

Mechanizm zużycia frettingowego w połączeniu koło-oś zestawu kołowego

Zestaw kołowy stanowi najważniejszy element układu biegowego pojazdu szynowego, decydujący o bezpieczeństwie ruchu. Stąd niedopuszczalne są jakiegokolwiek uszkodzenia na jego poszczególnych elementach a w szczególności na osi zestawów kołowych. Obserwacje eksploatacyjne wskazują natomiast, że na powierzchni podpięcia osi w obszarze połączenia z piastą koła ma miejsce zużycie frettingowe, które z kolei może być źródłem pęknięć zmęczeniowych. W artykule przedstawiono mechanizm rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym koło – oś zestawu kołowego pojazdów szynowych. Mechanizm opisany został na podstawie wyników badań na modelu połączenia wciskowego spełniającego warunki podobieństwa mechanicznego do obiektu rzeczywistego.

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 zużycia, w którym nakładają się lub następują po sobie; zużycie adhezyjne, zmęczenie powierzchniowe, odwarstwianie, utlenianie, ścieranie wierzchołkami nierówności i luźnymi produktami zużycia [3]. Rozbieżności 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 [5,7].

Analiza dotychczasowych prac z zakresu frettingu wskazuje jednoznacznie, że warunkiem koniecznym do zaistnienia tego zjawiska są dwa czynniki:

- styk dwóch powierzchni ciał,
- oscylacyjne przemieszczenia styczne powierzchni iewielkiej amplitudzie.

Obrazem zużycia frettingowego mogą być ślady korozji na powierzchni elementów, wzrost chropowatości powierzchni, mikropęknięcia w warstwie wierzchniej, wżery, a konsekwencją tego, np. w przypadku połączeń wciskowych może być zmniejszenie nacisków montażowych lub powstanie mikrokarbów zmęczeniowych. Przykłady zużycia można znaleźć praktycznie we wszystkich dziedzinach techniki, gdzie mamy do czynienia z parą stykających się elementów, które mogą być narażone na oscylacje w punkcie styku. Zdecydowana większość autorów, wymieniając przykłady elementów lub połączeń, w których występuje zużycie frettingowe, wskazuje najczęściej na połączenia wciskowe. Należy podkreślić, że jest to układ bardzo trafny. Połączenia wciskowe kumulują w

sobie wszystkie niezbędne do rozwoju frettingu warunki. Istnieje stały, określony docisk połączonych powierzchni elementów oraz mogą występować przemieszczenia względne tych powierzchni. Mają one miejsce w przypadku obciążenia jednego z elementów zmienną siłą styczną lub gdy całe połączenie pracuje w warunkach obrotowego zginania. Natomiast wiedza na temat rozwoju zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych jest niedostateczna.

Opisane wyżej warunki rozwoju zużycia frettingowego szczególnie spełnione są w połączeniu koło-oś zestawu kołowego pojazdów szynowych. Oba elementy tworzą połączenie wciskowe wykonane przez wtlaczanie, w wyniku którego w strefie połączenia są określone naciski powierzchniowe, których zadaniem jest niedopuszczenie do przemieszczeń poosiowych i obwodowych. W trakcie toczenia się, zestaw pracuje w warunkach obrotowego zginania, czego efektem mogą być mikropoślizgi (oscylacje) pomiędzy połączonymi powierzchniami na co wskazują wyniki badań analitycznych i doświadczalnych. Ponadto wykazano, że maksymalna wartość amplitudy oscylacji zawsze będzie miała miejsce na styku powierzchni czołowej piasty koła z powierzchnią osi [1].

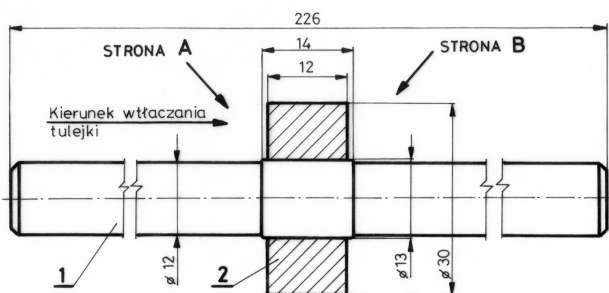
2 BADANIA MODELOWE

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 kilku do kilkadziesiąt mikrometrów. Również szerokość obszaru zużycia jest niewielka rzędu kilku milimetrów. Z tego względu badanie tego typu zjawisk możliwe jest 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 Heinke’go, można prowadzić jako badania modelowe na prostych próbkach przy symulacji rzeczywistych warunków eksploatacji [4]. 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,
- obniżenie kosztów wykonania modelu połączenia i samych badań.

W badaniach eksperymentalnych prowadzonych na modelach bardzo ważne jest zachowanie kryteriów podobieństwa mechanicznego umożliwiających przenoszenie wyników tych badań na obiekty rzeczywiste. 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 jeszcze wszystkich zjawisk zużyciowych spotykanych w praktyce. Przy doborze modelu połączenia wciskowego koło – oś zestawu kołowego szczególnie istotne jest zachowanie podobieństwa wymiarowego oraz tych samych nacisków powierzchniowych w połączeniu. Model połączenia posiadał pewne ograniczenia. Związane one były głównie z doбором stanowiska badawczego, które determinowało wymiary modelu oraz doбором wartości wcisku, uzależnionych z kolei od możliwości wykonawczych. Na rys.1 przedstawiono schemat próbki modelującej połączenie koło – oś oraz jej zasadnicze wymiary.



Rys. 1 - Schemat próbki będącej modelem połączenia koło-oś: 1 – wałek, 2 - tulejka

W przypadku połączenia wykonanego przez wtlaczenie bardzo istotna jest ta strona wałka i tulejki, od której rozpoczynano wtlaczenie. Stronę tą oznaczono przez A, a przez B – stroną przeciwną. Wartości maksymalnych nacisków powierzchniowych obliczonych MES dla wartości wcisków w rzeczywistym połączeniu koło – oś oraz dla modelu połączenia zestawiono w tabeli 1

Tabela 1 - Zestawienie wartości nacisków powierzchniowych w połączeniu koło – oś oraz w modelu połączenia tulejka – wałek

Połączenie	Wcisk [mm]	Nacisk p [MPa]
koło - oś	0,2	66,8
	0,3	100,2
tulejka - wałek	0,01	63,9
	0,02	127,7

Chropowatość powierzchni montażowych podpięcia osi i otworu piasty koła wg PN powinny wynosić odpowiednio 1,6 i 3,2 μm . Powierzchnie montażowe modelu połączenia wykonano natomiast przyjmując następujące wartości parametru R_a : dla powierzchni wałka wg dwóch wariantów obróbki powierzchni 3,27 μm (toczenie) i 0,32 μm (szlifowanie), a dla otworu tulejki 2,28 μm (toczenie).

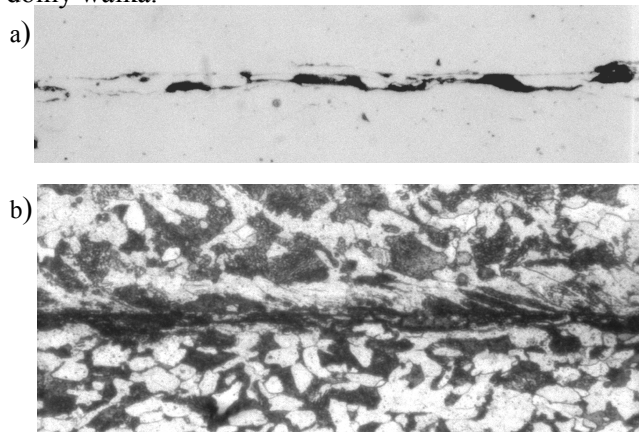
Celem badań doświadczalnych na modelu połączenia było określenie:

- rzeczywistych zmian fizykalnych w warstwie wierzchniej łączonych elementów,
- miejsca inicjacji zużycia frettingowego i zasięgu jego rozwoju,
- procesu zużycia, który będzie inicjował uszkodzenia frettingowe..

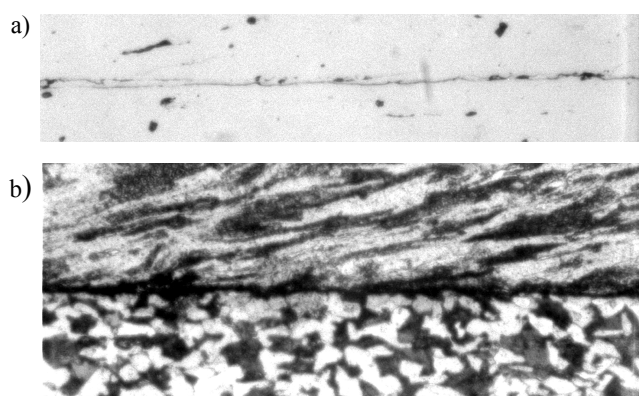
Badania zużyciowe polegały na cyklicznym obciążaniu momentem gnącym modelu połączenia w warunkach obrotowego zginania. Przyjęty przebieg zmian obciążenia próbki oraz rozkład momentu gnącego na długości połączenia wciskowego symulował rzeczywiste warunki obciążenia w połączeniu koło – oś zestawów kołowych. Przyjęto następujące wartości parametrów badań: obciążenie zewnętrzne siłą $Q = 150$ i 400 N, częstotliwość wymuszeń $n = 23,3$ Hz, liczba cykli $N = (3 \div 8) \times 10^6$.

Szczególnie ważne były badania wstępne, których istotnym elementem były obserwacje przekroju powierzchni połączenia wałka i tulejki po wykonaniu połączenia. Pozwoliły one na poznanie rzeczywistego styku powierzchni połączonych elementów. Próbkę do obserwacji obrazu styku powierzchni zostały wycięte z modeli połączeń wciskowych. Obejmowały one całą długość styku połączenia wałka z tulejką w płaszczyźnie równoległej do osi wałka. Obserwacje powierzchni próbek wykonywano na zgładach nietrawionych oraz trawionych. Zgłady nietrawione miały pokazać rzeczywisty zarys styku obu połączonych elementów z jego wszystkimi deformacjami i uszkodzeniami. Zgłady trawione natomiast – ewentualne deformacje i

uszkodzenia w warstwie wierzchniej połączonych elementów. Na kolejnych rys.2 i 3 przedstawiono zdjęcia charakterystycznych obrazów styku powierzchni podpięcia wałka i otworu tulejki dla poszczególnych wariantów połączenia. Na wszystkich zdjęciach górny element jest powierzchnią tulejki, a dolny wałka.



Rys. 2 - Obrazy powierzchni styku wałka toczonego i tulejki, wcisk 0,02mm, pow. 320x



Rys. 3 - Obraz powierzchni styku wałka szlifowanego i tulejki, wcisk 0,02 mm, pow. 320x

Przeprowadzone badania powierzchni styku połączonych elementów, a w szczególności badania metalograficzne warstwy wierzchniej wykazały, że powierzchnia styku wałka i tulejki po wykonaniu połączenia wciskowego jest złożona. Na jej ostateczny obraz ma wpływ zarówno chropowatość początkowa powierzchni oraz wartość wcisku. Przytoczone zdjęcia obrazują charakterystyczne zmiany na styku powierzchni obu elementów połączonych przez wtlaczenie, którego wynikiem jest:

- ścięcie mikronierówności powierzchni otworu tulejki oraz jej deformacja plastyczna po stronie

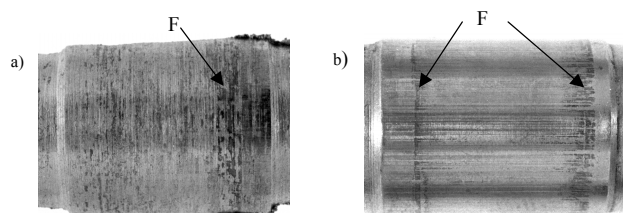
B połączenia,

- ścięcie mikronierówności powierzchni podpięcia wałka po stronie A.

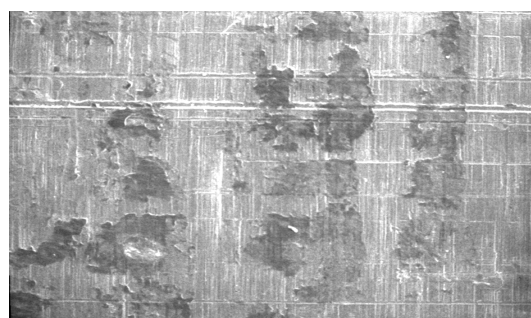
Deformacje warstwy wierzchniej i zużycie mikrowystępów powierzchni montażowych wałka i tulejki, które powstają w trakcie wykonywanego połączenia powodują, że styk powierzchni obu elementów na całej długości połączenia nie jest jednolity. Po stronie

B (około $10 \div 30 \mu\text{m}$ od czoła tulejki) oraz na kilkakrotnie dłuższym odcinku po stronie A brak jest bezpośredniego styku połączonych elementów. Pomiedzy nimi tworzy się szczelina o wysokości kilku do kilkunastu mikrometrów, wypełniona produktami zużycia. Długość oraz wysokość szczeliny jest ściśle związana z wyjściowym profilem chropowatości powierzchni łączonych elementów (powierzchnia wałka toczonego lub szlifowanego) oraz wartością wcisku. Jest ona zdecydowanie większa w przypadku wałków o podpięciu toczonego. Pozostała część styku charakteryzuje się występowaniem na przemian obszarów rzeczywistego styku powierzchni elementów oraz szczelin wypełnionych produktami zużycia. Obszar rzeczywistego styku ciał pierwszych również zależy od wyżej wymienionych czynników. Jest on większy dla wałków szlifowanych i dla większych wartości wcisku.

Na kolejnych zdjęciach (rys.4) przedstawiono wybrane charakterystyczne obrazy powierzchni podpięcia wałków po badaniach zużyciowych dla badanych wariantów ich wykonania. Prawa strona zdjęcia odpowiada stronie B według rys.1. Literą „F” oznaczono miejsce występowania zużycia frettingowego. Z kolei na rys.5 przedstawiono charakterystyczny obraz uszkodzeń frettingowych obserwowanych na mikroskopie skaningowym.



Rys. 4 - Fotografie powierzchni podpięcia wałków po badaniach zużyciowych, pow. ok. 4x, a) powierzchnia toczonego, wcisk – 0,01mm, b) powierzchnia szlifowana, wcisk – 0,02mm



Rys. 5 - Obraz skaningowy zużycia frettingowego na powierzchni wałka szlifowanego, wcisk – 0,02mm, pow. - 200x

Prawie na wszystkich powierzchniach wałków zaobserwowano charakterystyczny obraz zużycia frettingowego. Miejsce jego rozwoju i zasięg zużycia zależy z kolei od wartości wcisku i chropowatości wyjściowej powierzchni. Przedstawiony na rys.4 obraz powierzchni podpięcia wałków po badaniach zużyciowych, wskazuje na wyraźną różnicę w obrazie zużycia pomiędzy powierzchniami toczonego a szlifowanego

wanymi. W przypadku powierzchni toczonych charakterystycznym jest miejsce występowania zużycia, które dla wszystkich wałków obserwowane jest przede wszystkim po stronie B w postaci pierścienia obejmującego cały obwód wałka. Wałki o powierzchni szlifo wanej wykazują znacznie większą podatność na rozwój zużycia frettingowego w porównaniu do wałków toczonych. W przypadku wałków szlifowanych obserwuje się wyraźny wpływ na zużycie wartości wcisku. Obszar i intensywność zużycia wyraźnie zwiększa się ze wzrostem wartości wcisku. Również w tym przypadku zużycie występuje w postaci pierścienia na całym obwodzie wałka. Charakterystycznym jest również, że pierścień zużycia występuje zarówno po stronie B jak i A. Jedynie obszar zużycia po stronie A jest kilkakrotnie mniejszy niż po stronie B.

Uszkodzenia frettingowe występujące na wszystkich badanych powierzchniach mają bardzo podobny charakter (rys.5). Dominującym uszkodzeniem jest przede wszystkim tworzenie się na powierzchni wałka narostów materiału, które ulegają następnie deformacjom plastycznym i utlenieniu. Obserwacje powierzchni w strefie uszkodzeń również wykazały występowanie niewielkich wżerów, wytarć oraz cząstek zużytych materiałów. Obserwacje na mikroskopie skaningowym również potwierdziły większą podatność powierzchni o mniejszej chropowatości na rozwój zużycia frettingowego.

W świetle przytoczonych wyników badań można stwierdzić, że w rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym dominującą rolę w inicjacji zużycia spełnia zjawisko adhezji. Tworzenie się i rozrywanie szperei adhezyjnych w miejscach rzeczywistego styku ciał pierwszych przy odpowiedniej amplitudzie poślizgu. Pozostałe rodzaje zużycia, jak deformacja plastyczna, utlenienie, mikroskrawanie spełniają funkcję podrzędną, intensyfikując powstałe wcześniej uszkodzenia w wyniku rozerwania szperei adhezyjnych. Zaproponowano mechanizm rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym jako kilkustopniowy proces, którego najważniejszymi elementami są:

- utworzenie obszarów rzeczywistego styku ciał pierwszych,
- generowanie oscylacji na styku powierzchni elementów,
- tworzenie szperei adhezyjnych, które następnie ulegają rozerwaniu, tworząc na powierzchniach styku wyrwy i narosty,
- utlenienie uszkodzonego wcześniej obszaru,
- mikroskrawanie utlenionymi wierzchołkami na roztów przeciwległej powierzchni,
- tworzenie produktów zużycia jako wynik m.in. mikroskrawania – powstanie ciała trzeciego i stabilizacja procesu zużycia.

3 PRZEBIEG ZUŻYCIA W POŁĄCZENIU KOŁO-OŚ

W oparciu o przedstawiony powyżej mechanizm zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym zaproponowano jego prawdopodobny przebieg w połączeniu wtlaczanym koło – oś zestawu kołowego pojazdu szynowego.

Połączenie wciskowe koła z osią wykonuje się wtlaczając piastę koła na podpięcie osi od strony czopa w kierunku części środkowej (rys.6). W trakcie wtlaczania następować będzie przede wszystkim ścięcie wierzchołków mikronierówności piasty koła od strony wewnętrznej tarczy koła oraz w mniejszym stopniu podpięcia osi od strony czopa. Produkty zużycia wytworzone w wyniku ścięcia wierzchołków mikronierówności, będą gromadzić się w zagłębieniach mikronierówności powierzchni tworząc tzw. ciało trzecie. Powierzchnia otworu piasty koła, o ściętych wcześniej wierzchołkach mikronierówności, przemieszczając się wzdłuż coraz mniej ściętych wierzchołków mikronierówności podpięcia osi, będzie z kolei ulegać odkształceniom plastycznym w warstwie wierzchniej. Na tej podstawie można prognozować, że w wyniku połączenia wtlaczanego, otrzymamy na długości połączenia styk obu powierzchni o następujących charakterystycznych cechach:

- gromadzenie się produktów zużycia tworzących ciało trzecie na styku obu powierzchni głównie od strony czopa (przede wszystkim w tej części połączenia będzie miało miejsce ścinanie wierzchołków mikronierówności),
- od strony czopa powierzchnie styku oddzielone będą zgromadzonym ciałem trzecim, wynikiem czego rzeczywisty styk ciał pierwszych będzie występował sporadycznie,
- od strony części środkowej osi będzie miał miejsce przede wszystkim rzeczywisty styk ciał pierwszych, ze względu na mniejszą ilość ciała trzeciego oraz deformację plastyczną powierzchni tulejki, ,
- po obu stronach połączenia będą występowały niewielkie stożkowe szczeliny różniące się długością i wysokością przy powierzchni czołowej piasty. Po stronie czopa szczelina będzie dłuższa ale o mniejszej wysokości. Szczeliny również będą wypełnione, szczególnie po stronie czopa, produktami zużycia.



Rys. 6 - Schemat wtlaczania piasty koła na podpięcie osi oraz obszary powierzchni łączonych elementów ulegających zużyciu (zaznaczonych linią kreskowa)

Przedstawione charakterystyczne cechy styku powierzchni podpiaścia osi i piasty koła decydują o tym, że obszary, w których może wystąpić zużycia frettingowe będą położone w bezpośrednim sąsiedztwie czoła piasty koła od strony części środkowej osi. W obszarach tych, ze względu na ograniczone występowanie ciała trzeciego oraz dużą powierzchnię rzeczywistego styku ciał pierwszych, będą sprzyjające warunki do tworzenia szepień adhezyjnych.

Kolejnym warunkiem rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu koło-oś będzie wystąpienie przemieszczeń względnych pomiędzy powierzchniami obu połączonych elementów w momencie toczenia się koła. Określenie metodami analitycznymi możliwości wystąpienia przemieszczeń w połączeniu koło – oś jest praktycznie bardzo trudne. Przemieszczenia te zostały natomiast wyznaczone doświadczalnie przez autorów pracy [5]. Wartość amplitudy oscylacji pomiędzy piastą koła a podpiaściem osi wyznaczana była w płaszczynie czoła piasty po stronie części środkowej osi. Zmierzona wartość amplitudy była w zakresie $0,01 \div 0,03$ mm w zależności od konstrukcji zestawu kołowego.

Zgodnie z opisanym mechanizmem rozwoju zużycia frettingowego występujące oscylacje w połączeniu w czasie toczenia się zestawu kołowego, będą inicjować szepienia adhezyjne pomiędzy powierzchniami rzeczywistego styku od strony części środkowej osi. Po stronie czopa natomiast, najpierw nastąpi usunięcie ciała trzeciego ze strefy styku aby dopiero wówczas tworzyć szepienia adhezyjne w strefach rzeczywistego styku ciał pierwszych. Kontynuowanie oscylacji w wyniku toczenia się zestawu kołowego będzie z kolei prowadzić do rozerwania powstałych szepień, tworząc wyrwy i narosty na powierzchni styku obu elementów. W dalszym etapie uszkodzenia te będą ulegać deformacjom plastycznym. Wynikiem tego będzie „rozmazywianie” tych uszkodzeń (narostów) a następnie utlenienie obszaru uszkodzeń adhezyjnych. Utworzona na mikronierównościach warstwa tlenku o dużej twardości będzie z kolei przy odpowiedniej amplitudzie oscylacji inicjować procesy mikroskrawania, tworząc produkty zużycia. Dodatkowym ich źródłem będą również pękające, kruche warstewki tlenku. Utworzona w ten sposób warstwa ciała trzeciego będzie prowadzić do stabilizacji procesów zużyciowych w obszarze styku. Na rys.6 przedstawiono charakterystyczny obraz zużycia frettingowego na powierzchni podpiaścia osi od strony części środkowej dla losowo wybranej osi po 15 latach eksploatacji.

4 ZAKOŃCZENIE

Omówiony mechanizm rozwoju zużycia frettingowego w połączeniu wciskowym, w którym nominalnie nie powinny mieć miejsca oscylacje wskazuje, że wyeliminowanie poślizgów pomiędzy skojarzonymi powierzchniami jest praktycznie niemożliwe. Stąd



Rys.7 - Obraz zużycia frettingowego na powierzchni podpiaścia osi

naależy sądzić, że zużycie frettingowe również może mieć miejsce w przypadku osadzenia np. piasty hamulca tarczowego na osi wagonowej lub napędowego koła zębatego na osi pojazdu trakcyjnego.

Charakterystyczną cechą zużycia frettingowego jest to, że rozwija się ono już po niewielkiej liczbie cykli przemieszczeń względnych skojarzonych powierzchni (ok. 10^3 cykli). Intensywność zużycia rośnie do ok. $10^5 \div 10^6$ cykli pracy, a następnie stabilizuje się. Uszkodzenia frettingowe bardzo często stają się źródłem rozwoju innych uszkodzeń, szczególnie zmęczeniowych. W warunkach zmiennych obciążeń, będące wynikiem frettingu wżery, mikropęknięcia, mogą stać się ogniskiem rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Wyniki wielu autorów wskazują, że wytrzymałość zmęczeniowa elementów pracujących w warunkach frettingu zmniejsza się nawet o 30%.

Ograniczenie rozwoju zużycia frettingowego w świetle przytoczonej analizy, wiąże się przede wszystkim z niedopuszczeniem do wystąpienia zjawiska adhezji. Ograniczenie występowania oscylacji jest praktycznie niemożliwe. Stąd główne działania powinny iść w kierunku niedopuszczenia do rzeczywistego styku skojarzonych powierzchni tzw. ciał pierwszych.

Bibliografia

- [1] Guzowski S.: *Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych. Monografia 284, wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003*
- [2] Guzowski S.: *A model of fretting wear in wheel set clamped joint. Archives of Transport, wyd. PAN, vol. 15, z. 1, 2003*
- [3] Neyman A.: *Fretting w elementach maszyn. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003*
- [4] Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITE, Radom, 1997*
- [5] Шевеля В.В., Калда Г.С.: *Фреттингустальность металлов. Изд. Хмельницький „Поділля”, 1998*
- [6] Tanaka S., Hatsuno K., Mohri B., Yaguchi S.: *Fretting corrosion and fatigue strength of wheel-seat of car-axle. Quarterly Reports, Vol. 17 No. 1, 1976*
- [7] Waterhouse R.B.: *Fretting fatigue. Applied Science Publishers Ltd., London, 1981*