

Dr hab. inż. Waław Gierulski, prof. PŚk.
Katedra Zarządzania Jakością i Własnością Intelektualną
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego

Recenzja

rozprawy doktorskiej pt.: Sterowanie jakością procesów montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym metodami modelowania empirycznego.

Autor rozprawy: mgr inż. **Rafał Popiel**

Promotor: dr hab. inż. **Grzegorz Działkiewicz**, prof. Pol. Śl.

Dyscyplina naukowa: Inżynieria mechaniczna (Inżynieria produkcji)

Recenzję wykonano na zlecenie Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak – Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej (Pismo: RDJMe.512.22.2022).

1. Tematyka i struktura rozprawy

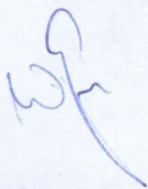
W obecnych czasach popularnej masowej produkcji ważnym zagadnieniem jest zapewnienie wysokiej powtarzalności co określane jest czasami jako „obsesja na tle zmienności”. Dąży się, aby każdy wyprodukowany egzemplarz wyrobu posiadał takie same właściwości z uwzględnieniem dopuszczonej przez konstruktorów tolerancji. Dobrym przykładem jest produkcja silników dla przemysłu motoryzacyjnego, gdzie na linii montażowej każdego dnia powstają setki identycznych egzemplarzy. Ponieważ kontrola każdego gotowego egzemplarza jest niemożliwa jakość musi być wbudowana w cały proces montaż. Ważnym elementem w procesach montażu często bywają połączenia gwintowe i na zagadnienia ich jakości ukierunkowana jest recenzowana rozprawa. Jej celem jest opracowanie metod zapewnienia odpowiedniej jakości i powtarzalności własności połączeń gwintowych w procesach montażu realizowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Cel powiązany jest z postawioną tezą (hipotezą) zgodnie z którą, sterowanie jakością z wykorzystaniem metod modelowania może być skuteczne w zakresie doskonalenia procesów montażu – w tym przypadku dotyczących połączeń gwintowych.

Można więc stwierdzić, że tematyka rozprawy wpisuje się w aktualne trendy badawcze a jej wyniki mogą mieć zastosowanie praktyczne w działaniach związanych z zapewnianiem jakości w procesach montażu.

Przedstawiona do recenzji rozprawa w formie oprawionego tradycyjnego wydruku obejmuje 180 stron, w tym rozdziały merytoryczne, strona tytułowa, streszczenia, spis treści oraz spis literatury (bibliografia).

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 13.09.2022
RDJMe/15715/17022
zaf.



2. Przegląd treści rozdziałów

We wstępie, rozdział 1 (s.5-s.13) wskazano na popularność połączeń gwintowych, opisano ich główne cechy i właściwości. W bardzo ogólny sposób przedstawiono czynniki wpływające na jakość połączenia, którego główna miara jest siła zaciskowa. Bezpośredni pomiar wartości tej siły jest trudny szczególnie w warunkach masowego montażu. Dlatego w przemysłowych procesach montażu wykorzystuje się inne, pośrednie miary co w automatycznych systemach realizowane jest przez sterowanie momentowe lub kątowe. Dalsza część rozdziału zawiera krótki przegląd bogatej literatury dotyczącej projektowania, modelowania oraz oceny jakości połączeń gwintowych. Wskazano, że w literaturze niewiele pozycji odnosi się do zagadnień praktycznych związanych z procesami montażu co uwidacznia pewną lukę badawczą – stąd koncepcja rozprawy ukierunkowanej na sterowanie jakością połączeń gwintowych w rzeczywistych procesach montażu.

W rozdziale 2 (s.14-s.21) przedstawiono w skrótej formie elementy technologii montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym. Zagadnienie to potraktowano bardzo szeroko, uwzględniając proces dostarczania elementów na stanowisko montażowe, co trudno jednoznacznie wiązać z jakością wykonywanej operacji. Przedstawiono rysunki i opisy dwóch prostych ręcznych narzędzi dynamometrycznych. Pokazano także elektryczną wkrętarke dynamometryczną sterowaną elektronicznie, jednak bez szczegółowego opisu sposobu jej użytkowania. Wkrętarke takie umożliwiają realizację dwuetapowego cyklu dokręcania – pierwszy z większą a drugi mniejszą prędkością. Miarą jakości jest moment dokręcania zapewniający odpowiednią siłę zaciskową. Moment ten powinien pokonać siły tarcia pomiędzy zwojami gwintu, na powierzchni oporowej nakrętki lub łba śruby oraz zapewnić naciąg śruby wytwarzający siłę zaciskową. Ponieważ zjawisko tarcia jest zależne od wielu losowych czynników, uzyskanie odpowiedniej wartości siły zaciskowej wymaga czasem innych działań – wymuszenie zadanego kąta obrotu w ostatniej fazie operacji.

W rozdziale 3 (s.22-s.49) przedstawiono modele matematyczne zjawisk zachodzących podczas montażu połączeń gwintowych. Przedstawiają one zależności pomiędzy momentem lub kątem dokręcania a siłą napięcia śruby co w konsekwencji przekłada się na siłę zaciskową. Zgodnie z informacją zawartą na początku rozdziału część prezentowanych modeli jest zaczerpnięta z literatury a część jest opracowana przez Autora.

W modelach statycznych wykorzystywane są zasady statyki w zakresie odkształceń sprężystych lub plastycznych. Podawane są złożone wyrażenia matematyczne bez wystarczających objaśnień, w tym często bez odpowiednich rysunków. Przedstawiono także model dynamiki operacji dokręcania pokazujący zmiany w czasie różnych parametrów. Model ten w uproszczonej wersji stanowi układ dynamiczny o dwóch a rozbudowanej wersji o pięciu stopniach swobody. Jego złożoność i brak możliwości identyfikacji wartości parametrów uniemożliwia praktyczne wykorzystanie. Kolejny model dotyczy zjawisk kontaktowych w połączeniu śrubowym, zachodzących pomiędzy nakrętką lub łbem śruby, podkładką oraz

łączonym elementem. Jest on zaczerpnięty z literatury i przedstawiony w formie wyrażen matematycznych bez szczegółowych opisów.

Przedstawione modele nie były później wykorzystywane, należy sądzić że służą jedynie prezentacji złożoności problemu. Stąd też wynika koncepcja budowy stosunkowo prostych modeli empirycznych dla których dane pozyskiwane są w trakcie badań eksperymentalnych. Nie przedstawiono natomiast modeli opartych o analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), mimo że są one w praktyce wykorzystywane w projektowaniu, badaniu i symulacji pracy połączeń gwintowych.

W rozdziale 4 (s.50-s.66) określono pewne miary jakości związane z połączeniami gwintowymi. Są to momenty na różnych etapach dokręcania oraz tzw. wiązkość – określenie zaczerpnięte z mechaniki pękania. W tym przypadku jest to praca mechaniczna momentu dokręcania. Zaprezentowano przykład dokręcania koła samochodowego z wykorzystaniem wielowrzecionowego urządzenia. Następnie mierzono szczytowy moment kontrolny i przeprowadzono analizy statystyczne. Ze względu na różnice w wartościach momentów dokręcania zalecono regulacje i wzorcownie wkrętarek urządzenia. Dzięki temu w kolejnym eksperymencie zaobserwowano większą powtarzalność co wskazuje na poprawę jakości operacji dokręcania. Drugi przykład przedstawiony w tym rozdziale pokazuje wpływ zmiany warunków tarcia pomiędzy stykającymi się powierzchniami na proces dokręcania. Zmiany te mogą wynikać z różnic własności elementów w kolejnych dostawach lub zanieczyszczenia powierzchni. W badaniach używano nakrętek o dwóch różnych twardościach dla suchych oraz zaolejonych powierzchni. W wyniku badań wykazano, że te parametry w znaczącym stopniu wpływają na jakość połączenia.

W rozdziale 5 (s.67-s.86) poruszono zagadnienie analizy i oceny systemów pomiarowych związanych z montażem połączeń gwintowych. Przedstawiono cztery metody pomiaru, zwracając uwagę na zagadnienia powtarzalności i odtwarzalności. Przedstawiono metodę oceny systemu pomiarowego z wykorzystaniem analizy wariancji. Następnie dokonano oceny systemu pomiarowego gdzie eksperymenty przeprowadzało trzech pracowników z użyciem mechanicznego symulatora złącza gwintowego. Pokazano także przykład oceny systemu pomiarowego w warunkach produkcyjnych. Pomiary wykonywało trzech pracowników bezpośrednio po zakończeniu operacji dokręcania. Analiza wykazała zmienność wyników zależną od osoby dokonującej pomiaru. Jako działania naprawcze wskazano przeprowadzenie odpowiednich szkoleń co wpłynie na poprawę powtarzalności i jakości systemów pomiarowych a w konsekwencji na jakość montowanych wyrobów.

W rozdziale 6 (s.87-s.102) pokazano możliwości zastosowania SPC (statistical proces control) w sterowaniu jakością montażu połączeń gwintowych. SPC jest bardzo często stosowaną metodą w procesach produkcji seryjnej. Zaprezentowano wyniki badań, w których w wielu przypadkach przekraczane były linie kontrolne. Przyczyny dopatrywano się w niewłaściwej twardości podkładek co często doprowadzało do tzw. bruzdowania, oraz

relaksacji naprężeń w krótkich okresach czasu po wykonaniu połączenia. W zakończeniu tego rozdziału zachęcano do stosowania SPC jako metody znacząco wpływającej na podniesienie poziomu jakości.

Rozdział 7 (s.103-s.112) porusza zagadnienie jakości dostaw co właściwie odnosi się do własności elementów przeznaczonych do montażu. Nie chodzi więc o dostawy, tylko o różnicę we własnościach elementów i ich wpływ na jakość połączenia gwintowego. Przedstawiono wzory określające zależność odkształceń wzdłużnych (rozciąganie) od momentu dokręcania i kąta obrotu. Są to odkształcenia w zakresie sprężystości lub w wybranych połączeniach w zakresie plastyczności. Opisano przykładowy eksperyment dokręcania dwóch rodzajów śrub dwustronnych. Analizy statystyczne uwidocznily różnice, co może być wskazówką do ustalania nowych parametrów dokręcania każdorazowo przy stosowaniu elementów o innych własnościach.

W rozdziale 8 (s.113-s.133) rozważano zagadnienia związane z uzyskaniem odkształceń plastycznych w elementach połączeń gwintowych. W większości połączeń moment dokręcania ma zapewnić jedynie odkształcenia w zakresie sprężystości, jednak są przypadki odpowiedzialnych połączeń, gdzie dla zapewnienia odpowiedniej jakości konieczne jest przejście w zakres odkształceń plastycznych. Przedstawiono zestaw wzorów opisujących taki proces dokręcania co pozwala na teoretyczną analizę procesu. Wzory te wiążą ze sobą takie wielkości jak moment dokręcania, kąt obrotu i naprężenia w elemencie łączącym. Trudne do identyfikacji zjawisko tarcia powoduje, że obliczenia teoretyczne muszą być potem weryfikowane w praktycznych eksperymentach. W tym celu przedstawiono opartą na modelu empirycznym metodę wyznaczania parametrów dokręcania i związanych z tym momentów granicznych. Eksperymenty dotyczyły montażu koła pasowego pompy wodnej z wykorzystaniem śrub M6.

W rozdziale 9 (s.134-s.164) przedstawiono metody optymalizacji w procesie doboru parametrów dokręcania. Jak zaznaczono nie jest to poszukiwanie najlepszych rozwiązań w sensie klasycznej teorii optymalizacji. Jest to natomiast szukanie tzw. racjonalnych rozwiązań z uwzględnieniem rzeczywistych warunków w systemach seryjnego montażu. Przedstawiono trzy przykłady dla których przyjęto dwukrokową strategię dokręcania. Czynniki podlegającymi optymalizacji, był moment pośredni, prędkości w kolejnych krokach oraz powiązane z tym kąty obrotu. Pierwszy przykład dotyczył połączenia elementu zawieszenia z nadwoziem samochodu. W drugim przykładzie analizie poddano montaż połączenia gwintowego łączącego za pomocą śruby drążonej przewód hydrauliczny z kompresorem. W trzecim przykładzie analizowano połączenie za pomocą specjalnej śruby drążonej elementu silnika spalinowego z siluminowym korpusem. Badano zmienność parametrów połączenia przed i po optymalizacji i we wszystkich przypadkach odnotowano poprawę. Ponieważ każdy przykład dotyczy innego połączenia to nie ma możliwości porównania skuteczności stosowanych metod optymalizacji.

Rozdział 10 (s.165-s.169) to podsumowanie i uwagi końcowe. W sposób syntetyczny przedstawiono zagadnienia będące treścią rozprawy. W końcowym akapicie zamieszczono zasadnicze stwierdzenie, że przedstawione analizy i wyniki badań nie zamykają tematyki natomiast stanowią podstawę do dalszych badań związanych z zagadnieniem polepszenia jakości połączeń gwintowych powszechnie występujących w produkcji seryjnej.

Bibliografia – w zestawieniu zamieszczono 166 pozycji, w tym książki, artykuły naukowe, normy oraz strony internetowe. Zestawienie uporządkowano z uwzględnieniem imion autorów. Taki porządek znacznie utrudnia analizę zamieszczonych pozycji. Większość stanowią pozycje anglojęzyczne, wydaje się że można było w większym stopniu promować krajowych autorów. W zestawieniu znajduje się tylko jedna pozycja Autora rozprawy (pozycja 121) o tematyce związanej z montażem połączeń gwintowych.

3. Ocena ogólna rozprawy

Rozprawa dotyczy zagadnień poprawy jakości w produkcji seryjnej z ukierunkowaniem na zagadnienia połączeń gwintowych, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym. Połączenia gwintowe są powszechnie stosowane w montażu różnych maszyn i urządzeń i wpływają na jakość i niezawodność użytkowanych wyrobów. O ile w produkcji jednostkowej istnieje możliwość bieżącej inspekcji parametrów wykonywanych połączeń to w produkcji wielkoseryjnej konieczne jest wbudowanie w system montażu procedur sterowania jakością.

Zagadnienia te w rozprawie doktorskiej zostały potraktowane wieloaspektowo, bardzo szeroko w uporządkowanym metodycznie układzie. Przedstawiono przegląd literatury dotyczącej tematyki rozprawy oraz krótki opis technologii montażu połączeń gwintowych. Dalsza część obejmuje prace badawcze, w tym: modele matematyczne zjawisk fizycznych występujących w procesach montażu połączeń gwintowych, wielkości kontrolne oraz analizę pracy systemów pomiarowych. W dalszej części związanej z montażem w warunkach przemysłowych wskazano możliwości stosowania kart kontrolnych w ramach SPC, oraz oceniono wpływ zmiany własności elementów pochodzących z różnych partii dostaw na jakość połączenia. Dwa końcowe rozdziały to określenie momentów granicznych oraz optymalizacja parametrów w dwukrokovym cyklu operacji dokręcania.

W analizowanych w kolejnych rozdziałach zagadnieniach przyjęto uzasadniony logicznie cykl działań. Opis problemu, model matematyczny oraz model empiryczny w sensie analizy statystycznej na bazie wyników pomiarów z rzeczywistych procesów dokręcania. Ta statystyczna część analizy związana z modelem empirycznym jest bardzo rozbudowana, w wielu przypadkach z wykorzystaniem zaawansowanych metod. Analizy były wykonywane z wykorzystaniem programu statystycznego (nie podano jaki to program). Tak rozbudowane analizy statystyczne wskazują na dużą widzę i umiejętności Autora w tym trudnym, a mającym duże praktyczne znaczenie obszarze.

W kolejnych rozdziałach opisano wiele eksperymentów wykonanych na potrzeby rozprawy doktorskiej oraz innych wykonanych wcześniej w procesie montażu co sprawia, że badania mają w większym stopniu charakter praktyczny niż teoretyczny. Dla analizowanych w kolejnych rozdziałach zagadnień podano wiele sposobów poprawy jakości w procesie dokręcania połączeń śrubowych w warunkach przemysłowych. Jest to jednak w wielu przypadkach jedynie przedstawienie zagadnień bez wskazania szczegółowych sposobów stosowania w praktyce przemysłowej. Te szczegółowe wskazania wykraczają poza zakres rozprawy i zgodnie z sugestią Autora powinny być tematem oddzielnych opracowań. Rozprawa doktorska stanowi więc dobrą podstawę do opracowania szczegółowych indywidualnych procedur sterowania jakością połączeń gwintowych w procesach montażu wyrobów w przemyśle motoryzacyjnym. W tym ujęciu cel pracy został osiągnięty natomiast Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia prac badawczych. Dodać należy, że rozprawa została starannie przygotowana pod względem językowym i edytorskim a drobne uchybienia nie wpływają na ocenę.

W treści rozprawy wielokrotnie występują odwołania do praktycznych obserwacji, stąd przekonanie, że Autor ma duże doświadczenie praktyczne. Podnosi to wartość przedstawionych badań i analiz jako bliskich rzeczywistych a nie tylko teoretycznych problemów. Stąd też pytania wymagające oprócz teoretycznej wiedzy znaczącego praktycznego doświadczenia:

- Jak często w praktyce w przemyśle motoryzacyjnym występuje problem wynikający ze złej jakości połączeń gwintowych?
- Dlaczego w zaproponowano dwukrokową strategię dokręcania – co wskazuje że jest ona lepsza od jednokrokowej (rozdział 9)?
- Czy wyniki optymalizacji parametrów dokręcania (rozdział 9) można uogólnić, czy też w każdym przypadku trzeba powtarzać procedurę?
- Co powoduje, że sterowanie kątem dokręcania nie jest powszechnie stosowane, jakie są zalety takiego sterowania?
- Jakim sposobem mierzono moment dokręcania w przedstawianych przykładach badań dla wcześniej wykonanych połączeń (w rozdziale 5 przedstawiono 4 sposoby pomiaru)?

4. Uwagi krytyczne

W rozprawie jest odniesienie do wielu eksperymentów, których wyniki były wykorzystywane w późniejszych analizach. W niektórych przypadkach nie jest dokładnie wyjaśniany sposób wykonywania tych eksperymentów. Jako przykład braku odpowiednich wyjaśnień można wskazać (punkt. 5.1. str. 77): „.....polegał na posłużeniu się, zebranymi przez autora pracy wynikami pomiarów momentów kontrolnych dla statystycznej próby 180 różnych łączników gwintowych i różnych połączeń. Na podstawie zebranych w ciągu dwóch lat danych”. Nie wiadomo kto i w jakim celu wykonywał pomiary. Autor rozprawy zbierał wyniki ale nie wiadomo czy wykonywał pomiary, czy próby były wykonywane w ciągu dwóch lat, czy też Autor zbierał wyniki w ciągu dwóch lat.

Pewne zastrzeżenia mogą budzić używane określenia. Przykładowo str. 6: „Pomimo jednak coraz większej jakości i precyzji operacji dokręcania.....”. Określenia „większa” i „mniejsza” raczej nie są stosowane do oceny poziomu jakości.

Na rysunku 68, (str.136): „Schemat dwukrokowej strategii dokręcania z kluczowymi parametrami programu” pozycje 1, 2, 5 to prędkości natomiast pozycja 4 to przyspieszenie. Na tym rysunku nie ma osi „przyspieszenie” pozycja 4 to zmienna a nie stała prędkość. podobnie jak pozycja 5.

Niezbyt dobrze sformułowane zdanie – tytuł podpunktu 9.1: „Minimalizacja zmienności finalnego kąta kontrolnego w strategii dokręcania na określony moment dokręcania metodą Taguchiego”. Nie jest jednoznaczne, czy metoda Taguchiego odnosi się do momentu dokręcania czy do minimalizacji zmienności.

W treści rozprawy występują modele matematyczne, statyczne i dynamiczne. Pokazują one jedynie złożoność omawianych problemów. Brakuje natomiast przykładowych rozwiązań i symulacji pokazujących rozkłady sił, naprężeń i przemieszczeń.

Przedstawione uwagi krytyczne nie wpływają znacząco na wartość pracy, są natomiast zachętą aby w opracowaniach dotyczących badań naukowych dbać o pełną jednoznaczność opisów.

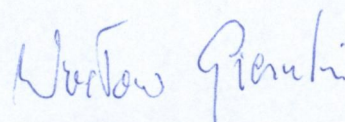
5. Podsumowanie

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego związanego z zapewnieniem jakości w systemach produkcyjnych. Mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i stanowi znaczący wkład w badania związane z wykonywaniem połączeń śrubowych w warunkach produkcji seryjnej.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Popiela pt.: „Sterowanie jakością procesów montażu połączeń gwintowych w przemyśle motoryzacyjnym metodami modelowania empirycznego” spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki.

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz o dopuszczenie Pana mgr inż. Rafała Popiela do publicznej obrony.

Kielce, dnia 7 września 2022 r.


Wacław Gierulski