



Dr hab. inż. Elżbieta Piesowicz, prof. ZUT  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
i Mechatroniki  
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu  
Technologicznego w Szczecinie

Szczecin 2023-02-10

## OCENA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jagody Nowak-Grzebyta  
pt.

### **Nieniszczące metody oceny połączeń hybrydowych kompozytów polimerowych**

wykonanej pod kierunkiem pani promotora prof. dr hab. inż. Ewy Stachowskiej oraz promotora pomocniczego pani dr inż. Moniki Knitter w ramach uczestnictwa w projekcie: Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie „NanoBioTech”, realizowanym wspólnie przez trzy jednostki: Politechnikę Poznańską, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Instytut Chemii Bioorganicznej Polskiej Akademii Nauk (Umowa o dofinansowanie nr POWR.03.02.00-00-I011/16).

Recenzja wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria materiałowa Politechniki Poznańskiej z dnia 13 stycznia 2023 r.

Elementy hybrydowe typu metal–tworzywo polimerowe stanowią nowe i bardzo interesujące rozwiązanie konstrukcji nośnych. Pierwsze informacje o tego typu rozwiązaniach pochodzą z początku lat 90-tych ubiegłego wieku. Pozwalają one łączyć w jednym elemencie konstrukcyjnym korzystne właściwości metali (np. duża sztywność oraz dużą wytrzymałość mechaniczną) z zaletami tworzyw polimerowych (np. bardzo dobre możliwości kształtowania, mały ciężar właściwy oraz odporność na korozję i naprężenia ściskające).

Podczas projektowania nowej grupy elementów hybrydowych, najważniejsza jest analiza możliwych do uzyskania właściwości tych elementów. Zintegrowanie, zespolenie obu

materiałów, aby osiągnąć założony cel konstrukcyjny, zachodzi dzięki połączeniom adhezyjnym oraz/lub połączeniom mechanicznym tworzywa polimerowego z metalem.

Części metalowe w elementach hybrydowych (zwykle z blachy stalowej), mają za zadanie przenieść duże obciążenia mechaniczne jak również „odpowiedzieć” na inne, niekorzystne oddziaływania warunków pracy, w których się znajdują. Praca takich elementów jest bardzo często uważnie analizowana, chociażby ze względu na większe prawdopodobieństwo wystąpienia wad wyrobu, spowodowane przykładowo defektem połączenia nie widocznego podczas oceny kontroli jakości. Wykrycie takich wad jest bardzo trudne i sprowadza się najczęściej do demontażu elementu i jego zniszczenia w celu sprawdzenia przyczyny awarii. Obecnie coraz większym zainteresowaniem cieszą się metody pozwalające na wyeliminowanie wadliwych wyrobów z użytkowania bez konieczności niszczenia kształtu. Są to tzw. metody nieniszczące badań. W literaturze możemy spotkać wiele przykładów dotyczących wykorzystania tych metod w procesach produkcji materiałów kompozytowych i nie tylko. W ostatnim czasie prace związane z badaniami materiałów z wykorzystaniem metod nieniszczących stały się coraz bardziej zaawansowane o czym świadczą prężnie działające grupy badawcze w Polsce, m.in. na Politechnice Krakowskiej, Politechnice Warszawskiej, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego i Politechniki Poznańskiej, czego dowodem są cytowania Doktorantki przywołane w części literaturowej dysertacji. Poziom zaawansowania tych badań stale rośnie a potrzeby rynku materiałów konstrukcyjnych ukierunkowują prace naukowców na coraz wyższy poziom badań materiałów i ocenę ich użyteczności.

Naprzeciw tym trendom wyszła Pani mgr inż. Jagoda Nowak-Grzebyta, realizując swoją pracę doktorską pt. „Nieniszczące metody oceny połączeń hybrydowych kompozytów polimerowych”. Jako cel pracy Doktorantka przyjęła opracowanie i doświadczalne zweryfikowanie metody badania połączeń polimer-metal w zdefiniowanych obiektach testowych z materiałów kompozytowych z użyciem cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej. Obecnie znanymi i najczęściej stosowanymi metodami badań nieniszczących są pomiary ultradźwiękowe, tj. wibrometria ultradźwiękowa, radiografia, skaningowa, laserowa wibrometria dopplerowska czy szerografia. Niektóre z tych metod, jak słusznie zauważyła Doktorantka niejednokrotnie są czasochłonne, mają ograniczoną zdolność rozdzielczą i nie obrazują obiektu w czasie rzeczywistym.

Celem utylitarnym pracy dla Doktorantki była ocena możliwości wykrywania defektów wewnętrznych i wpływu tych defektów na propagację drgań w próbkach z połączeniem polimer-metal, co przyczynić miało się do pogłębienia stanu wiedzy w zakresie badań

nieniszczących. Cel ten Pani Nowak-Grzebyta zrealizowała dzięki bardzo szerokiemu wachlarzowi zadań badawczych, które opisała w pierwszym rozdziale swojej dysertacji.

Praca napisana jest w języku polskim a układ treści jest typowy jak dla większości dotychczas spotykanych prac doktorskich. Układ dysertacji zawiera opracowanie wprowadzające czytelnika w tematykę pracy (rozdziały od 2-6). Na pozostałych stronach możemy zapoznać się z celem pracy, opisem metod przygotowania próbek oraz stanowiska badawczego, metodyką badawczą oraz wynikami badań i ich dyskusją oraz bardzo obszerną bibliografią. Całość podsumowana została szczegółowymi wnioskami.

### Ocena merytoryczna pracy

W literaturowej części rozprawy Doktorantka w szerokim zakresie opisała zagadnienia, które stanowią zasadniczą podbudowę teoretyczną do przeprowadzenia prac eksperymentalnych oraz interpretacji wyników badań własnych. Poprzez dogłębne studia literaturowe (136 pozycji literaturowych) wykazała, że zagadnienie związane z tematyką badań jakim poświęcona została praca jest powszechnie opisywane. Jednak, ze względu na ciągle rosnące zapotrzebowanie na materiały konstrukcyjne oraz stawiane im wymagania do coraz to nowocześniejszych i odpowiedzialnych zastosowań, istniejący opis stanu wiedzy, w odniesieniu do założeń pracy wykazuje pewną lukę informacyjną, dzięki czemu możliwe było udowodnienie, że użycie cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej pozwala na skuteczniejsze wykrywanie niwidocznych defektów złączy polimer-metal. Pozwoliła na to m.in. ulepszona konstrukcja urządzenia badawczego, opracowana przez Doktorantkę, umożliwiająca jednoczesną obserwację obu stron złącza polimer-metal, w trakcie rejestracji drań w czasie rzeczywistym, w przeciwieństwie do standardowych badań wibrometrycznych, gdzie obserwacji poddaje się tylko jedną stronę próbki.

W analizowanej pracy Doktorantka wytypowała do wytworzenia próbek połączeń polimerów z metalami jako część metalową – dobrze przenoszącą drgania – stal DC04 oraz aluminium AW-6061 i AW-5754. Część polimerową stanowił poliamid 6 (PA6), poliamid 6 z 10-procentowym dodatkiem miki (PA6/10M) lub talku (PA6/10T) (Tarnamid T-27, Grupa Azoty; Mica 30, Talc Extra 10, Aurum Chemicals, Katowice, Polska), polilaktyd (PLA, Ingeo Biopolymer 6400D), polifluorek winylidenu (PVDF, Arkema Kynar Flex 3312 C), poliwęglan (PC, Lotte Advanced Materials Infino S.C.-1220UR) lub mieszanina polietylenu i poliamidu (LDPE/PA6) z różnym udziałem kompatybilizatora PE-g-MAH. Oba rodzaje materiałów łączono poprzez złącze adhezyjne uzyskane w procesie wtryskiwania lub

prasowanie na gorąco przy użyciu prasy hydraulicznej. Pani Nowak-Grzebyta poddała badaniom także połączenia z warstwą pośrednią w postaci kleju epoksydowego i połączenie adhezyjno-mechaniczne uzyskane poprzez nawiercenie otworów w stalowej płycie wypełnianych tworzywem polimerowym w procesie wtryskiwania. Na potrzeby badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej, Doktorantka zmodyfikowała również stanowisko pomiarowe umożliwiające jednoczesną obserwację obu stron złącza (polimerowej i metalowej) w trakcie rejestracji drgań w czasie rzeczywistym. Pozwoliło to zaobserwować istotne różnice w uzyskanych rozkładach drgań mierzonych z nanometryczną osiową zdolnością rozdzielczą dla połączeń bez i z defektem (defekty były wcześniej ściśle sprecyzowane przez Doktorantkę). Jak zauważyła, wady połączeń uwidaczniały się poprzez lokalną zmianę amplitudy i fazy drgań w miejscu występowania rozwarstwienia/wady, co umożliwiało wykrycie i lokalizację ukrytych defektów złącza. Wartość amplitudy wzbudzonych drgań, nieprzekraczająca 40 nm, gwarantowała nieniszczący charakter prowadzonych badań.

Wszystkie badania jakie zostały przeprowadzone przez Autorkę pracy wykorzystywały próbki o kształcie zbliżonym do kształtek stosowanych w typowych badaniach niszczących np. wytrzymałościowych. Taki kształt próbki umożliwia pojawienie się w niej nanodrgań, które rozprzestrzeniają się w postaci fal Lamba. Doktorantka świadoma występowania tego zjawiska, określiła ich prędkość w części metalowej i polimerowej badanych próbek w zakresie niskich częstotliwości ultradźwiękowych. W przypadku częstotliwości wzbudzenia do 30 kHz, zaobserwowała propagacje wyłącznie antysymetrycznych fal Lamba zerowego rzędu A0. Zbadała przy tym również właściwości transmisyjne połączeń dla niskich częstotliwości wzbudzenia pod kątem: zakresu częstotliwości, dla którego możliwa była obserwacja regularnych fal Lamba, wartości amplitud tych fal oraz prędkości ich propagacji w zależności od częstotliwości wzbudzenia. Jak wykazały wyniki badań, właściwości te zmieniają się w przypadku wystąpienia defektu połączenia. Doktorantka zauważyła, że nawet jeśli defektu nie można było zlokalizować za pomocą cyfrowej wibrometrii holograficznej, to nadal na podstawie różnic krzywych dyspersyjnych możliwe było stwierdzenie czy połączenie polimer-metal było uszkodzone czy nie. Udało się to Jej potwierdzić dzięki innej, niezależnej metodzie, jaką jest szerografia. Pani Nowak -Grzebyta udowodniła tym, że użycie cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej pozwala na skuteczne wykrywanie ukrytych defektów złączy polimer-metal. Na podstawie badań jakie przeprowadziła i uzyskanych wniosków, potwierdziła również informacje o podatności próbek z połączeniem polimer-metal na wymuszenie drgań w danym zakresie częstotliwości wzbudzenia. Nieniszczący

zawierających defekt połączenia, prędkości i amplitudy drgań fal Lamba dla obu stron próbek były wyraźnie większe niż dla złączy bez defektu; jak można wyjaśnić to zjawisko, jaki wpływ ma na to struktura ośrodka w którym fala Lamba się rozchodzi?

- czy modyfikacja stanowiska pomiarowego i opracowane na cele pracy programy komputerowe pozwolą w przyszłości na równie szczegółową obserwację złączy o wymiarach innych niż 20 x 20 mm?

- czy metoda cyfrowej wibrometrii holograficznej może mieć wykorzystanie jako metoda kontrolna w pracy ciągłej konstrukcji poddawanych działaniom wibracyjnym pod wpływem czynników środowiska pracy?

**Podsumowując, mogę stwierdzić, że praca Pani Jagody Nowak-Grzebyta została wykonana i opracowana na wysokim poziomie. Wg mojego uznania praca zasługuje na wyróżnienie o co wnioskuję do Wysokiej Rady Dyscypliny.** Potwierdzeniem tego jest fakt, że Doktorantka dla zrealizowania celu pracy zmodernizowała komercyjne stanowisko pomiarowe z cyfrowym laserowym wibrometrem holograficznym, co pozwala na szybkie i nieskomplikowane badań próbek z różnymi typami złącza, pobudzanych do drgań w szerokim zakresie niskich częstotliwości. Przeprowadzone wielokrotnie pomiary na tych samych próbkach były powtarzalne i można było stwierdzić, że procesy badawcze nie doprowadziły do ich uszkodzenia, co potwierdziło nieniszczący charakter prowadzonych badań. Opracowane na potrzeby badań programy komputerowe pozwoliły na wypracowanie metody wykrywania defektu złącza i oceny charakteru drgań próbki. Ponadto Doktorantka przeprowadziła analizy propagacji fal Lamba w badanych złączach, co dostarczyło dodatkowych informacji nt. połączeń polimerowo – metalowych.

Skuteczność metody wibrometrycznej pani Nowak-Grzebyta potwierdziła, korzystając również z innej metody optycznej – szerografii, która pozwoliła na wykrycie wad trudnych do zlokalizowania za pomocą metody cyfrowej wibrometrii holograficznej.

Wszystkie przeprowadzone przez Doktorantkę badania pozwoliły stwierdzić, że cyfrowa wibrometria holograficzna jest szybką i nieniszczącą metodą wykrywania defektów w połączeniach polimer-metal, która będzie przydatna w badaniach laboratoryjnych prowadzonych w celu opracowania różnych rodzajów złączy polimer-metal. Ponadto, wykorzystanie metody DHV do wykrywania fal Lamba jest rozszerzeniem testów złączy, które można również będzie przeprowadzać bezpośrednio w kontroli jakości produkcji wyrobów. Uzyskane informacje stanowią interesujące pogłębienie wiedzy w zakresie inżynierii materiałowej.

charakter metody wykorzystanej w pracy, umożliwia ponadto poddanie tych samych próbek kolejnym badaniom. Pomiary wibrometryczne są krótkie, a podstawowe wyniki uzyskuje się w czasie rzeczywistym, co jest ważnym czynnikiem przy rutynowym testowaniu komponentów i ewentualnym zastosowaniu tej metody w kontroli produkcji.

Najważniejsze konkluzje jakie przedstawione zostały w dysertacji to:

1. Holograficzna wibrometria laserowa umożliwiła wykrycie i zlokalizowanie istniejących wad połączenia wszystkich typów złączy polimer-metal: adhezyjnego, adhezyjnego i mechanicznego, adhezyjnego z warstwą pośrednią, adhezyjnego bez warstwy pośredniej, adhezyjnego wytworzonego za pomocą prasowania;
2. Obecność wady połączenia w przypadku wszystkich złączy polimer-metal zmniejszała zakres częstotliwości wzbudzenia umożliwiającego obserwację fal Lamba;
3. Metoda szerograficzna umożliwiała określenie środka defektu złącza polimer-metal po poddaniu próbki niewielkiemu obciążeniu termicznemu.
4. Zmodyfikowane stanowisko pomiarowe z cyfrowym laserowym wibrometrem holograficznym oraz opracowany na potrzeby pracy program komputerowy pozwala na szybkie i powtarzalne przeprowadzenie badań próbek z różnymi typami złącza, pobudzanych do drgań w szerokim zakresie niskich częstotliwości.

Praca Pani Jagody Nowak-Grzebyta przedstawiona do oceny zrealizowana jest na wysokim poziomie naukowym. W trakcie lektury trudno doszukać się niedociągnięć, czy też błędów, nawet edycyjnych. Strona graficzna jest bardzo przejrzysta, estetyczna i łatwa w interpretacji dla czytelnika.

Chciałabym jednak w tym miejscu dopytać Doktorantkę o to:

- czy były przeprowadzone próby badania kąta zwilżania dla materiałów wybranych do wytworzenia próbek połączeń, czy uważa Pani, że takie badania są zasadne w tym przypadku,
- od czego zależał dobór wartości częstotliwości wzbudzenia dla poszczególnych rodzajów połączeń?
- na podstawie wyników przedstawionych na rys. 9.23, 9.24..... oraz 9.33 stwierdzono, że nie zaobserwowano znaczących różnic w prędkości i amplitudzie fal Lamba dla części metalowej i polimerowej w próbce PC\_Al bez defektu i z defektem, a dla pozostałych próbek,

Pani Jagoda Nowak-Grzebyta ma również znaczący dorobek naukowy, na który powoływała się w dysertacji (poz.115, 119,132-134) w tym trzy w czasopismach z bazy JCR oraz 3 inne współautorskie publikacje nie związane z dysertacją. Fakt ten świadczy o tym, że jest Ona doświadczonym badaczem, potrafi odpowiednio dobrać zestaw technik badawczych. Pozwoliło to na wytworzenie odpowiednich próbek złączy kompozytowych oraz trafną i dokładną ocenę ich właściwości, dzięki opracowanej metodzie nieniszczącej. Prace Doktorantki jak i Zespołu, w którym pracuje, mają istotne znaczenie dla pogłębienia wiedzy w obszarze inżynierii materiałowej. Autorka rozprawy wykazała się szeroką wiedzą specjalistyczną w tym obszarze, co potwierdziła umiejętnością poprawnego sformułowania celu i prowadzenia badań naukowych, opracowania i prezentacji wyników badań doświadczalnych oraz wyciągania właściwych wniosków z przeprowadzonych badań, potwierdzonych doniesieniami literaturowymi.

Po zapoznaniu się z przedstawionymi do oceny materiałami mogę stwierdzić, że rozprawa spełnia z nawiązką wymogi stawiane pracom doktorskim przez „Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym” i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Jagody Nowak-Grzebyta do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Elżbieta Piesowicz, prof. ZUT

