

Włodzimierz GAŚOWSKI

Politechnika Poznańska

Leszek STASIAK

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy

Pojazdów Szynowych

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ WAGONOWYCH OSI
ZESTAWÓW KOŁOWYCH W OŚRODKU KOROZYJNYM.
KOROZJA STYKOWA

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki, przeprowadzonych po raz pierwszy w kraju, badań wytrzymałości zmęczeniowej wagonowych osi zestawów kołowych w ośrodku korozyjnym. Szczególną uwagę zwrócono na wykazanie przyczyn i skutków działania korozji stykowej w połączeniu wciskowym koła z osią oraz na wyznaczenie ilościowego wpływu tej korozji na wytrzymałość zmęczeniową podpięcia osi.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie związane z wytrzymałością zmęczeniową osi zestawów kołowych pojazdów szynowych w ośrodku korozyjnym są mało znane. Dotyczy to szczególnie połączenia wciskowego koła z osią, w którym występuje bardzo silny koncentrator naprężeń, wywołany przez tzw. korozję stykową - "fretting corrosion". Mechanizm działania tej korozji bywa różnie interpretowany, a jej ilościowy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową osi nie został dotychczas w sposób miarodajny poznany. Logiczną konsekwencją takiego stanu rzeczy są uszkodzenia zmęczeniowe osi zestawów kołowych w eksploatacji z wyraźnymi śladami występowania różnego rodzaju korozji, a przede wszystkim korozji stykowej. W bezpośredniej konfrontacji z tą eksploatacją mało skuteczne okazały się dotychczasowe metody oceny wytrzymałości osi zestawów kołowych na etapie projektowania, które to metody nie uwzględniają korozji jako czynnika mającego wpływ na wytrzymałość zmęczeniową osi. Taka sytuacja legła u podstaw podjęcia w Ośrodku Badawczo Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu specjalnych badań w ramach dysponowanej bazy badawczej.

2. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań było 30 wagonowych osi zestawów kołowych typu UIC. Wybór tego typu osi został podyktowany faktem, że w eksploatacji oraz w aktualnej produkcji bieżącej znajduje się największa ich ilość. Konstrukcję próbki osi sprowadzono do tzw. "półzestawu", pokazanego poglądowo na rys. 1. Zapewniała ona, że os zestawu kołowego była poddawana próbom zmęczeniowym z uwzględnieniem aktualnej technologii wykonania, naprężeń własnych wywołanych naprasowaniem koła na os oraz wpływu sztywności tarczy koła.

3. SPOSÓB OBCIĄŻENIA OSI W PRÓBACH ZMĘCZENIOWYCH

Dokładny opis stanowiska badawczego, a szczególnie maszyny zmęczeniowej do badań wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych znany jest z licznych publikacji [2], [3], [4]. Z tego względu nie uznano za celowe przedstawianie go po raz następny. Należy jednak zaznaczyć, że zastosowany sposób obciążenia osi w próbkach zmęczeniowych był ściśle związany z charakterem obciążania zestawu kołowego w eksploatacji.

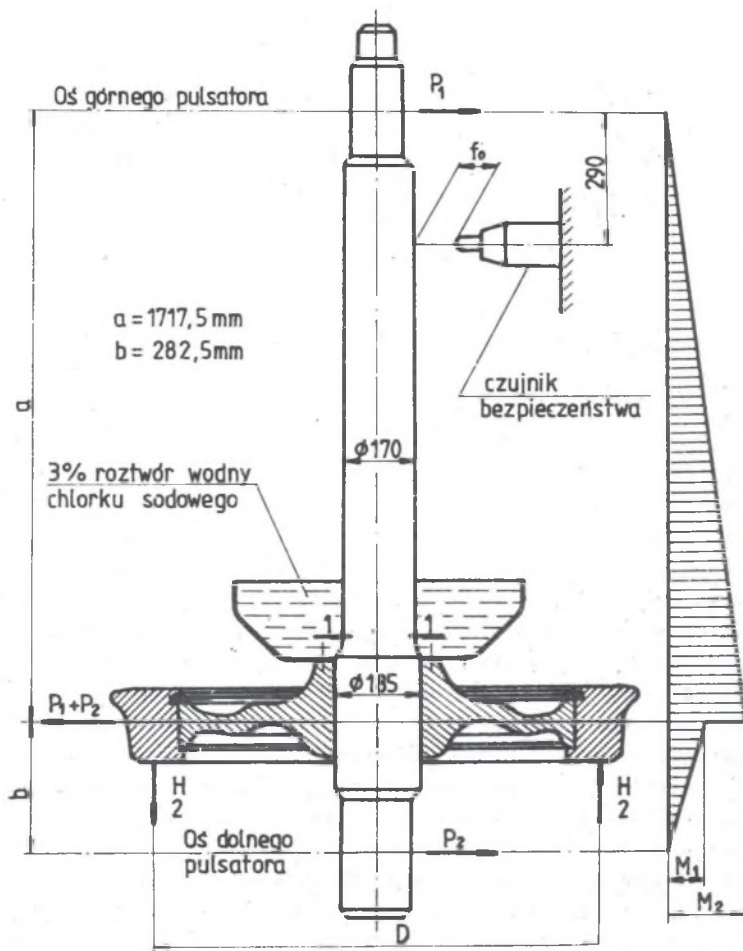
Odpowiadający mu układ obciążenia osi wraz z przebiegiem momentów gnących przedstawiono na rys. 1. Charakterystyczny uskok na wykresie tych momentów wyraźnie wskazuje na to, że różnica:

$$M_2 - M_1 = H \cdot \frac{D}{2},$$

przenoszona jest przez piastę i tarczę koła. Analogiczne przekazywanie obciążeń zachodzi w ruchu wagonu w wyniku oddziaływania obrzeży kół na szynę. Za szczególnie charakterystyczną cechę obciążenia osi w próbkach zmęczeniowych należy uznać fakt, że os ta nie ulegała obrotowi, a mimo to zachodziły w niej identyczne jak w ruchu obrotowym zmiany fizyczne. Powodowały je mianowicie dwa odśrodkowe pulsatory obciążające, zabudowane w czopach osi i obracające się ze stałą prędkością kątową. Pulsatory te były ze sobą zsynchronizowane, co gwarantowało, że siły odśrodkowe P_1 i P_2 działały zawsze w jednej płaszczyźnie i skierowane były w tym samym kierunku. Jednocześnie obciążenia te były tak dobrane, aby każdorazowo był spełniony następujący warunek:

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{P_1 \cdot a}{P_2 \cdot b} = 1,3-1,4$$

Wynika on z aktualnych metod obliczeń osi zestawów kołowych oraz z analizy wyników badań obciążeń wagonów przeprowadzanych w ruchu. Zatem w każdej próbie zmęczeniowej zadanej sile P_1 odpowiadała każdorazowo siła P_2 , wyznaczona z podanej relacji.



Rys. 1. Obciążenia osi zestawu kołowego w próbach zmęczeniowych w ośrodku korozyjnym

Fig. 1. The loads of a wheelset axle during the fatigue tests in a corrosive surrounding

4. DOPROWADZANIE OŚRODKA KORODUJĄCEGO

Zastosowany sposób doprowadzania ośrodka korodującego między powierzchnie połączenia wciskowego koła z osią pokazano na rys. 1. Do powierzchni czołowej piasty koła został przykręcony, poprzez uszczelkę gumową, specjalnie wykonany zbiornik, a następnie napełniony 3% roztworem wodnym chlorku sodowego. Powodowało to, że obciążenia i odkształcenia osi i piasty koła w próbach zmęczeniowych zachodziły z udziałem bezpośredniej penetracji ośrodka korodującego w połączeniu wciakowym tych elementów.

5. PRZEBIEG PRÓB ZMĘCZENIOWYCH

Każda próba zmęczeniowa była poprzedzana pomiarem dynamicznej strzałki ugięcia f_0 w osi czujników bezpieczeństwa, położonych 290 mm poniżej osi górnego pulsatora obciążającego (rys. 1). Następnie nastawiono czujniki bezpieczeństwa tak, aby ich odległości od osi wynosiła $(f_0 + 1)$ mm. W ten sposób wychylenie się osi o 1 mm ponad dynamiczną strzałkę ugięcia f_0 było natychmiast sygnalizowane przez automatyczne wyłączenie maszyny zmęczeniowej. Oznaczało to jednocześnie, że w osi wystąpił początek przełomu zmęczeniowego. Po wyłączeniu maszyny przeprowadzono dokładne oględziny osi w okolicy zapiaścia. Jeśli nie wykryto makropęknięcia, to w dalszej kolejności nastawiano czujniki bezpieczeństwa na odległość o 1 mm większą i uruchamiano ponownie maszynę zmęczeniową. Postępowanie takie powtarzano dopóty, dopóki nie stwierdzono makropęknięcia. We wszystkich przypadkach pęknięcia osi pod piastą koła, próbę zmęczeniową uważano za zakończoną wówczas, gdy cała oś, po automatycznym, kolejnym wyłączeniu była wyraźnie wychylona względem pionu. Dalsze dołamywanie osi prowadzono przy małych obrotach pulsatorów aż do całkowitej dekohezji strefy resztkowej. Okres upływający od pierwszego wyłączenia maszyny zmęczeniowej do pojawienia się widocznego pęknięcia zapiaścia lub wyraźnego wychylenia się osi nie przekraczał na ogół 0,5 godziny.

Charakterystycznym objawem wystąpienia niewidocznego pęknięcia zmęczeniowego podpiścia osi były zmiany zachodzące w roztworze wodnym ośrodka korodującego, który sprawiał wrażenie bardzo intensywnego wrzenia. Przyczyną tego zjawiska była otwierająca się i zamykająca szczelina pęknięcia zmęczeniowego w podpiściu, co można by porównać do działania pompy ssąco-tłoczącej. W miarę wzrostu tej szczeliny intensywność pozornego wrzenia była co raz większa. Należy również zaznaczyć, że ośrodek korodujący, początkowo czysty i przezroczysty, w miarę upływu badań stawał się bardziej zanieczyszczony i zagęszczony brunatnym tlenkiem żelaza, wydzielającym się spod piasty koła. Fakt ten przemawiał o występowaniu silnego tarcia między powierzchniami połączenia wciskowego. W czasie trwania prób zmęczeniowych mierzono każdorazowo temperaturę zapiaścia

osi i ośrodka korodującego. Temperatura ta zależna była od zastosowanego poziomu obciążenia i utrzymywała się w granicach

$$T = (30-50)^{\circ}\text{C}$$

Jednocześnie z poziomem temperatury mierzono strzałkę ugięcia w osi czujników bezpieczeństwa. Nie stwierdzono jednak istotnych różnic w odniesieniu do analogicznych pomiarów wykonanych w temperaturze otoczenia. W każdej próbie zmęczeniowej rejestrowano dokładnie ilość cykli zmian obciążeń (obroty pulsatorów obciążających) oraz czas badań z jednoczesnym wykazywaniem ich przerw. Całość omawianych badań, związanych z korozją stykową została przeprowadzona w okresie dwóch lat.

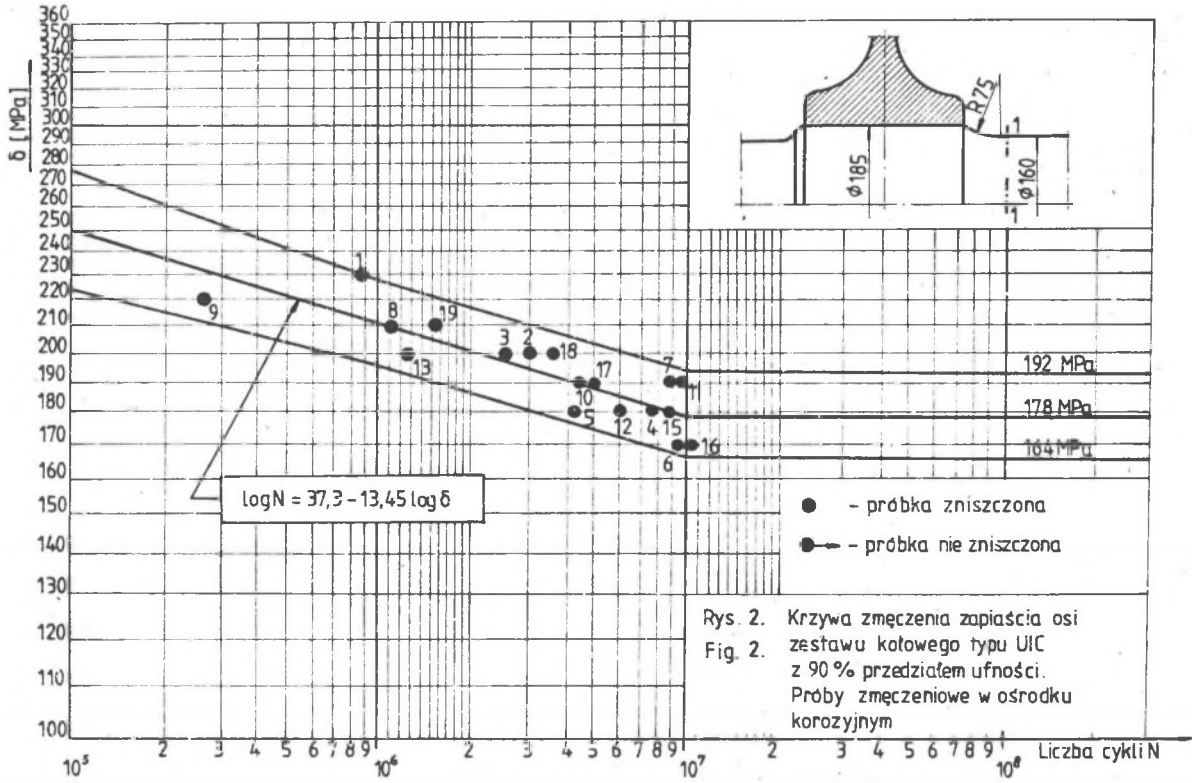
6. WYNIKI PRÓB ZMĘCZENIOWYCH I ICH STATYSTYCZNE OPRACOWANIE

W rezultacie dokonanych prób zmęczeniowych w ośrodku korozyjnym doprowadzono do złomów zmęczeniowych, zlokalizowanych w zapiąsciu i znacznie mniejszym stopniu w podpiąsciu osi. W związku z tym wyniki prób zmęczeniowych opracowano w odniesieniu do bezpośredniego miejsca występowania uszkodzeń zmęczeniowych. Głównym celem tego opracowania było wyznaczenie krzywej zmęczenia (Wohlera) dla zapiąsścia i podpiąsścia osi z uwzględnieniem rzeczywistego rozrzutu wyników badań. W związku z tym zostały one opracowane statystycznie za pomocą analizy korelacji liniowej i metody najmniejszych kwadratów [7]. Odpowiednie obliczenia wykonano wg programu "KRZYZME" na PC XT/AT, [9]. Podstawę wyjściową do obliczeń stanowiły wyłącznie wyniki prób zmęczeniowych, w których zapiąsście lub podpiąsście osi uległo zniszczeniu zmęczeniowemu. Każdej krzywej zmęczenia został przyporządkowany przedział ufności, w którego granicach mieszczą się z góry określonym prawdopodobieństwem wszystkie wyniki badań. Do wyznaczenia takiego przedziału program "KRZYZME" wykorzystuje test t-Studenta.

W wyniku opisanego postępowania iteracyjnego otrzymano ostateczną postać charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej zapiąsścia i podpiąsścia osi z uwzględnieniem rozrzutu wyników badań. Tym samym zawierają one dostateczną ilość danych dla potrzeb oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi.

7. KRZYWA ZMĘCZENIA ZAPIĄSĆCIA OSI W OŚRODKU KOROZYJNYM

Ilościowy wpływ ośrodka korodującego na wytrzymałość zmęczeniową zapiąsścia osi wynika z porównania przedstawionej na rys. 2 krzywej zmęczenia z analogiczną, odnoszącą do środowiska bezkorozyjnego. Krzywa taka została wyznaczona jako jedna z pierwszych na tym samym stanowisku badawczym [2], [3] i charakteryzuje się następującymi parametrami:



Rys. 2. Krzywa zmęczenia zapiaścia osi zestawu kołowego typu UIC z 90% przedziałem ufności. Próby zmęczeniowe w ośrodku korozyjnym
 Fig. 2. The fatigue curve of the wheel set axle of the wheelset type UIC with 90% confidence interval. Fatigue tests in the corrosion medium

Rys. 2. Krzywa zmęczenia zapiaścia osi zestawu kołowego typu UIC z 90% przedziałem ufności. Próby zmęczeniowe w ośrodku korozyjnym

Fig. 2. The fatigue curve of the wheel set axle of the wheelset type UIC with 90% confidence interval. Fatigue tests in the corrosion medium

- średnia granica wytrzymałości zmęczeniowej,

$$(Z_{go})_k = 201 \text{ MPa}$$

- współczynnik pochYLENIA krzywej zmęczenia,

$$m = 19,3$$

- bazowa ilość cykli,

$$N_0 = 10^7$$

Z bezpośredniego porównania wynika, że procentowy spadek granicy wytrzymałości zmęczeniowej zapieścia osi w ośrodku korozyjnym wynosi:

$$\frac{201 - 178}{201} \cdot 100\% = 11,4\%$$

Należy zaznaczyć, że wszystkie osie, badane w ośrodku korozyjnym posiadały zabezpieczenia antykorozyjne zgodne z obowiązującymi na PKP warunkami technicznymi. Otrzymany wynik badań przemawia jednak za tym, że zabezpieczenia te są mało skuteczne.

8. KRZYWA ZMĘCZENIA PODPIAŚCIA OSI W OŚRODKU KOROZYJNYM I JEJ WŁAŚCIWOŚCI

W wyniku przeprowadzenia trzydziestu prób zmęczeniowych: uzyskano sześć przypadków pęknięć zmęczeniowych podpięcia osi z wyraźnymi śladami występowania korozji stykowej. Pozwoliło to na wyznaczenie ilościowego wpływu tej korozji na wytrzymałość zmęczeniową podpięcia osi. W sposób poglądowy wpływ ten ilustruje pokazana na rys. 3 krzywa zmęczenia.

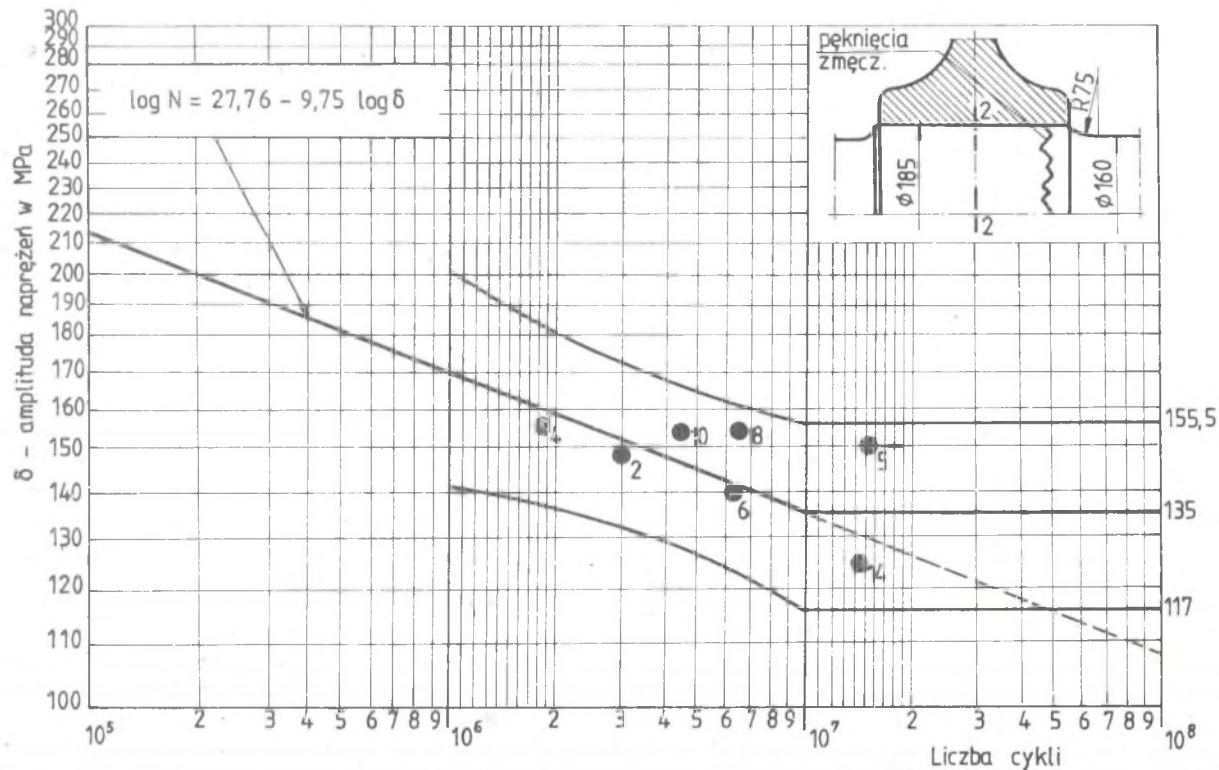
Wykazuje ona, że średnia granica wytrzymałości zmęczeniowej podpięcia osi w odniesieniu do naprężeń w środku piasty koła i bazowej ilości cykli $N_0 = 10^7$, wynosi:

$$(Z_{go})_k = 135 \text{ MPa}$$

Jednocześnie zaznaczony na tym rysunku przedział ufności informuje, że pęknięcia zmęczeniowe mogą nachodzić na poziomie naprężeń:

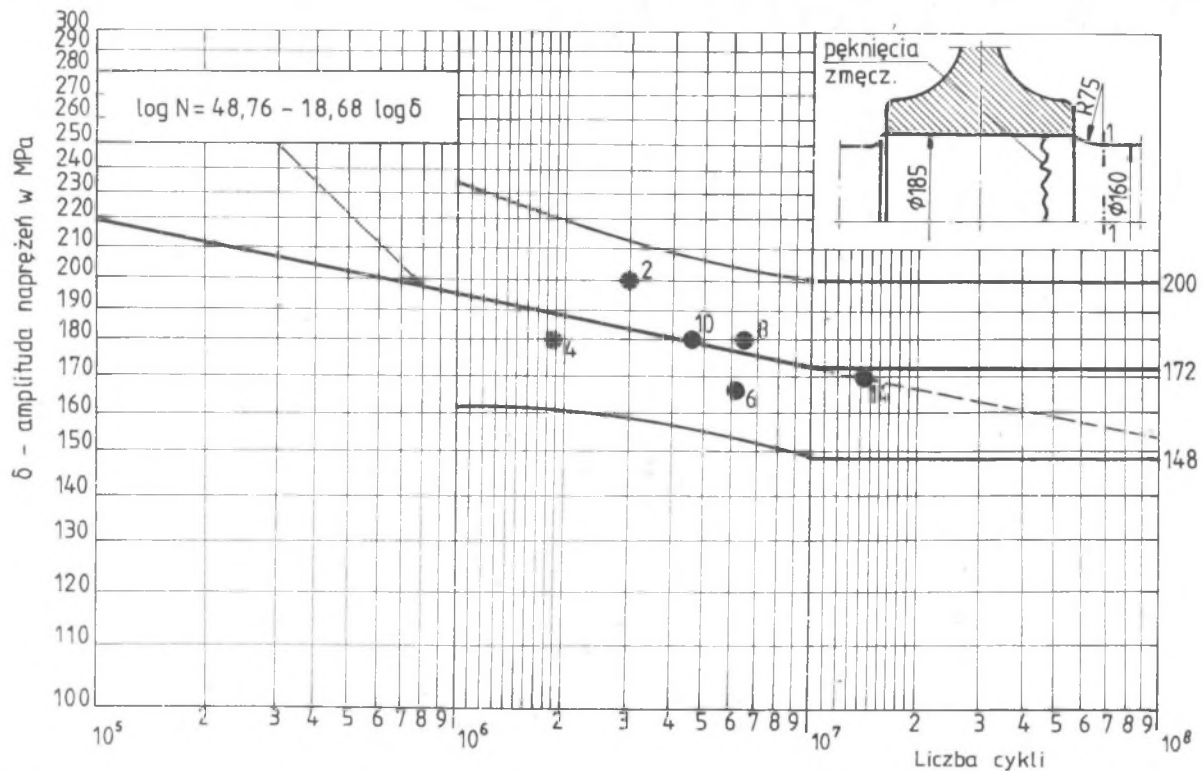
$$(Z_{go})_{k, \min} = 117 \text{ MPa}$$

Wobec braku jakichkolwiek, miarodajnych danych dotyczących wpływu korozji stykowej na wytrzymałość zmęczeniową podpięcia osi, uzyskane wyniki badań przemawiają za tym, że istnieją realne możliwości odzworowania działania korozji stykowej na stanowisku badawczym.



Rys. 3. Krzywa zmęczenia podpięcia osi zestawu kołowego typu UIC z 90% przedziałem ufności. Amplituda naprężzeń odniesiona do średnicy podpięcia - przekrój 2-2. Próby zmęczeniowe w ośrodku korozyjnym

Fig. 3. The fatigue curve of the wheel seat of the wheelset type UIC with 90% confidence interval. The amplitude of stresses related to the diameter of the wheel seat - section 2-2. Fatigue tests in the corrosion medium



Rys. 4. Krzywa zmęczenia podpięcia osi zestawu kołowego typu UIC z 90% przedziałem ufności. Amplituda naprężeń odniesiona do średnicy zapiaścia - przekrój 1-1. Próby zmęczeniowe w ośrodku korozyjnym

Fig. 4. The fatigue curve of the wheel seat of the wheelset typu UIC with 90% confidence interval. The amplitude of stresses related to the diameter of the wheel seat - section 1-1. Fatigue tests in the corrosion medium

Przedstawione na rys. 3 wyniki badań wskazują także na inne, równie istotne aspekty zagadnienia.

W badaniach osi przeprowadzonych w ośrodku bezkorozyjnym nie stwierdzono żadnego przypadku pęknięcia zmęczeniowego osi po przebiegu 10^7 cykli, a wyniki badań wskazywały wyraźnie na istnienie realnej granicy wytrzymałości zmęczeniowej na bazie $N_0 = 10^7$ cykli. Na zagadnienie to zwracano w badaniach szczególną uwagę, przedłużając specjalnie próby zmęczeniowe. W tym względzie godna uwagi jest próba zmęczeniowa oznaczona na rys. 3 numerem 14, w której pęknięcie zmęczeniowe wystąpiło po przebiegu $N = 14\ 300\ 000$ cykli, na stosunkowo małym poziomie obciążenia $\sigma = 123$ MPa. Wynik tej próby przemawia zatem, że w ośrodku korozyjnym podpiąście osi nie ma granicy wytrzymałości zmęczeniowej w dosłownym tego terminu znaczeniu.

Na rys. 3 zwrócono uwagę na to zagadnienie przez przedłużenie krzywej zmęczenia linią przerywaną. Próba ta wskazuje jednocześnie, że kumulacja uszkodzeń zmęczeniowych może zachodzić przy małych amplitudach naprężeń, co nie jest bez znaczenia w całym procesie powstawania pęknięcia zmęczeniowego w ośrodku korozyjnym. Rzeczą znamioną jest także fakt, że w badaniach w ośrodku bezkorozyjnym nie stwierdzono żadnego przypadku pęknięcia podpiąścia osi. Prowadzi to do wniosku, że uszkodzenia zmęczeniowe tego podpiąścia mogą zachodzić wyłącznie w obecności ośrodka korozyjnego.

Przy ocenie wytrzymałości zmęczeniowej może okazać się również przydatna krzywa zmęczenia podpiąścia osi w odniesieniu do naprężeń, występujących w zapiąście osi. Dla tych celów krzywa taka została opracowana na rys. 4.

9. MECHANIZM DZIAŁANIA KOROZJI STYKOWEJ, WYNIKAJĄCY Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ I ROZWIĄZAŃ TEORETYCZNYCH

Zjawiska występujące w procesie przeprowadzania badań oraz wygląd zewnętrzny i makrobudowa złomów zmęczeniowych wskazują, że mechanizmu działania korozji stykowej należy dopatrywać się w specyfice obciążeń zewnętrznych i wewnętrznych połączenia wciskowego koła z osią.

W podpiąście tego połączenia występuje moment gnący, będący wynikiem działania na czop osi zmiennego obciążenia P_1 oraz siły poziomej Y_1 , powstającej w czasie ruchu pojazdu między obrzeżem koła, a szyną.

Działanie siły Y_1 na promieniu okręgu tocznego R lewego koła ze stawu przekazuje się na oś w postaci momentu zewnętrznego

$$M_0 = Y_1 \cdot R$$

W przekazywaniu tym uczestniczy tarcza i piasta koła, co w sposób najbardziej prosty można zilustrować parą sił $Z \cdot b$ w podpiąście osi.

Wynikiem działania tej pary sił jest zmiana nacisków powierzchniowych między podpięciem, a piastą koła, charakterystycznych dla połączenia wciskowego tych elementów. Przyjmując, że rozkład nacisków powierzchniowych w takim stanie obciążenia zewnętrznego zachodzi według paraboli drugiego stopnia, można wykazać, że ramie działania pary sił jest równe:

$$b = \frac{27}{48} \cdot l$$

Dopełnieniem obciążenia podpięcia osi jest pionowa reakcja szyny R_1 , jako wynik równowagi wymienionych wyżej obciążeń pionowych i poziomych. Reakcja ta przekazywana jest na podpięcie osi w płaszczyźnie okręgu tocznego.

Znajomość przedstawionych na rys. 5 obciążeń podpięcia osi pozwala na wyznaczenie przebiegu momentów gnących oraz naprężeń normalnych w charakterystycznych przekrojach osi. W tym celu można wykorzystać istniejące metody obliczeń osi zestawów kołowych, np. najbardziej rozpowszechnioną metodę opracowaną w ramach ORE, [8].

Pod wpływem obciążeń zewnętrznych, os zestawu kołowego ulega odkształceniu w sposób pokazany na rys. 5b. Kąt ugięcia podpięcia osi w miejscu jej teoretycznego podparcia (płaszczyzna okręgu tocznego) oznaczono literą Θ . O taki sam kąt ulega obrotowi podpięcie osi oraz silnie związana z nim piasta koła. Nie jest to jednak ostateczna postać odkształcenia podpięcia osi ze względu na fakt, że w górnych jego włóknach występują normalne naprężenia rozciągające i takie same naprężenia w dolnych włóknach lecz przeciwnego znaku. W rozpatrywanym zagadnieniu tego rodzaju odkształcenia wzdłużne podpięcie osi nie miałyby istotnego znaczenia, gdyby takim samym odkształceniom uległa długość piasty koła. Aby zaistniał taki stan jednoczesnego odkształcenia podpięcia i piasty koła, naprężenia tarcie w połączeniu ζ , wynikające z tarcia związanych ze sobą powierzchni, musiałyby być większe lub co najmniej równe naprężeniom normalnym w podpięciu:

$$\zeta = p_{\text{śr}} \cdot \mu \geq \sigma_n,$$

gdzie:

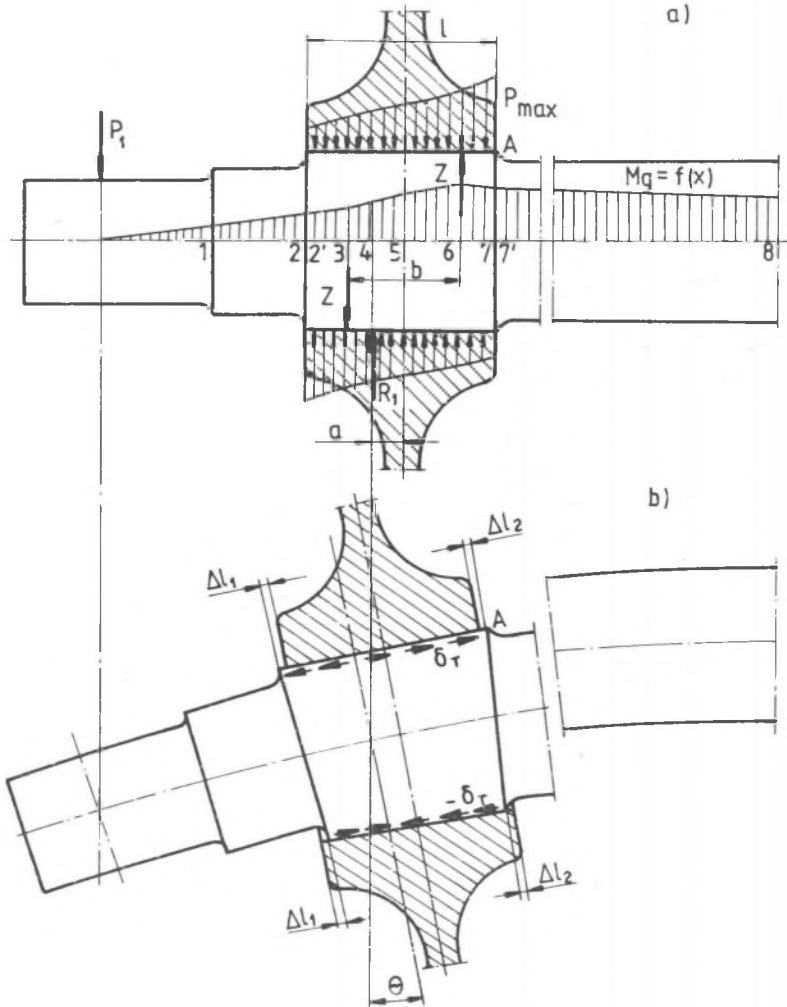
$\mu = 0,8-0,12$ - współczynnik tarcia w połączeniu wciskowym koła z osią [1],

$p_{\text{śr}}$ - średnie naciski powierzchniowe w połączeniu,

σ_n - naprężenia normalne w podpięciu osi.

Z przeprowadzonych obliczeń numerycznych 5 wynika, że średnie naciski powierzchniowe w połączeniu wciskowym zestawu kołowego typu UIC wynoszą:

- przy wcisku $w = 0,2 \text{ mm}$, $p_{\text{śr}} = 89 \text{ MPa}$,
- przy wcisku $w = 0,3 \text{ mm}$, $p_{\text{śr}} = 131 \text{ MPa}$.



Rys. 5. Obciążenia i odkształcenia osi zestawu kołowego
Fig. 5. The loads and distortions of the wheelset axle

Zatem przyjmując największe wartości wcisku oraz współczynnika tarcia, jakie mogą występować w połączeniu, odpowiadające takim wartościom naprężenia trące wynoszą:

$$\tau = 131 \cdot 0,12 = 15,7 \text{ MPa}$$

Naprężenia normalne w podpiąściu osi obliczone zgodnie z [8], wynoszą:

$$\sigma_n = 94 \text{ MPa}$$

Są zatem kilkakrotnie większe od naprężeń tnących, wynikających z tarcia związanych ze sobą powierzchni połączenia wciskowego. W wyniku takiego stanu obciążeń wewnętrznych, punkt A (rys. 5a, 5b) leżący na krawędzi podpiąścia zmienia swoje położenie względem piasty koła o wielkość Δl_2 .

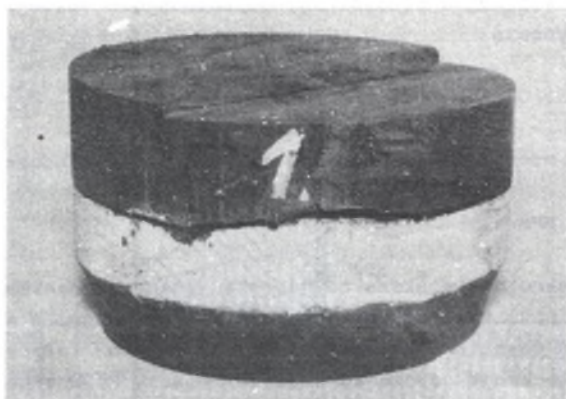
Wykorzystując prawo Hooke'a oraz znajomość naprężeń normalnych osi w przekrojach 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 (rys. 5a), można wykazać, że wielkość przemieszczenia się punkt A względem piasty wyniesie:

$$\Delta l_2 = 0,041 \text{ mm}$$

Wielkość ta jest zbiedzna z badaniami japońskimi [6], w których wyznaczono eksperymentalnie ruchy podpiąścia względem piasty koła rzędu 0,03 mm na każde 98 MPa nominalnych naprężeń normalnych, pochodzących od momentu zginającego. Wskazuje jednocześnie, że ruchy takie muszą zachodzić w eksploatacji i są największe na krawędzi podpiąścia znajdującej się po stronie środkowej części osi. Każdy punkt leżący na tej krawędzi, wraz z obrotem koła, wykonuje względem piasty ruch sinusoidalny, którego amplituda jest zależna od występujących w eksploatacji obciążeń zewnętrznych. Tego rodzaju ruchy miały również miejsce w przeprowadzonych próbach zmęczeniowych.

10. SKUTKI DZIAŁANIA KOROZJI STYKOWEJ W PRÓBACH ZMĘCZENIOWYCH

Z przeprowadzonych rozważań wynika jednoznacznie, że tarcie przyczepne jest niewystarczające dla zapewnienia nierozłącznego połączenia koła z osią. Zachodzące ruchy względne między tymi elementami wywołują ścieranie się powierzchni połączenia wciskowego. W zrealizowanych próbach zmęczeniowych działanie takie potwierdzało wydobywanie się ze szczeliny połączenia brunatnego proszku tlenku żelaza. Zjawisko to nazwane potocznie jako "krwawienie osi" występowało we wszystkich próbach zmęczeniowych, niezależnie od tego czy były one przeprowadzone w ośrodku korozyjnym, czy bezkorozyjnym. Najbardziej wyraźnie, działanie korozji stykowej było widoczne po wyprasowaniu koła z osi. Na krawędziach podpiąścia, zwłaszcza



Rys. 6. Typowy złom zmęczeniowy podpiaścia osi w warunkach korozji stykowej. Pęknięcie na granicy skorodowanej powierzchni złomu (kolor biały) z częścią metaliczną

Fig. 6. A typical fatigue break of the wheel seat on the axle in conditions of the fretting corrosion. A crack on the border between the corroded surface of the break (white colour) and the metallic portion



Rys. 7. Typowy złom zmęczeniowy podpiaścia osi w warunkach korozji stykowej. Na skorodowanej części złomu twarda, nierównomiernie rozłożona powłoka o bardzo dużej chropowatości

Fig. 7. A typical fatigue break of the wheel seat on the axle in conditions of the fretting corrosion. On the corroded portion of the break there is a hard, non-uniformly distributed layer having very great surface roughness

po stronie zapięcia występowała każdorazowo silnie skorodowana powierzchnia długości od 20 do 60 mm.

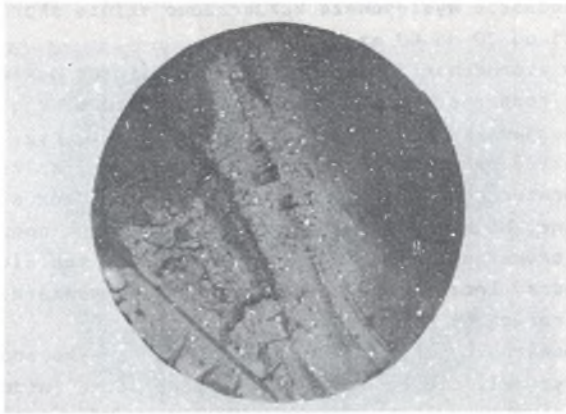
Na granicy skorodowanej powierzchni z metaliczną występowały ogniska zmęczeniowe i rozprzestrzeniały się dokładnie wzdłuż tej granicy. W sposób poglądowy zjawisko to przedstawiono na zdjęciu (rys. 6), na którym skorodowana część pękniętego podpięcia została celowo zamalowana białym kolorem. Na powierzchni tej skorodowanej części widoczne były wyraźnie wżery korozyjne. Na niektórych złomach zmęczeniowych podpięcia zauważono, że część brunatnego proszku tlenku żelaza nie została wypchnięta ze szczeliny złącza, lecz utworzyła na skorodowanej powierzchni twardą, nierównomiernie rozłożoną powłokę (nalepę rys. 7).

W wyniku powstania takiej powłoki powierzchnie skorodowanej części złomów charakteryzowały się bardzo dużą chropowatością, widoczną wizualnie i wyraźnie odczuwalną dotykaniem palca. Dokładne oględziny tej powierzchni oraz przeprowadzone próby usuwania "nalep" za pomocą pilnika lub szlifierki, wykluczają występowanie zjawisk "pittingu". Zatem najbardziej prawdopodobną przyczyną powstawania złomu zmęczeniowego jest koncentrator naprężeń wywołany bardzo dużą różnicą chropowatości powierzchni na granicy zejścia się metalicznej części złomu z częścią skorodowaną. Należy zaznaczyć, że analogiczne skutki i ślady występowania korozji stykowej są charakterystyczne dla występujących przypadków pęknięć podpięcia osi w eksploatacji.

11. MAKROBUDOWA ZŁOMÓW ZMĘCZENIOWYCH

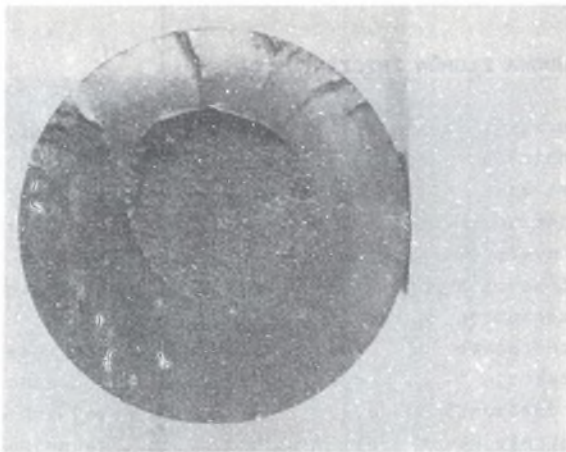
Cechy powierzchni złomów zmęczeniowych podpięcia osi, odpowiadające małym lub średnim obciążeniom charakteryzowały się na ogół jednym lub dwoma ogniskami zmęczeniowymi, zainicjowanymi na powierzchni podpięcia na granicy zejścia się części skorodowanej z częścią metaliczną (rys.8). Wokół ogniska występowała wyraźnie strefa przyogniskowa o drobnoziarnistej budowie i małej chropowatości. Rozprzestrzeniała się ona w głąb materiału, przechodząc następnie w strefę zmęczeniową o budowie nieznacznie większej chropowatości. Strefa zmęczeniowa obejmowała około 1/3 do 1/2 całego przekroju złomu i była każdorazowo skorodowana. W końcowej fazie pęknięcia zmęczeniowego występowała zawsze mniej lub więcej gwałtowna dekohezja strefy resztkowej. Mniejsza część uzyskanych złomów zmęczeniowych charakteryzowała się rozpoczęciem się pęknięcia na całym obwodzie, niemal jednocześnie i stopniowym pogłębianiem się w głąb środka materiału. Uwidoczniło się to kształtem linii zmęczeniowych, w tych przypadkach stanowiących prawie koncentryczne okręgi, rys. 9.

Cechy zmęczeniowe złomów, odpowiadające pęknięciom zapięcia osi były analogiczne jak w badaniach przeprowadzonych na osiach w ośrodku bezkorozyjnym [2], [3]. Z tego względu nie uznano za celowe powtarzanie ich opisu.



Rys. 8. Złom zmęczeniowy podpiaścia osi w warunkach korozji stykowej, odpowiadający małym lub średnim obciążeniom. Kilka ognisk zmęczeniowych na granicy skorodowanej części złomu z częścią metaliczną

Fig. 8. The fatigue break of the wheel seat on the axle in conditions of the fretting corrosion. This break corresponds to small or medium loads. There are some fatigue foci on the border between the corroded portion of the break and the metallic portion



Rys. 9. Złom zmęczeniowy podpiaścia osi w warunkach korozji stykowej, odpowiadający dużym obciążeniom. Ogniska zmęczeniowe na całym obwodzie wzdłuż granicy skorodowanej części złomu z częścią metaliczną

Fig. 9. The fatigue break of the wheel seat on the axle in conditions of the fretting corrosion. This break corresponds to big loads. The fatigue foci are located on the entire periphery along the border between the corroded portion of the break and the metallic portion

12. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH W ODNIESIENIU DO DOTYCHCZASOWYCH METOD OCENY WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ OSI

Podstawą wszystkich metod oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych jest granica wytrzymałości zmęczeniowej. W dotychczasowej interpretacji granica ta determinowana jest jako zależność funkcyjna szeregu czynników. Jej stanem wyjściowym jest granica wytrzymałości zmęczeniowej Zgo małej próbki laboratoryjnej o średnicy 7 do 10 mm. Pomijając fakt, że w zależności od przyjętej metody obliczeń występują duże rozbieżności wyników, należy jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie te metody pomijają korozję jako czynnik mający wpływ na wytrzymałość zmęczeniową osi. Z tego powodu wykazują one, że wagonowe osie zestawów kołowych typu UIC posiadają dostateczną wytrzymałość. W przeciwieństwie do tych metod wyniki przeprowadzonych badań nie wykluczają występowania uszkodzeń zmęczeniowych osi w eksploatacji, w której rzeczywistości zachodzą. Najczęściej pojawiają się po około 5 do 10 lat eksploatacji w podpiąściu i zapiąściu osi. Ilość tych uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach krajowych jest większa niż na kolejach zachodnich.

Jest to jednak zjawisko całkiem normalne i uzasadnione, gdyż na PKP przebiegi wagonów są kilkakrotnie większe. Tym samym w procesie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych bierze udział znacznie liczniejsza ilość zmian amplitud naprężeń.

Niezależnie od tego wyniki badań wskazują, że w kumulacji tej uczestniczą również małe amplitudy naprężeń uznawane dotychczas za nieznaczące.

13. WNIOSEK

Przeprowadzone badania wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych w ośrodku korozyjnym dają podstawę do wyciągnięcia następujących wniosków:

- istnieją realne możliwości odwzorowywania działania korozji stykowej na stanowisku badawczym oraz wyznaczaniu jej ilościowego wpływu na wytrzymałość zmęczeniową podpiąścia osi zestawów kołowych,
- zbieżność przeprowadzonych badań z rzeczywistością potwierdza fakt, że skutki i ślady działania korozji stykowej w próbach zmęczeniowych były identyczne jak w eksploatacji. Odnosi się to również do makrobudowy złomów zmęczeniowych,
- w przeciwieństwie do badań tych samych osi w ośrodku bezkorozyjnym, pęknięcia zmęczeniowe lokalizują się nie tylko w zapiąściu ale również w podpiąściu osi. Wskazuje to, że pęknięcie tego podpiąścia mogą zachodzić wyłącznie z udziałem środowiska korodującego,
- średnia granica wytrzymałości zmęczeniowej zapiąścia osi w ośrodku korozyjnym wynosi 178 MPa i jest około 11,4% mniejsza w porównaniu do ba-

dań tych samych osi w ośrodku bezkorozyjnym. Otrzymany wynik wskazuje jednocześnie, że dotychczasowe zabezpieczenie antykorozyjne osi zestawów kołowych nie są dostatecznie skuteczne,

- średnia granica wytrzymałości zmęczeniowej podpięcia osi w warunkach korozji stykowej, odniesiona do naprężeń normalnych w środku podpięcia i bazowej ilości cykli $N_0 = 10^7$ jest na poziomie 135 MPa. Wyniki badań wskazują jednak, że w warunkach korozji stykowej nie istnieje granica wytrzymałości zmęczeniowej w dosłownym tego terminu znaczeniu. Zatem zagadnienie trwałości podpięcia osi winno być rozpatrywane w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej,
 - w przeciwieństwie do dotychczasowych metod oceny wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych, przeprowadzone badania potwierdzają występowanie uszkodzeń zmęczeniowych osi zestawów kołowych w eksploatacji. Powodem tego jest fakt, że metody te nie uwzględniają korozji jako czynnika mającego wpływ na wytrzymałość zmęczeniową osi,
 - mechanizm działania korozji stykowej jest ściśle związany ze stanem utrzymania torów oraz z konstrukcją układów biegowych wagonów. Pod tym ostatnim względem duże znaczenie ma wprowadzenie do eksploatacji nowej generacji wózków dla wagonów towarowych typu Y25C, Y25R, Y25L, w których konstrukcja zestawów kołowych jest także zmodernizowana.
- Ważną rolę w eliminowaniu skutków działania korozji stykowej przypisuje się rozwojowi klejonych konstrukcji zestawów kołowych.

LITERATURA

- [1] Brinkmann Paul: Das Fügen von Eisenbahnradaxen. Fragen des Verfahrens und Gestaltung. Hestra-Vertrag, Darmstadt, ETR/28/6-1979.
- [2] Gąsowski W., Stasiak L., Stępień J.: Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Radsatzachsen in Originalausführung. Die Eisenbahntechnik nr 8/1983.
- [3] Stasiak L.: Doświadczalna determinacja charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej - rozprawy nr 173, Poznań 1986.
- [4] Stasiak L.: Badania wytrzymałości zmęczeniowej rolowanych osi zestawów kołowych. "Trakcja i Wagony" nr 8/1987.
- [5] Stasiak L.: Wnioski i zalecenia konstrukcyjne, wynikające z eksploatacji programów "KŁO" w Ośrodku Badawczo Rozwojowym Pojazdów Szynowych w Poznaniu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Transport, nr 914, Gliwice 1987.
- [6] Tanaka S., Hatsuno K., Mohri B.: Fretting Corrosion and Fatigue Strenght of Wheel - Seat of Car - Axle. Quarterly Reports, Vol. 17, Nr 1, 1976.
- [7] Volk Willam: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1979.
- [8] ORE, Question B 136, Rp Nr 3 "Calcul des essieux-axes, 1-ere partie", Utrecht, octobre 1976.
- [9] Program "KRZYZME" - opracowywanie wyników wytrzymałościowych badań zmęczeniowych. OBRPS, Poznań 1988.

Recenzent: Doc. dr inż. Roman Bąk

Wpłynęło do Redakcji 4.05.1989 r.

ИСПЫТАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ОСЕЙ ВАГОННЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР
В СРЕДЕ КОРРОЗИОННЫХ ВЛИЯНИЙ. ФРЕТТИНГ КОРРОЗИЯ

Р е з ю м е

В работе представлены результаты испытаний усталостной прочности вагонных осей колесных пар в среде коррозионных влияний. Такие испытания были проведены впервые в ПНР. Особое внимание обращено как на представление причин и результатов действия фреттинг коррозии в соединении с натягом колеса с осью, так и на определение количественного влияния этой коррозии на усталостную прочность подступичной части оси.

TESTS OF THE FATIGUE STRENGTH OF WAGON WHEELSET AXLES IN
A CORROSIVE SURROUNDING. THE FRETTING CORROSION

S u m m a r y

In the elaboration there shown are the results of the wagon wheelset axle fatigue strength tests carried out for the first time in Poland in a corrosive surrounding.

Special attention was paid on reasons and results of action of the fretting corrosion in an interference-fitted joint of the wheel with the axle and on quantitative determination of effect of this corrosion on the fatigue strength of the wheel seat on the axle.