

Dr hab. inż. Stanisław Guzowski, prof. PK, Dr inż. Maciej Michnej

Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Instytut Pojazdów Szynowych
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Polska
E-mail: m-8@mech.pk.edu.pl

Wpływ technologicznych metod podwyższenia trwałości warstwy wierzchniej na zużycie frettingowe osi kolejowych zestawów kołowych

Keywords: *zestaw kołowy, warstwa wierzchnia, zużycie frettingowe*

Abstract: W niniejszym artykule przedstawiono badania mające na celu zastosowanie takich technologii ulepszania warstwy wierzchniej podpiaścia zestawu kołowego, które eliminowałyby zużycie frettingowe. Badania zostały przeprowadzone na uproszczonym modelu fizycznym rzeczywistego połączenia koła i osi zestawu kołowego z samoczynną zmianą rozstawu kół. Wyniki przeprowadzonych badań zużyciowych wskazują, że obróbką skutecznie ograniczającą rozwój zużycia frettingowego może być zastosowanie powłoki metalicznej w postaci molibdenowania. Przeprowadzone badania wskazują na pełną możliwość zastosowania tego rozwiązania w rzeczywistej eksploatacji.

1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych podzespołów pojazdu szynowego, którego trwałość i niezawodność decyduje o bezpieczeństwie ruchu kolejowego jest zestaw kołowy. Od jego właściwej jakości użytkowej zależy zarówno bezpieczeństwo ruchu kolejowego, jak również koszty związane z eksploatacją pojazdu szynowego.

Zestaw kołowy pojazdów szynowych, ze względu na specyficzne warunki pracy jest szczególnie narażony na rozwój zużycia zmęczeniowego. Z uwagi na rolę jaką odgrywa w prowadzeniu pojazdu w torze niedopuszczalne są jego uszkodzenia. Wyniki badań eksploatacyjnych zestawów kołowych wskazują, że występujące zużycia mają istotny wpływ na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej lub mogą być ogniskiem rozwoju pęknięć zmęczeniowych przede wszystkim osi zestawu będącej jego podstawowym elementem. Obserwacje powierzchni podpiaścia osi po demontażu zestawu kołowego wielokrotnie pokazywały występowanie m.in. uszkodzeń frettingowych w obszarze styku podpiaścia osi z piastą koła.

Wyniki badań autorów niniejszego artykułu wskazują, że zużycie frettingowe może mieć istotny wpływ na rozwój zużycia zmęczeniowego szczególnie w połączeniu wciskowym koło-oś zestawu kołowego [2]. Podobny problem występuje w przypadku zestawu kołowego z samoczynną zmianą rozstawu kół, w którym ze względów konstrukcyjnych wymiary powierzchni połączenia koła i osi spełniają warunki pasowania obrotowego.

Złożone zjawiska fizyko-chemiczne zachodzące na styku skojarzonych powierzchni oraz wpływ dużej liczby czynników powoduje, że mechanizm rozwoju zużycia frettingowego jest trudny do opisanego i nie doczekał się on w literaturze jednoznacznej definicji. Częścią wspólną dla różnych opracowań naukowych oraz publikacji jest jedynie stwierdzenie, że rozwój zużycia frettingowego jest uwarunkowany występowaniem nacisków powierzchniowych w skojarzeniu oraz oscylacyjnych poślizgów o bardzo małej amplitudzie nie przekraczających 150 μm [2, 17, 18, 19]. Obrazem zużycia frettingowego mogą być ślady

korozji na powierzchni elementów, wzrost chropowatości powierzchni, mikropęknięcia w warstwie wierzchniej, wżery. Fretting jest zjawiskiem o bardzo złożonym mechanizmie zużywania, w którym nakładają się lub następują po sobie; zużycie adhezyjne, zmęczenie powierzchniowe, odwarstwianie, utlenianie, ścieranie wierzchołkami nierówności i luźnymi produktami zużycia. Badania zużycia frettingowego prowadzone były przede wszystkim dla skojarzeń o styku skoncentrowanym lub płaskim i również ich dotyczyły proponowane modele zużycia [7, 10, 16].

Z przeglądu badań zużycia frettingowego wynika, że rozwój zużycia jest ściśle związany z rzeczywistym stykiem skojarzonych powierzchni elementów oraz z obecnością w strefie kontaktu tzw. trzeciego ciała. Z kolei forma rozwoju tego zużycia zależy przede wszystkim od warunków oscylacji i amplitudy poślizgu [9, 10, 11]. Zdecydowana większość autorów wymieniając przykłady elementów lub połączeń, w których występuje zużycie frettingowe, wskazuje najczęściej na połączenia wciskowe [9,10,11,12,16]. Natomiast badania tych połączeń prowadzone były sporadycznie [16, 17].

Przytoczone w pracy [2] dane statystyczne dotyczące uszkodzeń zmęczeniowych osi w warunkach eksploatacji wskazują, że miejsce rozwoju pęknięć zmęczeniowych pokrywa się z obszarem rozwoju zużycia frettingowego. Potwierdzają to również wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzonych przez L. Stasiaka [12] na rzeczywistych zestawach kołowych w warunkach laboratoryjnych. Wskazuje to na prawdopodobny związek występowania uszkodzeń zmęczeniowych osi zestawu kołowego z rozwojem zużycia frettingowego.

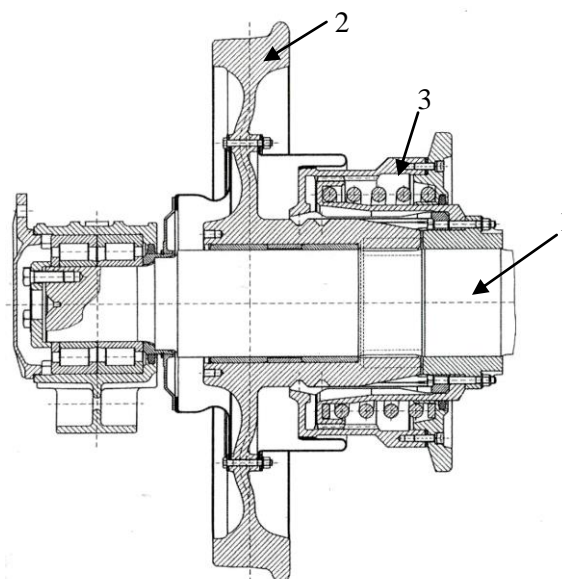
W świetle powyższych faktów istotnym elementem zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu szynowego jest wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu koło – oś zestawu kołowego. W artykule przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych przez autorów badań modelowych, wpływu wybranych technologicznych metod podwyższania trwałości warstwy wierzchniej na zużycie frettingowe kolejowych zestawów kołowych z automatyczną zmianą rozstawu kół.

2. Obiekt badań

Klasyczny zestaw kołowy pojazdów szynowych składa się z osi i dwóch kół, które połączone są z osią poprzez wtlaczanie. To trwałe połączenie zapewnia prawidłowe i bezpieczne toczenie pojazdu w torze. Obok tej podstawowej konstrukcji zestawu kołowego w pojazdach szynowych występują również rozwiązania specjalne, umożliwiające np. przesuw koła po podpiąści osi.

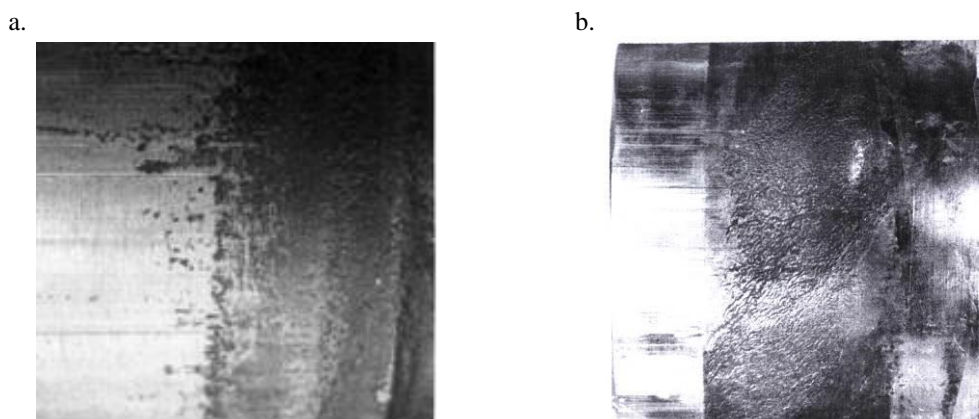
W latach 90 ubiegłego wieku w Centralnym Biurze Konstrucyjnym PKP w Poznaniu zaprojektowano i wykonano zestaw kołowy SUW2000, który umożliwił bezobsługowy, samoczynny przejazd z toru o jednej szerokości na tor o innej szerokości, dokonywany na torowym stanowisku przestawczym.

Fragment przekroju zaprojektowanego zestawu przedstawiono na rysunku 1. Istotnym elementem przedstawionej konstrukcji jest połączenie koła z osią. W przeciwieństwie do klasycznego zestawu kołowego, gdzie koła połączone są trwale z osią w wyniku wtlaczania, jest ono połączeniem o pasowaniu obrotowym. Rozwiązanie to umożliwia przemieszczanie poosiowe kół w trakcie zmiany ich rozstawu, przy następnym zablokowaniu koła względem osi w czasie jazdy. W prototypowym zestawie koło oraz oś wykonano z materiałów zgodnie z normami UIC. Koło ze stali R7E, a oś ze stali A1N. Skład chemiczny tych stali przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 1. Przekrój zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół SUW2000 [13];
1- oś zestawu kołowego, 2 - koła przemieszczające się po osi zestawu, 3 - mechanizm blokujący

Wstępna eksploatacja zestawu pokazała, że już po niewielkim przebiegu (ok. 1,5 tys. km) istnieją duże problemy podczas zmiany rozstawu kół [13, 14]. Znacznie wzrastała siła niezbędna do przemieszczenia poosiowego kół, prowadząc nawet do uszkodzeń stanowiska przestawczego. Obserwacje powierzchni podpiaścia osi po demontażu zestawu kołowego pokazały występowanie m.in. uszkodzeń frettingowych w obszarze styku z piastą koła oraz znaczne procesy starzenia smaru. Czynniki te były przyczyną blokowania koła na osi w trakcie zmiany jego rozstawu. Charakterystyczną cechą rozwoju zużycia frettingowego występującego na osi zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół (pasowanie obrotowe) jest to, że miejsce występowania i obraz zużycia jest podobny jak w przypadku osi klasycznego zestawu kołowego (połączenie właczane). Na rysunku 2 przedstawiono fragment osi obu rodzajów zestawu kołowego ze zużyciem frettingowym na ich powierzchni.



Rys. 2. Zużycie frettingowe na brzegu podpiaścia osi: a). tradycyjnego zestawu kołowego [2], b). zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół [13].

Zużycie, którego charakterystyczny obraz przedstawiono na rysunku 2 obejmuje obszar od czoła piasty w głąb połączenia o szerokości około 30mm. Zużycie występuje na całym obwodzie powierzchni podpiaścia w postaci charakterystycznego pierścienia. Zaobserwowane w tym obszarze uszkodzenia powierzchni to głównie wżery i narosty. Obszar

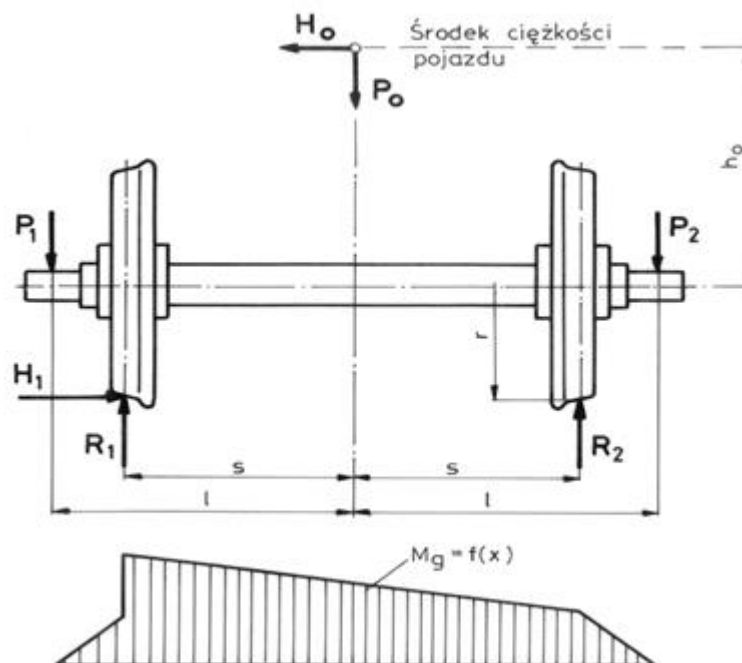
ten cechuje się również zabarwieniem brązowo – czarnym, świadczącym o jego utlenieniu. Jedyną różnicą w zużyciu na obu osiach jest miejsce jego występowania. W przypadku tradycyjnego połączenia ma ono miejsce głównie od strony części środkowej osi, natomiast w połączeniu obrotowym występuje po obu stronach osi zestawu kołowego.

2.1. Warunki pracy zestawu kołowego

Warunki pracy analizowanego połączenia o pasowaniu obrotowym koło – oś zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół można z dużym przybliżeniem odnieść do połączenia wciskowego koło – oś tradycyjnego zestawu kołowego. Zasadnicza różnica jest jedynie w stanie naprężeń wstępnych wytworzonych w warstwie wierzchniej połączonych elementów. W połączeniu wciskowym w wyniku wtłoczenia koła na oś na całej powierzchni styku powstaje wstępny stan naprężeń ściskających i towarzyszący mu również stan deformacji w warstwie wierzchniej połączonych elementów. W przypadku natomiast połączenia obrotowego koło – oś zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół występuje jedynie styk niekonforemny i naprężenia są wynikiem siły normalnej pochodzącej od obciążenia zestawu.

Do badań przyjmuje się najczęściej schemat obciążenia zestawu kołowego przedstawiony na rysunku 3. Według przyjętego schematu, złożony układ obciążenia zestawu kołowego w czasie ruchu pojazdu szynowego, przekazywany jest następująco:

- na czopy osi działa pionowe obciążenie skupione P_1 i P_2 ,
- na obrzeże kół tocznych siła boczna H_1 , zależna od położenia koła względem główki szyny.

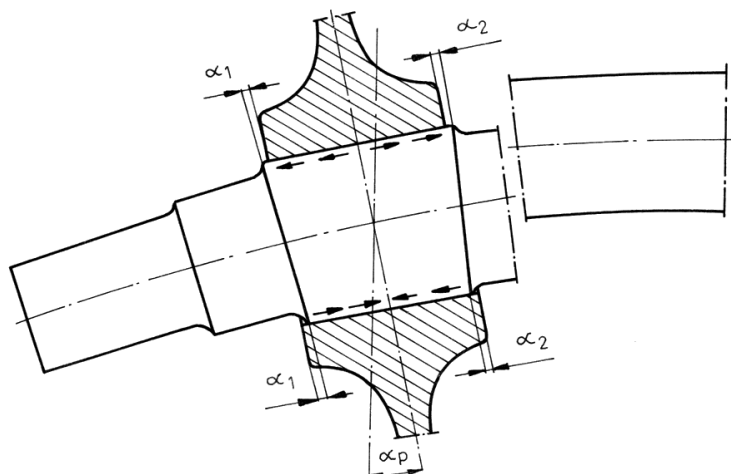


Rys. 3. Schemat obciążenia zestawu kołowego i odpowiadający mu rozkład momentu gnącego przy przesunięciu zestawu w lewo [2]

W osi zestawu kołowego występuje moment gnący, który jest wynikiem działania tych obciążeń (rys.3). Maksymalna wartość tego momentu występuje na podpiąści osi w płaszczyźnie działania reakcji R_1 i R_2 (punkt styku koła z szyną), tj. w obszarze

połączenia z piastą koła. Oś pracuje więc w warunkach obrotowego zginania. Efektem tego, w trakcie toczenia się zestawu, mogą być oscylacje pomiędzy osią a piastą koła na brzegu połączenia. Autorzy pracy [1] w następujący sposób tłumaczą wystąpienie mikroprzemieszczeń względnych w połączeniu wciskowym podpięcia osi z piastą koła. Pod wpływem obciążeń zewnętrznych (rys.3), oś zestawu kołowego ulega odkształceniom w sposób pokazany na rysunku 4. W górnych warstwach osi występują naprężenia rozciągające a w dolnych ściskające. Ten charakter odkształcenia osi nie miałby istotniejszego znaczenia, gdyby w takim samym zakresie ulegała odkształceniu piasta koła. Aby zaistniał stan jednoczesnego odkształcenia podpięcia osi i piasty koła, jednostkowe siły tarcia p_T na styku połączenia musiałyby być większe lub co najmniej równe naprężeniom normalnym σ_n w podpięciu. Stwierdzony przez autorów obraz zużycia frettingowego jest potwierdzeniem tego, że w obszarze tym mają miejsce poślizgi względne, a więc zgodnie z modelem Mindlina:

$$p_T = p_{sr} \cdot \mu \leq \sigma_n \quad (1)$$

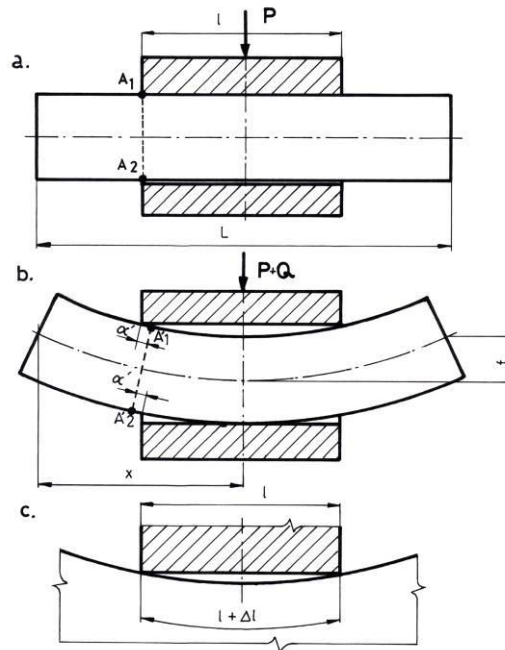


Rys. 4. Deformacja zestawu kołowego pod wpływem obciążenia zewnętrznego [1]

Ten stan obciążeń i rozkładu naprężeń można również odnieść do zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół. W zestawie kołowym pomiędzy tuleją ślizgową a osią występuje pasowanie obrotowe, a więc ze względu na brak nacisków powierzchniowych montażowych istnieje znacznie większe prawdopodobieństwo wystąpienia oscylacji pomiędzy skojarzonymi powierzchniami elementów, co w połączeniu z niekorzystnym wpływem sił zewnętrznych może prowadzić do powstawania zużyć i uszkodzeń osi szczególnie w miejscu połączenia koła z osią.

Pomiar rzeczywistej amplitudy poślizgu pomiędzy powierzchnią styku tulejki i wałka w badaniach zużyciowych obrotowo-giętnych jest trudny. Jak wskazują wyniki badań różnych autorów, rozwój zużycia frettingowego jest ściśle związany z wystąpieniem oscylacji. Stąd istotne jest, czy w badanym połączeniu mogą wystąpić oscylacje, których widocznym efektem powinien być obraz uszkodzeń na powierzchni połączenia. W pracy zaproponowano bardzo uproszczoną, szacunkową ocenę wartości amplitudy poślizgu, która będzie wynikiem ugięcia wałka pod działaniem siły Q i P . Na rysunku 5 przedstawiono schemat występowania poślizgów pomiędzy połączonymi elementami o pasowaniu obrotowym. Na rysunku 5a przedstawiono skojarzone elementy bez obciążenia momentem

zginającym a jedynie siłą P. W wyniku tego tulejka dociskana jest do górnej powierzchni wałka, a na dolnej występuje maksymalny luz wynikający z pasowania obrotowego. Punkty $A_1 - A_2$ związane są z powierzchnią wałka i wyznaczają miejsce styku powierzchni wałka i czoła tulejki. W wyniku ugięcia wałka pod działaniem momentu gnącego (rys.5b) ulegnie również obrotowi płaszczyzna przechodząca przez punkty A_1-A_2 . Przyjmie ona pozycję wyznaczoną przez punkty $A_1'-A_2'$ pokrywając się z promieniem krzywizny ugięcia wałka. Powierzchnia wklęsła wałka (ściskana) ulegnie skróceniu a wypukła (rozciągana) wydłużeniu. W wyniku tego punkt A_1 przemieści się na powierzchni ściskanej pod tulejkę przyjmując pozycję A_1' , a na powierzchni rozciąganej punkt A_2 poza czoło tulejki przyjmując pozycję A_2' . Wielkość przemieszczenia punktu A_1 względem czoła tulejki oznaczono α' .



Rys. 5. Schemat wyznaczania amplitudy poślizgu pomiędzy czołem tulejki a powierzchnią podpięcia wałka: a) próbka w stanie swobodnym obciążona tylko siłą P, b) próbka obciążona momentem zginającym, c) schemat skojarzenia tulejki z wałkiem do wyznaczenia amplitudy oscylacji

Punkt A_2 na powierzchni rozciąganej ze względu na luz wynikający z pasowania obrotowego nie będzie miał kontaktu z powierzchnią tulejki. Bezpośredni poślizg pomiędzy skojarzonymi powierzchniami będzie miał miejsce tylko na powierzchni ściskanej wałka. Maksymalna amplituda oscylacji będzie przy brzegu tulejki i będzie równa α' , natomiast w osi symetrii połączenia osiąga wartość zero.

Do wyznaczenia szacunkowej wartości amplitudy poślizgu w badanym połączeniu posłużono się modelem połączenia przedstawionym na rys.5c. Obciążenie próbki momentem gnącym spowoduje ugięcie wałka, czego wynikiem będzie wydłużenie jego powierzchni na długości styku z tulejką o wartość Δl . Jeżeli przyjmiemy, że ugięcie wałka jest bardzo małe, a odkształcenia mają charakter sprężysty, to do wyznaczenia wartości wydłużenia Δl możemy wykorzystać prawo Hooke'a, wg którego wydłużenie liniowe względne ε można określić przy pomocy wzorów:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_n}{E} \quad \text{oraz} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

stąd

$$\Delta l = \frac{\sigma_n \cdot l}{E} \quad (2)$$

Całkowite przemieszczenie względne (amplituda poślizgu) powierzchni wałka względem czoła tulejki będzie więc równe $\alpha = \Delta l/2$. W tabeli 1 przedstawiono obliczoną wg wzoru (2), szacunkową wartości amplitudy poślizgu pomiędzy czołem tulejki a powierzchnią wałka dla przyjętych parametrów badań modelowych (kolumna 2).

Tabela 1

Szacunkowa wartość amplitudy poślizgu α oraz wartość strzałki ugięcia f_o, f_{rz} próbki			
1	2	3	4
$(P + Q)$ [N]	α [mm]	f_o [mm]	f_{rz} [mm]
350	0,0046	0,51	0,75

Według wzoru (2) amplituda oscylacji zależy od naprężeń normalnych, a więc i od wartości przyłożonego momentu gnącego, który z kolei będzie decydował o wartości ugięcia próbki. Będzie więc istniał ścisły związek pomiędzy ugięciem wałka, a amplitudą oscylacji. Wykorzystano to, do zweryfikowania obliczonej szacunkowej wartości amplitudy oscylacji w porównaniu do amplitudy rzeczywistej. W tym celu obliczono analitycznie wartość strzałki ugięcia wałka f_o i porównano ją z rzeczywistą zmierzoną wartością ugięcia próbki f_{rz} . Do obliczenia wartości ugięcia wałka posłużono się schematem obciążenia próbki jak na rysunku 7. Obliczoną analitycznie wartość strzałki ugięcia f_o zamieszczono w tabeli 1 w kolumnie 3. Wartość rzeczywistą strzałki ugięcia f_{rz} , wyznaczoną podczas pomiarów statycznych ugięcia próbki, zamieszczono w tab.1 w kolumnie 4. Porównanie tych obu wartości wskazuje, że ugięcie rzeczywiste jest większe od wartości obliczonej analitycznie. Stąd można sądzić, że rzeczywista amplituda poślizgu również może być większa od obliczonej analitycznie. W tym miejscu należy podkreślić, że w obliczeniach analitycznych amplitudy poślizgu przyjęto uproszczenia. Przede wszystkim nie uwzględniono sił tarcia na styku połączonych powierzchni.

3. Metodyka badań

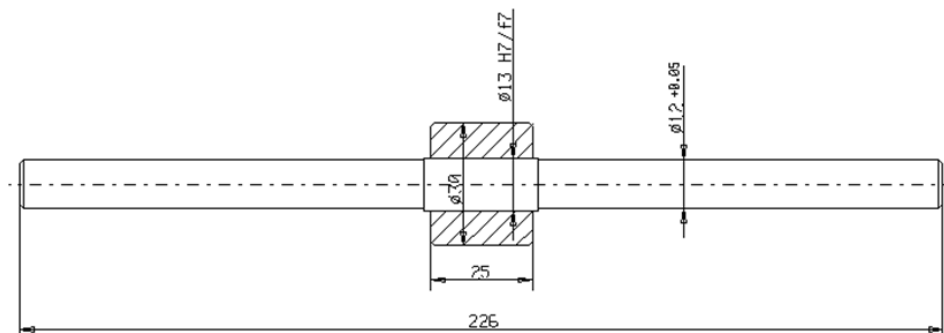
Ze względu na wymiary zestawów kołowych badania na obiekcie rzeczywistym są kosztowne i czasochłonne z uwagi na konieczność zastosowania specjalistycznego stanowiska badawczego, a także odpowiednio długiego czasu badań. Z tego powodu badania zużyciowe wykonano na próbkach modelujących połączenie tuleja-oś wykorzystując maszynę zmęczeniową typu MUJ. Badania zmęczeniowe próbki w warunkach obrotowego zginania zapewniają symulację rzeczywistych obciążeń zestawu kołowego w warunkach eksploatacji.

Badania doświadczalne dotyczyły:

- określenia rzeczywistego stanu warstwy wierzchniej w obrębie połączenia tulejki z wałkiem po badaniach zużyciowych dla wytypowanych procesów technologicznych.
- określenia wpływu wybranych procesów technologicznych, na rozwój zużycia frettingowego.

Przy doborze próbki modelującej połączenie tuleja ślizgowa – oś zestawu kołowego kierowano się zachowaniem podobieństwa wymiarowego w strefie połączenia. W tym celu zachowano proporcję długości połączenia i średnicy osi oraz pasowania. Wymiary próbki przedstawiono na rysunku 6.

Tulejkę ustalano względem wałeczka za pomocą śruby bez łba z gniazdem, która zabezpieczała przed przemieszczeniami poosiowymi i obwodowymi oraz zapewniała ruch tulejki względem wałeczka w kierunku promieniowym podczas obrotów.



Rys. 6. Wymiary próbki do badań modelowych [6]

Do badań wstępnych wałek wykonano ze stali 45, a tulejkę ze stali 36HNM poprzez obróbkę skrawaniem bez dodatkowego umocnienia warstwy wierzchniej. Dobór materiałów zapewniał zbliżone własności do materiałów, z których wykonany był obiekt rzeczywisty w wersji prototypowej (tabela 2). Tak wykonany model miał stanowić punkt odniesienia do innych wariantów wykonania skojarzenia wałek-tuleja, które powinny ograniczyć lub wyeliminować zużycie w połączeniu przy jednoczesnym zapewnieniu jak najmniejszej siły przesuwu w kierunku poosiowym.

Tabela 2

Skład chemiczny stali stosowanych do wykonania osi i koła zestaw kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół oraz tulejki i wałka modelujących badane połączenie

Oznaczenie materiału	Skład chemiczny [%]					Własności mechaniczne [MPa]	
	C	Mn	Si	P max	S max	R _e	R _m
ER7	0,52	0,80	0,40	0,020	0,015	≥ 520	820-940
A1N	0,40	1,20	0,50	0,020	0,020	≥ 320	550-650
45	0,42- 0,50	0,50- 0,80	0,10- 0,40	0,040	0,040	340	600-700
36HNM	0,32-040	0,50- 0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	750-800	850-1000

Na podstawie analizy literatury dotyczącej mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych koła z osią zaproponowano takie procesy technologiczne, które powinny ograniczyć inicjację zużycia frettingowego na powierzchni wałka oraz pozwolą otrzymać odpowiedni stan powierzchni podpięcia zapewniający minimalną, stałą siłę potrzebną do przesuwu tulei po podpięciu przed i po badaniach zużyciowych. W tabeli 3 przedstawiono wybrane warianty wykonania modelu pary ciernej tuleja-ślizgowa oś.

Do badań zużyciowych wykorzystano maszynę zmęczeniową typu MUJ, która pozwala na uzyskanie parametrów symulujących rzeczywiste warunki eksploatacji zestawu kołowego. Konstrukcja maszyny pozwala na otrzymanie okresowo zmiennego obciążenia z równoczesnym zginaniem obracającej się próbki. W badaniach zużycia frettingowego

ważne jest uzyskanie takiego rozkładu momentu zginającego na podpiąściu osi, który doprowadzi do jego ugięcia, co jest warunkiem wystąpienia oscylacyjnych przemieszczeń stycznych pomiędzy powierzchniami będącymi w styku.

Tabela 3

Wybrane modele skojarzeń wytypowane do badań zużyciowych

Lp.	Rodzaj próbki	Powierzchnia podpiąścia wałka	Materiał tulei
1	bazowa	stal	stal
3	modyfikowana	molibden	stal
8	modyfikowana	stal hartowana	stal

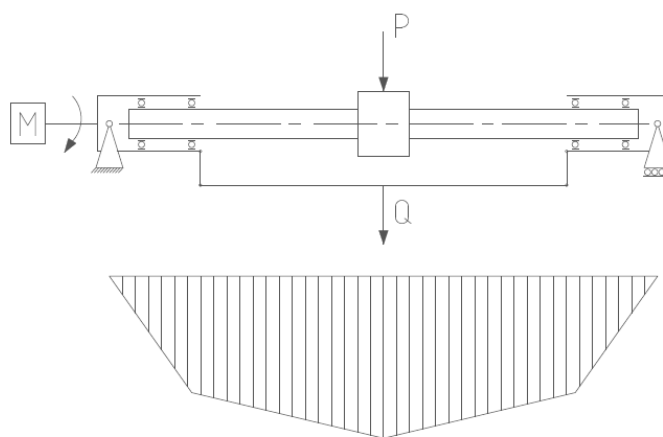
Na rysunku 7 przedstawiono schemat obciążenia próbki na maszynie wytrzymałościowej typu MUJ odpowiadający obciążeniu zestawu kołowego, w którym przyjęto, że zestaw kołowy toczy się po torze prostym bez nabiegania na główkę szyny.

Parametry badania próbki na maszynie wytrzymałościowej były następujące:

- obroty $n=1360$ obr/min
- obciążenie próbki $Q=300$ N
- obciążenie próbki $P=50$ N
- liczba cykli $r > 6 \times 10^6$

Przyjęta prędkość obrotowa próbki odpowiada prędkości 75 km/h wagonu kolejowego.

W badaniach zużyciowych próbki modelującej połączenie tuleja ślizgowa – oś zestawu kołowego, przyjęto wartość obciążeń, dla których wartość naprężeń na powierzchni podpiąścia wałeczka była wyższa od naprężeń w rzeczywistej osi. Naprężenia w próbce obliczono metodą elementów skończonych w programie ANSYS przyjmując wartości sił $Q=300$ N oraz $P=50$ N.



Rys. 7. Schemat obciążenia próbki na maszynie wytrzymałościowej typu MUJ i odpowiadający mu rozkład momentu zginającego

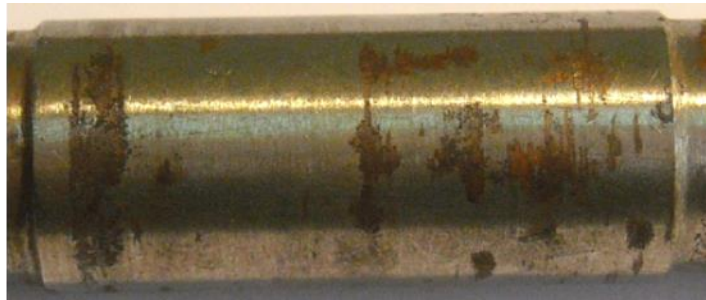
Rozkład naprężeń normalnych na powierzchni wałka dla zadanych wartości obciążeń nie powodował odkształceń plastycznych (strzałka ugięcia 0,27 mm). Maksymalna wartość naprężeń dla przyjętych warunków obciążenia wynosi 61 MPa, przewyższa ona lokalne wartości naprężeń w rzeczywistej osi, które wynoszą 40-50 MPa.

4. Badania doświadczalne

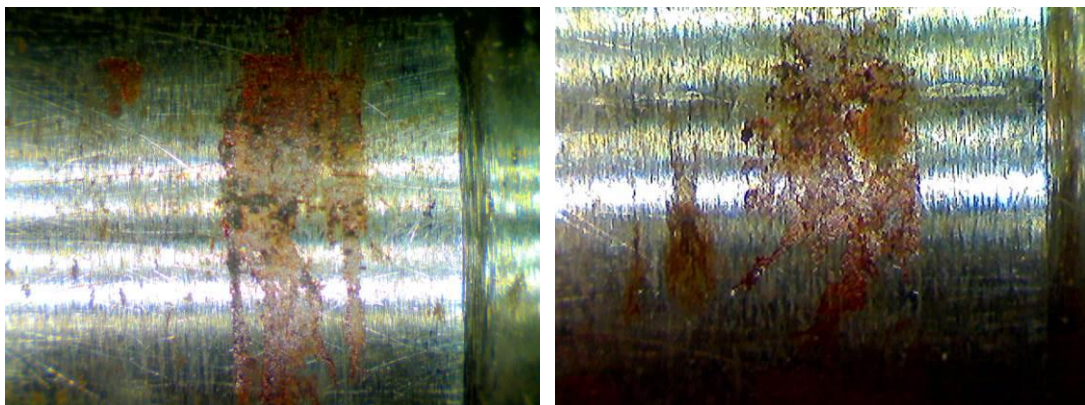
4.1. Próbką bazowa

Badania próbki bazowej miały na celu weryfikację doboru modelu poprzez uzyskanie podobnego obrazu zużycia jak w obiekcie rzeczywistym oraz jako odniesienie do proponowanych zmian. Obserwacje makrograficzne powierzchni podpięcia wałka stalowego w próbce bazowej pokazują, że uszkodzenia powierzchni występują po obu stronach podpięcia wałka (rys. 8). Duża powierzchnia styku współpracujących elementów węzła tribologicznego stwarza warunki do powstawania szperein adhezyjnych na brzegach połączenia, które powodują destrukcję warstwy wierzchniej, a w konsekwencji powstawanie wyraźnych śladów zużycia frettingowego.

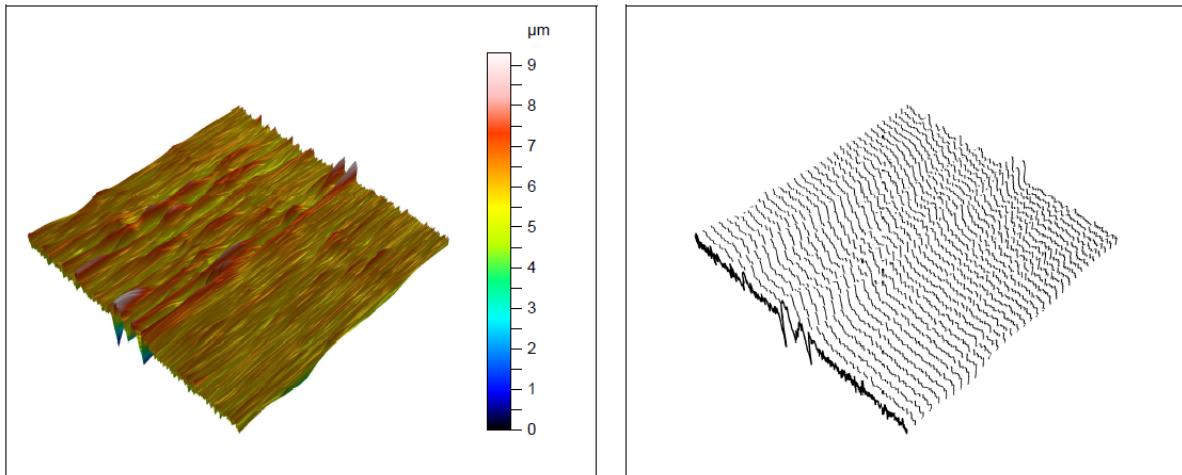
Na fotografiach makroskopowych powierzchni wałka przedstawionych na rysunku 9 zaobserwowano brązowe zabarwienie w obszarze występowania zużycia frettingowego, typowe dla korozji atmosferycznej żelaza. Najbardziej prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest kontakt uszkodzonego obszaru z tlenem z powodu szczeliny tworzącej się pomiędzy powierzchniami wałka i tulejki w wyniku ugięcia próbki.



Rys. 8. Powierzchnia wałka bazowego po badaniach zmęczeniowych – wyraźne ślady zużycia frettingowego na brzegach wałka z mniejszą intensywnością do środka połączenia, pow. ok. 3x [6]

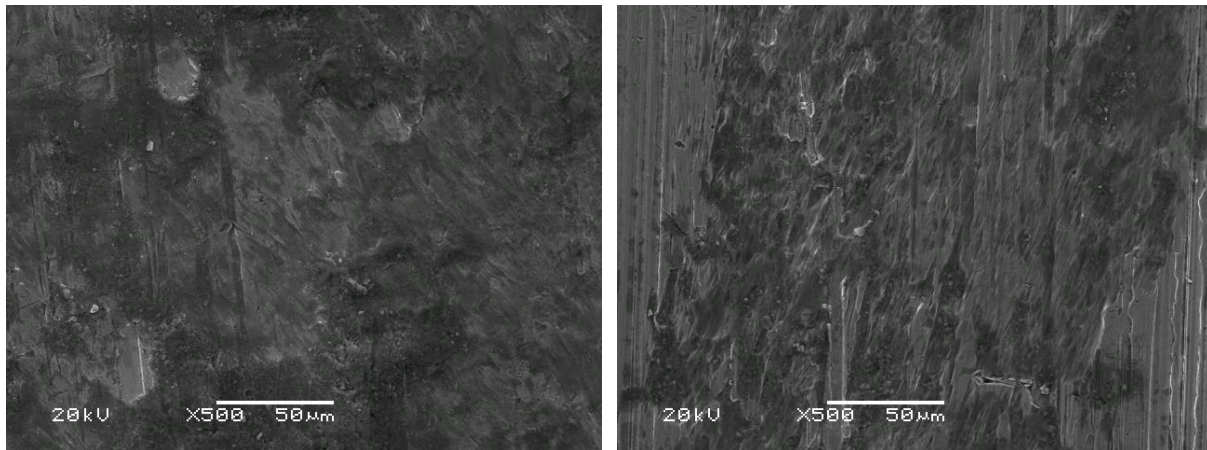


Rys. 9. Próbką bazowa po badaniu zużyciowym, pow. ok. 15x. Brak obróbki wzmacniającej powierzchnie. Widoczne ślady zużycia frettingowego [6]



Rys. 10. Przestrzenny obraz profilu chropowatości powierzchni wałka w obszarze zużycia frettingowego

Na obrazach przestrzennego profilu chropowatości (rys. 10) oraz obrazach skaningowych (rys. 11) podpięcia wałka próbki bazowej można zauważyć charakterystyczne narosty materiału, które ulegają deformacji plastycznej i utlenianiu. Obserwacje powierzchni wykazały również miejscowe wytarcia oraz mikrowżery. Uszkodzenia powierzchni w postaci mikronarostów oraz mikrowżerów posiadają swoje źródło w zjawiskach adhezji, stanowiących element mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego. Mechanizm ten w omawianym przypadku związany jest również z występowaniem względnych przemieszczeń stycznych pomiędzy powierzchniami połączonych elementów. Założone obciążenie generuje maksymalną amplitudę oscylacji pomiędzy powierzchnią wałka i tulejki na brzegu połączenia.



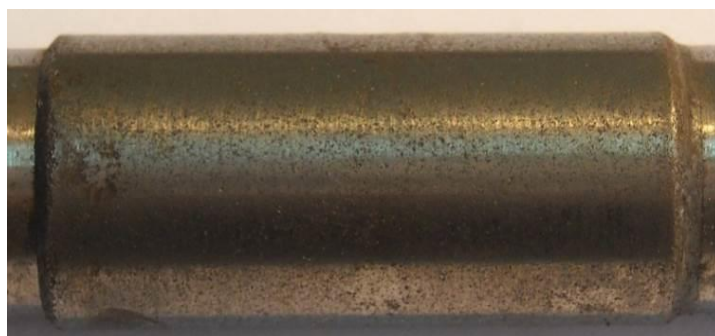
Rys. 11. Obrazy zużycia powierzchni wałka bazowego, pow. 500x

Otrzymany obraz zużycia świadczy o tym, że przyjęty model jest prawidłowy i odzwierciedla warunki pracy oraz związany z nimi obraz uszkodzeń rzeczywistego skojarzenia koło-oś.

4.2. Próbką molibdenowana

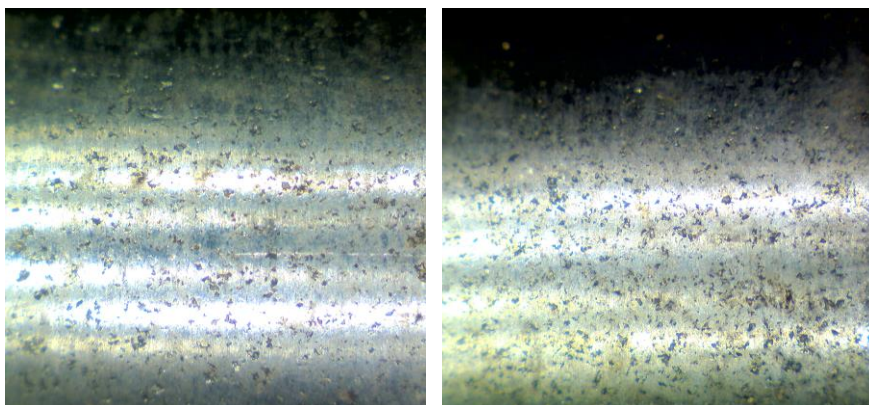
Wysokie koszty molibdenowania pomimo dobrych właściwości tribologicznych, ograniczają jego stosowanie tylko do osi pojazdów trakcyjnych oraz wagonów wchodzących w skład pociągów dużych prędkości. Powłokę molibdenową nałożono na próbkę metodą metalizacji natryskowej po wykonaniu procesu śrutowania warstwy wierzchniej powierzchni

podpiaścia wałka, który wpływa na przyczepność powłoki do podłoża. Grubość naniesionej powłoki wynosiła około $37,5\mu\text{m}$, co stanowiło ok. 0,58% średnicy wałka. W przypadku rzeczywistej osi procent ten wynosi ok. 0,54%. Na rysunku 12 przedstawiono obraz powierzchni podpiaścia wałka molibdenowanego skojarzonego w połączeniu o pasowaniu obrotowym ze stalową tulejką po badaniach zmęczeniowych. Twardość powierzchni molibdenowanej wynosiła 460 HV, natomiast wałka stalowego 210 HV. Widoczne jest całkowite wyeliminowanie zużycia frettingowego.

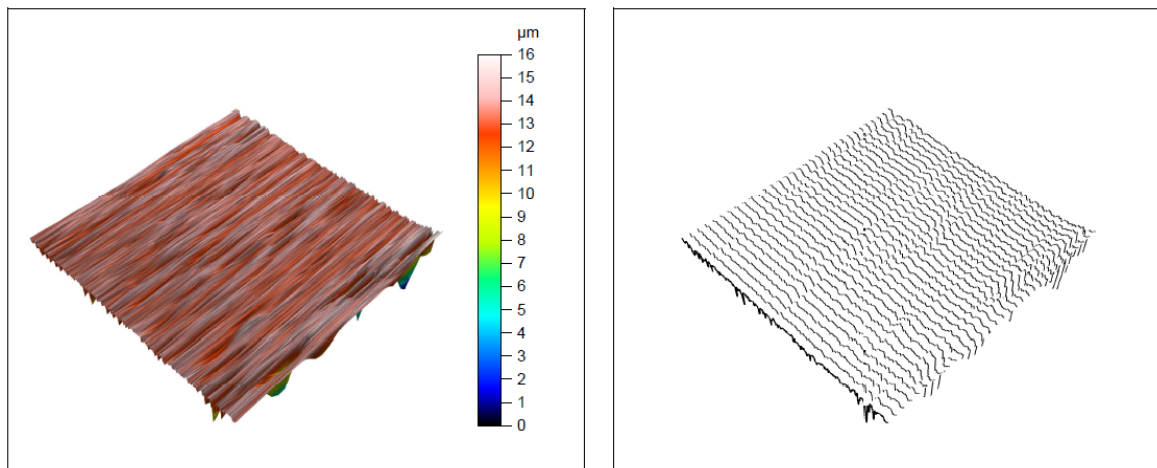


Rys. 12. Powierzchnia wałka molibdenowanego po badaniach zmęczeniowych – brak zużycia frettingowego, pow. ok. 3x

Przeprowadzone badania potwierdzają tezy zawarte w pracach [2, 7, 9], że molibdenowanie jako metoda modyfikacji warstwy wierzchniej stosowana w węzłach stykowych narażonych na fretting ogranicza skłonność do występowania szczepień adhezyjnych, powoduje zmniejszenie siły tarcia, zwiększa odporność na oddziaływanie mechaniczne oraz zwiększa odporność na korozję.

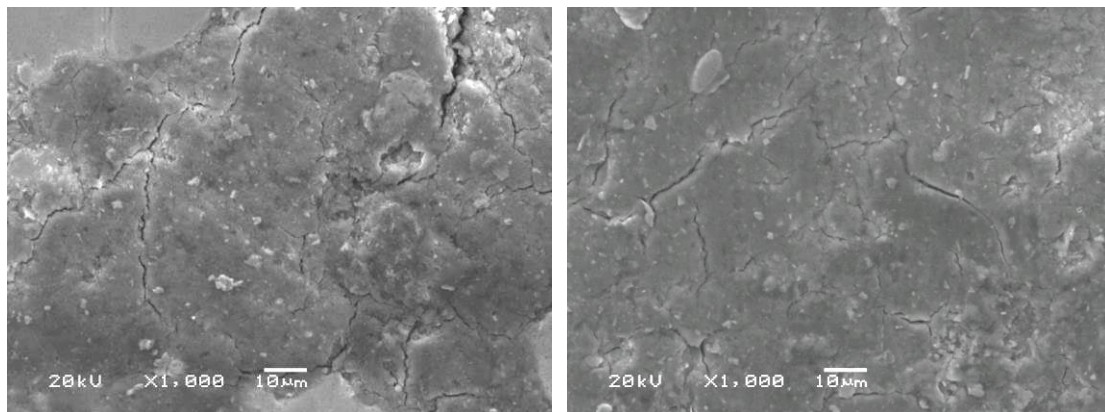


Rys. 13. Próbkę molibdenowaną po badaniu zużyciowym, pow. ok. 15x.
Brak śladów zużycia frettingowego [4]



Rys. 14. Przestrzenny obraz profilu chropowatości powierzchni wałka molibdenowanego w teoretycznym obszarze zużycia frettingowego

Obrazy powierzchni próbki molibdenowanej przedstawione na rysunku 15 wskazują na brak charakterystycznych dla zużycia frettingowego uszkodzeń w postaci mikrowżerów lub narostów z następnym ich utlenieniem. Duża twardość powierzchni z powłoką molibdenową oraz chropowatość wynosząca $1,1 \mu\text{m}$ powodują że przy badanej liczbie cykli $6,57 \times 10^6$ zużycie frettingowe na podpiąściu nie występuje.



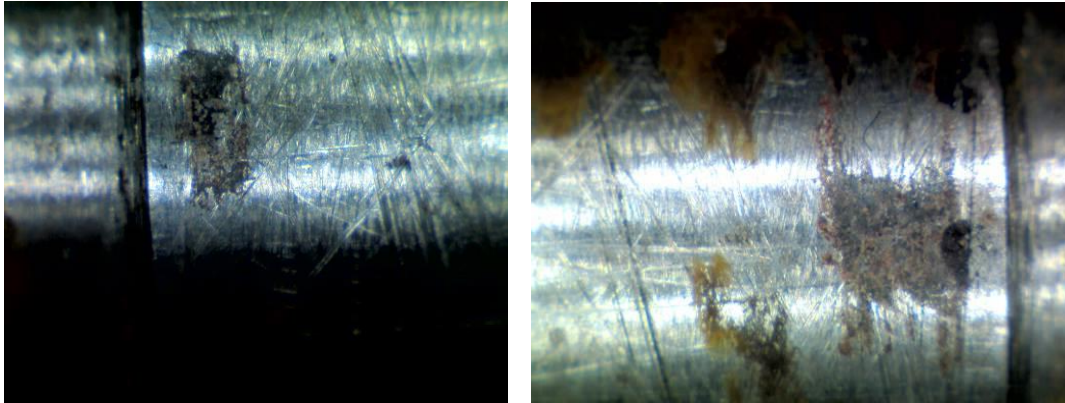
Rys. 15. Obrazy powierzchni próbki molibdenowanej, pow. 1000x

Pomimo braku znamion zużycia frettingowego na powierzchni wałka, zbierające się w mikrowyrwach (efekt śrutowania) produkty zużycia jako efekt frettingu na wewnętrznej powierzchni tulei będą powodowały wzrost właściwości ciernych połączenia.

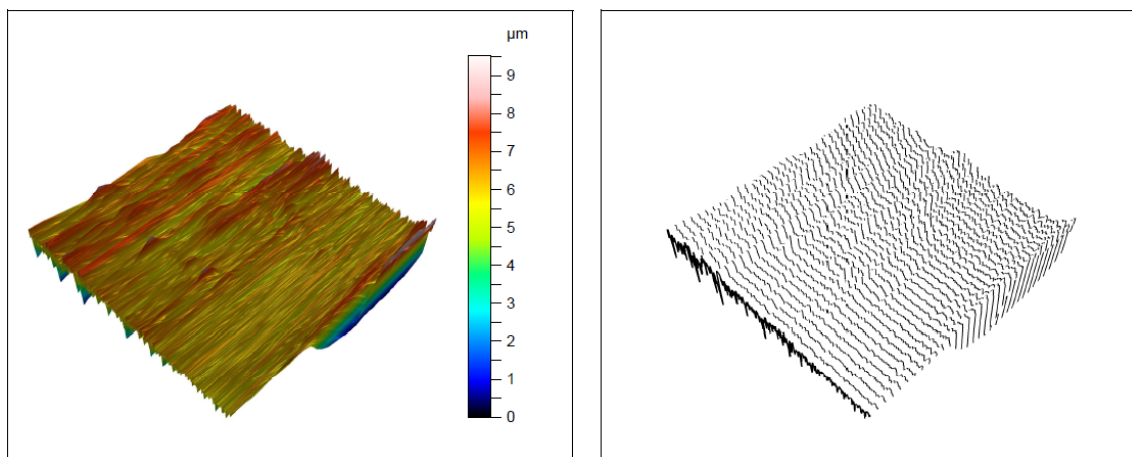
4.3. Próbkę hartowana powierzchniowo

Jedną z metod powierzchniowej obróbki wykańczającej osi zestawów kołowych, mającą wpływ na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej jest hartowanie. Do badań modelowych wykorzystano próbkę poddaną hartowaniu powierzchniowemu metodą indukcyjną, która jest najbardziej popularna i charakteryzuje się dobrymi właściwościami technologicznymi. Proces hartowania próbki polegał na nagraniu warstwy wierzchniej do temperatury hartowania, a następnie szybkim ostudzeniu. Próbki nagrzewane były przez ok. 1,5 min. za pomocą prądu indukowanego w polu magnetycznym. Po procesie hartowania indukcyjnego próbkę poddano odpuszczaniu w piecu typu PEH-2 w temperaturze około 380° , w czasie 1 h.

Przedstawione na rysunku 16 obrazy zużycia na powierzchni wałka hartowanego powierzchniowo wskazują, że pomimo dużego gradientu twardości warstwy wierzchniej obu skojarzonych elementów występują liczne uszkodzenia warstwy wierzchniej (głównie frettingu), które doprowadziły do zablokowania się tulejki i uniemożliwiły jej przesuw po wałku.

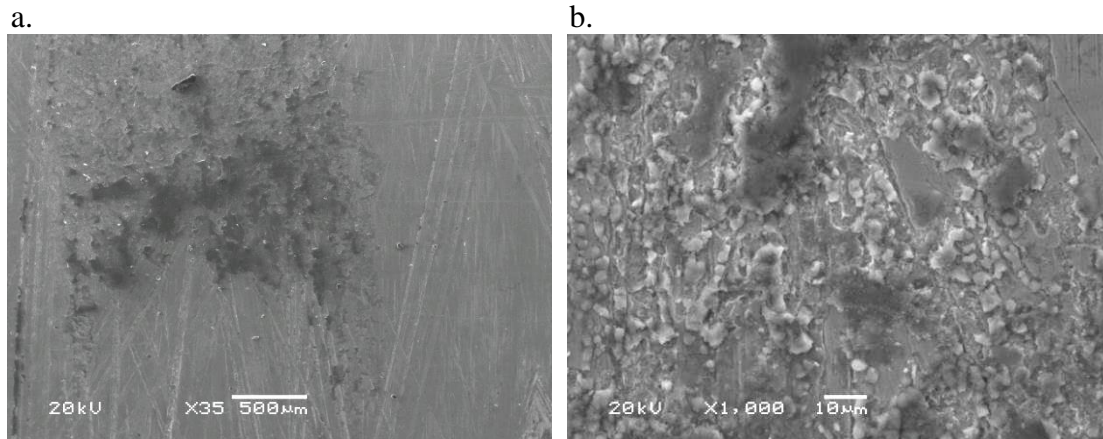


Rys. 16. Próbką hartowna powierzchniowo po badaniu zużyciowym, pow. ok. 15x.
Widoczne duże obszary zużycia frettingowego



Rys. 17. Przestrzenny obraz profilu chropowatości powierzchni wałka hartowanego w obszarze zużycia frettingowego

W trakcie badań makro i mikroskopowych zidentyfikowano narosty materiałowe podatne na odkształcenia plastyczne oraz utlenianie. Narosty z uwagi na swoje własności oraz lokalne uwarunkowania fizyko-mechaniczne posiadają dużą skłonność do pęknięcia i odrywania. Z uwagi na obecność licznych produktów zużycia w postaci startych i utlenionych cząstek materiału oraz bardzo duży zakres uszkodzeń, doszło do zablokowania się tulejki na wałku. Powyższe wyniki dyskwalifikują możliwość zastosowania badanego zestawienia elementów pary ciernej w rzeczywistym zestawie kołowym.



Rys. 18. Obrazy zużycia na powierzchni wałka hartowanego, a), powiększenie 500x, b), powiększenie 1000x

4. Wnioski

Przytoczony obraz zużycia frettingowego w badanym połączeniu próbki bazowej (rys.8) jest podobny do zużycia w połączeniu wciskowym wałek – tulejka poddanym analogicznym warunkom obciążenia [2]. W rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym dominującą rolę w inicjacji zużycia spełnia zjawisko adhezji. Tworzenie się i rozrywanie szepień adhezyjnych [2]. Warunkiem rozwoju szepień adhezyjnych jest utworzenie obszarów rzeczywistego styku ciał pierwszych w wyniku wtłaczania jednego elementu w drugi (ścięcia mikronierówności, deformacja plastyczna warstwy wierzchniej i usunięcie warstwy tlenków). W przypadku połączenia o pasowaniu obrotowym, ze względu na charakter połączenia utworzenie obszarów rzeczywistego styku ciał pierwszych będzie miało miejsce dopiero w trakcie obrotowego zginania próbki. W wyniku względnych przemieszczeń powierzchni tulejki i wałka, których amplituda jest największa na brzegu połączenia, ma miejsce zużycie ściernie skojarzonych powierzchni. Jest ono wynikiem mikroskrawania mikrowystępów powierzchni. Tworzące się produkty zużycia są usuwane ze styku połączenia w trakcie połowy obrotu próbki. Powstała w ten sposób rzeczywista powierzchnia styku (po usunięciu warstwy tlenkowej i tzw. ciała trzeciego) będzie podatna na tworzenie szepień adhezyjnych i inicjację zużycia frettingowego. Można więc zaproponować analogicznie do mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym wałek – tulejka podobny mechanizm w połączeniu o pasowaniu obrotowym jako kilkietapowy proces, którego najważniejszymi elementami są:

- utworzenie obszarów rzeczywistego styku ciał pierwszych w trakcie generowania przemieszczeń względnych o bardzo małej amplitudzie na styku powierzchni elementów w wyniku obrotowego zginania,
- tworzenie szepień adhezyjnych w obszarach rzeczywistego styku szczególnie na brzegu połączenia (największa amplituda poślizgów względnych), które następnie ulegają rozerwaniu, tworząc na powierzchniach styku wyrwy i narosty,
- utlenienie uszkodzonego wcześniej obszaru,
- mikroskrawanie utlenionymi wierzchołkami narostów przeciwległej powierzchni.

W proponowanym mechanizmie rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu o pasowaniu obrotowym warunkiem koniecznym do jego inicjacji będą procesy adhezji. Tworzenie się i rozrywanie szepień adhezyjnych. Według M. Hebdy [3] szczególna skłonność do tworzenia szepień adhezyjnych będzie w przypadku kojarzenia materiałów tego samego rodzaju i o podobnych własnościach mechanicznych. To tłumaczy m.in. tak

intensywny obraz zużycia frettingowego na próbce bazowej (stal – stal). Natomiast wg [3] zwiększenie odporności na zużycie adhezyjne można uzyskać m.in. poprzez wysokie własności mechaniczne (twardość, granica plastyczności).

Ograniczenie rozwoju zużycia frettingowego, wiąże się więc przede wszystkim z niedopuszczeniem do wystąpienia zjawiska adhezji. Ograniczenie występowania oscylacji, ze względu na warunki pracy skojarzenia, jest praktycznie niemożliwe.

W badaniach przyjęto dwa sposoby podwyższenia twardości powierzchni wałka poprzez nałożenie powłoki molibdenowej oraz hartowanie powierzchniowe. W tabeli 4 przytoczono wyniki pomiarów twardości na powierzchni skojarzonych elementów, siły niezbędnej do przesunięcia poosiowego tulei po wałku oraz stwierdzony obraz zużycia.

Tabela 4

Zestawienie wyników pomiarów

Lp.	Próbka	Skojarzenie walek - tuleja	Siła niezbędna do zsunienia tulei [N]		Twardość wałka [HV]	Twardość tulei [HV]	Stan powierzchni wałka po badaniach
			<i>przed badaniami</i>	<i>po badaniach</i>			
1	bazowa	stal - stal	1,4	24,3	210	189	Wyraźne zużycie frettingowe
2	modyfikowana	molibden - stal	8,1	43,2	460	190	Brak zużycia frettingowego
3	modyfikowana	stal hartowana – stal	1,7	>50	549	192	Ślady zużycia frettingowego

Przytoczone wyniki pomiarów i obserwacji wskazują, że wpływ dużego gradientu twardości skojarzonych powierzchni na ograniczenie zużycia frettingowego jest złożony. O ile w przypadku materiałów tego samego rodzaju i zbliżonej twardości powierzchni (stal – stal) rozwój zużycia frettingowego jest bardzo intensywny, to w przypadku powierzchni z powłoką molibdenową i hartowaną powierzchniowo sytuacja jest odmienna. Pomimo, że gradient twardości powierzchni wałka z powłoką molibdenowaną w stosunku do tulei jest o ok. 20% mniejszy od wałka o powierzchni hartowanej, zużycie frettingowe dla tego skojarzenia zostało całkowicie wyeliminowane. Natomiast na powierzchni wałka hartowanego występują wyraźne ślady zużycia frettingowego. Może to wskazywać na fakt, że obok dużej twardości powierzchni, na ograniczenie zużycia będzie miał wpływ skład chemiczny materiału oraz budowa krystalograficzna warstwy wierzchniej skojarzonych materiałów.

Należy podkreślić, że głównym celem artykułu było przedstawienie wyników badań ograniczenia zużycia frettingowego na powierzchni wałka dostępnymi procesami technologicznymi. Główna uwaga skupiona była na powierzchni wałka, gdyż w rzeczywistym połączeniu koło – oś zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół, to właśnie oś jest elementem determinującym trwałość całego zestawu kołowego.

Przytoczone przykłady stanu powierzchni wałków po badaniach zmęczeniowych wskazują, że z badanych procesów technologicznych mających na celu podwyższyć trwałość zmęczeniową połączenia, jedynie molibdenowanie wpływa bardzo korzystnie na wyeliminowanie zużycia frettingowego. Natomiast powierzchnie hartowane powierzchniowo

są podatne na rozwój tego zużycia a ponadto nie spełniają warunku swobodnego przemieszczania się tulei po wałku.

References

1. Gąsowski W, Stasiak L. Badania wytrzymałości zmęczeniowej wagonowych osi zestawów kołowych w ośrodku korozyjnym. Korozja stykowa. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport, z. 14, Gliwice, 1989, 103-121.
2. Guzowski S. Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych. Monografia 284, Politechnika Krakowska, Kraków, 2003.
3. Hebda M. Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Wyd. ITeE-PIB, Warszawa, 2007.
4. Kaczmarek J, Hanzel-Powierża Z. Aktualny stan i perspektywy diagnostyki technologicznej warstwy wierzchniej, IMJON –79, Warszawa, 1979.
5. Kula P. Inżynieria warstwy powierzchniowej, Monografie, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.
6. Michnej M. Proces zużycia w połączeniu obrotowym na przykładzie modelu zestawu kołowego z samoczynną zmianą rozstawu kół. Rozprawa doktorska, Kraków 2012.
7. Miller K. How to Reduce Fretting Corrosion – Influence of Lubricants. Tribology International, 8.2, (1975): 57-64.
8. Młynarczyk A, Jakubowski J, Obróbka powierzchniowa i powłoki ochronne. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
9. Neyman A. Fretting w elementach maszyn. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2003.
10. Nosal S. Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Politechnika Poznańska, Rozprawy, Poznań, nr 328, 1998.
11. Pytko S, Szczerek M. Fretting - forma niszczenia elementów maszyn. Tribologia nr 6, 1994, 673-693.
12. Stasiak L. Doświadczalna determinacja charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych pojazdów szynowych. Politechnika Poznańska, Rozprawy, Nr.173, Poznań, 1986.
13. Suwalski R.M. System samoczynnej zmiany rozstawu kół pojazdów szynowych. Monografia AGH, Kraków, 2006.
14. Szkoa M. Assessment of Reliability, Availability and Maintainability of Rail Gauge Change Systems. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014; 16 (3): 422-432.
15. Szulc S, Stefko A. Obróbka powierzchniowa części maszyn - podstawy fizyczne i wpływ na własności użytkowe. Warszawa WNT 1976.

16. Volchok A, Halperin G, Etsion I. The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life. *Wear* 253 (2002): 509-515.
17. Waterhouse R.B. *Fretting corrosion*. Pergamon Press Ltd, Oxford, 1972.
18. Waterhouse R.B. *Fretting fatigue*. Applied Science Publishers Ltd., London, 1981.
19. Waterhouse RB. *Fretting Wear*, ASM Handbook, vol.18, Friction, Lubrication and Wear technology. Cleveland, OH: ASM International, 1992: 233–256.