

Stanisław GUZOWSKI*, Maciej MICHNEJ*

ZUŻYCIE FRETINGOWE W POŁĄCZENIU O PASOWANIU OBROTOWYM

FRETTING WEAR IN THE ROTATIONAL JOINT

Słowa kluczowe:

pasowanie obrotowe, zużycie, fretting

Key words:

rotational joint, wear, fretting

Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę wyjaśnienia rozwoju zużycia frettingowego połączeniu typu wałek–tulejka o pasowaniu obrotowym. Warunkiem rozwoju zużycia są naciski powierzchniowe skojarzonych powierzchni i oscylacje o bardzo małej amplitudzie. Przedstawiono analizę spełnienia powyższych warunków w badanym połączeniu oraz wyniki badań zużyciowych modelu połączenia. W zakończeniu opisano prawdopodobny mechanizm rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu.

* Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Polska, tel. (12) 374 36 58, e-mail:wojtek@mech.pk.edu.pl.

WPROWADZENIE

W konstrukcji środków transportu występuje wiele połączeń o pasowaniu obrotowym. W warunkach pracy mają możliwość wykonywania przemieszczeń głównie w kierunku obwodowym lub są blokowane, a przemieszczenia obwodowe lub poosiowe wykonywane są w określonych cyklach pracy. Można do nich zaliczyć m.in. łożyska ślizgowe, połączenia sworzniowe. W skojarzeniach tych mają miejsce głównie naciski powierzchniowe będące wynikiem działania na te połączenia np. sił normalnych. Mogą natomiast zaistnieć przypadki, że w warunkach pracy połączenie poddawane będzie siłom stycznym determinującym poślizgi pomiędzy połączonymi elementami.

Przykładem tego może być połączenie osi zestawu kołowego pojazdu szynowego z tuleją piasty koła zestawu kołowego z automatyczną zmianą rozstawu kół. W przeciwieństwie do tradycyjnego zestawu kołowego, gdzie koła połączone są trwale z osią w wyniku wtłaczania, jest ono połączeniem o pasowaniu obrotowym. Rozwiązanie to umożliwi przemieszczanie poosiowe kół w trakcie zmiany ich rozstawu przy następnym zablokowaniu koła względem osi w czasie jazdy. Wstępna eksploatacja zestawu pokazała, że już po niewielkim przebiegu (ok. 1,5 tys. km) istnieją duże problemy w zmianie rozstawu kół [L. 1]. Znacznie wzrastała siła niezbędna do przemieszczenia poosiowego kół, prowadząc nawet do uszkodzeń stanowiska przestawczego. Obserwacje powierzchni podpięcia osi po demontażu zestawu kołowego pokazały występowanie m.in. uszkodzeń frettingowych w obszarze styku z piastą koła.

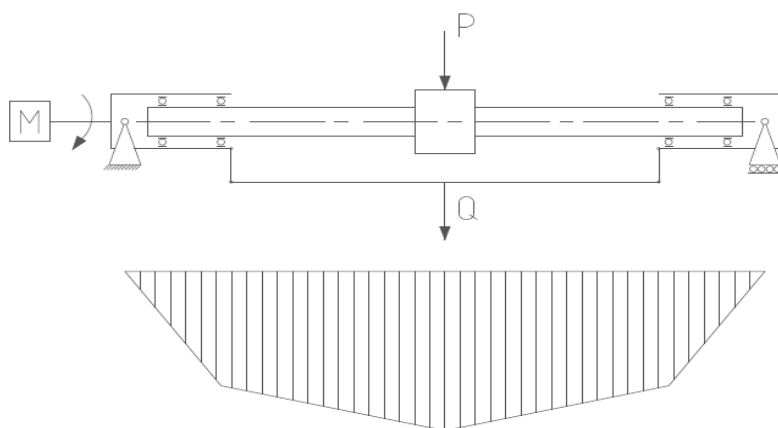
Rozwój zużycia frettingowego jest uwarunkowany występowaniem nacisków powierzchniowych w skojarzeniu oraz oscylacyjnych poślizgów o bardzo małej amplitudzie [L. 2, 3].

Pojęcie frettingu obejmuje skutki działania złożonych zjawisk zachodzących na powierzchniach dociskanych do siebie i obciążonych zmienną siłą elementów. 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 [L. 2]. Rozbieżności w opisie procesów zużywania pomiędzy poszczególnymi badaczami wynikają głównie z przyjęcia jednego z tych procesów jako inicjującego rozwój zużycia frettingowego. Badania zużycia frettingowego prowadzone były przede wszystkim dla skojarzeń o styku skoncentrowanym lub płaskim i również ich dotyczyły proponowane modele zużycia [L. 4, 5, 6].

W świetle powyższych faktów w artykule przedstawiona zostanie analiza możliwości wystąpienia poślizgów w połączeniu o pasowaniu obrotowym oraz wyniki badań wskazujących na możliwość wystąpienia zużycia frettingowego. W zakończeniu zostanie opisany prawdopodobny mechanizm rozwoju tego zużycia w połączeniu o pasowaniu obrotowym.

PRZEMIESZCZENIA OSCYLACYJNE W POŁĄCZENIU OBROTOWYM WAŁEK–TULEJKA

Dla wyjaśnienia mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu o pasowaniu obrotowym przeprowadzono analizę oraz badania na próbkach modelujących rzeczywiste połączenie koło–oś w zestawie kołowym z automatyczną zmianą rozstawu kół. Wymiary próbki (wałek, tulejka) oraz materiał zostały tak dobrane, aby zapewnić podobieństwo do prototypowego węzła rzeczywistego połączenia koło–oś. Średnica zewnętrzna wałka oraz wewnętrzna tulejki została tak dobrana, aby zapewnić pasowanie obrotowe w połączeniu. W trakcie badań zmęczeniowych tulejka była blokowana względem wałka (podobnie jak w rzeczywistym zestawie), aby uniemożliwić jej przemieszczanie obwodowe oraz wzdłużne względem wałka przy zachowaniu przemieszczeń promieniowych. Na **Rys. 1** pokazano schemat obciążenia próbki na maszynie zmęczeniowej podczas badań zużyciowych w warunkach obrotowego zginania.



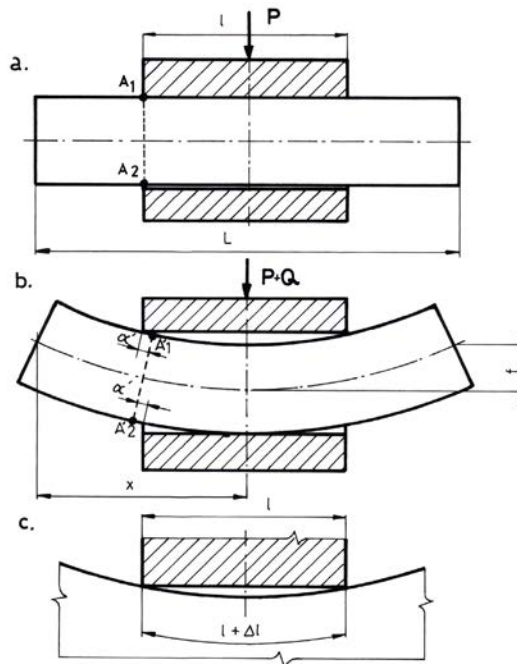
Rys. 1. Schemat obciążenia próbki i rozkład momentu gnącego

Fig. 1. Loading of test piece and bending moment distribution on MUJ machine

Na przedstawionym schemacie siła Q stanowi podstawowe obciążenie próbki podczas obrotowego zginania, natomiast siła P jest dodatkowym docięciem tulejki do wałka w celu wytworzenia nacisków powierzchniowych pomiędzy skojarzonymi elementami.

Pomiar rzeczywistej amplitudy poślizgu pomiędzy powierzchnią styku tulejki i wałka w badaniach zużyciowych obrotowo-giętnych jest trudny. Jak wskazują natomiast 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 **Rys. 2**

przedstawiono schemat występowania poślizgów pomiędzy połączonymi elementami o pasowaniu obrotowym. Na **Rys. 2a** 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. 2b**) ulegnie również obrotowi płaszczyzna przechodząca przez punkty A_1 – A_2 . Przyjme 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. 2. 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

Fig. 2. A scheme of determining slide amplitude between the butting surface of the sleeve and the shaft under-hub surface [L. 9]: a) a sample in a free state, b) a sample loaded with a bending moment, c) a scheme of shaft and sleeve connection to determine oscillation amplitude

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 przy brzegu tulejki i 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. 2c**. Obciążenie próbki momentem gnącym spowoduje ugięcie wałka, czego wynikiem będzie wydłużenie jego powierzchni na długości styku z tulejką o wartość Δl . Jeżeli przyjmimy, 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 za pomocą wzorów:

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

stąd

$$\Delta l = \frac{\sigma_n \cdot l}{E} \quad (1)$$

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

Tabela 1. Szacunkowa wartość amplitudy poślizgu α oraz wartość strzałki ugięcia f_0, f_{rz} próbki

Table 1. The estimated value of the amplitude of the slip α and the value of deflection f_0, f_{rz}

Q [N]	α [mm]	f_0 [mm]	f_{rz} [mm]
1	2	3	4
350	0,0046	0,51	0,75

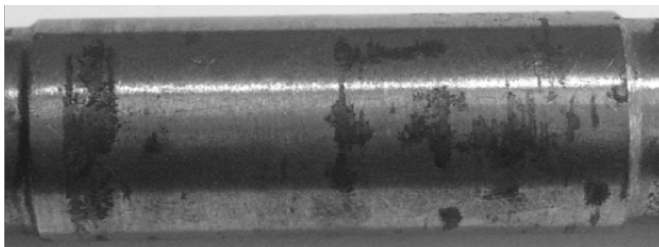
Według wzoru (1) amplituda oscylacji zależy od naprężeń normalnych, a więc i od wartości przyłożonego momentu gnącego, który z kolei będzie decydował o wartości ugięcia próbki. Będzie więc istniał ścisły związek pomiędzy ugięciem wałka, a amplitudą oscylacji. Wykorzystano to do zweryfikowania obliczonej szacunkowej wartości amplitudy oscylacji w porównaniu z amplitudą rzeczywistą. W tym celu obliczono analitycznie wartość strzałki ugięcia wałka f_0 i porównano ją z rzeczywistą zmierzoną wartością ugięcia próbki f_{rz} . Do obliczenia wartości ugięcia wałka posłużono się schematem obciążenia

próbki jak na **Rys. 1**. 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.

BADANIA ZUŻYCIOWE

Badania zużyciowe przeprowadzono na maszynie zmęczeniowej typu MUJ zapewniającej podobny charakter obciążenia w warunkach obrotowego zginania jak w rzeczywistym zestawie kołowym (**Rys. 1**). Badania wykonano na modelu, w którym oba elementy wałek i tulejka wykonane były ze stali, a ponadto w połączeniu nie stosowano środków smarnych (węzeł pracował na sucho). Przyjęcie takiego wariantu wykonania próbki podyktowane było uzyskaniem nieskażonego przez inne czynniki obrazu ewentualnego zużycia. Na uszkodzenie w strefie styku połączonych elementów będą miały wpływ jedynie naciski powierzchniowe od obciążenia siłą normalną P (**Rys. 1**) oraz poślizgi względne pomiędzy skojarzonymi powierzchniami w wyniku ugięcia obracającej się próbki. Są to jednocześnie warunki rozwoju zużycia frettingowego.

Parametry badania próbki na maszynie wytrzymałościowej były następujące: obroty $n = 1360$ obr/min, obciążenie próbki $Q = 300$ N oraz $P = 50$ N, liczba cykli $N \approx 6 \times 10^6$.



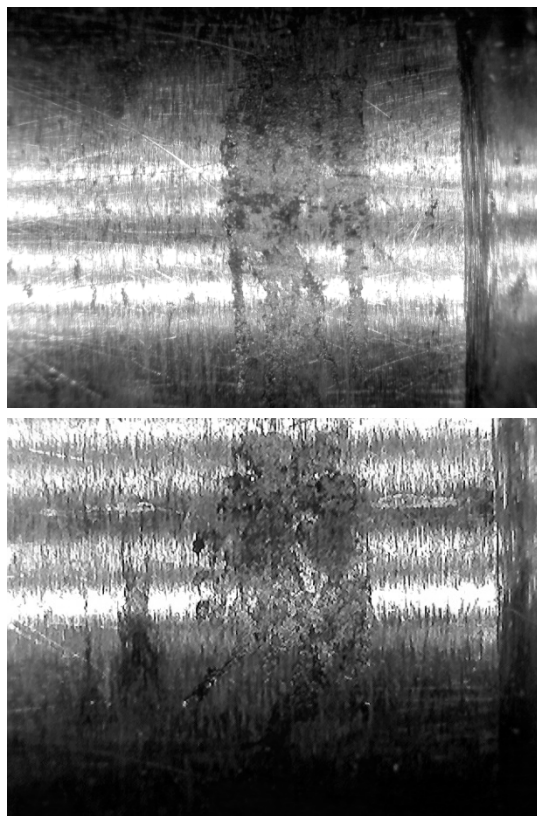
Rys. 3. Powierzchnia wałka po badaniach zmęczeniowych – wyraźne ślady zużycia frettingowego na brzegach wałka z mniejszą intensywnością do środka połączenia, pow. ok. 3×

Fig. 3. Surface after wear examination, clear signs of fretting wear on the edges of the shaft with less intensity inside connection, magnification about 3×

W wyniku przeprowadzonych badań zmęczeniowych stwierdzono występowanie na powierzchni wałków uszkodzeń typowych dla zużycia frettingowego. Na **Rys. 3** przedstawiono charakterystyczny obraz zarejestrowanych uszko-

dzeń na długości połączenia z tulejką. Charakterystyczną cechą dla tego rodzaju skojarzenia oraz warunków obciążenia jest rozkład uszkodzeń, który występuje głównie na brzegach połączenia.

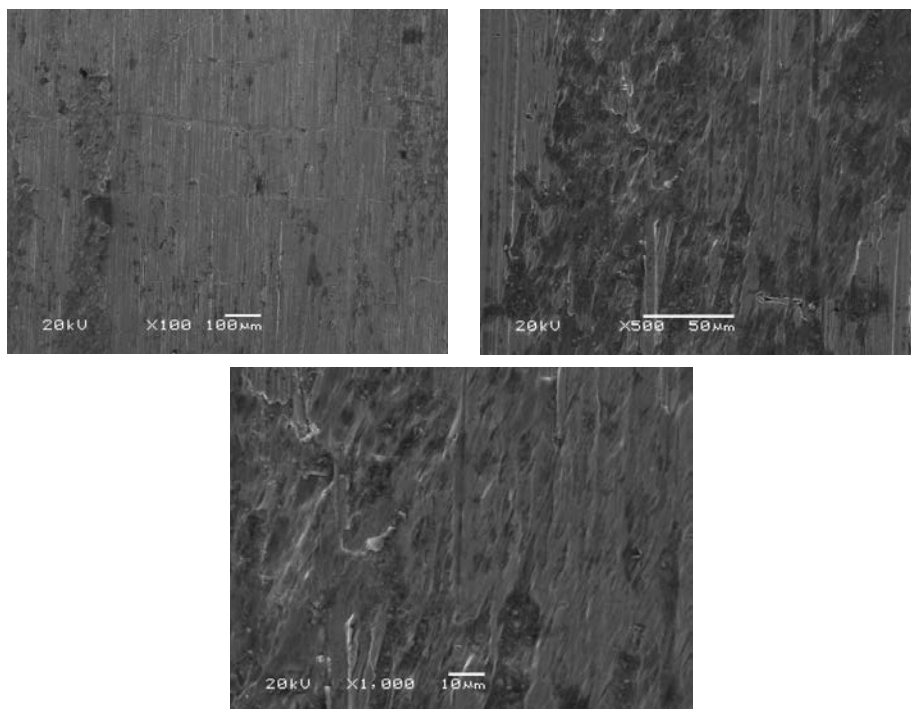
Na **Rys. 4** przedstawiono obraz makroskopowy uszkodzeń powierzchni w wyniku zużycia frettingowego dla wybranych fragmentów podpiaścia wałka, a na **Rys. 5** obraz uszkodzeń zarejestrowany na mikroskopie skaningowym.



Rys. 4. Obraz makroskopowy uszkodzeń frettingowych na powierzchni wałka – ślady korozji charakterystyczne dla frettingu, pow. ok. 3×

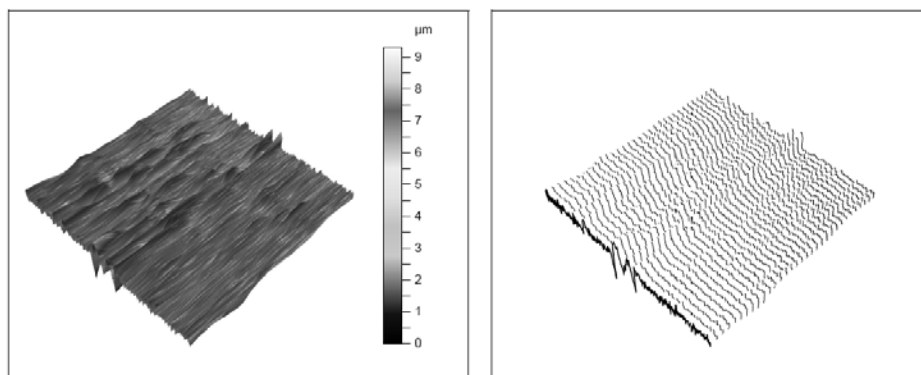
Fig. 4. Macroscopic image of fretting wear on the surface of the shaft – characteristic fretting corrosion, magnification about 3×

Przedstawione na **Rys. 3÷6** uszkodzenia na powierzchni wałka mają cechy charakterystyczne dla zużycia frettingowego. Podczas obserwacji makroskopowych stwierdzono, że na powierzchniach wałków w obszarze występowania zużycia frettingowego ma miejsce charakterystyczne zabarwienie brązowo-czarne typowe dla korozji atmosferycznej żelaza (tlenki żelaza). Z kolei zdjęcia z badań skaningowych wskazują, że utlenieniu ulegają wyłącznie te fragmenty powierzchni wałka, na których utworzyły się uszkodzenia w postaci narostów lub wżerów.



Rys. 5. Obraz skaningowy zużycia frettingowego na powierzchni podpięcia wałka – wżery i narosty materiału w strefie uszkodzenia oraz jego utlenienie, pow. 100×, 500× i 1000×

Fig. 5. A scanning image of fretting wear – growths pitting and damage to the material in the zone and its oxidation. magnification 100×, 500× i 1000×



Rys. 6. Przestrzenny obraz profilu chropowatości powierzchni wałka w obszarze zużycia frettingowego

Fig. 6. The spatial picture of the surface roughness profile in the area of fretting wear

Na **Rys. 6** przedstawiono przestrzenny obraz profilu chropowatości powierzchni wałka w wybranym fragmencie zawierającym obszar zużycia frettingowego z charakterystycznymi narostami i wżerami.

Zużycie na powierzchni wałków ma miejsce głównie przy brzegu połączenia z tulejką, co wskazuje na ścisły związek zużycia z amplitudą oscylacji.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Przytoczony obraz zużycia frettingowego w badanym połączeniu jest podobny do zużycia w połączeniu wciskowym wałek–tulejka poddanym analogicznym warunkom obciążenia [L. 7]. W rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym dominującą rolę w inicjacji zużycia spełnia zjawisko adhezji. Warunkiem rozwoju szepień adhezyjnych jest utworzenie obszarów rzeczywistego styku ciał pierwszych w wyniku wtłaczania jednego elementu w drugi (ścięcia mikronierówności, deformacja plastyczna WW i usunięcie warstwy tlenków). W przypadku połączenia o pasowaniu obrotowym, ze względu na charakter połączenia, utworzenie obszarów rzeczywistego styku ciał pierwszych będzie miało miejsce w trakcie obrotowego zginania próbki. W wyniku względnych przemieszczeń powierzchni tulejki i wałka, których amplituda jest największa na brzegu połączenia, ma miejsce zużycie ścierne 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 [L. 7] podobny mechanizm do połączenia o pasowaniu obrotowym jako kilkuetapowy 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. W tworzeniu się szepień adhezyjnych szczególną rolę odgrywać będą [L. 9, 10]:

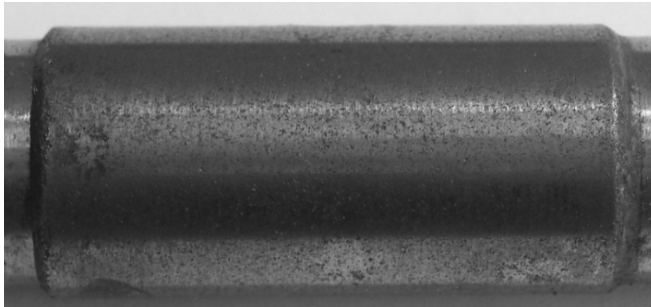
- własności fizykochemiczne skojarzonych powierzchni metalowych,
- wartość nacisku w styku skojarzonych powierzchni,
- brak warstw tlenkowych na powierzchni styku,
- wartość amplitudy oscylacji połączonych elementów.

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.

WNIOSKI

Jednym ze sposobów wyeliminowania lub ograniczenia adhezji a tym samym zużycia frettingowego jest m.in. wykonanie powierzchni elementów styku o dużym gradiencie twardości lub zastosowanie w połączeniu odpowiednich środków smarnych.

Na **Rys. 7** przedstawiono obraz powierzchni podpięcia wałka molibdenowanego skojarzonego w połączeniu o pasowaniu obrotowym ze stalową tulejką po badaniach zmęczeniowych wg tych samych parametrów. Twardość powierzchni molibdenowanej wynosiła 460 HV, natomiast wałka stalowego 210 HV. Widoczne jest całkowite wyeliminowanie zużycia frettingowego.



Rys. 7. Powierzchnia wałka molibdenowanego po badaniach zmęczeniowych – brak zużycia frettingowego, pow. ok. 3×

Fig. 7. Surface of molybdenum shaft after fatigue tests – no fretting wear, magn. ca. 3×

Podobny efekt uzyskano w przypadku zastosowania w skojarzeniu środka smarnego w postaci smaru Glacier [L. 11]. Wałek i tulejka wykonane były podobnie jak model połączenia o pasowaniu obrotowym – ze stali. Obraz powierzchni wałka po badaniach zmęczeniowych przedstawiono na **Rys. 8**.

Przytoczone przykłady powierzchni wałków po badaniach zmęczeniowych w innych wariantach wykonania niż model prototypowy dla ograniczenia zjawia-

ska adhezji potwierdzają bardzo korzystny efekt prowadzący do wyeliminowania zużycia frettingowego. Potwierdza to tym samym tezę, że proces zużycia frettingowego inicjowany jest przez zjawiska adhezji.



Rys. 8. Powierzchnia wałka stalowego smarowanego smarem Glacier po badaniach zmęczeniowych – brak zużycia frettingowego, pow. ok. 3×

Fig. 8. Surface of steel shaft lubricated with Glacier grease after fatigue tests – no fretting wear, magn. ca. 3×

LITERATURA

1. Suwalski R.: System samoczynnej zmiany rozstawu kół pojazdów szynowych. Monografia 154, wyd. AGH, Kraków 2006.
2. Neyman A.: Fretting w elementach maszyn. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003.
3. Waterhouse R.B.: Fretting corrosion. Pergamon Press Ltd, Oxford, 1972.
4. Шевеля В.В., Калда Г.С.: Фреттинг-усталость металлов. Изд. Хмельницький „Поділля”, 1998.
5. Waterhouse R.B.: Fretting fatigue. Applied Science Publishers Ltd., London 1981.
6. Pytko S., Szczerek M.: Fretting – forma niszczenia elementów maszyn. Tribologia nr 6, 1994.
7. Guzowski S.: Mechanizm zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym. Tribologia nr 5, 2012.
8. Guzowski S., Michnej M.: Wpływ wybranych środków smarnych na rozwój zużycia frettingowego w połączeniu obrotowym wałek–tuleja. Tribologia nr 5, 2012.
9. Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Wyd. ITeE – PIB, Warszawa 2007.
10. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Politechnika Poznańska, Rozprawy, Poznań, nr 328, 1998.
11. Michnej M.: Proces zużycia w połączeniu obrotowym na przykładzie modelu zestawu kołowego z samocz zmianą rozstawu kół. Kraków 2012.

Summary

This article will attempt to explain the development of fretting wear of an axle-sleeve rotational joint. The conditions for the development of wear are surface pressure and very small amplitude oscillations. The article presents an analysis of the above-mentioned conditions in the research model and the results of wear tests. A description is introduced of a probable mechanism for the development of fretting wear in tested joint.