

Analiza wymiarowa w badaniach modelowych zużycia zestawów kołowych

Stanisław GUZOWSKI¹, Maciej MICHNEJ²

Streszczenie

Pojęcie frettingu obejmuje skutki działania złożonych zjawisk zachodzących na powierzchniach elementów dociskanych do siebie i obciążonych zmienną siłą. Obecnie panuje zgodność, że 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. Aktualna kwerenda czasopism obejmująca tę tematykę, a w szczególności *Wear* lub *International Tribology* wskazuje, że problem zużycia frettingowego jest rozpatrywany głównie pod względem wpływu doboru materiału lub procesu technologicznego na inicjację zużycia w węźle tribologicznym. Autorzy podjęli próbę wyjaśnienia rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu koło – oś kolejowego zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół. Wstępna eksploatacja zestawu pokazała, że już po niewielkim przebiegu istniały duże problemy w zmianie rozstawu kół. Po demontażu zestawu kołowego obserwacje powierzchni podpięcia osi pokazały występowanie uszkodzeń frettingowych w obszarze styku z piastą koła powodujące zablokowanie koła na osi w trakcie zmiany jego rozstawu. Badania na rzeczywistym obiekcie jakim jest zestaw kołowy są trudne, z tego względu autorzy zaproponowali badania modelowe przy symulacji rzeczywistych warunków eksploatacji, a metodyka przeprowadzenia tego typu badań jest głównie tematem niniejszego artykułu.

Słowa kluczowe: zużycie frettingowe, zestaw kołowy, symulacja, analiza wymiarowa

1. Wprowadzenie

Pojęcie frettingu obejmuje skutki działania złożonych zjawisk zachodzących na powierzchniach dociskanych do siebie i obciążonych zmienną siłą elementów. Obecnie panuje zgodność, że 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 [6]. Rozbieżności pomiędzy poszczególnymi badaczami wynikają głównie z przyjęcia jednego z tych procesów jako inicjującego rozwój zużycia frettingowego.

Badania zużycia frettingowego były prowadzone przede wszystkim dla skojarzeń o styku skoncentrowanym lub płaskim i również ich dotyczyły proponowane modele zużycia [5, 8, 12, 13]. Badania te były realizowane przede wszystkim w latach pięćdziesiątych do osiemdziesiątych ub. wieku. Aktualna kwerenda czasopism obejmująca powyższą tematykę, a w szczególności *Wear* lub *International Tri-*

bology wskazuje, że problem zużycia frettingowego jest rozpatrywany głównie pod względem wpływu doboru materiału lub procesu technologicznego na inicjację zużycia w węźle tribologicznym. Ponieważ brakuje publikacji dotyczących badań mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego w rzeczywistych węzłach elementów maszyn lub pojazdów, podjęto próbę wyjaśnienia rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu koło – oś kolejowego zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół. Wstępna eksploatacja zestawu pokazała, że już po niewielkim przebiegu istniały duże problemy w zmianie rozstawu kół. Obserwacje powierzchni podpięcia osi po demontażu zestawu kołowego pokazały występowanie uszkodzeń frettingowych w obszarze styku z piastą koła powodujące zablokowanie koła na osi w trakcie zmiany jego rozstawu. Badania na rzeczywistym obiekcie jakim jest zestaw kołowy są trudne, dlatego autorzy zaproponowali badania modelowe przy symulacji rzeczywistych warunków eksploatacji a metodyka przeprowadzenia tego typu badań jest głównie tematem niniejszego artykułu.

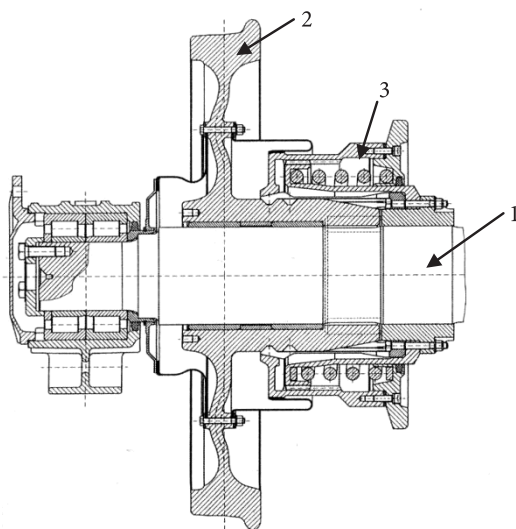
¹ dr hab. inż., prof. PK; Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych; e-mail: wojtek@mech.pk.edu.pl.

² dr inż.; Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych.

2. Obiekt badań

Klasyczny zestaw kołowy pojazdów szynowych składa się z osi i dwóch kół, które są połączone z osią przez wtlaczenie. 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 dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku w Centralnym Biurze Konstrukcyjnym PKP w Poznaniu zaprojektowano i wykonano zestaw kołowy SUW2000, który umożliwiał bezobsługowy, samoczynny przejazd z toru o jednej szerokości na tor o innej szerokości, dokonywany na torowym stanowisku przestawczym [9].

Fragmencnt przekroju zaprojektowanego zestawu przedstawiono na rysunku 1. Istotnym elementem przedstawionej konstrukcji jest połączenie koła z osią. W przeciwieństwie do klasycznego zestawu kołowego, w którym koła są trwale połączone z osią w wyniku wtlaczenia, 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 tabelicy 1.

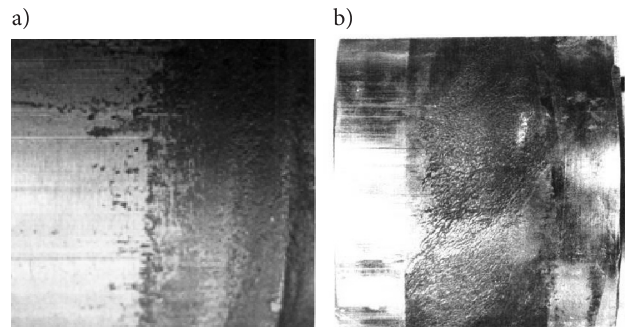


Rys. 1. Przekrój zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół SUW2000 [9]; 1) oś zestawu kołowego, 2) koła przemieszczające się po osi zestawu, 3) mechanizm blokujący

Fig. 1. Cross section of a wheel set with automatic change of wheel track SUW2000 [9]; 1) wheel set axle, 2) wheels rolling on the set axle, 3) lockup mechanism

Wstępna eksploatacja zestawu pokazała, że już po niewielkim przebiegu (około 1,5 tys. km) istnieją duże

problemy podczas zmiany rozstawu kół [9]. Znacznie wzrastała siła niezbędna do przemieszczenia poosiowego kół, prowadząc nawet do uszkodzeń stanowiska przestawczego. Obserwacje powierzchni podpiąścia 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 wtlaczone). Na rysunku 2 przedstawiono fragment osi obu rodzajów zestawu kołowego ze zużyciem frettingowym na ich powierzchni



Rys. 2. Zużycie frettingowe na brzegu podpiąścia osi:

a) tradycyjnego zestawu kołowego [3], b) zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół [9]

Fig. 2. Fretting wear at the edge of axle wheel seat: a) traditional wheel set [3], b) wheel set with automatic wheel track change [9]

Zużycie, którego charakterystyczny obraz przedstawiono na rysunku 2, obejmuje obszar od czoła piasty w głąb połączenia o szerokości około 30 mm. Zużycie występuje na całym obwodzie powierzchni podpiąścia w postaci charakterystycznego pierścienia. Zaobserwowane uszkodzenia powierzchni w tym obszarze to głównie wżery oraz narosty. Obszar ten cechuje się również zabarwieniem brunatno-czarnym, świadczącym o jego utlenieniu. Jediną 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 o pasowaniu obrotowym występuje po obu stronach osi zestawu kołowego.

Bezpośrednie badania na rzeczywistym obiekcie, jakim jest zestaw kołowy, są znacznie utrudnione. Wynika to z wielkości obiektu oraz trudności nie tylko ekonomicznych, związanych z doбором odpowiedniego stanowiska badawczego, a przede wszystkim z badaniem procesów zużycia w samym połączeniu. Uszkodzenia powierzchni składające się na zużycie

frettingowe mają miejsce w warstwach wierzchnich połączonych elementów na głębokości od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Również szerokość obszaru zużycia jest niewielka – rzędu kilku milimetrów. Z tego względu badanie tego typu zjawisk jest możliwe tylko na niedużych próbkach pozwalających na wykorzystanie m.in. mikroskopii skaningowej do obserwacji obrazu uszkodzeń.

Badanie zjawisk zużycia frettingowego w połączeniu koło – oś zestawu kołowego, zgodnie z klasyfikacją badań eksperymentalnych Heinkégo, można prowadzić jako badania modelowe na prostych próbkach przy symulacji rzeczywistych warunków eksploatacji [10].

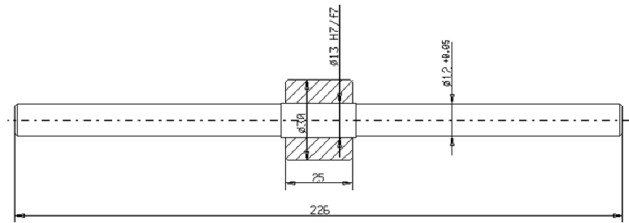
Zaletą tego typu badań jest przede wszystkim:

- prosta konstrukcja próbki,
- łatwy dobór typowego stanowiska do badań zużyciowych,
- znaczne skrócenie czasu badań,
- możliwość szczegółowej oceny zużycia w strefie połączenia przez wykorzystanie m.in. badań metalograficznych i metrologicznych,
- obniżenie kosztów wykonania modelu połączenia i samych badań.

Wadą takiego podejścia jest konieczność weryfikacji uzyskanych wyników podczas badań na obiekcie rzeczywistym.

3. Model badawczy

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 [5]. Wymiary próbki przedstawiono na rysunku 3. 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. 3. Wymiary próbki do badań modelowych [4]

Fig. 3. Sample dimensions for model tests [4]

Do wstępnych badań wałek wykonano ze stali C45, a tulejkę ze stali 36HNM przez obróbkę skrawaniem bez dodatkowego umocnienia warstwy wierzchniej. Taki dobór materiałów zapewniał zbliżone własności do materiałów, z których wykonany był obiekt rzeczywisty w wersji prototypowej (tablica 1). Tak wykonany model miał stanowić punkt odniesienia do innych wariantów skojarzenia wałek – tuleja.

Do badań zużycia wykorzystano maszynę zmęczeniową, która pozwala na uzyskanie parametrów symulujących rzeczywiste warunki eksploatacji zestawu kołowego. Konstrukcja maszyny umożliwia otrzymanie okresowo zmiennego obciążenia z równoczesnym zginaniem obracającej się próbki (rys. 4). 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.

Siła Q jest bazowym obciążeniem próbki podczas zginania obrotowego, natomiast siła P ma wytworzyć docisk między wałkiem a tuleją. Siły $P + Q$ symulują rzeczywiste obciążenie statyczne zestawu kołowego.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat obciążenia próbki na maszynie wytrzymałościowej 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:

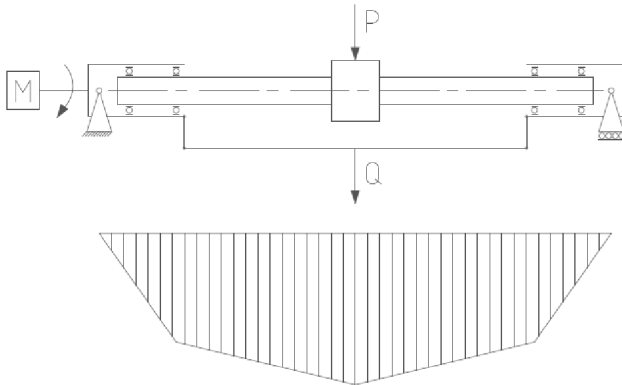
- obroty – $n = 1360$ obr/min,
- obciążenie próbki – $Q = 300$ N,

Tablica 1

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

Oznaczenie materiału	Skład chemiczny [%]						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	P _{max}	S _{max}
ER7	0,52	0,80	0,40	0,30	0,08	0,020	0,015
A1N	0,40	1,20	0,50	0,30	0,08	0,020	0,020
C45	0,42–0,50	0,50–0,80	0,10–0,40	0,30	0,10	0,040	0,040
36HNM	0,32–0,40	0,50–0,80	0,17–0,37	0,90–1,2	0,15–0,25	0,035	0,035

- obciążenie próbki – $P = 50$ N,
- liczba cykli – $r > 6 \times 10^6$.



Rys. 4. Schemat obciążenia próbki na maszynie wytrzymałościowej i odpowiadający mu rozkład momentu zginającego

Fig. 4. Scheme of sample loading on a testing machine of MUJ type and corresponding to it bending moment distribution

Przyjęta prędkość obrotowa próbki odpowiada prędkości 75 km/h wagonu kolejowego. W badaniach zużycia próbki modelującej połączenie tuleja ślizgowa – oś zestawu kołowego, przyjęto wartość obciążeń, dla których wartość naprężeń na powierzchni podpięcia waleczka 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.

4. Wyznaczenie kryteriów podobieństwa mechanicznego

W badaniach eksperymentalnych prowadzonych na modelach, ważne jest zachowanie kryteriów podobieństwa mechanicznego umożliwiających przenoszenie wyników tych badań na obiekty rzeczywiste [1, 2]. Modelowanie na stanowisku badawczym tylko zasadniczych parametrów procesu upraszcza i ułatwia eksperyment, natomiast odtworzenie wszystkich parametrów jest zazwyczaj niemożliwe ze względu na złożoność i zakres eksperymentu. Trudność modelowania procesu zużycia wynika z faktu, że przyjęcie takich samych materiałów, warunków styku, obciążenia itp. nie odwzorowuje wszystkich zjawisk zużyciowych spotykanych w praktyce. W badaniach tych może być przydatna teoria podobieństwa, której matematycznym narzędziem jest analiza wymiarowa [11]. Elementy tej teorii wykorzystano do wyznaczenia kryteriów podobieństwa mechanicznego przyjętego do badań modelu połączenia o pasowaniu obrotowym w stosunku do obiektu rzeczywistego (połączenie o pasowaniu obrotowym koło – oś zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół) [1, 2]. Miara

wytrzymałości zmęczeniowej połączenia o pasowaniu obrotowego koła z osią są [4]:

- nacisk wywołany na powierzchni kontaktu koła z osią: – p [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$],
- moment zginający jaki może przenieść połączenie – Mg [$\text{N} \cdot \text{mm}$].

Na wytrzymałość zmęczeniową mają wpływ następujące czynniki traktowane jako zmienne niezależne:

- zastępczy moduł sprężystości – E [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$],
- długość skojarzenia elementów pary ciernej – l [mm],
- średnica podpięcia osi – D [mm],
- luz – h [mm],
- współczynnik długości nośnej profilu chropowatości – t_p [%],
- częstotliwość obciążeń – n [Hz],
- chropowatość powierzchni podpięcia osi – R_{a1} [μm],
- chropowatość powierzchni otworu piasty koła – R_{a2} [μm],
- obciążenie normalne – P [N].

Nacisk można przedstawić za pomocą następującej funkcji:

$$p = F(t_p, P, h, R_{a1}, R_{a2}, l, D, E, n) \quad (1)$$

Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami [7], macierz wymiarowa wielkości ujętych w zależności (1) przyjmie postać:

	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
	p	t_p	P	h	R_{a1}	R_{a2}	l	D	E	n
L	-1	0	1	1	1	1	1	1	-1	0
*M	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
T	-2	0	-2	0	0	0	0	0	-2	-1

gdzie: L [m] – długość, M [kg] – masa, T [s] – czas

Funkcja F otrzymuje swoją postać na podstawie wyników badań doświadczalnych. Wszystkie założenia zastosowania metody macierzowej są spełnione. Równanie (1) jest równoważne równaniu bezwymiarowemu (2) zgodnie z twierdzeniem Buckingham'a, które mówi, że liczba modułów bezwymiarowych jest równa liczbie niezależnych parametrów fizycznych pomniejszonych o liczbę wymiarów podstawowych [1].

$$\pi_0 = F(\pi_1, \dots, \pi_{ii}) \quad (2)$$

gdzie: π_i ($i = 0, 1, \dots, 6$) tworzą zupełny układ liczb kryterialnych zmiennych: $p \dots n$.

Z macierzy wynika następujący układ równań wymiarowych, który rozwiązano względem niewiadomych p_7, p_8 oraz p_9 .

$$\begin{aligned} -p_0 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 - p_8 &= 0 \\ p_0 + p_2 + p_8 &= 0 \\ -2p_0 - 2p_2 - 2p_8 - p_9 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Po uwzględnieniu swobodnych niewiadomych p_i ($i = 0, 1, \dots, 6$) oraz specjalnego ciągu wartości liczbowych otrzymano macierz rozwiązań [1]:

π_i	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
	p	t_p	P	h	R_{a1}	R_{a2}	l	D	E	n
π_0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
π_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
π_2	0	0	1	0	0	0	0	-2	-1	0
π_3	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
π_4	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0
π_5	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0
π_6	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0

Z macierzy po przekształceniach otrzymano następujący układ liczb kryterialnych D

$$\begin{aligned} \pi_0 = \frac{p}{E}; \pi_1 = t_p; \pi_2 = \frac{P}{D^2 E}; \pi_3 = \frac{h}{D}; \\ \pi_{4,5} = \frac{R_{a1}}{R_{a2}}; \pi_6 = \frac{l}{D} \end{aligned} \quad (4)$$

Na podstawie twierdzenia Buckingham'a zależność (1) można przedstawić w postaci bezwymiarowej oraz wymiarowej. Postać funkcji f może być wyznaczana doświadczalnie.

$$\frac{p}{E} = f\left(t_p; \frac{P}{D^2 E}; \frac{h}{d}; \frac{R_{a1}}{R_{a2}}; \frac{l}{D}\right)$$

– bezwymiarowa postać równania (5)

$$p = E \left[f\left(t_p; \frac{P}{D^2 E}; \frac{h}{d}; \frac{R_{a1}}{R_{a2}}; \frac{l}{D}\right) \right]$$

– wymiarowa postać równania (6)

Moment zginający można wyznaczyć zależnością:

$$M_g = G(t_p, P, h, R_{a1}, R_{a2}, l, D, E, n) \quad (7)$$

Po wyznaczeniu w przedstawiony sposób, moment M_g przyjmuje postać:

$$\frac{M_g}{D^2 E} = g\left(t_p; \frac{P}{D^2 E}; \frac{h}{d}; \frac{R_{a1}}{R_{a2}}; \frac{l}{D}\right)$$

– bezwymiarowa postać równania (8)

$$M_g = D^2 E \left[f\left(t_p; \frac{P}{D^2 E}; \frac{h}{d}; \frac{R_{a1}}{R_{a2}}; \frac{l}{D}\right) \right]$$

– wymiarowa postać równania (9)

Postać funkcji g może być wyznaczana doświadczalnie. W tabelicy 2 przedstawiono przykładowo obliczone wartości wybranych liczb kryterialnych według zastosowanej metodyki [4].

Tabela 2

Wartości wybranych liczb kryterialnych

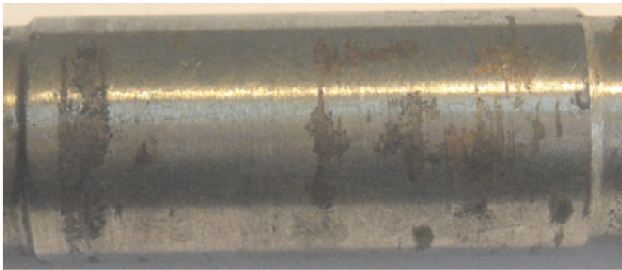
π_i	Obliczane parametry	Obiekt rzeczywisty	Model	Wynik porównania
π_0	p [MPa]	69,2–103,9	37,4–110,8	Ob \approx M
π_2	P/D^2 [N·mm ²]	2,01	1,09	Ob \neq M
π_3	h/D [mm]	0,001	0,001	Ob = M
$\pi_{4,5}$	R_{a1}/R_{a2}	0,5	0,7–0,2	Ob \approx M
π_6	l/D	1,72	1,84	Ob \approx M

Z porównania wartości liczb kryterialnych wynika, że spełnione są przede wszystkim warunki podobieństwa geometrycznego samego połączenia oraz stan naprężeń, natomiast nie jest spełniony warunek obciążeń zewnętrznych, ponieważ wynikał on z ograniczeń maszyny zmęczeniowej i wytrzymałości samego modelu połączenia. Wygenerowane uszkodzenia w modelu połączenia, przy mniejszym zakresie obciążeń zewnętrznych, mogą sugerować ich większą intensywność na obiekcie rzeczywistym. Zachowanie kryteriów podobieństwa mechanicznego umożliwi przeniesienie wyników badań uzyskanych na modelu połączenia o pasowaniu obrotowym na połączenie rzeczywiste.

5. Badania zużyciowe modelu połączenia koło – oś

Badania próbki bazowej miały na celu weryfikację doboru modelu przez uzyskanie podobnego obrazu zużycia jak w obiekcie rzeczywistym oraz jako odnie-

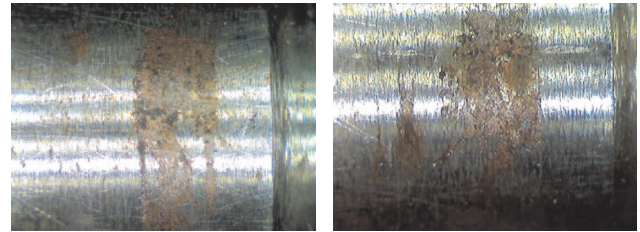
sienie do dalszych badań. Obserwacje makrograficzne powierzchni podpięcia wałka stalowego w próbce bazowej pokazują, że uszkodzenia powierzchni występują po obu stronach podpięcia wałka (rys. 5). Duża powierzchnia styku współpracujących elementów węgła tribologicznego stwarza warunki do powstawania szepień adhezyjnych na brzegach połączenia, które powodują destrukcję warstwy wierzchniej, a w konsekwencji powstawanie wyraźnych śladów zużycia frettingowego.



Rys. 5. Powierzchnia wałka bazowego po badaniach zmęczeniowych – wyraźne ślady zużycia frettingowego na brzegach wałka z mniejszą intensywnością do środka połączenia, powiększ. około 3× [4]

Fig. 5. Base shaft surface after fatigue tests – distinct traces of fretting wear on the shaft edges of lower intensity into the connection centre, magnified. about 3× [4]

Na fotografiach makroskopowych powierzchni wałka przedstawionych na rysunku 6, 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.

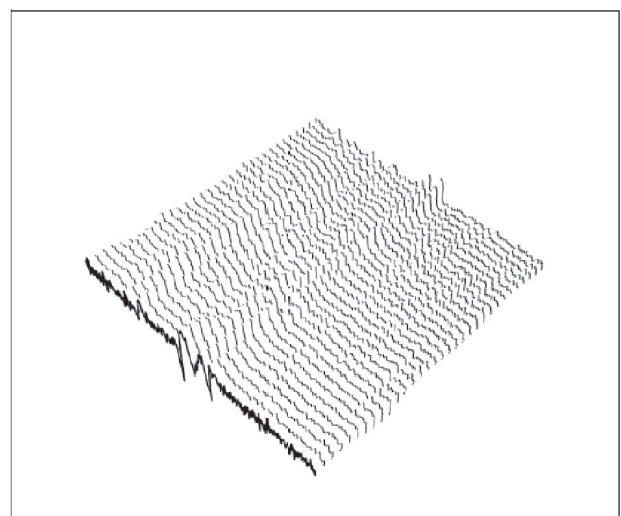
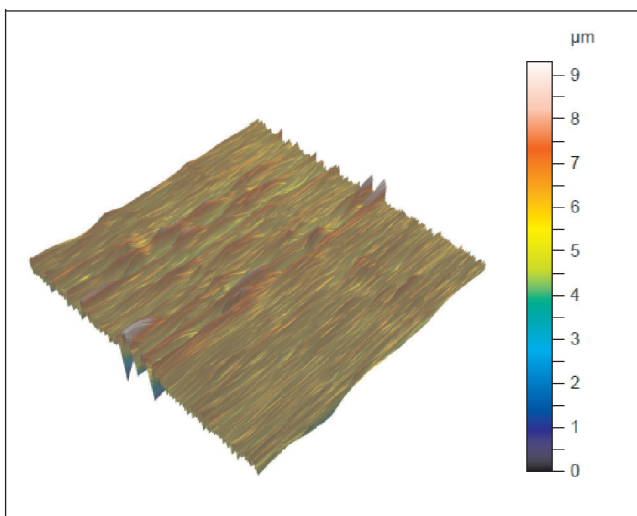


Rys. 6. Próbkę bazową po badaniu zużyciowym, powiększ. około 15×. Brak obróbki wzmacniającej powierzchnie. Widoczne ślady zużycia frettingowego [4]

Fig. 6. Base sample after fretting wear, magnified about 15×. Lack of machining strengthening the surfaces. Visible traces of fretting wear [4]

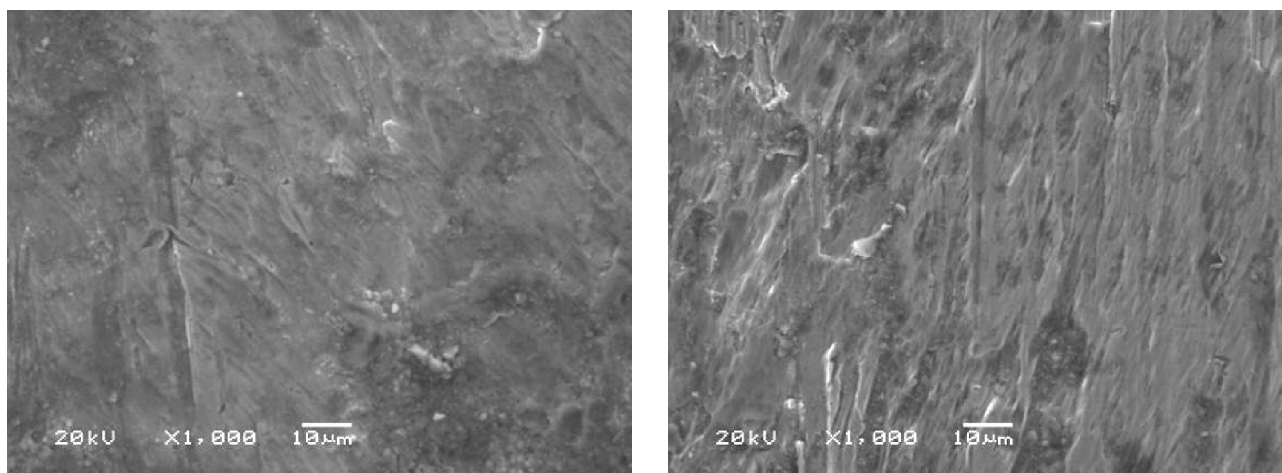
Na obrazach przestrzennego profilu chropowości (rys. 7) oraz obserwacji skaningowych (rys. 8) podpięcia wałka próbki bazowej można zauważyć charakterystyczne narosty materiału, które ulegają deformacji plastycznej i utlenianiu. Obserwacje powierzchni wykazały również miejscowe wytarcia oraz mikrowżery. Uszkodzenia powierzchni w postaci mikronarostów oraz mikrowżerów mają swoje źródło w zjawiskach adhezji, stanowiących element mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego. Mechanizm ten w omawianym przypadku jest również związany z występowaniem względnych przemieszczeń stycznych pomiędzy powierzchniami połączonych elementów. Założone obciążenie generuje maksymalną amplitudę oscylacji pomiędzy powierzchnią wałka i tulejki na brzegu połączenia.

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 zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół.



Rys. 7. Przestrzenny obraz profilu chropowości powierzchni wałka w obszarze zużycia frettingowego [4]

Fig. 7. Spatial image of shaft surface roughness profile in the area of fretting wear [4]



Rys. 8. Obrazy zużycia powierzchni wałka bazowego wykonane na mikroskopie skanującym, powiększ. 1000× [4]

Fig. 8. Base shaft surface wear images, magnified 500× [4]

6. Zakończenie

Zachowanie równości liczb kryterialnych dla obiektu rzeczywistego i modelu połączenia świadczy o jego prawidłowym doborze. Jest to bardzo ważne stwierdzenie które pozwala wyniki badań zużycia uzyskane na modelu połączenia, przenieść bezpośrednio na obiekt rzeczywisty. Badanie zjawisk frettingowych, na zaproponowanym modelu połączenia, umożliwia wykonanie wielu obserwacji i pomiarów, których nie można wykonać na obiekcie rzeczywistym. Szczególnie istotne jest zbadanie powierzchni styku obu elementów i to zarówno przed badaniami, jak i po badaniach zużycia. Opisane badania i obserwacje powierzchni styku, w przypadku tak dużego obiektu jakim jest zestaw kołowy, są możliwe do wykonania tylko na przyjętym modelu połączenia. Metoda analizy wymiarowej w wyznaczeniu kryteriów podobieństwa mechanicznego, jest dogodnym narzędziem w przypadku modelowych badań zużycia frettingowego na dużych obiektach.

Literatura

1. Furmanik K., Oleksiak Z.: *Analiza wymiarowa w modelowaniu tarcia i zużycia*, Problemy Eksploatacji, 2002 nr 1.
2. Furmanik K.: *Możliwości wykorzystania analizy wymiarowej w badaniach oporu przeginalnego taśmy na bębnach przenośnika*, Mining Science – Fundamental Problems of Conveyor Transport, vol. 21(2), 2014.
3. Guzowski S.: *A model of fretting wear in wheel set clamped joint*. Archives of Transport, wyd. PAN, vol. 15, z. 1, 2003.
4. Guzowski S., Michnej M.: *Influence of technological methods increasing surface layer durability on axles fretting wear in railway wheel sets*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2016; 18 (1): 1–9.
5. Hoepfner D.W.: *Fretting fatigue case studies of engineering components*. Tribology International, Vol. 39, Issue: 10, October, 2006.
6. Neyman A.: *Fretting w elementach maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2003.
7. Nowak Z.: *Ogólna metoda wyznaczania zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych*, Czasopismo Techniczne, z.6, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1969.
8. Shinde S., Hoepfner D.W.: *Observations on fretting damage transition to cracking; state of the art and preliminary observations*, Tribology International, Vol: 39 Issue: 10, October, 2006.
9. Suwalski R.M.: *System samoczynnej zmiany rozstawu kół pojazdów szynowych*, Monografia AGH, Kraków, 2006.
10. Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*, Wydawnictwo ITE, Radom, 1997.
11. Szücs E.: *Modelowanie matematyczne w fizyce i technice*, WNT Warszawa, 1977.
12. Waterhouse R.B.: *Fretting fatigue*, Applied Science Publishers Ltd., London, 1981.
13. Zhu M.H., Zhou Z.R.: *On the mechanisms of various fretting wear modes*, Tribology International, Vol: 44 Issue: 11, October, 2011.

Dimensional Analysis in Wear of Wheelsets Model Studies

Summary

The notion of fretting comprises the effects of complex phenomena actions on the surfaces pressed against each other and loaded by a variable force of the elements. At present mechanical engineers agree that fretting is a phenomenon of a very complex wear mechanism, in which there overlap or follow in succession: adhesive wear, surface fatigue, exfoliation, oxidation, irregularities apex wear and loose products wear. The present query of periodicals dealing with the above subject, especially *Wear* or *International Tribology*, shows that the fretting wear problem is mainly considered in the aspect of the influence of material selection or technological process on the initiation of wear in the tribological node. There are no publications on the studies of fretting wear development mechanism in actual nodes of machines or vehicles. Carrying out tests on a real object such as a wheelset is very difficult. Fretting wear studies of a connection a wheel – a wheelset axle, in agreement with Heinke's classification of experimental tests, can be carried out as model tests on simple specimens when simulating real exploitation conditions. The advantage of such studies is first of all: a simple construction of a sample, easy selection of a typical stand for fretting wear tests, a significant shortening of the testing time, the possibility of detailed evaluation of wear in the connection area by making use of, among others, metallographic and metrological tests, lowering the costs of making the connection model and the tests themselves. On the other hand the disadvantage is the necessity of the achieved results verification with those carried out on a real object.

Keywords: fretting wear, railway wheelset, simulation, dimensional analysis

Размерный анализ в испытаниях моделей износа колесных пар

Резюме

Термин „фреттинг” относится к последствиям сложных явлений происходящих на соединенных поверхностях подлежащих действию переменной силы элементов. Ныне существует широкий консенсус в отношении к тому, что фреттинг это явление с очень сложным механизмом износа, в котором совпадают или следуют друг за другом: адгезионный износ, поверхностная усталость, отслоение, окисление, трение верхушками неровности и продуктами износа.

Последняя проверка журналов по вышеуказанной тематике, особенно *Wear* или *International Tribology* указывает, что проблема фреттингового износа рассматривается прежде всего на предмет влияния подбора материала или технологического процесса на инициирование износа трибологического узла. Отсутствует публикаций на тему исследований механизма развития фреттингового износа в настоящих узлах элементов машин или подвижных единиц. Авторы нынешней работы попытались объяснить развитие фреттингового износа в соединении колесо – ось колесной пары. Предварительная эксплуатация указала, что уже после небольшого пробега появились большие проблемы во время изменения расстояния колес. Наблюдения подступничной части оси после демонтажа колесной пары указали возникновение фреттинговых повреждений в сфере контакта со ступицей колеса вызывающие блокировку колеса на оси во время изменения его расстояния. Исследования на настоящим объекте очень сложны. Поэтому авторы предложили испытания с моделированием настоящих условий эксплуатации, а методика этого типа исследований является главной темой этой работы.

Ключевые слова: фреттинговый износ, колесная пара, моделирование, размерный анализ