

dr hab. inż. Wojciech Jurczak prof. AMW
Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Mechaniczno-Elektryczny
w.jurczak@amw.gdynia.pl
tel. kom. 604224262

Gdynia, 17.03.2024 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Eweliny Ozgi

pt.: Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium AW-2024-T3,

wykonano w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Rzeszowskiej z dnia 10.01.2024 r., pismo nr. RM-530-31-03/2024

Przedstawioną do recenzji rozprawa doktorska pt.: „**Wpływ procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium AW-2024-T3**” autorstwa mgr inż. Eweliny Ozgi, została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Władysława Zieleckiego prof. PRz. i promotora pomocniczego Panią dr inż. Magdalenę Bucior.

Tematyka pracy, jej zakres i cel

Połączenia klejowe są rodzajem połączeń nierozłącznych, bardzo często stosowanych w łączeniu elementów konstrukcyjnych jako alternatywa do połączeń termicznych jak spawanie, zgrzewanie czy lutowanie. Ten rodzaj połączenia adhezyjnego stosowany do spajania różnych materiałów metalicznych np. o różnych temperaturach topnienia jest niejednokrotnie koniecznością dla tworzenia konstrukcji cienkościennych. Połączenia klejone nie wpływają na strukturę materiału łączonych elementów, wobec czego konstrukcja nie doznaje osłabienia w strefie złącza a dodatkowo stanowią strefę ograniczenia drgań zależnie od sztywności kleju.

Łączenie klejowe stosowane jest nie tylko dla materiałów metalicznych, ale także często wykorzystywane jest w budownictwie do łączenia konstrukcji żelbetonowych, drewnianych czy ceglanych lub szkła z metalem. Połączenia klejowe to także wzmocnienie innych połączeń np. gwintowych czy nitowanych zwiększające nośność eksploatacyjną tych złączy.

Rodzaj kleju, jego właściwości jako łącznika w tego rodzaju połączeniach jest bardzo istotny i w ocenie konstruktorów nie zyskał on tak dużego zaufania jak inne łączniki. Za taki stan rzeczy odpowiada małe zaufanie projektantów do tworzyw adhezyjnych oraz wysoki poziom cen i słabe zaopatrzenie rynku w odpowiedniej wytrzymałości kleje, w czasie, gdy bardzo szybkiego rozwija się technologia spawalnia.

Problem klejenia konstrukcyjnego nie jest równie pozbawiony wad, zarówno w zakresie wykonawstwa połączeń, jak i ich trwałości. Nie należy jednak negować faktu i większość niedogodności wynika (lub wynikała) z niskiej jakości oferowanych na rynku klejów oraz

nieznajomości skutecznych metod ich stosowania (szczególnie w przeszłości). Wraz z rozwojem technologii klejenia zniwelowano negatywne aspekty. Istotnym problemem, który w przeszłości wykluczał stosowalność połączeń klejonych była niska wytrzymałość kleju w stosunku do wytrzymałości spajanych materiałów. Adhezja, kohezja to zjawiska warunkujące powstanie złącza klejowego, którego właściwości wytrzymałościowe i nośność uwarunkowane są głównie doborem kleju i odpowiednim przygotowaniem powierzchni klejonych. Składnikiem klejów są głównie polimery, które wykazują czułość na oddziaływanie podwyższonej temperatury. Istotnym problemem, który w przeszłości wykluczał stosowalność połączeń klejonych była niska wytrzymałość kleju w stosunku do wytrzymałości spajanych materiałów. Praktyka projektowa zakłada, że każde złącze konstrukcji musi posiadać nośność większą niż łączone elementy (aby ich nośność była w pełni wykorzystana). Obecnie problem ten już nie występuje, ponieważ współcześnie oferowane tworzywa adhezyjne posiadają nośność znacznie wyższe niż było to w niedalekiej przeszłości.

W świetle doskonałych właściwości nośnych klejów, jednym i to ważniejszym elementem procesu klejenia jest przygotowanie powierzchni łączonych elementów. Oczyszczenie, osuszenie i odtłuszczenie powierzchni przed klejeniem to tylko podstawowe i znane zabiegi zapewniające poprawność klejenia. Współcześnie poszukuje się takich zabiegów technologicznych, które mają umożliwić pełne wykorzystanie właściwości kleju, który niejednokrotnie ma lepsze właściwości wytrzymałościowe niż łączone materiały. Także i rodzaj łączonych materiałów ma istotny wpływ na jakość połączenia, np. klejenie aluminium i jego stopów jest trudniejsze od stali, ponieważ jest to podłoże o niższym napięciu powierzchniowym oraz łatwo ulegające utlenianiu. Pneumokulkowanie jest jedną z odmian modyfikacji powierzchni materiału poprzez nagniatanie dynamiczne. Zaletami pneumokulkowania są m.in. prostota, łatwość sterowania intensywnością obróbki i jej niskie koszty. Opisane w przeglądzie literatury rozprawy doktorskiej wyniki badań, w których udowodniono, że pneumokulkowanie strefy zakładki może być z powodzeniem stosowane do umacniania połączeń klejowych wykonanych ze stali S235JR i stopu tytanu Ti6Al4V.

Temat rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Eweliny Ozgi jest aktualny, o charakterze innowacyjnym i rozwojowym dla technologii klejenia lekkich materiałów metalicznych stosowanych m.in. w lotnictwie.

Przeprowadzona w rozprawie ocena stanu zagadnienia w obszarze obejmującym tematykę rozprawy doktorskiej oraz ustalone na jej podstawie wnioski umożliwiły sformułowanie problemu naukowego, którego efektem jest możliwość zwiększania nośności zakładkowych połączeń klejowych ze stopów aluminium oraz określenie sposobu przewidywania oraz kontroli efektów obróbki umacniającej.

Pani mgr inż. Ewelina Ozga zwana dalej Doktorantką postawiła w swojej rozprawie doktorskiej następującą hipotezę: *Obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, realizowana metodą pneumokulkowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność.*

Na tak sformułowanej hipotezie badawczej Doktorantka wyznaczyła trzy główne cele:

- zbadanie wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,

- wyjaśnienie mechanizmu wzrostu nośności połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania,

- sprawdzenie możliwości wykorzystania różnych metod kontroli procesu pneumokulkowania takich jak próba Almena, pomiar chropowatości powierzchni, czy pomiar stanu naprężeń własnych do przewidywania nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu i oceny poprawności obróbki umacniającej.

Do zrealizowania wyżej opisanych celów przyjęto bardzo szeroki zakres prac badawczych:

- doświadczalne zbadanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, chropowatość powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena,

- zbudowanie modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,

- zbadanie zależności pomiędzy nośnością połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu, a wartością strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, chropowatością powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu oraz stanem naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu,

- porównanie metodami numerycznymi stanu naprężeń w spoinie klejowej połączeń obciążonych na rozciąganie, które były lub nie były poddane pneumokulkowaniu.

- zbudowanie modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,

- zbadanie zależności pomiędzy nośnością połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu, a wartością strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, chropowatością powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu oraz stanem naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu,

- porównanie metodami numerycznymi stanu naprężenia w spoinie klejowej połączeń obciążonych na rozciąganie, które były lub nie były poddane pneumokulkowaniu.

Najważniejsze wyniki i ocena merytoryczna pracy

Recenzowana rozprawa doktorska jest obszerna i została napisana na 152 stronach. Układ pracy logiczny, czytelny zawierający sześć głównych rozdziałów kończących się analizą wyników badań i wnioskami. Na początku należy podkreślić, że Doktorantka postawiła przed sobą bardzo ambitne cele, co wymusiło przeprowadzenie dużej ilości badań eksperymentalnych i obliczeniowych.

Cała monografię można podzielić na dwie zasadnicze części: **teoretyczną** jako przegląd literatury zakończoną oceną stanu naukowego zagadnienia i wnioskami oraz badawczą opisującą metodykę przeprowadzonych badań, analizę ich wyniki oraz wnioski. Część teoretyczną pracy kończy krótki podrozdział opisujący tezę i hipotezę rozprawy oraz postawienie cele badawcze.

Pierwsze 56 stron monografii zostały poświęcone na *Wprowadzenie*, poprzedzone *Wykazem oznaczeń i skrótów* stosowane przez Doktorantkę w całej rozprawie, zawierające opis *połączeń klejowych i technologii rozproszonego nagniatania dynamicznego* w świetle **dobrej i aktualnej literatury** anglo- i polskojęzycznej.

W przeglądzie literatury poprawnie opisano zagadnienia podjętego w pracy problemu naukowego, które odniesiono do dwóch zagadnień jakimi są: połączenia klejowe w przygotowaniu i osiągniętych właściwości oraz technologii nagniatania dynamicznego z przedstawieniem korzyści ale i wad takich zabiegów. Przeanalizowano istniejące teorie nt. adhezji kleju z klejoną powierzchnią, puentując, że adsorpcyjna teoria adhezji najlepiej wyjaśnia charakter rzeczywisty zjawisk zachodzących na granicy międzyfazowej kleju i klejonego materiału. Trwałości i nośność takiego połączenia zależą głównie m.in. od przygotowania powierzchni łączonego materiału. Szczegółowo scharakteryzowano metody przygotowania takiej powierzchni (wstępna, podstawowa i dodatkowa) do klejenia, nie pomijając opisu przygotowania masy klejowej, nakładania kleju, ustawienie klejonych powierzchni i utwardzania spoiny klejowej wraz z obróbką wykańczającą i kontrolą powstałych połączeń. Głównym celem przygotowanie powierzchni do klejenia jest odpowiedniego rozwinięcia powierzchni klejonej metodami: mechanicznymi (obróbka strumieniowo-ścierna, kulkowanie, szlifowanie itp.) chemicznymi (kąpiele kwaśne lub alkaliczne) elektrochemicznymi (anodowanie, fosforyzowanie czy chromianowanie) i inne jak ozonowanie, wykorzystanie cech wiązki lasera lub plazmy, które aktywują niezbędne mechanizmy wiążące klej do powierzchni.

Wnikliwie i poprawianie opisano rozkłady naprężenia w połączeniach klejowych dla różnych typów połączeń i działającej siły obciążającej także w aspekcie zmian temperatury i cyklach szokowych tych zmian, odnosząc się do zagadnień eksploatacji obiektów powietrznych. W najważniejszym podpunkcie 1.6 przeglądu literatury dobrze opisano metody zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych. Wynikiem tego był wybór przez Doktorantkę pneumokulkowanie strefy zakładki klejowej, techniki położenia odpowiedniego rodzaju kleju i zastosowania podcięć skrajnych krawędzi połączeń jako zabiegów wytypowanych do badań własnych.

Szeroko i dokładnie opisano nagniatanie dynamiczne, koncentrując się na wykorzystaniu parametrów tego zabiegu technologicznego dla uzyskania optymalnych właściwości (strukturę

geometryczną) powierzchni klejonej i jej właściwości fizycznych do uzyskania jak najlepszego połączenia klejowego.

Część eksperymentalną Doktorantka rozpoczęła od punktu 5, w którym w *Metodyce Badań*, na początku przyjęła zastosowanie modeli matematycznych (wg. doświadczeń Hartleya) do opisu relacji przyjętych parametrów pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych. Wybór materiału na wykonanie połączeń klejowych jednozakładkowych był przez Doktorantkę dobrze uzasadniony, ponieważ ten stop i w tym stanie umocnienia stosowany jest szeroko m.in. w przemyśle lotniczym. Ten materiał charakteryzuje się stosunkowo dobrą wytrzymałością ($R_m > 435 \text{ MPa}$, $R_{0,2} > 290 \text{ MPa}$, $E = 72-73 \text{ GPa}$) i stabilnością parametrów do 120°C . Do wykonania połączeń wybrano dwuskładnikowy klej epoksydowy Loctite EA 3430, którego wytrzymałość to 36 MPa przy $E = 3,21 \text{ GPa}$, twardość Shore'a 70 skali D. Przed planowanym klejeniem obszaru próbek, o wymiarach $d \times l \times s = 12,5 \times 25 \times 25 \text{ mm}$, stopu 2024-T3 poddano obróbce strumieniowo-ściernej elektrokorundem (piaskowanie) przy ustalonych parametrach. Zakładanym efektem tego działania było rozwinięcie struktury geometrycznej powierzchni klejenia a uzyskany stan powierzchni to $R_a = 4,53 \mu\text{m}$.

Proces klejenia przeprowadzono zgodnie z doświadczeniem Doktorantki, na specjalnych stanowiskach w Katedrze Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa. Podkreślić i wyróżnić należy, że sam proces pneumokulowania przeprowadzono na specjalnie wykonanym stanowisku. Parametrów tego procesu były jednym z ważniejszych aspektów naukowych badań przeprowadzonych w tej rozprawie opisane jako parametry wejściowe. Rozproszone dynamiczne umocnienie zewnętrznych powierzchni połączeń klejowych przeprowadzono dla różnych średnic (0,5; 1,0; 1,5 mm) kulek stalowych „wyrzucanych” pod ciśnieniem 0,3; 0,4 i 0,5 MPa z odległości 100 mm. Kolejnym, trzecim parametrem był czas umacniania, tylko powierzchni złącza klejowego, który wynosił 60, 120 i 180 sekund. W sumie przeprowadzono 11 wariantów procesu pneumokulowania po 8 próbek na każdy wariant. Efekty procesu pneumokulowania oceniono za pomocą wartości strzałki ugięcia f_A płytek kontrolnych Almena.

Badania struktury geometrycznej powierzchni poddanej i niepoddanej procesowi pneumokulowania przeprowadzono dla próbek stopu AW-2024 w układzie dwuwymiarowym i przestrzennym zgodnie z normami co pozwoliło na wyznaczenie wszystkich parametrów stanu powierzchni po pneumokulowaniu. Wyznaczono także stan naprężeń własnych w zewnętrznych powierzchni zakładki połączeniach klejowych celem sprawdzenia, czy w wyniku pneumokulowania doszło do ukonstytuowania się w ich warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych. W obszarach klejenia dokonano wyznaczenia ściskających naprężeń własnych metodą dyfrakcji rentgenowskiej $\sin^2\psi$, polegającej na pomiarze kąta pomiędzy normalną do próbki a normalną do płaszczyzny dyfrakcji. Pomiary wykonano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego.

W kolejnym podrozdziale opisano metodykę badań symulacji MES z wykorzystaniem oprogramowania Ansys by określić wpływ pneumokulowania na stan naprężeń własnych w spoinie klejowej. Celem było wyjaśnienie mechanizmu wzrostu nośności połączeń klejowych pod wpływem pneumokulowania strefy zakładki. Wprowadzono do celów porównawczych symulację połączeń klejowych bez i z pneumokulowaniem oraz wprowadzono zmienną powierzchnię połączenia klejowego. Tak przygotowane i opisane parametry próbek połączeń klejowych poddano statycznej próbie rozciągania. By zapewnić

jednoosiowy stan naprężenia w próbkach, szczęki maszyny wytrzymałościowej przesunięto względem siebie stosownie do grubości złącza. Próbki były obciążane siłą osiową z prędkością rozciągania wynoszącą 5 mm/min do momentu zerwania połączenia klejowego. Siła, przy której następowało zerwanie uznawano była za nośność połączenia klejowego P_t . W tym rozdziale jest wiele wątpliwości dotyczących przyjętego kierunku weryfikacji numerycznej otrzymanych wyników badań.

Charakter zniszczenia badanych połączeń klejowych określono na podstawie wizualnej obserwacji struktury „przełomów” w oparciu o normę PN-EN ISO 10365:2022-07. Opisano wpływ parametrów pneumokulkowania na charakter zniszczenia połączeń klejowych, przypisując trzy rodzaje zniszczenia: kohezyjnego, adhezyjnego lub zniszczenia adhezyjno-kohezyjnego z oddarciem.

Podstawowy rozdział tej rozprawy to analiza wyników badań, czyli określenia wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność badanych połączeń klejowych. Wyniki badań opracowano matematycznie według planu doświadczeń Hartleya PS/DS-P:Ha3.

W kolejnych podrozdziałach *Analizy wyników badań* oceniono wpływ:

- wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych, gdzie stwierdzono, że w większości przypadków pneumokulkowanie przyczyniło się do zwiększenia nośności połączeń klejowych. Największą wartość nośności połączeń klejowych uzyskano dla wariantu nr 10 (średni czas i średnia średnica kulek, najwyższe ciśnienie) gdzie zwiększenie nośności względem próbek niepoddawanych pneumokulkowaniu wynosiło w tym przypadku 33,4%. Jednak nie wszystkie przyjęte warianty badań były pozytywne, najmniejszą wartość nośności uzyskano dla wariantu 4, który charakteryzuje się największymi wartościami parametrów pneumokulkowania. W przypadku wariantu nr 4 pneumokulkowanie spowodowało zmniejszenie nośności połączeń względem złączy niekulkowanych o 31,9%. Analiza powierzchni oderwań, złomów (zniszczenia sklejn) wskazuje na uszkodzenia adhezyjne i kohezyjne więc nie można jednoznacznie określić wpływ parametrów obróbki na mechanizm niszczenia. W tym rozdziale przeprowadzoną szeroką analizę matematyczną uzyskanych wyników badań czego wynikiem jest stwierdzenie, że parametry wejściowe (pneumokulkowania) nie są silnie skorelowane z nośnością połączeń klejowych
- intensywność obróbki pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych według planu Hartleya. W celu sprawdzenia, czy na podstawie intensywności obróbki można przewidywać nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu przeprowadzono analizę regresji i korelacji między wartością strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena i nośnością połączeń klejowych. Ocena istotności współczynników równania regresji wykazała, że oba współczynniki są istotne (patrz rys. 6.12). Zgodnie z równaniem regresji, w założonym obszarze zmienności czynników wejściowych, nośność połączeń klejowych maleje wraz ze wzrostem strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena. Potwierdza to wartość współczynnika korelacji Pearsona, który wynosi -0,733. Współczynnik determinacji wskazuje, że 54% wyników nośności można opisać równaniem regresji przedstawionym na rys. 6.12. Potwierdza to, że w założonym obszarze zmienności czynników wejściowych, wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena mogą być stosowane do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu i oceny poprawności obróbki umacniającej.

- na strukturę geometryczną powierzchni badanych połączeń przeprowadzono według planu Hartleya, ten szeroki podrozdział jest potwierdzeniem możliwości wykorzystania wybranych wartości parametrów chropowatości do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu oraz do oceny poprawności przeprowadzonej obróbki umacniającej. Obraz izometryczny powierzchni zakładki po pneumokulkowaniu, o tych samych parametrach różniący się tylko czasem, wykazał brak pełnego pokrycia śladami umocnienia dla $t=60s$. Doktorantka dokładanie i dobrze opisała wpływ każdej wielkości wejściowej na parametry powierzchni, wykazując ich wpływ na nośność połączenia klejowego.

Na podstawie obróbki matematycznej wyników, w przyjętym zakresie zmienności czynników wejściowych, wykazano jak silna jest korelacji linowa parametrów wejściowych pneumokulkowania z parametrami charakteryzującymi umocnioną powierzchnię.

- na stan naprężeń własnych po jednostronnym pneumokulkowaniu, w tej części rozprawy sprawdzono, czy w wyniku pneumokulkowania zewnętrznych powierzchni zakładki doszło do ukonstytuowania w ich warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych oraz czy przyjęte wartości parametrów obróbki mają istotny wpływ na stan naprężeń własnych. Dla badanych wariantów naprężenia ściskające mieściły się w przedziale od $-226,65$ MPa do $-292,52$ MPa. Największą wartość bezwzględną naprężeń ściskających uzyskano w przypadku połączeń klejowych pneumokulkowanych w czasie 120 s, kulkami o średnicy 1 mm z ciśnieniem wynoszącym 0,5 MPa (wariant 10), natomiast najmniejszą wartość bezwzględną naprężeń zaobserwowano w przypadku próbek pneumokulkowanych w czasie 60 s, kulkami o średnicy 1,5 mm z ciśnieniem wynoszącym 0,3 MPa (wariant 3).

- wyniki analizy nośności połączeń klejowych dla symulacji MES, oparte na rozkładzie naprężeń w spoinach połączeń klejowych obciążonych siłą rozciągającą 4000 N, które nie były poddane pneumokulkowaniu oraz rozkłady naprężeń w spoinach połączeń klejowych obciążonych siłą rozciągającą 4000 N, które były poddane pneumokulkowaniu kulkami o średnicy 1 mm, w czasie 120 s, z ciśnieniem 0,5 MPa (długość strefy pneumokulkowania 12,5 lub 25 mm). Wyniki wskazują, że naprężenia maksymalne występują na końcach, obrzeżach spoiny. Wyniki analiz numerycznych wskazują, że pneumokulkowanie zewnętrznej powierzchni zakładki prowadzi do redukcji naprężeń w spoinie klejowej. Największy spadek wartości naprężeń jest zauważalny w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej. Zmniejszenie wartości naprężeń normalnych prostopadłych prowadzi do zmniejszenia wyężenia spoiny (naprężeń zredukowanych w spoinie) i skutkuje wzrostem wytrzymałości połączeń klejowych. W przyjętym modelu MES nie stwierdzono odkształceń dla połączenia klejowego, zastosowane uproszczenia nie zostało uzasadnione.

Te analizy, z wyjątkiem symulacji numerycznej, pozwoliły Doktorantce na poprawne i szczegółowe przeprowadzenia podsumowania i sformułowanie wniosków. Podsumowania polegało na stwierdzeniu, że:

- pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki może dojść do zwiększenia nośności połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. W tym celu zbudowano model matematyczny opisującego wpływ czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza na nośność analizowanych połączeń klejowych,

- wybrana metoda matematyczna wyników badań, może posłużyć do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu oraz do oceny poprawności przeprowadzonej obróbki umacniającej,

- mechanizm wzrostu nośności połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki można wyjaśnić w oparciu o stan naprężeń własnych w spoinie klejowej.

Rozprawę doktorską kończą dobrze sformułowane *Wnioski*. Doktoranta zrealizowała założone cele badawcze oparte na przyjętej tezie dysertacji, że proces pneumokulkowania ma wpływ na nośność połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu AW-2024-T3. Największą wartość bezwzględną naprężeń ściskających uzyskano w przypadku połączeń klejowych pneumokulkowanych w czasie 120 s, kulkami o średnicy 1 mm z ciśnieniem wynoszącym 0,5 MPa, natomiast najmniejszą wartość bezwzględną naprężeń zaobserwowano w przypadku próbek pneumokulkowanych w czasie 60 s, kulkami o średnicy 1,5 mm z ciśnieniem wynoszącym 0,3 MPa.

Uwagi, spostrzeżenia i pytania do treści rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska została napisana językiem zrozumiałym, w bardzo staranny sposób, bez znaczących niedociągnięć od strony stylistycznej i językowej. Doktorantka poprawnie operuje również językiem technicznym, stosując odpowiednią nomenklaturę (nieliczne potknięcia), co jest niezmiernie ważne w przypadku rozprawy doktorskiej w dziedzinie nauk technicznych. Doktorantka z pewnością dołożyła wiele wysiłku w opracowanie matematyczne swoich wyników badań, co umożliwiło przeprowadzenie nader szczegółowej analizy tych wyników.

Uwagi, pytania :

W przeglądzie literatury zabrakło szerokiej informacji na temat opisu stopnia wykorzystania symulacji numerycznej wytrzymałości połączeń także z wykorzystaniem MES dla wcześniej przebadanych połączeń klejowych. Informacje na ten temat podano tylko na str. 46-49 pracy w oparciu o wyniki jeden pozycji literaturowej [142]. Nie zrobiono tego także w metodyce badań – symulacji, gdzie należało opisać możliwości zastosowanego oprogramowania Ansys. Wygenerowało to pewne nieścisłości z symulacją numeryczną w części badawczej.

Obróbka matematyczna przeprowadzona poprawnie, rozumowanie statystyczne prawidłowe, testy istotności użyte prawidłowo, wykresy funkcji regresji są właściwie przedstawione. Ogólnie rzecz biorąc jest poprawnie, jednak: (5.14) czy nie powinno być : $S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^r S^2(y_i)$, Str. 94 wiersz 13 zwykle przyjmuje się "poziom istotności" a nie jak podano istotność statystyczna. Określenie podane jest jedynie nieprecyzyjne jednak zrozumiałe i jasne, Str 96 niezbyt zrozumiały zapis: $S(y)_i$, czy nie powinno być $S^2(y_i)$?

Moduł sprężystości Young'a ozn. E jest współczynnikiem sprężystości wzdłużnej jak poprawnie opisano w wzorze 1.2, ale w teście napisano sprężystość podłużna? Jest to jedna z podstawowych stałych materiałowych, która winna być wykorzystana przy symulacji, dla wszystkich łączonych warstw badanego połączenia klejowego.

Nie można dokonać *pomiaru naprężenia*, pojęcie wyznaczyć stan naprężenia lub składowe stanu naprężenia to poprawne pojęcia.

W planie doświadczeń Hartleya z zasady przyjmuje się 4-5 parametrów wejściowych to dlaczego w rozprawie przyjęto tylko 3 czynniki wejściowe, czy pneumokulkowanie daje możliwość przyjęcia większej ilości czynników wejściowych? Czy możliwa była zmiana odległości między dyszą górną stanowiska do pneumokulkowania a obrabianą powierzchnią?

W pracy nie podano czy elementy klejone wykonane ze stopu AW 2024-T3 był wycięte z arkusza blachy wzdłuż czy w poprzek do jej kierunku walcowania. Ten fakt determinuje ich właściwości mechaniczne i stałą materiałową jak winna być wykorzystana do symulacji numerycznej MES do określenia nośności połączenia.

Brakuje uzasadnienia, dlaczego wykorzystano tylko klej epoksydowy Loctite EA 3430 w przygotowaniu próbek do badań. Alternatywny klej, daje możliwości jakiegokolwiek porównania, odniesienia i ewentualnie wyboru kleju. To rozbudowałyby i tak szerokie zakres badań, ale mógłby być on zakończony na etapie wyznaczania właściwości mechanicznych, nośności połączenia.

Czy właściwości kleju oraz technologia klejenia podana przez producenta warunkowała, że grubość kleju wyniosła zaledwie 0,09mm? Brakuje danych o stałych materiałowych kleju.

Jaka jest zgodność stanu naprężeń własnych wyznaczonych z wykorzystaniem dyfraktogrametru rentgenowskiego a jaki stan naprężeń własnych uzyskano w analizie numerycznej?

Proszę o wyjaśnienie, dlaczego dla długości zakładek 12,5mm pneumokulkowaniu poddano próbki na długości 25mm?

Nieczytelna legenda do rys. 5.19 i w tabelach 6.18-6.19.

Autorka napisała cyt. *W wyniku analizy wykresów (rys. 6.1-6.2) można stwierdzić, że w przypadku wariantów obróbki 1-11 większość krzywych ma podobne nachylenie* – moduł Younga jest podstawnym parametrem do symulacji numerycznej! Do wyznaczenia nośności połączenia klejowego potrzebna jest siła zrywająca, ale do wyznaczenia E należało opracować wyniki badań statycznej próby rozciągania wykresy do postaci $\sigma=f(\epsilon)$.

Opis wykresów - obciążenie to Pt czy Fr , rys. 6.1 i 6.2, bo na rys. 6.3 jest Pt ? Brak w podpisie pod rys. 6.1 i 6.2 informacji dotyczącej długości próbek połączenia klejowego.

Szeroki zakres, dobrze przeprowadzonych badań eksperymentalnych został słabo wykorzystany przy realizacji symulacji numerycznej. Oprogramowanie Ansys, wbrew zapisowi na str. 84, pozwala na realizację nagniatania dynamicznego, jednak uruchomienie zagadnienia plastycznego i zdefiniowanie warunków brzegowych daje możliwość z lepszym lub gorszym przybliżeniem realizację tego zagadnienia. Ten kierunek z pewnością jest lepsze niż zastosowanie modelu termicznego jako symulacji efektu kulowania. Ten rozdział dysertacji należało by uzupełnić lub uściślić o takie informacji jak: model materiałowy, parametry symulacji, warunki brzegowe, wartość obciążeń, podać schemat i scenariusz obliczeń oraz metody obliczeń aż w końcu zamodelować zjawiska adhezji czy kohezji charakterystyczne dla połączenia klejowego.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Postawiona przez Doktorantkę teza rozprawy, potwierdzona w trzyetapowej analizie wyników badań, **została osiągnięta**. Poprawnie i szeroko opisane wnioski z badań eksperymentalnych potwierdzają tezę rozprawy, że proces pneumokuklowania (dla wybranych parametrów) połączenia klejowych stopu EN AW 2024_T3 umożliwia zwiększenie jego nośności. Doktorantka zna teoretyczne podstawy badanych procesów i posiada umiejętności wykorzystania aparatu matematycznego do opracowania wyników przeprowadzonych badań. Dobór i wykorzystanie różnorodnych metod i stanowisk badawczych, dobra interpretacja uzyskanych wyników oraz podejmowanie w oparciu o te wyniki decyzji o kierunku dalszych prac świadczy o dojrzałości naukowej Pani mgr inż. Eweliny Ozgi ubiegającego się o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska spełnia formalne wymogi stawiane dysertacjom doktorskim oraz spełnia zapisy ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U, z 2018 r. poz. 1668), jak i zapisy zawarte w Dz. U. 2022 poz. 574 z dnia 3 marca 2022 r. i wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Panią mgr inż. Ewelinę Ozgę do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

