

Dr inż. Sławomir Kowalski

Instytut Techniczny
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu
ul. Zamenhofa 1a, 33-300 Nowy Sącz, Poland
E-mail: skowalski@pwsz-ns.edu.pl

Wpływ wybranych powłok PVD na zużycie frettingowe w połączeniu wtlaczanym na przykładzie modelu zestawu kołowego pojazdu szynowego

Słowa kluczowe: połączenie wtlaczane, zużycie frettingowe, powłoki PVD

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych dotyczące wpływu zastosowania wybranych powłok PVD na inicjację i rozwój zużycia frettingowego w połączeniach wtlaczanych. Na wały nałożono powłoki TiN a także CrN+a-C:H:W, wyniki badań zużyciowych porównano z wynikami badań wałów bez powłok. Badania zużyciowe wykonywano na stanowisku badawczym, które symulowało warunki pracy zestawów kołowych pojazdów szynowych poruszających się po torze prostym. Montaż elementów próbki przeznaczonej do badań wykonano przez wtłoczenie tulei na wał z wartością wcisku 0,02mm.

W celu oceny zjawiska frettingu dla badanych warstw wierzchnich wałów wykonano obserwacje makroskopowe, mikroskopowe przy użyciu mikroskopu skaningowego, mikroanalizę rentgenowską składu chemicznego metodą EDS oraz pomiar topografii warstwy wierzchniej w miejscu zużycia. Zaprezentowane wyniki badań dotyczą warstwy wierzchniej wałów, ponieważ to ona w głównej mierze determinują trwałość połączenia wtlaczanego. Zaprezentowano również wyniki obserwacji makroskopowych warstwy wierzchniej piasty tulei, w celu porównania obrazu zużycia pomiędzy współpracującymi powierzchniami.

Wyniki obserwacji poszczególnych warstw wierzchnich wałów wskazują na ograniczenie rozwoju zużycia frettingowego w przypadku wałów z zastosowanymi powłokami, przy czym powłoki CrN+a-C:H:W korzystniej wpływają na zmniejszenie zużycia frettingowego. Głównym uszkodzeniem składającym się na zjawisko frettingu we wszystkich badanych próbkach są nalepienia materiału, powstałe w wyniku zjawiska adhezji. W czasie eksploatacji nalepienia te ulegają utlenianiu. Lokalnie obserwuje się mikrowżery i mikrowytarcia warstwy wierzchniej.

1. Wstęp

Połączenia wtlaczane należą do jednych z najczęściej wykorzystywanych metod łączenia elementów. Związane jest to prostotą wykonania montażu a tym samym niskimi kosztami procesu. Możliwość przenoszenia stosunkowo dużych obciążeń sprawia, że połączenia wtlaczane łączą elementy pracujące w różnych, nieraz ciężkich, warunkach eksploatacyjnych.

Zestaw kołowy pojazdów szynowych jest jednym z przykładów, w którym elementy łączy się poprzez wtlaczanie. Proces montażu odbywa się na prasie wyposażonej w rejestrator wartości siły, chroniąc tym samym połączenie przed niepożądanymi uszkodzeniami. Zestawy kołowe należą do najważniejszych elementów pojazdów szynowych. Wpływają bezpośrednio na bezpieczeństwo podróży. Jakikolwiek uszkodzenia powstałe podczas eksploatacji mogą być przyczyną katastrofy kolejowej, dlatego też należy stosować odpowiednie metody zmniejszające ryzyko wystąpienia uszkodzeń.

Skuteczne wyeliminowanie uszkodzeń i zużyć zestawów kołowych nie należy do łatwych zadań, ze względu na ich specyficzne warunki pracy. Na zestawy kołowe działają siły

statyczne wynikające z obciążenia pionowego zależnego od ciężaru pojazdu oraz siły dynamiczne na styku koło-szyna wynikające z toczenia się zestawu po torze. Siły pionowe powodować będą ugięcie osi, w związku z tym podczas eksploatacji, w wyniku działania sił dynamicznych, powstawać będą oscylacyjne przemieszczenia styczne pomiędzy współpracującymi powierzchniami. Takie warunki pracy powodują uszkodzenia nie tylko powierzchni toczonej kół czy szyn, ale również uszkodzenia w strefie połączenia wtlaczanego koło-oś. Do najczęściej spotykanych zużyć i uszkodzeń można zaliczyć: uszkodzenia osi o charakterze adhezyjnym, przesunięcie kół jezdnych względem osi, zużycie frettingowe i zużycia zmęczeniowe osi prowadzące do powstawania pęknięć. W niniejszym artykule skupiono się na zużyciu frettingowym, ponieważ mechanizm jego rozwoju nie został jeszcze całkowicie poznany.

Zużycie frettingowe zaliczane jest do zużyć tribologicznych, a warunkiem koniecznym do jego rozwoju są oscylacyjne mikroprzemieszczenia współpracujących elementów, według niektórych autorów o amplitudzie rzędu 25-150 μm . Ze względu na złożoność zjawisk fizykochemicznych, jakie towarzyszą zużyciu frettingowemu nie podano jednoznacznej definicji dla tego pojęcia. Obrazem zużycia frettingowego mogą być ślady korozji na powierzchni elementów, wzrost chropowatości powierzchni, mikropęknięcia i wżery.

Na rozwój zużycia frettingowego wpływa wiele różnych czynników, jednak ze względu na złożoność zjawiska i nie do końca zbadany mechanizm rozwoju trudno jest określić dokładną liczbę. Autor pracy [5] dokonał tabelarycznego zestawienia najczęstszych czynników wpływających na rozwój zużycia frettingowego. Wskazał m. in. na twardość i chropowatość powierzchni, liczbę cykli oraz temperaturę i wilgotność powietrza. Wpływ chropowatości na rozwój zużycia frettingowego badali m. in. autorzy [15]. Zaproponowali wielkoskalową procedurę badania efektu chropowatości przy użyciu metody elementów skończonych. W pracy [3] badano wpływ chropowatości powierzchni na rozwój korozji i zużycie frettingowego czystego tytanu, z którego produkuje się implanty medyczne. Autorzy pracy [10] stwierdzają, że początkowa topografia warstwy wierzchniej ma znaczący wpływ na rozwój oraz intensywność zużycia frettingowego. Badania prowadzono dla kilku wartości amplitudy poślizgu. Wpływ temperatury na zużycie frettingowe badany był m.in. przez autorów prac [8, 13].

Z przeglądu literatury wynika, że większość badań nad zużyciem frettingowym dotyczy elementów dociskanych do siebie siłą normalną, a niewielu autorów podejmowało badania w kierunku rozwoju zjawiska frettingu w połączeniach wciskowych. Tym czasem połączenie to kumuluje w sobie wszystkie czynniki niezbędne do jego rozwoju. Istnieje stały, określony docisk połączonych powierzchni elementów oraz występują przemieszczenia względne tych powierzchni. Dzieje się tak w przypadku obciążenia jednego z elementów zmienną siłą styczną lub gdy połączenie pracuje w warunkach obrotowego zginania lub skręcania zmiennym momentem [5]. Prawdopodobną przyczyną małej liczby badań zużycia w połączeniach wtlaczanych jest problem demontażu połączenia. Tradycyjne stłoczenie jednego elementu z drugiego może uszkodzić strefę występowania zużycia frettingowego i tym samym zniekształcić obraz zużycia. W związku z tym należałoby opracować odpowiedni proces technologiczny, pozwalający bezpiecznie zdemontować połączenie. W przypadku zestawów kołowych pojazdów szynowych taki proces wiąże się z dużymi kosztami, ponieważ wymiary zestawów kołowych wymagają stworzenia odpowiedniego stanowiska badawczego oraz odpowiednio długiego czasu demontażu.

Wśród prac dotyczących badania zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym na przykładzie zestawów kołowych pojazdów szynowych można wskazać m.in. pracę badawczą [6], w której autor badał wpływ sposobu wykonania połączenia (połączenie wtlaczone, skurczowe), wartość wcisku oraz chropowatość powierzchni elementów przed wykonaniem

połączenia na rozwój i intensywność zużycia frettingowego. Autorzy pracy [17] przeprowadzili analizę uszkodzeń osi w miejscu połączenia z kołem. Wykazali, że na zjawisko frettingu składają się zużycie ściernie, zużycie utleniające i rozwarstwienia. Badania autorów pracy [19] wykazały, że intensywność zużycia frettingowego silnie zależy od obciążeń normalnych i amplitudy poślizgu. Również w tym przypadku zjawisko frettingu jest połączeniem zużycia ściernego, zużycia korozyjnego i rozwarstwiania z wyraźnym zdeformowaniem plastycznym. Na uwagę zasługuje również praca [14], która dotyczy procesów zużycia i sposób ich redukcji w połączeniach obrotowych. Jako przykład takiego połączenia wskazuje zestaw kołowy pojazdów szynowych z samoczynną zmianą rozstawu kół. Mimo iż praca nie dotyczy badań zużycia w połączeniach włączanych, to mechanizm rozwoju zużycia frettingowego w analizowanym połączeniu jest bardzo podobny. Autor proponuje wybrane procesy technologiczne w celu ograniczenia zużycia frettingowego. Z przytoczonych wyników badań wynika, że tylko powłoki molibdenowe skutecznie redukują zjawisko frettingu.

Zacytowane prace dotyczyły głównie określenia miejsca i zasięgu rozwoju zużycia frettingowego, a także wskazanie rodzajów zużyć składających się na zjawisko frettingu. Nie prowadzono natomiast badań nad próbą wyeliminowania zużycia. W tej kwestii można wskazać prace [7] i [9]. W pierwszej pracy autorzy analizowali wpływ obróbki powierzchniowo-wzmacniającej (ulepszanie cieplne, śrutowanie, azotowanie, hartowanie powierzchniowe) na wytrzymałość zmęczeniową próbek z karbem technologicznym. Badania nie dotyczyły bezpośrednio wpływu wymienionych technologii na rozwój zużycia frettingowego. Druga praca dotyczyła wpływu wybranych procesów technologicznych w wykończeniu warstwy wierzchniej wału, takich jak: azotowanie, rolkowanie, hartowanie powierzchniowe na rozwój zużycia frettingowego w połączeniach włączanych. Wyniki badań wskazały niewielki wpływ procesów technologicznych na ograniczenie zużycia frettingowego. Z przeglądu literatury wynika, że nie prowadzono badań nad zastosowaniem powłok PVD w celu ograniczenia zużycia frettingowego. Dlatego też w niniejszym artykule przeprowadzono takie badania dla połączenia włączanego wał-tuleja, w którym wał pokryto powłokami TiN oraz CrN+a-C:H:W.

Początkowo powłoki PVD wykorzystywano w celu zwiększenia trwałości narzędzi skrawających. Już wówczas zauważono pozytywne właściwości tribologiczne tych powłok. Z czasem zakres stosowania powłok poszerzał się, a obecnie coraz powszechniej wykorzystuje się je do ochrony przed zużyciem tribologicznym. Powłoki PVD charakteryzują się dużą twardością, odpornością na zużycie i korozję oraz posiadają dobre właściwości zmęczeniowe. W literaturze można znaleźć szereg prac potwierdzających wspomniane właściwości. Dla przykładu można wskazać pracę [11], w której Autorka badała właściwości tribologiczne powłok a-C:H:W z międzywarstwami TiN i CrN. Wyniki badań potwierdziły poprawę właściwości tribologicznych elementów, na które nałożono powłoki. Celem badań zaprezentowanych w pracy [2] było określenie mechanizmów uszkodzeń powstających na stali nierdzewnej służącej do produkcji urządzeń wyciskających olej z oliwek oraz ocena właściwości powłok TiN wpływających na ograniczenie tych mechanizmów. Wyniki badań wykazały doskonałą odporność powłok na ścieranie. W pracy [1] badano powłoki a-C:H:W nałożone na stalowe podłoże. Również w tym przypadku wyniki badań wykazały dobre właściwości tribologiczne powłok. Kolejne prace [4, 12, 16, 18] dotyczące badań właściwości powłok wielowarstwowych a-C:H:W i powłok WC/C również potwierdzają zmniejszenie zużycia elementów, na które nałożono powłoki niskotarciowe.

2. Właściwości warstwy wierzchniej wałów poddanych badaniom

Program badań zakładał ocenę zużycia frettingowego w połączeniu wtlaczanym, w którym na wały nałożono wybrane powłoki PVD.

W ramach badań wykorzystano następujące warianty wykończenia warstwy wierzchniej wałów:

- wał z warstwą wierzchnią bez powłok – (próbki numer: S_02),
- wał z warstwą wierzchnią powlekaną powłoką z azotku tytanu (TiN) – (próbki numer: S_06),
- wał z warstwą wierzchnią, na którą nałożono powłokę niskotarciową (CrN+a-C:H:W) – (próbki numer: S_14).

W tabeli 1 zestawiono podstawowe właściwości powłok wykorzystywanych w dalszych badaniach.

Tabela 1



Właściwości powłok według danych katalogowych Oerlikon Balzers

Właściwości	Powłoka	
	TiN	CrN+a-C:H:W
Skład powłoki	TiN	CrN+a-C:H:W
Mikrotwardość [HV _{0,05}]	2300	1500
Współczynnik tarcia o stal na sucho μ	0,4	0,1-0,2
Grubość powłoki [μm]	1-4	1-2
Temperatura powlekania [°C]	180-500	180-350
Szczałkowe naprężenia ściskające [GPa]	-2,5	-1
Kolor	złoty	antracytowy

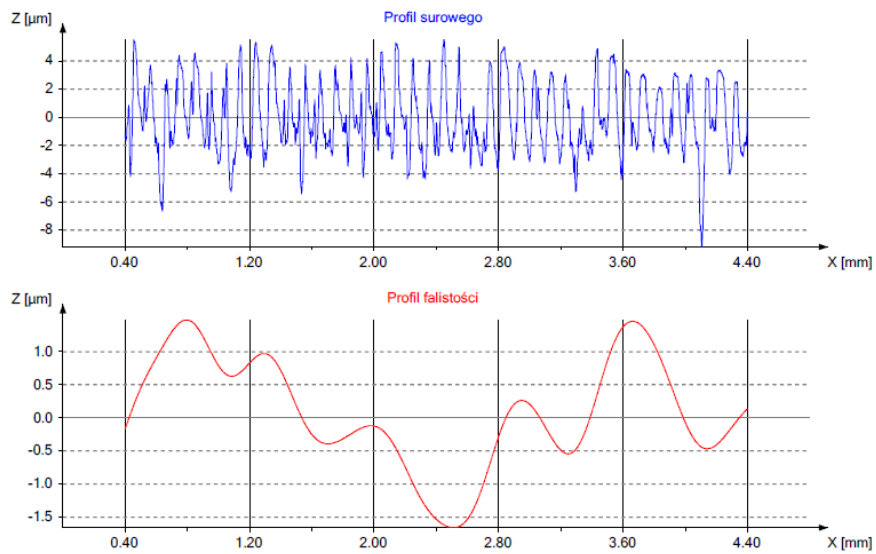
W przypadku badania zużycia frettingowego w połączeniach wtlaczanych ważną rolę na jego rozwój odgrywa chropowatość oraz twardość wyjściowa warstwy wierzchniej współpracujących elementów. Na rys. 1 przedstawiono wykresy profili chropowatości i falistości warstwy wierzchniej wałów w funkcji długości, a w tabeli 2 zestawiono wartości parametrów chropowatości.

Tabela 2

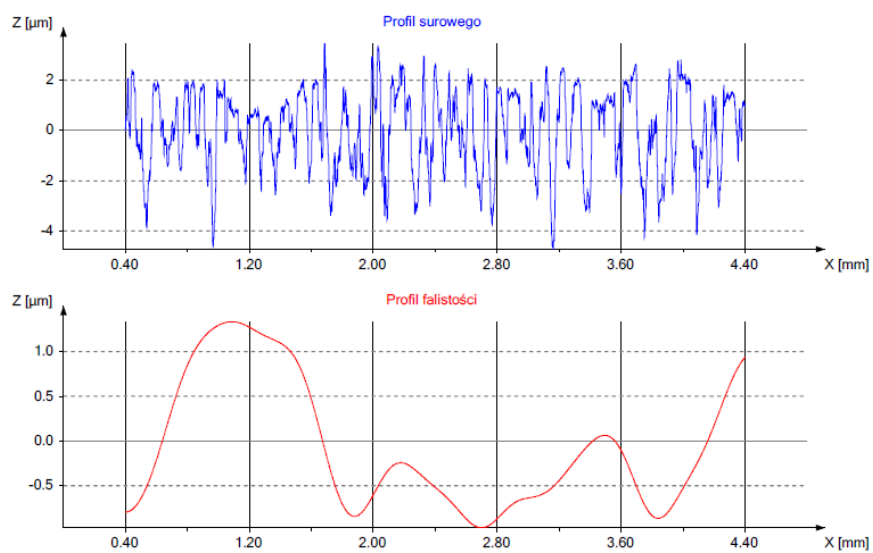
Wyniki pomiaru parametrów chropowatości warstwy wierzchniej

Parametr chropowatości	Wartość zmierzona [μm]			
	wał bez powłoki	wał z powłoką TiN	wał z powłoką CrN+a-C:H:W	tuleja
				
Ra	1,16	1,34	1,68	2,78
Rz	6,25	7,09	11,57	14,55

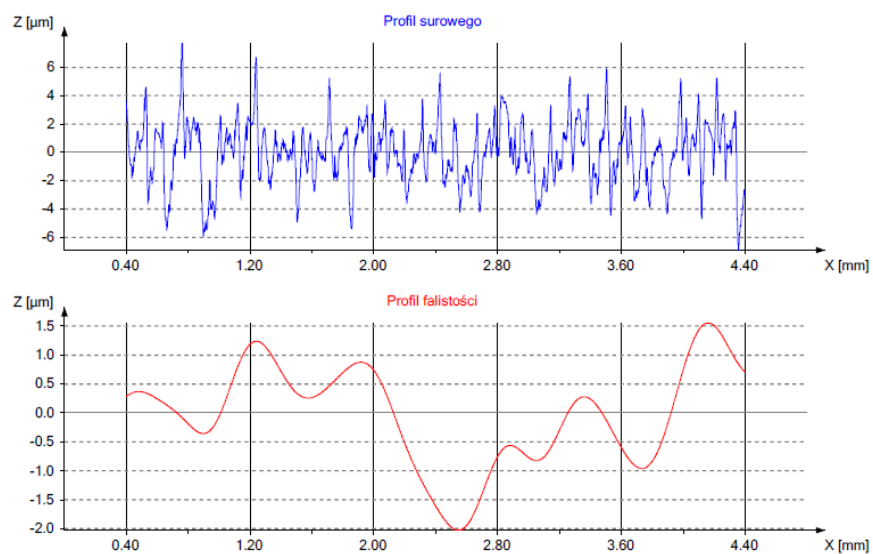
a



b



c



Rys. 1. Wykres profilu chropowatości i falistości a) wału bez powłoki, b) z powłoką TiN, c) z powłoką CrN+a-C:H:W

Z tabeli 2 oraz rys. 1 wynika, że warstwa wierzchnia wałów z powłoką posiada większe parametry chropowatości w stosunku do powierzchni wałów bez powłoki. Związane jest budową powłok, która charakteryzuje się porowatością. Pory te są naturalnym wynikiem procesu technologicznego nakładania powłok. Są to wgłębienia w powłoce w postaci wąskich kanalików, wypełnione substancjami niestanowiącymi powłokę. Substancjami tymi mogą być powietrze lub inne gazy. Niekiedy spotyka się różne ciecze bądź ciała stałe.

3. Metodyka badań

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzona została analiza możliwości zastosowania powłok TiN oraz CrN+a-C:H:W, stosowanych powszechnie, jako zabezpieczenie narzędzi tnących i tłoczących, w celu ograniczenia rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wtłaczanym.

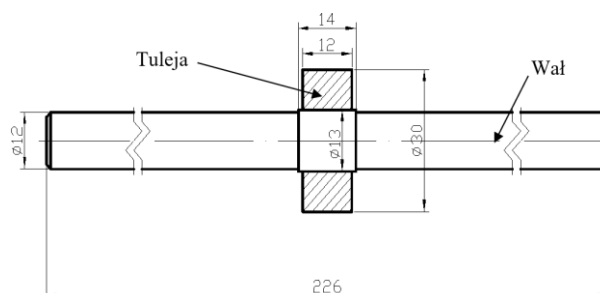
Badania doświadczalne dotyczyły:

- określenia rzeczywistego stanu warstwy wierzchniej współpracujących elementów po badaniach zużyciowych,
- określenia wpływu powłok na rozwój i intensywność zużycia frettingowego.

Typując stanowisko do badań zużyciowych oraz próbki założono, że badania mają symulować warunki pracy zestawu kołowego pojazdu szynowego. W tym celu dobrano odpowiednią maszynę zmęczeniową oraz zachowano podobieństwo wymiarowe w miejscu łączenia elementów próbki.

Próbka przeznaczona do badań składała się z tulei, której warstwa wierzchnia piasty charakteryzowała się twardością 160 HB oraz wału o twardości warstwy wierzchniej 170 HB. Montaż połączenia odbywał się poprzez wtłaczanie tulei na wał przy wartości wcisku zapewniającej trwałość połączenia.

Wymiary próbki przedstawiono na rys. 2. Długość i średnica wału uzależnione były od wymiarów stanowiska badawczego. Zachowano jednak proporcje wymiarowe średnicy i długości połączenia a także wartości wcisku w stosunku do wymiarów zestawu kołowego pojazdów szynowych.



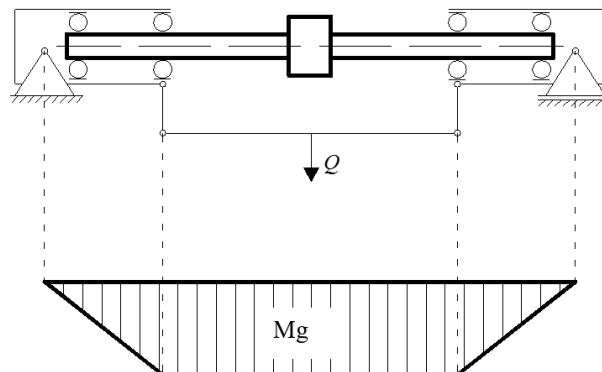
Rys. 2. Wymiary próbki poddanej badaniom zużyciowym

Podobieństwo nie odnosiło się jedynie do wymiarów, zastosowano również takie same materiały konstrukcyjne. Wał wykonano ze stali C45, a tuleję ze stali P58.

Badania zużyciowe przeprowadzono na maszynie zmęczeniowej typu UB-M, pozwalającej na uzyskanie parametrów symulujących rzeczywiste warunki pracy zestawu kołowego. Konstrukcja maszyny zmęczeniowej umożliwia uzyskanie obciążenia okresowo zmiennego próbki przy czystym zginaniu obrotowym.

Obciążenie próbki powinno generować taki moment zginający, który spowoduje ugięcie wału. W takiej sytuacji, podczas eksploatacji powstawać będą oscylacyjne przemieszczenia styczne tulei względem wału, które są warunkiem koniecznym inicjacji zużycia frettingowego.

Na rys. 3 przedstawiono schematycznie stanowisko do badań zużyciowych próbki, sposób jej obciążenia oraz wynikający z tego obciążenia moment zginający. Podobny rozkład momentu zginającego uzyskuje się w przypadku zestawów kołowych obciążonych ciężarem nadwozia pojazdu szynowego na torze prostym.



Rys. 3. Schemat mocowania próbki w maszynie zmęczeniowej oraz obciążenia

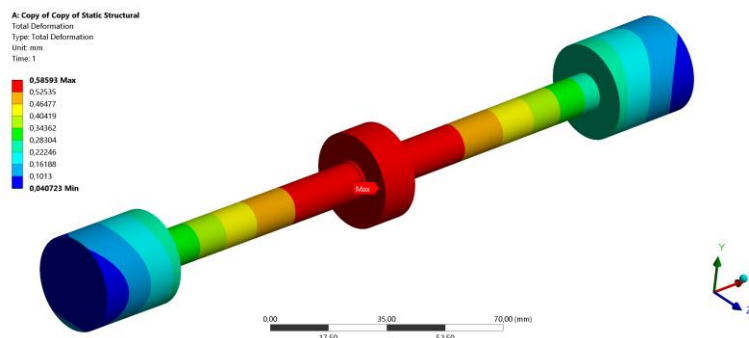
Podczas badań zużyciowych, próbki obciążono siłą 550 N. W wyniku takiego obciążenia, na powierzchni kontaktu tuleja-wał powstają naprężenia normalne o wartości 102 MPa. Wartość ta jest zbliżona do zakresu naprężeń normalnych na powierzchni podpięcia osi rzeczywistego zestawu kołowego. Przyjmując typowe warunki pracy zestawu kołowego lokomotywy w torze prostym naprężenia normalne na powierzchni osi, według przepisów UIC, wynoszą 98MPa.

Analiza wytrzymałościowa przeprowadzona w programie ANSYS wykazała, że obciążenie siłą 550 N spowoduje maksymalne ugięcie wału wynoszące 0,52 mm (rys. 4), i maksymalne naprężenia zredukowane – 356 MPa (rys. 5) nie powodując przy tym odkształceń plastycznych. Takie parametry wytrzymałościowe pozwolą podczas badań na otrzymanie oscylacyjnych przemieszczeń stycznych inicjujących rozwój zużycia frettingowego. W tabeli 3 zestawiono pozostałe parametry badań zużyciowych.

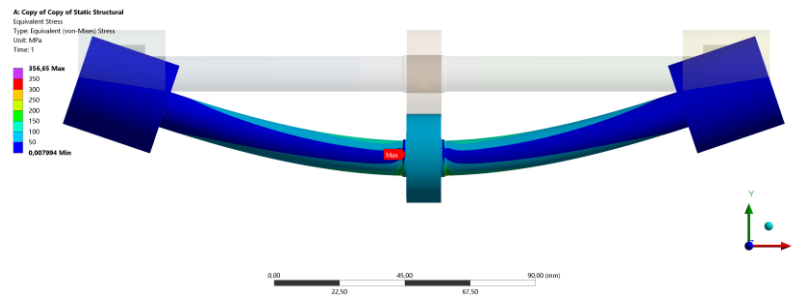
Tabela 3

Zestawienie parametrów badań zużyciowych

Nr próbki	Siła wtłaczania tulei na wał N	Obciążenie próbki N	Moment gnący Nm	Amplituda naprężenia MPa		Liczba cykli 10^6
				ϕ 12 mm	ϕ 13 mm	
S_02	4800	550	27,5	162	128	8
S_06	7000	550	27,5	162	128	16
S_14	6600	550	27,5	162	128	10



Rys. 4. Rozkład linii ugięcia próbki



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych występujących w próbce obciążonej siłą 550 N

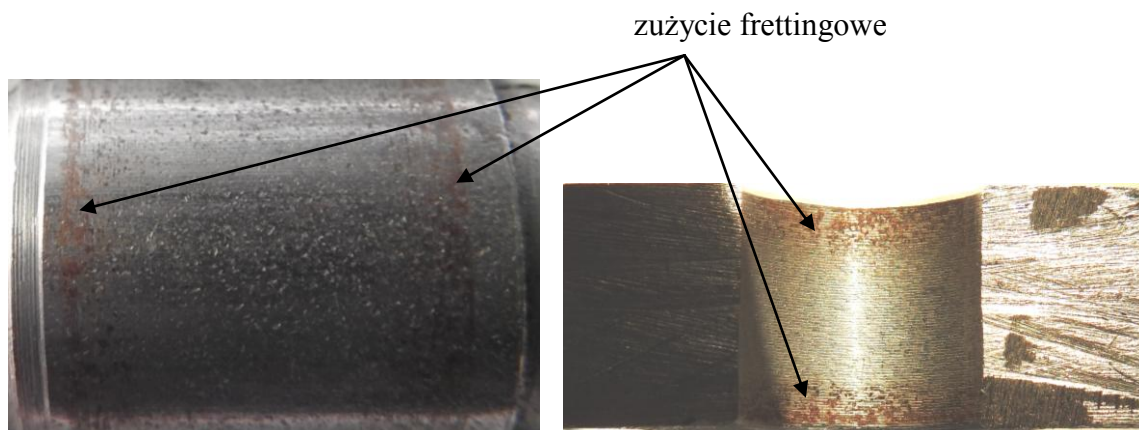
Po badaniach zużyciowych przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych w celu określenia wpływu powłok na rozwój zjawiska frettingu. Przeprowadzono między innymi badania topografii warstwy wierzchniej badanych modeli oraz obserwacje mikroskopowe z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego typu JEOL JSM-6460LV, wyposażonego w spektrometr EDS. Przeprowadzenie badań możliwe było dopiero po odpowiednim przygotowaniu próbek. Tradycyjne stłoczenie tulei z wału spowodowałoby zniszczenie powstałego zużycia frettingowego, co uniemożliwiłoby dokładną jego analizę. Stąd opracowano technologię demontażu połączenia, polegającą na przecięciu połączenia równoległe do osi wału. W wyniku, czego otrzymano trzy próbki, których obserwacje pozwoliły wyciągnąć odpowiednie wnioski dotyczące zastosowania analizowanych powłok w celu zwiększenia trwałości wału.

4. Wyniki badań doświadczalnych

W pierwszej kolejności zaprezentowano wyniki badań dla wału bez powłoki. Stanowią one bazę porównawczą dla pozostałych próbek poddanych analizie. Podobny obraz zużycia frettingowego obserwuje się na powierzchni osi i koła w połączeniu koło-oś zestawu kołowego. W dalszej części artykułu zaprezentowano wyniki badań zużyciowych dla wałów z naniesionymi powłokami.

4.1. Wał z warstwą wierzchnią bez powłoki

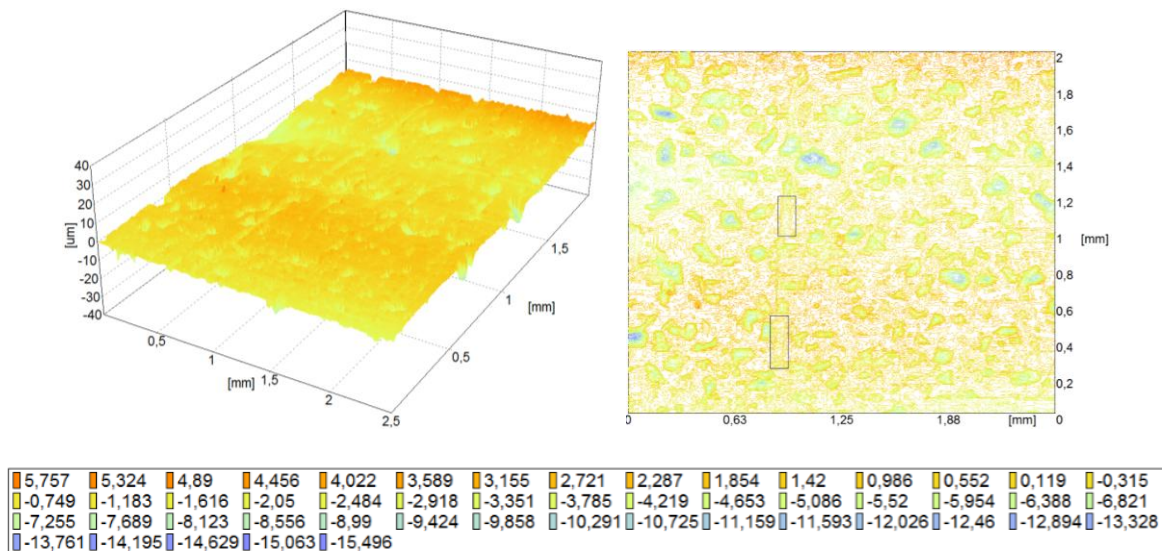
Wyniki badań makrograficznych warstwy wierzchniej wykazały występowanie zużycia frettingowego po obu stronach podpięcia wału i piasty tulei (rys. 6). Lokalizację zużycia, przy brzegach połączenia, należy tłumaczyć mechanizmem rozwoju zjawiska frettingowego w połączeniach właczanych, który szczegółowo został omówiony w [5].



Rys. 6. Zużycie frettingowe na powierzchni wału bez powłoki i piastie tulei

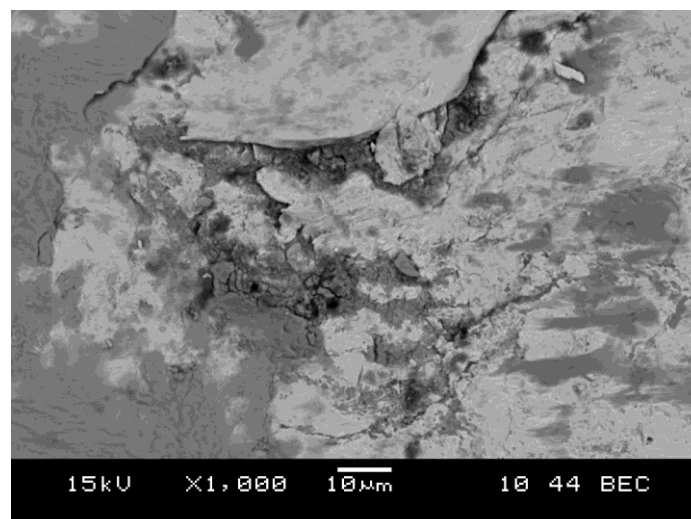
Zużycie występuje w postaci pierścienia na całym obwodzie podpięcia wału. Szerokość obszaru zajętego przez zużycie wynosi ok. 2-3 mm po każdej stronie i zlokalizowane jest w odległości ok. 3 mm od brzegu podpięcia.

Badania topografii warstwy wierzchniej w miejscu zużycia frettingowego wykazały znaczny wzrost parametrów chropowatości. Parametr Ra w miejscu zużycia frettingowego wynosi 3,23 μm . Przykładowe wyniki badań topografii warstwy wierzchniej wału w miejscu zużycia frettingowego, wykonane z użyciem profilometru stykowego TOPO 01P wyposażonego w indukcyjną głowicę pomiarową o promieniu 2 μm i kącie stożka 90° przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Wyniki badania topografii warstwy wierzchniej w miejscu zużycia frettingowego

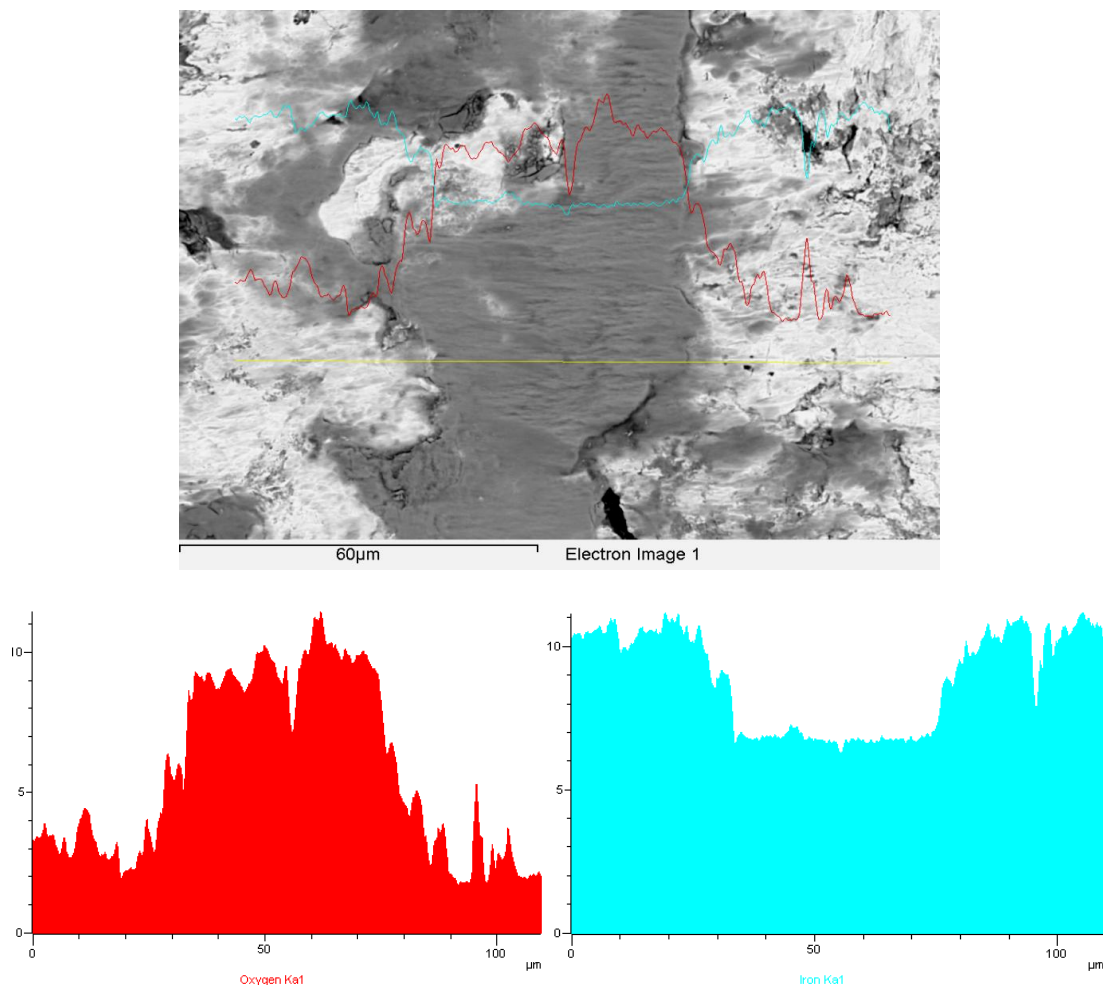
Wzrost parametrów chropowatości związany jest głównie z pojawiającymi się nalepzeniami materiałów. Nalepienia te są produktami zużycia, które powstały podczas procesu wtlaczania tulei na wał, kiedy to dochodziło do zrywania mikrowystępów warstwy wierzchniej elementów o mniejszym gradiencie twardości i ciągłego ich przemieszczania aż do chwili zakończenia procesu wtlaczania. Źródłem powstawania produktów zużycia i tworzenia narostów jest zjawisko adhezji.



Rys. 8. Obraz z mikroskopu skaningowego powierzchni wału w strefie zużycia frettingowego

Na rys. 8 przedstawiono przykładowy obraz z mikroskopu skaningowego powierzchni wału w miejscu zużycia frettingowego, na którym obserwuje się liczne uszkodzenia w postaci narostów materiału a także mikrowżery oraz mikropęknięcia warstwy wierzchniej.

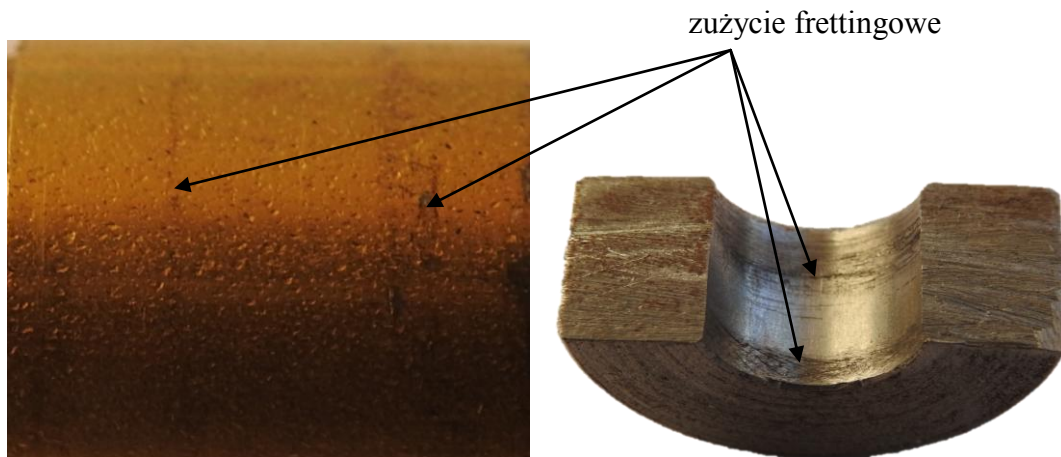
Podczas eksploatacji, w wyniku oscylacyjnych przemieszczeń stycznych współpracujących powierzchni, narosty ulegają deformacjom plastycznym, a następnie utlenianiu tworząc obraz charakterystyczny dla korozji żelaza. Na rys. 6 jest to widoczne w postaci brązowego pierścienia w miejscu zużycia frettingowego. Utlenianie zdeformowanych narostów następuje w wyniku przedostawania się tlenu do zużytych miejsc przez szczeliny powstałe w wyniku ugięcia wału. W celu potwierdzenia powyższego stwierdzenia przeprowadzono analizę stężenia tlenu i żelaza w obszarze zajęтым przez zużycie. Badania rentgenowskie składu chemicznego przeprowadzono metodą EDS a wyniki tych badań zaprezentowano na rysunku 9.



Rys. 9. Wyniki badań rentgenowskich składu chemicznego przeprowadzone metodą EDS na powierzchni wału w strefie zużycia frettingowego

4.2. Wał z powłoką TiN

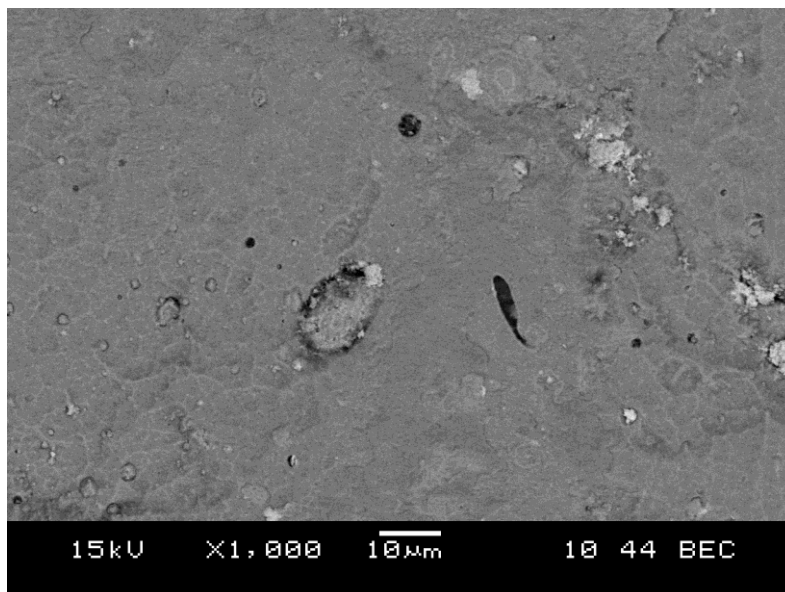
Obserwacje makrograficzne warstwy wierzchniej wału z powłoką wykazały występowanie zużycia frettingowego w postaci pierścienia obejmującego cały obwód podpięcia po obu stronach. Intensywność zużycia jest zdecydowanie mniejsza w stosunku do wału bez powłoki. Zużycie frettingowe obserwuje się również na powierzchni piasty tulei na obu jej brzegach, przy czym intensywność zużycia jest zdecydowanie większa w stosunku do wału z powłoką TiN (rys. 10).



Rys. 10. Zużycie frettingowe na powierzchni wału z powłoką TiN i piastce tulei

Zużycie frettingowe charakteryzuje się różną intensywnością po każdej stronie podpięcia. Szerokość obszaru zajętego przez zużycie wynosi z lewej strony ok. 1 mm i zaczyna się w odległości ok. 4 mm od krawędzi podpięcia. Z prawej strony szerokość obszaru zużycia wynosi ok. 2-3 mm i rozpoczyna się w odległość 5-6 mm od brzegu połączenia.

W przypadku piasty tulei początek zużycia frettingowego obserwuje się już przy krawędziach i obejmuje znaczny obszar powierzchni. Szerokość „paska” zużycia waha się od 3 do 4 mm po obu stronach.

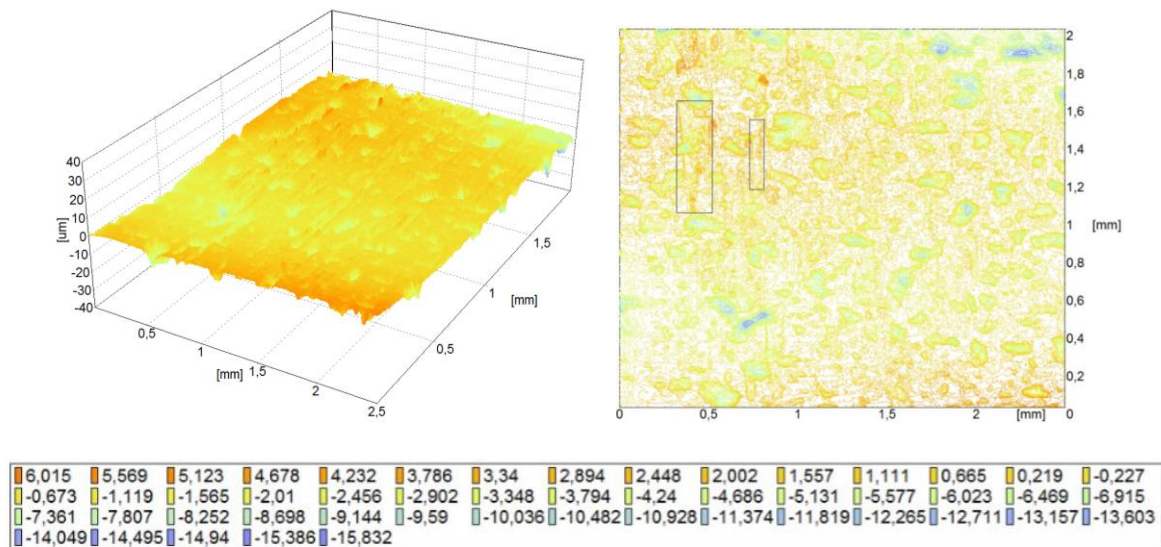


Rys. 11. Ślady zużycia frettingowego na powierzchni wału z powłoką TiN

Tak samo jak w przypadku połączenia wtlaczanego z wałem bez powłoki, tutaj również głównym zużyciem składającym się na zjawisko frettingu są nalepienia materiału, które pochodzą ze ścinania mikrowystępów powierzchni piasty tulei (rys. 11). Nalepienia te, podczas eksploatacji ulegają deformacjom i utlenianiu. Duża różnica gradientu twardości powierzchni wału w stosunku do powierzchni tulei powoduje, że w głównej mierze uszkodzeniom ulega tuleja.

Badania parametrów chropowatości w miejscu charakteryzującym się większą intensywnością zużycia frettingowego nie wykazały istotnych różnic w stosunku do stanu przed badaniami zużyciowymi. Wynika to z małych wymiarów wysokości uszkodzeń, które

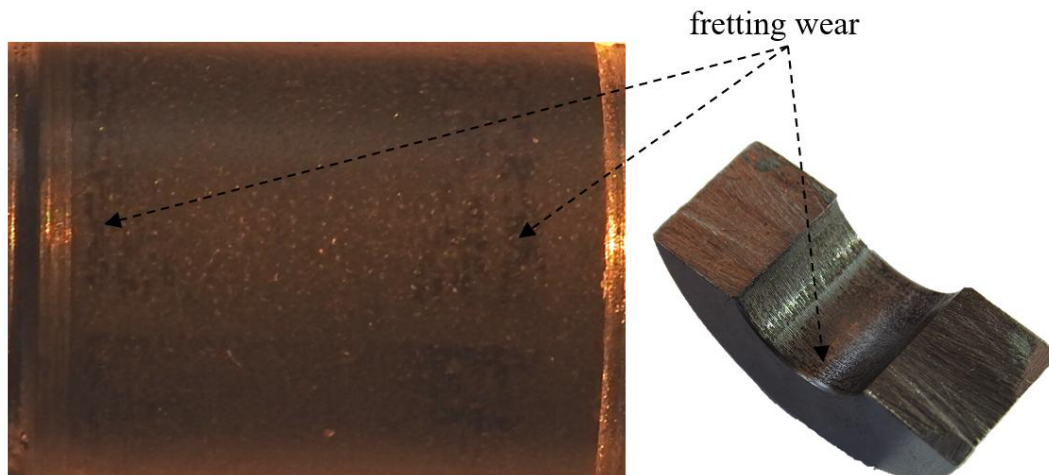
w większości pokrywają się z mikronierównościami powierzchni podpięcia. Na rys. 12 zaprezentowano przykładowy wynik pomiaru parametrów chropowatości w miejscu zużycia frettingowego.



Rys. 12. Wyniki badania topografii warstwy wierzchniej w miejscu zużycia frettingowego

4.3. Wał z powłoką CrN+a-C:H:W

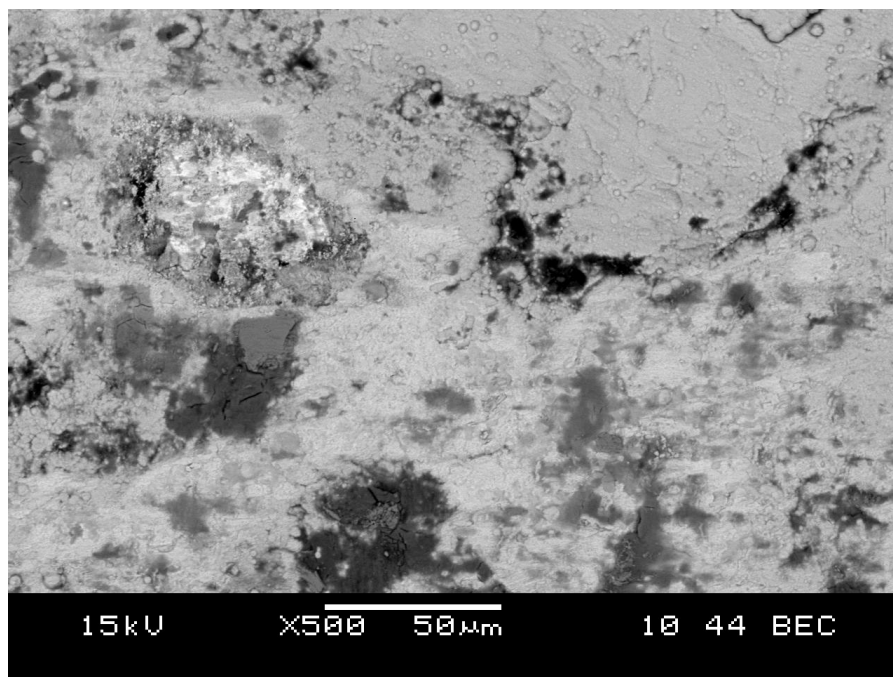
Badania makrograficzne warstwy wierzchniej wałów wykazały występowanie zużycia frettingowego w niewielkim stopniu. Również w przypadku warstwy wierzchniej piasty tulei zużycie frettingowe obserwuje się lokalnie. Uszkodzenia występują, podobnie jak w poprzednich przypadkach, przy brzegach połączenia (rys. 13). Uszkodzenia rozmieszczone są losowo na obwodzie podpięcia wału.



Rys. 13. Zużycie frettingowe na powierzchni wału z powłoką CrN+a-C:H:W i piastie tulei

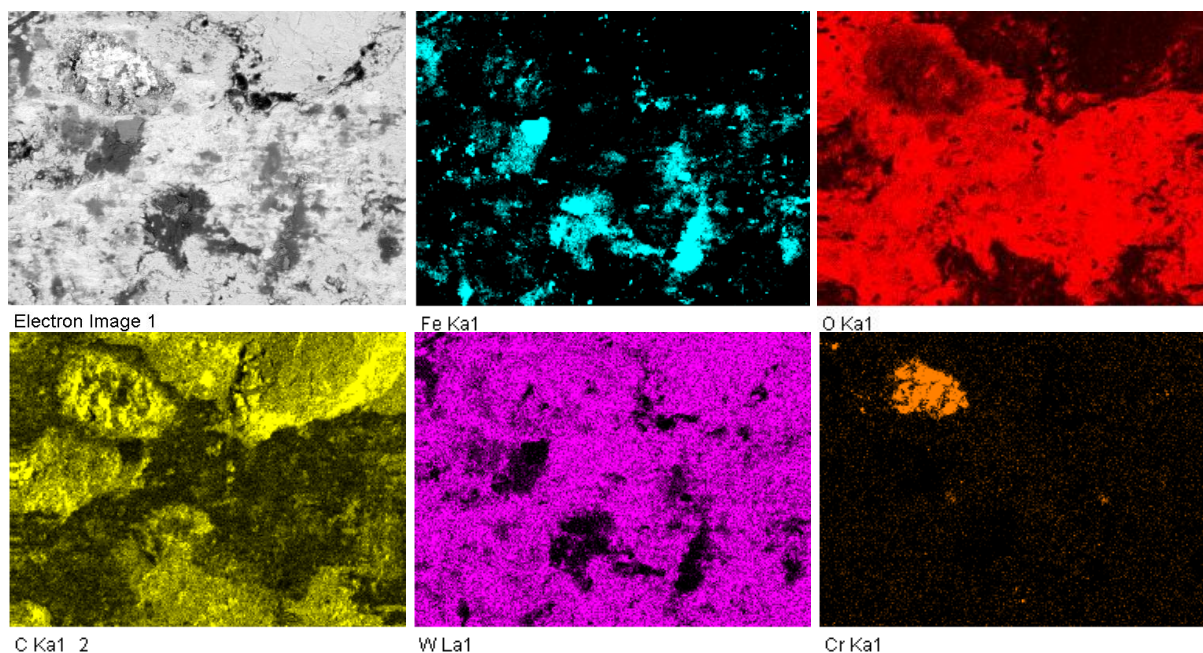
Największe odnotowane ślady zużycia frettingowego zajmują powierzchnię ok. 2 – 2,5 mm². Strefy występowania zużycia frettingowego charakteryzują się brązowym zabarwieniem.

Zużycie występuje głównie w postaci narostu produktów zużycia, o czym świadczą obrazy z mikroskopu skaningowego. Przykładowy obraz warstwy wierzchniej wału w strefie zużycia frettingowego przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Ślady zużycia frettingowego na powierzchni wału z powłoką CrN+a-C:H:W

Dostęp tlenu do uszkodzonych stref powoduje, że produkty zużycia ulegają utlenianiu. Potwierdzają to mapy rozkładu pierwiastków na powierzchni wału w strefie zużycia frettingowego przedstawione na rys 15. Tlen występuje w 90% badanej powierzchni tworząc tlenki z pozostałymi pierwiastkami.



Rys. 15. Mapy rozkładu pierwiastków na powierzchni wału w strefie zużycia frettingowego

5. Wnioski

Celem artykułu było przedstawienie wyników badań ograniczenia rozwoju zużycia frettingowego w połączeniach właczanych. Z przeglądu literatury wynika, że ograniczenie zużycia w tego typu połączeniach wiąże się z wyeliminowaniem zjawiska adhezji. Jest to

możliwe w przypadku kojarzenia elementów charakteryzujących się odpowiednią geometrią i twardością warstwy wierzchniej.

Badaniom zużyciowym poddano wały bez powłok PVD oraz wały z powłokami TiN i CrN+a-C:H:W. Powłoki nałożono na powierzchnię wałów, ponieważ w rzeczywistym połączeniu koło – oś zestawu kołowego pojazdów szynowych, oś jest elementem determinującym trwałość całego zestawu kołowego.

Wyniki badań powierzchni wałów bez powłok wskazują intensywny obraz zużycia frettingowego, co świadczy o skłonności połączenia do tworzenia szczepień adhezyjnych. Zużycie frettingowe występuje na całym obwodzie wału w postaci pierścienia o szerokości 2-3 mm po obydwu stronach podpiaścia. Obszar zajęty przez zużycia zaczyna się w odległości ok. 3 mm od brzegu połączenia.

W przypadku wałów z powłoką TiN obserwuje się mniejszą intensywność zużycia, jednak również w postaci pierścienia o szerokości 1 mm dla lewej strony i 2-3 mm po prawej stronie podpiaścia. Odmienna geometria i twardość wału i tulei powoduje, że występuje mniej miejsc skłonnych do tworzenia szczepień adhezyjnych.

Z zaproponowanych powłok największy wpływ na ograniczenie rozwoju zużycia frettingowego mają powłoki CrN+a-C:H:W. Pomimo mniejszej twardości i chropowatości w stosunku do powłok TiN, na wałach pokrytych tą powłoką zużycie charakteryzuje się najmniejszą intensywnością. Zużycie w tym przypadku występuje lokalnie zajmując za każdym razem pole powierzchni 2-2,5 mm². Spowodowane to może być składem chemicznym powłoki. Dobre właściwości antyzużyciowe uwodornionego węgla amorficznego uzupełnia wolfram. Stąd powłoka ta charakteryzuje się małym współczynnikiem tarcia powierzchni stalowych ograniczając tym samym uszkodzenie powierzchni.

Badania mikroskopowe wykazały, że w głównej mierze na zjawisko frettingu, składają się nalepienia materiału, pochodzące ze ścinania mikronierówności warstwy wierzchniej tulei, które przyklejają się do powierzchni wałów. Warstwa wierzchnia tulei posiada najmniejszą twardość w skojarzeniu z warstwami wierzchnimi wałów z powłokami, dlatego też ta powierzchnia będzie bardziej podatna na uszkodzenia. Badania pokazały również, że podczas eksploatacji nalepienia te ulegają deformacjom plastycznym w wyniku występowania oscylacyjnych przemieszczeń stycznych współpracujących powierzchni oraz utlenianiu w wyniku kontaktu z powietrzem atmosferycznym. Badania ilościowe składu chemicznego produktów zużycia wykazały czterdziestoprocentowe stężenie tlenu i pięćdziesięcioprocentowe stężenie żelaza. Pozostałe dziesięć procent składu chemicznego stanowią pierwiastki wchodzące w skład budowy warstwy wierzchniej wałów. Ponadto, w strefach zużycia obserwuje się mikrowżery i mikrowytarcia, szczególnie widoczne na wałach bez powłok.

W artykule zaprezentowano wyniki badań nad zużyciem frettingowym na przykładzie zestawów kołowych pojazdów szynowych, ale wyniki te mogą być również odniesione do innych przykładów połączeń włączanych pracujących w warunkach zginania obrotowego.

Podziękowania: Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr PB.501-1/2017 finansowanego przez Państwową Wyższą Szkołę Zawodową w Nowym Sączu.

Literatura

1. Astrid Gies, Thomas Chudoba, Norbert Schwarzer, Jürgen Becker. Influence of the coating structure of a-C:H:W coatings on their wear-performance: A theoretical

- approach and its practical confirmation. *Surface and Coatings Technology*; 2013; 237: 299-304
2. Bahri A., Kaçar E., Akkaya S.S., Elleuch K., Ürgen M. Wear protection potential of TiN coatings for 304 stainless steels used in rotating parts during olive oil extraction. *Surface and Coatings Technology*; 2016; 304: 560-566
 3. Bose Sivakumar, Lokesh Chandra Pathak, Raghuvir Singh. Role of surface roughness on corrosion and fretting corrosion behaviour of commercially pure titanium in Ringer's solution for bio-implant application. *Applied Surface Science*; 2017; 401: 385-398
 4. Dong-Wook Kim, Kyung-Woong Kim. Tribological characteristics of Cr/CrN/a-C:H/W/a-C:H coating under boundary lubrication conditions with glycerol monooleate (GMO) and molybdenum dithiocarbamate (MoDTC). *Wear*; 2015; Volumes 342–343: 107-116
 5. Guzowski S. Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2003
 6. Guzowski S. Warunki rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu koło-oś zestawu kołowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport*; 1995; 27: 111-118
 7. Karwala K., Kulikowski H., Tułeczki A. Technologiczne problemy trwałości zestawów kołowych pod kątem przystosowania pojazdów szynowych do zwiększonych prędkości. Rozprawa doktorska, Kraków, 1991
 8. Kesavan D., Vamshidhar Done, Sridhar M.R., Ronald Billig, Daniel Nelias. High temperature fretting wear prediction of exhaust valve material. *Tribology International*; 2016; 100: 280-286
 9. Kowalski S., Guzowski S. Wpływ procesów technologicznych na zużycie frettingowe w połączeniu wciskowym. *Tribologia*; 2010; 3: 85-94
 10. Lenart A., Pawlus P., Dzierwa A., Sęp J., Dudek K. The effect of surface topography on dry fretting in the gross slip regime. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*; 2017; volume 17, issue 4: 894-904
 11. Madej M. The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings. *Wear*; 2014; Volume 317, Issues 1–2: 179-187
 12. Matteo Benedetti, Vigilio Fontanari, Elisa Torresani, Christian Girardi, Lorenzo Giordanino. Investigation of lubricated rolling sliding behaviour of WC/C, WC/C-CrN, DLC based coatings and plasma nitriding of steel for possible use in worm gearing. *Wear*; 2017; 378-379: 106-113
 13. Mi X., Cai Z.B., Xiong X.M., Qian H., Tang L.C., Xie Y.C., Peng J.F., Min-hao Zhu. Investigation on fretting wear behavior of 690 alloy in water under various temperatures. *Tribology International*; 2016; 100: 400-409

14. Michnej M. Proces zużycia w połączeniu obrotowym na przykładzie modelu zestawu kołowego z samoczynną zmianą rozstawu kół. Praca doktorska; 2012; Kraków
15. Pereira K., Yue T., Abdel Wahab M. Multiscale analysis of the effect of roughness on fretting wear. *Tribology International*; 2017; 110: 222-231
16. Richert M., Zawadzka P., Mazurkiewicz A., Smolik J., Leszczyńska-Madej B., Nejman I., Pałka P., Pietrzyk S. Deposition of W/a-C:H:Zr and W/a-C:H:W multilayer coatings on substrate made of porous graphite by arc – Electron beam hybrid method. *Surface and Coatings Technology*; 2016; 300: 19-24
17. Song C., Shen M.X., Lin X.F., Liu D.W., Zhu M.H. An investigation on rotatory bending fretting fatigue damage of railway axles. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*; 2014; 37: 72-84
18. Stefan Nißen, Jan Heeg, Mareike Warkentin, Detlef Behrend, Marion Wienecke. The effect of deposition parameters on structure, mechanical and adhesion properties of a-C:H on Ti6Al4V with gradient Ti-a-C:H:Ti interlayer. *Surface and Coatings Technology*; 2017; 316: 180-189
19. Zheng J.F., Luo J., Mo J.L., Peng J.F., Jin X.S., Zhu M.H. Fretting wear behaviors of a railway axle steel. *Tribology International*; 2010; Volume 43, Issues 5–6: 906-911