

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Szabelskiego nt.  
„Badania wpływu obróbki cieplnej doczołowych połączeń klejowych  
na ich wytrzymałość statyczną”

Recenzję opracowano na zlecenie Prodziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej (pismo WM-278/2015 z dnia 06 listopada 2014 r.) na podstawie decyzji Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej z dnia 29 października 2014 r.

### **1. Wprowadzenie**

Podjęty przez Doktoranta temat rozprawy, dotyczący wpływu czynników technologicznych i eksploatacyjnych na wytrzymałość statyczną doczołowych połączeń klejowych, należy do grupy problemów ważnych poznawczo i użytkownie, ponieważ dotyczy zwiększenia trwałości wyrobów poprzez zastosowanie odpowiednich metod ich wytwarzania.

Technologia klejenia jest metodą łączenia części maszyn znaną i stosowaną od stuleci, która intensywnie jest wdrażana w budowie maszyn od momentu opracowania klejów polimerowych. W literaturze przytaczane są liczne wyniki badań wpływu czynników technologicznych i konstrukcyjnych na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych oraz przykłady optymalizacji parametrów klejenia różnych materiałów konstrukcyjnych, których celem była poprawa właściwości użytkowych węzłów konstrukcyjnych – wytrzymałości doraźnej, długotrwałej, zmęczeniowej. Mimo tego, że technologia klejenia została już dobrze poznana, to podjęta w pracy tematyka posiada aspekt poznawczy, ponieważ dotyczy określenia wpływu obróbki cieplnej, proporcji mieszania żywicy z utwardzaczem i temperatury eksploatacji na wytrzymałość statyczną doczołowych połączeń klejowych oraz sprężystość podłużną, udurowienie i twardość kleju.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca doktorska liczy 132 strony, zawiera 76 rysunków, 17 tabel oraz wykaz skrótów i symboli. Cytowana w pracy literatura liczy 111 pozycji ze źródeł krajowych (35%) i zagranicznych (65%). Na szczególne podkreślenie zasługuje aktualność cytowanej w pracy literatury, co świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy. Praca została podzielona na 10 rozdziałów. Rozprawę otwiera wstęp przedstawiający rozwój technologii klejenia oraz wskazujący na uzależnienie właściwości użytkowych połączeń klejowych od różnorodnych czynników technologicznych oraz eksploatacyjnych.

Rozdział pierwszy zawiera podstawowe informacje o procesie klejenia. W rozdziale tym Autor omówił zjawiska adhezji i kohezji, które warunkują powstanie złącza klejowego oraz jego właściwości wytrzymałościowe. Zwięźle scharakteryzowano adhezję mechaniczną, adsorpcyjną, dyfuzyjną i elektrostatyczną. Przedstawiono w nim również klasyfikację połączeń klejowych, sposoby ich obciążania oraz wymieniono Polskie Normy dotyczące badań wytrzymałościowych złączy klejowych.

Metody przygotowania i oceny powierzchni do operacji klejenia stanowią treść rozdziału trzeciego. Zawarto w nim charakterystykę mechanicznych i chemicznych sposobów przygotowania powierzchni części do klejenia oraz możliwość stosowania promotorów adhezji. Wskazano również na możliwość zastosowania obróbki laserowej i napawania plazmowego do konstytuowania powierzchni o dobrych właściwościach adhezyjnych. Do podstawowych sposobów oceny przygotowania powierzchni do klejenia zaliczył Autor wyznaczanie swobodnej energii powierzchniowej metodą pomiaru kąta zwilżania oraz pomiary chropowatości powierzchni.

Rozdział czwarty omawia sposoby utwardzania wybranych klejów konstrukcyjnych. Szczegółowo scharakteryzowano utwardzanie na skutek reakcji kleju z utwardzaczem i utwardzanie przez ogrzewanie oraz zwięźle omówiono utwardzanie na skutek reakcji aminowej, utwardzanie w reakcji z wodą, utwardzanie pod wpływem promieniowania UV, utwardzania na skutek reakcji anaerobowej, utwardzanie poprzez odparowanie rozpuszczalnika i utwardzanie klejów termotopliwych.

Wpływ ciepła na wytrzymałość połączeń klejowych omówiony został w rozdziale piątym. Przedstawiono w nim odporność cieplną oraz starzenie cieplne połączeń klejowych.

Rozdział szósty podsumowuje przegląd literatury i zawiera ocenę stanu zagadnienia oraz formułuje wnioski wskazujące na celowość przeprowadzenia badań zmierzających do określenia wzajemnego wpływu odróbki cieplnej zmienności proporcji żywicy epoksydowej do utwardzacza na wytrzymałość doczołowych połączeń klejowych w temperaturze otoczenia oraz podwyższonej.

Rozdział siódmy zawiera dwie hipotezy badawcze, cele pracy i zakres badań oraz uzasadnia wykonanie dodatkowych badań kleju (sztywności, udurowienia, mikrotwardości) nieujętych w temacie pracy doktorskiej.

Metodykę oraz wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono rozdziale ósmym. Zaprezentowano w nich wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie

doczołowych połączeń klejowych próbek walcowych ze stali S235JR sklejonych kompozycjami klejowymi Epidian 57/PAC oraz Loctite Hysol 9492 utwardzanych w temperaturze pokojowej (25°C) oraz 100°C. Próbki sklejono kompozycjami klejowymi różniącymi się proporcją masy żywicy do utwardzacza. Próby wytrzymałościowe prowadzono w temperaturze 25°C oraz 50°C dla kompozycji Epidian 57/PAC oraz w temperaturze 25°C oraz 70°C dla kompozycji dla kleju Loctite Hysol 9492. Wyniki badań przedstawiono w tabelach oraz postaci histogramów. Analiza statystyczna wyników badań obejmowała wyznaczenie współczynnika zmienności, analizę normalności oraz analizę równości wariancji serii. Badania wytrzymałości połączeń doczołowych uzupełnia analiza zniszczeń (złomów) zerwanych próbek. Oprócz badań sygnalizowanych w tytule rozprawy w rozdziale ósmym przedstawiono wyniki badań sprężystości podłużnej, udarności i twardości zastosowanych klejów.

W rozdziale dziewiątym przeprowadzono analizę uzyskanych wyników badań, która została zobrazowana histogramami. Dla badanych kompozycji klejowych przeanalizowano:

- względną zmianę średniej wytrzymałości statycznej między połączeniami dotwarzanymi cieplnie a niedogrzewanymi,
- względny wpływ odstępstwa od zalecanej proporcji żywicy i utwardzacza na zmianę średniej wytrzymałości połączeń doczołowych,
- względny wpływ odstępstwa od zalecanej proporcji żywicy i utwardzacza, sposobu utwardzania i temperatury badania na zmianę średniej wytrzymałości połączeń doczołowych,
- zmianę względnej średniej wytrzymałości po zastosowaniu dogrzewania cieplnego w zależności od odstępstw od zalecanej proporcji żywicy i utwardzacza,
- średnią wytrzymałość połączenia klejowego z charakterem zniszczenia próbki w zależności od sposobu utwardzania i składu kleju,
- wpływ składu kompozycji klejowej, warunków utwardzania oraz temperatury badania na moduł Younga badanych klejów,
- wpływ wartości modułu Younga na wartość wytrzymałości połączeń doczołowych,
- wpływ składu kompozycji klejowej, warunków utwardzania oraz temperatury badania na udarność badanych klejów,
- wpływ udarności na wartość wytrzymałości połączeń doczołowych,
- wpływ składu kompozycji klejowej, warunków utwardzania oraz temperatury badania na twardość badanych klejów,
- wpływ twardości na wartość wytrzymałości połączeń doczołowych.

Rozprawę doktorską kończą wnioski i uwagi końcowe (rozdział dziesiąty) dotyczące wpływu dotwarzania cieplnego, zawartości utwardzacza w kompozycji klejowej oraz temperatury, w której prowadzono próbę rozciągania, na wytrzymałość doraźną doczołowych połączeń klejowych.

### 3. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska posiada strukturę typową dla prac teoretyczno-odświadczalnych złożoną z analizy literatury, tezy, celu i zakresu pracy, metodyki badań, wyników badań oraz wniosków. Przyjęty tytuł rozprawy doktorskiej nie odzwierciedla w pełni problematyki pracy, ponieważ nie zawiera on informacji o badaniach wpływu odstępstw od zalecanej proporcji żywicy i utwardzacza na wytrzymałość statyczną doczołowych połączeń klejowych.

Oceniana praca doktorska stanowi przykład naukowego rozwiązywania problemu z zakresu technologii klejenia. Jej celem jest określenie wpływu obróbki cieplnej (dotwarzania) oraz odstępstw od zalecanej proporcji żywicy i utwardzacza na wytrzymałość statyczną doczołowych połączeń klejowych. O ile problematyka obróbki cieplnej połączeń klejowych dość dobrze została opisana w literaturze naukowej to problem wpływu odstępstw od zalecanej proporcji żywicy i utwardzacza w kompozycji klejowej na właściwości wytrzymałościowe połączeń adhezyjnych nie został kompleksowo przebadany. Przedstawione w pracy wyniki badań wpływu obróbki cieplnej i składu kompozycji klejowych na wytrzymałość statyczną doczołowych połączeń klejowych oraz moduł Younga, udarność i twardość badanych klejów jak również analiza charakteru zniszczeń połączeń poszerzają wiedzę z zakresu technologii klejenia. Wykazane w badaniach eksperymentalnych pogorszenie wytrzymałości statycznej w następstwie nadmiaru utwardzacza w kompozycji klejowej oraz brak pogorszenia właściwości wytrzymałościowych w przypadku niedoboru utwardzacza w kompozycji klejowej mogą być praktycznie wykorzystane przy projektowaniu operacji kontrolnych procesów klejenia realizowanych w warunkach przemysłowych.

Mocną stroną rozprawy doktorskiej jest część eksperymentalna, ujawniająca umiejętności Doktoranta w zakresie planowania eksperymentu, prowadzenia badań i pomiarów, opracowania i analizy wyników badań. Przeprowadzoną analizę statystyczną wyników badań, obejmującą wyznaczenie współczynnika zmienności, analizę normalności, analizę równości wariancji serii oraz budowę histogramów uważam za niepełną. Zastosowanie analizy wariancji ANOVA, regresji wielorakiej oraz korelacji pozwoliłoby na wyciągnięcie bardziej precyzyjnych wniosków dotyczących wpływu badanych czynników i właściwości zastosowanych klejów na wytrzymałość badanych połączeń klejowych. Proszę aby w odpowiedzi na moją recenzję Doktorant przedstawił wyniki proponowanych przeze mnie analiz statystycznych. Prowadząc badania eksperymentalne Doktorant zaprojektowała i wykonała oryginalne pomoce warsztatowe stosowane w procesie klejenia próbek.

W przeglądzie literatury dużo uwagi poświęcił Doktorant metodom przygotowania i oceny powierzchni do klejenia, natomiast w wynikach swoich badań podał jedynie informację o parametrach toczenia powierzchni klejonych próbek oraz wartość parametru  $Ra$ . Uważam, że w pracy doktorskiej powinna znaleźć się pełna charakterystyka struktury geometrycznej powierzchni w układzie 2D i 3D oraz wyniki pomiarów energii swobodnej powierzchni ukonstytuowanej w operacji toczenia czół klejonych próbek.

W pracy doktorskiej występuje wiele nieścisłości oraz nieprecyzyjnych sformułowań:

- s. 21 i 22 - brak opisów na wykresach rozkładów naprężeń w spoinach klejowych (rys. 6 oraz 7),
- s. 24 - „Zasadniczym celem operacji przygotowania powierzchni jest „wyeksponowanie” warstwy materiału...” - lepiej użyć sformułowanie „ukonstytuowanie warstwy wierzchniej lub powierzchni”,
- s. 30 - oznaczenia składowych napięcia powierzchniowego we wzorze (6) nie odpowiadają ich opisowi zamieszczonemu pod wzorem,
- s. 43 - „utwardzanie mechanizmów wtórnych ...”,
- s. 64 - w tekście podano, że dogrzewanie prowadzono w temperaturze 60°C, natomiast w tabelach 1 i 2 w temperaturze 100°C,
- s. 66 - w opisie rys. 34 mowa o „przyrządach do przechowywania próbek przy utwardzaniu” - przyrząd (uchwyt) służy do ustawienia próbek podczas utwardzania,
- s. 67 - nie wyjaśniono w pracy dlaczego próbki sklejące kompozycją Epidian 57/PAC zrywano w temperaturze 50°C, natomiast próbki sklejące kompozycją Loctite 9492 w temperaturze 70°C,
- s. 87 - na rys. 48b nie przedstawiono kształtek stosowanych w badaniach udarność kleju,
- s. 98 - „Odstępstwa od proporcji wyjściowej również istotnie wpływały na wpływ dogrzewania na wytrzymałość połączenia.”
- s. 113 - „Twardość jest miarą tworzywa sztucznego ...” - twardość jest właściwością materiału.

#### **4. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Podsumowując pragnę wyrazić opinię, że praca doktorska mgr inż. Jakuba Szabelskiego pt. „Badania wpływu obróbki cieplnej doczołowych połączeń klejowych na ich wytrzymałość statyczną” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z zakresu technologii klejenia oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu inżynierii produkcji, umiejętnością identyfikowania problemów naukowych i samodzielnego ich rozwiązywania z zastosowaniem różnych metod badawczych. Rozprawa jest opracowaniem wartościowym zawierającym oryginalne podejście do przedmiotu badań. Przedstawione w pracy uwagi krytyczne nie obniżają jej oceny i powinny przyczynić się do doskonalenia warsztatu naukowego Doktoranta.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Szabelskiego spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym (Dz. U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

