

Dr hab. inż. Stanisław Kuciel, prof. PK
Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki
Politechnika Krakowska

12 styczeń 2026 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
Mgr inż. Anny Krzak

**Struktura i własności wielowarstwowych materiałów kompozytowych
aplikowanych w warunkach kriogenicznych.**

Dyscyplina naukowa: Inżynieria materiałowa
Ścieżka dyplomowania: Doktorat wdrożeniowy

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Grzegorz Matula, Prof. PŚ
Promotor pomocniczy: dr inż. Agnieszka J. Nowak

wykonanej na zlecenie Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki
Śląskiej z dnia 30 października 2025 r. przedstawionej w piśmie
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Prof. dr hab. inż. Adama Grajcara (RDIMa.512.42.2025)

1. Aktualność przedmiotu rozprawy i rozpoznawalność naukowa

Rozprawa doktorska mgr inż. Anny Krzak stanowi obszerną, wielowątkową analizę zagadnienia opracowania i charakterystyki kompozytów wielowarstwowych przeznaczonych do pracy w ekstremalnie niskich temperaturach. Tematyka związana z kompozytami epoksydowo-szklanymi w zastosowaniach kriogenicznych jest obszarem o rosnącym znaczeniu strategicznym w kontekście technologii kosmicznych, kriogeniki technicznej, energetyki nadprzewodnikowej, pojazdów kosmicznych i zaawansowanych struktur inżynierskich. Wybór tematu pracy zasługuje na uznanie zarówno ze względu na jego aktualność, jak i wysoki stopień trudności naukowej i technologicznej. W ostatnich latach obserwujemy rosnące zapotrzebowanie na materiały inżynierskie o specjalnych właściwościach a przy tym niskiej masie właściwej, takimi materiałami są kompozyty polimerowe. Szczególnie wymagającym jest przemysł kriogeniczny, który stawia konkretne, wysokie wymagania wytrzymałościowe w odniesieniu do stosowanych obecnie materiałów. Materiały inżynierskie aplikowane w tej branży muszą zachować swoje

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 23.01.2026
RDIMa.512.5151/2026
nr zał.

właściwości mechaniczne i termiczne, być odporne na degradację w niskich temperaturach oraz charakteryzować się dobrymi właściwościami dielektrycznymi.

Rozprawa prezentuje ambitny projekt badawczy obejmujący zarówno kontekst teoretyczny, jak i rozbudowaną część eksperymentalną wraz z analizą środowiskową (LCA) oraz wdrożeniem przemysłowym. Należy podkreślić, że Autorka podjęła się realizacji badań, które wymagają nie tylko doskonałego przygotowania laboratoryjnego, lecz również zrozumienia zachowania materiałów pod wpływem skrajnych obciążeń termicznych i mechanicznych.

2. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska liczy 192 strony, w tym 177 stron rozprawy, a reszta to przegląd 173 pozycji literaturowych. Stanowi to dobry wynik i świadczy o dojrzałości naukowej Autorki, która syntetycznie ujęła zakres i przegląd badań oraz wnioski. Rozprawa posiada 7 rozdziałów i 16 podrozdziałów, obejmujących przegląd literatury, cel i zakres pracy, prace badawcze, prace wdrożeniowe oraz wnioski końcowe i kierunki dalszych badań. Część literaturowa rozprawy została zrealizowana z niezwykłą starannością, obejmując szeroki zakres zagadnień. Autorka przedstawia w niej:

- genezę i rozwój kriogeniki technicznej,
- analizę właściwości fizycznych materiałów w temperaturach od RT do temperatur kriogenicznych,
- przegląd i klasyfikację kompozytów ze szczególnym uwzględnieniem osnów epoksydowych oraz włókien typu E i S,
- analizę nowoczesnych technik wytwarzania laminatów kompozytowych,
- krytyczne ujęcie problematyki mikropęknięć inicjowanych skurczem termicznym,
- aktualny stan wiedzy dotyczący modyfikacji systemów epoksydowych pod kątem odporności kriogenicznej,
- aspekty środowiskowe, w tym znaczenie LCA i wyzwań recyklingowych dla kompozytów polimerowych.

Przegląd ten jest niezwykle obszerny – stanowi jedno z mocniejszych opracowań teoretycznych w dziedzinie kompozytów kriogenicznych. Autorka nie ogranicza się do prostego streszczenia literatury, lecz dokonuje wielokrotnie jej krytycznej analizy, porównuje wyniki, wskazuje braki badawcze i uzasadnia cel realizacji badań własnych. Opracowanie to świadczy o bardzo szerokiej orientacji w temacie, zrozumieniu procesów fizykochemicznych zachodzących w materiałach oraz umiejętności integrowania informacji pochodzących z różnych obszarów nauki.

Na podstawie wykonanego przeglądu sformułowano następującą tezę: Opracowanie autorskiego rozwiązania materiałowego w postaci kompozytu wielowarstwowego o osnowie duroplastycznej, charakteryzującego się wysokimi właściwościami mechanicznymi, termicznymi i elektrycznymi oraz stabilnością w szerokim zakresie temperaturowym środowiska pracy, przełoży się na wydłużenie czasu eksploatacji i niezawodność gotowych

produktów aplikowanych w warunkach kriogenicznych. Poszukiwanie odpowiedzi na tak postawioną tezę wymagało rozwiązania wielu interdyscyplinarnych zadań z czego Autorka wywiązała się poprawnie. Zastosowane metody badawcze są poprawne, przemyślane i obejmują:

- pełną charakterystykę mechaniczną (rozciąganie, zginanie, ścinanie, cykliczne próby L-UL),
- badania termiczne (DSC, TGA, DMA/DMTA oraz ocena CTE),
- analizę mikrostruktury (SEM, EDS),
- testy elektryczne,
- ocenę efektywności materiałowej na podstawie LCA,
- analizę uszkodzeń oraz mechanizmów powstawania mikropęknięć,
- ocenę efektów kriogenicznych przez zanurzenie w LN₂.

Szczególne uznanie budzi wprowadzenie do badań analizy DMTA, dzięki której Autorka uzyskała informacje na temat zmian właściwości lepkość-prężystych układów epoksydowych przy zmianie temperatury. Interesujący jest również zakres zastosowanych metod weryfikacji mikrostruktury – w tym obserwacje stref pęknięć, ich propagacji, łączenia i zależności od orientacji włókien.

Część badawcza jest wyjątkowo bogata, wieloetapowa i obejmuje:

- wytworzenie kilku wariantów materiałowych,
- selekcję najlepszych z nich pod kątem właściwości kriogenicznych,
- ocenę ich zachowania pod wpływem zmian temperatury,
- analizę mechanizmów degradacji,
- ocenę mikrostruktury,
- analizy właściwości termicznych,
- szczegółową interpretację wyników,
- finalne wdrożenie zidentyfikowanego, zoptymalizowanego wariantu.

Wyniki badań są przedstawione w sposób przejrzysty i logiczny. Autorka wykazuje umiejętność łączenia wyników z różnych metod badawczych, formułowania trafnych wniosków oraz rozpoznawania przyczyn obserwowanych zjawisk. Szczególnie cenne jest połączenie analizy pęknięcia z mikroskopowymi obserwacjami interfejsu włókno–matryca oraz ocena wpływu orientacji włókien na trwałość i wytrzymałość laminatów w warunkach kriogenicznych.

3. Wnioski i ocena merytoryczna

Udowodniono postawioną tezę pracy doktorskiej, wykazując, że zastosowanie autorskiej kompozycji osnowy oraz układu fazy wzmacniającej umożliwiło wytworzenie innowacyjnego wielowarstwowego materiału kompozytowego o osnowie duroplastycznej. Materiał taki charakteryzuje się stabilnymi własnościami mechanicznymi, termicznymi i elektrycznymi w szerokim zakresie temperaturowym, co najprawdopodobniej przełoży się na wydłużenie czasu eksploatacji oraz zwiększoną niezawodność elementów

konstrukcyjnych stosowanych w warunkach kriogenicznych. Do najważniejszych osiągnięć Autorki należy zaliczyć:

- opracowanie i charakterystykę nowych wariantów kompozytów epoksydowo-szklanych przeznaczonych do pracy w warunkach kriogenicznych,
- identyfikację głównych mechanizmów powstawania i propagacji pęknięć,
- analizę wpływu parametrów technologicznych na odporność materiałów krytycznych,
- przygotowanie kompleksowej oceny cyklu życia materiału (LCA),
- wdrożenie opracowanego wariantu w skali przemysłowej,
- rozszerzenie stanu wiedzy dotyczącego zachowania laminatów epoksydowych przy bardzo niskich temperaturach,
- opracowanie rekomendacji technologicznych dla przemysłu.

Praca ma wartość zarówno poznawczą, jak i praktyczną. Dzięki połączeniu badań podstawowych i wdrożeniowych stanowi przykład dobrze zrealizowanego doktoratu wdrożeniowego. Przedstawiona praca stanowi punkt wyjścia do dalszych działań w zakresie pozyskania kompleksowej charakterystyki wielowarstwowych materiałów kompozytowych w środowisku symulacyjnym oraz zastosowania alternatywnych technik ich wytwarzania, takich jak procesy autoklawowe. Na szczególne podkreślenie zasługuje podjęcie współpracy z ośrodkiem akademickim i partnerem przemysłowym i przygotowanie dwóch projektów badawczych. Pierwszy z nich dotyczący charakterystyki materiałowej kompozytów duroplastycznych modyfikowanych cząstkami pochodzącymi z recyklingu odpadów okołoprodukcyjnych. Drugi projekt natomiast podejmuje temat recyklingu wielowarstwowych kompozytów polimerowych, ze szczególnym uwzględnieniem oceny ich właściwości mechanicznych oraz prognozowania potencjalnych zastosowań.

Wybrane uwagi krytyczne i redakcyjne

Pomimo bardzo wysokiej jakości rozprawy, przedstawiam kilka uwag:

- część teoretyczna miejscami jest nadmiernie rozbudowana; skrócenie niektórych fragmentów mogłoby poprawić przejrzystość,
- niektóre wykresy mogłyby zostać ujednolicone pod względem graficznym,
- analiza statystyczna wyników mogłaby zostać pogłębiona (np. ANOVA),
- warto byłoby rozwinąć wątek dotyczący niepewności LCA oraz wpływu założeń modelowych,
- na stronie 53 jak i 139, 160, 174 nie ma tekstu
- część badawcza zawiera sporo powtórzeń tych samych wyników
- rysunek 34 literówki brak „g”;

Uwagi te nie mają jednak znaczącego wpływu na ocenę końcową rozprawy.

Pytania dotyczące rozprawy

Na stronie 102 przedstawiono krzywe obciążania - odciążania (histerezy mechanicznej), czy była obliczona energia dyssypacji i czy zgodnie z deklaracją na stronie 103 udało się dokończyć pełną analizę i przygotować publikację?

Na stronie 170 pada stwierdzenie, iż nie ma różnic udarności między temperaturą kriogeniczną, a pokojową, czy to jest możliwe i dlaczego?

4. Podsumowanie

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościowym osiągnięciem naukowym i przemysłowym. Przedstawione wyniki mają dużą wartość praktyczną, a przeprowadzone badania mogą stanowić podstawę do dalszych prac nad nowymi, bardziej zrównoważonymi materiałami kompozytowymi. Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe rozważania, oceniam rozprawę doktorską jej aspekty poznawcze i użytkowe wysoko i uważam, że spełnia odpowiednie wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20.07.2018 r (Dz.U. z 2024 poz. 1571 art. 187. Niniejszym wnoszę do Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Materiałowa, Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy, dopuszczenie Autora, mgr inż. Anny Krzak, do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie mu stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa

Prof. Stanisław Kuciel

/podpis odręczny/