

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. **TOMASZA DUBIELA**

nt. "**Analiza procesu plastycznego kształtowania śrub wysokowytrzymałych o łbach z kształtem nietypowym**" wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej, zgodnie z uchwałą RD IMECH nr 16/11/2022 z dnia 30 listopada 2022 r. (Pismo RM-530-11-03/2022 z dnia 30 listopada 2022r.)

1. Ocena istotności problemu naukowego rozprawy

Mgr inż. Tomasz Dubiel studia magisterskie ukończył w lipcu 2017 roku na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, po przedstawieniu pracy nt. „Zmiana współczynnika tarcia podczas wielokrotnego dokręcania w zakresie plastycznym ocynkowanych łączników gwintowanych”. Od października 2017 roku do czerwca 2022 na tym samym Wydziale uczestniczył w studiach doktoranckich w zakresie Budowa i Eksploatacja Maszyn. Od roku 2017 do chwili obecnej pracuje jako inżynier jakości w zakładzie Koelner Rawlplug IP, oddział w Łańcucie, gdzie jest odpowiedzialny m.inn. za rozwój produkcji wysokowytrzymałych zestawów śrubowych HV według EN 14399-4.

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Dubiela została wykonana w roku 2022 na Wydziale Mechanicznym Politechniki Rzeszowskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Tadeusza Balawendera, prof. PRz. Praca została napisana w klasycznym układzie. Zawiera spis treści, wstęp, przegląd literatury, cele i tezę pracy, wyniki badań własnych, podsumowanie i wnioski, wykaz literatury, spis rysunków i tablic oraz krótkie streszczenie w języku polskim i angielskim. W spisie literatury Doktorant podaje 137 pozycji krajowych i zagranicznych do których odwołuje się w swojej rozprawie. W tym wykazie znalazły się trzy prace Doktoranta, które publikował w czasie swej pracy naukowej. Rozprawa obejmuje 177 stron, 136 rysunków i 19 tablic. Zamieszczony w pracy materiał ilustracyjny w postaci wykresów i tabel dostatecznie podkreśla wyniki badań własnych i w wystarczającym stopniu stanowi

wsparcie merytoryczne dla wniosków końcowych rozprawy. Autor używa poprawnej terminologii technicznej. Rozprawa napisana jest w języku polskim.

Tematyka rozprawy dotyczy kształtowania plastycznego wysokowytrzymałych śrub o kształtach złożonych i nietypowych, stosowanych w najbardziej odpowiedzialnych połączeniach śrubowych, takich jak: sprężane węzły hal, dźwigary mostów, dźwigi wind, jako mocowanie w silnikach samochodów. W recenzowanej rozprawie doktorskiej analizowana jest możliwość zerwania śruby wysokowytrzymałej o nietypowym kształcie łba podczas jej eksploatacji, na skutek wad procesu kucia.

Opracowane rozwiązania badawcze z wykorzystaniem metod symulacji komputerowych MES, badań kruchości wodorowej pozwalają na prawidłowe projektowanie procesu wytwarzania śrub, poprawności doboru materiału, prawidłowości kucia wielooperacyjnego śrub, obróbki cieplnej i galwanicznej, możliwości występowania wad, powstania zarodków pęknięcia w procesie kucia oraz niezawodności śruby stosowanej w środowisku o podwyższonej korozyjności.

Realizacja badań w zakresie kształtowania plastycznego wysokowytrzymałych śrub o złożonych i nietypowych kształtach łbów ma charakter aktualny, jest uzasadniona, a tym samym spełnia oczekiwania w aspekcie naukowym. Ma znaczenie zarówno poznawcze jak i technologiczne. Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Dubiela wpisuje się zatem swoją tematyką w interesujące i nadal aktualne obszary badań poznawczych i aplikacyjnych nauk technicznych, w obszarze inżynierii mechanicznej. Należy dodać, że rozprawa ta wpisuje się także w tematykę badawczą realizowaną i rozwijaną od wielu lat w Katedrze Obróbki Plastycznej Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

2. Merytoryczna ocena pracy

Studium literaturowe zawarte na 47 stronach składa się z trzech rozdziałów i obejmuje zagadnienia dotyczące tematyki pracy. W podrozdziale 1.1 jako wprowadzenie do analizy stanu zagadnienia Doktorant podaje klasyfikację śrub według kształtu łba i gniazd w ujęciu norm DIN i ISO. W tym miejscu zwracam uwagę, że przedstawione tytuły norm zawarte w tekście różnią się od podanych w spisie literatury. Szczegółowo omawia technologię wykonania wyrobów śrubowych, począwszy od przygotowania walcówki, następnie operacji ciągnięcia, kucia, obróbki cieplnej aż do ochrony korozyjnej. W trzecim podrozdziale podkreśla znaczenie przebiegu linii płynięcia materiału oraz umiejętność ich ujawnienia. Wskazuje na korzyści stosowania kucia na zimno w stosunku do obróbki

skrawaniem, co jest ogólnie znane oraz wskazuje na możliwość analizy linii płynięcia materiału w procesie kucia przez stosowanie programów komputerowych opartych o MES. Doktorant klasyfikuje wady występujące podczas kucia wielooperacyjnego i podkreśla, że wady nieciągłości powierzchni nie są dostatecznie opisane w literaturze, a wpływ wad kucia na niezawodność wyrobów śrubowych ujęta jest jedynie w ogólnym standardzie norm ISO i DIN. To czyni, że badania w zakresie występowania wad nieciągłości powierzchni w procesie kucia wielooperacyjnego jako jako nadal aktualne i interesujące.

Druga część przeglądu piśmiennictwa dotyczy pękania materiału. Doktorant omawia modele pękania, wyjaśnia pękanie kruche, plastyczne, zmęczenie materiału. Ten rozdział jest związany z tematyką pracy, ale zawiera szereg wiadomości akademickich. Interesujący jest natomiast rozdział trzeci przeglądu piśmiennictwa dotyczący kruchości wodorowej, metodologii jej badania, mechanizmów jej działania, wpływu na deformację i pęknięcie stali oraz określenie podatności śrub na kruchość wodorową, wynikającą z procesu produkcyjnego oraz środowiska. Przegląd teoretycznej analizy stanu zagadnienia Doktorant kończy celem i zakresem pracy. Ten rozdział rozpoczyna krytyczną analizą problemu, co można określić jako podsumowanie przeglądu piśmiennictwa. Doktorant stwierdza, że w dostępnej literaturze dużo miejsca poświęca się żywotności narzędzi kuźniczych, a mało uwagi możliwości wystąpienia wad w procesie kucia wielooperacyjnego oraz wpływu defektów, zwłaszcza kruchości wodorowej, na funkcjonalność śrub podczas ich eksploatacji. Stąd wynika sformułowany cel naukowy, cele użytkowe i teza pracy. Moim zdaniem cel i tezę pracy można było zawrzeć w osobnym rozdziale poza przeglądem piśmiennictwa.

Przegląd piśmiennictwa jest poprawnie zredagowany, opracowany w sposób logiczny, w oparciu o właściwie dobrane pozycje literaturowe. Omówiona problematyka w części literaturowej właściwie koresponduje z tematyką rozprawy oraz problematyką prezentowaną w badaniach własnych. Należy podkreślić wykorzystanie w przeglądzie piśmiennictwa 137 pozycji literaturowych, głównie anglojęzycznych, w tym trzech pozycji zagranicznych z udziałem Doktoranta jako głównego autora.

Doktorant przedstawia cel naukowy pracy, którym jest wykazanie współzależności pomiędzy kruchością wodorową a wadami występującymi w śrubach na etapie ich wytwarzania oraz eksploatacji. Dalej Doktorant przedstawia trzy cele użytkowe i sformułowaną dwuczłonową tezę pracy brzmiącą: *„Zjawisko pęknięcia stali wywołane obecnością wodoru w strukturze, tzw. kruchość wodorowa może być wykorzystane do analizy defektów powstających na etapie wytwarzania oraz defektów generowanych w trakcie eksploatacji wyrobów śrubowych. Jest to szczególnie istotne w przypadku*

wysokowytrzymałych śrub o złożonych, nietypowych kształtach łbów, dla których określenie sposobu plastycznego płynięcia materiału na etapie wytwarzania jest trudne do analizy eksperymentalnej i numerycznej”.

Zaproponowana teza pracy w mojej ocenie jest poprawna, adekwatna do podjętego problemu badawczego a wraz z przyjętym zakresem prac wskazuje na spodziewane rezultaty badań. Przedstawioną tezę można było także zawrzeć w jednym członie przez dodanie *eksploatacji śrub wysokowytrzymałych o złożonych kształtach łbów*. Dla potwierdzenia przyjętej tezy Doktorant zaproponował szeroki zakres realizacji badań własnych, który obejmuje opracowanie modelu numerycznego procesu kucia wielooperacyjnego śrub, przeprowadzenie obliczeń numerycznych, realizację prób doświadczalnych, określenie wpływu parametrów technologicznych procesu na dokładność kształtowania wyrobów i występujące wady, takie jak: zakucia, zafałdowania, wykazanie lokalizacji wad poprzez testy kruchości wodorowej, badania wytrzymałościowe i metalograficzne.

Badania własne rozpoczyna zawarty w rozdziale piątym plan badań. Realizowane badania dla śrub M6 i M8 o klasie własności 12.9 ze stali 30MnB4, 32MnB4 i 19MnB4 podzielono na dwa etapy. W pierwszym analizowano możliwe do wystąpienia w łbach śrub wady podczas kucia wielooperacyjnego, a w drugim sprawdzono możliwość weryfikacji powstałych wad poprzez wykorzystanie zjawiska kruchości wodorowej. Badania własne Doktorant rozpoczyna od podania metodyki badań. Przedstawia oprogramowanie QForm zastosowane do analizy numerycznej procesu kształtowania śrub, które umożliwia analizę rozkładu odkształceń, prędkości odkształcenia oraz funkcji zniszczenia według Cockrofta – Lathama. Korzysta z gotowych zestawów narzędzi, a stosowane materiały wybrano z dostępnej bazy danych. Dużo miejsca poświęca technologii wytwarzania śrub przez wielooperacyjne kucie w kuźniarkach. Kuźniarki pozwalają na wykonanie śrub różnej długości, a mających ten sam kształt łba. Możliwość zmiany długości trzpienia wykorzystano w badaniach własnych, gdzie zastosowano trzy warianty ustawienia narzędzi. Jeden zgodny ze stosowaną technologią oraz dwa niezgodne powodujące ruch materiału z łba śruby w sworzeń oraz ze sworznia w łeb śruby. Niezgodne warianty kucia prowadzą do generowania wad, takich jak: fałdy, zakucia na powierzchni oporowej, przecięcie układu włókien na promieniach przejścia. Sprawdzenie zachowania ciągłości linii płynięcia realizowano w badaniach metalograficznych. Doktorant w metodyce badań przedstawia zbyt szczegółowo końcowe operacje wytwarzania śrub, badania własności mechanicznych, sposób przygotowania zgładów, ocenę mikroskopową, co wynika ze stosowanych norm i instrukcji technologicznych. Na uwagę zasługuje przedstawienie metodyki badań kruchości

wodorowej śrub wysokiej wytrzymałości, z łbami nietypowymi i dużym ich odkształceniu podczas kucia wielooperacyjnego. Zaproponowana przez Doktoranta metoda badawcza umożliwia analizę wpływu wad powierzchni i niekorzystnego układu włókien na wystąpienie zjawiska kruchości wodorowej. Doktorant przedstawia zaproponowaną procedurę badania kruchości wodorowej, przygotowane stanowisko badawcze i zastosowane oprzyrządowanie. Śruby oceniano w kilku krokach, poczynając od demontażu skręconego zestawu śruby, poprzez badania mikroskopowe, wytrzymałości połączenia na rozciąganie i ocenie przelomu próbek z wyraźnym pęknięciem.

W rozdziale siódmym i dziewiątym zawarto badania doświadczalne mające na celu określenie wad występujących w wyrobach śrubowych na skutek niewłaściwego ustawienia narzędzi kuźniczych. Doktorant szczegółowo przedstawił wyniki symulacji numerycznych w postaci wektorów prędkości i linii płynięcia dla kutych śrub M8x60, M6x55, przy prawidłowym i nieprawidłowym ustawieniu narzędzi. Takie ustawienie narzędzi zastosowano także w eksperymentach doświadczalnych realizowanych w warunkach przemysłowych. Wykazał dużą zgodność występowania wad w łbach śrub, w postaci nieciągłości powierzchni, fałd, zakuć, wtrąceń niemetalicznych określonych w symulacjach numerycznych, a występujących podczas kucia w kuźniarkach. Ma to istotne znaczenie podczas opracowywania procesu technologicznego kucia wielooperacyjnego w kuźniarkach śrub o skomplikowanym kształcie. Druga część badań doświadczalnych, zawarta w rozdziale ósmym, dotyczy weryfikacji opracowanej metodyki, która wykorzystuje zjawisko kruchości wodorowej do analizy defektów powstałych podczas kucia i eksploatacji śrub. Badania obciążonego zestawu śrubowego w środowisku korozyjnym wykazały występowanie zjawiska kruchości wodorowej w śrubach mających wady łba w postaci zakucia, karbu, pęknięcia, co potwierdzono oceną metalograficzną i oceną przelomu. Szczególnie narażone na pęknięcia są wysokowytrzymałe śruby o nietypowym kształcie łba, odpowiadające klasie własności 12.9. Zatem, jak stwierdza Doktorant, opracowana procedura badawcza kruchości wodorowej została wdrożona jako dodatkowe badanie w produkcji nowych śrub wysokowytrzymałych, z łbem o kształcie nietypowym, celem potwierdzenia poprawności przyjętych założeń technologicznych.

Rozprawa doktorska na zakończenie zawiera krótkie podsumowanie i wnioski wynikające z prowadzonych obliczeń numerycznych i prób doświadczalnych. Wskazaniem jest aby wnioski wynikające z pracy były wyeksponowane i ponumerowane.

Oceniając część pracy dotyczącą badań własnych muszę stwierdzić, że część eksperymentalna, która wymagała niewątpliwie dużego nakładu pracy, wiedzy i umiejętności

została dokładnie zaplanowana i wykonana. Z dużą starannością przeprowadzono i opisano analizy numeryczne i próby laboratoryjne procesu kształtowania wysokowytrzymałych śrub. Załączone rysunki, tabele i schematy są przejrzyste i dobrze uzupełniają tekst pracy. Nie budzi większych zastrzeżeń strona redakcyjna i edycja rozprawy. Występujące, nieliczne błędy edycyjne zaznaczyłem w tekście pracy. Wymaga podkreślenia fakt, że przedstawione wyniki badań własnych mają dużą wartość poznawczą i praktyczną, co potwierdza, że założenia i cele rozprawy były słuszne. Przeprowadzone badania potwierdzają przyjętą tezę pracy, że kruchość wodorowa może być stosowana do analizy defektów powstających na etapie wytwarzania oraz defektów generowanych w trakcie eksploatacji wysokowytrzymałych śrub o złożonych, nietypowych kształtach łbów. Doktorant wykazał się dużą umiejętnością prowadzenia badań i ich analizy w oparciu o wiedzę z obróbki plastycznej, mechaniki i budowy maszyn.

Do największych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć :

- opracowanie literaturowe w zakresie kucia wielooperacyjnego śrub wysokowytrzymałych o nietypowych łbach, co rozszerza zakres wiedzy na temat kształtowania plastycznego wyrobów śrubowych,
- określenie na drodze modelowania numerycznego i doświadczalnego wpływu parametrów kształtowania na cechy geometryczne wysokowytrzymałych śrub o łbach nietypowych oraz wyjaśnienie zjawisk zakłócających proces kształtowania wyrobu,
- wykazanie przydatności symulacji numerycznej do ujawnienia przebiegu włókien i występowania wad powierzchniowych w procesie kucia wielooperacyjnego śrub w kuźniarkach,
- opracowanie i wdrożenie metodyki badań kruchości wodorowej śrub oraz wykonanie stanowiska badawczego,
- wykazanie współzależności pomiędzy występowaniem kruchości wodorowej w śrubach wysokowytrzymałych a wadami strukturalnymi, co pozwala na wykrywanie wadliwych śrub na etapie ich wytwarzania.

Jednocześnie mam kilka uwag, które wymagają wyjaśnienia podczas publicznej obrony:

1. Czy pozytywny jest wpływ zwiększonego tarcia w procesie kucia wielooperacyjnego śrub i w jaki sposób można zwiększyć współczynnik tarcia?
2. Doktorant wskazuje na konieczność wyżarzania walcówki po procesie trawienia i fosforanowania. Czy proces wyżarzania walcówki jest w całości realizowany w zakładzie produkcji śrub, czy też zamawiana jest walcówka w stanie wyżarzonej?

3. Czy w ujęciu obowiązujących norm możliwym jest wytwarzanie wysokowytrzymałych śrub w stanie bezpośrednio po kuciu, bez stosowania obróbki cieplej, jeśli spełniają określone normą wymagania właściwości?
4. Czy możliwym jest stosowanie podczas montażu śrub naprężeń powyżej granicy plastyczności?
5. Jak obliczany jest współczynnik koncentracji naprężeń i współczynnik efektu karbu?
6. Czy do programu MES możliwe jest wprowadzenie wyznaczonych dla badanych stali właściwości mechanicznych, szczególnie krzywych umocnienia.
7. Czy w świetle obowiązujących norm dla śrub ze stali wysokowytrzymałych możliwym jest wytwarzanie śrub bez stosowania obróbki cieplnej?
8. Jak rozumieć występujące wycieki występujące w okolicach pęknięć i dlaczego nie można ich uniknąć?

3. Wniosek końcowy

Opiniowaną rozprawę doktorską mgr inż. Tomasza Dubiela n.t. "Analiza procesu plastycznego kształtowania śrub wysokowytrzymałych o łbach z kształtem nietypowym" oceniam pozytywnie z uwagi na walory naukowe i poznawcze, bogaty warsztat badawczy, a także duży potencjał Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W podsumowaniu uważam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w oparciu o opracowanie technologiczne, wskazuje na ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, Jego umiejętności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem spełnia wymagania stawiane w ustawie z dnia 20 lipca 2018 (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. Nr 2018, poz. 1668 z późn. zm.) i dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Dubiela do publicznej obrony.

Eugeniusz Hordant