Gliwice, 6.09.2018 r.

Prof. dr hab. inż. Bożena Skołud,
Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Politechnika Śląska

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Pety zatytułowanej „Ocena lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła za pomocą sztucznych sieci neuronowych".

Recenzję sporządzono na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarzadzania Politechniki Poznańskiej z dnia 10.07.2018r., w związku z uchwałą Rady Wydziału z dnia 6.07.2018 r. Recenzja została sporządzona w kontekście dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn, w której ten przewód jest prowadzony.

1. Istota rozprawy, analiza i dyskusja

Problem jakości jest aktualnym zagadnieniem, ponieważ z jednej strony rynek (klienci) oczekują niezawodnych produktów z drugiej strony konkurencja, która w dobie globalizacji dotyka przedsiębiorstwa, zmusza by produkty były tanie. Jakość i TQM wpisują się w zagadnienie „Lean production" oraz „Lean management" i są nierozerwalnie związane z działaniami w zakresie TPM, JiT i innymi. Koszty jakości stanowią nakłady, bądź straty, ponoszone przez przedsiębiorstwo w związku z produkcją, oferowaniem i sprzedażą produktu o określonej jakości. Koszty jakości są elementem ogólnych kosztów wytwarzania, a zarazem sumą wszystkich kosztów operacyjnych związanych z osiągnięciem jakości. W złożonych systemach, reprezentowanych m. in. przez pojazdy samochodowe, wymaga się pewnej trwałości eksploatacyjnej ze względu na warunki pracy, gdyż awaria jednego elementu powoduje zaburzenie pracy innych. Szczególnym przykładem są samochodowe wymienniki ciepła, których niesprawność zaburza pracę, a w końcu prowadzi do awarii silnika i tym

samym uniemożliwia dalszą eksploatację pojazdu. Oczywistym jest, że poprawa jakości, badanie produktów, w szczególności zaś badania niszczące, wpływają na podniesienie kosztów produkcji, a w niektórych przypadkach dodatkowo wydłużają czas potrzebny do zrealizowania zamówienia. Doktorantka zmierzyła się z tym problemem, proponując alternatywne podejście, polegające na predykcji jakości z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Praca ma charakter dedykowany, a działania, które zostały w niej przedstawione są ukierunkowane na konkretne produkty, jakimi są wspomniane wcześniej samochodowe wymienniki ciepła. Badania, których przebieg i wyniki przedstawiono w pracy, zostały wykonane w przedsiębiorstwie produkującym wymienniki ciepła.

Rozprawa doktorska zaczyna się od rozważań na temat sprzeczności, związanej z jednej strony, z trwałością wyrobów finalnych, poprzez doskonalenie procesów wytwarzania i tym samym zmniejszenia brakowości wyrobów, a z drugiej strony z dążeniem do minimalizowania kosztów generowanych przez przedsiębiorstwa, poprzez ograniczenie liczby badań niszczących. Ta sprzeczność stała się przyczyną poszukiwania sposobów racjonalizacji procesów oraz sposobów ich kontroli, pozwalających na minimalizowanie (na uniknięcie) występowania niezgodności, a więc o uzupełnienie procesów kontroli o przewidywanie przyszłych zdarzeń. W tym miejscu pragnę stwierdzić, że Doktorantka nie przewiduje rezygnacji z dotychczasowej kontroli lecz zamierza ją uzupełnić o predykcje zdarzeń, co powinno wpłynąć na niezawodność w sytuacji posiadania niepełnych danych produkcyjnych.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury mgr Katarzyna Peta wywnioskowała, że w zakresie montażu zauważalny jest brak uniwersalności oraz niski poziom automatyzacji. Z kolei na podstawie analizy literatury dotyczącej wymienników ciepła stwierdziła, że szczelność tego elementu jest jednym z ważniejszych wymogów, gdyż ma bezpośredni związek z pracą silnika. Materiały, z których zbudowane są wymienniki, są łączone lutowaniem i ta technika jest najczęściej stosowaną w montażu samochodowych wymienników ciepła. Te przesłanki spowodowały, że jakość połączeń lutowanych stała się przedmiotem analizy.

Doktorantka opisała specyfikę lutowania wyrobów lutem Al.-Si oraz odmiany lutowania. Uważam, że opis wszystkich dostępnych technik nie był konieczny, gdyż praca zamiast charakteru pracy doktorskiej nabiera cech monografii. Moim zdaniem wystarczyło

scharakteryzować lutowanie piecowe, które jest stosowane w przypadku samochodowych wymienników ciepła, będących przedmiotem niniejszej dysertacji.

Predykcja jest działaniem, które przewiduje, a nie kontroluje, zatem jest zadaniem realizowanym przed wystąpieniem zdarzenia i pozwalającym na jego uniknięcie w przeciwieństwie do kontroli, która w praktyce sprowadza się do klasyfikacji wyrobów na dobre oraz te niespełniające wymagań, co oznacza, że koszt produkcji wyrobu wadliwego i tak zostanie poniesiony. W celu dokonania predykcji Doktorantka zdecydowała się wykorzystać sztuczną inteligencję. Przedstawiła podstawowe informacje na temat sztucznych sieci neuronowych. Przegląd literatury został zakończony podsumowaniem, które ograniczyło się jedynie do przytoczenia definicji. Pewnym niedosytem w tym miejscu jest brak sformułowania wniosków, które można było wykorzystać przy formułowaniu problemu i celu pracy oraz do wyboru metody i narzędzi. Uważam, że przedstawianie sieci neuronowej przed postawieniem tezy i sformułowaniem celu pracy jest przedwczesne.

W rozdziale 2 zawarto uzasadnienie wyboru tematu pracy i zakresu badań. Przedstawiona analiza stanu wiedzy, z której wynika brak prowadzenia kompleksowej oceny wyrobów w szczególności połączeń montażowych, skłoniła doktorantkę do wyznaczenia celu pracy jakim jest:

1. Kompleksowa ocena jakościowo-ilościowa lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła oraz identyfikacja ewentualnych wad.
2. Opracowanie procedury kontroli tych połączeń w praktyce przemysłowej.

Osiągniecie tak postawionego celu wymagało od Doktorantki przeprowadzenia licznych badań z zakresu oceny metalograficznej makro- i mikrostruktury lutowanych połączeń, oceny właściwości mechanicznych lutowanych połączeń, weryfikacji wymiarów geometrycznych oraz oceny szczelności połączeń. Ocena lutowanych połączeń ma charakter interdyscyplinarny, gdyż obejmuje badania z zakresu technologii wytwarzania i montażu, inżynierii materiałowej, organizacji produkcji i informatyki. Wyniki przeprowadzonych badań zostały wykorzystane do nauki sieci neuronowej oraz oceny skuteczności modeli w warunkach przemysłowych.

Jak wspomniałam wcześniej celem pracy była ocena połączeń lutowanych, w szczególności opracowanie predykcji jakości lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach ciepła. Po zapoznaniu się z pracą stwierdzam, że jej zakres został rozszerzony o opracowanie metodyki badań, mającej uniwersalny charakter (omówiony w rozdziale 3), która może zostać również wykorzystana do oceny dowolnych wyrobów o podobnych cechach, ale też w innych

gałęziach produkcji. Zaprezentowano w tym miejscu podstawowe informacje na temat zaplanowanych badań. Opis jest jasny i wystarczający.

W rozdziale 4. przedstawiono przedmiot badań (wymienniki ciepła) oraz stosowane w nich techniki lutowania. Zakres wykonanych badań był bardzo obszerny, został przedstawiony z wystarczającą dokładnością i ze wskazaniem aparatury, która była wykorzystana. Należy do nich: badanie struktur metalograficznych, identyfikacja składu chemicznego i zmian stężenia pierwiastków, wyznaczenie podstawowych własności mechanicznych, określenie odporności korozyjnej, weryfikacja wymiarów geometrycznych, ocena szczelności połączeń, określenie wytrzymałości na rozrywanie i na drgania oraz odporności na szoki cieplne. Opis badań jest wyczerpujący. Doktorantka nie podaje jednoznacznie, które z tych badań wykonała osobiście, a które z wyników zostały udostępnione przez firmę. Ta informacja nie ma wpływu na ocenę pracy, jednak dla porządku należałoby ją zawrzeć w pracy.

Doktorantka arbitralnie wybrała niniejszy zestaw badań, można więc jedynie przypuszczać, że wybór był podyktowany wiedzą producenta (przedsiębiorstwa) i wsparty wiedzą z przeglądu literatury. W pracy bardzo dobrze zostały scharakteryzowane wymagania stawiane przy ocenie wyrobów. Doktorantka zwróciła również uwagę na fakt, że niektóre cechy oceniane w trakcie produkcji są niezależne od czasu, inne natomiast są wyznaczane w trakcie eksploatacji i te właśnie, z dużym prawdopodobieństwem, wpływają na niezawodność wyrobów. Autorka pracy zestawiła podstawowe cechy lutowanych połączeń w samochodowych wymiennikach cieczy, jednak nie podała, czy o ich wyborze zdecydowały wyłącznie badania literaturowe, czy też były one uzupełnione o inne badania prowadzone w przedsiębiorstwach lub osobiście. To zestawienie stało się jednocześnie wykazem badań wykonanych w pracy. Już w tym miejscu opinii chciałam podkreślić, że zakres wykonywanych badań jest wyjątkowo obszerny.

Doktorantka nie pominęła też oceny stabilności procesu lutowania i na podstawie jej wyników stwierdziła, że możliwe jest planowanie kontroli cech połączeń z mniejszą częstotliwością, co wpłynie na ograniczenie kosztów, gdyż badania te należą do badań niszczących.

Procedura oceny lutowanych połączeń w wymiennikach ciepła była przedmiotem 5 rozdziału. Ocena lutowanych połączeń obejmuje kryteria określone w dokumentacji technicznej DT. Ponieważ nie podano nazwy przedsiębiorstwa ani produktu nie ma możliwości weryfikacji tego założenia. Również na podstawie DT wybrano wejścia i wyjścia sieci neuronowej. Procedura oceny dokonywanej przez sieci neuronowe została dobrze opracowana, a obejmuje: preparowanie danych (przygotowanie zbioru uczącego), normalizację danych liczbowych,

przygotowanie danych, interpretację wejścia. W ramach normalizacji przyjęto transformację liniową, skalującą wartości do zakresu <0,1>. Opracowano 6 niezależnych sieci, każdą do predykcji innej cechy. W każdym z przypadków analizowano różne sieci i dokonano wyboru najlepszej, tj. dającej najmniejszy błąd Do ich opracowania zastosowano programy STATISTICA 13.1 oraz MATLAB 2018a.

Do uczenia sieci wykorzystano algorytm Broydena-Fletchera-Goldfarba-Shanno (BFGS), a decyzję o wyborze podjęto na podstawie przeprowadzonych badań i porównania 4 algorytmów (Levenberga-Marquardta, regulacji bayesowskiej, gradientu skalowania sprzężonego oraz Broydena-Fletchera-Goldfarba-Shanno). Doktorantka nie uzasadniła wyboru algorytmów do testów, z kolei wybór BFGS uzasadniła najmniejszym błędem uczenia i testowania. Przedstawiła wartości rzeczywiste i przewidywane wartości poszczególnych kryteriów, wyniki są bardzo zbliżone w każdym przypadku, co pozwala wyciągnąć wnioski, że sieć działa poprawnie i można bazować na uzyskanych przez nią wynikach. W uzasadnieniu pominięto fakt, że ze względu na błąd weryfikacji, lepszy wynik daje algorytm gradientu skalowania sprzężonego. Z kolei w tabeli 5.3 dla algorytmu regulacji bayesowskiej wartość błędu MSE jest równa 0, jednak w pracy nie zinterpretowano tego wyniku. Nie jest też jasne dlaczego przy błędzie równym 0 również skuteczność wynosi 0.

Do badań wykorzystano 100 danych, z czego 70 jest danymi uczącymi, 15 to dane testowe kolejne 15 to dane do weryfikacji. Wybór danych do grup był losowy, podobnie jak liczbę neuronów ukrytych w zakresie 8-30, z których ostatecznie przyjęto liczbę neuronów równą 15. Cztery parametry sieci podlegały modyfikacji, są to: liczba warstw ukrytych, liczebność próby uczącej, testowej oraz weryfikacyjnej; algorytm uczenia się, funkcja aktywacji. Ostatecznie przyjęto strukturę wielowarstwowego perceptronu. Jest to prymitywna sieć, ale łatwiejsza do zastosowania i bardziej wydajna, dlatego też wybór oceniam pozytywnie. Poprawność działania opracowanych algorytmów oceniono w warunkach przemysłowych. Porównano wartości cech uzyskanych w produkcji z wartościami uzyskanymi na wyjściu sieci neuronowej.

Opis wyników uzyskanych w części badawczej jest niewystarczająco jasny. Nie wiadomo jak rozumieć zakresy dopuszczalności, np. ciągłość połączeń (podane w %) zapisane jako 100,00 – 30,00 W tej samej tabeli zakres dopuszczalnych wartości wytrzymałości na rozrywanie (w MPa) wynosi 1,00±0,724, z kolei zakres odporności na korozję 36±16. Przedstawione wartości są istotne w związku z przeprowadzonymi badaniami i szczególnie z tego powodu powinny być precyzyjnie wyjaśnione.

W tabeli 5.15 przedstawiono wyniki badania ciągłości połączeń, dla których wartość rzeczywista oraz przewidywana wynosi 100%. Wynik tego typu zawsze budzi wątpliwości, należałoby przebadać przypadek, w którym wynik jest równy 100%.

Wybrane uwagi szczegółowe

Stwierdzono, że międzyoperacyjna kontrola jest tak samo konieczna, w celu eliminowania wadliwych części, jak finalna. W praktyce w przemyśle motoryzacyjnym w wielu przypadkach (w szczególności tam gdzie nie dotyczy to systemów bezpieczeństwa) odchodzi się od kontroli międzyoperacyjnej, gdyż podnosi ona koszt i wydłuża proces. W tabeli 4.1. zatytułowanej „Podstawowe cechy łączonych materiałów..." cechy: „prawidłowa długość", „prawidłowa wysokość" itp. podlegają ocenie jakościowej „tak" lub „nie", inne z kolei są podlegają ocenie ilościowej, są to na przykład: „długość otworu płyty sitowej", „szerokość". Konstrukcja tabeli 4.2, przedstawiającej podstawowe parametry lutowania, nie daje wyobrażenia o warunkach panujących w poszczególnych strefach pieca. Rysunek 4.4 Schemat chłodnicy cieczy z rozmieszczeniem termoelementów na tej powierzchni nie jest zrozumiały i w tej postaci nic nie wnosi do pracy. Do sprawdzenia zmienności statystycznej wyników posłużyło 100 pomiarów badanej cechy. W pracy jednak nie uzasadniono dlaczego liczba próbek wynosi 100. Należałoby wyznaczyć krytyczne liczebności próby.

4. Podsumowanie i wniosek

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca ma charakter badawczy. Postawiona teza została udowodniona, a cele osiągnięte. Wykonanie badań wymagało od doktorantki rozległej wiedzy, łączącej kilka dyscyplin oraz konsekwencji działania. Doktorantka wykazała się umiejętnością prowadzenia badań, analizy wyników i wnioskowania. Ponadto przeprowadziła wnikliwą analizę literatury, wykonała szereg badań w warunkach przemysłowych, których wyniki zostały wykorzystane do trenowania sieci neuronowej. Przeprowadziła również dyskusję na temat doboru sieci neuronowej, ocenę sprawności sieci oraz przeprowadziła eksperymenty z wykorzystaniem danych z produkcji.

Za wkład doktorantki w dyscyplinę uznaję:

- opracowanie metodyki predykcji jakości lutowanych połączeń, która ma charakter uniwersalny i może być wykorzystana do badania innych połączeń,

- przeprowadzenie kompleksowych badań we współpracy z przedsiębiorstwem z zakresu makro i mikrometalograficznej analizy struktury metalograficznej, identyfikacji składu chemicznego (badania spektroskopowe), wyznaczenia własności mechanicznych, badania odporności na korozję, sprawdzenia geometrii (skanowanie optyczne), identyfikacji wad (tomografia komputerowa), weryfikacji szczelności, wytrzymałości na pulsacje ciśnienia oraz na szoki cieplne.
- połączenie wyników badań praktycznych z zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do oceny lutowanych połączeń.

Nieliczne przytoczone przeze mnie uwagi mają charakter dyskusyjny lub dotyczą kwestii wyjaśnienia pewnych zapisów i nie podważają mojej bardzo wysokiej oceny pracy

W moim odczuciu doktorantka, pani mgr inż. Katarzyna Peta, wykazała się niezbędnym zasobem wiedzy z zakresu budowy i eksploatacji maszyn, technologii oraz inżynierii materiałowej. Przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz pokazała, że potrafi samodzielnie prowadzić bardzo trudne interdyscyplinarne badania naukowe. Przedstawiona rozprawa spełnia z nadmiarem warunki Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Uważam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Stawiam wniosek o dopuszczenie do obrony w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Z powodów wymienionych wcześniej wnioskuję o wyróżnienie pracy.

Wniosek o wyróżnienie uzasadniam tym, że Doktorantka przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz pokazała, że potrafi samodzielnie prowadzić bardzo trudne interdyscyplinarne badania naukowe. Wykazała się umiejętnością łączenia wyników badań doświadczalnych z metodami sztucznej inteligencji. Potrafi przygotować trudne zadanie naukowe, dobrać narzędzia badawcze oraz metody. Doskonale interpretuje wyniki i formułuje wnioski.

Bożena Skołud