

Stanisław GUZOWSKI

WYBRANE PROBLEMY ŻUŻYCIA FRETTING W POŁĄCZENIU KOŁO-OŚ ZESTAWU KOŁOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ wielkości wcisku i metody łączenia w połączeniu wciskowym na rodzaj deformacji w warstwie wierzchniej oraz jej związek z naciskiem powierzchniowym. Zwrócono uwagę na wpływ powyższych czynników na wystąpienie względnych poślizgów powierzchni połączonych elementów i rozwój zużycia fretting.

SOME PROBLEMS OF FRETTING WEAR IN WHEEL-AXLE SET

Summary. The article presents the effect of clamp value and joining method in a clamped joint on the type of deformation in the surface layer and its relation to the surface pressure. The influence of these factors on surface relative slips and fretting development has been pointed out.

1. WPROWADZENIE

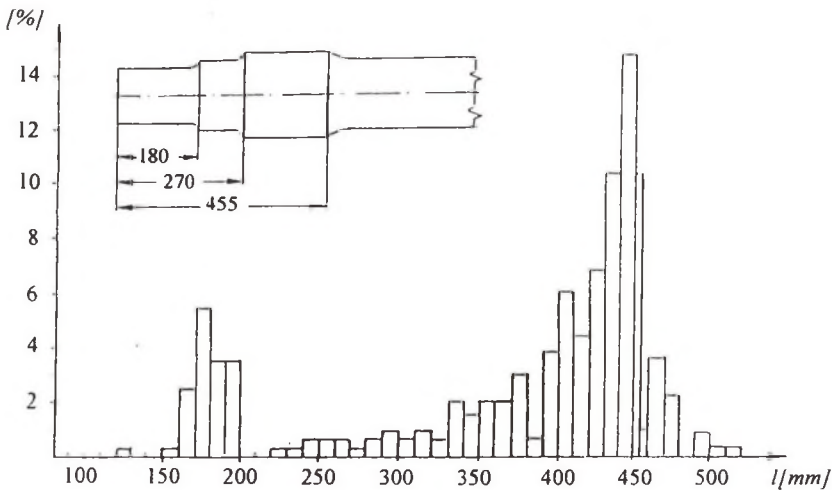
Zestaw kołowy, jak żaden inny układ czy zespół pojazdu szynowego, ze względu na rolę, jaką spełnia w bezpiecznym prowadzeniu pojazdu w torze, musi charakteryzować się szczególnie wysoką trwałością, a przede wszystkim niezawodnością. Stąd istnieje cały szereg przepisów UIC i Polskich Norm szczegółowo określających warunki związane z wykonaniem, montażem i badaniem zestawów kołowych. Elementem zestawu, który podlega szczególnym wymaganiom jest oś, która m.in. determinuje trwałość całego zestawu. Z kolei podpięcie osi jest miejscem, które kumuluje największe i najbardziej niekorzystne dla wytrzymałości zmęczeniowej rozkłady naprężeń. Składają się na nie m.in.:

- naprężenia od nacisków powierzchniowych będących wynikiem połączenia wciskowego osi z kołem (tzw. karb nasadzenia),
- naprężenia od obciążeń zewnętrznych.

Z tych m.in. przyczyn warstwa wierzchnia podpięcia osi oraz jej struktura nie może wykazywać praktycznie żadnych wad (zgodnie z normą PN-93/K-91047), które mogą być źródłem, szczególnie pęknięć zmęczeniowych. Jednak w trakcie eksploatacji, pomimo tak rygorystycznego odbioru, występują uszkodzenia i zużycia w warstwie wierzchniej osi.

2. USZKODZENIA OSI ZESTAWÓW KOŁOWYCH

W Instytucie Pojazdów Szynowych PK opracowano statystykę uszkodzeń osi zestawów kołowych na podstawie kart uszkodzeń stwierdzonych w latach 1975 ÷ 1985 [7]. Statystyka dotyczyła osi do łożysk tocznych, a zarejestrowane uszkodzenia to wyłącznie pęknięcia zmęczeniowe. Na rys. 1 przedstawiono procentowy udział pęknięć na długości osi mierzonej od jej powierzchni czołowej, przy przyjęciu odcinka pomiarowego 10 mm. Przytoczone dane wskazują, że miejscem osi, szczególnie podatnym na rozwój pęknięć zmęczeniowych, jest obszar szerokości około 10 mm, położony w pobliżu krawędzi podpięcia od strony części środkowej osi.



Rys. 1. Procentowy rozkład ilości pęknięć na długości osi zestawu kołowego
 Fig. 1. The distribution of the crack number percentage on the wheel set axle length

Również w pracy [8] stwierdzono, że najbardziej liczne przypadki pęknięć osi mają miejsce na podpięciu. Na ponad milion przebadanych osi, w ciągu 3 lat wykryto około 1400 przypadków pęknięć w osiach wagonowych, z których ok. 1350 znajdowało się na podpięciu (~95%). Stwierdzono również, że najczęściej poprzeczne pęknięcia zmęczeniowe na podpięciu osi leżały w odległości kilku mm od płaszczyzny czołowej piasty (w głąb połączenia), po stronie części środkowej osi. Powierzchnie podpięcia, w miejscach położonych w bezpośrednim sąsiedztwie płaszczyzn czołowych piasty, były zwykle skorodowane, tworząc na całym obwodzie dwa pasy skorodowanych obszarów o szerokości od kilku do kilkudziesięciu mm. Ten obraz zużycia świadczy, że w tym obszarze osi ma miejsce proces frettingu.

Według badań przedstawionych w pracy [9], w osiach występuje kilka rodzajów uszkodzeń, ale ponad 90% ma miejsce w częściach pasowanych przez wtłaczanie, a przede wszystkim w podpięciu i czopie. Stwierdzono, że 86% uszkodzeń na podpięciu osi jest wynikiem zużycia fretting.

3. WARUNKI ROZWOJU FRETTINGU

Pojęcie frettingu obejmuje skutki działania bardzo złożonych zjawisk zachodzących na powierzchniach dociskanych do siebie i obciążonych zmienną siłą elementów. Stąd zużycie fretting występuje przede wszystkim w połączeniach wciskowych, sworzniowych, wpustowych, śrubowych itp. Ogólnie przyjmuje się, że warunkiem jego rozwoju są względne poślizgi o amplitudzie około 0,025 mm, ale nie przekraczającej 0,130 mm, pomiędzy stykającymi się powierzchniami dwóch elementów. O wielkości zużycia fretting decyduje cały szereg parametrów związanych ze skojarzonymi elementami, a w szczególności: amplituda i częstotliwość względnego poślizgu, liczba cykli poślizgu, obciążenie normalne, parametry struktury geometrycznej warstwy wierzchniej, własności mechaniczne skojarzonych materiałów itp. Obrazem zużycia fretting na powierzchniach uszkodzonych elementów są m.in. ślady korozji, wzrost chropowatości, narosty, wykruszenia materiału, mikropęknięcia. Uszkodzenia w tej postaci są szczególnie niebezpieczne w przypadku elementów poddanych działaniu obciążeń zmiennych.

Warunkiem stateczności połączenia wciskowego, a takim jest również połączenie koło-oś zestawu kołowego, w przypadku działania siły poosiowej jest [1]:

$$p \geq \frac{Pk}{fld\pi}, \quad (1)$$

gdzie: p - nacisk powierzchniowy,
 P - siła poosiowa,
 k - współczynnik zapasu przyczepności,
 f - współczynnik tarcia,
 l - długość połączenia,
 d - średnica połączenia.

W przypadku toczonego się i obciążonego zestawu kołowego rolę siły poosiowej mogą spełniać naprężenia normalne na powierzchni podpięcia będące efektem momentu zginającego. W skrajnym przypadku wartość naprężeń normalnych σ_n może w określonych strefach połączenia przekroczyć wartość naprężeń trących τ wynikających z tarcia związanych ze sobą powierzchni podpięcia osi i piasty koła. Według [2] powyższy przypadek można zapisać:

$$\sigma_n > \tau = p_{sr}f. \quad (2)$$

Efektom tego będą, w określonych obszarach połączenia, poślizgi pomiędzy skojarzonymi powierzchniami. Analiza rozkładu naprężeń w połączeniu wskazuje, że będą one miały miejsce głównie w pobliżu brzegu piasty koła [3]. Badania zmęczeniowe zestawu kołowego w skali 1:1 wykazały, że poślizg piasty koła względem podpięcia osi mierzony na brzegu piasty wynosi $0,01 \pm 0,03$ mm na 100 MPa nominalnego naprężenia normalnego. Stwierdzono również, że wynikiem tych poślizgów jest zużycie fretting, którego zasięg jest do 4 mm od brzegu piasty [9].

4. WPLYW CZYNNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH NA ROZWÓJ ZUŻYCIA FRETTING

Jak wspomniano wcześniej, warunkiem poprawnej pracy połączenia wciskowego jest uzyskanie określonej stateczności połączenia. Otrzymujemy to poprzez wytworzenie odpowiedniego nacisku powierzchniowego pomiędzy skojarzonymi powierzchniami, a o którym decydują przede wszystkim wielkość wcisku, metoda łączenia i stan warstwy wierzchniej łączonych elementów. W niniejszym opracowaniu zostanie zwrócona uwaga głównie na wpływ wielkości wcisku oraz metody łączenia na wytrzymałość połączenia, a tym samym podatność na rozwój zużycia fretting.

4.1. Wielkość wcisku

Wcisk jest czynnikiem decydującym o wartości nacisków powierzchniowych, a tym samym o wytrzymałości i stateczności połączenia. Wartość nacisków powierzchniowych, w przypadku gdy łączone elementy wykonane są z tego samego materiału, a $d_1 = 0$ (średnica wewnętrzna osi), najczęściej określa się z równania [1]:

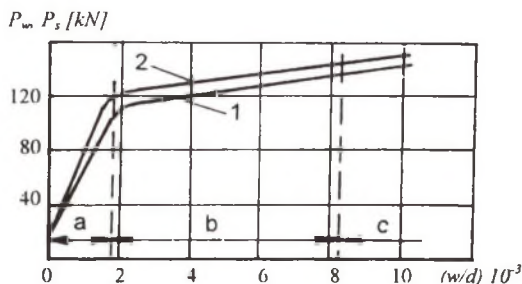
$$p = \frac{w}{d} 0,5E \left[1 - \left(\frac{d_2}{d} \right)^2 \right], \quad (3)$$

gdzie: w - wielkość wcisku,
 E - moduł sprężystości,
 d_2 - średnica zewnętrzna piasty.

Naciski obliczone według wzoru (3) są prawdziwe jedynie przy niewielkich wciskach, kiedy na styku połączonych elementów występują jedynie deformacje sprężyste. Według Kragielskiego [6], zakres sprężystych deformacji w strefie rzeczywistego styku jest możliwy do osiągnięcia w przypadku względnych wcisków rzędu:

$$\frac{w}{d} = 2,96 \cdot 10^{-7} \left[E \left(1 - \frac{d_2^2}{d^2} \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Wykonanie połączenia dla takiego zakresu względnego wcisku jest bardzo trudne do zrealizowania w praktyce. Stąd w połączeniach wciskowych mamy głównie do czynienia, w strefach rzeczywistego styku skojarzonych powierzchni, z deformacją sprężysto-plastyczną lub plastyczną. Efektem tego jest mniejszy rzeczywisty nacisk powierzchniowy od obliczeniowego. Na rys.2 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dla połączenia wciskowego wykonanego przez wtlaczanie dla próbek ze stali 45, pokazujących zależność wytrzymałości statycznej połączenia (siły wtlaczania - P_w i siły stłaczania - P_s) od względnego wcisku [1]. Według powyższych badań, wytrzymałość połączenia wyraźnie rośnie przy sprężystych deformacjach połączenia (obszar „a” na rys.2). Natomiast w obszarze odkształceń sprężysto-plastycznych (obszar „b”) i plastycznych (obszar „c”) intensywność wzrostu wytrzymałości maleje ze wzrostem wcisku.



Rys. 2. Zależność siły właczania P_w - 1 i stłaczania P_s - 2 od względnego wcisku [1]
 Fig. 2. Dependence of force in effort P_w - 1 and force out P_s - 2 on relative clamp [1]

W wyniku wzrostu wielkości wcisku nastąpi przejście w strefach rzeczywistego styku od deformacji sprężystych do deformacji sprężysto-plastycznych i plastycznych. Efektem tego będzie, w przypadku działania tylko sił normalnych (np. połączenie skurczowe), zbliżenie kontaktujących się powierzchni o wartość h . Tak więc rzeczywista wartość nacisków powierzchniowych będzie określona ze wzoru [7]:

$$p = \frac{w - \psi h}{d} 0,5 E \left[1 - \left(\frac{d_2}{d} \right)^2 \right], \quad (5)$$

gdzie: ψ - współczynnik zależny od mikrogeometrii skojarzonych powierzchni (np. dla styku sprężystego - $1 \div 1,008$, dla plastycznego - $1,04 \div 1,31$).

Natomiast według [6]:

$$h = 0,7 R_{\max} \left(\frac{p}{HB} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

gdzie: R_{\max} - maksymalna wysokość mikronierówności,
 HB - twardość.

4.2. Metoda łączenia

W przypadku połączenia koła z osią powszechnie stosuje się metodę właczania. Jest ona prosta w montażu i charakteryzuje się wysoką niezawodnością pracy połączenia. Jednak w tej metodzie montażu, w trakcie łączenia obu elementów, następuje ścinanie i zginięcie mikronierówności (w zależności od wielkości wcisku), a nawet mogą się tworzyć uszkodzenia typu adhezyjnego. Największej deformacji ulegają powierzchnie stykowe na początku piasty oraz na końcu podpięcia osi. To powoduje, że na długości połączenia styk staje się nierównomierny, czego konsekwencją będzie nierównomierny rozkład nacisków powierzchniowych [4].

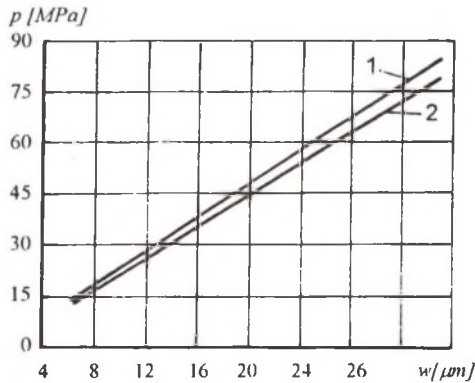
Tych wad połączenia można uniknąć w przypadku połączenia skurczowego. W tej metodzie unika się ścinania mikronierówności, natomiast mikrowystępy jednej powierzchni mogą wnikać w mikrowgłębienia drugiej lub w materiał o mniejszej twardości. Zależy to od własności mechanicznych skojarzonych materiałów, struktury geometrycznej warstwy wierzchniej oraz wielkości wcisku, czego wynikiem mogą być również deformacje plastyczne mikronie-

równości. Rzeczywista wielkość zbliżenia łączonych powierzchni będzie większa w przypadku łączenia metodą wtlaczania, gdzie występuje dodatkowy podział powierzchni styku w wyniku działania siły styrcznej. To powiększenie zbliżenia powierzchni w przypadku połączenia wtlaczanego możemy określić według Kragielskiego [6] ze wzoru:

$$\Delta h = \left[\left(2\sqrt{1+f^2} \right)^{\nu} - 1 \right] h, \quad (7)$$

gdzie: ν - parametr krzywej nośności profilu chropowatości.

Tak więc nacisk powierzchniowy dla tej samej wartości nominalnej wcisku będzie większy w przypadku elementów połączonych metodą skurczową. Na rys.3 przedstawiono wartości nacisków powierzchniowych w zależności od wielkości wcisku i metody łączenia (wielkość zbliżenia) [6].



Rys. 3. Zależność nacisków powierzchniowych od wielkości wcisku i metody łączenia: 1 - połączenie skurczowe, 2 - połączenie wtlaczane

Fig. 3. Dependence of surface pressure on clamp value: 1 - compression joint, 2 - forced-in joint

5. ZAKOŃCZENIE

Przytoczone rozważania dotyczące wpływu wielkości wcisku i metody łączenia na wartość nacisków powierzchniowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

- Wzrost wcisku powoduje przejście w połączeniu wciskowym od styku sprężystego do sprężysto-plastycznego lub plastycznego. Wpływa to na zmniejszenie rzeczywistych nacisków powierzchniowych w porównaniu do obliczonych według wzoru (1).
- W przypadku montażu połączenia poprzez wtlaczanie struktura geometryczna stykających się powierzchni ulega znacznej deformacji. Następuje większe zbliżenie połączonych powierzchni (o wielkość Δh) powodując mniejsze naciski powierzchniowe w porównaniu do połączenia skurczowego. Ponadto deformacje powierzchni powodują nierównomierny rozkład nacisków powierzchniowych na długości połączenia.

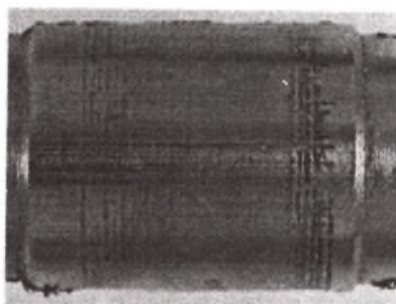
Skutkiem tych zmian w niektórych strefach połączonych elementów (szczególnie w pobliżu styku z brzegiem piasty) naprężenia normalne mogą przekroczyć wartość naprężeń trących, doprowadzając do wględnych poślizgów w tych obszarach. Efektem tego będzie rozwój zużycia fretting.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono obraz powierzchni podpięcia wałeczków modelujących połączenie wciskowe koło-oś zestawu kołowego [5]. Połączenia wykonano jako wtlaczane (rys. 4) oraz skurczowe (rys. 5). Powierzchnie podpięcia wałeczków modelujących oś były szlifowane ($R_a \cong 0,32 \mu\text{m}$), a tulejek modelujących piastę koła - toczone ($R_a \cong 2,28 \mu\text{m}$). Połączenia wykonano dla dwu wielkości wcisku 0,01 oraz 0,02 mm.

Wyniki badań zmęczeniowych potwierdziły wcześniejsze wnioski dotyczące wpływu wielkości wcisku i metody łączenia na rozwój zużycia fretting. Szczególnie podatne są elementy łączone przez wtlaczanie. Na przytoczonych fotografiach widać wyraźny wzrost intensywności zużycia wraz ze wzrostem wcisku, czego natomiast nie obserwuje się w przypadku połączeń skurczowych. Można więc stwierdzić, że obszar styku podpięcia osi z piastą koła w pobliżu jej brzegu, od strony części środkowej jest szczególnie podatny na rozwój zużycia fretting.



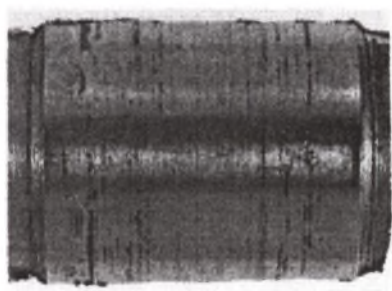
a



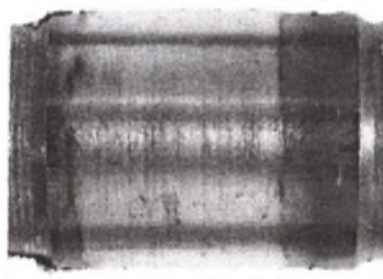
b

Rys. 4. Obraz powierzchni podpięcia wałeczków po badaniach zmęczeniowych, połączenie wtlaczane (pow. 4x): a - wcisk 0,01 mm; b - 0,02 mm

Fig. 4. Shafts wheel seat surface after fatigue tests, forced-in joint (magn. 4x): a - clamp 0.01 mm; b - 0.02 mm



a



b

Rys. 5. Obraz powierzchni podpięcia wałeczków po badaniach zmęczeniowych, połączenie skurczowe (pow. 4x): a - wcisk 0,01 mm; b - 0,02 mm

Fig. 5. Shafts wheel seat surface after fatigue tests, compression joint (magn. 4x): a - clamp 0,01 mm; b - 0,02 mm

LITERATURA

1. Bałacki L.T.: Proczność priesowych sojedinenij. Izd. Tiejchnika, Kijev 1982.
2. Gąsowski W., Stasiak L.: Badania wytrzymałości zmęczeniowej wagonowych osi zestawów kołowych w ośrodku korozyjnym. Korozja stykowa. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport, z. 14, Gliwice 1989, s. 103-121.
3. Guzowski S.: Wpływ stanu naprężeń w połączeniu wciskowym koło-oś na rozwój zużycia fretting. Mat. Konferencyjne XII Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe”, Poznań-Rydzyna, 21-24.10.1996, s. 95-100.
4. Guzowski S.: Fretting wear expansion in clamped joints. Tribologia, nr 4, 1994, s. 504-512.
5. Guzowski S.: Wpływ metody łączenia w połączeniu wciskowym na rozwój zużycia typu fretting. Tribologia, nr 5-6, 1997, s. 614-622.
6. Kragielski I.W., Michin Ch.M.: Uzły trienia maszin. Maszynostrojenije, Moskwa 1984.
7. Piec P., Guzowski S., Magiera J. i in.: Prognozowanie trwałości osi zestawów kołowych wagonów kolejowych. CPBP 02.19.04.16, Instytut Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej, Kraków 1987.
8. Świderski Z.: Wady i uszkodzenia elementów taboru kolejowego. Praca niepublikowana w ramach projektu badawczego nr PB-730/T12/95/08, IPSz PK, Kraków 1996.
9. 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, s. 14-17, 20.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Józef Marciniak

Abstract

The wheel set is a rail vehicle unit which is important in safeguarding traffic safety. This is why the standard codes of practice allowing the wheel set to be used are extremely rigorous. Despite the strict regulations, there are still many cases of failure and wear tolerated in actual practice. These refer mainly to the wheel-axle clamped joint. Fatigue cracks are most common, although the incident frequency is insignificant. Characteristically, the fatigue cracks area overlaps with the fretting development area. Clamped joint strength is strongly affected by the value of the clamp and joining methods, which in turn decide of the deformation in the surfaces of the joined parts. This directly influences Thai values of surface pressure which ensure the joint stability. Fretting wear development in certain areas of the joint proves that the stresses on wheel seat axle (due to service load) exceed friction stresses in the joint. The relation between these stresses results in relative slips of the joined surfaces and development of fretting wear.