

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK
ul. Lazurowa 185C m 122
01-476 Warszawa

Warszawa, dn. 16.12.2022 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Rejka
pt. „Analiza czynników wpływających na szczelność połączeń nierozłącznych
układów chłodniczych”

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Dyrektora Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego, Pani dr hab. inż. Justyny Patalas-Maliszewskiej, prof. UZ, nr IMIM/DP/215/2021 z dnia 20 października 2022 r.

1. Wstęp

Wśród szerokiej grupy połączeń części maszyn, mechanizmów i urządzeń znaczące miejsce zajmują połączenia nierozłączne realizowane z wykorzystaniem łączników, tzw. połączenia pośrednie lub bez tych łączników, określane jako połączenia bezpośrednie. Powszechne przekonanie o gruntownej wiedzy na temat teoretycznych i praktycznych aspektów realizacji i właściwości użytkowych tego typu połączeń nie znajduje potwierdzenia w realiach coraz wyższych wymagań eksploatacyjnych warunkujących między innymi poszukiwania nowych materiałów konstrukcyjnych oraz wdrażania innowacyjnych technik ich wytwarzania i spajania. Na tej niwie w ostatnich latach kształtuje się niezwykle istotny obszar aktywności naukowej leżący u podstaw rozwoju nowoczesnych rozwiązań inżynierskich a obejmujący między innymi prace nad połączeniami nierozłącznymi, w szczególności dotyczące funkcjonalności tychże.

W świetle powyższego, podjęcie w recenzowanej pracy doktorskiej badań mających na celu racjonalny dobór technologii kształtowania połączeń nierozłącznych stosowanych między innymi w układach chłodniczych, zmierzających do zapewnienia ich szczelności i poszerzonych o identyfikację i opis istoty zjawisk determinujących jakość tego typu połączeń nierozłącznych uważam za w pełni uzasadnione.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Rejka składa się z 5 rozdziałów, wykazu literatury, spisów rysunków i tabel zamieszczonych po tych wykazach streszczeń rozprawy w języku polskim i angielskim oraz trzech załączników zawierających: opis patentowy urządzenia do wykonywania nierozłącznego złącza pomiędzy rurą i króćcem przyłączeniowym, projekt szczegółowy urządzenia generującego obciążenie i przemieszczenie podczas badań szczelności próbek oraz zbiór tabel zawierających wartości parametrów topografii powierzchni będących przedmiotem badań.

Praca na 225 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami oraz fotografiami wytworzonych i poddanych badaniom złączy, aparatury i stanowisk badawczych wykorzystywanych podczas badań własnych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 179 rysunków i 30 tabel.

W dwustronicowym wstępie Doktorant w sposób syntetyczny opisuje istotę zjawisk determinujących jakość połączeń nierozłącznych, podkreślając znaczenie świadomego sterowania nimi i postrzegając znaczenie wykorzystywania takiej umiejętności w procesach produkcyjnych. Szczególną uwagę skupiono na uzasadnieniu trójwymiarowego podejścia podczas analizy powierzchni elementów współpracujących, w tym elementów składowych połączeń nierozłącznych wybranych układów chłodniczych.

W rozdziale pierwszym poświęconym analizie danych literaturowych, na 39 stronach, w oparciu o 141 pozycje literaturowe dokonany został przegląd opracowań dotyczących połączeń nierozłącznych i opublikowanych wyników badań szczelności tego typu połączeń wykorzystywanych w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem tematyki topografii powierzchni, jako zagadnienia stanowiącego rdzeń obszaru badań własnych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że aż 73 z przywołanych publikacji ukazało się w ciągu ostatnich 10 lat.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych literaturowych oraz sprecyzowane we wstępie uzasadnienie konieczności podjęcia prac nad racjonalnym doбором technologii kształtowania złączy szczelnych oraz określeniem cech funkcjonalnych powierzchni mających zapewnić tę szczelność w kontekście wydajności stosowanych procesów technologicznych wytwarzania tego typu złączy legły u podstaw sprecyzowania w następnym, drugim rozdziale hipotez i celów rozprawy. Na podstawie wyników przeprowadzonych wstępnych badań własnych wyszczególniono hipotezy w brzmieniu:

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

i dwa cele pracy w brzmieniu:

1) Porównanie i ocena wybranych parametrów topografii oraz identyfikacja parametrów mających wpływ na wybraną cechę funkcjonalną powierzchni, tj. uzyskanie wartości przecieku znajdującego się w określonym, zdefiniowanym w rozprawie obszarze,

2) Wytworzenie szczelnego połączenia nierozłącznego bez wykorzystania dodatkowego uszczelnienia przy użyciu jednej z dwóch metod formowania złącza zaprezentowanych w rozprawie oraz pomiary i ocena wpływu geometrii połączenia na jego wybrane cechy funkcjonalne.

Oczywiście treść przytoczonych hipotez oraz celów w pełni ujmują zamierzenia Doktoranta, nie mniej zalecana precyzja ich formułowania skłania do dyskusji nad syntezą części zapisów i wydzieleniem celów: naukowego i utylitarnego, które często są osiągnane poprzez rozwiązanie konkretnego problemu technologicznego. W praktyce Doktorant podjął się bowiem opracowania technologii wytwarzania szczelnego, nierozłączalnego złącza przeznaczonego do układów chłodniczych realizując przy tym niezwykle obszerny zakres badań naukowych obejmujących m.in.: analizę wpływu zbadanych parametrów topografii powierzchni łączonych elementów i siły ściskającej na szczelność połączenia, ocenę wpływu wybranych procesów obróbczych na siły zacisku złączy i wartości przecieku a także wpływu geometrii wytwarzanego połączenia nierozłącznego na siły wymagane do jego wytworzenia, na jego wytrzymałość i szczelność dla różnych wartości średnicy kołnierza bloku przyłączeniowego oraz grubości ścianki kołnierza. Założono, że zwieńczeniem założonego programu badawczego będzie weryfikacja szczelności wytworzonych złączy przy użyciu zaproponowanych w pracy metod.

Rozdział trzeci liczący 26 stron poświęcono opisowi metodyki badań doświadczalnych. W rozdziale tym dokonano identyfikacji zarówno przedmiotu badań jak i zastosowanych podczas realizacji pracy metod i technik badawczych. Ocenę szczelności rozpatrywanych w rozprawie połączeń-próbek przeprowadzono w zależności od siły docisku dwóch powierzchni względem siebie i metody wykonania badanych powierzchni oraz parametrów ich wykonania, z uwzględnieniem lokalizacji występujących nieszczelności. Do tego celu

wykorzystano stanowisko z sondą detekcyjną i kalibracyjną. Jako próbkę zastosowano w tym przypadku element dociskowy z trzpieniem gwintowanym o gładkiej powierzchni dociskowej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że do weryfikacji wymaganej siły docisku, w zależności od charakterystyki powierzchni elementów wykonanych próbek, zostało zaprojektowane i wykonane przez Doktoranta urządzenie umożliwiające zmianę siły docisku współpracujących elementów. Do realizacji zaplanowanych, obszernych badań topografii powierzchni wytworzonych próbek wykorzystano profilometr optyczny. Rozdział zamyka przedstawiony w formie blokowej algorytm realizacji badań własnych, ujmujący zakres badań wstępnych, zasadniczych, jak i weryfikacyjnych.

Zasadniczą część rozprawy stanowi rozdział czwarty zatytułowany *Badania własne i ich analiza*, liczący 97 stron. W rozdziale tym przedstawiono, zachowując logiczny układ, wyniki szeroko nakreślonych badań, które można podzielić na dwa obszary badawcze:

- 1) Badania wpływu topografii powierzchni na szczelność wytwarzanego połączenia dla próbek wykonanych wybraną techniką. Rozpatrzono w tym przypadku topografię powierzchni próbek wykonanych w procesach toczenia i frezowania frezem walcowo-czołowym.
- 2) Badania funkcjonalne połączeń nierozłącznych zaciskanych dwiema metodami: metodą czterech szczęk i metodą stempla formującego.

W praktyce realizacja powyższych punktów posłużyła do osiągnięcia celu o charakterze utylitarnym, tj. wytworzenia szczelnego połączenia nierozłącznego bez wykorzystania dodatkowego uszczelnienia przy użyciu jednej z dwóch metod formowania złącza zaprezentowanych w rozprawie

Doktorant dążąc do jednoznacznej identyfikacji efektów zastosowania konkretnych metod obróbki mechanicznej w odniesieniu do parametrów opisujących chropowatość powierzchni w ujęciu przestrzennym, dokonał licznych pomiarów parametrów funkcjonalnych generowanych powierzchni zarówno przed, jak i po teście szczelności. Uzyskany materiał badawczy, jego obróbka i opracowanie zapewnia zrealizowanemu procesowi badawczemu wymóg intersubiektywnej kontroli i stanowi bazę do obszernego wnioskowania.

Założone, zbliżone wartości parametrów Ra wytypowanych do badań grup próbek wykonanych podczas toczenia i frezowania zapewniły Doktorantowi możliwość spójnej interpretacji wyników badań szczelności złącza przy zmiennych wartościach siły zacisku. Zasadnym w tym przypadku wydaje się przeprowadzenie szczegółowej analizy wyników badań w oparciu o wybrane parametry topograficzne powierzchni elementów. Ocenę

szczelności badanych złączy, przy założonej wartości siły zacisku złącza, przeprowadzono po obciążeniu wstępnym i następującym po nim teście wysokociśnieniowym. Do tego celu wykorzystano medium w postaci mieszaniny helu. Wyniki pomiarów szczelności przedstawiono w formie czasowych przebiegów zmian ciśnienia i wartości wycieku oraz zmian wartości wycieku w zależności od siły zacisku złącza i od wybranych parametrów topograficznych powierzchni. Należy podkreślić, że dla dwóch rozpatrywanych metod obróbki mechanicznej przyjęto ujednoliconą formę prezentacji wyników badań szczelności badanych złączy.

Zasadniczą część badań połączeń nierozłącznych wytwarzanych metodami czterech szczęk i stempla formującego poprzedzono określeniem parametrów zapewniających wykonanie poprawnego złącza, bez imperfekcji wywołanych niewłaściwym doborem drogi pokonywanej przez narzędzie podczas realizacji połączenia. W przypadku metody stempla formującego obszar badawczy poszerzono ze względów praktycznych o analizę MES procesu wytwarzania złączy, służącą weryfikacji zaproponowanego w pracy narzędzia. Wyniki obliczeń numerycznych poddano walidacji podczas praktycznej realizacji połączenia. Ciągła rejestracja przemieszczenia złącza względem stempla, przy nieruchomym narzędziu formującym oraz zmiany wartości siły umożliwiły w tym przypadku prezentację wyników badań w formie czasowych przebiegów zmian tych wielkości.

Opisane z należytą starannością w rozdziale czwartym wyniki badań zapewniły możliwość obszernego wnioskowania, które Doktorant przedstawił w rozdziale piątym. Zamieszczenie wyczerpujących odpowiedzi na hipotezy pracy ułatwia czytelnikowi możliwość płynnego zapoznania się z wnioskami poznawczymi i użytkowymi zamykającymi część zasadniczą rozprawy.

3. Ocena rozprawy

Ustawiczny rozwój technologii wytwarzania materiałów i konstrukcji dostosowanych do rosnących wymagań różnorodnych gałęzi przemysłu musi iść w parze z rozwojem technologii zapewniających ich aplikacje w postaci elementów konstrukcyjnych i połączeń tych elementów. Przemawiają za tym coraz wyższe oczekiwania eksploatacyjne, a spełnienie ich, jak słusznie zaznaczył Doktorant w recenzowanej monografii, jest możliwe dzięki stosowaniu innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych lub projektowaniu technologicznej warstwy wierzchniej współpracujących części zarówno w połączeniach ruchowych jak i spoczynkowych. Całość recenzowanej pracy pod względem merytorycznym zasługuje na bardzo dobrą ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Nieliczne uwagi dotyczące obszaru

merytorycznego rozprawy wynikają przede wszystkim z woli uściślenia niektórych zagadnień, mogących stanowić przyczynek do dyskusji podczas obrony recenzowanej rozprawy i dotyczących następujących problemów:

- 1) Szereg trudności związanych z realizacją szczelnych połączeń nierozłącznych coraz częściej skłania konstruktorów do prac nad rozwiązaniem tego problemu. W pracy podjęto próbę opracowania połączenia szczelnego połączenia nierozłącznego bez wykorzystania dodatkowego uszczelnienia. Takie rozwiązanie wymaga zapewnienia wymaganych parametrów określających topografię współpracujących powierzchni elementów połączenia pod kątem ich wpływu na uzyskiwany przeciek. Zachodzi pytanie: czy mimo wszystko zastosowanie odpowiednich uszczelnień w tego typu połączeniach nie jest prostszym, a przy tym tańszym rozwiązaniem? Co legło u podstaw podjęcia prac nad rozpatrywanym rozwiązaniem bez wykorzystania dodatkowego uszczelnienia?
- 2) W pracy do wykrywania nieszczelności wytworzonych połączeń zastosowano system detekcji nieszczelności gazami znakującymi. W praktyce do tego celu wykorzystywane są również inne metody, np. ciśnieniowa próba szczelności za pomocą odtlenionego azotu, czy próba próżniowa. Co zdecydowało o wyborze zastosowanej metody detekcji nieszczelności?
- 3) W opisie parametrów testowych zadanych na stanowisku do lokalizacji nieszczelności nie uwzględniono temperatury medium wykorzystywanym podczas poszczególnych etapów badań ani temperatury otoczenia. Jakiego wpływu na wystąpienie nieszczelności należy spodziewać się w przypadku zmian tej temperatury. Dlaczego zrezygnowano z włączenia do zakresu pracy tego zagadnienia?
- 4) Na stronie 66 rozprawy zamieszczono informację dotyczącą stopu aluminium EN-AW 5754 H111, zastosowanego do wytworzenia jednego z elementów podczas badań szczelności połączenia, dodając sformułowanie: „z wykorzystaniem różnego procesu obróbki”. O jakim procesie obróbki Doktorant w tym przypadku wspomina? Stan utwardzenia H111 jednoznacznie opisuje obróbkę cieplną stopu w postaci umocnionej przez walcowanie na zimno. Możliwe, że autorowi chodziło o procesy obróbki skrawaniem, ale to nie wynika z przytoczonego zapisu.

Pewne uwagi mogą również budzić nieliczne kwestie o mniejszym znaczeniu, natury edytorskiej, a dotyczące na przykład:

- zapisu „... dostarczenie do badanych części określonej energii w postaci siły ściskającej ...” - str. 70₁,
- zapisu „Rys. 3.26 przedstawia ...” (str. 75₁₅),
- zakończenie punktu podpisem pod rysunkiem (rys. 3.28).

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy interpunkcyjne, które przekazano bezpośrednio Doktorantowi do wykorzystania podczas przygotowywania publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie bardzo wysoką ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Doktorant wykazał się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych oraz bardzo dużą wiedzą w zakresie nowoczesnych technologii wytwarzania, a do jego oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Ustalenie w rozpatrywanym przypadku połączenia nierozłącznego związku między parametrami topografii powierzchni a szczelnością, rozumianą jako właściwość użytkową powierzchni,
- 2) Zbadanie wpływu geometrii wytwarzanego połączenia na siły wymagane do jego wytworzenia dla określonych wartości średnicy kołnierza bloku przyłączeniowego i grubości ścianki kołnierza,
- 3) Ustalenie zależności pomiędzy wytrzymałością i szczelnością złącza a grubością ścianki zagniatanej,
- 4) Wykazanie możliwości wykonania połączeń nierozłącznych o określonym poziomie wartości przecieku bez użycia dodatkowego materiału uszczelniającego dla złączy wykonanych metodą stempla formującego,
- 5) Wykazanie zbieżnej zależności pomiędzy wytrzymałością, uzyskiwaną szczelnością złącza zagniatanego a grubością ścianki zagniatanej dla połączeń nierozłącznych wykonanych metodą czterech szczęk i metodą stempla formującego,
- 6) Zaprojektowanie i wykonanie prototypowego urządzenia generującego określone obciążenie i przemieszczenie wraz z gniazdami formującymi podczas realizacji połączenia,
- 7) Opatentowanie zastosowanego w pracy urządzenia generującego określone obciążenie i przemieszczenie do wykonywania nierozłącznego złącza pomiędzy rurą i złączem przyłączeniowym.

4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pana mgr. inż. Michała Rejka wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorant posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i zagadnień praktycznych oraz ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na wysokim poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zjawisk, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą istotnych zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Michała Rejka pt.: *„Analiza czynników wpływających na szczelność połączeń nierozłącznych układów chłodniczych”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu *„Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”* z dnia 14 marca 2003 roku oraz dodatkowo Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *„Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”*. Jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Zielonogórskiego o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych badań, poziom naukowy oraz potencjał aplikacyjny rozprawy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

