

Prof. dr hab. inż. Michał Wasilczuk
Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
Ul Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Veroniki Kharina'y pt. Algorytm oceny złączy kablowych M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym: analiza cyklicznych obciążeń, siły zrywania oraz powłok galwanicznych

Recenzję sporządziłem na podstawie zawiadomienia o powołaniu na recenzenta z dnia 12.12.2025 podpisanego przez Rektora Politechniki Opolskiej datowanego na 12.12.2025.

1. Tematyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy metodyki oceny właściwości użytkowych złączy kablowych typu M12 stosowanych powszechnie w wielu gałęziach przemysłu. W pracy zaproponowano algorytm trójskładnikowej oceny jakości złącza, uwzględniający ważne czynniki tej oceny, takie jak opór elektryczny, odporność na wielokrotne łączenie i rozłączanie oraz wytrzymałość mechaniczną połączenia kabla zaciskami wtyczki/gniazda. Zastosowanie tego algorytmu zilustrowano wynikami badań doświadczalnych, w których zbadano poszczególne wpływające na prawidłowe działanie złącza.

2. Zawartość rozprawy

Układ pracy jest typowy, po wprowadzeniu i analizie stanu wiedzy przedstawiono cele i hipotezę badawczą. Następnie zaproponowano i opisano metodykę badań i ich wyniki, oraz na podstawie uzyskanych wyników dokonano przykładowej oceny złączy za pomocą zaproponowanego algorytmu. Główną część pracy zakończono wnioskami, a także oceną ograniczeń i możliwości rozwojowych algorytmu oraz spisem literatury. Część szczegółowych wyników badań w postaci danych tabelarycznych i wykresów umieszczono w załączniku.

3. Ocena rozprawy

Tematyka pracy jest aktualna ponieważ badania dotyczą rozwijającego się ciągle stosowania elektroniki w każdej gałęzi techniki, a także wzrastających wymagań dotyczących niezawodności stosowanych połączeń elektrycznych, coraz intensywniejszych potrzeb dotyczących przesyłania sygnałów o wysokiej częstotliwości, a także miniaturyzacji urządzeń powodującej konieczność zmieszczenia w złączu z gwintem M12 aż do 17 styków. Tematyka pracy wydaje się idealnie dopasowana do tematu doktoratu wdrożeniowego, jednak autorka nie wspomina o żadnej inspiracji ze strony przemysłu, czy też rozwiniętej współpracy z firmą z branży elektrycznej lub elektronicznej. Po ogólnym **Wprowadzeniu** w rozdziale **Przegląd wiedzy i część teoretyczna** na początku scharakteryzowano budowę, rodzaje, zasadę działania i przeznaczenie badanych złączy M12, ten opis nie budzi zastrzeżeń. Następnie omówiono **Parametry mechaniczne i elektryczne złączy**, w tym korzyści wynikające ze stosowania powłok galwanicznych, mechanizmy ich degradacji a następnie metody w szczególności czynniki wpływające na opór przejścia stykowego. W kolejnym podrozdziale scharakteryzowano mechanizmy pogarszające ich właściwości eksploatacyjne lub powodujące

uszkodzenia złączy. Ważnym podrozdziałem jest część **Aktualny stan badań i standardy branżowe**, gdzie Autorka podaje szereg interesujących przykładów rozwiniętych i rozwijanych metod badawczych stosowanych we współczesnym przemyśle – przykłady te pokazują, że zarówno normy branżowe, jak i międzynarodowe przewidują złożone i wieloaspektowe metody badania złączy elektrycznych, w tym także złączy typu M12, co do pewnego stopnia stoi w sprzeczności z końcowymi wnioskami podsumowującymi osiągnięcia pracy doktorskiej, dotyczącymi unikatowości opracowanego w ramach pracy algorytmu. Również podsumowanie tego podrozdziału nie wskazuje na istnienie jakiejś wyraźnej luki badawczej wymagającej podjęcia badań, ponieważ jak zauważa Autorka: „... aktualny stan badań i standardów.... opiera się na bogatej bazie naukowej oraz szeroko rozwiniętym zapleczu normatywnym i przemysłowym. Połączenie wyników badań materiałowych, procedur testowych i doświadczenia producentów pozwala dziś tworzyć złącza które spełniają surowe wymagania trwałości, odporności i niezawodności nawet w najbardziej wymagających zastosowaniach.”

W części teoretycznej rozprawy zabrakło mi syntetycznych podsumowań w postaci list, tabel, gdzie zestawiono by na przykład stosowane normy i badane według ich zaleceń parametry złączy i metody badawcze lub warunki badań, albo zestawienia mechanizmów degradacji złączy ze wskazaniem kto i jakimi metodami badał te mechanizmy. Takie zestawienia mogły by uzasadnić przyjęte w badaniach własnych metody badawcze i warunki prowadzenia badań, albo także uwypuklić osiągnięcia wyróżniające badania Autorki na tle innych podobnych badań.

Przedstawione w kolejnym rozdziale **Cel pracy i hipoteza badawcza**, cele i spodziewane efekty pracy zostały określone przez samą Autorkę i właściwie można powiedzieć, że są jednym z ważniejszych elementów w każdej pracy doktorskiej. Elementem, który powinien być dokładnie przemyślany, przedyskutowany i wyczelowany co do formy. Aby zilustrować jak te fragmenty wyglądają w pracy, być może warto te krótkie akapity przytoczyć w całości, choćby dla osób zapoznających się tylko z recenzjami, a nieznających całej pracy:

Celem danej pracy doktorskiej jest badanie kontaktów elektrycznych z galwaniczną powłoką cynową, poznanie zjawiska rezystancji przejścia, czynników wpływających na rezystancje przejścia, wpływ temperatury na powłokę cynową i zbadanie efektów starzeniowych. Celem jest opracowanie kompleksowego podejścia do oceny jakości i trwałości przemysłowych połączeń kontaktowych, uwzględniającego zarówno czynniki mechaniczne, jak i elektryczne.

I akapit z hipotezą:

Hipoteza badawcza przyjęta w niniejszej pracy zakłada, że jakość powłoki, temperatura, wilgotność otoczenia, geometryczne cechy zakucia kontaktów wpływają na rezystancje przejścia. Zakłada się również, że zastosowanie modyfikowanej metody pomiaru rezystancji umożliwi wczesne wykrycie zjawisk degradacyjnych niewidocznych przy klasycznych pomiarach statycznych rezystancji kontaktowej, co stanowi klucz do opracowania skutecznego algorytmu diagnostyczno-predykcyjnego oceny stanu połączeń.

Oba te fragmenty są niestety nieprecyzyjne, gdyż Autorka badała nie tylko styki z powłoką cyny (także złota, srebra i styki bez powłoki). Cele pracy nie zostały w pełni osiągnięte – uważam, że Autorka nie wykazała, że poznane zostało zjawisko rezystancji przejścia, ponieważ zostało ono jedynie opisane od strony teoretycznej w części literaturowej, a w badaniach własnych badano jedynie najbardziej podstawowy parametr będący efektem różnych zjawisk zachodzących w kontakcie, czyli opór elektryczny. Sformułowanie hipotezy nie jako odrębnego zdania, a w formie całego akapitu jest dyskusyjne. Osobiście sądzę, że w pracach z dziedziny nauk inżynierijno-technicznych formułowanie hipotezy nie jest konieczne, natomiast ważne są uzasadnione w odpowiedni sposób cele pracy. Pierwsza część hipotezy w recenzowanej pracy jest oczywistym truizmem niewymagającym żadnych

badania. Druga część hipotezy, w której sformułowano opinię o wyższości modyfikowanej metody pomiaru rezystancji przejścia nad metodą statyczną dotyczy innej niż inżynieria mechaniczna dyscypliny naukowej. Hipoteza ta, moim zdaniem nie została sformułowana precyzyjnie, ponieważ w pracy nie zastosowano żadnej zmodyfikowanej metody pomiaru rezystancji przejścia, a tylko zmodyfikowano warunki prowadzenia takich pomiarów wystawiając złącze na degradujące warunki. Jak rozumiem, sformułowana w hipotezie możliwość wczesnego wykrycie zjawisk degradacyjnych, dotyczy tego, że specjalnie wykorzystane degradujące warunki degradują złącze szybciej niż normalne warunki eksploatacji. Jeżeli dobrze zrozumiałem tę część hipotezy to też jest ona oczywistością. Idąc dalej: „skuteczny algorytm diagnostyczno-predykcyjny” żeby mógł powstać, zwłaszcza w części „predykcyjnej” musiałby w jakiś sposób umożliwić skalowanie/przeliczenie tych specjalnych surowych warunków degradacji do normalnych warunków eksploatacji w różnych zastosowaniach. Takich rozważań w pracy nie znalazłem. Zatem, idąc dalej, opinia o skuteczności opracowanego algorytmu jest tylko opinią i postulatem, ale raczej nie udowodnionym faktem.

W rozdziale **Część praktyczna – metodyka badań i analiza wyników** opisano na wstępie przyjęte do realizacji pracy metody i opracowane/zmodyfikowane urządzenia badawcze. Właściwie nie jest jasne czy metody te są metodami znormalizowanymi. Nie przytoczono żadnych oznaczeń norm, poza dość ogólnym skrótem HAST bez odniesienia się do konkretnej normy, z której zapewne przyjęto warunki badań, tj. temperaturę i wilgotność względną i czas badania. Brakuje jednak konkretnej informacji jakich złączy i jakich zastosowań dotyczą przyjęte warunki.

Podobnie niekompletny jest opis testów cykli temperaturowych, Autorka powołała się na firmę Phoenix Contact oraz, w innym miejscu na normę IEC 60068-2-14, ale nie podała konkretnych aplikacji/oznaczeń i tego co zaczerpnięto z normy, a co z zaleceń firmowych.

Jeżeli idzie o badania siły zrywania to zakładam, że wykorzystano zalecenia normy DIN EN 60352-2 (choć zapewne istnieje też norma ISO o identycznym oznaczeniu i takiej samej treści), chociaż wprost tego w miejscu opisu warunków badań nie sformułowano i nie podano konkretnej wartości, a pojawiające się w różnych miejscach informacje są niespójne – por. uwagi szczegółowe. Tym niemniej niezależnie od wymaganej wartości granicznej wszystkie złącza wykazały znacznie wyższą wytrzymałość na zrywanie.

W sposób najbardziej systematyczny opisano test łączenia/rozłączania, gdzie opis różnych standardów i norm zakończono przejrzystymi tabelami z wyszczególnieniem warunków badań (Tabela 4.2.1 i Tabela 4.2.2). Tabele te wprawdzie nie mają podanego źródła i nie wiadomo skąd wzięto wartości np. sił wkładania i wysuwania, ale i tak opis ten jest najbardziej przejrzysty, chociaż schemat elektryczny połączeń powinien być moim zdaniem objaśniony. Z punktu widzenia wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej muszę stwierdzić, że błędne w kontekście łączenia i rozłączania styków jest przywoływanie frettingu jako ważnego zjawiska prowadzącego do degradacji – fretting oczywiście występuje, ale zachodzi między powierzchniami nominalnie nieruchomymi. Tutaj podczas łączenia zachodzą ruchy o dużej amplitudzie i mechanizmy niszczenia są inne – zużycie ściernie, być może także adhezyjne. Nawet jeżeli fretting zachodzi podczas fazy połączonych złączy to kolejne rozłączanie i łączenie usuwa produkty zużycia frettingowego ze strefy stuku.

W dalszym ciągu tej części opisano zastosowane urządzenia badawcze. Do badań wykorzystano standardowe urządzenia badawcze maszyny wytrzymałościowe z odpowiednimi uchwytami do testów łączenia i rozłączania z pomiarem siły i inną maszynę to pomiaru siły zrywania. Układ do badania oporu był złożony z zasilacza laboratoryjnego i typowego multimetru dobrej klasy. Niestety tu również zabrakło wielu szczegółów, tak w opisie, jak i w części ilustracyjnej. Przede wszystkim razi zwrot „zbudowano specjalistyczne stanowiska badawcze” i „stanowiska te zostały zaprojektowane” podczas

kiedy, co najwyżej wykonano odpowiednie uchwyty do stanowisk. Brakuje jednak ilustracji (rysunków technicznych lub fotografii), na których jednoznacznie przedstawiono by, np. „(zaprojektowany przez Autorkę) uchwyt do maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell przeznaczony do badań cyklicznych obciążeń mechanicznych”. Wydaje się też, że uchwyty do próby zrywania przedstawione na rysunkach 4.3.1- 4.3.3 są standardowymi szczękami z wyposażenia stanowiska. Umieszczone w pracy fotograficznie nie są niestety szczegółowo objaśnione, czy to w tekście czy w podpisach, czy poprzez dodanie opisów do fotografii.

W opisie uzyskanych wyników badań w głównej części pracy w kolejności przedstawiono wyniki testu temperaturowego i przyspieszonego starzenia dla złącza z kablem pokrytym powłoką złota o grubości 0,4 μm , i powłoką srebra o nieopisanej grubości. Całość wyników tych testów umieszczono w załączniku – dodatkowo były to powłoka złota o grubości 0,4 μm , powłoka cyny i przewody zaciśnięte bez uprzedniego nałożenia powłoki). Każdy z testów dla każdego wariantu materiałowego wykonano dla 20 złączy. Wyniki przedstawiono w postaci tabelarycznej i wykresów. Każdy przebieg został przybliżony linią prostą przeprowadzoną przez trzy punkty – wartość początkowa, pośrednia (po 250 lub 500 h) i wartość końcowa (po 500 lub 1000 h). Z niezrozumiałej dla mnie przyczyny na wykresach nie zaznaczono punktów pomiarowych – są to w końcu jedyne bezpośrednie wyniki – interpolacja liniowa jest już interpretacją przebiegu zjawisk, której *nb.* w żaden sposób nie objaśniono, a już samo pokazanie na wykresie punktów pomiarowych unaoczniałoby rozrzut wyników i odstępstwa od liniowości. Wydaje się też, że przeprowadzenie aż 20 prób było wystarczające do wykonania analizy o charakterze statystycznym – np. wyznaczenie odchyłeń standardowych. Ewentualna interpolacja liniowa dla całego zestawu danych dla jednego wariantu materiałowego byłaby całkiem dobrze uzasadnionym modelem empirycznym zjawiska. Co więcej takie linie („modele”) pozwoliłyby na znacznie bardziej uzasadnione porównania szybkości degradacji poszczególnych wariantów. Takiego porównania zresztą w ogóle nie przeprowadzono – brak w tekście odnośników do poszczególnych wykresów i stwierdzeń typu „degradacja złącza z powłoką złota jest wielokrotnie wolniejsza niż złącza bez powłoki”, „rozrzut właściwości złącza z powłoką srebra jest mniejszy niż złącza z powłoką cyny”. Wyników tych też nie zebrano w dwie wspólne tabele czy dwa wykresy typu $\Delta R=f(\text{wariant materiałowy})$ – jedynym zestawieniem jest tabela 4.5.3, gdzie pokazano, który z typów złącza przeszedł test w akceptowalny sposób (tj. zmiana oporu była \leq niż 15 m Ω - nie do końca zresztą jest jasne czy ten dopuszczalny wzrost oporu dotyczy obu typów testów 500 h i 1000 h, a, co więcej dalej, na s. 118 podano 20 m Ω , jak dopuszczalną graniczną wartość wzrostu oporu). Nie wiadomo jak zestawiano ze sobą wyniki obu testów, czy uwzględniano średnie wartości, czy udział pozytywnych testów, bo powłoka cynowa została zdyskwalifikowana, a srebrna warunkowo zakwalifikowana, podczas gdy powłoka cynowa miała lepszy średni wynik niż powłoka srebrna (choć oczywiście poza dopuszczalnymi wartościami).

Kolejne przedstawione wyniki to wyniki pomiarów siły zrywania (nazywane w pracy siłami zrywu albo wręcz zrywem!), gdzie pomiary te przeprowadzono tym razem dla 25 złączy każdego rodzaju. Dodatkowo przeprowadzono 5 serii pomiaru siły zrywania w zależności „wysokości zacisku”, co rozumiem jako wymiar zaciśniętego złącza. Szkoda, że po pierwsze nie pokazano tej wielkości na jakimś rysunku czy fotografii, po drugie że nie podano informacji, co oznaczają poszczególne serie w tabeli 4.5.10 oznaczone jako kolejne 1 [N], aż do 5 [N] (może są to przewody z różnym pokryciem podobnie jak w poprzednich próbach?). W tym przypadku pomiar wykonano dla 16 różnych wysokości zacisku od 0,9 mm do 1,06 mm. Wyników nie skomentowano ilościowo, a tylko jakościowo (przypisując 0 w przypadku sił mniejszych od 40 N, co miało miejsce dla styków o wysokości powyżej 1,06 mm i wartość 1 dla sił powyżej 40 N, co jest zgodne z tabelą 2.5.1 – s. 64). Dodatkowy wykres pokazujący tę zależność

byłby na pewno interesujący. Moim zdaniem cenne byłoby także pokazanie narzędzia służącego do zaciskania.

Wyniki testu 100 cykli montażu przedstawiono w całości w załączniku, a w głównej części pracy pokazano tylko tabelę z końcowymi wynikami dla pięciu wariantów materiałowych. Kryterium zaliczenia wg Tabeli 4.2.2 to siła łączenia nieprzekraczająca 10 N i siła rozłączania nieprzekraczająca 15 N (jak wspomniałem nie podano podstawy przyjęcia takich wartości). Nie wyjaśniono, co oznacza trzecia kolumna tabeli opisana jako „U(Force)”. Wszystkie typy złączy spełniają warunek średniej siły demontażu natomiast tylko złącze bez powłoki spełnia warunek dotyczący siły montażu. Według mojej oceny przy przenoszeniu wartości z załącznika popełniono błędy, bądź opis nie wskazuje, co uznawano jako wynik testu. Na przykład dla powłoki złota w tabeli 4.5.6 podano wartość siły łączenia i rozłączania (średnie?), jako odpowiednio 18,05 N i 13,07 N, podczas gdy w tabeli 7.3.2 (w załączniku), bez liczenia widać wyraźnie, że siły te przekraczają odpowiednio 33 N, a siła demontażu w każdym przypadku przekracza 43 N, co powinno było zdyskwalifikować to złącze. Wydaje się, że podobne rozbieżności występują też przy wynikach dla innych materiałów. Kryterium wzrostu rezystancji też prawdopodobnie zostało ocenione nieprawidłowo w przypadku złącza bez powłoki, gdyż w tabeli 7.3.7 w załączniku widać wyraźnie znaczny rozrzut wyników, a obliczona średnia wynosi 11,88 mΩ i przekracza wartość graniczną 10 mΩ.

W dalszej części opisano wymieniony w tytule pracy algorytm oceny złączy, który jest właściwie wyznaczeniem sumy ważonej z wyników oceny trzech cech złączy, wybranych na podstawie literatury jako najistotniejsze. Są to odporność na starzenie w trudnych warunkach środowiskowych i na zmienność temperatury w szerokim przedziale, odporność na wielokrotne łączenie i wytrzymałość mechaniczna zaciskowego połączenia kabli z elementami złącza. Autorka przewiduje dla różnych zastosowań różne wagi przypisywane do oceny poszczególnych cech. Wagi te przyjęto arbitralnie, z lakonicznym uzasadnieniem ich wartości. Również w sposób arbitralny, bo nie przywołano żadnego źródła, przyjęto granice akceptacji w dwóch wariantach – w zależności od zastosowania „krytyczne”, „ogólnego zastosowania” i „mniej istotne” z granicami odpowiednio 0,7, 0,6 i 0,5. Drugi wariant z kolei wskazuje na trzy poziomy klasyfikacji „pełna”, „warunkowa” i „brak kwalifikacji” z granicami przedziałów odpowiednio 0,75 i 0,5. Wyniki testów składowych normalizuje się „binarnie” przypisując 1 gdy test wypadł pozytywnie i 0, gdy wynik testu był negatywny (choć na s. 105 pada stwierdzenie że „każdy składnik musi być znormalizowany do zakresu [0, 1]” – rozumiem że to jest nieprecyzyjne stwierdzenie, gdyż zaraz poniżej wyjaśniono, że 0 odpowiada niespełnieniu kryterium a 1 spełnieniu. Z „trzeciej strony” z tabeli na Rys. 4.5.2 na s. 122 wynika, że jednak siła zerwania jest w niektórych przypadkach normalizowana liniowo do przedziału $<1; 0>$ - jak jest naprawdę i w których przypadkach nie wiem.....). Analiza doboru wag skłania do wniosku, że wg Autorki, aby złącze zostało zaklasyfikowane jako dobre według wariantu pierwszego musi zdać najważniejszy dla danej aplikacji test i dodatkowo drugi, pod względem istotności. Pozytywna ocena dwóch mniej ważnych czynników nie wystarczy do pozytywnej oceny kompleksowej. Jedynie dla złączy ogólnego przeznaczenia wagi dla wszystkich trzech ocen są jednakowe, co właściwie powoduje, że wystarczy spełnienie dwóch dowolnych warunków żeby złącze zakwalifikować jako dobre w warunkach ogólnego zastosowania, ale nie w aplikacjach krytycznych. Wszystko to jest logiczne, chociaż niepoparte moim zdaniem głębszymi badaniami, czy analizą większej liczby praktycznych przypadków. Poza taką oceną zastosowano jeszcze dodatkową ocenę na podstawie pokazanych w pracy mikroskopowych obrazów przekroju złącza, gdzie na podstawie analizy zagniecenia poszczególnych żył zdyskwalifikowano jedno ze złączy. Autorka na s. 122 przeprowadza analizę przyjętych wag dla złączy o różnych wysokościach zagniecenia (w jakim wariacie materiałowym?) pokazując wpływ przyjętych wag i wartości ocen na ocenę kompleksową.

W podsumowaniu i wnioskach pada wiele bardzo górnolotnych stwierdzeń o „absolutnie kluczowych elementach”, „nowatorskim algorytmie”, który „stanowi przełom”, itp. Na takie stwierdzenia oczywiście nie ma miejsca w pracach o charakterze naukowym, tym bardziej, że są one w pewnej sprzeczności ze stwierdzeniami z podsumowania rozdziału teoretycznego. Po drugie, wydaje się, że podobny byłby wynik oceny złączy gdyby po prostu przyjąć, że konieczne jest pozytywny wynik testów dotyczących dwóch z trzech kryteriów oceny. Jeszcze ważniejsze jest jednak to, że nie jest jasne jak opracowany algorytm miałby być stosowany w praktyce, zwłaszcza wobec stwierdzenia, że „potencjał wdrożeniowy... otwiera perspektywę praktycznego zastosowania w kontroli jakości, diagnostyce predykcyjnej oraz automatyzacji procesów oceny komponentów”.

Przecież wszystkie z przeprowadzonych badań były badaniami o charakterze niszczącym, po drugie były to badania bardzo długotrwałe – jak w automatycznym systemie oceny jakości miałyby być pobierane próbki produkcyjne, w jakiej ilości, jak podejmowane powinny być decyzje? W części literaturowej ten temat nie został w ogóle poruszony.

Na koniec Autorka przeprowadza dyskusję na temat **Ograniczenia i możliwości dalszego rozwoju** jest to cenna dyskusja, bo pokazuje świadomość Autorki na temat ograniczeń zaproponowanej metodyki, odmienną od hurraoptymistycznego wydźwięku cytowanych powyżej fragmentów z podsumowania, wskazując między innymi na celowość opracowania innych metod szybkiej kwalifikacji bez konieczności wykonywania badań niszczących, wskazano też na potencjalną celowość dodania kryterium oceny obrazu przekroju złącza. Co ważne też (dopiero) na tym etapie Autorka zasugerowała, że celowa dla obiektywniejszej oceny opracowanego algorytmu, byłyby porównawcze badania, gdzie wyniki algorytmu zestawiono by z ocenami ekspertów lub innymi konwencjonalnymi metodami oceny.

4. Wybrane uwagi szczegółowe

Praca zawiera liczne nieprawidłowości o charakterze formalnym i stylistycznym, a także niekonsekwencje i niespójne informacje w różnych częściach pracy. Poniżej omawiam tylko wybrane usterki, na życzenie Autorki mogę przekazać wydruk pracy z moimi odręcznymi komentarzami.

Spis skrótów sporządzony jest w losowej kolejności, zamiast kolejności alfabetycznej.

W **Rozdziale 2** Autorka użyła niepoprawnie zwrotów z zakresu inżynierii mechanicznej (s. 19). Pierwszym jest „ciśnienie (jednostkowe)”, zamiast „nacisk (powierzchniowy)”, drugim „wytrzymałość materiału na odkształcenia” prawdopodobnie zamiast „granica plastyczności”.

s. 22 - podano zacytowany wg literatury (materiały konferencyjne IEEE z 1997) dwuczęściowy wzór na opór przejścia, który jest całkowicie niezrozumiały - wg niego opór przejścia jest iloczynem siły i dwóch współczynników, które dalej podawane są jako współczynniki niemianowane. W pierwszej części wzoru (po pierwszym znaku równości) z kolei opór jest równy iloczynowi siły pomnożonej przez jeden współczynnik i OPORU pomnożonego przez drugi współczynnik. Jak zatem i w jakich jednostkach opisany jest opór elektryczny?

s. 23 - po raz pierwszy autorka zastosowała zupełnie nietypowy sposób przywoływania pozycji źródłowych, a mianowicie podając pełny tytuł artykułu w tłumaczeniu na język polski i imię i nazwisko jego autora, podczas kiedy wystarczyłby sam nawias kwadratowy z odpowiednim numerem (ten sposób powtarza się jeszcze kilkakrotnie, chociaż nie jako reguła).

s. 23 natknąłem się także na niespójność: w jednym miejscu podano informację, że przewodności elektryczne tlenków srebra i czystego srebra są zbliżone (s. 23), a w innym, charakteryzując srebro jako przewodnik (s. 44), autorka pisze, że: „...jego (srebra) podatność na utlenianie i tworzenie siarczków może powodować wzrost oporu stykowego w miarę upływu czasu.” Które z tych stwierdzeń jest prawdziwe?

Lektura rozdziału literaturowego, w kontekście trudnego do weryfikacji spisu literatury, rodzi też niepokój co do sposobu wykorzystania źródeł, ponieważ długie fragmenty składające się z kilku następujących po sobie akapitów wykorzystują jedno źródło literaturowe (tak jest np. na s. 28-29 – 5 akapitów, na s. 32-35 - 10 akapitów, s. 35-37 – 6 akapitów, s. 40-41 - 4 akapity, s. 66-67 – 7 akapitów). Rodzi to podejrzenie, że znacząca część przeglądu literatury powstała w oparciu o kilka zaledwie pozycji wykorzystując ich spore części.

s. 25-27 – na tych stronach występuje trudno wytłumaczalne dosłowne powtórzenie (skopiowanie) trzech akapitów w sąsiednich rozdziałach, na s. 25 i 26-27. Co ciekawe, w każdym z pary powtórzonych akapitów przywołano inne pozycje literaturowe, moim zdaniem również to dowodzi bardzo niefrasobliwego traktowania źródeł literaturowych. Sposób korzystania ze źródeł powinien być na tym etapie pracy naukowej (na dalszych oczywiście też) nienaganny i na pewno jest przedmiotem oceny w aspekcie umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

s. 31 – „pleksi” to nazwa potoczna, należałoby użyć prawidłowej nazwy tego tworzywa PMM lub polimetakrylan metylu.

s. 32 – prawo tarcia przywołane przez Autorkę to prawo Amontosa (-Coulomba) a nie prawo Amontona

s. 32 – zupełnie niezrozumiały żargon (?): „odpowiednia kontrola struktury powierzchni może umożliwiać lepsze zarządzanie tarciami w aplikacjach inżynierskich” , podobnie dalej (s. 34) „odpowiednie zarządzanie siłami tarcia” - co to znaczy?

s. 32 odpis pod Rys. 2.3.1 – Wymuszone działanie pomiędzy stykającymi się chropowatościami – co to znaczy

s. 34 – wiązanie złączy M12 (tj. z gwintem M12x1) z systemami MEMS jest nieporozumieniem.

s. 36 – pisząc najpierw o warstwach izolujących złożonych z tlenków, dalej Autorka używa (jako synonim?) zwrotu „folie izolacyjne” – to na pewno nie jest to samo.

s. 37 – „(mikromechaniczne przemieszczenia) ... mogą powodować powstawanie zanieczyszczeń” – to nie są zanieczyszczenia tylko produkty zużycia

s. 37 – ostatniego paragrafu zupełnie nie rozumiem

s. 38 – opis eksperymentu nie jest jasny – jeżeli okrągła próbka jest wprawiona w ruch obrotowy, co sugeruje „okrągła” strzałka, a nie oscylacyjny o małej amplitudzie to nie mamy do czynienia z frettingiem. Zupełnie niezrozumiały jest dla mnie p. 3 podsumowania tego opisu.

s. 42. Tabela 2.3.1 nie powinna być słabej jakości skanem z angielskimi opisami, a zrobioną w edytorze tabelą z polskimi opisami. Identyczna uwaga dotyczy wielu innych tabel i rysunków (np. Rys. 2.3.2 i dalej Rys. 2.3.3 – 2.3.9, Rys. 4.3.2).

s. 42-44 – wydaje mi się, że Autorka nieprawidłowo używa słowa tekstura, w języku polskim jest to słowo odnoszące się do powierzchni danego materiału, a nie do jego budowy wewnętrznej.

s. 47 – w języku polskim stosowanym przez naukowców z dziedziny tribologii przyjęła się (po długich sporach) wersja przez „i” a nie „trybologia”, chociaż rzeczywiście słowniki języka polskiego dopuszczają obie wersje.

s. 49 i 50 – opis rysunku 2.3.3 nie odpowiada zawartości tego rysunku.

s. 50-51 – poszczególne części rysunku 2.3.4 tj. a, b, c i d nie zostały opisane w odpowiednio szczegółowy sposób.

s. 53-56 - rysunki są bardzo słabej jakości i brak im opisów w języku polskim. Wydaje się, że opis odnoszący się do rys. 2.3.8 w rzeczywistości dotyczy rys. 2.3.9.

s. 64 i 65 - w Tabeli 2.5.1 dla zastosowanego w badaniach przewodu o przekroju $0,34 \text{ mm}^2$ podano siłę zrywania równą 40 N (właściwie dla $0,32 \text{ mm}^2$), w sąsiadującym opisie mowa o „kilkunastu niutonach” (s. 65). Z kolei w miejscu opisu warunków badań (s. 86) dla przewodu o przekroju $0,5 \text{ mm}^2$ podano 80-

100 N, a dla przewodu o przekroju 1 mm² 120-150 N, podczas gdy wg tabeli ze s.64 powinny one wynosić odpowiednio 60 i 108 N).

s. 71 – „aplikator” to chyba niedobra nazwa na narzędzie do zaciskania styków. Swoją drogą bardzo brakuje w pracy pokazania i omówienia zasady działania takiego narzędzia.

s. 71 – w trzecim akapicie opisany wyniki badań przemysłowych prowadzonych przez Phoenix Contact, przywołując pozycję pt „White Paper on jednak żadna z wymienionych na końcu akapitu pozycji nie wskazuje na tę pozycję i żadna nie odnosi się do materiałów firmy Phoenix Cables.

W poprzednim rozdziale szczegółowo odniosłem się do rozdziału 3 **Cel, zakres i hipoteza badawcza** i usterek tej części nie będę tu już przywoływał ponownie.

W rozdziale 4 **Część praktyczna** ..., zawierającym opis metodyki badań i ich wyniki Autorka również nie ustrzegła się wielu niedociągnięć, z których wybrane wymienię poniżej:

s. 74 – potencjalnemu czytelnikowi (z dyscypliny inżynieria mechaniczna!) wypadłoby wyjaśnić na czym polega czteroprzewodowa metoda Kelvina pomiaru rezystancji i czym różni się od podstawowego pomiaru

s. 75 i 77 – w różnych miejscach podane są różne czasy trwania testu HAST – 48 h – na s. 75, a 1000 h na s. 77 i w wielu innych miejscach. W ogóle w co najmniej kilkunastu miejscach, gdzie Autorka przywołuje test HAST zazwyczaj niepotrzebnie powtarzany jest bardzo podobnie sformułowany opis „85/85 + faza soak HAST” – zamiast tego po opisanii charakterystyki tego testu wystarczyłoby przypisać mu jakąś zastępczą krótką nazwę, np. właśnie „HAST” i czy „test starzenia” i dalej używać tylko tej nazwy.

s. 74 – pomiar rezystancji odbywa się „przy użyciu multimetru w konfiguracji czteroprzewodowej (rys. 4.1.5)” – ale ten rysunek (fotografia) pokazuje sam multimetr bez żadnych połączeń. W tym miejscu warto by umieścić schemat (rys. 4.2.1) i objaśnić na czym polega ta metoda.

s. 81 – pierwszy akapit – wielokrotnie niepotrzebnie po przywołaniu nazwy złącza M12 powtarzana jest bardzo podobna formułka opisująca trudne warunki eksploatacji złączy „w sposób dynamiczny, często w obecności drgań, zmian temperatury, naprężeń mechanicznych czy środowisk korozyjnych”. Rozumiem, jeżeli napisano to nawet szerzej we wprowadzeniu, lub rozdziale teoretycznym, ale powtarzanie tych informacji prawie za każdym razem kiedy wymieniana jest nazwa M12 jest irytujące.

s. 82 – uszkodzenia mogą być „mikroskopijne” ale nie „mikroskopowe”; nie objaśniono pojęcia „kąta wprowadzenia” w kontekście łączenia złączy

s. 82 – w ostatnim akapicie opisano testy łączenia i rozłączania przywołując fotografie z pokazujące pomiar oporu, a przecież łączenie i rozłączanie odbywa się w maszynie Zwick/Roel.

s. 89 – „krimpowanie” koniecznie trzeba objaśnić jeżeli różni się od zaciskania przewodu, a jeżeli nie to takie pojęcie nie powinno być używane.

s. 90 - opis testu temperaturowego wskazuje na zakres temperatury (-40°C +80 °C), podano też całkowity czas 500 h, z podziałem na 5 cykli, ale kompletnie nie wiadomo ile cykli wzrostu/spadku temperatury realizowano, jaka była prędkość nagrzewania/stabilizacji/chłodzenia. Te ważne informacje zastąpiono zwrotem „profil temperaturowy zgodny z założeniami badawczymi” – rodzą się pytania: jakimi?, na jakiej podstawie przyjętymi?

s. 92 – Rys 4.4.1 na pewno nie pokazuje procesu podłączenia

s. 103 – moim zdaniem używanie pojęcia „zryw” jako synonimu „siły zrywania” jest nieprawidłowe Tak jak napisałem na wstępie tej części, takich mniejszych lub większych uchybień jest sporo i na życzenie Autorki mogę udostępnić rękopis z moimi odręcznymi notatkami.

We wcześniejszej części omówiłem podsumowanie – uwag tych nie będę tu uszczegóławiał.

Oczywistą wadą pracy jest sposób opisu **źródeł literaturowych**. W części 6. **Bibliografia** zamieszczono spis 130 wykorzystanych źródeł. Nie mam większych zastrzeżeń, co do wyboru literatury, jest ona różnorodna, zawiera stosunkowo aktualne pozycje zaczerpnięte z czasopism naukowych, pozycje klasyczne, podstawowe podręczniki i, co istotne w pracy o charakterze technicznym także cytowania norm i literatury firmowej. Jednak opisy bibliograficzne nie są sporządzone według żadnych znanych i przyjętych standardów. Mniejsza z tym, że imiona (lub inicjały imion) i nazwiska autorów podawane są niejednolicie, i że numery stron (jeżeli są – bo raczej jest to wyjątek) czasem mają skrót p. czasem pp., a czasem żadnego, czy brak nazwy wydawcy, kolejność cytowania jest też nieoczywista. Ważniejsze jest jednak to, że w większości przypadków brakuje kompletnej informacji pozwalających łatwo i jednoznacznie zidentyfikować źródło, na przykład żaden opis nie ma DOI, w wielu brakuje numerów tomów, nazw wydawcy, miejsca wydania, bliższych danych dotyczących konferencji, itp. Przywoływane strony internetowe nie zawierają w ogóle adresu internetowego strony, a tylko tytuł dokumentu i datę dostępu.

Przykład z wrywkowego sprawdzenia jednej z pozycji:

Pozycja [115] w pracy: Semeniuk V., Effect of Electrical Contact Resistance, J. Electron. Mater. (2019) Prawidłowe cytowanie (uzyskiwane „automatycznie” po kliknięciu znaczka “ ze strony z artykułem): Semenyuk, V. Effect of Electrical Contact Resistance on the Performance of Cascade Thermoelectric Coolers. *J. Electron. Mater.* **2018**, *48*, 1870–1876, <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6785-5>.

Błędy – błędna pisownia nazwiska, niepełny tytuł, brak DOI, brak numerów stron, nieprawidłowy rok. Ta usterka jest tym bardziej niepokojąca, że na nieprawidłowe cytowania źródeł literaturowych zwracała już uwagę komisja oceny śródkresowej, co można sprawdzić w ogólnodostępnym protokole z tej oceny.

Kolejna seria niedomówień i niejasnych opisów dotyczy załącznika w którym umieszczono szczegółowe wyniki.

s. 142-143 – zawiera zapewne listing procedury opracowanego algorytmu, ale nie jest to w żaden sposób objaśnione.

s. 144-163 – wyniki próby przyspieszonego starzenia i testy temperaturowe – główne zastrzeżenie dotyczy tego, że moim zdaniem nieprawidłowo przeniesione do głównej części

s. 164 i dalsze – oznaczenia próbek „br”, „ws”, „bl”, „sw” i „gr” nie zostały nigdzie objaśnione – kolory przewodów (?), ale jakie (?), nie zostały objaśnione również serie 1 aż do 5, nie wiadomo dlaczego liczba pomiarów jest inna niż dla prób przyspieszonego starzenia.

5. Podsumowanie

Przedstawiona praca doktorska tylko w części może być przypisana do inżynierii mechanicznej – w inżynierii mechanicznej mieszczą się testy siły zrywania, na pewno także próby wielokrotnego łączenia i rozłączania, ale już wpływ warunków środowiska na powstawanie powłok siarczków i tlenków dotyczy inżynierii materiałowej, a badania oporu elektrycznego w kontakcie przewodu i styków należy do elektrotechniki mieszczącej się wg aktualnej klasyfikacji w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W ocenianej rozprawie doktorskiej ogólna wiedza teoretyczna z zakresu inżynierii mechanicznej zaprezentowana została z wieloma mankamentami dotyczącymi błędów w stosowanej terminologii, nieprawidłowej klasyfikacji i oceny mechanizmów zużywania. Pomimo deklarowanej potencjalnej możliwości wykorzystania opracowanego algorytmu do zautomatyzowanych systemów oceny jakości brakuje też próby odniesienia się do zagadnień kontroli jakości w procesie produkcyjnym, co byłoby dodatkowym elementem wiążącym pracę z dyscypliną inżynieria mechaniczna.

Chciałbym podkreślić, że niewątpliwym plusem ocenianej rozprawy jest fakt przeprowadzenia obszernych badań doświadczalnych, co oceniam z reguły wyżej niż prace oparte na samych symulacjach komputerowych i rozważaniach teoretycznych, których obecnie jest bardzo dużo. Tylko eksperymentator wie ile pozornie łatwych przeszkód trzeba pokonać, aby doprowadzić eksperymenty do końca. Jednak nieodzownym elementem prowadzenia badań jest ich opisywanie. Ten element w ocenianej pracy jest na niezadowalającym poziomie – występują liczne niejasności, sprzeczności i niedopowiedzenia. Sposób napisania pracy wskazuje też na braki Autorki w zakresie podstawowego warsztatu badacza – opisywania źródeł, przywoływania tych źródeł, opisu ilustracji, sporządzania i opisywania wykresów, itp. Dodatkowo uważam, że nakreślone cele pracy nie zostały w pełni osiągnięte, a sformułowana hipoteza nie została udowodniona.

6. Wniosek końcowy

Autorka dokonała przeglądu stanu wiedzy i przeprowadziła badania, ale w rozprawie doktorskiej, tak wnioski z przeglądu literatury, jak i metodyka i wyniki badań opisane zostały w sposób niezadowalający i dlatego wnioskuję o skierowanie pracy do gruntownej poprawy, gdyż **w obecnej formie według mnie nie spełnia ona jeszcze wymogów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce**. Uważam jednak, że uzyskane wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych mogą po ich ponownym opracowaniu i opisanu stanowić podstawę rozprawy doktorskiej spełniającej ustawowe wymagania.