Prof. dr hab. Dorota Kocańda
Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechaniczny
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Warszawa, 24.06.2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pani mgr inż. Katarzyny PANASIUK pt.:

"Analiza właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych z recyklatem poliestrowo-szklanym"

promotor rozprawy: dr hab. inż. Lesław Kyzioł , prof. UMG

promotor pomocniczy: dr inż. Michał Barcikowski z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej

1. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest ocena rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Panasiuk pt.: "Analiza właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych z recyklatem poliestrowo - szklanym", opracowana zgodnie z podstawą prawną opublikowaną przez MNiSW w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora wszczętych przed 30 kwietnia 2019 r. to jest:

1. Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami), zwanej dalej *Ustawą*,
2. Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 stycznia 2018 r., poz. 261 w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. z 2018 poz. 1586) zwanego dalej *Rozporządzeniem*.

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowałam na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni - dr hab. inż. Andrzeja Miszczaka, prof. UMG z dnia 16.05. 2019 r. (dokumenty wraz z rozprawą doktorską wpłynęły do WAT 21.05. 2019 r.).

Rozprawa spełnia wymogi określone w art. 13 ust. 2 cytowanej Ustawy, tj. ma postać maszynopisu książki. Zawiera streszczenie rozprawy w j. polskim i angielskim zgodnie z wymaganiami zawartymi w art. 13 ust. 6 cyt. Ustawy.
Zakres rozprawy mieści się w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.
Opracowana przeze mnie recenzja zawiera szczegółowo uzasadnioną ocenę rozprawy pod kątem spełnienia wymagań zawartych w art. 13 ust. 1 cytowanej Ustawy , to jest :

- oryginalności rozwiązania problemu naukowego przez Doktorantkę,
- umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę,
- ogólnej wiedzy teoretycznej Doktorantki w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

2. Aktualność przedmiotu rozprawy

We współczesnym świecie od kilkudziesięciu lat narasta problem nadprodukcji, składowania i utylizacji trudno degradowanych tworzyw sztucznych, które stanowią zagrożenie dla całego ekosystemu Ziemi. Obecnie, zanieczyszczenie tworzywami sztucznymi objęło lądy i akweny morskie i oceaniczne. Setki lat trwający naturalny proces degradacji tych materiałów oraz ich toksyczność stanowi obecnie realne zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt. Z tego względu, każde działanie człowieka zmierzające do ograniczenia produkcji tworzyw sztucznych, opracowania metod utylizacji tych odpadów, jak również opracowanie metod wtórnego zagospodarowania tworzyw sztucznych w formie nowych materiałów konstrukcyjnych (tzw. recykling) jest bardzo pożądane.

W te proekologiczne działania wpisuje się praca doktorska Pani mgr inż. Katarzyny Panasiuk, która dotyczy recyklingu odpadów materiałów kompozytowych poliestrowo-szklanych. Te materiały kompozytowe są materiałem konstrukcyjnym dla ważnych elementów konstrukcyjnych jednostek pływających, statków powietrznych, pojazdów mechanicznych, w budownictwie lądowym kompozyty te są stosowane na elementy mostów jako pręty zbrojeniowe.

Biorąc pod uwagę duże znaczenie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, jakimi są kompozyty, o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i cechach fizyczno-chemicznych znacznie przewyższających materiały tradycyjne (metale i ich stopy), działania Doktorantki ukierunkowane na opracowanie technologii wtórnego wykorzystania odpadów poliestrowo-szklanych i wytworzenia nowego, pełnowartościowego materiału konstruk-

cyjnego w postaci warstwowego kompozytu z procentowym udziałem rozdrobnionego recyklatu, są działaniami słusznymi.

Zatem, podjęta tematyka badawcza w rozprawie doktorskiej pani mgr inż. Katarzyny Panasiuk jest ważna , aktualna i o cechach aplikacyjnych.

3. Struktura recenzowanej rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska składa się z dwóch głównych części: z **Części teoretycznej** (termin z oryginału rozprawy) i **Części badawczej.**

Część teoretyczna jest poprzedzona wykazem skrótów i symboli stosowanych w rozprawie doktorskiej oraz wprowadzeniem w tematykę rozprawy. Zawartość treści w **Części teoretycznej** została podzielona na dwa rozdziały.

Rozdział 1 jest zatytułowany **Ogólna charakterystyka kompozytów.** W piśmiennictwie naukowym dotyczącym kompozytów definiuje się je jako "materiał wytworzony w sposób sztuczny i świadomy, złożony z co najmniej dwóch faz oddzielonych wyraźnymi granicami międzyfazowymi, gdzie jedną z faz jest faza umacniająca. Własności kompozytu muszą być zależne od udziału poszczególnych faz i muszą być wyższe, inne, w stosunku do własności każdej z faz osobno lub zmieszanych razem". Przytoczone z literatury sformułowania wyjaśniają sens użytych określeń "materiał sztuczny i świadomie kształtowany" w taki sposób, aby spełniał oczekiwania inżynierów i wymagania przemysłu, czyli jego własności mechaniczne i użytkowe muszą być wyższe od własności materiałów podstawowych poszczególnych faz. W rozprawie rozdział 1 części teoretycznej jest przeglądem stanu wiedzy, opracowanym przez Doktorantkę, na temat budowy strukturalnej materiałów kompozytowych, ich podziału ze względu na materiał osnowy, zwanej fazą ciągłą lub matrycą oraz ze względu na geometrię przestrzenną i materiał drugiej fazy (umacniającej), zwanej zbrojeniem kompozytu. Każda z wymienionych faz strukturalnych pełni w kompozycie ważną rolę. Osnowa kompozytu nadaje kształt i wygląd. W kompozytach umacnianych włóknami osnowa w pewnym stopniu wpływa też na całkowitą wytrzymałość kompozytu. Z kolei, zbrojenie kompozytu ma istotny wpływ na poprawę właściwości mechanicznych, akustycznych i na cechy fizyczne kompozytu takie jak: gęstość, twardość, przewodnictwo elektryczne, rozszerzalność termiczną, odporność materiału na pękanie przy obciążeniu stałym i zmiennym w czasie oraz odporność kompozytu na korozję. W zależności od zastosowanego materiału osnowy kompozyty dzielą się ogólnie na kompozyty metalowe i niemetalowe. Z kolei, rodzaj i postać zbrojenia kompozytu determinuje podział kompozytów na kompozyty umacniane włóknami, umacniane cząstkami różnej wielkości i na kompozyty

strukturalne (laminaty). Rozszerzając wiedzę czytelnika rozprawy na temat znaczenia osnowy w materiałach kompozytowych Doktorantka zwróciła też uwagę na inne jeszcze komponenty osnowy, a mianowicie na fazy polimerowe czyli żywice, napełniacze ziarniste, włókna wzmacniające i modyfikatory żywic. Żywice pełnią ważną rolę w utrzymaniu wysokich wskaźników wytrzymałościowych na granicy włókien i osnowy, zapewniają równomierny rozkład obciążeń na włóknach, zapewniają odporność na uszkodzenie włókien, na działanie czynników chemicznych, podwyższonej temperatury pracy, zapewniają dobrą zwilżalność włókien na etapie ich preparacji i dobrego połączenia warstw kompozytowych w procesie utwardzania. Napełniacze ziarniste spełniają w kompozycie też wiele funkcji. Dzięki ich obecności możliwe jest stosowanie metod przetwarzania i wytłaczania profili konstrukcyjnych. Kolejnymi cechami kompozytów, obok wcześniej wymienionej ich niejednorodnej struktury, jest anizotropowość kompozytów, czyli zróżnicowanie właściwości mechanicznych i fizycznych w kierunku wzdłużnym i poprzecznym względem kierunku ułożenia włókien w fazie umacniającej kompozytu. Kolejna cecha kompozytów to lepko-sprężystość. Tą cechą charakteryzują się kompozyty o osnowie polimerowej. Lepko-sprężystość materiału zależy od przyłożonego naprężenia, temperatury i czasu oddziaływania wymienionych czynników.

Spośród materiałów kompozytowych dominujące znaczenie na rynku materiałowym mają kompozyty poliestrowe umacniane różnego rodzaju włóknami. Tym materiałom Doktorantka poświęciła w tej części rozprawy więcej uwagi porównując własności fizyczne i mechaniczne różnych typów włókien oraz omawiając wpływ średnicy włókna, temperatury i czasu składowania włókien szklanych w atmosferze suchej i wilgotnej na ich wytrzymałość na rozciąganie. Zostały też omówione właściwości korozyjne kompozytów poliestrowo-szklanych pod wpływem warunków atmosferycznych. Czynniki atmosferyczne takie jak: temperatura powietrza i wilgotność, światło słoneczne i wiatr wpływają na nieodwracalne zmiany zachodzące w strukturze materiału kompozytowego. Wpływają też ujemnie na jego właściwości fizyczne i mechaniczne. Jest to proces starzenia kompozytu.

Różnorodność materiału osnowy i geometrii zbrojenia kompozytu, rozszerzona o różnego rodzaju napełniacze osnowy polimerami termoutwardzalnymi i polimerami termo-plastycznymi, istotnie rozszerzają własności użytkowe kompozytów, w tym głównie ich właściwości mechaniczne, czyniąc kompozyty materiałami bardzo interesującymi z punktu widzenia możliwości ich zastosowania w różnego rodzaju konstrukcjach. W pracy podano przykłady zastosowania materiałów kompozytowych wzmacnianych włóknami w różnego rodzaju konstrukcjach.

W rozdziale 2. Doktorantka zajęła się **Problematyką odpadów polimerowych.**

Jak już wcześniej wspomniano w recenzji, niezrównoważone gospodarowanie odpadami z tworzyw sztucznych prowadzone przez dziesiątki lat, w tym kompozytami o osnowie polimerowej, jak również ograniczone możliwości recyklingu tych odpadów, przyczyniły się do zwiększonego i niekontrolowanego składowania odpadów na nielegalnych wysypiskach. Taka sytuacja doprowadziła do znacznego zanieczyszczenia środowiska naturalnego tworzywami sztucznymi i zwiększyła zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt uwalniającymi się toksycznymi związkami chemicznymi i rozpylonymi w powietrzu mikrocząstkami pochodzącymi z procesu degradacji odpadów pod wpływem światła słonecznego i temperatury. W tej części pracy Doktorantka opisuje możliwe sposoby przetwarzania odpadów tworzyw sztucznych, w tym odpadów poliestrowo-szklanych. Przetwarzanie odpadów określane jest w pracy jako odzysk. Zostały wprowadzone takie terminy, jak: **odzysk energetyczny** - w sensie pozyskiwania energii w procesie spalania odpadów, **recykling surowcowy** - czyli przetworzenie odpadów do postaci pierwotnej, **recykling materiałowy** - odzyskiwanie tworzyw z odpadów celem ich wtórnego przetworzenia i wytworzenia nowych materiałów i wyrobów, **recykling organiczny** - poprzez stosowanie obróbki tlenowej lub beztlenowej w warunkach kontrolowanych oraz **recykling chemiczny**, któremu poddawane są odpady tworzyw termoplastycznych.

Omawiając różne możliwe formy recyklingu odpadów Doktorantka wskazuje też na korzyści, jakie przynosi świadome gospodarowanie odpadami. Przede wszystkim są to korzyści ekologiczne wynikające z ukierunkowanego zarządzania odpadami tworzyw sztucznych, połączone z ograniczeniem ich toksyczności dla środowiska naturalnego, ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych, które występuje przy utylizacji odpadów. Korzyści finansowe wynikają też z odzysku energetycznego, obniżenia kosztów składowania i transportu odpadów, gdy zmniejszy się ilość odpadów przeznaczonych do utylizacji. Bardzo korzystny jest też odzysk materiałowy, gdyż osnowę kompozytów metalicznych stanowią w formie sproszkowanej często cenne metale (wolfram, kobalt, nikiel, żelazo).

Doktorantka przeprowadziła też szeroką dyskusję na temat świadomości proekologicznego postępowania współczesnych społeczeństw (stosowanie segregacji odpadów) i poziomu zaawansowania recyklingu materiałów kompozytowych w Polsce i w innych krajach europejskich. Wskazała na liczne przykłady funkcjonujących w kraju Zakładów Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, które stosują już technologie recyklingowe na skalę przemysłową, bądź inne zakłady, które produkują urządzenia do utylizacji lub recyklingu odpadów.

Tematyka gospodarowania odpadami polimerowymi została przedstawiona przez Doktorantkę w sposób ciekawy i obszerny niemal na 20 stronach rozprawy. Na podstawie dokonanego przeglądu literatury Doktorantka wskazała też na możliwości wykorzystania odpadów polimerowych w produkcji przemysłowej (ceramika budowlana, beton lekki, ulepszony asfalt, beton asfaltowy) i specjalistycznej (produkcja włókien szklanych z tłuczonego szkła, ultralekkiego granulatu o unikalnej geometrii porów ze spienionego proszku szklanego pozyskiwanego ze szkła odpadowego jako wypełniacz w tynkach, produkcja butelek, pojemników, opakowań, odzieży , zabawek itp. z plastiku poddanego recyklingowi).

Opracowanie metody recyklingu odpadów polimerowych w celu wytworzenia nowego, pełnowartościowego materiału konstrukcyjnego jest również zamierzeniem Doktorantki i to zamierzenie będzie możliwe do zrealizowania w wyniku przeprowadzenia zaplanowanego lub rozszerzonego programu badań.

Zawartość treści w części teoretycznej obejmuje 36 stron.

W części badawczej rozprawy w rozdziale 1. sformułowano **Cel i zakres pracy** (str.51)

Według podania Doktorantki - **celem głównym badań doświadczalnych** było **określenie właściwości mechanicznych wytwarzanego nowego kompozytu warstwowego z recyklatem poliestrowo-szklanym** m.in. takich, jak: wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, twardość, odporność kompozytu na obciążenia udarowe, na korozję a także opracowanie technologii wytwarzania, składowania i recyklingu materiałowego.

Tak sformułowany główny cel badań doświadczalnych będzie wymagał realizacji sześciu celów szczegółowych (str. 51):

1/ ocenę wstępną jakości odpadu poliestrowo-szklanego pochodzącego z głównych elementów konstrukcyjnych np. jednostek pływających, pojazdów mechanicznych, części maszyn itp.,

2/ opracowanie technologii recyklingu odpadu poliestrowo-szklanego,

3/ ocenę wpływu zawartości procentowej granulatu poliestrowo-szklanego i stopnia jego rozdrobnienia na właściwości mechaniczne nowego kompozytu,

4/ zweryfikowanie możliwości wykorzystania tradycyjnych technologii produkcji tworzyw sztucznych w procesie wytwarzania kompozytu z granulatem poliestrowo-szklanym,

5/ wyznaczenie parametrów mechanicznych na podstawie przeprowadzonych badań, w szczególności badań wytrzymałościowych, korozyjnych i strukturalnych,

6/ opracowanie wniosków z badań i propozycji dalszego doskonalenia procesu wytwarzania i użytkowania kompozytu z recyklatem poliestrowo-szklanym.

Następnie, Doktorantka sformułowała **hipotezę główną** następującej treści: kompozyt z recyklatem poliestrowo-szklanym ma właściwości mechaniczne pełnowartościowego produktu i może być materiałem konstrukcyjnym stosowanym na konstrukcje maszyn, urządzeń itp.

Aby uszczegółowić postawioną hipotezę główną Doktorantka przedstawiła w rozprawie **7 hipotez szczegółowych** na str. 52.

Dla **zrealizowania głównego celu pracy, czyli określenia właściwości mechanicznych wytwarzanego nowego kompozytu warstwowego z recyklatem poliestrowo-szklanym**, zaproponowano następujące **metody badawcze:**

1/ statyczną próbę rozciągania - wyznaczenie wytrzymałości materiału przy rozciąganiu, określenie modułu sprężystości podłużnej Younga i wydłużenia próbki,

2/ określenie granicy plastyczności badanych kompozytów metodą entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinaia,

3/ badania udarności - zbadanie odporności materiału kompozytowego na obciążenia dynamiczne,

4/ badanie kinetyki zniszczeń - oszacowanie energii odkształcenia materiału w zakresie sprężystym przy obciążeniu dynamicznym, a także analiza rozwoju zniszczeń w próbkach kompozytowych,

5/ trójpunktowe zginanie - określenie wytrzymałości kompozytu na zginanie,

6/ badanie twardości kompozytu,

7/ starzenie materiału kompozytowego - odporność kompozytu na środowisko korozyjne,

8/ badania mikroskopowe - powiązanie właściwości wytrzymałościowych materiału z jego strukturą.

4. Materiał badawczy

Przedmiotem badań był nowo wytworzony kompozyt warstwowy w Laboratorium Katedry Podstaw Techniki Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z recyklatem pochodzącym ze złomu poliestrowo-szklanego. Złom ten poddawano różnym wstępnym zabiegom mechanicznym na stanowisku do przetwarzania tworzyw kompozytowych, w celu uzyskania recyklatu o dwóch różnych średnicach cząstek: do 1.2 mm i do 3 mm. Recyklat posłużył jako wypełniacz dodawany do materiału osnowy kompozytu, którym była żywica konstrukcyjna Polimal 1094 AWTP-1, średnio-elastyczna, ortoftalowa. Zbrojenie kompozytu stanowiły kolejno układane warstwy maty szklanej o losowym kierunku ułożeniu włókien w

postaci szerokich pasów w formie prostokątnej o wymiarach 50x25x2 mm, przesycane płynną, żelującą żywicą i utwardzane utwardzaczami i przyspieszaczami, podawanymi w odpowiedniej ilości do żywicy. Ta metoda wytwarzania kompozytu warstwowego nosi nazwę laminowania ręcznego.

W tabelach 4.1 i 4.2 podano wartości parametrów wytrzymałościowych odpowiednio, maty szklanej wykorzystywanej w procesie wytwarzania warstwowego kompozytu poliestrowo-szklanego oraz żywicy poliestrowej Polimal 1094 AWTP. Uwagę zwraca wysoka wartość wytrzymałości maty szklanej na rozciąganie Rm wzdłuż włókien, która wynosi 2,9 GPa (stal ST3S Rm = 370-460 MPa, stal sprężynowa Rm rzędu 1.4 GPa), wartość modułu Younga - 73,5 GPa (porównywalny z modułem Younga dla czystego Al. i stopów Al, srebra, złota) i jej małe wydłużenie po rozerwaniu włókien wynoszące około 3.4%. Są to dane literaturowe. Wytrzymałość żywicy na rozerwanie wynosi 70 MPa.

W rozprawie zaznaczono, że wytwarzanie kompozytu metodą laminowania ręcznego łączyło się często z obecnością defektów w strukturze kompozytu, w postaci porów powietrza znajdujących się pomiędzy warstwami maty. Z tego powodu opracowano i zastosowano też drugą metodę wytwarzania kompozytu tzw. metodę worka próżniowego. W metodzie tej, poprzez zastosowanie podciśnienia, powietrze jest usuwane spomiędzy warstw i uzyskuje się w ten sposób lepsze przyleganie warstw sąsiednich w materiale kompozytowym.

Na podstawie przeprowadzonych szeregu badań eksperymentalnych opracowano procedury wytwarzania kompozytów poliestrowo-szklanych z różną zawartością recyklatu. Wstępne badania prowadzone w tym zakresie wykazały, że zawartość recyklatu w kompozycie warstwowym powinna zawierać się w przedziale od 10% do 30% całkowitej jego objętości. Większa zawartość recyklatu w objętości kompozytu prowadziła do problemów z odsączaniem nadmiaru żywicy.

Bazując na zdobytej wiedzy, do przeprowadzenia szerokiego programu badań doświadczalnych dla nowego materiału kompozytowego, przygotowano próbki kompozytowe wytwarzane wspomnianymi dwoma metodami bez recyklatu i z recyklatem, wycięte z płyt kompozytowych metodą strumienia wody, o geometrii wymaganej w danej metodzie badawczej. Geometrię i wymiary próbki "wiosełkowej" przeznaczonej do badań w statycznej próbie rozciągania przedstawiono na rys. 5.1.

Zawartość recyklatu w próbkach wynosiła 10%, 20% i 30%, w przypadku kompozytu wytwarzanego metodą laminowania ręcznego (skrót metody LR stosowany do oznaczenia próbek), a w kompozytach wytwarzanych metodą worka próżniowego (skrót metody WP) stanowiła 10% i 20% całkowitej zawartości kompozytu.

Wpływ wielkości cząstek recyklatu na właściwości mechaniczne kompozytu badano dla dwóch ich granulacji, to jest o średnicy cząstek do 1.2 mm i do 3 mm.

5. Metody badawcze warstwowego kompozytu poliestrowo-szklanego, wyniki i ich analiza

5.1. Statyczna próba rozciągania

Badania wytrzymałości mechanicznej próbek kompozytowych na statyczne rozciąganie przeprowadzano dla próbek wykonanych metodą LR i WP, bez recyklatu i z różną zawartością recyklatu poliestrowo-szklanego oraz dla dwóch średnic cząstek: 1.2 mm i 3 mm. Badania prowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy Zwick&Roell wyposażonej w ekstensometr firmy Epsilon model 3542 do pomiaru wydłużenia próbek aż do ich całkowitego pęknięcia. W rozprawie doktorskiej zamieszczono obrazy złomów pękniętych próbek po statycznej próbie rozciągania (rys. 5.6) oraz rysunki 5.7-5.13 z wykresami zależności $\varepsilon = f(\sigma)$ sporządzonymi na podstawie wyników badań odkształcenia próbek ε (%) w zależności od stosowanego naprężenia rozciągającego σ (MPa).

Z wykresów doświadczalnych wynika, że wielkość granulacji recyklatu w przedziale 1.2 - 3 mm zasadniczo nie wpływa na właściwości wytrzymałościowe kompozytu warstwowego, wytwarzanego dwoma metodami LR i WP. Jednakże, wielkość rozdrobnienia recyklatu powyżej 3 mm wpływa na obniżenie właściwości wytrzymałościowych próbek kompozytowych. Podobną tendencję spadkową w wytrzymałości badanych próbek obserwuje się, gdy wzrasta zawartość recyklatu w kompozycie z 10% do 20% , w przypadku próbek wytwarzanych metodą WP i gdy wzrasta zawartość recyklatu w kompozycie z 10% do 30%, w przypadku próbek wytwarzanych metodą LR. W tabelach 5.1 i 5.2 zamieszczono średnie wartości podstawowych wielkości wytrzymałościowych, wyznaczone na populacji pięciu próbek o różnej zawartości recyklatu i różnej jego granulacji, odpowiednio dla próbek typu LR i WP, to jest: moduł sprężystości podłużnej Younga E (MPa), wytrzymałości doraźnej Rm na rozciąganie (MPa) i wartość odkształcenia próbek ε (%). W tabeli 5.3 zestawiono wyniki ze statycznej próby rozciągania badanych próbek kompozytowych, pochodzące z tabel 5.1 i 5.2, dla próbek typu LR i WP, dla ułatwienia oceny wpływu metody wytwarzania kompozytu na jego parametry wytrzymałościowe.

Z przeprowadzonej całościowej analizy wyników otrzymanych z próby rozciągania próbek kompozytowych wynika, że **najwyższą wytrzymałość na rozciąganie i odkształcenie**

plastyczne wykazał kompozyt poliestrowo-szklany bez recyklatu, **wytworzony metodą worka próżniowego**.

Dwufazowa budowa strukturalna kompozytu poliestrowo-szklanego znajduje odbicie na wykresach zależności $\varepsilon = f(\sigma)$. Wykresy te są odmienne od przebiegów otrzymywanych dla metali. W przypadku materiałów kompozytowych wykresy te nie wykazują wyraźnej dynamiki wewnętrznej procesu deformacji materiału pod wpływem przyłożonej siły rozciągającej i z tego powodu trudno jest jednoznacznie określić podstawowe wielkości wytrzymałościowe materiału kompozytowego takie, jak: granica plastyczności materiału (wyraźna lub umowna), moduł sprężystości podłużnej Younga i wytrzymałość na rozciąganie. W rozprawie, Doktorantka zaproponowała oryginalne podejście statystyczne do określenia granicy plastyczności badanego kompozytu na podstawie zarejestrowanych przez maszynę wytrzymałościową danych pomiarowych, mianowicie metodę entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinaia. W uzasadnieniu możliwości zastosowania metody entropii metrycznej Doktorantka przytoczyła przyjęte założenia. Zakłada się, że przejście od przedziału liniowo-sprężystego zachowania się materiału do przedziału nieliniowego z trwałymi odkształceniami plastycznymi w materiale, oznacza zarówno zmianę jakościową w strukturze materiału, zachodzącą w punkcie krytycznym, jak również zmiany w dynamice danych pomiarowych rejestrowanych przez maszynę wytrzymałościową. W materiale konstrukcyjnym, zaabsorbowana energia jest przekształcana w energię potrzebną do pokonania tarcia wewnętrznego podczas przemieszczania się płaszczyzn krystalograficznych w systemach poślizgów i w energię do wytworzenia trwałego odkształcenia plastycznego w materiale. Z tymi zjawiskami związany jest chaos deterministyczny w danych pomiarowych i fluktuacje entropii. Doktorantka, powołuje się też w pracy doktorskiej na wcześniejsze badania prowadzone w zespole, które dowodzą, że entropia metryczna może być wykorzystana do wyznaczenia lub weryfikacji ważnych parametrów wytrzymałościowych dla materiałów konstrukcyjnych, w tym również dla materiałów anizotropowych. Minimalna wartość entropii w przedziale przejścia od stanu sprężystego do plastycznego determinuje punkt krytyczny, który rozdziela stany procesów fizycznych zachodzących w materiale konstrukcyjnym podczas jego obciążania. W rozprawie, Doktorantka przedstawiła przebiegi obliczonej entropii metrycznej naniesionej na wykresy odkształcenia w funkcji punktów pomiarowych, dla wszystkich wariantów badanych próbek kompozytowych (rys. 5.20-5.40), to jest: próbek ze zbrojeniem wykonanym dwiema metodami - LR i WP, próbek bez recyklatu i z różną jego zawartością w objętości kompozytu oraz z różnym stopniem granulacji recyklatu. W kolejnym etapie postępowania, punkt pomiarowy z najniższą wartością entropii i

odpowiadającym mu odkształceniem ε naniesiono na wykres (σ, ε) odczytując odpowiadające odkształceniu - naprężenie występujące w próbce, pod wpływem zewnętrznej siły rozciągającej. Wyznaczoną w ten sposób wartość naprężenia przypisano wartości granicy plastyczności materiału dla danej próbki kompozytowej. W zbiorczej tabeli 5.5. oraz na rys. 5.41 i 5.42, zestawiono wyniki: oszacowanej metodą entropii metrycznej K-S granicy plastyczności materiału kompozytowego $R_{e,K-S}$ i powiązanej z granicą plastyczności - wartością odkształcenia ε, dla obu metod zbrojenia kompozytu i wariantów budowy kompozytu z różną zawartością recyklatu i zróżnicowanym jego granulatem.

5.2. Badania udarności kompozytów

Badania udarności polimerowych kompozytów wielowarstwowych (laminatów) wykonuje się w celu zbadania ich wrażliwości na obciążenia dynamiczne - udarowe oraz oceny wpływu zawartości recyklatu na udarność kompozytu. Obciążenia udarowe mogą doprowadzić do powstania w materiale mikropęknięć w przedziale sprężystego zachowania się materiału i w końcu do całkowitego pęknięcia elementu konstrukcyjnego. Z tego powodu przeprowadzenie tych badań dla nowo-wytwarzanego warstwowego kompozytu poliestrowo-szklanego z recyklatem o objętości od 0-20% jest ważne, aby w szerokim zakresie poznać jego właściwości mechaniczne i kinetykę pękania próbek. Do badań udarnościowych przygotowano próbki prostokątne z karbem w kształcie litery U o głębokości 5 mm, o geometrii przedstawionej na rys. 5.44 , wycięte z płyt kompozytowych wytwarzanych dwoma metodami: LR i WP. Badania przeprowadzono w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów UMG na stanowisku wyposażonym w młot Charpiego firmy Zwick&Roel wraz z oprzyrządowaniem rejestrującym w bardzo małych przedziałach czasowych ugięcie próbek pod wpływem siły zginającej. Otrzymany doświadczalnie wykres siła-przemieszczenie pozwala oszacować energię potrzebną do zniszczenia próbki w obszarze odkształceń sprężystych i energię wymaganą do całkowitego jej zniszczenia. Na rys. 5.47 przedstawiono wyniki badań wpływu zawartości recyklatu i wielkości jego granulatu na udarność U próbek, wyrażoną w jednostkach [kJ/m^2], wykonanych metodą LR. Podobne badania przeprowadzono dla próbek wykonanych metodą WP i ich wyniki przedstawiono na rys. 5.49. Dla obu rodzajów próbek badania wykazały, że wzrost zawartości recyklatu w próbkach wpływa na znaczne obniżenie ich udarności, w stosunku do udarności próbek bez recyklatu, przy czym spadek ten jest większy w próbkach wykonanych metodą WP. W rozprawie podano liczbowe, procentowe spadki udarności dla obu rodzajów próbek w zależności od zawartości recyklatu w przedziałach od 0-10% i od 10-20%. Są to spadki udarności w wymienionych przedziałach

zawartości recyklatu odpowiednio: 30% i 63% dla próbek typu LR i wartości odpowiednio: 40% i 70% dla próbek typu WP. W celach poglądowych, podano też wyniki badań wpływu zawartości recyklatu i stopnia jego rozdrobnienia na wartość maksymalnej siły gnącej Fmax, doprowadzającej do dekohezji próbek, odpowiednio rys. 5.48 i 5.50. Z kolei, na rys. 5.51 i 5.52 w formie graficznej przedstawiono wyniki porównawcze wpływu zawartości procentowej recyklatu, odpowiednio o granulacji ≤ 1.2 mm i granulacji ≤ 3 mm, na udarność U próbek wykonanych metodami LR i WP. Z zamieszczonego w pracy podsumowania wyników otrzymanych w tej serii badań Doktorantka stwierdza ostatecznie, że materiały kompozytowe bez recyklatu wytworzone metodą WP wykazują wyższą udarność od materiałów wytworzonych metodą LR. Każdy dodatek recyklatu prowadzi do obniżenia udarności próbek w stosunku do kompozytu bez recyklatu. Wielkość cząstek recyklatu negatywnie wpływa na odprowadzenie kanałami nadmiaru żywicy. Podobne spostrzeżenia wynikają z badań wytrzymałości próbek kompozytowych przy statycznym rozciąganiu.

5.2.1. Badanie kinetyki zniszczeń kompozytu przy obciążeniu udarowym

Badania kinetyki zniszczenia próbek kompozytowych pod wpływem zginania udarowego, wytworzonych metodą laminowania ręcznego (LR) i metodą worka próżniowego (WP) o zawartości recyklatu od 0 do 20% i wielkości granulatu recyklatu ≤ 1.2 mm, zostały przeprowadzone na oprzyrządowanym młocie Charpy'ego, umożliwiającym zmianę siły zginającej i rejestrację ugięcia w czasie. Stanowisko badawcze dawało możliwość dokładnego wykreślenia przebiegu procesu niszczenia próbek pod wpływem zginania udarowego z rejestracją energii zaabsorbowanej przez materiał w przedziale sprężystym Ue i energii Up związanej z niszczeniem próbki. Na rys. 5.53-5.55 przedstawiono odpowiednio, wykresy zależności ugięcia f [mm] od siły zginającej F [N] próbki bez recyklatu i z recyklatem o zawartości 10 % i 20% i rozdrobnieniu ≤ 1.2 mm. Po przekroczeniu maksymalnej wartości siły zginającej Fmax zachodzi proces pękania badanych próbek. W tabeli 5.6 zamieszczono zbiorcze wyniki z badań poszczególnych próbek, podając wartość maksymalnej siły zginającej Fmax, wartość ugięcia f próbki, W - pracę [J] wymaganą do zniszczenia próbek i udarność próbek [kJ/m^2]. Wyniki badań dowodzą, że próbki kompozytowe LR bez recyklatu wykazywały największą udarność U wynoszącą 85 kJ/m^2. Dla kompozytu z recyklatem 10% siła Fmax była o 15% niższa w stosunku do tej siły dla materiału bez recyklatu. Próbki kompozytowe z 20% recyklatem i garnulacji 1.2 mm wykazały bardzo duże obniżenie

wartości siły zginającej rzędu 50% w stosunku do siły Fmax zarejestrowanej dla kompozytu bez recyklatu.

W rozprawie Doktorantka wyjaśniła, że obniżenie siły Fmax i wzrost ugięcia próbek z recyklatem wynika z tego powodu, że w kompozycie bez recyklatu jest większa liczba wytrzymałych i sztywnych włókien szklanych. Włókna te są materiałem sztywnym i kruchym, więc zmniejszenie ich liczby i zastąpienie recyklatem prowadzi do obniżenia siły Fmax i jednocześnie wzrostu ugięcia.

Podobnie, w tabeli 5.7 zamieszczono wyniki badań Fmax siły zginającej, ugięcia próbek f, wartości energii W (pracy) wymaganej do zniszczenia próbek i udarności U próbek wykonanych metodą worka próżniowego. Porównując wyniki zbiorcze dla próbek kompozytowych wykonanych metodą LR i WP, przy tej samej zawartości recyklatu i tej samej granulacji, można stwierdzić, że maksymalna siła Fmax wymagana do zniszczenia próbek typu WP była nieznacznie większa aniżeli dla próbek typu LR.

Podsumowując wyniki tej części badań stwierdzono w rozprawie, że :

- największą udarność wykazuje kompozyt poliestrowo-szklany bez recyklatu,
- wartości siły Fmax, związanej z energią sprężystą Ue, zaabsorbowaną przez materiał do wywołania ugięcia próbki w przedziale sprężystego odkształcenia, są wyższe dla próbek wykonanych metodą WP,
- na wykresach przebiegu zależności siła - ugięcie, przedział sprężystego odkształcenia próbek jest znacznie mniejszy w porównaniu z przedziałem plastycznych odkształceń decydujących o rozwoju procesu niszczenia próbek kompozytowych,
- wyniki udarności materiału kompozytowego wykazują te same zależności od zawartości recyklatu w kompozycie i stopnia jego rozdrobnienia, jakie zostały sformułowane w odniesieniu do wyników badań wytrzymałościowych, podanych w rozdz. 5.1.

5.3. Próba trójpunktowego zginania próbek kompozytowych

Wielowarstwowe kompozyty polimerowe o wzmocnieniu utworzonym z mat lub z płóciennych tkanin przy odkształceniu liniowym wykazują wydłużenie próbki około 1-3% w momencie jej zniszczenia. Taki rząd wydłużenia wykazały też próbki badanego kompozytu poliestrowo-szklanego w próbie statycznego rozciągania (str. 71 w rozprawie). Dla tych materiałów istotnym problemem technicznym jest przeprowadzenie prób rozciągania kompozytów w kierunku pokrywającym się z kierunkiem ułożenia włókien w osnowie. Wykresy rozciągania materiałów kompozytowych przypominają wykresy dla materiałów kruchych. W piśmiennictwie naukowym proponuje się dla tych materiałów przeprowadzenie

prób trójpunktowego lub czteropunktowego zginania w celu zbadania własności mechanicznych. W pracy doktorskiej przeprowadzono próby trójpunktowego zginania prostopadłościennych próbek, wyciętych z płyt warstwowego kompozytu wytwarzanego dwoma metodami LR i WP, bez recyklatu i z zawartością 10% i 20% recyklatu poliestrowo-szklanego i jego granulacji ≤ 1.2 mm i ≤ 3 mm, traktując te badania jako uzupełniające do określenia właściwości wytrzymałościowych materiału przy zginaniu (rys. 5.63-5.67).

Analiza wyników badań wytrzymałości R_{mg} poliestrowo-szklanego kompozytu przy zginaniu trójpunktowym (tabela 5.8) wykazała te same tendencje wynikające z obecności lub z braku recyklatu w kompozycie, jakie zaobserwowano i udokumentowano w rozprawie w każdym przypadku przeprowadzonych badań. Wyniki z badań doświadczalnych prowadzą do jednoznacznego wniosku, że recyklat wpływa na obniżenie wytrzymałości również przy zginaniu materiału.

Porównując zamieszczone w tabeli 5.3 wyniki badań wytrzymałości kompozytu poliestrowo-szklanego na rozciąganie z jego wytrzymałością na zginanie (tabela 5.8) można wyciągnąć wniosek, że wytrzymałość na zginanie badanego kompozytu poliestrowo-szklanego jest wyższa o 40% od jego wytrzymałości na rozciąganie. Ta tendencja jest zgodna z wynikami podawanymi w pracach badawczych dotyczących kompozytów polimerowych wzmacnianych matami lub tkaninami płóciennymi.

Podobne porównanie można byłoby przeprowadzić dla modułów sprężystości Younga.

5.4. Badania twardości próbek kompozytowych

W celu pozyskania dodatkowych informacji o własnościach wytrzymałościowych badanego materiału kompozytowego do programu badań doświadczalnych włączono też badania jego twardości, czyli badania odporności materiału na odkształcenia trwałe powstałe wskutek wciskania weń wgłębnika.

W rozprawie Doktorantka przedstawiła metodykę badań twardości materiałów kompozytowych metodą wciskania kulki o średnicy 5± 0.05 mm siłą obciążającą P (metoda Brinella). Wybór obciążenia P zależy od powstania średnicy odcisku (w pracy głębokości odcisku), który powinien mieć wartość 0.15 - 0.35 mm po 30 sekundach obciążania. W badaniach wykorzystano twardościomierz uniwersalny Qness Q 250 M wyposażony w wgłębnik do badań tworzyw sztucznych. Pomiary twardości wykonano dla próbek o geometrii dostosowanej do statycznej próby rozciągania. Dla każdej próbki wykonano 10 pomiarów twardości. W tabeli 5.9 zamieszczono wyniki pomiaru twardości dla próbek wykonanych metodą laminowania ręcznego (LR): bez recyklatu, z recyklatem poliestrowo-

szklanym o zawartości 10% i 20% oraz jego rozdrobnieniu ≤ 1.2 mm i ≤ 3 mm. Otrzymane pomiary twardości próbek przedstawiono w formie graficznej w zależności od zawartości recyklatu i od jego granulacji (rys. 5.70 i 5.71). Uzyskane wyniki badań dowodzą spadku twardości próbek z 10% zawartością recyklatu o 13% o granulacji ≤ 1.2 mm. Gdy granulacja recyklatu ≤ 3 mm i zawartość recyklatu też jest 10% - to spadek twardości próbek wynosił 17% w stosunku do twardości materiału kompozytowego bez recyklatu. W przypadku próbek o zawartości 20% recyklatu spadek twardości wynosił około 40%.

Uzasadniając otrzymane wyniki spadku twardości próbek kompozytowych wraz ze wzrostem zawartości recyklatu Doktorantka powiązała ten fakt ze zmniejszeniem ilości zbrojenia i zaburzeniem adhezji składników tworzących kompozyt poprzez recyklat.

5.5. Badanie procesu starzenia kompozytów

Proces starzenia kompozytów jest wywołany oddziaływaniem na powierzchnię materiału czynników środowiskowych takich, jak: światło słoneczne, szczególnie pasmo ultrafioletu, wilgotność i temperatura otoczenia, atmosfera czynników agresywnych (np. solanki, środków chemicznych itp.), które przyspieszają w nim rozwój procesów korozyjnych. W rozprawie, podatność na korozję próbek kompozytowych, wytworzonych metodą LR z zawartością recyklatu od 0 do 30% i wielkością granulatu ≤ 1.2 mm i ≤ 3 mm, badano poddając je nasączaniu w zbiorniku 3% roztworem wodnym solanki (NaCl) o temperaturze 35°C i umieszczając dodatkowo w atmosferze mgły solnej. Przygotowane do badań korozyjnych próbki podzielono na 4 partie. Poszczególna partia próbek była przeznaczona do ekspozycji korozyjnej odpowiednio przez okres 5 dób, 15 , 30 i 60 dób. Po ekspozycji korozyjnej próbki były suszone, mierzone i ważone, następnie poddawano je statycznemu rozciąganiu, aby sprawdzić wpływ czasu ekspozycji na wytrzymałość próbek. Próbki czterech serii bez recyklatu wykazały niewielkie obniżenie wytrzymałości na rozciąganie (rys. 5.76). Druga seria badań dotyczyła próbek kompozytowych z zawartością recyklatu 10% i granulacją ≤ 1.2 mm i ≤ 3 mm. Wyniki badań wytrzymałości próbek na rozciąganie po ekspozycji korozyjnej trwającej odpowiednio przez 5 dób, 15, 30 i 60 dób przedstawiono w postaci krzywych $\sigma=f(\varepsilon)$ odpowiednio na rys. 5.77 - dla recyklatu z granulatem ≤ 1.2 mm i na rys. 5.78 - dla próbek z granulatem recyklatu ≤ 3 mm. Zauważono obniżenie wytrzymałości kompozytu już po 1440 godz. Wpływ zwiększonej zawartości recyklatu do 20% i jego granulacji do wielkości ≤ 1.2 mm i ≤ 3 mm na wytrzymałość próbek po ekspozycji korozyjnej w 4 różnych przedziałach czasowych przedstawiono graficznie w postaci krzywych $\sigma=f(\varepsilon)$

odpowiednio na rys. 5.79- 5.82. Największe spadki wytrzymałości próbek i ich plastyczności po ekspozycji korozyjnej wystąpiły w próbkach o zawartości recyklatu 30% i wielkości granulatu 3 mm (rys. 5.83). Doktorantka, podsumowując tę grupę badań i otrzymane wyniki stwierdziła, że przy wysokiej 30% zawartości recyklatu w kompozycie i jego granulacji wynoszącej do 3 mm, struktura kompozytu jest bardziej podatna na destrukcyjne działanie środowiska korozyjnego. Dodatkowo, zmniejsza się adhezja pomiędzy włóknami zbrojenia i żywicą osnowy oraz zwiększa się liczba porów, które ułatwiają wnikanie do materiału cząsteczek wody, przyspieszając proces starzenia materiału kompozytowego.

W każdym przypadku przeprowadzonych badań, czas ekspozycji korozyjnej wpływał ujemnie na właściwości wytrzymałościowe badanego kompozytu, w tym na obniżenie wartości modułu sprężystości materiału kompozytowego.

5.6. Badania strukturalne kompozytów

Badania struktury przełomów próbek wykonanych dwoma metodami LR i WP po statycznej próbie rozciągania wykonywano z użyciem mikroskopu stereoskopowego. Badania mikroskopowe wykazały, że próbki kompozytowe po rozerwaniu ulegają rozwarstwieniu - mechanizm niszczenia próbek. W miejscu pęknięcia próbek zaobserwowano większą liczbę włókien szklanych zbrojenia, większą spoistość i zwartość włókien w próbkach wytworzonych metodą WP aniżeli metodą LR. Można w ten sposób wyjaśnić stwierdzaną w badaniach wyższą wytrzymałość próbek typu WP. Na rys. 5.88, 5.89, 5.90 przedstawiono odpowiednio, przełomy próbek kompozytowych o zawartości recyklatu 10% i 20% z granulacją ≤ 1.2 mm i ≤ 3 mm. Zniszczenie próbek kompozytowych przypomina obraz zniszczenia materiału kruchego. W próbkach typu WP, w miejscu zniszczenia próbek nie obserwowano odkształconych i wydłużonych włókien.

Z przeprowadzonych badań Doktorantka wyciągnęła wnioski, że kompozyty o zawartości recyklatu 20% i powyżej tej zawartości, wytworzone metodą LR, wykazują nieznacznie wyższe właściwości wytrzymałościowe od kompozytów wytworzonych metodą WP. W procesie wytwarzania kompozytu metodą WP żywica jest odsysana i przy dużej ilości recyklatu składniki kompozytu nie są dokładnie powiązane. Na rys. 5.94 zamieszczono zdjęcia struktur materiału bez recyklatu, wykonanego metodą LR (rys,5.94 a) i metodą WP (rys,5.94 b), przy powiększeniu 50x. Zamieszczone zdjęcia z mikroskopu dowodzą, że w kompozycie wytworzonym metodą LR występuje spora liczba porów powietrza, umiejscowionych szczególnie przy zbrojeniu. Natomiast, w przypadku stosowania metody WP tych porów powietrza w kompozycie jest mniej. Istotne znaczenie ma adhezja pomiędzy

żywicą a włóknami. W kompozycie LR bez recyklatu, na zdjęciach struktury kompozytu widoczna jest granica pomiędzy włóknami a żywicą, czego nie obserwuje się w kompozycie typu WP. Jest ona praktycznie niezauważalna. Na zdjęciach obrazu struktury kompozytu z zawartością 10% recyklatu i jego granulacją ≤ 1.2 mm zauważalna jest różnica w strukturze, w stosunku do struktury kompozytu bez recyklatu. Z kolei, w kompozycie typu WP z tą samą zawartością recyklatu 10% i jego granulacją 1.2 mm adhezja pomiędzy żywicą i recyklatem oraz zbrojeniem jest większa, widoczne są też niewielkie pory powietrza. Porównując zdjęcia struktur kompozytów z recyklatem ze strukturą kompozytu bez recyklatu można stwierdzić, że jest zauważalny wpływ recyklatu na strukturę kolejnych warstw zbrojenia. Gdy wzrasta rozmiar cząstek granulatu do 3 mm (zawartość recyklatu 10%) to wiązanie pomiędzy zbrojeniem a żywicą jest słabsze, wzrasta więc wpływ recyklatu na adhezję.

Badania mikroskopowe dowiodły też, że mikrostruktura złomu kompozytu bez recyklatu wykazuje cechy pękania plastycznego. Z kolei, gdy w kompozycie występuje recyklat o zawartości 10% i jego cząstki o różnych średnicach : 1.2 i 3 mm, to mikrostruktura przełomu jest charakterystyczna dla pęknięć kruchych, rozwijających się w różnych płaszczyznach. Można też umiejscowić defekt w próbce inicjujący główny front pękania.

W podsumowania tej grupy badań Doktorantka stwierdza, że badania mikrostruktury materiałów kompozytowych wykazały zależność mechanizmu pękania kompozytu od zawartości i wielkości granulatu recyklatu oraz wykazały zasadniczy wpływ wielkości granulatu na obniżenie właściwości mechanicznych materiału.

6. Podsumowanie i wnioski oraz kierunki dalszych badań.

Rozprawę doktorską kończy podsumowanie uzyskanych wyników z licznych badań doświadczalnych (7 różnych badań) przeprowadzonych dla kompozytu warstwowego z recyklatem poliestrowo-szklanym w celu określenia właściwości mechanicznych nowo tworzonego materiału kompozytowego. Do określenia granicy plastyczności niejednorodnego strukturalnie materiału kompozytowego Doktorantka zastosowała oryginalną, statystyczną metodę entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinaia.

Przeprowadzone badania, otrzymane wyniki i ich analiza pozwoliły na sformułowanie przez Doktorantkę następujących wniosków:

1) są duże możliwości pełnego zagospodarowania odpadów poliestrowo-szklanych eliminujących zanieczyszczenie oraz ograniczających ilości tych odpadów i ich destrukcyjny wpływ na środowisko naturalne;

2) przetworzone odpady poliestrowo-szklane mogą być całkowicie wykorzystane do wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych;

3) zawartość recyklatu poliestrowo-szklanego w kompozycie wywiera wpływ na jego właściwości mechaniczne i warunkuje jego zastosowanie na elementy konstrukcyjne;

4) zawartość recyklatu do 15% w kompozycie, pozwala go stosować w konstrukcjach poddanych dużym obciążeniom;

5) materiały kompozytowe wytwarzane metodą worka próżniowego zawierające do 15 % recyklatu, wykazują wyższe właściwości mechaniczne od materiałów o podobnej zawartości recyklatu, ale uzyskiwanych metodą laminowania ręcznego;

6) zastosowanie metody entropii metrycznej Kolmogorova - Sinaia pozwoliło na określenie granicy plastyczności kompozytów.

Podsumowanie uzyskanych wyników w rozprawie wraz z ciekawą dyskusją i refleksjami odnoszącymi się do weryfikacji głównej hipotezy roboczej, postawionej w rozprawie przez Doktorantkę wraz z 7 hipotezami szczegółowymi i sformułowanie wniosków końcowych obejmuje 3 strony. Rozprawę kończy wytyczenie przez Doktorantkę dalszych kierunków badań, które pozwolą pogłębić wiedzę i zweryfikować już uzyskane rezultaty z badań dla kompozytu warstwowego z recyklatem poliestrowo-szklanym.

Zawartość treści w części badawczej przedstawiono na 85 stronach.

Do części badawczej dołączono spis 131 rysunków i spis 18 tabel. Bibliografia obejmuje 179 pozycji literaturowych.

Całość rozprawy doktorskiej zawarta jest na 154 stronach.

7. Uwagi krytyczne do rozprawy :

1/ W wykazie zastosowanych skrótów na str. 6 w rozprawie podano znaczenie dla symboli ε i ε_g , że są to wydłużenia, odpowiednio przy rozciąganiu i przy zginaniu. Powszechnie przyjęte jest w literaturze naukowej, że te symbole oznaczają odkształcenie.

2/ Uwaga do struktury rozprawy: na str. 10 rozprawy wprowadzony został tytuł: Część teoretyczna, który obejmuje dwa rozdziały z podrozdziałami na temat: charakterystyki kompozytów i problematyki odpadów polimerowych. Jest to zatem przegląd literatury w przedmiocie kompozytów i problematyki odpadów. Recenzent kwestionuje nazwanie tej partii rozprawy tj. stron 10-51 - częścią teoretyczną. Proponuje tytuł np.: "Przegląd literatury", lub " Obecny stan wiedzy" itp.

3/ propozycja uzupełnienia zdania w linii końcowej na str. 10 " Osnowę tych kompozytów stanowią metale ….. " i stopy metali: głównie Al, Mg, Ti, Ni".

4/ na str. 54 w linii 2 od dołu strony występuje oznaczenie RTM, które nie znajduje wyjaśnienia w wykazie skrótów.

5/ W tabeli 5.1 na str. 68 zamieszczono wartości średnie modułu Younga E, wytrzymałości na rozciąganie Rm i odkształcenia ε (%) (w tekście odkształcenia plastycznego) wyjaśniając wcześniej, że określono je ze statycznej próby rozciągania. Takie stwierdzenie budzi wątpliwość, gdyż zamieszczone w pracy wykresy rozciągania próbek kompozytowych (rys. 5.7-5.10) nie ułatwiają określenia wyżej wymienionych parametrów. Zatem, w jaki sposób wyznaczono parametry wytrzymałościowe próbek kompozytowych ?

Ta uwaga dotyczy również parametrów wytrzymałościowych zamieszczonych w tabeli 5.3 na str. 72.

6/ Na str. 74 w liniach 1-8 licząc od dołu strony, zamieszczono tekst, który nie łączy się z tekstem pracy występującym powyżej tych linii. Przypuszczalnie należy go usunąć.

7/ W podrozdziale 5.4 na str. 114 dotyczącym pomiaru twardości próbek kompozytowych metodą Brinella, Doktorantka opisując metodykę tych badań nie podała informacji z jakiego materiału była wykonana kulka, jako wgłębnik, do pomiaru twardości tworzyw sztucznych.

Następnie, z tekstu zamieszczonego w linii 3 od dołu strony 114 wynika, że wybór obciążenia wgłębnika zależny jest od głębokości odcisku, który powinien mieć wartość 0.15-0.35 mm. Czy miarą twardości materiału w metodzie Brinella jest głębokość odcisku czy średnica odcisku kulki ?

8/ W podrozdziale 5.5 na str. 118 dotyczącym starzenia kompozytów, zamieszczony tekst z wyjaśnieniem wykresów zbiorczych na rys. 5.83 i 5.84, przedstawiających zależność wytrzymałości na rozciąganie ΔRm od czasu ekspozycji kompozytu w środowisku korozyjnym, budzi niezrozumienie. Zarówno, pod rys. 5.83 i rys. 5.84 zamieszczono tekst: "przedstawiono zbiorczy wykres bezwzględnego obniżenia wytrzymałości na rozciąganie" itd. Jeśli ΔRm ma oznaczać bezwzględną wartość obniżenia wytrzymałości (względem jakiej wartości wytrzymałości ?) to na osi pionowej wykresów powinien wystąpić moduł wartości ΔRm. Moim zdaniem, niepotrzebnie skomplikowano wspomniane wykresy. Wraz z zamieszczonym tekstem wprowadzają niejasności.

Powyższe uwagi krytyczne do pracy nie wpływają na obniżenie wysokiego poziomu rozprawy.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej dokonana przez recenzenta:

opiniowaną rozprawę doktorską Pani mgr inż. Katarzyny Panasiuk pt.: "Analiza właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych z recyklatem poliestrowo-szklanym" **oceniam bardzo wysoko**.

Podstawą do oceny pracy są następujące jej walory :

1/ aktualność tematyki rozprawy doktorskiej i jej aplikacyjność (pkt 2, str. 2 recenzji),

2/ szerokie przedstawienie przez Doktorantkę charakterystyki kompozytów i problemu recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych z uwzględnieniem problematyki ich składowania, przetwarzania i możliwości wtórnego użytkowania nowych materiałów wytworzonych z odpadów tworzyw sztucznych (rozprawa str. 10-51),

3/ realizacja szerokiego programu badań doświadczalnych (7 różnych badań) do określenia właściwości mechanicznych nowo tworzonego warstwowego kompozytu z użyciem odpadu poliestrowo-szklanego (rozprawa str. 51-136),

4/ staranne opracowanie wyników z przeprowadzonych badań doświadczalnych i ich analiza z odniesieniem do budowy strukturalnej kompozytu (rozprawa str. 51-136),

5/ zastosowanie oryginalnego podejścia do rozwiązania problemu naukowego jakim było określenie wartości granicy plastyczności niejednorodnego strukturalnie kompozytu metodą entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinaia (rozprawa str. 75-93),

6/ dojrzałe podejście młodego pracownika akademickiego na etapie: formułowania celu głównego pracy, stawiania hipotez, prowadzenia analizy wyników otrzymywanych z bieżących badań doświadczalnych, prowadzenie dyskusji nad zrealizowanym programem badawczym, formułowanie wniosków końcowych i wytyczenie kierunków dalszych badań (rozprawa str. 51-52, 62-140).

Ocena rozprawy pod kątem spełnienia wymagań zawartych w art. 13 ust. 1 cytowanej Ustawy , to jest :

- **oryginalności rozwiązania problemu naukowego** przez Doktorantkę - rozwiązanie problemu naukowego, polegającego na określeniu wartości granicy plastyczności dla niejednorodnego strukturalnie kompozytu poprzez zastosowanie oryginalnej metody entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinaia,
- **umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** przez Doktorantkę - została wykazana w punktach 2, 3, 4, 6 oceny rozprawy przez recenzenta,
- **ogólnej wiedzy teoretycznej Doktorantki w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna** - Doktorantka posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna o czym świadczy wysoka ocena rozprawy przez recenzenta, stosowanie w rozprawie poprawnych terminów, prowadzenie poprawnej i wnikliwej analizy otrzymanych wyników z badań doświadczalnych z odniesieniem do struktury materiału kompozytowego, prowadzenie szerokiej dyskusji w rozprawie nad zrealizowanym programem badawczym, sformułowanie wniosków końcowych i wytyczenie kierunków dalszych badań.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej : bardzo dobry.