

Poznań, 06.03.2024

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
tel.: +48 61 6653570
e-mail: michal.wieczorowski@put.poznan.pl

**Ocena rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Przemysława Polińskiego**

**Podwyższenie odporności na zużycie sprawdzianów gwintowych stosowanych
w przemyśle lotniczym**

Podstawa recenzji

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza numer RM-530-26-02/2023 z dnia 15 listopada 2023 roku.

1. Wprowadzenie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest związana z weryfikacją otworów gwintowanych w przemyśle lotniczym. Jej podstawowym elementem są sprawdziany do gwintów, które umożliwiają pozytywną bądź negatywną ocenę wykonanego gwintu. Trwałość sprawdzianów, czyli zachowanie przez nie wymiaru pozwalającego na poprawne funkcjonowanie to ważne zagadnienie w praktyce produkcyjnej. Istnieje szereg sposobów związanych z materiałami i pokryciami wymagających wszakże analizy ekonomicznej, aby uzasadnić ich stosowanie w zakładach przemysłowych. Tą tematykę podjął Doktorant w swojej pracy, skupiając się także na różnorodnych problemach metrologicznych. Żywotność przyrządów pomiarowych to bardzo ważne zagadnienie, ciągle aktualne, co sprawia, że oceniana praca podejmuje istotne tematy badawcze i uytylitarne. To ostatnie jest jeszcze o tyle istotne, że praca jest finalizacją

działań prowadzonych w ramach programu ministerialnego Doktorat Wdrożeniowy, a więc jej nieodzownym elementem jest wdrożenie wyników w praktyce.

2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do recenzji dysertacja złożona jest z 7 rozdziałów oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Manuskrypt w całości liczy 213 stron, jest więc bardzo obszerny. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy układ spójny i logiczny. Zawartość merytoryczna jest w większości poprawnie i bogato ilustrowana, co pomaga w interpretacji toku rozumowania Autora.

Rozdział pierwszy (Wprowadzenie) stanowi wstęp do pracy i przedstawia informacje wprowadzające czytelnika w zagadnienia związane z dysertacją związane m.in. z przemysłem lotniczym i występującymi w nim elementami oraz sprawdzianami gwintowymi.

W rozdziale drugim Autor przeprowadził szeroką analizę stanu zagadnienia w odniesieniu do gwintów calowych oraz materiałów stosowanych w lotnictwie. Odniósł się także do powłok przeciwzuzyciowych ogólnego przeznaczenia. Omówiono zatem gwinty calowe, uwzględniając także te, które są przystosowane do wkręcania wkładek helicoil. Zaprezentowano występujące w normach amerykańskich sprawdziany gwintowe calowe trzpieniowe. Przedstawiając kontrolę połączeń gwintowych stosowanych w przemyśle lotniczym Doktorant poruszył tematykę materiałów stosowanych do produkcji sprawdzianów gwintowych (stal narzędziowo-stopowa do pracy na zimno, stal szybko tnąca, węgiel spiekany) oraz wzorcowania sprawdzianów gwintowych i ich zużycia. Ponieważ sprawdziany przeznaczone są do weryfikacji produkcji lotniczej, w tej części pracy scharakteryzowano również wybrane materiały stosowane w przemyśle lotniczym: a mianowicie stopy aluminium, tytanu i stal nierdzewną. Ostatnia część tego rozdziału została poświęcona charakterystyce powłok przeciwzuzyciowych. Omówiono powłoki ochronne wytwarzane metodami PVD i CVD, a także mechanizmy ich degradacji.

Rozdział trzeci jest wynikiem analizy przedstawionej w rozdziałach poprzednich i przedstawia ogólnie sformułowaną hipotezę, a także cel i zakres pracy. Weryfikacji podlega stwierdzenie, że opracowanie metodyki i dobór materiałów do wytworzenia sprawdzianów gwintowych i rodzaju powłok ochronnych o właściwościach przeciwzuzyciowych pozwala na wydłużenie żywotności sprawdzianów gwintowych, zminimalizowanie zjawiska ich zacierania się w trakcie kontroli jakości elementów wykonanych z aluminium, wydłużenie okresu między wzorcowaniami oraz opracowanie rozwiązania pozwalającego na regenerację zużytych sprawdzianów. Celem natomiast jest już bardziej ogólnie właśnie opracowanie tej metodyki, czyli

doboru materiałów sprawdzianów gwintowych i powłok przeciwzużyciowych wydłużających czas eksploatacji jednocześnie zwieszającej czasookres wzorcowania sprawdzianów gwintowych trzpieniowych używanych w przemyśle lotniczym, do kontroli elementów konstrukcyjnych samolotów: korpusów, kolektorów, obudów.

Począwszy od rozdziału czwartego rozpoczyna się część badawcza pracy. Omówiono tu szczegółowo plan i przedmiot badań (czyli jakie badania prowadzono na jakich przedmiotach). Ponownie, ale na znacznie większym poziomie szczegółowości scharakteryzowano materiały stosowane do produkcji sprawdzianów gwintowych użytych do badań, a konkretnie stal narzędziową do pracy na zimno O1, stal szybko tnącą molibdenową HSS M1 i węgiel spiekany C-2, 10% Co. Dokładniej i konkretniej niż poprzednio pokazano też powłoki przeciwzużyciowe zastosowane do nanoszenia na powierzchnie sprawdzianów gwintowych. W dalszej części omówiono przyrządy i systemy pomiarowe wykorzystane w badaniach. Zaprezentowano urządzenia do pomiaru średnicy podziałowej (z bardzo szczegółowym wyznaczeniem niepewności pomiaru) oraz do analizy nierówności powierzchni. Omówiono sposób realizacji obserwacji powierzchni sprawdzianów gwintowych i przekrojów za pomocą technik mikroskopowych. Aparaturę badawczą przedstawiono także przy badaniach odporności na zużycie, potraktowanych przez Autora jako testy eksploatacyjne i badanie przyczepności powłoki do podłoża metodą testu na zarysowanie. Tą część pracy kończy przyrząd do badania właściwości mechanicznych, a konkretnie do pomiaru twardości materiałów.

Rozdział piąty przedstawia wyniki zrealizowanych badań i ich analizę. Pierwsza część to wyniki pomiarów średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych. Wyniki te zostały podzielone pod względem trzech elementów, jakie weryfikowane są przy użyciu sprawdzianów, a mianowicie kolektorów hydraulicznych: modułu autopilota samolotu Boeing 737, OB spoiler samolotu Dreamliner 787 i hamulca samolotu Airbus A350. Następnie przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości i topografii powierzchni sprawdzianów oraz efekty badań przyczepności powłoki do podłoża i pomiaru twardości materiałów. Doktorant zaprezentował również wyniki obserwacji sprawdzianów (pokrytych i niepokrytych) za pomocą mikroskopii elektronowej i świetlnej. Rozdział kończą rozważania na temat regeneracji sprawdzianów gwintowych i analizy opłacalności wydłużenia ich żywotności.

W rozdziale szóstym znajdują się wnioski z badań i analiz, a w rozdziale siódmym wykaz literatury. Obejmuje on 124 pozycje w tym książki, artykuły, normy, strony internetowe oraz świadectwo wzorcowania. Są wśród nich także współautorskie opracowania Autora ocenianej rozprawy. Pracę kończy streszczenie w języku polskim i angielskim (abstract) jako rozdziały nienumerowane.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca doktorska związana jest z działalnością firmy lotniczej, produkującej elementy z otworami gwintowanymi. Doktorant zajął się tematyką związaną z wydłużeniem żywotności sprawdzianów, umożliwiającą weryfikację tych otworów. Zagadnienie to jest częściowo funkcją zastosowanych materiałów i powłok. W pracy wykonano szereg pomiarów, które pozwoliły Autorowi zdobyć wiedzę z dziedziny inżynierii materiałowej i mechanicznej. Analizując założenia rozprawy doktorskiej stwierdzam, że postawiona przez Doktoranta teza pracy została udowodniona, materiał z jakiego wykonany jest sprawdzian i powłoka, którą został pokryty wpływają istotnie na jego trwałość. W mojej ocenie osiągnięto również główny cel pracy. Ważnym elementem rozprawy są pomiary średnicy podziałowej i szczegółowo przedstawiona analiza niepewności pomiaru. Ciekawym pomysłem jest też próba oceny efektywności ekonomicznej.

Zapoznając się z treścią manuskryptu nasunęły mi się pewne uwagi w stosunku do treści, które mogą być dla Doktoranta punktem wyjścia do dalszego doskonalenia warsztatu naukowego i edytorskiego, a także do przemyśleń odnośnie dalszych publikacji. Wśród takich uwag są następujące:

- 1) Rozprawa doktorska powinna mieć pewne cechy uogólnień, będących efektem zdobytej wiedzy. Z tego względu ograniczanie się normami amerykańskimi jest całkowicie nieuzasadnione. Praca o sprawdzianach powinna zawierać istotne informacje, a takie znajdują się w normach ISO, bezwzględnie obowiązujących w naszej części świata. Bezkrytyczne przywiązanie do norm lotniczych jest słabością pracy, chyba że doktorat ma obowiązywać tylko w konkretnej fabryce lotniczej. Analiza sprawdzianu calowego może być jedynie szczególnym przypadkiem rozważań.
- 2) Analiza zjawiska jakim jest zużycie może być związana z wartością średnicy. W pracy analizowano tylko jeden sprawdzian o stosunkowo małej średnicy zewnętrznej. Czy Doktorant przeprowadził rozważania na ten temat?
- 3) Badania zużycia sprawdzianów pokrytych TiN i węglkowych pokazały, że zmian w ramach wykonanych prób nie zaobserwowano. Czy nie powinno się ich kontynuować aż do zniszczenia, aby zdobyć wiedzę na temat liczby cykli pracy do zużycia?
- 4) Czy Doktorant rozważał skonstruowanie stanowiska do wkręcania sprawdzianów? To pozwoliłoby stosunkowo szybko zrealizować testy zużycia.
- 5) W badaniach powłok zasadne byłoby przeanalizowanie różnych grubości pokryć, aby określić funkcję trwałości w stosunku do ceny. Czy rozważano taką możliwość?

- 6) Strona 13. Dlaczego akurat takie powłoki i metody ich nakładania wybrano? Czy wynika to z jakiejś analizy?
- 7) W rozdziale 2 bardzo szczegółowo opisano sprawdzian (jest to wiedza powszechna), do tego niezgodnie z normami, które jako umowa w Polsce obowiązują. Natomiast bardzo skąpo opisano wkładki helicoil, będące raczej rzadkością. Nie podano sposobu jej działania. Do tego rysunek 2.2 nic nie wnosi - można się domyślać, gdzie jest wkładka - bez dodatkowych opisów jest w zasadzie nieprzydatny.
- 8) Autor w pracy (od rozdziału 2.3.1) pisze o zużyciu ściernym i erozyjnym sprawdzianów. Gdzie występuje zużycie erozyjne i na skutek czego?
- 9) Przy tak obszernej pracy nie jestem przekonany czy konieczny jest tak szczegółowy rozdział 2.4, wystarczy tylko podać jakie materiały zastosowano w badaniach - rozdział 4.
- 10) Rozdział 2.5 mówi o materiałach na sprawdziany. Znow nie jestem przekonany, czy jest on niezbędny w tak obszernej wersji, zwłaszcza że opisano go na podstawie norm amerykańskich, co jest ... mocno nietypowe i nieprzydatne w sensie ogólnym. Poza tym, tekst tego rozdziału praktycznie powtórzono (rozszerzając) w rozdziale 4.3.
- 11) Strona 51. Autor pisze o pomiarach metrologicznych. Czy są pomiary niemetrologiczne?
- 12) Strona 52. Dlaczego do grubości powłoki nie zastosowano spektrometru fluorescencji rentgenowskiej? Jaki cel miał pomiar grubości powłoki, skoro nie był to parametr, na który Doktorant miał jakikolwiek wpływ? Czy przekazano producentowi informacje o odchyłkach grubości i uzyskano od niego komentarz zwrotny? Podobnie odnośnie składu chemicznego powłok.
- 13) Strona 52. Dlaczego do sezonowania sprawdzianów przyjęto 2 godziny? Czy przeprowadzono analizę pokazującą, że to wystarczy? Z reguły w laboratoriach akredytowanych przyjmuje się 8 godzin.
- 14) Strona 52. Czy średnicę wałeczka według normy amerykańskiej zweryfikowano długościomierzem?
- 15) W całej pracy w obliczeniach i wynikach wartość średnic podaje się z czterema miejscami po przecinku. Tymczasem niepewność rozszerzona to +/- 3 mikrometry. Jaki sens ma czwarte miejsce? To wymaga co najmniej komentarza lub usunięcia. Wartość na tym miejscu jest całkowicie losowa. Tym bardziej uzasadnienia nie ma zapis (zero po trójce) ze strony 59:

$$6,9431 \pm 0,0030$$

- 16) Bardzo ciekawa i dobra jest analiza niepewności dla średnicy podziałowej. Niestety, dla żadnych innych pomiarów o niepewności nie ma ani słowa. Czy zatem można było zakończyć pomiary na średnicy podziałowej?
- 17) Strona 59. Na końcu strony Autor powołuje się na wartość ze świadectwa. Rozumiem zatem przywołanie pozycji literaturowej [100], ale skąd się wzięły pozostałe? Nie ma w nich nic na temat pomiaru tego konkretnego sprawdzianu.
- 18) Rozdział 4.5.2. Nie podano żadnych warunków pomiaru dla topografii powierzchni (powiększenie, oświetlenie, pole pomiaru, rozdzielczość, stitching, filtracja...). Trudno ocenić pomiary bez tych informacji.
- 19) Jeśli mówimy o pomiarach nierówności w układzie 3D to jest to topografia powierzchni, a nie morfologia. Wszystkie normy ISO z rodziny 25178 czy 16610 stosują takie właśnie pojęcie, a morfologia w nich nie występuje. Słowo "morphologie" do oceny powierzchni stosują wyłącznie Francuzi, inne nacje rozumieją morfologię bardziej ogólnie w odniesieniu do warstwy wierzchniej i jej cech. Nie mówimy też o chropowatości 3D, ponieważ termin "chropowatość" wymusza niejako odfiltrowanie pewnych składowych nierówności powierzchni.
- 20) Strona 78 i dalsze. Z uwagi na grubość powłoki, dla pokryć nie bada się twardości, a raczej mikrotwardość, a wręcz nanotwardość. Pomiar twardości w skali HRC stosowany jest dla przedmiotów, dla których nie ma wyraźnych różnic pomiędzy twardością powierzchni i rdzenia. Przy 2 mikrometrach grubości mierzymy coś bardzo nieokreślonego. Do powłok powinni się wtedy użyć wgłębnik Vickersa lub Berkovicha.
- 21) Podrozdział 5.7 (czyli pierwszy w rozdziale 5). Dlaczego do pomiaru nie zastosowano technik optycznych, które są dużo szybsze i pozwoliłyby na statystykę? A poza tym, są metody, które pozwoliłyby uzyskać mniejszą niepewność pomiaru.
- 22) Podrozdział 5.7 (czyli pierwszy w rozdziale 5). Jaka jest wiarygodność pomiarów średnicy podziałowej, kiedy niepewność zajmuje około 40% pola tolerancji? Zgodnie ze złotą zasadą metrologii nie powinno to być więcej niż 10%, w szczególnych sytuacjach 20%.
- 23) Podrozdział 5.7 (czyli pierwszy w rozdziale 5). Czy Doktorant przeanalizował fakt, że z uwagi na niepewność i losowość czwartego miejsca po przecinku, okazuje się, że niektóre sprawdziany przy zużyciu zwiększają swoją średnicę?
- 24) Tabela 5.52 i 5.53. W niektórych miejscach zaskakująca jest powtarzalność wyników, tutaj jest to szczególnie widoczne. Czy przy tych pomiarach zachowano wszelkie wymagane standardy metrologii?

- 25) Rozdział 5.8. Absolutną rzadkością jest sytuacja, kiedy S_a jest mniejsze od R_a czy prawie równe, zwłaszcza jeśli R_a jest średnią. Czy przy tych pomiarach zachowano wszelkie wymagane standardy metrologii? Czy P1 do P5 to kolejne zwoje gwintu? Jaki sens ma średnia z trzech wartości, jak bardzo się one od siebie różniły? Jak wybrano obszary pomiarowe? Różnice w R_z są spore pomiędzy średnimi - w tabeli 5.82 od 2,67 do 4,01 mikrometra. Jak wpływa na to niepewność pomiaru?
- 26) Jaki był cel badań przyczepności podłoża, skoro Doktorant nie miał na to wpływu? Działanie scratch testera w żaden sposób nie przypomina zużycia podczas wkręcania czy wykręcania sprawdzianu. Trzeba wszelako oddać, że materiał graficzny w tej części pracy jest szczególnie ładny.
- 27) Rozdział 5.12. Rozwiązanie pozwalające na regenerację jest co najmniej opisem procesu i warunków jakie musi on spełniać z doborem wszystkich niezbędnych elementów. Samo stwierdzenie, że można pokryć coś co się zużyło równomiernie nie jest rozwiązaniem. A jeśli nie jest zużyte równomiernie, można podszlifować? A może całość zeszlifować? A może jeszcze trochę bardziej w głąb materiału? Ile?
- 28) Strona 202. Co to jest wzorcowanie w celu pomiaru?
- 29) Rozdział 5.13. Jak Doktorant ocenił ekonomiczne aspekty sprawdzianów pokrytych czy węglkowych, skoro w większości przypadków w badaniach nie doszło do osiągnięcia końca ich żywotności? Skąd zatem wnioski na temat uzasadnienia ekonomicznego? A jeżeli sprawdzian pokryty TiN pracuje kilkanaście lub kilkadziesiąt razy dłużej od najtańszego stalowego? Z moich doświadczeń wynika, że pokrycie może dawać takie efekty.
- 30) Rozdział 6. W każdych działaniach inżynierskich bardzo ważny jest realizm. Również tego co się zrobiło i uzyskało. To moje spostrzeżenie odnosi się do wniosków. Proponuję je przeczytać raz jeszcze, a potem realnie i uczciwie ocenić to, czego naprawdę Doktorant dokonał. Podziwiam odwagę napisania: przedstawiono rozwiązanie pozwalające na regenerację zużytych sprawdzianów, czy opracowano zweryfikowane praktycznie rozwiązania zapewniające zwiększenie trwałości... Skromność i pokora wobec nauki są nie do przecenienia...
- 31) Czy efektem działań wdrożeniowych jest pomysł zakupu sprawdzianów pokrywanych?
- Oceniając stronę edytorską należy podkreślić, że praca napisana została poprawnym językiem polskim. Rysunki w większości wykonane są z dbałością i starannością. Wśród uwag edytorskich warto zwrócić uwagę na następujące:
- 1) W pracy występują tzw. teksty wiszące, czyli teksty znajdujące się np. pomiędzy tytułem rozdziału głównego a tytułem podrozdziału (np. na początku rozdziału 5). Zasady edytorskie stanowią, że przy numeracji cyfrowej wielorzędowej np. po tytule rozdziału 4

- powinien od razu następować tytuł podrozdziału 4.1. a tuż np. po tytule podrozdziału powinien być tytuł podrozdziału kolejnego rzędu itd. Między nimi nie powinno być żadnych tekstów (zwanych wiszącymi). Teksty te to z reguły ogólne wprowadzenia do rozdziałów, omówienia czy streszczenia. Jeżeli tekst wiszący jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu – powinien mieć numer i tytuł, natomiast jeśli zawiera ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału – powinien zostać usunięty przez Autora.
- 2) Jeśli rozdział dzielony jest na podrozdziały, to powinno być ich co najmniej dwa. Jeśli jest tylko jeden, to powstaje pytanie o celowość podziału (2.1.1, 4.8.1).
 - 3) Podrozdziały w rozdziale 5 zaczynają się od 5.7.
 - 4) Jeśli mamy na myśli elementy policzalne, to mówimy o ich liczbie a nie ilości.
 - 5) Brak kropki na końcu strony 9.
 - 6) teksty na rysunku 1.2 są mało czytelne.
 - 7) Strona 13. Lepiej pisać o dużych obciążeniach a nie wysokich.
 - 8) Strona 50. Powinno być Centennial Carbide.
 - 9) Strona 51. Powinno być pozycję a nie pozycje.
 - 10) Strona 63. Tekst o wybranych stronach przewodnich jest powtórzeniem fragmentu ze strony poprzedniej.
 - 11) Strona 63. Podrozdział o obserwacjach mikroskopowych powinien mieć numer 4.6.2.

Mam nadzieję, że przedstawione powyżej uwagi pomogą Doktorantowi w głębszym zrozumieniu problematyki prowadzenia badań naukowych, wnioskowania, a na pewno powinny skłonić do refleksji nad własnymi dokonaniem. Pozwolą również zastanowić się nad kształtem, realnością i zasadnością ewentualnych dalszych prac. Przyczynią się także zapewne do doskonalenia warsztatu pisarskiego.

4. Wnioski

Zaprezentowana rozprawa doktorska jest dziełem zawierającym bogaty materiał ilustracyjny i pisemny na temat możliwości poprawy trwałości sprawdzianów gwintowych. Jej Autor wykazał się umiejętnością realizacji pomiarów i oszacowania niepewności pomiaru średnicy podziałowej. Zaplanował i przeprowadził eksperymenty, które potwierdziły wysuniętą hipotezę. Określił cel i zakres pracy w stopniu niezbędnym do przygotowania dysertacji. Praca napisana jest w sposób jasny i przejrzysty bogato ilustrowana graficznie.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że tematyka pracy jest żywa i aktualna, została wybrana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dysertacja wnosi treści nowe. Powyższe fakty świadczą o

kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Przemysława Polińskiego pt. *Podwyższenie odporności na zużycie sprawdzianów gwintowych stosowanych w przemyśle lotniczym*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski



Politechnika Poznańska