

Kraków 2025-07-12

dr hab. inż. Tomasz MACHNIEWICZ, prof. AGH
Katedra Projektowania i Eksploatacji Maszyn
Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana KAROLEWSKIEGO

pt.: *„Wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość złącza klejonego stosowanego w połączeniach elementów o różnych właściwościach mechanicznych”*

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 8 maja 2025, w sprawie powołania recenzentów przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

1. Tematyka i ogólna charakterystyka rozprawy

Tytuł rozprawy doktorskiej wskazuje na badania złączy klejonych, ze szczególnym uwzględnieniem połączeń elementów o różnych właściwościach mechanicznych. Połączenia klejone charakteryzują się ciągłym przenoszeniem obciążeń na powierzchni styku łączonych elementów. W przypadku klasycznych połączeń zakładkowych lub nakładkowych, obciążenia są przekazywane stopniowo wzdłuż długości połączenia, co prowadzi do działania różnych sił wewnętrznych, a w konsekwencji nierównych odkształceń łączonych elementów w tych samych przekrojach poprzecznych. Wywołane tym różnice przemieszczeń powierzchni przylgowych tych elementów prowadzą do nierównomiernego rozkładu naprężeń w warstwie kleju, z wyższymi ich wartościami występującymi w rejonach końcowych zakładki. Zjawisko to intensyfikuje się wraz ze wzrostem długości zakładki i prowadzić może do powstania lokalnych przeciążeń i inicjacji uszkodzeń skleiny na obu jej końcach. Mechanizm

ten jest szczególnie istotny i tym bardziej ciekawy, kiedy nierównomierność odkształceń prowokowana jest nie tylko różnicą sił wewnętrznych działających w obu łączonych elementach, ale dodatkowo różnymi właściwościami mechanicznymi tych elementów, bo to bezpośrednio decyduje o ich sztywności. W takim kontekście temat połączeń klejowych elementów o różnych właściwościach mechanicznych podejmowany jest w publikacjach naukowych i tak rozumiany temat przedmiotowej rozprawy uważam za ciekawy i ważny. Choć zagadnienie wytrzymałości połączeń klejonych było przedmiotem badań od wielu lat, to postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej – obejmujący produkcję nowych materiałów, kompozytów i klejów – w połączeniu z rozwojem nowoczesnych technik badawczych, zarówno eksperymentalnych, jak i numerycznych sprawia, że temat ten jest wciąż interesujący pod względem naukowych, a przy tym ma istotny aspekt praktyczny. Świadczą o tym z jednej strony liczne, nowe publikacje dotyczące tej tematyki, a równocześnie trwała już obecność technologii klejenia w różnych sektorach przemysłu, szczególnie związanych z budownictwem i transportem. W pełni uzasadnia to celowość podjęcia tematu rozprawy.

Praca ma postać monografii formatu A4 i składa się z sześciu rozdziałów rozmieszczonych na niemal 100 stronach. Nie jest więc bardzo obszerna, szczególnie, że mimo zewnętrznie dużego formatu użyte pole zadruku (125 mm x 200 mm) jest typowe dla ekonomicznego formatu B5 (163 mm x 235 mm). Pierwszy rozdział – *wstęp* (2 strony) – prezentuje genezę pracy, a następnie jej cel i zakres. Rozdział 2 (16 stron) poświęcony jest analizie literatury, zaś pozostałe rozdziały (81 stron) dotyczą własnych badań Doktoranta. Całość zamyka *spis literatury*, oraz *streszczenia* w języku polskim i angielskim.

Podjęty temat, oraz zastosowane metody badawcze, tj. monotoniczne testy wytrzymałościowe oraz badania trwałości połączenia zawiasu meblowego, kwalifikują przedstawioną pracę do dyscypliny *inżynieria mechaniczna*.

2. Sformułowanie celu pracy

Trzeba przyznać, że omówiony wyżej temat pracy jest bardzo ogólny i niewątpliwie należało go zawęzić formułując odpowiednio cel i zakres pracy. Nie mogę jednak uznać za właściwą skalę z jaką zostało to zrobione w ocenianej rozprawie. Po półtorastronicowym wstępie, który dość nieoczekiwanie skoncentrował się wyłącznie na problemach i wyzwaniach przemysłu meblarskiego, jako cel pracy podano: „*zbadanie możliwości zastąpienia złącza śrubowego stosowanego do mocowania zawiasów meblowych, złączem*

klejonym stosowanym do połączenia materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych, tj. zawiasu stalowego z płytą drewnopochodną". Można to oczywiście potraktować wyłącznie jako stylistyczną niezręczność, ale generalnie już samo sformułowanie, że „*celem naukowym pracy jest zbadanie [czegoś]*” nie jest precyzyjne – badanie nie jest celem samo w sobie. Pomijając jednak tę nieścisłość, tego typu cel pracy byłby zrozumiały, gdyby chodziło o doktorat wdrożeniowy, realizowany we współpracy np. z producentem mebli, ale wtedy też i oczekiwania dotyczące pracy byłyby zupełnie inne. Wybór płyty meblowej jako drugiego – w parze ze stalą – elementu połączenia klejowego mocno utrudnia realizację podjętego tematu i szansę na uzyskanie wyników o ogólnym charakterze. Bazę użytych płyt CDF stanowią płyty HDF o wysokiej gęstości, pokryte kilkoma warstwami filmu melaminowego. Zamiast więc połączenia litych materiałów, których powierzchnię można swobodnie obrabiać, wybrany został materiał niejednorodny, w dodatku pokryty laminatem. Tym samym, badane dalej połączenie klejone „stal – płyta CDF” obejmuje w rzeczywistości kilka warstw sklejin, których wpływu na wypadkowe właściwości złącza nie da się praktycznie rozdzielić. Tematyka opisana tak sformułowanym celem pracy („*zbadanie możliwości zastąpienia złącza śrubowego złączem klejonym*”) nie jest też zgodna z jej tytułem („*wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość złącza klejonego stosowanego w połączeniach elementów o różnych właściwościach mechanicznych*”). W miejsce ogólnego i – jak napisano wcześniej – szerokiego problemu, obszar zainteresowań został zredukowany do zaproponowanego połączenia jednego modelu zawiasu i jednego rodzaju płyty meblowej. Użyte w tym rozwiązaniu połączenie klejone reprezentuje bardzo specyficzną parę materiałową, a jego integralność zależy być może w głównej mierze, nie tyle od naprężeń stycznych, a od naprężeń odrywających działających w sklecinie, które w żadnej części pracy nie są rozważane.

3. Analiza literatury

Rozdział 2, zajmujący 16 stron, poświęcony jest analizie literatury, której spis obejmuje 95 pozycje. Jak na obecne standardy – nie jest to zbyt wiele. Omawiane w tym rozdziale zagadnienia uwzględniają: charakterystykę oraz badania płyt meblowych, charakterystykę okuć meblowych oraz charakterystykę połączeń klejowych, z opisem procesu klejenia, zastosowania połączeń klejowych w meblarstwie, metod kontroli jakości, rodzajów uszkodzeń i wreszcie norm określających warunki badań tych połączeń. Także w tym

rozdziale znalazła swoje odzwierciedlenie niespójność tematu pracy z jej celem. Przegląd danych literaturowych dotyczy połączeń różnorodnych materiałów. Przykładowo, punkt 2.4 (*Połączenia klejone*) najczęściej przywołuje publikacje [30, 31] dotyczące blach ze stopu aluminium [30] oraz adhezyjnych połączeń metali [31]. Podobnie literatura przywoływana w punkcie 2.4.2 (*Połączenia klejone w meblarstwie*) dotyczy w szczególności: regeneracji konstrukcji samolotów (ze stopów aluminium) [51], projektu i montażu drewnianego budynku mieszkaniowego w Norwegii [52], zastosowania drewna klejonego w konstrukcji budynków w krajach zachodnich [53], połączenia szkła i innych materiałów (ale nie drewna) za pomocą klejów utwardzanych promieniami UV [54], połączeń klejowych twardych stopów ze stalą [55], wpływu grubości elementów (ze stopu PA9) na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejonego [65], itp. Tematy te nie mają związku z celem pracy, choć mieszczą się w jej tytule. Najpoważniejsze jednak moje zastrzeżenie *a propos* przeglądu literatury jest takie, że koncentruje się on wyłącznie na kwestiach techniczno – inżynierskich. Przegląd ten pomija zupełnie przywołane na wstępie recenzji mechanizmy nierównomiernych odkształceń łączonych obiektów, które są kluczowe do zrozumienia problemu wytrzymałości złączy klejowych elementów o różnych właściwościach mechanicznych. Zupełnie został też pominięty temat modelowania tego typu połączeń, choć tu przywołać by można dziesiątki analitycznych i numerycznych modeli jakie zostały zaproponowane i opisane w literaturze.

4. Badania eksperymentalne

Obiekt badań, w sposób korespondujący ze sformułowanym celem pracy, przedstawiony został na wstępie rozdziału 3, w postaci zestawienia rysunku „*złacza śrubowego stosowanego do mocowania zawiasów*” (rys. 3.1a) oraz zaproponowanego „*złacza z wykorzystaniem połączenia klejonego*” (rys. 3.1b), któremu poświęcono ocenianą pracę. Zwraca uwagę arbitralność tej propozycji. To oczywiście kwestia dyskusyjna, jednak w mojej ocenie proponowane rozwiązanie (rys. 3.1b) jest cięższe, droższe, bardziej kłopotliwe pod względem technologicznym, a także mniej estetyczne w porównaniu z oryginałem (rys. 3.1a). Zgodnie z przedstawionym dalej opisem i wynikami, Doktorant wykonał 12 testów statycznego rozciągania oraz 36 testów trójpunktowego zginania próbek płyt CDF. Próby statycznego rozciągania powtarzano trzykrotnie dla każdej z 4 rozważanych grubości płyty (6,4 mm, 8,4 mm, 10,4 mm, 12,4 mm). Z tą samą liczbą powtórzeń i dla tego samego szeregu

grubości wykonano próby statycznego zginania, rozważając dodatkowo, oprócz próbek gładkich, także próbki w których wykonano otwory (jak pod wkręty zawiasów), oraz próbki do których te zawiasy przykręcono.

Główna część badań doświadczalnych zrealizowanych w ramach pracy, to przedstawione w rozdziale 4 statyczne próby ścinania połączeń dwuzakładowych. Plan badań obejmował łącznie 28 serii po 3 próbki. Badano połączenia w układzie „płyta CDF – stal – płyta CDF” oraz „stal – stal – stal”. Jako zmienne stanu warstwy wierzchniej połączenia po stronie stali (S235) uwzględniono powierzchnie: chromowane, niklowane, nieszlifowane, oraz szlifowane papierem ściernym P40 oraz P80. Po stronie płyt CDF uwzględniono 4 jej grubości (6,4 mm, 8,4 mm, 10,4 mm, 12,4 mm), a przy tym powierzchnie nieszlifowane oraz szlifowane papierem P40 i P80. Wszystkie połączenia wykonano z użyciem tego samego kleju epoksydowego *Henkel Pattex Epoxy*. Montażu połączeń dokonywano za pomocą specjalnie zaprojektowanych i wydrukowanych przyrządów (rys. 4.5). Dla różnych kombinacji wymienionych wcześniej zmiennych stosowano dwa różne dociski klejonych powierzchni (opisane jako: „1 kg” i „2 kg”). W tym aspekcie niepokój budzi opis: *„na łączonych elementach umieszczano odważnik o średniej masie 1002,93 g lub 2004,73 g, który pozwalał na zapewnienie stałej siły docisku. Obciążenie rozkładało się na powierzchnię klejoną wynoszącą 100 mm² oraz podporę o powierzchni 600 mm², co w przeliczeniu na powierzchnię samej spoiny klejowej dało nacisk wynoszący odpowiednio 143,28 g / 100 mm² i 286,39 g / 100 mm²”*. Być może to wyjaśnia anomalie, jakie pojawiły się w wynikach dotyczących wpływu docisku na nośność złączy klejonych, obserwowaną przy różnych grubościach płyt CDF (por. Tabela 4.8 – 4.11).

Ostatnim rodzajem zrealizowanych w pracy eksperymentów są przedstawione w rozdziale 5 badania trwałości połączenia zawiasu (*Blum Expando T*) z płytą CDF. Badaniu poddano trzy warianty połączeń, tj. połączenie śrubowe zawiasu z płytą o grubości 12,4 mm oraz zaproponowane w pracy połączenia zawiasu za pośrednictwem płytki stalowej przyklejanej do płyt CDF o grubości 6,4 mm oraz 12,4. Dla każdej z tych serii przeprowadzono badanie trzech próbek, wykorzystując w tym celu specjalistyczne stanowisko badawcze opracowane i zgłoszone do urzędu patentowego przy współudziale Doktoranta. Zgodnie z opisem wyników badań, wszystkie próbki, niezależnie od sposobu połączenia i grubości płyty CDF, przetrwały założony w badaniach ekwiwalent 8 lat eksploatacji (tj. 85 000 cykli), jeśli nie liczyć odłamań fragmentu samego zawiasu, w badaniu jednej próbki z proponowanym połączeniem klejonym w płycie o grubości 12,4 mm.

5. Ocena zrealizowanych badań i uzyskanych wyników

Wątpliwości budzi związek przedstawionych w rozdziale 3 prób statycznego rozciągania i zginania z tematem, a także i celem pracy. Na podstawie prób rozciągania wyznaczono wytrzymałość R_m , odkształcenia do zniszczenia, oraz moduł Younga płyt; na podstawie prób zginania – wytrzymałość na zginanie. Wyniki te nie zostały następnie w żaden sposób wykorzystane do wnioskowania w temacie rozprawy. Niektóre z nich są przy tym łatwo przewidywalne, jak np. to, że wykonanie otworów w relatywnie wąskiej i płaskiej próbce z płyty CDF zmniejszy wartość niszczącego momentu gnącego. Ilościowo jednak tego efektu nie można w żaden sposób odnieść do praktycznych przypadków frontów meblowych, które mają znacznie większą szerokość i w związku z tym ryzyko ich złamania wzdłuż linii mocowania zawiasów nie jest wręcz realne.

Dokonany przez Doktoranta wybór zmiennych parametrów w realizowanych eksperymentach nie zawsze jest oczywisty i do końca zrozumiały. Patrząc na tytuł pracy – *„Wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość złącza klejonego...”* – zastanawia czy potrzebne było, niemal we wszystkich badaniach, rozważanie 4 różnych grubości płyt CDF, gdy przecież nie jest to parametr technologiczny.

W przypadku badań połączeń opisanych w Rozdziale 4, skleina zlokalizowana na samym brzegu łączonych elementów miała szerokość 20 mm i długość – mierzoną wzdłuż działania siły tnącej – 5 mm. Przy tak krótkiej długości zakładki tytułowy efekt różnicy właściwości mechanicznych łączonych elementów zupełnie się nie ujawnił. Przywołany na wstępie tej recenzji mechanizm nierównomierności odkształceń można uznać za pomijalny na tak krótkim odcinku. Nie można stwierdzić, że różnice nośności pomiędzy połączeniami „płyta CDF – stal – płyta CDF” oraz „stal – stal – stal”, które zresztą w zależności od pozostałych zmiennych mają różne znaki, są spowodowane różnymi właściwościami mechanicznymi łączonych materiałów. Przypuszczam raczej, że większe znaczenie w tym przypadku odegrała różna adhezja kleju dla różnych powierzchni i być może niepowtarzalność warunków wykonywania połączenia (np. siły docisku). Dodatkowo ujawnił się efekt krawędziowy – tam gdzie skleina „trzymała mocno”, wrywany był laminat płyty CDF na krawędzi połączenia, jak to przykładowo demonstruje rys. 4.10 g-h. W mojej opinii tych wyników nie powinno się traktować na równi z innymi. Jest oczywiste, że całość połączenia nie może być „bardziej wytrzymała” niż najsłabsze jego ogniwo.

Ogólnie, zrealizowane w pracy badania, sposób zaprezentowania wyników oraz ich analiza nie wykraczają poza inżynierski schemat działania i takież sam poziom wiedzy i

kompetencji. Poziom naukowy ma jedynie gruntowna statystyczna analiza wyników. Dla każdego wyniku pomiarowego podana została jego niepewność; przeprowadzono testy istotności wyników. Według mnie, jest przy tym jedynie mylące podawanie niepewności pomiaru, zamiast odchylenia standardowego, obok średnich wartości mierzonych wielkości, szczególnie gdy te niepewności są kilkukrotnie mniejsze niż rozstęp wyników dla danej serii próbek (np. Tabela 3.8 oraz Tabela 3.26, oraz Tabele 4.3 – 4.14). Analiza wyników badań przedstawiona w pracy jest jednak niemal wyłącznie statystyczna. Efektem tego jest m.in. wielokrotne przekopiowanie prawie identycznie brzmiącego fragmentu – na temat wyników testu Shapiro-Wilka, oraz wyników testu dla zmiennych niezależnych – w podpunktach dotyczących różnych rozważanych zmiennych (Rozdział 4). Doktorant praktycznie nie podjął próby identyfikacji trendów eksperymentalnych, poza jedynie kilkoma bezpośrednimi porównaniami. Nigdzie nie podjęto też próby interpretacji uzyskanych wyników pod kątem wskazania mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane prawidłowości. Nie przeprowadzono też żadnej dyskusji wyników z odniesieniem do danych literaturowych. Jest znamienne też, że w rozprawie, w której tytule występuje „*wytrzymałość złącza klejowego*”, wytrzymałość ta ani raz nie zostaje obliczona, a podawane są jedynie wartości sił niszczących.

W mojej ocenie opracowanie i zbudowanie przed Doktoranta stanowiska do pomiaru trwałości zawiasów drzwiczek meblowych jest największym, oryginalnym osiągnięciem tej pracy, choć samo w sobie nie jest klasycznym narzędziem do badania „*wpływu wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość złącza klejonego stosowanego w połączeniach elementów o różnych właściwościach mechanicznych*”. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły jego funkcjonalność, choć akurat nie dały wyników, które stanowić by mogły materiał do pogłębionych analiz na temat różnych trwałości badanych obiektów. Poniekąd dlatego, że nie określono sił i naprężeń jakie powstawały w tym połączeniu w trakcie badań. Wynikają one nie tylko z ciężaru drzwi, ale także zależą od miejsca mocowania i charakterystyki sprężyny w zawiasie *Blum Expando T*, o której nic nie wiadomo. Powierzchnia skleiny została przy tym dobrana wyłącznie ze względu na wymiar zawiasu, bez refleksji na temat aspektów wytrzymałościowych. W tej sytuacji uszkodzenia zmęczeniowego tej skleiny być może nie należało w ogóle oczekiwać, a w każdym razie wyników tych testów, bez względu na to jakie one są, bez znajomości działających obciążeń nie ma co czego odnieść.

Przedstawione w pracy wnioski podzielono na ogólne i szczegółowe. Co do szczegółowych, to poza oczywistym wnioskiem na temat wpływu wykonania otworów na wyniki prób zginania (wniosek 4), wszystkie pozostałe mogą być odniesione wyłącznie do obiektów, które były przedmiotem badań (te same płyty, klej, ten sam producent i partie dostawy, te same warunki przygotowania i badania próbek). Z wniosków ogólnych, tylko jeden dotyczy wprost tematu pracy. Brzmi on: *„Badania połączeń klejonych wykazały, że w przypadku łączenia materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych (stal – płyta drewnopochodna CDF) analizowane czynniki, takie jak np. szlifowanie powierzchni, pokrycie galwaniczne jednego z elementów mogą mieć wpływ na nośność połączenia. Zależności tej nie stwierdzono w przypadku połączenia takich samych elementów (stal – stal)”*.

Praca, od której należało oczekiwać opisu wpływu tych parametrów, nie daje w konkluzji końcowej jednoznacznego potwierdzenia, że ten wpływ istnieje, choć skądinąd doskonale wiemy, że tak jest, zarówno w przypadku materiałów o różnych, jak i o tych samych właściwościach mechanicznych.

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska zawiera pewne osiągnięcia, które należy docenić. Zrealizowany program badań, nie wnikając w tej chwili w ich merytorykę, jest dość obszerny, bo obejmuje łącznie 132 badania statyczne i 9 testów trwałościowych. Z pewnością mocną stroną pracy jest bogaty arsenał zastosowanych narzędzi statystycznych. Oryginalnym osiągnięciem jest z pewnością opracowanie zgłoszonego w Urzędzie Patentowym „stanowiska do badania trwałości połączenia zawias – płyta meblowa”, którego funkcjonalność została potwierdzona w ramach pracy.

Jednakże:

- 1) Dość krótka i pobieżna analiza literatury koncentruje się niemal wyłącznie na inżyniersko – technicznych aspektach dotyczących połączeń nitowych, z pominięciem stricte naukowych zagadnień związanych z tą tematyką, istotnych dla dyscypliny inżynieria mechaniczna, takich jak w szczególności: analiza stanów odkształceń i naprężeń w skleinach i sposoby ich modelowania. Zrealizowane eksperymenty nie wykraczały poza zakres inżynierskich kompetencji i umiejętności, nie zawsze też były zgodne z tematem rozprawy, a bywało, że ich szczegółowe warunki nie służyły ujawnieniu tych mechanizmów, które zgodnie z tematem pracy powinny być przedmiotem analiz. Ocena wyników badań pod kątem identyfikacji trendów eksperymentalnych ogranicza się w

rozprawie jedynie do bezpośrednich porównań; nie podjęto próby interpretacji uzyskanych wyników pod kątem wskazania mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane efekty. Doktorant nie wykazał się też umiejętnością opracowywania modeli obliczeniowych, mimo że realizowany temat pracy wręcz tego wymagał, a umiejętność ta w rozważanej dyscyplinie jest niezbędna do prowadzenia badań naukowych. Wszystko to razem nie pozwala potwierdzić, że rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, jak to wymaga art. 187, ust. 1 ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018.

- 2) Postawiony cel pracy jest nieadekwatny do jej tytułu i stanowi wyzwanie o charakterze konstrukcyjno-inżynierskim. W kontraście do ogólnego i szerokiego tematu, obszar zainteresowań został zredukowany w celu pracy do arbitralnie wybranego połączenia klejonego, reprezentującego bardzo specyficzną parę materiałową, co nie służy uzyskaniu wniosków o ogólnym charakterze. W efekcie uzyskane wyniki badań można odnieść wyłącznie do obiektów, które były przedmiotem badań, bez możliwości ich uogólnienia. Przedstawione wnioski wskazują, że praca nie zmieniła ogólnego stanu wiedzy w obszarze tytułu pracy. Nie ma też przesłanek, by zakładać, że zaproponowane i badane w pracy połączenie zostanie wdrożone, jak to ma miejsce w doktoratach wdrożeniowych. W tej sytuacji nie można potwierdzić, że praca przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, bądź oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej, co wymaga art. 187, ust. 2 ww. ustawy.

Ostatecznie więc z dużą przykrością zmuszony jestem wyrazić opinię, że **będąca przedmiotem niniejszej recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Karolewskiego, zatytułowana „Wpływ wybranych parametrów technologicznych na wytrzymałość złącza klejonego stosowanego w połączeniach elementów o różnych właściwościach mechanicznych”, nie spełnia wymogów określonych ustawą Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 (z późn. zmianami).**