

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Krawczuk
„Analiza warunków grawitacyjnego wypełniania szczelin w połączeniach
klejowo-zgrzewanych”

Recenzję wykonano na podstawie zlecenia Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna dr. hab. inż. Jarosława Bieniasia oraz „Umowy o dzieło w przewodzie doktorskim” (nr RDN/IM/19/2022) zawartej w dniu 8 marca 2022 roku.

I. Uwagi wstępne

Przedstawiona do recenzji praca obejmuje:

- 180 stron oprawionych w książkę formatu A4,
- 48 ponumerowanych rysunków,
- 31 ponumerowanych tabel,
- bibliografię liczącą 227 ponumerowanych pozycji krajowych i zagranicznych (w tym 2 współautorskie pozycje Doktorantki).

Zasadnicza część rozprawy zawarta jest w rozdziałach 1-6. Wstęp rozprawy ma formę wprowadzenia do identyfikacji jej tematyki badawczej oraz wstępnie odnosi się do rodzajów połączeń klejowo-zgrzewanych stosowanych w budowie środków transportu. Podstawowa część rozprawy została zwieńczona wnioskami i uwagami końcowymi stanowiącymi podsumowanie podjętego wysiłku badawczego Doktorantki.

Rozprawa została, z niewielkimi zastrzeżeniami, napisana poprawnym językiem i spełnia standardy stawiane rozprawom doktorskim. Układ pracy jest przejrzysty, a podział treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały nie budzi większych zastrzeżeń. Terminologia i pojęcia stosowane w pracy są zasadniczo poprawnie zdefiniowane, chociaż Autorka nie uniknęła kilku błędów takich jak zamienne stosowanie pojęć wielkość i wartość. Materiały graficzne oraz tabele zamieszczone w pracy w sposób właściwy i czytelny przedstawiają rozważania Doktorantki dotyczące badania wpływu wybranych parametrów na właściwości połączeń klejowych i klejowo-zgrzewanych.

II. Ocena doboru tematu rozprawy

Współcześnie często stosowanym w strukturach środków transportu materiałem są stopy aluminium, w których elementy łączone są różnymi metodami wykorzystującymi tzw. połączenia mechaniczne. Jedną z technologii łączenia elementów ze stopów aluminium jest zgrzewanie, które w przypadku tych materiałów jest często realizowane jako punktowe lub liniowe zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny. Oprócz połączeń zgrzewanych, do łączenia elementów ze stopów aluminium wykorzystuje się również inne mechaniczne połączenia rozłączne i nierozłączne w tym połączenia klejowe. Zarówno połączenia klejowe jak i zgrzewane stosowane samodzielnie cechują się określonymi właściwościami, które mogą zostać polepszone, jeśli zastosuje się te połączenia jednocześnie, tworząc w ten sposób połączenie hybrydowe klejowo-zgrzewane. Dzięki temu uzyskuje się m.in. uszczelnienie połączeń zgrzewanych, zmniejszenie koncentracji naprężeń własnych w połączeniu, czy wzrost trwałości zmęczeniowej. Połączenia klejowo- zgrzewane mogą być wykonywane dwuwariantowo: poprzez naniesienie warstwy kleju i następnie przeprowadzenie zgrzewania i utwardzenie kleju (technika „weld-through”) lub wykonanie zgrzeiny a następnie wprowadzenie kleju w szczelinę i utwardzenie (technika „flow-in”). Pierwsza z technik, łatwiejsza w realizacji jest stosowana znacznie częściej, lecz cechuje się istotnymi wadami. Z kolei w technice „flow-in” problemem technologicznym jest proces wypełniania szczelin klejem po wykonaniu zgrzewania.

Całkowicie zgadzam się z opinią Doktorantki, że „z uwagi na zalety połączeń klejowo-zgrzewanych wykonanych techniką „flow-in” warto poddać analizie czynniki, które mogą wspomóc proces wypełniania klejem szczelin w zgrzewanych połączeniach zakładkowych”. Uważam, że w świetle analizy dostępnej literatury Doktorantka podjęła się istotnego zadania polegającego na ilościowym i jakościowym oszacowaniu wpływu stanu powierzchni łączonych elementów, lepkości tworzywa adhezyjnego oraz oddziaływania grawitacyjnego na wypełnienie szczelin w połączeniach zgrzewanych. **Reasumując, uważam, że podjęcie przez mgr inż. Annę Krawczuk problematyki oceny wpływu warunków grawitacyjnego wypełnienia klejem szczelin w połączeniach klejowo-zgrzewanych należy uznać za uzasadnione, a sformułowanie tematu rozprawy za poprawne.**

III. Analiza zakresu, celu i treści rozprawy

W przedstawionej do recenzji rozprawie Autorka podjęła się rozwiązania zagadnienia dotyczącego analizy warunków grawitacyjnego wypełniania szczelin w połączeniach klejowo-zgrzewanych stosowanych do łączenia elementów wykonanych ze stopów aluminium. Z przeprowadzonego przez Doktorantkę przeglądu literatury wynika, że połączenia klejowo-zgrzewane mogą być stosowane w budowie środków transportu, jednak niewiele opracowań dotyczy analiz połączeń wykonywanych metodą „flow-in”, a jest to metoda, która umożliwia

uzyskanie wyższej wytrzymałości niż w połączeniach wykonywanych metodą „weld-through” i zapewnia lepsze warunki tworzenia zarówno spoiny klejowej jak i połączenia zgrzewanego. Problemem ograniczającym stosowanie takich połączeń, który dostrzegła Doktorantka, są trudności związane z wypełnianiem szczelin w zgrzewanych punktowo połączeniach. Prawdłowo przeprowadzone przez Autorkę analizy literaturowe wykazały, że połączenia klejowo-zgrzewane wykonywane techniką „flow-in” zapewniają szczelność i wysoką wytrzymałość statyczną i dynamiczną, ale są stosowane rzadko ze względu na pracochłonność wynikającą m.in. z konieczności wypełniania szczelin klejem po wykonaniu zgrzewania. **Wnioski wynikające z krytycznego przeglądu literatury przeprowadzonego przez Doktorantkę uważam za właściwe.**

Na podstawie analizy stanu zagadnienia Doktorantka sformułowała hipotezy badawcze, które zakładają, że „możliwa jest poprawa skuteczności wypełniania klejem szczelin w zgrzewanych punktowo połączeniach zakładkowych wykonanych ze stopu aluminium poprzez odpowiednie ukształtowanie struktury geometrycznej łączonych elementów oraz wykorzystanie oddziaływania grawitacji jako czynnika wspomagającego proces wypełniania” oraz, że „skuteczność wypełniania klejem szczelin w zgrzewanych punktowo połączeniach zakładkowych jest silnie skorelowana z lepkością kleju”.

Postawione przez Doktorantkę hipotezy badawcze uważam za właściwe.

Zawartość poszczególnych rozdziałów pracy jest powiązana z tytułem rozprawy i stanowi jego rozwinięcie oraz odpowiada sformułowanym celom badawczym.

Wstęp (4 strony) (Rozdział I) stanowi wprowadzenie do problematyki badawczej podjętej w rozprawie, poprzez prezentację połączeń adhezyjnych i zgrzewanych a także klejowo-zgrzewanych stosowanych do łączenia elementów ze stopów aluminium. Autorka wymienia tu właściwości połączeń hybrydowych i podkreśla ich zalety, które powodują zainteresowanie tym rodzajem połączeń w przemyśle. We wstępie znajdują się również przesłanki, które skłoniły Doktorantkę do zajęcia się tematyką połączeń klejowo-zgrzewanych wykonywanych techniką „flow-in”. **Obszar badawczy przedstawiony przez Autorkę uważam za aktualny i istotny w kontekście łączenia elementów m.in. statków powietrznych.**

Rozdział II (46 stron) zawiera teoretyczne wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej. Autorka skupiła się w tym rozdziale na opisie podstawowych czynników wpływających na właściwości połączeń klejowych i klejowo-zakładkowych, szerzej charakteryzując te czynniki, które wywierają istotny wpływ na tworzenie spoiny klejowej, takie jak zjawiska adhezji i kohezji. Doktorantka trafnie zwróciła uwagę na równoczesne występowanie adhezji specyficznej i właściwej w poprawnie wykonanym połączeniu klejowym i właściwie wytypowała „mierniki oceny przygotowania powierzchni materiałów do procesu klejenia oraz, właściwości adhezyjnych takie jak: zwilżalność określana na

podstawie kąta zwilżania kleju, praca adhezji oraz swobodna energia powierzchniowa”. Ponadto Autorka zwróciła uwagę, że „bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na wartość kąta zwilżania jest chropowatość powierzchni”. Jest to o tyle istotne spostrzeżenie, że jego wykorzystanie pozwala kształtować kąt zwilżania powierzchni klejonej przez klej za pomocą zmiany chropowatości powierzchni. Na podstawie analizy literatury Autorka przedstawiła teoretyczne i praktyczne podstawy wyznaczania mierników właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej łączonych elementów.

Doktorantka na podstawie analizy literatury poprawnie scharakteryzowała również materiałowe, technologiczne, konstrukcyjne i eksploatacyjne czynniki, które należy uwzględnić, aby uzyskać dobre jakościowo połączenie klejowe. Zwróciła uwagę, że bardzo istotne jest przygotowanie powierzchni do klejenia, i że warunki przygotowania są różne dla różnych materiałów klejonych jak również zastosowanych klejów. W rozdziale tym Autorka przedstawiła również istotę oraz wagę przygotowania i warunków utwardzania spoiny klejowej, zwracając uwagę na czynniki związane z sieciowaniem kleju i wpływające na wytrzymałość utworzonej spoiny klejowej, takie jak temperatura czy ciśnienie utwardzania. Charakteryzując czynniki konstrukcyjne wpływające na właściwości połączeń klejowych, Doktorantka skupiła się przede wszystkim na połączeniach zakładkowych co jest zrozumiałe ze względu na użycie tego rodzaju połączeń w badaniach, jednak nie zaakcentowała tego jasno. Mgr inż. Anna Krawczuk przedstawiła także syntetycznie zjawisko grawitacji, ponieważ zauważyła możliwość wykorzystania siły grawitacji jako czynnika wspomagającego proces wypełniania szczelin w połączeniu klejowo-zgrzewanym.

Ze względu na temat rozprawy Doktorantka przedstawiała również literaturę analizę połączeń klejowo-zgrzewanych, uzupełniając wprowadzenie do tych połączeń zamieszczone we wstępie. W mojej opinii pewien niedosyt budzi niewielka ilość informacji na temat połączeń zgrzewanych wobec tak obszernej charakterystyki zamieszczonych połączeń klejowych. Doktorantka rozszerzyła prezentację połączeń klejowo-zgrzewanych wykonywanych technikami „weld-through” i „flow-in” uzasadniając zasadność stosowania tego typu połączeń, m.in. korzystniejszym rozkładem naprężeń w połączeniach hybrydowych czy wzrostem wytrzymałości (w odniesieniu do samodzielnych połączeń klejowych i zgrzewanych). **Większość analiz literaturowych dotyczących połączeń hybrydowych odnosi się do techniki „weld-through”, co również przekonuje o mniejszej popularności oraz mniejszej ilości informacji na temat połączeń wykonywanych techniką „flow-in” i uzasadnia wybór takiej tematyki przez Doktorantkę.**

Rozdział III (2 strony) zawiera sformułowane o analizę stanu zagadnienia hipotezy badawcze oraz cel i zakres pracy. Autorka przedstawiła dwie hipotezy badawcze, które zostaną zbadane w trakcie prowadzenia i analizy badań. **Stwierdzam, że postawione**

hipotezy i przyjęta koncepcja badań jest uzasadniona a zaproponowany zakres pracy właściwy.

Rozdział IV (68 stron) przedstawia metodykę oraz wyniki wszystkich przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej badań. Zakres zrealizowanych badań jest zbieżny z przyjętym zakresem pracy, chociaż zostały one przedstawione w nieco innej kolejności. W ramach badań eksperymentalnych Doktorantka przeprowadziła:

- badania lepkości wybranych kompozycji klejowych,
- analizę struktury geometrycznej powierzchni elementów ze stopu aluminium przeznaczonych do wykonania połączeń,
- badania wartości swobodnej energii powierzchniowej przygotowanych do badań elementów połączeń,
- badania nośności połączeń klejowych,
- analizę pola powierzchni wypełnienia szczelin w badanych połączeniach,
- badania nośności połączeń klejowo-zgrzewanych wykonanych techniką „flow-in”.

Doktorantka do badań wybrała połączenia zakładkowe elementów ze stopu aluminium EN AW-2017A, a do konstytuowania spoin klejowych w badanych połączeniach wytypowała klej na bazie polskiej żywicy epoksydowej Epidian 5 sieciowanej z użyciem trzech dedykowanych utwardzaczy: ET, IDA oraz Z-1. W celu modyfikacji lepkości stosowanych w badaniach tworzyw adhezyjnych Autorka zaproponowała wykorzystanie rozcieńczalnika do wyrobów epoksydowych TKB. W badaniach wykorzystano zatem 6 kompozycji klejowych.

Badanie lepkości zostało przeprowadzone przez Doktorantkę zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12092:2004 z wykorzystaniem wiskozymetru rotacyjnego. Prawidłowo podczas badań zwracano uwagę na czasy życia klejów określone przez producenta. W efekcie przeprowadzonych badań określono średnią lepkość wszystkich klejów oraz potwierdzono założenie Doktorantki o istotnym zmniejszeniu (o około 70%) lepkości wszystkich klejów przez 10% dodatek rozcieńczalnika TKB.

Strukturę geometryczną powierzchni elementów przeznaczonych do klejenia Autorka postanowiła kształtować poprzez obróbkę mechaniczną z wykorzystaniem włókniny ścierniej o gradacji 80, 180 i 320, w wyniku czego zmianie uległa chropowatość obrabianych powierzchni. Po obróbce, powierzchnie elementów odtłuszczano i poddawano badaniu wybranych przez Doktorantkę parametrów chropowatości. Autorka przedstawiła w pracy przykładowe zarysy chropowatości powierzchni, które potwierdzają odmienne struktury powierzchni po obróbce, ze zmniejszającymi się wysokościami nierówności dla włókniny o gradacji 180 i 320 w odniesieniu do powierzchni nie poddanych obróbce. Doktorantka zauważyła że zwiększenie liczby i wysokości nierówności powstałych w wyniku obróbki może

korzystnie wpływać na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych, jednak obróbka włókniną o większych gradacjach zmniejsza wartości wybranych parametrów chropowatości.

Stan energetyczny powierzchni przeznaczony do klejenia Doktorantka badała poprzez określenie swobodnej energii powierzchniowej na podstawie kąta zwilżania, który określano z wykorzystaniem oceny i analizy cyfrowego obrazu kropli naniesionej na powierzchni materiału. Stwierdzono, że obróbka mechaniczna powoduje zmniejszenie całkowitej energii powierzchniowej.

Badaniami weryfikującymi przyjęte przez Doktorantkę założenia były badania nośności połączeń klejowych zakładkowych wykonane w pierwszej kolejności na próbkach, których powierzchnie klejone nie były obrabiane mechanicznie. Specjalnie przygotowane próbki ze szczeliną o szerokości 0,12 mm (odpowiadającą średniej wartości szczeliny w przygotowanych połączeniach zgrzewanych) łączono za pomocą sześciu klejów dozowanych pipetą automatyczną do szczelin próbek pochylonych pod kątem 30 lub 60°. Wymiary próbki przedstawione przez Autorkę na rysunku zamieszczonym w pracy różnią się od wymienionych w tekście, co utrudnia ocenę wyników badań. Analiza statystyczna uzyskanych wyników umożliwiła Doktorantce sformułowanie stwierdzenia, że nośność połączeń w których elementy klejone nie były poddane obróbce mechanicznej wyznaczona w próbie rozciągania jest zależna od rodzaju zastosowanego kleju oraz kąta pochylenia próbek podczas wykonywania połączeń. Następnie Doktorantka poddała analogicznemu badaniu połączenia klejowe, w których powierzchnie łączonych elementów obrobiono przed klejeniem mechanicznie. Doktorantka zdecydowała, aby połączenia w tym etapie wykonać wyłącznie dwoma klejami – klejem o najwyższej lepkości spośród badanych (sieciovym utwardzaczem ET), oraz tym samym klejem z dodatkiem rozcieńczalnika TKB. W tym przypadku analiza statystyczna wykorzystująca testy wielokrotnych porównań wykazała m.in. brak wpływu kąta ustawienia próbek na nośność połączeń wykonanych klejem z dodatkiem rozcieńczalnika.

Doktorantka prawidłowo założyła, że wprowadzany do szczeliny klej może nie wypełniać jej w całości, zatem powierzchnie klejone mogą zostać niepokryte klejem i poddała wizualnej analizie przełomy połączeń, określając stopień pokrycia klejem oraz rodzaj zniszczenia. Po analizie rezultatów, Autorka zauważyła, że przeważająca większość połączeń uległa zniszczeniu adhezyjnemu, zaś stopień pokrycia klejem powierzchni nie poddanych obróbce mechanicznej przez kleje nierozcieńczone nie przekroczył 50%, a w przypadku klejów z dodatkiem rozcieńczalnika TKB był znacznie wyższy i dla niektórych klejów, klej pokrył całą klejoną powierzchnię. W przypadku próbek o powierzchniach klejonych obrobionych mechanicznie stopień pokrycia klejem był niższy. Doktorantka stwierdziła, że lepkość kleju jest najistotniejszym spośród analizowanych czynników wpływających na pole pokrycia powierzchni klejem.

Ostatnim etapem badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktorantkę były badania nośności połączeń klejowo-zgrzewanych wykonanych techniką „flow-in”. Próbkę zakładkową z pojedynczą centralną zgrzeiną ustawiano pod kątami 30, 40, 50 i 60° do poziomego podłoża i za pomocą automatycznej pipety wprowadzano klej do szczeliny. Autorka po analizie nośności i pola powierzchni pokrycia klejem próbek klejonych, zdecydowała w badaniach połączeń hybrydowych zastosować wyłącznie kleje dla których uzyskano nośność powyżej 2 kN oraz co najmniej 50% pokrycie klejem łączonych powierzchni – były to trzy kleje z rozpuszczalnikiem TKB. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorantka stwierdziła, że rodzaj zastosowanego kleju istotnie wpływa na nośność badanych połączeń, natomiast badania nie potwierdziły istotnego wpływu kąta ustawienia próbek oraz obróbki mechanicznej na badany parametr.

Wszystkie wyniki badań eksperymentalnych analizowano z użyciem oprogramowania Statistica pod kątem normalności rozkładu z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka, a następnie przeprowadzono analizę równości średnich wartości nośności stosując analizę ANOVA/MANOVA oraz dokładniejsze analizy różnic między średnimi z poszczególnych grup, wykorzystując testy wielokrotnych porównań.

Biorąc pod uwagę spektrum przeprowadzonych i zaprezentowanych przez Autorkę badań, rozdział IV uważam za najbardziej wartościowy w całej rozprawie.

Rozdział V (17 stron) prezentuje analizę wyników badań wykonanych w przez Doktorantkę. Autorka zdecydowała przedstawić graficznie uzyskane wyniki w postaci względnej, co powinno ułatwić ich analizę. Interpretacja wyników badań została oparta głównie na wynikach analizy statystycznej i Doktorantka starała się znaleźć w nich odpowiedzi na potwierdzenie lub odrzucenie stawianych w pracy hipotez.

Autorka stwierdza, że w połączeniach klejowych, w których powierzchnie klejone pozostawiono bez obróbki występuje wpływ zmiany lepkości kleju na nośność badanych połączeń i wypełnienie szczeliny. W tych samych połączeniach, nie zaobserwowano jednoznacznego wpływu kąta ustawienia próbek do klejenia na nośność uzyskanych połączeń. W przypadku połączeń elementów obrabianych mechanicznie Doktorantka potwierdziła wpływ lepkości kleju oraz zastosowanej obróbki na nośność badanych połączeń i trafnie zauważyła, że obróbka powierzchni próbek włókniną o gradacji 80 najkorzystniej wpływa na uzyskaną w badaniach nośność połączenia. Ponadto Autorka zaobserwowała, istotne z punktu widzenia adhezji mechanicznej zmniejszenie obserwowanych w układzie 2D i 3D parametrów chropowatości, natomiast zarówno w tym przypadku jaki i przy analizie swobodnej energii powierzchniowej nie ustosunkowała się do próbek w których powierzchnie obrabiano włókniną o gradacji 80, gdzie uzyskano najwyższą nośność. Autorka zauważyła, że w przypadku powierzchni nieobrabianych i obrabianych, zmniejszenie lepkości kleju poprzez dodanie rozpuszczalnika TKB w każdym przypadku powoduje wzrost wartości pola

powierzchni pokrycia klejem zakładki, natomiast na stopień pokrycia klejem nie ma (za wyjątkiem jednego kleju) wpływu kąt pochylenia próbki podczas klejenia. Obserwacja próbek umożliwiła także dostrzeżenie spływania niektórych klejów poza spoinę lub gromadzenia się w miejscu aplikacji, co jak stwierdza Autorka może wpływać na wartość nośności połączenia. Analiza wyników badania nośności połączeń klejowo-zakładkowych jest bardzo oszczędna. Doktorantka stwierdziła tylko, że „aplikacja kleju, odpowiednie przygotowanie powierzchni próbek oraz ustawienie ich pod kątem ma wpływ na wartość siły niszczącej połączenie” i przedstawiła opisowo zawartość wykresu prezentującego wyniki badania nośności, bez podjęcia próby wyjaśnienia wyników.

Rozdział VI (5 stron) zawiera podsumowanie rozprawy i wnioski wynikające z jej realizacji. Doktorantka właściwie wnioskuję, iż w oparciu o analizę wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić istnienie możliwości poprawy skuteczności wypełniania szczelin klejem w zgrzewanych punktowo połączeniach zakładkowych stopu aluminium. Wykazała, że zmiana lepkości klejów istotnie wpływa na stopień wypełnienia klejem szczelin w połączeniach zgrzewanych oraz na nośność badanych połączeń klejowych i klejowo-zgrzewanych. Potwierdziła również wpływ siły grawitacji na nośność niektórych konfiguracji połączeń. Oprócz uwag końcowych Doktorantka przedstawiła streszczenie analizy niektórych wyników oraz ogólne wnioski, stanowiące podsumowanie rozprawy.

Ostatnimi elementami pracy są: wykaz ilustracji, wykaz tabel, spis literatury (liczący 227 pozycji) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

IV. Ocena rozprawy

Uważam, że zasadniczym i najważniejszym dorobkiem mgr inż. Anny Krawczuk jest określenie czynników wpływających na stopień wypełnienia szczeliny klejem w połączeniu klejowo-zgrzewanym wykonanym techniką „flow-in”. Uzyskane wyniki wskazują, że przy konstytuowaniu takich połączeń koniecznie należy zwracać uwagę na lepkość użytego kleju i warto poddawać ten parametr modyfikacji celem otrzymania jak najwyższego stopnia pokrycia klejem powierzchni elementów klejonych. Poza tym Doktorantka potwierdziła również wpływ siły grawitacji na nośność niektórych połączeń klejowych, jednak w większości przypadków połączeń klejowych i dla wszystkich połączeń klejowo-zgrzewanych uzyskane wyniki nie potwierdzają tego wpływu. Oczywiście jest to również cenne spostrzeżenie. Dorobek ten stanowi wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Dokonując oceny układu rozprawy należy zaznaczyć, że jej ogólna formuła i zakres wynikają z realizacji celów rozprawy. Z punktu widzenia postawionych hipotez badawczych, przyjęta koncepcja badań jest wystarczająco uzasadniona a zastosowane narzędzia i przyjęte metody badawcze są do niej adekwatne.

Uważam, że zarówno struktura rozprawy mgr inż. Anny Krawczuk jak i sposób opracowania materiału, a także forma przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań pozwalają stwierdzić, że cele rozprawy zostały osiągnięte.

W mojej opinii zarówno materiał literaturowy jak i badawczy zostały przez Doktorantkę wykorzystane właściwie. Autorka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w obszarze połączeń klejowych i hybrydowych klejowo-zgrzewanych, znajomością przedmiotu badań, umiejętnością właściwego ujęcia rozpatrywanego problemu i jego rozwiązania. Wybrana forma rozprawy oraz sposób opracowania materiału empirycznego a także sposób przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań są poprawne dla tego rodzaju prac.

V. Uwagi szczegółowe

Zawartość merytoryczną rozprawy oceniam pozytywnie, jednak mimo takiej oceny, podczas czytania tekstu pracy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi krytyczne.

1. W analizie literatury Doktorantka w wielu miejscach stosuje odniesienia do literatury zbyt ogólne, czyli obejmujące całe akapity, podczas gdy w mojej opinii powinny być bardziej szczegółowe i odnosić się do konkretnych, nawet pojedynczych informacji zamieszczonych w tekście pracy.
2. Oznaczenia stosowane na niektórych rysunkach (np. rys. 3) różnią się od oznaczeń stosowanych w tekście i odnoszących się do tych rysunków.
3. W tekście są zamiennie stosowane terminy wielkość i wartość (rys. 6, str. 50, str. 139).
4. Proszę o wyjaśnienie, czy poprawne jest następujące stwierdzenie (str. 29) „zazwyczaj jednak tam, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość połączenia oraz odporność na działanie wysokich temperatur stosowane są kleje termoplastyczne”.
5. Na str. 30 Autorka stwierdziła, że „odtłuszczanie może poprawić właściwości adhezyjne oraz wytrzymałość utworzonego połączenia” - czy znane są przypadki, kiedy odtłuszczanie nie poprawia tych właściwości?
6. Podrozdział 2.3.3 ma tytuł „Sposoby przygotowania, nanoszenia i warunki utwardzania masy klejowej”, natomiast w tekście nie ma wzmianki o nanoszeniu kleju.
7. Na str. 37 użyto sformułowań „wyższe właściwości plastyczne” oraz niższe właściwości plastyczne – co autorka rozumie pod tymi pojęciami?
8. Na str. 37 umieszczono akapit o badaniach połączeń typu „pióro-wpust” – w jakim celu?
9. Zbyt dużym uogólnieniem jest stwierdzenie, iż „przy większości dostępnych na rynku klejów... zmiana wytrzymałości doraźnej połączenia następuje w temperaturze około 100° C”.

10. W opisie właściwości hybrydowych połączeń klejowo-zgrzewanych warto byłoby podawać jaką metodą były wykonywane te połączenia (weld-through czy flow-in), ponieważ jest to istotne w kontekście realizowanej pracy – w opisach wielu badań nie ma takiej informacji.
11. Sformułowanie „wytrzymują 4-krotnie wyższą siłę niszczącą niż połączenia...” jest niepoprawne.
12. Na str. 54 jest informacja, że „przyspieszenie dośrodkowe Księżyca jest 602 razy mniejsze niż przyspieszenie g”, co nie jest prawdą.
13. W tabeli 6 użyto błędnej jednostki przewodności cieplnej stopu aluminium.
14. W tabeli 10 podano wartości 7 parametrów chropowatości powierzchni – uważam, że jest ich zbyt wiele, ponieważ trudno je analizować w takiej liczbie, a poza tym niektóre w ogóle nie wpływają na właściwości adhezyjne.
15. Proszę wyjaśnić, czy sprawdzono wpływ linek dystansowych na wytrzymałość połączeń klejowych oraz ile czasu zajmowało dozowanie kleju do szczelin?
16. Uważam, że celowym byłoby poddanie badaniom – w celu porównania – próbek zakładkowych sklejonych przy użyciu zwyczajowej metodyki, co umożliwiłoby uzyskanie informacji o wytrzymałości próbek klejonych w typowy sposób i porównanie ich z wynikami uzyskanymi podczas badań realizowanych na potrzeby pracy.
17. W tabeli 16 brakuje wyników dla próbki B łączonej klejem E5/ET/100:18.
18. Podrozdział 4.5 ma błędny tytuł. Powinno być (analizując jego zawartość) „Analiza pola powierzchni wypełnienia i typu zniszczenia”.
19. W tabelach 19 i 20 przedstawiono typy zniszczeń badanych połączeń, jednak nie podano czy powierzchnie były obrabiane. Z kolei w opisie tabeli 21 podano, że dotyczy ona połączeń elementów obrabianych mechanicznie, ale zawiera także wyniki analiz połączeń z powierzchniami nieobrabanymi.
20. W wyniku analiz typów zniszczeń stwierdzono, (str. 106) że „... złomy wykazują model uszkodzenia adhezyjnego z możliwymi oderwaniami masy kleju” – proszę o wyjaśnienie o czym to świadczy?
21. W tabeli 22 zawarto informację, że pole powierzchni pokrycia klejem może wynieść 1000 mm². Na stronie 79 podano, że wymiary próbki wynoszą 100x20x2, co jest nieprawdą. Na stronie 80 (rys. 19) podano, że zakładka ma wymiar 20x20 mm. Z kolei na stronie 81 podano, że przyjęto zakładkę o długości 40 mm. Z żadnego z tych wymiarów nie można uzyskać pola powierzchni połączenia równego 1000 mm² – jakie zatem wymiary miały próbki – proszę o wyjaśnienie.
22. Dlaczego wyniki analizy ANOVA/MANOVA o wpływie kąta ustawienia próbek (str. 112) są sprzeczne z wynikami dotyczącymi tych samych badań analizowanych z wykorzystaniem testu Tukeya (str. 116 – pierwszy wniosek).

23. W tabeli 30 pojawia się wynik nośności połączeń zgrzewanych, natomiast w tekście pracy nie wspomniano o badaniach połączeń zgrzewanych.
24. W mojej opinii tabela 30 jest zbyt obszerna (6 stron) do zamieszczenia w głównej części pracy i powinna zostać przeniesiona do załącznika.
25. Brak analizy wpływu obróbki włókniną o gradacji 80 na parametry chropowatości (str. 133), chociaż przy obróbce tą włókniną połączenia klejowe mają najwyższą nośność i analiza wydaje się potrzebna.
26. W kończącym pracę rozdziale pojawia się ogólne podsumowania badań i analiz wyników, które w mojej opinii są w tym miejscu zbyt szczegółowe, podobnie jak wnioski, które chociaż interesujące i celowe także są w niektórych miejscach za bardzo szczegółowe.

VI. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Przedstawiona do recenzji pracę doktorską oceniam pozytywnie i stwierdzam, że została przygotowana na dobrym poziomie merytorycznym. Zawarte w pracy treści dotyczą problemów związanych z wykonywaniem połączeń hybrydowych klejowo-zgrzewanych elementów ze stopu aluminium. Treści merytoryczne i poziom przeprowadzonych badań świadczą o wystarczającej dojrzałości naukowej, wiedzy i umiejętnościach Doktorantki.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny dorobek naukowy Doktorantki, a rezultaty pracy mogą z powodzeniem zostać wykorzystane w praktyce.

Uwagi krytyczne, nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Na taką ocenę ma wpływ fakt potwierdzenia postawionych hipotez i realizacji zakładanych celów badawczych.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa przedstawiona do recenzji **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Kandydatki w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 z późn. Zmianami).

Stawiam zatem wniosek o przyjęcie opracowania przedstawionego do recenzji jako rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Krawczuk na stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i dopuszczenia jej do publicznej obrony.



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Krawczuk nt.
„Analiza warunków grawitacyjnego wypełnienia szczelin w połączeniach klejowo-
zgrzewanych”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Naukowej Inżynieria Mechaniczna dra hab. inż. Jarosława Bieniasia – pismo
nr RDN/IM/145/2021 z dnia 25 lutego 2022 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 180 stronach maszynopisu i zawiera poza spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, wykazem: ilustracji i tabel, oraz wstępem:

- rozdział drugi, w którym Doktorantka dokonała przeglądu literatury dotyczącej: zjawiska adhezji, w tym adhezji mechanicznej i specyficznej, mierników przygotowania warstwy materiału do klejenia (zwilżalność, praca adhezji oraz swobodna energia powierzchniowa) oraz czynników, w tym: materiałowych, technologicznych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych mających wpływ na właściwości wytrzymałościowe i użytkowe połączeń adhezyjnych. W rozdziale tym zaprezentowano również informacje na temat połączeń zgrzewano-klejowych (hybrydowych), technologii ich przygotowania, pozytywnego wpływu obecności kleju w hybrydowym węzle połączeniowym oraz zjawisk wspomagających proces wypełniania szczeliny przez klej. Na bazie analizowanej literatury sformułowano także wnioski wynikające z przeglądu literatury,

- rozdział trzeci zawierający hipotezę, cel i zakres pracy,
- rozdział czwarty opisujący metodyki szeregu badań eksperymentalnych oraz ich wyniki dotyczące wykorzystywanych w testach klejów, łączonych elementów ze stopu aluminium serii EN AW-2017A oraz połączeń klejowych i hybrydowych,
- rozdział piąty, w którym przedstawiono obszerną analizę wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych,



- rozdział szósty zawierający wnioski z przeprowadzonych badań i analiz oraz uwagi końcowe,

- wykaz cytowanej literatury, zawierający 227 pozycji,

- streszczenie w języku polskim i angielskim.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

W przedłożonej pracy Doktorantka analizowała temat dotyczący efektywnego wprowadzania do szczelin połączeń zgrzewanych tworzywa adhezyjnego i w ten sposób formowania połączeń zgrzewano-klejowych. Praca została przygotowana na bazie licznych badań eksperymentalnych realizowanych w wielu etapach, począwszy od badań samych klejów, poprzez geometryczne i energetyczne właściwości powierzchni elementów łączonych, a skończywszy na badaniach nośności zarówno połączeń klejowych jak i połączeń zgrzewano-klejowych. Wiedza o tym, że połączenia hybrydowe, w tym zgrzewano-klejowe cechują korzystne właściwości wytrzymałościowe i użytkowe w porównaniu do samych połączeń klejowych czy zgrzewanych jest powszechnie znana z dostępnych publikacji. Wykorzystywane narzędzia obliczeniowe oparte np. na metodzie elementów skończonych również potwierdzają pozytywny wpływ tworzywa adhezyjnego na rozkłady naprężeń w zgrzeinach. Istotnym problemem jest jednak efektywne rozmieszczenie tworzywa adhezyjnego pomiędzy wcześniej zgrzewanymi elementami w szczelinie utworzonej pomiędzy łączonymi elementami. Doktorantka przeprowadziła wieloetapowe badania eksperymentalne w celu zdefiniowania czynników materiałowych, konstrukcyjnych i technologicznych, które mogą mieć istotny wpływ na efektywne przygotowanie połączeń hybrydowych techniką, która w literaturze jest określana *flow-in*. Właściwy dobór tworzywa adhezyjnego i odpowiednie przygotowanie powierzchni łączonych elementów mają zasadnicze znaczenie w kontekście wytwarzania połączeń hybrydowych, które charakteryzują korzystne właściwości wytrzymałościowe (w tym m.in. ich nośność) jak i właściwości użytkowe (szczelność, trwałość zmęczeniowa). Podejmowanie problematyki poszukiwania korelacji pomiędzy technologicznymi zabiegami przygotowania klejów i metod ich wprowadzania do szczeliny oraz mechanicznym przygotowaniem powierzchni łączonych elementów a nośnością samych połączeń, i to zarówno klejowych jak i hybrydowych, uważam za celowe i użyteczne.

3. Ocena rozprawy

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru metod i zakresu badań, opracowania i prezentacji wyników oraz badawczego wkładu Doktorantki zaliczam:

a) podjętą tematykę,



- b) opracowanie rozbudowanego planu realizacji badań eksperymentalnych i metodyki statystycznej analizy wyników,
- c) wieloaspektowe i wieloetapowe eksperymentalne badania porównawcze klejów, powierzchni łączonych elementów oraz połączeń klejowych i hybrydowych,
- d) zdefiniowanie czynników technologicznych związanych z przygotowaniem masy klejowej i powierzchni łączonych elementów mających istotny wpływ na nośność połączeń klejowych i hybrydowych,

Doktorantka powołuje się na 227 publikacji w tym większość o charakterze naukowym, co jest dużą liczbą w wypadku pracy doktorskiej. Analiza literatury jest przeprowadzona rzetelnie i dotyczy problematyki formowania połączeń klejowych, które przy okazji są również obiektem badań i także połączeniem wykorzystywanym w węźle hybrydowym. Wnioski z przeprowadzonej analizy literatury dobrze się komponują z postawioną hipotezą badawczą i celami pracy.

Recenzowana praca wnosi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam zdefiniowanie parametrów technologicznych tworzywa adhezyjnego i parametrów energetycznych oraz geometrycznych powierzchni łączonych elementów mających wpływ na proces wypełnienia klejem szczeliny połączeń zgrzewanych oraz wykazanie korelacji między parametrami klejów i parametrami powierzchni łączonych elementów a nośnością połączeń zgrzewano-klejowych. Przedstawiona praca, w tym liczba wykonywanych testów z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi pomiarowych, świadczy o przygotowaniu Doktorantki do planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, co stanowi dobrą podstawę do samodzielnego wykonywania dalszych badań naukowych. Lektura całości rozprawy sprawia bardzo pozytywne wrażenie. Proporcje poszczególnych części pisemnego opracowania są właściwie dobrane, a treści w poszczególnych rozdziałach wzbogacone są prawidłowo dobranymi ilustracjami.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób przejrzysty i logiczny, nie mam również uwag co do prowadzonego eksperymentu oraz poprawności wnioskowania. W ramach dyskusji publicznej chciałbym dowiedzieć się więcej o właściwościach kleju mieszanego z rozpuszczalnikiem – być może Doktorantka ma wiedzę czy i jak istotny był wpływ rozpuszczalnika na właściwości wytrzymałościowe wykorzystywanych klejów w stanie utwardzenia (np. modułu sprężystości podłużnej kleju)? Dodatkowo po lekturze pracy nasuwa się pytanie czy podobnego efektu związanego ze zmianą lepkości kleju przed jego aplikacją do połączenia nie można uzyskać podgrzewając tworzywo np. do 50°C? Być może takie



rozwiązanie jest mało efektywne technologicznie? Uprzejmie proszę Doktorantkę o krótki komentarz w ww. zapytaniach.

Przy lekturze pracy zauważyłem kilka pomyłek i niezręczności językowych, które nie mają istotnego wpływu na pozytywny odbiór pracy, ale być może pomogą Doktorantce w przygotowywaniu kolejnych pisemnych opracowań:

- zamiast wyrażen: „klejenie posiada” lub „połączenia hybrydowe...posiadają” – powinno być: „klejenie ma”, „połączenia hybrydowe...mają” (str. 9, 10),
- str. 53 powinno być: „podać analizie czynnik”,
- tabela 12 - zamiast „ilości powtórzeń” powinno być „liczba powtórzeń” - str. 82,
- tabela 22 – wypełnienie klejem pola powierzchni zakładki – 102% - powinno być 100%.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zakres i poziom recenzowanej pracy doktorskiej, jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Anny Krawczuk do publicznej obrony Jej rozprawy.

STRESZCZENIE

Jednym z obranych kierunków rozwoju przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego jest wykorzystywanie połączeń hybrydowych klejowo-zgrzewanych w celu zapewnienia oczekiwanych właściwości mechanicznych, większej trwałości i niezawodności konstrukcji. Hybrydowe technologie montażu elementów łączą w sobie korzystne cechy obu technologii, jednak wymagają nadal zbadania i rozwiązania szeregu problemów technicznych. Z tego względu rozprawa doktorska podejmuje problematykę połączeń hybrydowych zgrzewanych punktowo wzmacnianych klejem epoksydowym wykonywanych metodą „flow-in”. W pracy przedstawiono stan zagadnienia dotyczący procesu klejenia w szczególności metod oceny właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej oraz analizę wpływu czynników materiałowych, technologicznych, konstrukcyjnych jak również warunków eksploatacyjnych na jakość połączenia adhezyjnego.

Przedstawiony przegląd literatury dotyczący połączeń hybrydowych oraz wpływu różnych parametrów na wytrzymałość statyczną i dynamiczną tego połączenia wskazuje, że metoda „flow-in” pozostaje nadal niezbadanym obszarem. Z tego względu w pracy skupiono się na przeanalizowaniu czynników, które mogą wspomóc proces wypełniania klejem szczelin w zgrzewanych punktowo połączeniach zakładkowych wykonanych ze stopu aluminium metodą „flow-in” podwyższając równocześnie wytrzymałość takiego połączenia. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych sformułowano wnioski dotyczące wpływu ukształtowania struktury geometrycznej łączonych elementów, lepkości stosowanej kompozycji klejowej oraz wykorzystania oddziaływania grawitacji na wytrzymałość utworzonego połączenia oraz wypełnienie szczeliny powstałej między łączonymi elementami w procesie zgrzewania punktowego.

Słowa kluczowe: *połączenia hybrydowe, połączenia klejowo-zgrzewane, wytrzymałość na rozciąganie, blachy ze stopu aluminium*