

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Pety

**pt. „Ocena lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła
za pomocą sztucznych sieci neuronowych”**

Podstawa opracowania recenzji: Pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. nadzw. Politechniki Poznańskiej z dnia 10 lipca 2018 r. o powołaniu przez Radę Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Pety.

1. Ocena znaczenia problemu badawczego i oryginalności rozwiązania przedstawionego w pracy doktorskiej

Przedmiotem opiniowanej rozprawy jest opracowanie procedur oceny lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Problem badawczy poruszany w pracy jest bardzo aktualny i ważny zarówno ze względów gospodarczych jak i społecznych. Wymienniki ciepła są kluczowymi elementami stosowanymi w pojazdach samochodowych, a stosowane w trakcie ich montażu połączenia lutowane muszą spełniać wyjątkowo wysokie wymagania dotyczące szczelności, wytrzymałości mechanicznej i odporności na korozję. Praca obejmuje bardzo ważne z naukowego i praktycznego punktu widzenia zagadnienia budowy i eksploatacji urządzeń. Cechą szczególną ocenianej pracy jest jej uniwersalny charakter obejmujący zastosowanie metod sztucznej inteligencji do rozwiązywania problemów technologicznych. Na podstawie analizy bardzo obszernego materiału źródłowego doktorantka sformułowała tezę, zgodnie z którą zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwoli na predykcję jakości lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła. W dalszej części tezy wskazano też, iż uzyskanie odpowiednio dokładnej predykcji jakości lutowanych połączeń pozwoli na ograniczenie liczby badań nieniszczących stosowanych dotychczas w procesie produkcyjnym.

Duże znaczenie problemu badawczego wynika z przesłanek związanych z ekonomicznymi skutkami wdrożenia procedur oceny lutowanych połączeń opracowanych w ramach pracy. Wdrożenie proponowanego rozwiązania do praktyki przemysłowej pozwoli na szybkie i dokładne oszacowanie jakości uzyskanego połączenia lutowanego, co w konsekwencji przełoży się na ograniczenie stosowania kosztowych badań niszczących. Tematyka pracy wpisuje się w dominujące aktualnie w przemyśle tendencje związane z ciągłym doskonaleniem kontroli wyrobów finalnych, w tym połączeń montażowych, jako konsekwencji zwiększających się wymagań klientów i konkurencyjności rynku motoryzacyjnego.

W celu rozwiązania postawionego problemu doktorantka zaplanowała oryginalny plan badań obejmujący kompleksową ocenę lutowanych połączeń, określenie najważniejszych czynników wpływających na trwałość połączeń, identyfikację najważniejszych wad, ocenę stabilności procesu wytwarzania samochodowych wymienników ciepła, opracowanie procedury predykcji jakości lutowanych połączeń z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych oraz ocenę skuteczności opracowanej procedury w praktyce przemysłowej. Badania związane z określeniem czynników wpływających na trwałość połączeń lutowanych były bardzo szczegółowe i obejmowały makro i mikrograficzną analizę struktury metalograficznej, identyfikację składu chemicznego, wyznaczenie podstawowych właściwości mechanicznych, określenie odporności na korozję, sprawdzenie wymiarów za pomocą współrzędnościowej techniki pomiarowej i trójwymiarowego skanowania optycznego, identyfikację wad metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej, weryfikację szczelności, ocenę wytrzymałości na rozmywanie oraz weryfikację odporności na działanie szoków cieplnych i pulsacji ciśnienia.

Opracowanie zaplanowanej procedury oceny jakości połączeń lutowanych wymagało bardzo dużej wiedzy teoretycznej związanej z technologią wykonywania tych połączeń oraz przeprowadzeniem licznych badań eksperymentalnych.

Dodatkowym elementem potwierdzającym oryginalność przeprowadzonych badań są wykonane badania symulacyjne oraz badania weryfikacyjne przeprowadzone w warunkach przemysłowych w celu potwierdzenia tezy pracy.

2. Ocena zakresu ogólnej wiedzy wykorzystanej w tym rozwiązaniu i jego interpretacjach

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Pety składa się ze streszczenia, spisu treści, wprowadzenia, sześciu rozdziałów, bibliografii, spisu rysunków, spisu tabel oraz załącznika. W pierwszej części pracy doktorantka przedstawiła najważniejsze

zagadnienia związane z konstrukcją wymienników ciepła, technologią połączeń lutowanych, kontrolą procesów wytwarzania oraz budową sztucznych sieci neuronowych. Zwrócono szczególną uwagę na technologię wykonywania połączeń lutowanych oraz sposoby oceny jakości tych połączeń. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, iż jakość połączeń lutowanych zależy głównie od właściwości łączonych materiałów, zastosowanego spoiwa lutowniczego oraz zastosowanej obróbki cieplnej. Doktorantka prawidłowo wskazała, iż ocena złożonych procesów, w warunkach posiadania niepełnych informacji, wymaga zastosowania innowacyjnych metod wspomagania decyzji w postaci sztucznych sieci neuronowych, uzupełniających wiedzę i doświadczenie osób odpowiedzialnych za kontrolę produkcji.

W rozdziale drugim prawidłowo przedstawiono tezę, cel pracy, problem naukowy oraz zakres pracy. Celem naukowym jest kompleksowa ocena jakościowo-ilościowa lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła, identyfikacja wad oraz opracowanie procedury kontroli tych połączeń.

W rozdziale trzecim opisano metodykę badań zastosowanych w celu oceny lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła oraz przygotowania danych uczących sieć neuronową. Przeprowadzono badania metalograficzne połączeń lutowanych za pomocą mikroskopii świetlnej i skaningowej mikroskopii elektronowej, zidentyfikowano skład chemiczny oraz profil zmian stężenia pierwiastków w strefie lutowanych materiałów za pomocą spektroskopii rentgenowskiej, wyznaczono właściwości mechaniczne połączeń lutowanych (twardość Vickersa i Martensa, moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie), określono odporność korozyjną strefy lutowanych materiałów, zweryfikowano wymiary geometryczne połączeń lutowanych z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej, oceniono szczelność połączeń lutowanych, oceniono odporność na drgania i zmiany ciśnienia cieczy chłodzącej oraz wyznaczono odporność na szoki cieplne.

Bardzo wysoko oceniam rozdział czwarty, w którym autorka przedstawiła wyniki badań lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła. Scharakteryzowano najważniejsze cechy materiałów, używanych do wykonywania połączeń lutowanych, opracowano wykres obrazujący rozkład temperatury pieca radiacyjno-konwekcyjnego w funkcji czasu, opisano jakościowo i ilościowo najważniejsze cechy lutowanych połączeń oraz poddano analizie wyniki badań metalograficznych lutowanych połączeń. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałościowych i badań opisujących odporność na korozję połączeń lutowanych. W celu określenia odporności korozyjnej łączonych materiałów wykonano potencjodynamiczne pomiary polaryzacyjne,

uzupełnione obrazowaniem zmian korozyjnych i mikroanalizą ich składu chemicznego. Do badań elektrochemicznych stosowano trzy elektrolity. Zjawiska korozyjne zachodzące na powierzchni metalu przedstawiono za pomocą krzywych polaryzacji potencjodynamicznej ilustrujących zmiany natężenia prądu w funkcji potencjału. W tej części pracy autorka zamieściła też bardzo ciekawą analizę Pareto-Lorenza i ustaliła procentowy udział wad lutowanych połączeń w samochodowych chodnicach cieczy. Wykazano, iż największe znaczenie ma nieszczelność w obszarze rura zwijana płyta sitowa. Usterka ta powoduje wyciek cieczy chłodzącej z układu chłodzenia i może doprowadzić do poważnego uszkodzenia silnika. W ramach podrozdziału 4.2 przeprowadzono analizę stabilności procesu lutowania. Na uwagę zasługuje zastosowanie prawidłowej procedury badania stabilności procesu, uwzględniającej przyjęcie odpowiedniej liczebności próby badawczej, sprawdzenie hipotezy o zgodności rozkładu wyników pomiarów z rozkładem normalnym oraz określenie wskaźników C_p i C_{pk} .

Na podstawie przeprowadzonej analizy zakresu zrealizowanych badań należy stwierdzić, iż doktorantka posiada szeroką, interdyscyplinarną wiedzę związaną z przedmiotem rozprawy, a także swobodnie porusza się w tym obszarze nauki. Przeprowadzenie badania wskazują na obszerną ogólną wiedzę doktorantki, która została prawidłowo wykorzystana do rozwiązania postawionego problemu naukowego.

3. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Przedstawione wyżej uwagi dotyczące czterech pierwszych rozdziałów rozprawy dowodzą bardzo wysokich umiejętności Doktorantki w obszarze warsztatu teoretycznego oraz metodologii badań empirycznych. Równie pozytywnie oceniam rozdział piąty, w którym przedstawiono autorską procedurę oceny lutowanych połączeń, wykorzystującą sztuczne sieci neuronowe. Zaprojektowano strukturę sztucznej sieci neuronowej przystosowanej do predykcji jakości lutowanych połączeń. Określono liczbę warstw (3), liczbę neuronów w poszczególnych warstwach oraz algorytm uczenia i funkcję aktywacji. Do uczenia sieci stosowano algorytmy: Levenberga-Marquardta, regularyzacji bayesowskiej, gradientu skalowania sprzężonego oraz Broydena-Fletcher-Goldfarba-Shanno. Model sztucznej sieci neuronowej zbudowano z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB 2018a. Łącznie opracowano 6 sieci neuronowych przystosowanych do predykcji różnych cech lutowanych połączeń (szczelności, ciągłości, wytrzymałości na rozrywanie i pulsacje ciśnienia, odporności na szoki cieplne i korozję).

Opracowane modele sztucznych sieci neuronowych poddano weryfikacji w warunkach przemysłowych. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką użyteczność zaproponowanej procedury do predykcji parametrów lutowanych połączeń. W tabeli 5.16 doktorantka porównała przewidywane i rzeczywiste wartości nieszczelności, ciągłości połączeń, wytrzymałości na pulsacje ciśnienia, wytrzymałości na rozmywanie, odporności na szoki termiczne i odporności na korozję. Otrzymane wyniki w wielu przypadkach były takie same dla wartości przewidywanej i wartości rzeczywistej. Ewentualne rozbieżności były bardzo niewielkie.

Przeprowadzone badania potwierdzają bardzo dobre umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę. Na szczególne wyróżnienie zasługuje fakt, iż zaproponowana procedura predykcji parametrów połączeń lutowanych została zweryfikowana z wykorzystaniem rzeczywistych danych uzyskanych z procesu produkcyjnego.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Oceniana praca przygotowana została bardzo starannie zarówno pod względem merytorycznym jak i formalnym. Niemniej jednak w trakcie oceny nasunęły się następujące uwagi wymagające wyjaśnienia.

1. W tabeli 5.11 Doktorantka przedstawiła rzeczywistą i przewidywaną wytrzymałość lutowanych połączeń na pulsację ciśnienia. Wszystkie analizowane przypadki można podzielić na cztery grupy. Do grupy 1 można zakwalifikować przypadki 5 i 9, gdzie rzeczywista liczba cykli była mniejsza niż 230 000. Do drugiej grupy można zakwalifikować przypadki, gdzie liczba cykli wynosiła od 230 000 do 250 000. Do trzeciej grupy zakwalifikowano przypadki, gdzie liczba cykli wynosiła od 250 000 do 270 000. Do czwartej grupy zakwalifikowano przypadki, gdy liczba cykli była większa niż 270 000 cykli. Doktorantka nie określiła, dlaczego wszystkie analizowane przypadki zostały podzielone tylko na te cztery grupy. Nie określono też precyzyjnie, co oznacza „mniej niż 230 000 cykli”. Czy oznacza to, że dane połączenie wytrzymało tylko kilka cykli, czy może 220 999 cykli. Z jaką dokładnością możliwe jest oszacowanie liczby cykli przez opracowany model sieci neuronowych?

2. W tabeli 5.13 Doktorantka wskazała rzeczywiste i przewidywane wartości wytrzymałości połączeń lutowanych na szoki cieplne. Wszystkie analizowane przypadki można podzielić na dwie grupy. Do grupy 1 można zakwalifikować przypadki 5 i 9, gdzie rzeczywista liczba cykli była mniejsza niż 2500. Do drugiej grupy można zakwalifikować

pozostałe przypadki, gdzie liczba cykli wynosiła od 2500 do 2600. Doktorantka nie określiła, dlaczego wszystkie analizowane przypadki zostały podzielone tylko na dwie grupy. Nie określono też precyzyjnie, co oznacza „mniej niż 2500 cykli”. Czy oznacza to że dane połączenie wytrzymało tylko kilka cykli, czy może 2499?

3. W tabeli 5.15 przedstawiono rzeczywistą i przewidywaną odporność korozyjną połączeń lutowanych. Wszystkie przypadki zawierają się w przedziale 32 – 38 dni. Brak jest informacji, czy wszystkie analizowane przypadki można uznać jako prawidłowe, czy też są one zakwalifikowane jako błędy.

4. Końcowa ocena rozprawy

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Pety jest pozytywna. Autorka wykazała się teoretyczną i praktyczną wiedzą z zakresu budowy i eksploatacji maszyn, metod sztucznej inteligencji, badań nieniszczących połączeń lutowanych oraz zagadnień związanych z analizą stabilności procesów produkcyjnych.

Przedstawione w rozprawie badania stanowią oryginalny wkład w rozwój wiedzy w zakresie opracowania innowacyjnych procedur oceny jakości połączeń lutowanych. Mocnym aspektem pracy są przeprowadzone badania parametrów wytrzymałościowych i eksploatacyjnych chłodnic samochodowych. W ramach prowadzonych badań Doktorantka wykorzystwała metalograficzny mikroskop OPTA-TECH LAB40, skaningowy mikroskop elektronowy Tescan model Vega 5135, nanointender Fischer Picodentor HM500, komorę do badań odporności korozyjnej na działanie mgły solnej, potencjostat-galwanostat ATLAS 0531 EU&IA ATLAS-SOLLICH, trójwymiarowy skaner optyczny GOM ATOS III, tomograf komputerowy Phoenix v|tome|x L300, współrzędnościową maszynę pomiarową Hexagon Global Performance 122210, tester szczelności metodą różnicową, stanowisko do testu szczelności metodą woda/powietrze, stanowisko do oceny wytrzymałości na rozrywanie, stanowisko do badań odporności na drania i zmiany ciśnienia, stanowisko do badań odporności na szoki cieplne.

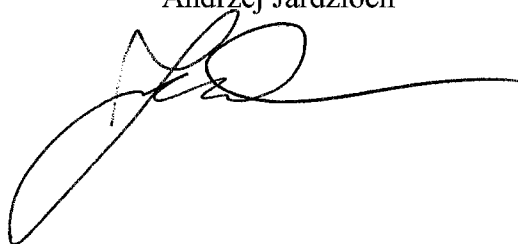
Ważnym osiągnięciem pracy jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do predykcji parametrów eksploatacyjnych połączeń lutowanych. Zastosowana w pracy metoda badawcza wymaga dużego zaangażowania od prowadzącego badania, konsekwencji i umiejętności metodycznego prowadzenia badań oraz analitycznego myślenia. Ranga rozwiązywanego problemu oraz jakość i zakres prowadzonych badań jest bardzo wysoki. Praca wyróżnia się oryginalnością zastosowanych metod i narzędzi badawczych. Wyróżnia się ona też wyjątkowymi walorami poznawczymi i użytkowymi. Reasumując opiniowana praca

doktorska znacznie przekracza poziom prac prezentowanych w tym obszarze badań. W związku z powyższym zgłaszam wniosek o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Pety w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Szczecin 15.09.2018

Andrzej Jardzioch

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'A' followed by a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.