

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Rejka nt.: „**Analiza czynników wpływających na szczelność połączeń nierozłącznych układów chłodniczych**”

Promotor: dr hab. inż. Joanna Królczyk, prof. PO
Promotor pomocniczy: dr inż. Nikodem Wróbel

Podstawa opracowania: pismo IIM-D.51.511.17.2022.JG. z dnia 20.10.2022 r.

*Pani Dyrektor Instytutu Inżynierii Mechanicznej,
dr. hab. inż. Justyny Patalas-Maliszewskiej, prof. UZ*

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 224 strony, a w tym: 2 str. spisu treści, 1 str. wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów; 171 str. zasadniczej części pracy; 12 str. wykazu literatury (148 pozycji); 9 str. spisu rysunków; 2 str. spisu tabel; 1 str. streszczenia w j. polskim oraz 1 str. streszczenia w j. angielskim; 18 str. załączników zawierających: *kopie patentu na prototypowe stanowisko; projekt szczegółowy urządzenia generującego obciążenia i przemieszczenia; rozważania koncepcyjne; opis mechaniczny urządzenia; opis elektryczny urządzenia; opis algorytmu sterującego urządzeniem; wartości parametrów topografii powierzchni będących przedmiotem badań.*

Praca składa się z 5 głównych rozdziałów.

Praca została opracowana bardzo starannie pod względem redakcyjnym.

We wstępie (s.9-s.10) Autor rozprawy w skrócie przedstawia aktualne, wiodące trendy związane z projektowaniem innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn i urządzeń technologicznych, w których ważną rolę odgrywają połączenia poszczególnych części i zespołów. Jednym z istotnych problemów eksploatacyjnych jest szczelność połączeń, która może być przyczyną przecieków prowadzących do awarii urządzeń w trakcie ich eksploatacji.

Szczelność połączeń jest w znacznej mierze zależna od stanu powierzchni połączeń, zaś jednym z warunków decydujących o jakości złączy jest topografia powierzchni. Trójwymiarowa, w jęciu przestrzennym, topograficzna analiza powierzchni jest właściwym podejściem do oceny właściwości tribologicznych powierzchni, a w tym także szczelności połączeń. Te zagadnienia zostały przedstawione w opiniowanej rozprawie. Podjęte przez Doktoranta badania eksperymentalne pozwoliły na analizę czynników wpływających na szczelność połączeń nierozłącznych na przykładzie wybranych układów chłodniczych. **W świetle tych uwarunkowań podjęcie zaproponowanego tematu rozprawy doktorskiej, uznaję za trafne i w pełni uzasadnione przedsięwzięcie.**

W rozdziale 1 - analiza danych literaturowych (s.11-s.49) Doktorant zawarł szczegółową **charakterystykę połączeń nierozłącznych** wyodrębniając 3 kategorie: połączenia nierozłączne spajane, połączenia nierozłączne odkształcone plastycznie i połączenia nierozłączne wciskane.

Głównym sposobem uzyskania spajanego połączenia nierozłącznego jest operacja spawania. W przemyśle motoryzacyjnym najczęściej używanymi metodami są spawanie laserowe oraz spawanie metodą CMT (*Cold Metal Transfer* - metoda spawania o ograniczonej energii cieplnej wprowadzanej podczas spawania).

Drugą popularną metodą wytwarzania połączeń nierozłącznych spajanych jest lutowanie. W przemyśle motoryzacyjnym są także stosowane nierozłączne połączenia nitowane, należące do kategorii połączeń nierozłącznych odkształconych plastycznie.

Oprócz połączeń nitowanych w przemyśle motoryzacyjnym stosuje się również połączenia wykonane poprzez klinczowanie. Polega ono na łączeniu elementów poprzez formowanie na zimno małego fragmentu powierzchni łączonych części za pomocą stempla i matrycy bez udziału dodatkowych pośrednich części, jak np. nitów. W tej grupie metod łączenia Doktorant omawia także metody montażu za pomocą klejenia oraz procesów zaciskania.

Każda z wymienionych metod wykonywania połączeń nierozłącznych została wyczerpująco zilustrowana odpowiednimi schematami i szczegółowo omówiona.

Drugim zagadnieniem, które podjął mgr inż. M. Rejek jest **szczelność połączeń**, określana jako „...nieprzepuszczalność danego czynnika poza określony i zamknięty zbiornik, w którym został uprzednio umieszczony”. Autor rozprawy stwierdza, że „... absolutna szczelność nie jest możliwa do uzyskania”.

W celu zredukowania przecieków wskutek nieszczelności stosuje się różnego typu uszczelnienia. Uszczelnienia metalowe mają zastosowanie w warunkach, w których działają na uszczelkę ekstremalne warunki obciążeń. Skuteczność uszczelnienia zależy od rzeczywistej powierzchni kontaktu pomiędzy uszczelnianymi powierzchniami. Decydujący wpływ ma jakość powierzchni kontaktu, tj. dokładność kształtu i chropowatość powierzchni. Autor rozprawy przedstawił wyczerpującą analizę dotychczasowych, modelowych prac badawczych z tego zakresu, prezentowanych w literaturze.

W podsumowaniu tej części analizy mgr inż. M. Rejek stwierdza m.in.: „... wszystkie badania zdecydowanie potwierdzają, że głównymi czynnikami warunkującymi otrzymywany przeciek w uszczelnieniach statycznych są: wywierany nacisk kontaktowy, właściwości materiału części uszczelniającej oraz topografia powierzchni uszczelki, jak i części z nią współpracujących. Dwa pierwsze czynniki są łatwe do kontrolowania, jednak pełna kontrola topografii powierzchni podczas procesów produkcyjnych jest wciąż ograniczona”.

Dlatego też były i nadal są podejmowane liczne prace badawcze oraz próby opracowania analitycznego modelu w celu określenia zależności między nierównością powierzchni, a uzyskiwanym przeciekiem. Doktorant przedstawił też badania szczelności urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych wraz z charakterystyką stosowanej aparatury.

Kontynuując analizę zagadnienia wytwarzania szczelnych nierozłącznych połączeń Autor rozprawy skoncentrował się na określeniu wpływu chropowatości powierzchni przylegających do siebie na występujące przecieki. Przedstawił szczegółową analizę charakterystyki chropowatości powierzchni bazując na informacjach zawartych w cytowanej literaturze nt. struktury geometrycznej powierzchni oraz właściwych temu metodach pomiaru, a także stosownych definicji i wymagań zawartych w normach ISO.

Podsumowując przedstawioną przeze mnie w sposób bardzo skrótowy analizę literatury dotyczącej podjętej przez mgr. inż. Michała Rejka rozprawy doktorskiej **uważam, że jest ona godna polecenia jako przykład osobom podejmującym pracę doktorską, bowiem została opracowana w sposób metodycznie uporządkowany.**

Rozdział 2 - hipotezy, cel i zakres pracy (s.50-s.51)

Doktorant sformułował trzy hipotezy:

1. *istnieją istotne związki między parametrami topografii powierzchni, a właściwością użytkową powierzchni - szczelnością;*
2. *istnieje zależność pomiędzy wytrzymałością i uzyskiwaną szczelnością złącza zagniatanego, a grubością ścianki zagniatanej;*

3. istnieje możliwość wytworzenia szczelnego na danym poziomie połączenia nierozłącznego bez wykorzystania dodatkowego uszczelnienia.

Przedstawione hipotezy dotyczą wytwarzania szczelnych połączeń nierozłącznych w układach klimatyzacji, wykonywanych metodą zagniatania bez wykorzystania dodatkowych uszczelnień. Zostały one sformułowane po uwzględnieniu analizy publikacji oraz przeprowadzonych przez Doktoranta wstępnych badań rozpoznawczych.

Hipotezom zostały podporządkowane cele pracy oraz zakres niezbędnych do wykonania badań. **Do przedstawionych hipotez celu i zakresu planowanych badań nie mam uwag.**

Rozdział 3 - metodyka badań doświadczalnych (s.52-s.77) zawiera szczegółowy opis zaprojektowanego połączenia nierozłącznego (rys.3.1) wraz z techniką i technologią jego wykonania za pomocą obróbki mechanicznej. Części badanego połączenia zostały wykonane ze stopu aluminium EN-AW 5754 H111. Właściwości mechaniczne i skład chemiczny stopu aluminium zostały podane w tab. **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** i tab. **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** Wymiary wraz z tolerancjami trzech wariantów próbek zawiera tab.3.3 i rys.3.2.

Ważną czynnością jest operacja formowania połączenia. Doktorant szczegółowo i z bardzo dobrą charakterystyką przedstawił metody zespoły oraz urządzenia formujące połączenie nierozłączne, tj.:

- **metodę czterech szczęk** wraz ze schematem ruchu wytwarzania złącza (rys.3.3) oraz przykładowe połączenie nierozłączne wykonane z użyciem czterech szczęk formujących z zaznaczonymi wyływkami kształtowanego materiału (rys.3.4);
- **projekt zespołu formującego** do realizacji metody czterech szczęk w procesie kształtowania połączenia nierozłącznego (rys.3.5 i rys.3.6);
- **metodę stempla formującego** wraz ze schematem ruchu wytwarzania złącza z użyciem stempla formującego (rys.3.7) i przykładowym połączeniem nierozłącznym wykonanym za pomocą tej metody (rys.3.8) i projektem zespołu formującego do kształtowania połączenia nierozłącznego (rys.3.9 i rys.3.10).

Kolejnym, ważnym elementem metodyki badań jest urządzenie generujące kontrolowane obciążenie i przemieszczenie narzędzi umieszczonych w zespole formującym (rys.3.11). Urządzenie składa się z dwóch niezależnych układów napędowych wyposażonych w serwonapędy, które pozwalają na precyzyjnie i powtarzalnie pozycjonowanie zespołów. Każda z osi jest wyposażona w czujniki tensometryczne i wzmacniacz do kontrolowania obciążenia generowanego przez poszczególne osie. Rejestracja wyników pomiarów jest realizowana przez system akwizycji danych (rys.3.12). Główne elementy konstrukcji zespołu formującego są przedstawione na rys.3.13 - rys.3.15.

Testy wytrzymałościowe wytworzonych złączy zostały przeprowadzone na podstawie norm EN ISO 12996:2013, EN 2591-417:2007 i PN-EN 1993-1-8.

Szczegółowo zostały opisane zaprojektowane i wykonane **próbki do badań szczelności**. Do badań wybrano 48 części. Próbki zostały podzielone na dwie grupy o odmiennym sposobie wytwarzania powierzchni, wśród których wyodrębniono 5 podgrup różniących się wartością parametru Ra chropowatości powierzchni. Powierzchnie testowanych próbek były poddane obróbce toczeniem (T - oznaczenie próbek) lub frezowaniem (F - oznaczenie próbek) w zakresie wartości parametru Ra: 6,3 μm , 3,2 μm , 1,6 μm , 0,8 μm , 0,4 μm .

Do każdej z wytypowanych grup należało pięć powierzchni wykonanych z jednakowymi parametrami obróbki skrawaniem. Ilość próbek wynikała z założonych wstępnie sił docisku dwóch powierzchni względem siebie, tj. 4 kN, 6 kN, 8 kN, 10 kN oraz 12 kN, przy czym każda z powierzchni próbek należących do danej grupy była ściskana z określoną wartością siły. Minimalne obciążenie testowe zostało wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań

wstępnych. Podczas tych badań dla próbki o wartości chropowatości powierzchni $Ra = 4,3 \mu\text{m}$ i wartości wywieranej siły 4kN osiągnięto przeciek na poziomie $1 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$.

Wymiary części badanych zostały przedstawione na rys.3.16 i rys.3.17. Składy chemiczne materiałów, z których wykonano próbki zostały podane w tab.3.4 (stop aluminium EN-AW 5754 H111 zgodny z normą PN-EN 573-3:2019-120 oraz w tab.3.6 (nierdzewna stal chromowa 2H17N2 zgodny z normą PN-EN 10088-1:2014-12). Odpowiednio właściwości mechaniczne stopu aluminium EN-AW 5754 H111 są zawarte w tab.3.5, oraz nierdzewnej stali chromowej 2H17N2 w tab.3.7.

Pomiary chropowatości powierzchni próbek były wykonane z wykorzystaniem optycznego profilometru 3D Sensofar S neox, działającego na zasadzie interferometrii ze skanowaniem koherencyjnym (*ang. CSI - Coherence Scanning Interferometry*), która jest jedną z odmian interferometrii światła białego. Szczegółowa charakterystyka stanowiska do badań topografii powierzchni (rys.3.18) została przedstawiona w rozprawie doktorskiej.

Podobnie szczegółowo została przedstawiona charakterystyka **stanowiska do lokalizacji nieszczelności** (rys.19 i rys.3.22 - stanowisko do badań szczelności z testerem helowym z sondą detekcyjną). Parametry testowe zadane na stanowisku do lokalizacji nieszczelności są ujęte w tab.3.8.

Ważnym etapem badań **była weryfikacja urządzenia** metodą elementów skończonych w środowisku Solidworks Simulation. Na podstawie zaprojektowanego modelu CAD została przygotowana reprezentacja złożonego układu geometrycznego z metody MES (rys.3.23-rys.3.27). Wyniki tej analizy były podstawą do stwierdzenia, czy zaprojektowane oraz wykonane urządzenie pozwala na wiarygodne zweryfikowanie wymaganej siły docisku w zależności od charakterystyki powierzchni wykonanych próbek.

Syntezę usystematyzowanych, logicznych działań podjętych do realizacji pracy doktorskiej mgr inż. M Rejek przedstawił na schemacie - rys.3.28. Każdy z etapów, tj. badania wstępne, badania zasadnicze oraz badania weryfikacyjne zawiera zadania, które zostały szczegółowo i z dużą starannością ujęte w pracy.

Rozdział 4 - badania własne i ich analiza (s.78-s.173) zawiera wyniki badań szczelności połączeń, które zostały przygotowane i scharakteryzowane w poprzednim rozdziale. Dotyczą one następujących zagadnień:

- wpływu topografii powierzchni na szczelność wytwarzanego połączenia dla próbek wykonanych wybraną techniką, tj.:
 - ✓ wpływu topografii powierzchni próbek wykonanych w procesie toczenia na szczelność połączenia (s.79-s.115);
 - ✓ wpływu topografii powierzchni próbek wykonanych w procesie frezowania frezem walcowo-czołowym na szczelność połączenia (s.116-s.145);
- badań połączeń nierozłącznych wytwarzanych dwiema metodami, tj.:
 - ✓ analizy złączy wytworzonych metodą czterech szczęk (s.146-s.156);
 - ✓ analizy MES procesu wytwarzania złączy metodą stempla formującego (s.157-s.163);
 - ✓ analizy złączy wytworzonych metodą stempla formującego (s.163-s.173).

Nie przedstawiam w recenzji szczegółowego omówienia każdego z zagadnień ze względu na obszerność informacji zawartych w rozprawie doktorskiej. Natomiast **podkreślam, że wyniki badań zostały z dużą starannością i rzetelnością udokumentowane oraz zaprezentowane syntetycznie w postaci tabel i wykresów.**

Rozdział 5 - Wnioski końcowe (s.174-s.179) jest zwięzłym, kompletnym podsumowaniem efektów badań osiągniętych przez Doktoranta. Należy podkreślić, że każdy ze sformułowanych wniosków poznawczych oraz użytkowych został uzupełniony odpowiednim komentarzem.

W recenzji przedstawiam tylko skrótowo podsumowujące sentencje w odniesieniu do tych wniosków.

We wnioskach poznawczych Doktorant między innymi stwierdza, że:

- powierzchni otrzymane w procesie toczenia, osiągały mniejsze wartości przecieku w teście szczelności w porównaniu do powierzchni wytworzonych poprzez operacje frezowania przy porównywalnych siłach ściskających;
- wartość przecieku dla powierzchni, które zostały wykonane w procesie toczenia, jak i w procesie frezowania, spada wraz ze wzrostem wartości siły ściskającej;
- parametry obróbki mechanicznej decydujące o strukturze geometrycznej obrobionej powierzchni wpływają na wartość przecieku; uzasadniona jest więc optymalizacja wartości tych parametrów;
- konstrukcja oprzyrządowania technologicznego i sposób wywierania nacisku przy wykonywaniu złączy zaciskowych także wpływają na wartość przecieku.

We wnioskach użytkowych Doktorant podaje m. in. wartości parametrów topografii powierzchni wykonanych w procesie toczenia oraz frezowania, przy których została osiągnięta najniższa wartość przecieku przy sile ściskającej na poziomie 12,5 kN.

W propozycjach kierunków dalszych badań Doktorant sugeruje aby:

- rozszerzyć badania wpływu parametrów topografii powierzchni wykonanych poprzez odmienne procesy obróbki na wymagane siły ściskające i wartości przecieku o parametry opisujące falistość powierzchni;
- zbadać korelacje parametrów chropowatości i falistości powierzchni oraz ich wpływ na siły ściskające i wartości przecieku z uwzględnieniem parametrów opisujących falistość powierzchni.

Podsumowując całość przeprowadzonych badań oraz uzyskanych wyników stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Wyniki te poszerzają wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w obszarze inżynierii produkcji, a także w zakresie metod identyfikacji i oceny szczelności połączeń nierozłącznych.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Michał Rejek przedstawił w rozprawie spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu techniki i technologii połączeń nierozłącznych. Opracował oryginalne rozwiązania konstrukcyjne oprzyrządowania technologicznego do tworzenia tych połączeń oraz przetestował skuteczność jego działania.

Doktorant potwierdził, że bardzo dobrze opanował niezbędną wiedzę inżynierską do opracowania nowych rozwiązań projektowych oraz wiedzę z zakresu planowania i organizacji eksperymentów wraz z analizą wyników badań. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że mgr inż. Michał Rejek dysponuje usystematyzowanym zasobem wiedzy oraz umiejętności do realizacji prac badawczych i dalszego rozwoju naukowego.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego, związanego z rozwojem wyrobów i planowania produkcji w celu zapewnienia akceptowalnej jakości użytkowej tych wyrobów. **Rozprawa doktorska została opracowana bardzo starannie pod względem merytorycznym i redakcyjnym.**

Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości, a także istotne walory użyteczne. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Michała Rejka zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała Rejka nt.: „Analiza czynników wpływających na szczelność połączeń nierozłącznych układów chłodniczych” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r., a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 7 grudnia 2022 r.



Józef Gawlik