 i 53. W Epidian 53 ten zalecany stosunek wynosi właśnie 100/10.
- 3) Dlaczego w rozprawie doktorskiej jako utwardzacz żywicy Epidian 53 zastosowano tylko Z1?
- 4) Zgodnie z zaleceniami producenta utwardzacza PAC, proporcje stosowalności w żywicach określono następująco:
Epidian 5 => PAC 100/ 60 – 100;
Epidian 53 => PAC 100/ 50 – 80.
Czy materiały Epidian 5 i 53 stworzone w proporcjach z PAC 100/60 i 100/80, kosztem rezygnacji z Z1 mogłyby dać bardziej reprezentatywne wyniki eksperymentów?
- 5) Czy badania materiałów matrycy w kontekście stosowania do budowy kompozytów wzmacnianych wybranym materiałem (proszkami, włóknami, tkaninami, matami) powinny również być analizowane z różnymi innymi modyfikatorami? Oprócz utwardzaczy (Z1, PAC), na przykład stosuje się modyfikatory poprawiające odporność na zmiany temperatury materiału, obniżających palność, itp. Takie modyfikacje są powszechnie stosowane przy produkcji kompozytów.
- 6) W jaki sposób zostały zamocowanie próbki wioselkowe w maszynie wytrzymałościowej podczas próby rozciągania? Czy sposób mocowania mógł mieć wpływ na uzyskane wyniki badań? – szczególnie dla materiału M2.
- 7) Brakuje szerszego komentarza czy interpretacji wykresów przedstawionych na rys. 41. Większość informacji została zawarta już na rys. 38 – 40 i w tab. 2. W jakim stopniu wartościową informacją są w tym przypadku „krzywe dopasowania”?
- 8) Czy na otrzymanywane wyniki z badań doświadczalnych miały wpływ dość nieprecyzyjnie wykonane karby w próbkach, np. rys. 14 i 23?

- 9) W pracy nie została przedstawiona analiza składu chemicznego analizowanych materiałów, chociaż na taką analizę doktorant się powołuje.
- 10) W celu weryfikacji wniosków z pomiarów emisji akustycznej podczas testu CT, do testów DCB wybrano materiał M1 i M3. Czym się kierowano w tym wyborze? Dlaczego nie analizowano wszystkich materiałów?
- 11) Jak i z jaką wartością wyznaczono/przyjęto poziom dyskryminacji w przeprowadzonych badaniach za pomocą emisji akustycznej? Czy był on różny dla poszczególnych materiałów i badań CT oraz DCB?
- 12) W pracy brakuje przynajmniej jednej prezentacji (na „surowych danych”) określenia takich parametrów jak zdarzenie czy zdarzenia oraz liczba zliczeń w zdarzeniu.
- 13) Z analizy wyników emisji akustycznej przeprowadzonych podczas testów CT i DBC wynika, że częstotliwość EA maleje wraz ze wzrostem podatności materiału – jest to ważna informacja. Monitorowanie uszkodzeń metodą EA dla tych konkretnych materiałów silnie zależy od ich wewnętrznej struktury. Czy istnieją charakterystyczne częstotliwości, które bezwzględnie mogą wskazywać na rodzaj uszkodzenia niezależnie od analizowanych w pracy materiałów, lub też tych materiałów już w zastosowaniu w kompozycie czy połączeniu klejowym?
- 14) Praca została bardzo starannie napisana i zredagowana, nieliczne drobne uwagi to:
 - użyto sformułowań moduł rozciągania czy materiał elastyczny, lepiej byłoby moduł sprężystości wzdłużnej oraz sprężysty;
 - zbędny jest rys. 42, ponieważ na rys. 43 zamieszczono te same dane;
 - rys. 57 powinien zostać przedstawiony analogicznie do rysunków 55 i 56 (zamiana osi czas-częstotliwość).

Powyższe uwagi i pytania mają charakter informacyjny oraz dyskusyjny i nie powinny wywrzeć znaczącego wpływu na ogólną bardzo dobrą ocenę przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej.

4. Podsumowanie

Recenzowana praca doktorska ma głównie charakter badawczy. Doktorant zaprezentował możliwości zastosowania standardowych metod badawczych oraz emisji akustycznej do analizy wytrzymałościowej utwardzonych żywic epoksydowych. Praca dowodzi znacznej wiedzy doktoranta w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*. Zarówno przedstawiona praca, jak i publikacje Doktoranta w renomowanych czasopismach naukowych, udowadniają jego umiejętność samodzielnego prowadzenia dalszej pracy naukowej.

Uważam, że rozprawa doktorska pt. *Odporność na pękanie połączeń klejowych materiałów kompozytowych* autorstwa Pana mgr. inż. Jakuba Skoczylasa **spełnia wymagania** stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2021 poz. 478 z późn. zm.) i **może stanowić podstawę o ubieganie się przez Niego o stopień naukowy doktora nauk inżynieryjno-technicznych** w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*. Wnoszę o dopuszczenie jej do obrony publicznej.

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping strokes that form a unique, cursive-like mark.