

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Tomasza Dubiela**
nt. „**Analiza procesu plastycznego kształtowania śrub wysokowytrzymałych o łbach z kształtem nietypowym**”

Formalna podstawa recenzji

Podstawę formalną opracowania przedmiotowej recenzji, stanowiła Uchwała RD IMech Nr 16/11/2022 z dnia 30 listopada 2022 roku i przedstawiona w skierowanym do mnie piśmie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr hab. inż. Andrzeja Burghardta prof. PRz.

Recenzowana praca została napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Tadeusza Balawendra prof. PRz.

Aktualność podjętego tematu

W dziedzinie kształtowania śrub wysokowytrzymałych istnieje wiele badań i opracowań, a stan wiedzy na ten temat stale się rozwija. Śruby wysokowytrzymałe są stosowane w wielu dziedzinach, takich jak przemysł lotniczy, przemysł energetyczny, motoryzacyjny, czy przemysł stoczniowy. Do produkcji śrub wysokowytrzymałych stosuje się różne technologie kształtowania, takie jak kucie, walcowanie, ciągnięcie, wyciskanie i inne. Ważne jest również dobranie odpowiedniego materiału, w zależności od wymagań konstrukcyjnych. Badania skupiają się na zwiększeniu wytrzymałości śrub, poprawie odporności na korozję, zmniejszeniu wagi i kosztów produkcji. Często stosowanymi rozwiązaniami są modyfikacje kształtu gwintów, zmiany materiałów, dodatki stopowe oraz różne procesy obróbki cieplnej. Wyniki badań w tej dziedzinie przyczyniają się do poprawy jakości i trwałości elementów łączących, co ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji.

Wraz z rozwojem technologicznym, rosną wymagania co do jakości i wytrzymałości elementów łączących, a co za tym idzie, wzrasta zapotrzebowanie na śruby wysokowytrzymałe ich stabilną jakość. Obecnie stosowane materiały cechują się wysoką wytrzymałością, co wymaga stosowania śrub o podobnych lub wyższych parametrach. Zapotrzebowanie na śruby wysokowytrzymałe będzie wciąż rosło wraz z rozwojem przemysłu, innowacjami technologicznymi i potrzebami rynku.

W związku z powyższym **tematykę opiniowanej pracy uważam za celową i aktualną z naukowego i praktycznego punktu widzenia.**

Mocną stroną pracy jest jej badawczy charakter oraz potencjał aplikacyjny. Wyniki z pewnością znajdą zastosowanie w praktyce przemysłowej. Aktualność podejmowanej tematyki potwierdzają również polskie i zagraniczne doniesienia literaturowe.

Zakres opiniowanej pracy

Struktura pracy składa się z dziesięciu rozdziałów głównych, z których pierwsze trzy dotyczą badań literaturowych, natomiast kolejne siedem rozdziałów zawiera autorskie opracowanie tematu dysertacji. Pracę kończy spis literatury, rysunków oraz tabel. Recenzowana praca liczy 177 stron, jest bogato ilustrowana, zawiera 136 rysunków, 19 tabel oraz 137 pozycji literatury.

Teoretyczna analiza stanu zagadnienia przedstawia tło zagadnienia którego dotyczy rozprawa doktorska. W rozdziale odniesiono się między innymi do procesów stosowanych w technologii wyrobów śrubowych, oraz problemów związanych z eksploatacją śrub wysokowytrzymałych. Szczególną uwagę zwrócono uwagę na problem pęknięcia materiału i kruchości wodorowej występującej w łącznikach gwintowanych. Analiza literaturowa zawiera wieloaspektowe odniesienia do literatury przedmiotu. Na uwagę zasługuje obszerny udokumentowany przegląd literatury. Rozdział prezentuje aktualny stan zagadnienia w zakresie analizowanego obszaru wiedzy. Istotnym aspektem poruszonym w tej części pracy jest omówienie zagadnienia powstawania kruchości wodorowej występującej w materiałach metalicznych, gdy są one narażone na oddziaływanie wodoru. W wyniku tego oddziaływania, materiał może ulec pęknięciu lub złamaniu przy niższym niż zwykle naprężeniu, co jest nazywane kruchością wodorową.

Cel i zakres pracy poddaje krytycznej analizie problem unikania wad w procesie wytwórczym śrub wysokowytrzymałych. Istotnym wnioskiem z przeprowadzonej analizy jest stwierdzenie, że kluczowe jest rozpoznanie defektów mogących wystąpić w chwili kształtowania łba śruby takich jak zakucia fałdowania oraz pęknięcia. Doktorant zwraca uwagę, że w dostępnej literaturze brakuje bezpośredniego odwołania się do technologii produkcji łączników gwintowanych, a rozważane problemy skupiają się często na żywotności narzędzi kuźniczych. Doktorant wskazuje również, że brakuje badań określających wpływ poszczególnych defektów na funkcjonalność wyrobów oraz określenia skutecznych testów pozwalających na weryfikację wyprodukowanych śrub ze względu na ryzyko zerwania w momencie eksploatacji. W tym kontekście Doktorant stwierdza, że czynnikiem wyzwalającym nagłe pęknięcie wysokowytrzymałej stali jest zjawisko kruchości wodorowej.

Głównym celem naukowym pracy jest wykazanie, że zjawisko kruchości wodorowej może być narzędziem stosowanym do wykrywania wad strukturalnych i oceny jakości wyrobów śrubowych. W rozdziale sformułowano również trzy cele użyteczne dotyczące określenia warunków technologicznych sprzyjających generowaniu wad strukturalnych w śrubach o łbach nietypowych, opracowanie metodologii wykrywania wad strukturalnych za

pomocą badania kruchości wodorowej oraz ich wpływu na bezpieczeństwo funkcjonowania wysokowytrzymałych wyrobów śrubowych o kształtach nietypowych.

Doktorant formułuje również tezę pracy w której twierdzi, że zjawisko pękania stali wywołane obecnością wodoru w jej strukturze może być wykorzystane do analizy defektów powstających na etapie wytwarzania oraz defektów generowanych w trakcie eksploatacji wyrobów śrubowych. Na podstawie zdefiniowanych celów pracy i tezy, Doktorant przygotował plan badań koniecznych do udowodnienia tezy pracy.

W części dotyczącej badań własnych Doktorant zaprezentował plan badań, który zakładał dwa etapy. W pierwszym etapie założono analizę możliwych do wygenerowania wad w procesie kucia wielooperacyjnego. W drugim etapie skupiono się na sprawdzeniu możliwości weryfikacji powstałych wad poprzez wykorzystanie zjawiska kruchości wodorowej. Opis metodyki badań zawiera informację o zastosowaniu oprogramowania Qform do analizy procesów kucia na zimno i gorąco. Przy opracowaniu symulacji MES skorzystano z gotowych zestawień narzędzi wraz z rysunkami poszczególnych detali. Dane materiałowe do symulacji przyjęto z dostępnej bazy danych programu. Parametry wykorzystane do opracowania symulacji MES nie budzą moich zastrzeżeń. W obliczeniach numerycznych zastosowano funkcję pozwalającą na ujawnienie zakuć i linii płynięcia.

Osobny podrozdział poświęcono na opis kuźniarki Sacma SP18 i SP28 zastosowanej do uzyskania wyrobów śrubowych, które następnie poddano badaniom. Zastosowana maszyna jest obecnie najczęściej stosowana do produkcji śrub. Cechą charakterystyczną tej maszyny, wykorzystaną w badaniach, jest możliwość zmiany pozycji wypychacza, pozwala to na wytwarzanie jednym zestawem narzędzi śrub o tym samym łbie, ale różnej długości trzpienia. Narzędzia do wytwarzania śrub w badaniach, wykonano ze stali stopowej NiCrMo po obróbce cieplnej. W procesie zastosowano wydajny system smarowania. Badawczy proces wytwarzania śrub oparty był na standardowych procedurach technologicznych. Wady w śrubach uzyskiwano poprzez zaburzenie standardowego procesu produkcyjnego poprzez zmianę geometrii narzędzia, zmianę objętości materiału wsadowego oraz zmianę ustawień kuźniarki podczas procesu produkcyjnego.

Do analizy linii płynięcia odkutych śrub wykorzystanych w eksperymencie zastosowano normę SAE USCAR 8. Badania wykonywano na polerowanych próbkach bez mocowania w bakelicie. W celu ujawnienia linii płynięcia zastosowano krótkie trawienie w roztworze NITAL. Próbki do badań poddano obróbce cieplej polegającej na hartowaniu w oleju i odpuszczaniu. Dla śrub poddanych badaniom zastosowano również proces cynkowania elektrolitycznego w celu zwiększenia połysku i odporności na korozję. Własności mechaniczne śrub zdefiniowano w oparciu o standard ISO 898-1 z określeniem minimalnej wytrzymałości na rozciąganie, R_m , twardości oraz integralności. Próbki do zglądów metalograficznych były wycinane wzdłuż lub poprzecznie w zależności od rodzaju badań, następnie były myte w myjce ultradźwiękowej. Powierzchnie do zglądów zgrubnie szlifowano. Następnie przeprowadzono szlifowanie dokładne i polerowanie na szlifierko-polerce. Ocenę mikroskopową wykonano na mikroskopach Keyence VHX 6000 i NEOPFO-30. Pomiar twardości metodą Vickers'a wykonano zgodnie ze standardem EN ISO 6507-1 na urządzeniu

LV800AT LECO pozwalającym na wykonywanie automatycznej serii pomiarów. Wytrzymałość na rozciąganie określono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej LabTest ZD40 na podstawie normy ISO 6892-1. Realizowana próba miała na celu wyznaczenie wytrzymałości śruby na rozciąganie oraz sprawdzenie integralności pomiędzy gwintem, a częścią niegwintowaną. Kruchość wodorową wyznaczono w oparciu o zmodyfikowany standard EAD 330232-00-0601. Doktorant dostosował procedurę do wymogów stosowanych w przemyśle. Pierwsza modyfikacja dotyczyła sposobu zakotwienia śruby i wytworzenia naprężenia rozciągającego. Drugą modyfikacją była rezygnacja z podłoża betonowego i umieszczenie próbki w pojemniku PET. Jak twierdzi Doktorant modyfikacje nie wpłynęły znacząco na wyniki badań.

W podrozdziale dotyczącym badania kruchości wodorowej dla śruby z łbem nietypowym przedstawiono szczegółowe spektrum badań analizowanej śruby. Analizowanym kształtem była śruba z łbem sześciokątnym i gniazdem Torx w rozmiarze M6xL dla której przedstawiono szczegółowy opis wraz z opisem procesu technologii kucia. Podrozdział zawiera również opis procedury przygotowania próbek do badania kruchości wodorowej, obróbki cieplej.

W rozdziale dotyczącym wad wyrobów śrubowych skupiono się na błędach wynikających z nieodpowiedniego ustawienia narzędzi kuźniczych, zaburzeniu objętości poszczególnych obszarów oraz błędów wykonania narzędzi. Rozdział zawiera wyniki analizy symulacji MES różnych wariantów symulowanych śrub w zestawieniu z makrostrukturą wykonaną za pomocą mikroskopu optycznego. Rozdział mógłby zawierać syntetyczne podsumowanie i charakterystykę wad. Weryfikację metody badania kruchości wodorowej przeprowadzono dla śruby M8x20 dla czterech wariantów badań. Po badaniach sprawdzano sztywność połączenia, integralność powierzchni, dokonano oceny metalograficznej, wytrzymałości połączenia na rozciąganie oraz przełomu próbek z wyraźnym pęknięciem. Podsumowanie zawarto w podrozdziale zatytułowanym „Wpływ HE na pękanie wysokowytrzymałych śrub” gdzie stwierdzono, że w przypadku śrub bez wpływu kruchości wodorowej pęknięcia nie wystąpiły, natomiast w przypadku śrub narażonych na działanie kruchości wodorowej stwierdzono pęknięcia co zostało wstępnie ocenione jako pozytywną weryfikację metody.

Przedostatni rozdział badań własnych dotyczy analizy śruby z łbem o kształcie nietypowym M6x25. Śruby przebadano w dwóch klasach dokładności 10.9 oraz 12.9 dla trzech wariantów wad. Opis wyników prezentuje już tylko same zdjęcia makrostruktury bez analizy numerycznej MES oraz badanie kruchości wodorowej wg. wcześniej ustalonej procedury. Wyniki badań testu kruchości wodorowej zestawiono w tabeli. Pozostałe wyniki zaprezentowano w osobnych podrozdziałach dokumentując je zdjęciami. Rozdział ten nie zawiera podsumowania.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski z całości pracy podzielonej na dwie części. Pierwsza część dotyczyła wad związanych z integralnością powierzchni natomiast druga część dotyczyła wad wykrywanych przy użyciu opracowanej metodyki badań kruchości wodorowej.

Uwagi redakcyjne

- *Str. 64; 8 linijka jest „...stali wysoko wytrzymałej...”* powinno być „...stali wysokowytrzymałej...”
- *Str. 64; 21 linijka jest „2. Cel użytkowy”* powinno być „2. Cele użytkowe”
- Doktorant bardzo skupił się na temacie kruchości wodorowej, że w pracy występują aż trzy podrozdziały z podobnym nagłówkiem: podrozdział 6.8, podrozdział 6.9 oraz 9.2. co utrudnia czytanie pracy.
- *Str. 83 dwie ostatnie linijki.* Brak ciągłości zdania w ostatnich linijkach.
- *Str. 84 ostatnia linijka.* Nagłówek podrozdziału jako ostatnia linijka na stronie jest niefortunne.
- *Str. 98 podpis pod Rys. 53.* Zdanie w podpisie pod Rys. 53 zaczyna się od słowa „Oprządkowanie...” a powinno raczej od słowa „Oprogramowanie...”
- Brak legendy dla wektorów prędkości na rysunkach symulacji MES w rozdziale 7
- Brak opisu pierwszego wiersza tabeli pokazanej na Rys. 78 i Rys. 79.
- *Str. 145 Rys. 100* Opis osi pionowej wykresu: *jest „Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]”* powinno być „Napężenie [MPa]”. Wytrzymałość na rozciąganie to tylko jeden punkt na prezentowanym wykresie.
- *Str. 145 Rys. 100 i Tab.19.* Numeracja próbek nie koreluje pomiędzy Rys. 100 i Tab. 19.

Uwagi dyskusyjne

- W liście zadań koniecznych do wykonania, zaprezentowanych przez doktoranta pod tezę pracy jest punkt: 3. Opracowanie zasad unikania wad procesu kucia. W pracy nie można znaleźć rozdziału na ten temat.
- Proszę podać alternatywne propozycje nagłówków dla podrozdziałów: 6.8; 6.9 oraz 9.2.
- Czy wyeliminowanie pokrycia ochronnego w postaci cynkowania elektrolitycznego nie przyspieszyłoby badań?
- Proszę scharakteryzować odkształcenia plastyczne dla wariantu śruby przedstawionej na Rys. 71.
- Z Tab. 18 wynika, że w badaniach śruby z łbem o kształcie nietypowym użyto 18 próbek, natomiast na Rys. 100 podano wykresy dla sześciu próbek, z kolei zestawienie zaprezentowane w Tab. 19. prezentuje niejasny dla mnie opis próbek.

Ocena merytoryczna rozprawy

Przegląd literatury bazujący na 137 pozycjach był podstawą zdefiniowania celu i zakresu pracy. Przedstawione przez Doktoranta dane literaturowe dotyczą bezpośrednio problematyki kruchości wodorowej rozważanej w pracy, umożliwiając ocenę aspektów poznawczych i naukowych pracy. Cytowane prace są aktualne i dobrze dobrane, w dużej części są to publikacje z renomowanych czasopism.

Rozprawa doktorska w dużej mierze skupia się na analizie i porównaniu próbek poddanych badaniu kruchości wodorowej. Praca wystarczająco przedstawia zagadnienie badawcze zarówno od strony sformułowanych treści jak i formy rozprawy. Struktura rozprawy w moim przekonaniu jest nieco chaotyczna. W rozprawie nie ustrzeżono się błędów edytorskich niewpływających w istotny sposób na czytelność i zrozumienie intencji Autora. Rozprawa w wielu fragmentach przybrała formę raportu z badań, co nie jest korzystne. Wymienione wątpliwości nie obniżają jednak w pełni pozytywnej oceny pracy, a jedynie mogą być pomocne przy dalszym upublicznianiu wyników pracy i dalszych badaniach. Procedury badawcze użyte w pracy są w większości standardowe lub znormalizowane i przyjęte w pracy zgodnie z ich przeznaczeniem.

Za najmocniejszą stroną pracy uważam jej aplikacyjny charakter. Modyfikacja procesu badania kruchości wodorowej pozwoliła na wykrycie wad powstałych w procesie kucia. Rozwinięcie tej idei może w przyszłości pozwolić na jej wykorzystanie w innych aplikacjach.

Za najbardziej istotny wniosek z pracy uważam stwierdzenie, że opracowana procedura badawcza kruchości wodorowej została wdrożona jako dodatkowe badanie w produkcji nowych śrub wysokowytrzymałych z łbem o kształcie nietypowym. Co więcej badanie znajduje również zastosowanie w obecnie wytwarzanych wyrobach.

Postawiony cel pracy uważam za osiągnięty, założony zakres pracy za zrealizowany a teza pracy za w pełni udowodnioną i udokumentowaną.

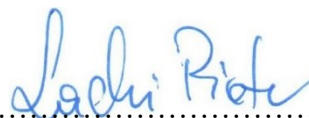
Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Tomasza Dubiela zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Doktorant wykazał się należyłą wiedzę oraz umiejętnością prowadzenia badań naukowych i prezentacji wyników. Na podkreślenie zasługuje fakt, że praca została zrealizowana przy dużym nakładzie pracy i środków związanych z wykonaniem badań. Wykonanie badań wymagało od Doktoranta znajomości teorii i technologii kuźniczych. Uzyskane wyniki mają unikalną wartość poznawczą i naukową, należy je uznać za wartościowe i w dużym stopniu jako oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy.

Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Dubiela pt. „**Analiza procesu plastycznego kształtowania śrub wysokowytrzymałych o łbach z kształtem nietypowym,**” stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Doktorant osiągnął założony cel wykazując się znajomością zagadnień z zakresu inżynierii mechanicznej, oraz nowoczesnej metodyki i technik badawczych. Zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Wnioski wynikające z rozprawy stanowią oryginalny wkład naukowy autora w rozwój Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.**

W mojej ocenie przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Dubiela w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



.....
Prof. dr hab. inż. Piotr LACKI
Politechnika Częstochowska
Częstochowa, 1.03.2023