

OPINIA
o rozprawie doktorskiej mgr inż. Marka Kozielczyka, pt.

„Evaluation of selected properties of welded joints in PVC profiles for civil engineering applications”

(„Ocena wybranych właściwości zgrzein profili z PVC stosowanych w inżynierii lądowej”)

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Marta Paczkowska, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Jakub Kowalczyk

Dziedzina: Nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: Inżynieria lądowa, geodezja i transport

Na podstawie starannie przeprowadzonej analizy pracy doktorskiej mgr inż. Marka Kozielczyka, pt.

„Evaluation of selected properties of welded joints in PVC profiles for civil engineering applications”

(„Ocena wybranych właściwości zgrzein profili z PVC stosowanych w inżynierii lądowej”)

stwierdzam, że jej zawartość merytoryczna spełnia obowiązujące przepisy i wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wniosuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do dalszego etapu postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora.

UZASADNIENIE OPINII

Podstawę opracowania opinii stanowią następujące dokumenty:

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej, Prof. dra hab. inż. Jacka Pielechy (DIL.510.59.3.2026), z dnia 25 czerwca 2026 r.,
- rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Marka Kozielczyka, pt. *„Evaluation of selected properties of welded joints in PVC profiles for civil engineering applications”*,
- obowiązująca ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

1. TEMATYKA BADAWCZA

Podjęta w rozprawie problematyka badawcza jest aktualna, istotna poznawczo i aplikacyjnie. Dobrze wpisuje się w rozwój współczesnych, wielomateriałowych systemów stolarki budowlanej. Zaostrzanie wymagań co do zakresu izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, w tym ograniczania mostków cieplnych, oraz trwałości i niezawodności użytkowej powoduje, że rozwiązania konstrukcyjne profili okiennych nie mogą być oceniane wyłącznie na poziomie materiału rodzimego czy pojedynczego

elementu. O właściwościach użytkowych całego elementu konstrukcyjnego w postaci okna decyduje współdziałanie geometrii profili, rodzajów zastosowanych w nich wzmocnień, technologia łączenia, jakość zgrzein oraz sposób przenoszenia obciążeń w narożu. Szczególne znaczenie ma zastępowanie tradycyjnych wzmocnień stalowych wkładami/wkładkami kompozytowymi, umożliwiającymi ograniczenie przewodzenia ciepła oraz masy konstrukcji przy zachowaniu wymaganej sztywności. Wprowadzenie do profilu PVC-U wkładki kompozytowej z włóknem szklanym istotnie zmienia warunki formowania zgrzewanego naroża. Strefa połączenia staje się obszarem współoddziaływania składników o wyraźnie odmiennej odpowiedzi termomechanicznej; PVC-U ulega uplastycznieniu i przepływowi, natomiast kompozyt zachowuje znacznie większą sztywność oraz stabilność wymiarową. Powstaje zatem problem inżynierski polegający na właściwym doborze parametrów obróbki samej wkładki a także procesu zgrzewania, aby zapewnić dostateczne uplastycznienie a w finalnym efekcie procesowym, konsolidację materiału, nie doprowadzając jednocześnie do nieciągłości zgrzeiny, przeciążenia układu roboczego maszyny technologicznej oraz degradacji termicznej PVC.

Zasadność wyboru tematu wynika również z właściwie zidentyfikowanej luki badawczej. Dostępne w tym zakresie prace badawcze dotyczą najczęściej profili bez wzmocnienia lub wzmacnianych tradycyjnymi kształtownikami stalowymi, a ocena jakości naroży bywa ograniczana do wyznaczania krytycznego obciążenia niszczącego. W obecnym stanie wiedzy brakowało dotąd kompleksowego rozpoznania wpływu pełnego zestawu parametrów uwzględniających: pełną głębokość frezowania wkładki, prędkości posuwów roboczych głowic zgrzewających, temperaturę zgrzewania oraz czas topienia, rozpatrywanych łącznie w odniesieniu do nośności naroża, zgodności wymiarowej ramy, symetrii i ciągłości zgrzeiny oraz stanu fizykochemicznego materiału w strefie połączenia.

Podsumowanie: Temat rozprawy oceniam jako trafny i ważny zarówno z punktu widzenia naukowego jak i przemysłowego. Problematyka opracowania mieści się w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Łączy zagadnienia technologii wytwarzania, mechaniki, w tym wytrzymałości połączeń, charakterystyki materiałów polimerowych i kompozytowych oraz wymagań stawianych wyrobom budowlanym. Rozprawa ma wyraźny wymiar wdrożeniowy (badania przeprowadzono z wykorzystaniem wyposażenia oraz sekwencji operacji odpowiadających praktyce przemysłowej). Uważam, że rozwiązanie problemu może wspierać zarówno projektowanie procesów technologicznych, jak i kontrolę jakości oraz zwiększanie wydajności produkcji profili okiennych ze wzmocnieniem kompozytowym.

2. OCENA MERYTORYCZNA

Przedmiot, zakres i cel rozprawy doktorskiej

Przedmiotem badań są właściwości materiałowe elementów składowych właściwości wytrzymałościowe zgrzein/połączeń narożnych sześciokomorowych profili okiennych z nieplastyfikowanego poli(chlorku winylu) wzmacnianych wkładkami kompozytowymi zawierającymi włókno szklane. Autor rozpatruje naroże ramy okiennej jako złożony obiekt techniczny, którego stan zależy od przygotowania powierzchni czołowych, kinematyki głowic roboczych, doprowadzonego oddziaływania cieplnego, konsolidacji uplastycznionego materiału oraz procesu przebiegu chłodzenia. W moim odbiorze takie ujęcie problemu jest właściwe, ponieważ pozwala odejść od traktowania obciążenia niszczącego jako jedynego kryterium jakości i oceny.

Hipoteza badawcza została jednoznacznie sformułowana i osadzona w rozdziale 3.1. Zakłada możliwość optymalizacji technologii zgrzewania profili PVC-U ze wzmocnieniem kompozytowym poprzez odpowiedni dobór głębokości frezowania wkładki, prędkości posuwu głowic, temperatury oraz czasu, tak aby uzyskać zgrzeiny spełniające wymagania wytrzymałościowe i wymiarowe, zachowujące prawidłową geometrię i ciągłość wypływu oraz

niewykazujące oznak degradacji termicznej, przy jednoczesnym skróceniu procesu i ograniczeniu jego zapotrzebowania na energię. **Przyjęte założenie spójni koreluje z tytułem, celem i dalszą konstrukcją badań.** Autor wyodrębnił cel naukowy, cel główny, pięć celów szczegółowych oraz kryteria potwierdzające ich osiągnięcie. Zakres pracy obejmuje charakterystykę materiału rodzimego PVC-U i wkładki kompozytowej, wytwarzanie naroży na czterogłowicowej zgrzewarce, systematyczne różnicowanie parametrów technologicznych, badania obciążenia niszczącego, ocenę wymiarów i symetrii, obserwacje morfologii zgrzeiny, badania twardości, badania mikroskopowe, DSC i FTIR-ATR. **Za szczególnie wartościowe uznaję powiązanie odpowiedzi mechanicznej i dokładności wymiarowej ram z wynikami badań cieplnych, strukturalnych oraz spektroskopowych.**

Program badawczy został podzielony na trzy komplementarne etapy: pierwszy służył wyznaczeniu właściwości materiałów składowych, drugi obejmował rozbudowane badania pilotażowe, w których identyfikowano użyteczne wartości parametrów i granice stabilności procesu a trzeci, weryfikacyjny etap badań połączeń, służył ocenie czy skrócenie czasu topienia nie spowoduje zmian materiałowych niewidocznych w próbie obciążenia niszczącego. Uważam, że **przyjęta przez Doktoranta struktura planu badawczego odpowiada logice postępowania naukowego; od rozpoznania właściwości materiałów, przez identyfikację zależności technologicznych, po wielometodową weryfikację wybranego okna procesowego.**

Struktura i strona formalno-redakcyjna rozprawy

Rozprawa liczy 198 stron. Zawiera streszczenia w językach angielskim, polskim i francuskim, wykaz skrótów i oznaczeń, pięć numerowanych rozdziałów oraz bibliografię obejmującą 202 pozycje. Część zasadnicza prowadzi od wprowadzenia oraz szerokiego opisu stanu wiedzy, przez sformułowanie problemu, hipotezy, celów i zadań badawczych, do części eksperymentalnej oraz rozbudowanego podsumowania. Pracę uzupełniają liczne tabele, rysunki, fotografie stanowisk i próbek, schematy technologiczne, wykresy uzyskanych wyników, termogramy DSC i widma FTIR-ATR. **Układ rozprawy jest zasadniczo logiczny, umożliwiając śledzenie toku rozumowania Autora. Szczególnie pozytywnie oceniam rozdział 3, w którym nie poprzestano na ogólnym wskazaniu celu, lecz przedstawiono hipotezę, cele szczegółowe, kryteria ich osiągnięcia, zakres oraz zadania przewidziane do realizacji.** Schemat metodyki zaprezentowany na stronie 62 porządkuje zależności pomiędzy badaniami materiałów składowych, badaniami przemysłowymi naroży, oceną jakości zgrzein oraz korelacją wyników.

Rozprawa została przygotowana z dużą dbałością o dokumentację procesu badawczego. Rysunki/fotografie i schematy dobrze ilustrują sposób przygotowania profili, frezowania wkładki, znakowania elementów, zgrzewania, obróbki CNC i badań niszczących. W pracy występują pewne drobne uchybienia językowe, terminologiczne i redakcyjne, w tym pozostawione uwagi robocze, literówki oraz niekonsekwencje numeracji. Nie podważają one wartości naukowej badań, lecz wymagają korekty przed ewentualnym wykorzystaniem rozprawy jako podstawy publikacji zwanej. Do tych kwestii powrócę jeszcze w dalszej części opinii.

Ocena stanu badań i przeglądu literatury

Szeroki przegląd literatury obejmuje rozwój oraz klasyfikację systemów okiennych, właściwości PVC, technologie jego wytwarzania oraz przetwarzania, wpływ temperatury, zagadnienia degradacji, toksykologii, recyklingu oraz metody łączenia profili. Doktorant uwzględnił normy odnoszące się do profili PVC-U oraz badań naroży, publikacje rozwiązujące problemy mostków cieplnych, wzmocnień stalowych i kompozytowych, zgrzewania tworzyw termoplastycznych oraz mechanizmów degradacji PVC. **Wysoko oceniam analityczne podejście Autora, dzięki któremu przegląd stanu wiedzy wykracza poza czysto opisowe zestawienie dotychczasowych wyników.** Mgr inż. Marek Kozielczyk wykorzystał wiedzę literaturową do wykazania zasadniczej rozbieżności pomiędzy wymaganiem dostatecznego uplastycznienia układu wielomateriałowego a ograniczoną

odpornością PVC-U na intensywne oddziaływanie cieplne. Trafnie wskazuje też, że wyniki krótkotrwałych prób wytrzymałościowych mogą nie ujawniać początkowych zmian chemicznych i mikrostrukturalnych. Właśnie **tym, słusznie uzasadnia zastosowanie równoległych metod mechanicznych, cieplnych, mikroskopowych oraz spektroskopowych.**

W moim odbiorze przywołana bibliografia jest aktualna. Obejmuje źródła krajowe oraz zagraniczne. Właściwie wykorzystano również wcześniejsze publikacje Autora i współbadaczy/współpracowników dotyczące doboru obróbki wkładek, prędkości posuwu głowic, czasu topienia oraz temperatury zgrzewania. **W mojej ocenie zestaw źródeł wiedzy stanowił wystarczającą podstawę do sformułowania luki badawczej i interpretacji uzyskanych rezultatów.**

Pewnym mankamentem, moim zdaniem, tej części jest jej, miejscami, encyklopedyczny charakter. Rozbudowane fragmenty dotyczące historii polimerów, szczegółowych technologii polimeryzacji, toksykologii różnych monomerów i ogólnych kierunków recyklingu nie zawsze pozostają w bezpośredniej proporcji do problemu zgrzewania profili PVC-U. Skrócenie tych partii oraz silniejsze skoncentrowanie przeglądu na reologii uplastycznionego PVC, przepływie materiału w strefie zgrzeiny, adhezji i mechanice interfejsu PVC-kompozyt zwiększyłoby zwartość wyводу. Uwaga ta dotyczy jednak konstrukcji narracji, a nie braku podstaw merytorycznych.

Metodyka i przebieg badań

Metodyka badań konstrukcji o postaci wieloelementowej i wielomateriałowej jest rozbudowana i obejmuje próby wytrzymałościowe materiałowe, w tym udarności, rozciągania oraz zginania, pomiary twardości, oznaczenie udziału masowego włókna szklanego, temperatury mięknięcia Vicata i temperatury ugięcia pod obciążeniem oraz analizę FTIR-ATR. W procesie badawczym weryfikacji poddano po pięć próbek PVC i kompozytu w próbach udarności, po dziesięć w rozciąganiu, po dziewięć w zginaniu oraz po pięć w pomiarach twardości. Udział włókna wyznaczono na dwóch próbkach, temperaturę Vicata na dwóch próbkach PVC, a HDT na trzech próbkach każdego materiału. Pozwoliło to Doktorantowi udokumentować wyraźnie odmienną odpowiedź mechaniczną i cieplną obu składników profilu. Na szczególne uznanie zasługuje bardzo dokładne opisanie przygotowania próbek oraz operacji technologicznych. Autor kontrolował geometrię, grubość ścianek, prostoliniowość, temperaturę składowania, jakość cięcia, stan narzędzi, czystość powierzchni, głębokość frezowania, odstęp profilu od płyty grzejnej, stan folii PTFE, czas chłodzenia i parametry obróbki wykańczającej CNC. Każdy narożnik identyfikowano ze względu na głowicę zgrzewającą, a symetrię sprawdzano przy użyciu autorskiego wzornika do znakowania profili ciętych pod kątem 45°. **Tak rozbudowana kontrola zmiennych zakłócających wzmacnia wiarygodność części eksperymentalnej.**

Badania pilotażowe miały charakter sekwencyjny. Głębokość frezowania wkładki zmieniano od braku frezowania do 6,0 mm. Analizowano prędkości posuwu głowic 0,19, 0,25 i 0,31 mm/s, czasy topienia od 21 do 30 s oraz temperatury od 247 do 280°C. Zmienność parametrów powiązano z równoczesną oceną obciążenia niszczącego, odchyłek wymiarowych, symetrii, ciągłości i barwy wypływu oraz występowania przeciążeń napędów. **Dzięki temu Doktorant słusznie nie przyjął uproszczonej zasady, że wariant o najwyższej sile niszczącej jest automatycznie wariantem najlepszym.**

W odniesieniu do prób naroży przyjęto co najmniej trzy ramy dla każdego wariantu, co dawało minimum dwanaście próbek narożnych, z co najmniej trzema próbkami pochodzącymi z każdej głowicy. Urządzenie do pomiaru obciążenia niszczącego miało aktualny status metrologiczny, a Autor zweryfikował spełnienie wymagania dokładności pomiaru +3%. **Pozytywnie oceniam także odrzucanie próbek w przypadku podejrzenia nieprawidłowego przebiegu obróbki CNC oraz dokumentowanie zdarzeń przeciążeniowych zgrzewarki.**

Etap weryfikacji połączeń obejmował pomiary twardości w 12 punktach dla każdego wariantu, obserwacje mikroskopowe, analizę DSC w sekwencji grzanie-chłodzenie-grzanie oraz badania FTIR-ATR. Zastosowanie czterech komplementarnych poziomów dowodowych (mechanicznego, geometrycznego, strukturalno-cieplnego i spektroskopowego) stanowi jedną z najmocniejszych stron metody badawczej, umożliwiającą ocenę nie tylko zdolności naroża do przenoszenia obciążenia, lecz także zachowania materiału w strefie oddziaływania cieplnego.

Wyniki badań, analiz oraz ich dyskusja

Wyniki charakterystyki materiałów składowych potwierdziły istotną asymetrię ich właściwości. Średni udział masowy włókna szklanego w kompozycie wyniósł ok. 52,25%. Moduł Younga kompozytu osiągnął 5854 MPa wobec 2022 MPa dla PVC-U, a wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio 88 i 45 MPa. W próbie zginania moduł kompozytu wyniósł 13444 MPa, podczas gdy dla PVC-U 3418 MPa. Kompozyt wykazywał znacznie mniejszą zdolność do odkształcenia i większą wrażliwość na karb. Wyniki te właściwie powiązano z mechanizmem przenoszenia obciążeń przez włókna oraz z ryzykiem lokalnej koncentracji naprężeń w narożu. Równie ważne były wyniki badań cieplnych. Dla PVC-U uzyskano temperaturę mięknienia Vicata ok. 89-90°C i HDT ok. 73°C, podczas gdy HDT kompozytu wyniosła ok. 202°C. Oznacza to, że w warunkach zgrzewania PVC-U traci sztywność funkcjonalną znacznie wcześniej niż wkładka. Doktorant trafnie wykorzystał tę rozbieżność do wyjaśnienia przeciążeń głowic, utraty symetrii i niezgodności wymiarowych przy niedostatecznym uplastycznieniu profilu.

Poprzez badania głębokości frezowania wykazano, że warianty 0,0, 0,5 i 1,0 mm mogą zapewniać ciągłość połączenia, natomiast większe głębokości powodują lokalne lub rozległe nieciągłości. Najkorzystniejszą odpowiedź uzyskano dla 1,0 mm. Jest to wynik o wyraźnej wartości technologicznej, ponieważ wskazuje, że zwiększanie zakresu usuwania wkładki nie prowadzi monotonicznie do poprawy jakości. Przeciwnie, po przekroczeniu granicy 1,0 mm zmniejsza się ilość materiału zdolnego do wypełnienia i skonsolidowania strefy naroża. W badanym zakresie optymalną prędkością posuwu głowic była wartość 0,25 mm/s. Przy frezowaniu 1,0 mm średnie obciążenie niszczące wyniosło 3637 N, wobec 3157 N dla 0,19 mm/s i 3033 N dla 0,31 mm/s. Autor w zasadzie interpretuje ten wynik jako kompromis pomiędzy czasem tworzenia kontaktu i konsolidacją uplastycznionej warstwy a warunkami przepływu PVC w obszarze wypływu. Z kolei, badania czasu oraz temperatury wykazały, że przy 264°C, prędkości 0,25 mm/s i frezowaniu 1,0 mm czas topienia można skrócić z 30 do 22 s bez pogorszenia jakości. Wariant z czasem topienia 21 s prowadził do systematycznych odchyłków ok. 2 mm i utraty symetrii. Przy czasie 30 s, temperatury 248-256°C umożliwiały uzyskanie akceptowalnych naroży, natomiast temp. 247°C stanowiła wartość zbyt niską dla stabilnego przebiegu weryfikowanego procesu. Z kolei próba kompensowania czasu 21 s temperaturami 270-250°C prowadziła do żółknięcia lub brązowienia wypływu, a więc do oznak nadmiernego oddziaływania cieplnego.

Weryfikacja materiałowa potwierdziła zasadność wyboru wariantu o parametrach 264°C/22 s. Dla zgrzein wykonanych w zakresie 256-264°C twardość mieściła się zasadniczo w przedziale 65-75 N/mm², a pomiędzy wariantami 264°C/22 s i 264°C/30 s nie stwierdzono istotnej różnicy. W wariantach 270°C/21 s średnia twardość była niższa, a obserwacje mikroskopowe ujawniły jasnobrązowe przebarwienie wnikaające do wnętrza zgrzeiny. Termogramy DSC dla wariantów 264°C/22 s i 264°C/30 s wykazywały porównywalny dominujący zakres przejścia szklстого, natomiast widma FTIR-ATR zachowywały ten sam zestaw diagnostycznych pasm PVC, bez pojawienia się nowych i zaniku charakterystycznych maksimów. W moim odbiorze wartościowy element interpretacji wyników stanowi analiza regresyjna zależności średniego obciążenia niszczącego od temperatury i czasu topienia. Uzyskano współczynniki korelacji 0,99

i 0,96. Doktorant prawidłowo zastrzega, że wartości progowe wyznaczone przez ekstrapolację modelu, ok. 226,7°C i 15,4 s dla kryterium 2760 N, nie są granicami technologicznej akceptowalności. To też uzasadnia twierdzenie, że model siłowy musi być uzupełniony oceną geometrii, stanu materiału oraz stabilności procesu.

Podsumowanie: Rozprawa zawiera również analizę aplikacyjną. Skrócenie kontrolowanej sekwencji topienia i łączenia z 60 do 52 s oznacza redukcję o 8 s, czyli ponad 13%. Przy przyjętym czasie pracy pozwala to zwiększyć teoretyczną liczbę zgrzein z ok. 465 do 536 na dobę, a więc o ponad 15%. Wnioski wdrożeniowe są jasno sformułowane, choć analiza zużycia energii oraz ekonomiki ma, w moim odbiorze, charakter szacunkowy i wymagałoby potwierdzenia pomiarem w warunkach produkcyjnych.

Oryginalność rozprawy i wkład naukowy Doktoranta

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne, wartościowe osiągnięcie naukowe. Jej nowość nie polega wyłącznie na wskazaniu, że temperatura oraz czas wpływają na wytrzymałość zgrzeiny, ponieważ zależności tego rodzaju są znane dla tworzyw termoplastycznych. Oryginalność wynika z powiązania czterech grup zmiennych technologicznych z wielokryterialną oceną naroża oraz z fizykochemicznym stanem materiału w strefie zgrzeiny dla konkretnego, hybrydowego systemu PVC-U-kompozyt. Za główne osiągnięcie poznawcze uznaję wykazanie, że obciążenie niszczące nie jest wystarczającą miarą bezpieczeństwa procesu. Wariant ten może osiągać wysoką siłę niszczącą, a jednocześnie wykazywać niezgodność wymiarową, asymetrię, przeciążenie maszyny lub termiczne przebarwienie materiału. Autor potwierdzał/udowodnił konieczność integrowania kryteriów mechanicznych, geometrycznych, morfologicznych, cieplnych i spektroskopowych.

Nowość metodyczna polega na opracowaniu sekwencji badań łączących kontrolowaną technologię przemysłową z laboratoryjną charakterystyki materiałów oraz zgrzein. Istotne jest zachowanie identyfikowalności próbek w odniesieniu do głowicy zgrzewającej, wariantu frezowania i parametrów cyklu oraz zastosowanie autorskiego wzornika do weryfikacji symetrii naroży. Pozwoliło to zbudować skorelowany zbiór dowodów odnoszących się do odpowiedzi całego naroża i lokalnego stanu materiału. Za oryginalny rezultat aplikacyjny uznaję wyznaczenie okna procesowego: temperatura 264°C, czas topienia 22 s, prędkość posuwu głowic 0,25 mm/s i głębokość frezowania wkładki 1,0 mm. Wartość tego osiągnięcia jest wypadkową jednoczesnego spełnienia wymagań nośności, dokładności wymiarowej, symetrii, ciągłości, stabilności chemicznej i braku mikroskopowych oznak degradacji. Rezultat ma bezpośredni potencjał wykorzystania w przemysłowym sterowaniu procesem.

Podsumowanie: Część rezultatów została już wcześniej przedstawiona w recenzowanych publikacjach naukowych, a opracowany wzornik zgłoszono jako rozwiązanie patentowe. Potwierdza to dojrzałość prowadzonych badań, ich weryfikację w obiegu naukowym i aktywność publikacyjną Doktoranta. W mojej ocenie rozprawa wnosi wkład zarówno do technologii łączenia materiałów polimerowych, jak i do aplikacyjnej/inżynierskiej oceny niezawodności wielomateriałowych połączeń stosowanych w budownictwie.

Zalety pracy, podsumowanie

Do najważniejszych zalet rozprawy zaliczam trafny wybór problemu, jednoznaczną hipotezę, logiczne przełożenie celów na zadania szczegółowe oraz skuteczne prowadzone badania w warunkach zbliżonych do produkcji przemysłowej. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością technologii wytwarzania profili, budowy i działania przemysłowych maszyn technologicznych oraz praktycznych źródeł zmienności procesu.

Mocną stroną pracy jest zakres i komplementarność zastosowanych metod. Badania mechaniczne materiałów składowych, pomiary naroży, kontrola wymiarowa, obserwacje makro- i mikroskopowe, DSC oraz FTIR-ATR tworzą spójny

układ dowodowy. Szczególnie wartościowe jest rozróżnienie pomiędzy spełnieniem kryterium siłowego a rzeczywistą akceptowalnością technologiczną wariantu. Pozytywnie oceniam również sposób dokumentowania stanowisk, narzędzi, przygotowania próbek i parametrów procesu. Rozprawa ma dzięki temu znaczną wartość odtworzeniową. Przedstawione wyniki są czytelnie powiązane z wnioskami poznawczymi, metodycznymi i aplikacyjnymi, a końcowe zalecenia nie wykraczają zasadniczo poza zakres uzyskanych danych.

Całość potwierdza, że Autor posiada wiedzę teoretyczną i praktyczną niezbędną do samodzielnego prowadzenia badań, potrafi sformułować problem naukowy, zaprojektować rozbudowany eksperyment, krytycznie zestawiać wyniki z literaturą oraz wyprowadzić zalecenia technologiczne. Wskazane poniżej uwagi mają charakter dyskusyjny i perspektywiczny. Nie podważają zasadniczych osiągnięć rozprawy, lecz wyznaczają obszary, w których interpretację można pogłębić lub rozszerzyć w dalszych badaniach.

Uwagi krytyczne o charakterze dyskusyjnym i perspektywicznym

Pomimo wysokiej oceny rozprawy za zasadne uważam przedstawienie kilku kwestii wymagających dyskusji. Część z nich dotyczy ograniczeń świadomie wskazanych przez Doktoranta, inne wynikają z przyjętego planu eksperymentu i zakresu metod. Mianowicie:

1) Zakres uogólnienia wyznaczonego okna procesowego

Badania przeprowadzono dla jednego sześciokomorowego profilu PVC-U, określonego układu dwóch wkładek kompozytowych, jednej geometrii naroża, konkretnej zgrzewarki czterogłowicowej i zdefiniowanego zestawu oprzyrządowania. Doktorant słusznie zastrzega na stronie 186, że przeniesienie wyników na inne profile, geometrie wkładek oraz możliwości parametryczne maszyn technologicznych powinno zostać zweryfikowane według tej samej logiki wielokryterialnej. Oznacza to, że wartości $264^{\circ}\text{C}/22\text{ s}/0,25\text{ mm/s}/1,0\text{ mm}$ są lokalnym optimum dla badanego układu, a nie uniwersalnym standardem technologii. Proszę Doktoranta o wskazanie, które elementy wyniku uważa za najbardziej transferowalne: wartości bezwzględne parametrów, kolejność procedury optymalizacyjnej, zestaw kryteriów akceptacji czy też relacje bezwymiarowe wynikające z geometrii i właściwości materiałów. Interesujące byłoby również określenie minimalnego programu walidacyjnego dla nowej grupy profili.

2) Sekwencyjny plan badań a interakcje pomiędzy parametrami

Program eksperymentalny miał charakter etapowy: najpierw zmieniano głębokość frezowania, następnie prędkość posuwu, czas topienia i temperaturę przy utrzymywaniu pozostałych parametrów na wybranych poziomach. Takie podejście jest praktyczne, pozwala ograniczyć liczbę prób, nie zapewnia jednak pełnego ilościowego rozpoznania interakcji. Przykładowo wpływ prędkości może zależeć od temperatury i czasu, a graniczna głębokość frezowania może zmieniać się wraz z lepkością uplastycznionego PVC. Zastosowanie pełnego lub frakcyjnego planu czynnikowego, metody powierzchniowej odpowiedzi albo planu optymalnego mogłoby umożliwić wyznaczenie składników interakcyjnych i przedziałów ufności dla optimum. Proszę Doktoranta o komentarz, czy rozważał taki plan oraz czy posiadane dane pozwalają na retrospektywną ocenę co najmniej wybranych interakcji temperatura-czas i frezowanie-prędkość.

3) Uzasadnienie i transferowalność kryterium 2760 N

Minimalne, akceptowalne obciążenie niszczące przyjęto na poziomie 2760 N zgodnie z zaleceniem producenta profilu. To użyteczne kryterium przemysłowe, ale jego znaczenie jest ograniczone do badanego przekroju, geometrii ramion, sposobu podparcia i metody próby. Na stronie 102 Autor informuje ponadto, że naprężenia niszczącego nie obliczono ze względu na brak zastrzeżonych danych

geometrycznych oraz materiałowych profilu. W konsekwencji porównania między różnymi systemami profili opierają się na sile obciążającej, a nie na znormalizowanej wartości stanu naprężenia lub energii pęknięcia. **Proszę o wyjaśnienie relacji wartości 2760 N do wymagań normowych i rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych okna.** W mojej ocenie perspektywicznie zasadne byłoby wykorzystanie modelu MES, cyfrowego odwzorowania przekroju lub eksperymentalnej identyfikacji sztywności do wyznaczenia lokalnych naprężeń i parametrów mechaniki pęknięcia.

4) Pomiar rozptyłu ciepła i mechanicznych odkształceń w strefie zgrzeiny

Ten proces opisano bardzo szczegółowo na stronach 96-100, a temperatura płyty była kontrolowana czujnikiem ręcznym. Analizowano wartości zadane temperatury, czasu i prędkości oraz rejestrowano zdarzenia przeciążeniowe. Nie przedstawiono jednak bezpośredniego pomiaru temperatury w materiale lub na interfejsie, przebiegu siły docisku, rzeczywistego przemieszczenia głowic, ciśnienia kontaktowego ani rozkładu temperatury w przekroju. W układzie wieloelementowym, wielomateriałowym te wielkości mogłyby wyjaśnić, dlaczego pozornie niewielka zmiana nastawy prowadzi do utraty symetrii lub przebarwienia. **Proszę Doktoranta o ocenę możliwości zastosowania termopar cienkowarstwowych, termografii, rejestracji napięcia prądu lub np. czujników siły i przemieszczenia, co moim zdaniem pozwoliłoby zdefiniować okno procesowe na podstawie rzeczywistej historii cieplno-mechanicznej, a nie wyłącznie nastaw maszyny.**

5) Mechanizm zniszczenia i lokalizacja inicjacji pęknięcia

Obciążenie niszczące jest globalną i praktyczną miarą jakości naroża. Niestety nie opisuje mechanizmu uszkodzenia. W rozprawie brakuje systematycznej klasyfikacji miejsc inicjacji pęknięcia, przebiegu szczeliny, udziału rozdzielenia na interfejsie PVC-kompozyt, zniszczenia kohezyjnego PVC, delaminacji wkładki i wpływu porów. Nie przedstawiono również analizy powierzchni przełomów po próbie. Uzupełnienie badań o cyfrową korelację obrazu, rejestrację pełnej krzywej siła-przemieszczenie, energię zniszczenia, mikroskopię przełomów lub tomografię pozwoliłoby powiązać parametry procesu z mechanizmem pęknięcia. **Proszę Doktoranta o omówienie, czy obserwowano jakościowo różne postacie zniszczenia dla głębokości frezowania powyżej 1,0 mm oraz dla wariantów 264°C/22 s i 270°C/21 s.**

6) Granice rozdzielczości metod DSC i FTIR-ATR

Wielometodowa weryfikacja stabilności materiału jest istotnym walorem pracy jednak, moim zdaniem, wnioski powinny być interpretowane w granicach czułości zastosowanych metod. DSC ujawniła szeroki, heterogeniczny obszar przejścia szklistego, a część efektów miała bardzo małe wartości (ΔC_p) lub nie została ilościowo wyznaczona. FTIR-ATR jest metodą powierzchniową i silnie zależną od docisku próbki, chropowatości, topografii oraz głębokości penetracji, co Autor sam prawidłowo odnotowuje. Brak nowych pasm oznacza brak zmiany wykrywalnej w przyjętych warunkach, nie zaś absolutny brak przemian chemicznych. Perspektywicznie warto byłoby zastosować zaawansowane metody badawcze, np.: analizy termiczne TGA/DTG lub/i DMA, ilościowe wskaźniki karbonylowe i polienowe, pomiar emisji HCl, chromatografię GPC, spektroskopię ramanowską Raman czy też skaningową mikroskopię elektronową SEM. **Proszę o wskazanie procedur badań, które Doktorant uznałby za najbardziej rozstrzygające.**

7) Trwałość długoterminowa i walidacja na kompletnym wyrobie

Doktorant bardzo trafnie identyfikuje w przeglądzie literatury brak danych dotyczących starzenia zgrzewanych naroży w rzeczywistych warunkach użytkowania, a na stronie 186-187 wskazuje potrzebę badań starzeniowych, cyklicznych, pogodowych i zmęczeniowych. Przedstawione eksperymenty dotyczą jednak próbek niepostarzonych, badanych w krótkim czasie po wykonaniu i w temperaturze laboratoryjnej. Nie wiadomo zatem, czy wariant 264°C/22 s zachowa przewagę po działaniu promieniowania UV, wilgoci, niskich i wysokich temperatur, cykli cieplnych, pełzania i wielokrotnego

otwierania skrzydła. Niezbędna wydaje się też weryfikacja na kompletnych ramach z pakietem szybowym, okuciami oraz uszczelnieniami. Proszę Doktoranta o wskazanie metod przyspieszonego starzenia i kryterium, które pozwoliłyby porównać zachowanie wariantu referencyjnego oraz zoptymalizowanego po reprezentatywnym okresie eksploatacji.

8) Pomiar zapotrzebowania na energię i pełna ocena efektu produkcyjnego

Analiza aplikacyjna wykazuje potencjalny wzrost liczby zgrzein na dobę oraz przedstawia koszt energii na podstawie maksymalnej mocy zainstalowanej, czasu pracy i ceny energii. Nie wykonano jednak bezpośredniego pomiaru profilu mocy oraz energii dla poszczególnych faz cyklu, a obliczenie wydajności zakłada pełne wykorzystanie dostępnego czasu, bez przebrojeń, awarii, przestojów, braków i ponownej obróbki. Dla oceny przemysłowej zasadne byłoby zastosowanie np. analizatora energii oraz wskaźników całkowitej efektywności maszyny OEE (Overall Equipment Effectiveness), poziomu braków i kosztów jednostkowych dobrego wyrobu. Krótszy cykl może wpływać na obciążenie napędów, grzałek, układu chłodzenia, a więc rzeczywista oszczędność nie musi być proporcjonalna do czasu. Proszę o wskazanie, czy Autor dysponuje danymi z systemu sterowania zgrzewarki pozwalającymi odtworzyć energochłonność maszyny technologicznej i czy planuje walidację zoptymalizowanego wariantu w dłuższej serii produkcyjnej.

Uwagi inne

Strona językowa i edytorska rozprawy jest na ogół poprawna, jednak przed ewentualnym przygotowaniem monografii należałoby przeprowadzić pełną korektę redakcyjną. Zauważone uchybienia mają charakter drobnych niedoskonałości edycyjnych i nie obniżają oceny merytorycznej rozprawy a ich liczba nie jest na szczęście duża.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marka Kozielczyka stanowi dojrzałe opracowanie naukowe poświęcone aktualnemu i złożonemu problemowi technologicznemu. Autor prawidłowo zidentyfikował lukę badawczą, sformułował hipotezę i cele, opracował wieloetapowy program badań oraz uzyskał wyniki o istotnej wartości poznawczej i użytkowej. Rozprawa wykazuje, że jakość naroża profilu PVC-U wzmacnianego kompozytem jest rezultatem właściwego skorelowania/sprzężenia; przygotowania wkładki, kinematyki głowic, oddziaływania cieplnego, przepływu i konsolidacji uplastycznionego materiału oraz odporności na degradację. Najważniejszym osiągnięciem jest wyznaczenie i wielometodowe potwierdzenie tzw. okna procesowego ($264^{\circ}\text{C}/22\text{ s}/0,25\text{ mm/s}/1,0\text{ mm}$), przy równoczesnym udowodnieniu, że sama siła niszcząca nie wystarcza do kwalifikacji procesu.

W mojej ocenie rozprawa prezentuje dobrą, ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta, potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań w praktyce przemysłowej. Uwagi krytyczne odnoszą się przede wszystkim do zakresu uogólnienia, pogłębienia analizy statystycznej, obiektywizacji wybranych kryteriów i potrzeby walidacji długoterminowej. Nie podważają poprawności głównych rezultatów.

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- 1) Doktorant dokonał trafnego i należyście uzasadnionego wyboru tematu badawczego, dotyczącego technologii i jakości zgrzewanych połączeń wielomateriałowych profili PVC-U przeznaczonych do zastosowań budowlanych,
- 2) hipoteza, cel naukowy, cel główny i cele szczegółowe zostały sformułowane poprawnie, a wyniki badań pozwoliły na ich zasadniczą weryfikację oraz osiągnięcie w zakresie

przyjętym w rozprawie,

- 3) metodyka przeprowadzonego postępowania twórczego obejmuje właściwie dobrany zestaw badań mechanicznych, geometrycznych, cieplnych, mikroskopowych i spektroskopowych, a realizacja eksperymentu w warunkach odpowiadających praktyce przemysłowej nadaje wynikom znaczną wartość aplikacyjną,
- 4) rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, polegające na wielokryterialnym wyznaczeniu optymalnego okna „procesowego” oraz powiązaniu odpowiedzi mechanicznej łączonych profili wielomateriałowych (naroża) ze stanem materiału w strefie zgrzeiny,
- 5) zgromadzony materiał, sposób jego opracowania oraz interpretacja wyników potwierdzają przygotowanie Doktoranta do samodzielnego prowadzenia działalności naukowej, przy czym wskazane uwagi powinny stanowić przedmiot dyskusji podczas obrony i podstawę dalszych badań.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr inż. Marka Kozielczyka pt. „Evaluation of Selected Properties of Welded Joints in PVC Profiles for Civil Engineering Applications” (promotor: dr hab. inż. Marta Paczkowska, prof. PP; promotor pomocniczy: dr hab. inż. Jakub Kowalczyk), przygotowana w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport, spełnia wymagania określone w obowiązującej ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę zatem jak w sentencji opinii.

Bydgoszcz, 20.08.2026 r.