

Prof. dr hab. inż. Adam Hamrol
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej

Poznań 12. 09.2022

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. inż. Rafała Popiela pt. **Sterowanie jakością montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym metodami modelowania empirycznego**

(recenzja wykonana na zlecenie

Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej)

1. Problem badawczy i celowość jego podjęcia

Jednym z warunków zapewnienia odpowiedniej jakości oraz efektywności procesów wytwarzania, w tym procesów montażu, jest możliwość kontroli i skutecznego reagowania na zakłócenia, których skutki przejawiają się niespełnianiem wymagań określonych w dokumentacji konstrukcyjnej oraz technologicznej. Ponieważ większość zakłóceń powstających w procesach produkcyjnych ma charakter losowy, ich wyniki charakteryzują się zazwyczaj dużą zmiennością i nieprzewidywalnością. W połączeniach gwintowych ta nieprzewidywalność jest potęgowana wielością czynników wpływających na efekt końcowy, takich jak np.: cechy geometryczne i materiałowe elementów połączenia, dokładność ich wykonania, rozszerzalność termiczna, sztywność elementów połączenia w zakresie odkształceń sprężystych, współosiowość, relaksacja naprężeń, moment dokręcania, umiejętności człowieka, i wiele innych. Większość z nich jest trudna do pomiaru, co sprawia, że końcowy efekt, siła oraz trwałość zacisku połączenia wykazuje dużą zmienność; trudno go jednak wyznaczyć, gdyż ich pomiar ma charakter niszczący. Stosowane w praktyce metody nadzorowania procesu montażu połączeń gwintowych na podstawie momentu lub kąta dokręcania nie gwarantują uzyskania prawidłowego złącza. Wsparciem jest podejście statystyczne lub przewidywanie siły oraz trwałości zacisku na podstawie odpowiednich modeli.

W kontekście powyższego zajęcie się przez mgr. inż. Rafała Popiela problematyką sterowania jakością montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym należy uznać za celowe i uzasadnione.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 19. 09. 2022

RDJMe/1641/511/2022

nr zał.

2. Treść pracy

Praca składa się z 10 rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono uzasadnienie podjęcia badań i zaprezentowano przegląd stanu wiedzy na temat sterowania jakością montażu połączeń gwintowych. Sformułowano również cele i tezę rozprawy.

Rozdział drugi zawiera opis technologii montażu połączeń gwintowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym.

W rozdziale trzecim przedstawiono oraz omówiono wybrane, matematyczne modele opisujące mechanikę połączeń gwintowych.

Rozdział czwarty zawiera opis wybranych wielkości, nazwanych przez Autora charakterystykami kontrolnymi połączeń gwintowych. Zaliczono do nich; dynamiczny moment dokręcania, statyczny moment kontrolny, finalny kąt kontrolny, momenty graniczne odnoszące się do zjawiska uplastycznienia połączenia gwintowego, wiązkość operacyjną połączenia i sztywność operacyjną połączenia w zakresie odkształceń sprężystych. Zastosowanie tych charakterystyk jest ilustrowane przykładami zastosowań w typowych problemach występujących podczas montażu.

Rozdział piąty jest poświęcony analizie systemów pomiarowych stosowanych w procesach montażu połączeń gwintowych. Także ten rozdział jest ilustrowany przykładami z praktyki.

W rozdziale szóstym jest omawiane zastosowanie w sterowaniu jakością procesu montażu połączeń gwintowych metod statystycznego sterowania procesem. Wskazano główne narzędzia SPC, takie jak karta kontrolna, do badania stabilności procesu, oraz wskaźniki zdolności jakościowej procesu. Rozpatrywany jest przykład ich zastosowania w procesie montażu konkretnego złącza gwintowego. Na przykładzie danych eksperymentalnych zebranych przez autora podczas pomiarów momentu kontrolnego w operacji dokręcania śrub łączących dwa elementy silnika spalinowego, pokazano zastosowanie narzędzi SPC w warunkach występującej niestabilności procesu.

Rozdział siódmy jest poświęcony analizie regresji i jej zastosowaniu do oceny wpływu na jakość łącza wybranych czynników procesu. Wprowadzono miarę jakości, w postaci względnej zmiany sztywności operacyjnej połączenia w zakresie odkształceń sprężystych, spowodowanej zmianą warunków tarcia w połączeniu. Zaprezentowano również przykład zastosowania metody modelowania empirycznego.

W rozdziale ósmym zaprezentowano metodę identyfikacji momentów granicznych w połączeniu, w którym występuje zjawisko uplastycznienia. Wprowadzono opracowane metody identyfikacji momentów dokręcenia, odnoszących się do naprężenia wstępnego śruby na poziomach granicy sprężystości i plastyczności. Modelowanie oraz opis opracowanych metod uzupełniono dwoma przykładami

W rozdziale dziewiątym przedstawiono sformułowanie oraz rozwiązanie problemów optymalizacji empirycznej operacji dokręcania łączników gwintowych w kontekście

maksymalizacji jakości tej operacji. Zastosowano metody modelowania empirycznego w postaci tzw. podejścia „krzepkiego” Taguchiego oraz metodę powierzchni odpowiedzi. Zilustrowano je na przykładzie trzech przypadków połączeń gwintowych mocujących elementy spalinowego silnika wysokoprężnego.

3. Wartość naukowa pracy

Praca ma charakter wielowątkowy. Dotyczy różnych aspektów przeprowadzania, pomiaru, kontroli oraz modelowania procesu montażu złącza gwintowego. Autor wykazuje, że dane pomiarowe z realizacji procesów montażu, czy to podczas operacji dokręcania, czy podczas operacji kontroli jakości, mogą być traktowane jako wejścia do opracowanych przez niego metod ilościowej analizy jakości oraz jako dane do formułowania i rozwiązywania problemów optymalizacji.

Autor ukazuje w pracy złożoność procesów wykonywania połączeń gwintowanych i uzasadnia celowość opisywania ich odpowiednimi, wielowymiarowymi modelami matematycznymi. Proponuje względnie proste narzędzia matematyczne, o dużym potencjale aplikacyjnym, umożliwiające panowanie nad niepewnością występującą w procesach montażu połączeń. Dane do modeli, traktowanych jako tzw. szare skrzynki, są pozyskiwane z pomiarów przeprowadzanych podczas operacji dokręcania lub podczas kontroli jakości połączenia.

Zaproponowane zostały przez Doktoranta ilościowe miary jakości procesu montażu połączenia gwintowego. Oryginalne są miary: sztywność operacyjna złącza oraz wiązkość operacyjna i momenty graniczne. Wykazana została możliwość ich zastosowania w sterowaniu jakością procesu.

Na podkreślenie zasługują:

- Opracowanie modelu dynamiki operacji dokręcania (Autor nazywa go wielkoskalowym), uwzględniającego podatność elementów połączenia, tłumienie strukturalne i tarcie suche, wymuszenie kinematyczne oraz wpływ na wynik procesu zjawisk kontaktowych w mikroskali powierzchni styku par trybologicznych połączenia gwintowego.
- Zaproponowanie oryginalnych metody pomiaru procesu montażu połączenia gwintowego oraz kontroli jakości złącza, opartych na:
 - estymacji sztywności operacyjnej połączenia na podstawie pomiarów kąta obrotu łba śruby i dynamicznego momentu dokręcania,
 - identyfikacji - na podstawie empirycznej krzywej dokręcania, uzyskanej podczas pomiarów kąta obrotu łba śruby - występujących w połączeniu momentów granicznych.

Opracowane przez Autora metody są oryginalne, jeśli chodzi o ich sformułowanie oraz proponowane zastosowania. Do ich implementacji wykorzystywane są znane z literatury narzędzia oraz algorytmy obliczeniowe, takie jak regresja ze zmienną fikcyjną, metoda zgrubnej detekcji wierzchołka krzywej empirycznej oraz narzędzia przez Autora odpowiednio zmodyfikowane, np. algorytm poprawy jakości detekcji wierzchołka krzywej empirycznej, na podstawie metody Forstnera.

- Osiągnięciem Autora jest opracowanie wymienionej już metody detekcji wierzchołka krzywej dokręcania. Doktorant zwraca uwagę, że dane empiryczne są zaszumione i dlatego konieczne jest ich filtrowanie. Sformułował oraz rozwiązał problem optymalizacyjny w postaci poszukiwania wierzchołka jako punktu o najmniejszej odchyłce położenia od wszystkich stycznych do krzywej aproksymującej charakterystykę dokręcania w przedziale ufności, wyznaczonym w pierwszym kroku algorytmu metody detekcji. Uzyskał rozwiązanie w postaci zależności na współrzędne wierzchołka.

Wątpliwości - może budzić sformułowanie tezy pracy. Trudno bowiem jednoznacznie wykazać tezę, że *„sterowanie jakością procesów montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym metodami modelowania empirycznego może być skuteczne i efektywne, w zakresie doskonalenia tych procesów, identyfikacji przyczyn zmienności oraz ich optymalizacji, w szczególności dla operacji dokręcania i kontroli jakości w warunkach produkcji przemysłowej”*. Trudno też taką tezę obalić – możliwość przecież zawsze istnieje, zależy od dostępnych środków. Tezy powinny być postawione jednoznacznie.

Na szczęście Autor formułuje tzw. „lukę” badawczą, która przejawia się „brakiem metod modelowania empirycznego do sterowania jakością procesów montażu połączeń gwintowych. Wypełnieniu tej luki podporządkowany są zakres i cele pracy, które stanowią jej zasadniczą wartość.

Szkoda, że Autor nie zdefiniował stosowanych w rozprawie terminów, zwłaszcza tych, występujących w tytule. Można się jedynie domyślać, że miarą jakości procesów montażu połączeń gwintowych są np. : statyczny moment kontrolny, finalny kąt i moment kontrolny, wiązkość operacyjna i inne. Z kolei miarą jakości połączenia gwintowego ”jest wielkość siły zaciskowej” (Autor nazywa ją charakterystyką jakościową). Można się z tymi definicjami zgodzić, ale w pracy naukowej powinny być jednoznacznie zdefiniowane, aby przy jej studiowaniu nie było wątpliwości interpretacyjnych.

Jako jakość procesu można bowiem przyjąć (tak jak w inżynierii jakości) frakcję jednostek niezgodnych, wskaźnik zdolności jakościowej, wskaźnik liczby niezgodności na jednostkę wyrobu itp.. Styczny moment kontrolny traktować z kolei jako zmienną procesową (tak jak np. temperaturę w procesie lutowania, czy siłę skrawania przy frezowaniu). Definicja jakości powinna się bowiem odnosić do wymagań.

Niedosyt budzi także brak definicji sterowania jakością, tym bardziej, że w tytule rozprawy jest ono wyeksponowane. Z drugiej strony sterowanie jakością jest w pracy traktowane jedynie jako adresat opracowanych przez Autora metod. Doktorant deklaruje, że opracowane przez niego modele w sterowaniu jakością mogą być wykorzystane.

W rozdziale piątym opisano proponowany przez Autora sposób analizy systemu pomiarowego, stosowanego w procesach montażu połączeń gwintowych. Autor przedstawia ją jako oryginalną. Ale w zasadzie nie różni się ona od powszechnie stosowanych. Stosując przedstawiony na rysunku 35 symulator złącza gwintowego można przecież wyznaczyć wszystkie składowe zmienności (od operatora, między operatorami oraz od przyrządu,) a zmienność procesu przyjąć jako założoną tolerancję wymagania.

W rozdziale szóstym „Zastosowanie metod statystycznego sterowania procesem w sterowaniu jakością procesu montażu połączeń gwintowych”, na rysunku 43 jest przedstawiona karta kontrolna wartości średniej momentu kontrolnego. Z danych pomiarowych (rysunek 42) oraz z położenia (i sekwencji) punktów na karcie kontrolnej wynika, że proces ma bardzo niską zdolność jakościową ($C_{pk} < 1$) i jest niestabilny (już w pierwszej próbie średnia znajduje się poza linią kontrolną). Jaki jest zatem sens przedstawiania takich danych. Czy tylko po to, aby pokazać jak niską zdolność jakościową mogą mieć oraz jak niestabilne mogą być procesy montażu połączeń gwintowych? Powinny być raczej pokazane sposoby poszukiwania przyczyn niskiej zdolności jakościowej oraz niestabilności procesu. Byłoby to zgodne z tytułem pracy.

Trudno ocenić jednoznacznie skuteczność opracowanych przez Autora modeli oraz sposobów postępowania (skuteczność rozumianą jako pewność, że ocena jakości montowanego złącza gwintowego jest prawidłowa; mały błąd I lub II rodzaju). Autor nie podaje przekonujących danych pozwalających ją ocenić. Jak w każdym przypadku modelowania rzeczywistości i opracowywania nowej metody postępowania Autor przyjął pewne założenia i poczynił wiele uproszczeń. I właśnie te założenia i uproszczenia decydują o dokładności metodyki oraz o zakresie, w którym dokładność ta jest możliwa do uzyskania.

Jeśli opisane przez Autora modele zostaną zweryfikowane w niezależnych badaniach oraz potwierdzone w zastosowaniach praktycznych, a w razie uzyskania istotnych rozbieżności skorygowane, można mieć pewność, że rezultaty przedstawione w rozprawie mgr. inż. Rafała Popiela zostaną na trwale przyjęte w praktyce przemysłowej.

4. Ocena formalna i edytorska rozprawy

Praca zawiera wszystkie etapy postępowania potrzebne do realizacji postawionych w niej celów.

Autor wykazał się szeroką znajomością literatury przedmiotu. Szkoda jednak, że jest wobec cytowanych pozycji mało krytyczny. Przyjmuje raczej rolę sprawozdawcy, tylko wyjątkowo wprowadzając swoje komentarze.

Na wyróżnienie zasługuje staranna szata edytorska pracy.

W pracy występuje także drobne usterki, które nie wpływają wprawdzie istotnie na jej wartość merytoryczną, ale utrudniają jej czytanie oraz właściwe zrozumienie intencji Autora.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mimo przedstawionych uwag - niektóre z nich mają charakter dyskusyjny - wskazujących na możliwości doskonalenia warsztatu naukowego Autora - uważam, że rozprawa mgr. inż. Rafała Popiela „**Sterowanie jakością montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym metodami modelowania empirycznego**” wnosi nowe i istotne wartości do wiedzy w zakresie technologii połączeń gwintowych stosowanych w procesach wytwarzania, w szczególności w przemyśle motoryzacyjnym.

Przedstawiony w pracy materiał teoretyczny, sposób przygotowania i przeprowadzenia badań oraz analiza uzyskanych wyników wskazują na ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej. W szczególności:

1. Doktorant wykazał się znaczną wiedzą i dobrym przygotowaniem do prowadzenia badań naukowych, w tym odpowiednimi umiejętnościami analitycznymi w zakresie modelowania procesów oraz w zakresie przeprowadzania pomiarów,
2. Przedstawione w rozprawie wyniki analiz oraz pomiarów mają znaczną wartość poznawczą i mogą być przydatne w zakresie nauk inżyniersko technicznych, zwłaszcza w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca spełnia wymagania ustawy o tytule i stopniach naukowych i stanowi oryginalne opracowanie naukowe. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Rafała Popiela do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Adam HAMROL

