ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 57 Nr kol. 1675

Henryk BĄKOWSKI, Piotr ADAMIEC, Jerzy OKRAJNI, Andrzej POSMYK

OCENA ZUŻYCIA W STYKU TOCZNO-ŚLIZGOWYM

Streszczenie. W ramach pracy przedstawiono wyniki badań metalograficznych szyn kolejowych, badań laboratoryjnych i metalograficznych próbek wykonanych z szyn kolejowych w gatunku 900A oraz wykonano obliczenia rozkładu naprężeń i odkształceń (MES) układu skojarzenia tribologicznego rolka-rolka. Na podstawie ww. badań stwierdzono zgodność mechanizmów zużywania występujących zarówno w rolce, jak i w eksploatowanej szynie kolejowej. Można rozróżnić dwa mechanizmy zużywania, tj. występujące od początku współpracy zużywanie ścierne i pojawiające się po określonej liczbie cykli zużywanie zmęczeniowe.

ESTIMATION OF WEAR IN ROLLING SLIDING CONTACT

Summary. The result of metallographic test of rail, laboratory metallographic test of specimens made of rail steel grade 900 A has been presented in this paper. Using Finite Element Method, distribution of reduced stresses and strains in the roller-roller system has been done. Based on the investigations, the comparison of wear mechanisms in real wheel-rail and roller-roller systems has been demonstrated. Two wear mechanisms of the rail steel were identified, namely, abrasive wear occurring in the beginning and fatigue wear after several thousands rolling cycles.

1. WSTĘP

W węzłach tribologicznych wielu maszyn i urządzeń występują warunki styku toczno-ślizgowego, o bardzo złożonym stanie naprężeń. Najbardziej rozpowszechnionymi w eksploatacji pojazdów przykładami takich skojarzeń są układy koło-szyna, zęby w przekładniach zębatych lub element toczny i bieżnia łożysk tocznych. Ze względu na rodzaj i wielkość występujących obciążeń najbardziej złożonym przypadkiem jest styk koło-szyna wagonów kolejowych.

Rozwijająca się gospodarka światowa i globalizacja powodują wzrost masy przewożonych towarów i szybkości pociągów. Dlatego powierzchnia toczna szyny kolejowej jest narażana na coraz to większe obciążenia prowadzące do wytężenia materiału w wyniku zmiennego oddziaływania wielokrotnie powtarzającego się obciążenia pochodzącego od koła kolejowego, sił trakcyjnych – hamowania i przyspieszania oraz prędkości jazdy (obciążenie dynamiczne). Efektem wytężenia materiału jest wzrost naprężeń w obszarze kontaktu (wewnątrz główki szyny) na pewnej głębokości pod powierzchnią styku. Tak więc powstawanie i rozwój uszkodzeń na powierzchni oraz tuż pod nią elementów pracujących w styku toczno-ślizgowym zależy, z jednej strony, od obciążenia i poziomu naprężeń w najbardziej wytężo-

nym obszarze szyny (tzw. punkt Bielajewa), z drugiej zaś strony od właściwości materiału, z jakiego szyna została wykonana, a przede wszystkim od jego wytrzymałości w tym obszarze. Na poziom naprężeń mają wpływ nie tylko czynniki zewnętrzne, lecz także stan naprężeń własnych, topografia powierzchni tocznej szyny, wszelkie karby geometryczne i strukturalne (w tym także nieciągłości) powodujące koncentrację naprężeń. Największe naprężenia powstają w górnej części główki szyny. Składają się one z:

- naprężeń kontaktowych wokół punktu styku szyny z kołem,
- naprężeń rozciągających i ściskających pochodzących od zginania szyny w torze,
- naprężeń własnych powstałych w czasie prostowania szyn,
- naprężeń dylatacyjnych rozciągających szyny (zgrzewane w torze bezstykowym, w zimie wskutek skurczu materiału).

Chcąc określić maksymalne wytężenie materiału, należy wyznaczyć wszystkie panujące w nim naprężenia pochodzące od różnych obciążeń, o ile te występują równocześnie. W tym celu wyznaczamy naprężenie zredukowane. W ten sposób możemy określić, czy w materiale szyny zostały osiągnięte naprężenia dopuszczalne. W większości przypadków przekroczenie granicy plastyczności materiału prowadzi do powstawania pęknięć podpowierzchniowych w wyniku uplastycznienia materiału. W praktyce nie oznacza to jednak, że przy wielokrotnym przetoczeniu musi dojść do postępujących deformacji plastycznych. Przynajmniej trzy efekty redukują albo zwiększają występujące naprężenia [1]:

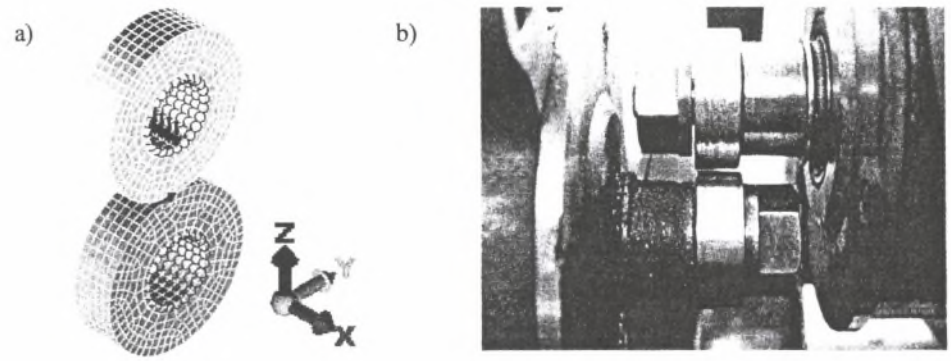
- na skutek odkształceń plastycznych (tzw. uplastycznienia) może dojść do zmian geometrii powierzchni,
- w przypadku uplastycznienia powstają naprężenia własne, które w czasie następnego cyklu (przetoczenia) powodują, że wyższe obciążenie może być przejęte czysto sprężyście,
- na skutek obciążenia materiał zmienia swoje właściwości i dochodzi do jego umocnienia.

W momencie, gdy materiał lokalnie osiągnie pewne odkształcenie krytyczne, dochodzi do rozwoju postępujących plastycznych odkształceń materiału (ratchetting), czego efektem jest powstawanie pęknięć. W przypadku silnie umocnionego przez zgniot, a tym samym kruchego materiału, pęknięcia pojawiają się natychmiast w chwili przeciążenia. Z mechaniki pękania wiadomo, że przełom zmęczeniowy szyny rozwija się pod wpływem dominujących naprężeń tnących, wynikających z różnicy naprężeń głównych trójosiowego stanu naprężeń panujących w główce szyny. Przy tych przeciążeniach powierzchni tocznych szyny dochodzi do uszkodzeń kontaktowo-zmęczeniowych, których usunięcie wymaga czynności konserwacyjnych (szlifowanie), a nawet w ekstremalnym przypadku wymiany szyny. Obie czynności są związane z wysokimi kosztami.

Istnieje możliwość zmniejszenia kosztów regeneracji i wymiany szyn, jeżeli uda się określić, przy jakiej intensywności zużywania ściernego szyny czas potrzebny do wystąpienia zmęczeniowego zniszczenia materiału pod powierzchnią szyny (liczba cykli zmęczeniowych) nie zostanie osiągnięty, ponieważ maksimum naprężeń zastępczych przesunie się w głąb szyny i zużywanie zmęczeniowe nie zdąży się pojawić. Przedłożony artykuł jest próbą określenia relacji pomiędzy intensywnością występującego na powierzchni tocznej szyny zużywania ściernego i występującym pod powierzchnią zużywaniem zmęczeniowym. W ramach prowadzonych w Katedrze Eksploatacji Pojazdów badań postawiono tezę, że przy odpowiednio dużej intensywności zużywania ściernego może nie wystąpić zużywanie zmęczeniowe. W celu sprawdzenia słuszności postawionej tezy wykonano badania zarówno szyn kolejowych eksploatowanych na wybranym odcinku toru w województwie Śląskim, jak i materiału po próbach modelowych przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. W celu dobrania odpowiednich - do warunków rzeczywistych - warunków badań stanowiskowych posłużono się analizą wymiarową i zaleceniami polskich norm [2]. W pierwszym etapie badań podjęto próbę sprawdzenia, na ile mechanizm zużywania w warunkach laboratoryjnych w układzie rolka-rolka jest zbliżony do zużycia w układzie rzeczywistym koło-szyna.

2. PRZEBIEG BADAŃ I ICH WYNIKI

Badania przeprowadzono dwuetapowo, tj. dokonano pomiarów zużycia szyny na wybranym odcinku torów i w warunkach laboratoryjnych na stanowisku typu Amsler pracującym w układzie rolka-rolka w styku toczno-ślizgowym. Schemat węzła tarcia testera przedstawiono na rysunku 1. Materiał do badań stanowiła stal szynowa w gatunku 900 A wg UIC 60 (tabl. 1) [3]. Przeciwpróbką w układzie rzeczywistym była obręcz koła ze stali P-54T, a w laboratoryjnym – zgodnie z PN-79 H-04329- stal ŁH15 o twardości 62 HRC. Po przepracowaniu przez badane skojarzenie określonej liczby cykli dokonywano pomiaru ubytku masy badanych rolek. Uzyskane wyniki ubytku masy (jako zużycie kumulacyjne) przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat węzła tarcia testera typu Amsler: a) sposób przyłożenia sił do rolki; b) węzeł tarcia

Fig. 1. Scheme kinematic pair of friction on stand Amsler: a) forces application on roller, b) kinematic pair of friction

Tablica 1

Skład chemiczny i wybrane właściwości użytej do badań stali szynowej [3]

Stal	Skład chemiczny [%]									Właściwości mechaniczne			
900A	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A_5 [%]	HB
	0,73	1,04	0,30	0,019	0,013	0,02	0,01	0,03	0,003	973-1230	515-750	12-13,6	288-356

Parametry eksploatacyjne w układzie rzeczywistym koło - szyna i warunki badań w układzie użytym w badaniach laboratoryjnych podano w tablicy 2.

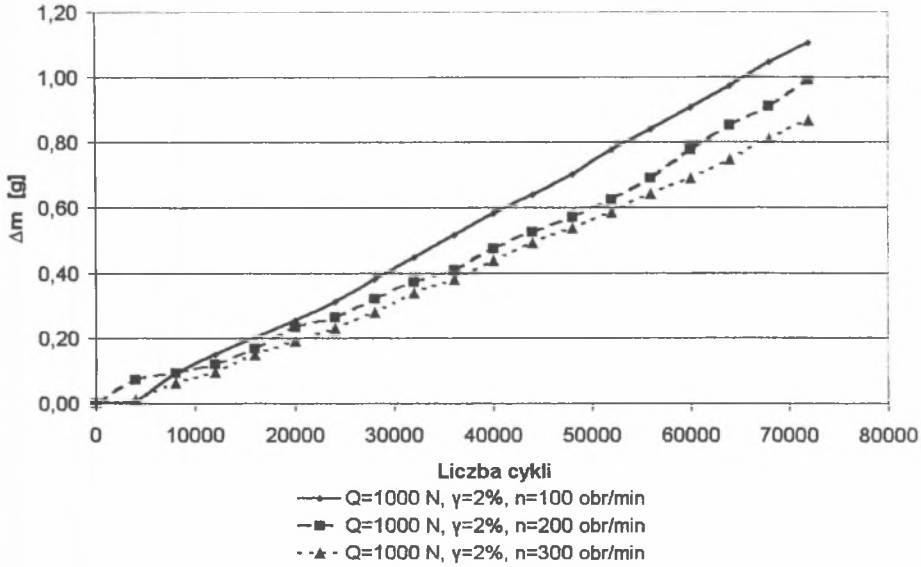
Tablica 2

Warunki badań w układzie rzeczywistym (koło - szyna) i laboratoryjnym (rolka - rolka)

Rodzaj skojarzenia									
Koło-szyna					Rolka-rolka				
Nacisk MPa	Poślizg %	Prędkość m/s	a* mm	b mm	Nacisk MPa	Poślizg %	Prędkość m/s	a** mm	b mm
760,00	0,30	15,00	5,20	7,20	650,00	0,30	5,00	10,00	0,02

* W przypadku skojarzenia koło-szyna obszar styku jest elipsą o ramieniu a i b (pow. 100–150 mm^2) [4].

** W przypadku skojarzenia rolka-rolka obszar styku jest wycinkiem pobocznicy walca (prostokątny).



Rys. 2. Zależność ubytku masy (Δm) rolki wykonanej ze stali szynowej 900 A od liczby cykli (n) po współpracy z rolką wykonaną ze stali ŁH15 dla różnych prędkości obrotowych rolki (wyraźnie widoczne dwa rodzaje zużywania, tj. łagodne ścierne na początku wykresu i intensywniejsze zmęczeniowe po 4000 cykli; p = 650 MPa)

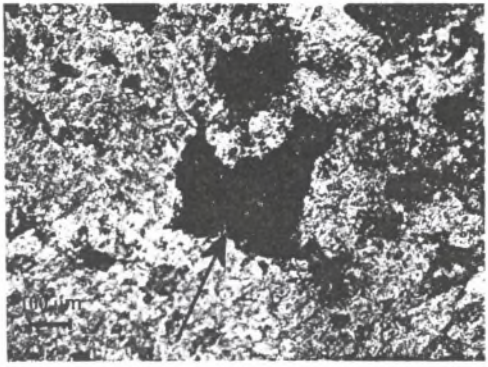
Fig. 2. Mass loss (Δm) of the roller made of rail steel grade 900 A versus number of cycles (n) for different speed of rotation

W celu porównania i wyjaśnienia mechanizmów zużycia szyn badanych w obiektach rzeczywistych i rolek użytych do badań laboratoryjnych wykonano badania metalograficzne pobranych z nich próbek w wybranych odcinkach szyn i rolek w warstwie powierzchniowej i w rdzeniu. Wyniki zamieszczono na rysunkach 3 i 4.

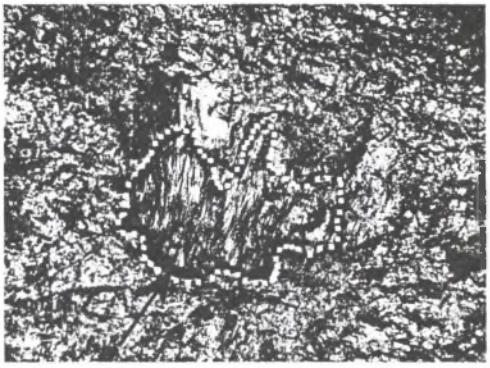
Do weryfikacji wyników badań uzyskanych w układzie rzeczywistym i laboratoryjnym wykorzystano symulację komputerową styku koło-szyna za pomocą metody elementów skończonych (MES).

Do budowy modelu przyjęto następujące założenia:

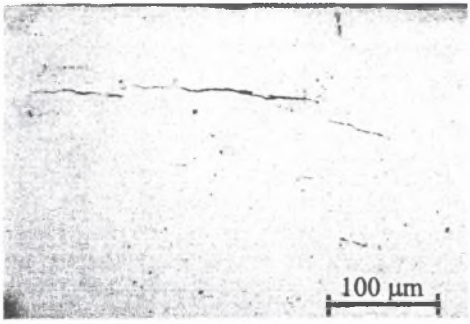
- naprężenia odpowiadają maksymalnym naprężeniom w styku rzeczywistym koło-szyna podczas przejazdu pociągu osobowego;
- obciążenie jest wywierane przez rolkę górną i jest przyłożone na jej osi X, rys. 1a;
- na styku koło szyna (rolka-rolka) panuje tarcie technicznie suche, siła tarcia T = 85 N (siła tarcia z pomiarów, obliczony z hipotezy Amontonsa współczynnik tarcia μ = 0,085);
- rolka symulująca szynę ma tylko dwa stopnie swobody, tj. może się przemieszczać wzdłuż osi Z i obracać wokół osi X, rys. 1;
- rolka symulująca koło ma tylko jeden stopień swobody, tj. może się przemieszczać wzdłuż osi Z, rys. 1;
- w obciążeniach pominięto siły napędowe i hamowania.



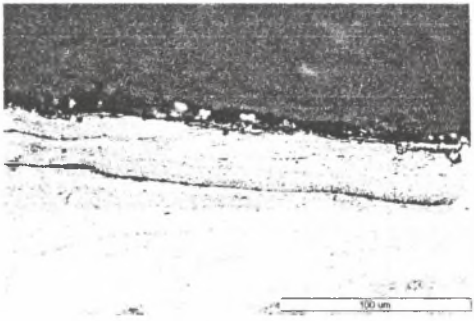
a) widok z powierzchni szyny po wystąpieniu zużycia zmęczeniowego; strzałką zaznaczono miejsce po złuszczeniu



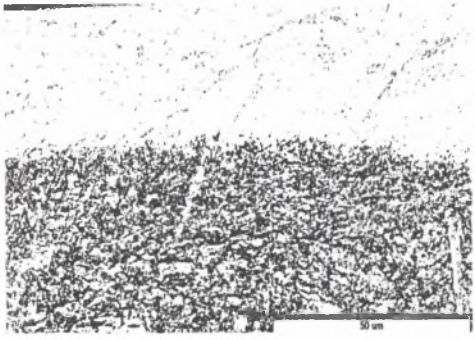
b) widok z powierzchni rolki po wystąpieniu zużycia zmęczeniowego; strzałką i jasnymi punktami zaznaczono miejsce po złuszczeniu



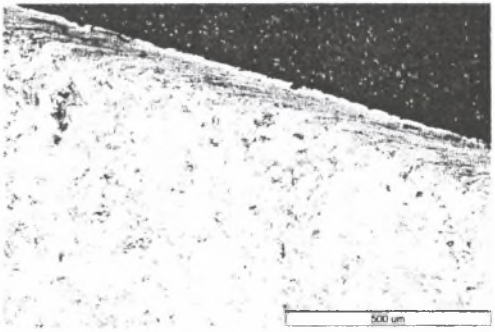
c) zgład poprzeczny szyny wzdłuż kierunku jazdy; widoczne pęknięcia zmęczeniowe w warstwie powierzchniowej na głębokości około 80 – 100 µm;



d) zgład poprzeczny czoła rolki ze stali szynowej, widoczne pęknięcia zmęczeniowe na głębokości od 30 do 35 µm i stekstu rowanie w warstwie powierzchniowej (trawione w nitalu)



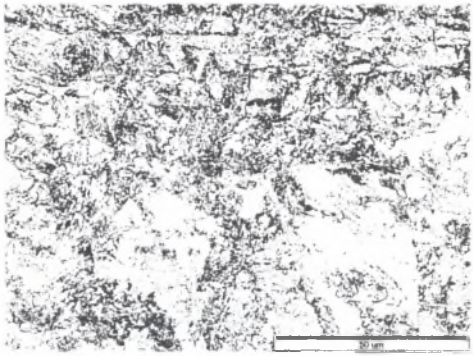
e) zgład poprzeczny szyny kolejowej z widoczną „białą warstwą" o grubości około 40 –50 µm



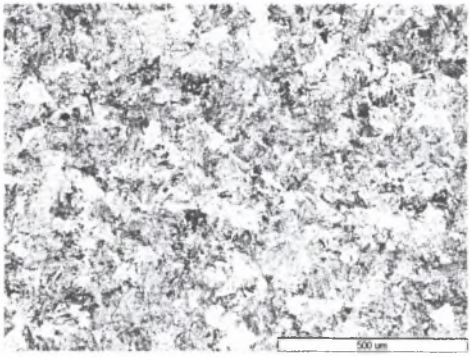
f) zgład poprzeczny czoła rolki ze stali szynowej z widoczymi zmianami w warstwie powierzchniowej na głębokości 40 – 60 µm

Rys. 3. Porównanie mechanizmów zużycia zmęczeniowego w warstwie powierzchniowej obiektu rzeczywistego – szynie i użytej do badań stanowiskowych rolce wykonanej ze stali szynowej 900 A

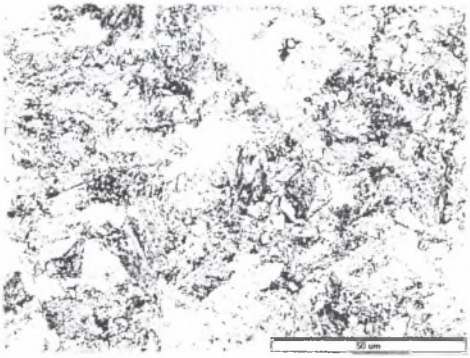
Fig. 3. Comparison of fatigue wear mechanism in surface layer of real object – rail and roller made of rail steel in grade 900 A



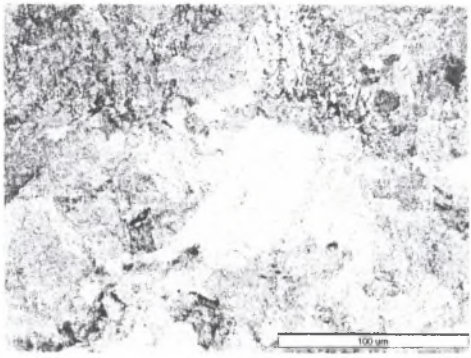
a) warstwa podpowierzchniowa szyny kolejowej, trawiona w nitalu; w górnej części widoczna strefa przejścia od warstwy odkształconej plastycznie do rdzenia; w dolnej części widoczna struktura perlityczna z wyraźnymi granicami ziaren



b) warstwa podpowierzchniowa stali szynowej, trawiona w nitalu; widoczna struktura perlityczna z wyraźnymi granicami ziaren



c) rdzeń szyny kolejowej bez śladów odkształceń; obok perlitu występuje również wolny ferryt w formie ziaren, a nie siatki



d) rdzeń rolki wykonanej ze stali szynowej bez śladów odkształceń; obok perlitu występuje również wolny ferryt w formie ziaren, a nie siatki

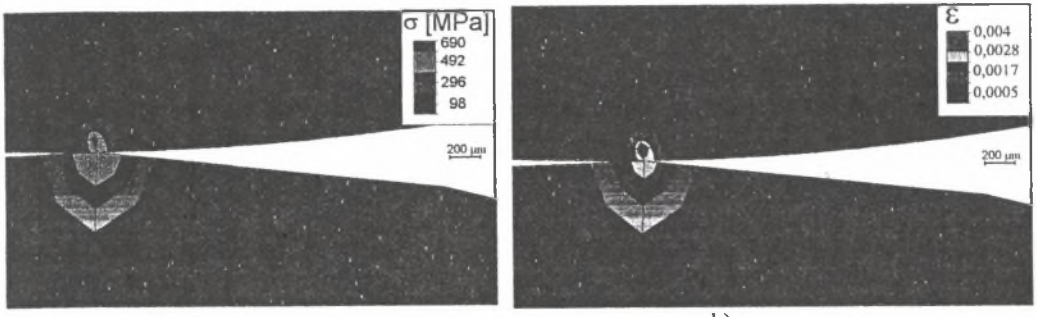
Rys. 4. Porównanie materiałów szyny i użytej do badań rolki w obszarach bez występowania zużycia zmęczeniowego
Fig. 4. Comparison of rail and roller materials in areas without fatigue wear

Na opracowanym modelu skojarzenia wyznaczono rozkład naprężeń oraz odkształceń w pobliżu miejsca styku, które pozwoliły na określenie położenia maksymalnych naprężeń zastępczych i odkształceń.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Zmiany, które zachodzą na powierzchni oraz tuż pod nią, są wynikiem działania naprężeń normalnych oraz stycznych. W obszarze styku koła z szyną na pewnej głębokości pod powierzchnią styku występują największe naprężenia, które powodują zużycie zmęczeniowe materiału i powstanie pęknięć (80 – 100 μm w szynie i 40 – 60 μm w rolce, rys. 3a i 3b). Po określonej liczbie cykli pęknięcia pojawiają się na powierzchni szyny i rolki w postaci odpadających łusek (rys. 2a i 2 b).

Zużycie zmęczeniowe jest poprzedzone łagodniejszym zużywaniem ściernym, którego intensywność zależy istotnie od prędkości obrotowej. Największe zużycie ścierne występuje przy n = 200 obr./min, rys. 2.



a) b)

Rys. 5. Rozkład naprężeń zastępczych (a) i odkształceń (b) w rolkach wyznaczonych metodą elementów skończonych (N = 1000 N; T = 85 N; γ = 2%; górna rolka ze stali A900, dolna z ŁH15

Fig. 5. Distribution of reduced-stresses (a) and strains (b) in system roller-roller using the MES (N = 1000 N; T = 85 N; γ = 2%), top roller made of rail steel in grade 900 A, bottom roller made of bearing steel ŁH 15

Tablica 3

Liczba cykli do zniszczenia dla stali 900A [5]

Liczba cykli do zniszczenia N_z	Naprężenia nasycenia σ_{an} [MPa]	Odkształcenie ε
6120	421	0,00078
3160	453	0,0098
1500	517	0,0136
950	525	0,0138
Liczba cykli zmęczenia wysokocyklowego $N_f = 5x10^6$	275	0,00135

Pierwsze łuskowate produkty zużycia na rolkach pojawiają się po wykonaniu 4 tysięcy cykli, rys. 2. Ta liczba cykli mieści się w przedziale niskocyklowej trwałości zmęczeniowej (N_Z) dla stali szynowej podanej w tabeli 3. Jednak wartość naprężeń, przy których wystąpiło zmęczenie materiału szyny (σ = 650 MPa) jest znacznie wyższa niż naprężenia, przy których N_Z jest zbliżone do 4000 ($\sigma \approx$ 450 MPa). Trwałość zmęczeniowa wysokocyklowa dla materiału szyny wynosi $N_f = 5x10^6$ cykli przy σ = 275 MPa. Gdyby w badanym układzie rolka-rolka występowało zużycie zmęczeniowe, to przy naprężeniach σ = 650 MPa płatkowe produkty zużycia powinny pojawić się już poniżej 1000 cykli. Ponieważ występuje zużywanie ścierne, to miejsce, w którym powinno wystąpić zmęczenie materiału (max. naprężenia zastępcze) przesuwa się w głąb rolki, gdzie panują mniejsze naprężenia, tj. $180 < \sigma < 300$ MPa na głębokości do 400 μm od powierzchni, rys. 5a. Jednak to miejsce ma już swoją historię, tzn. zostało poddane określonej liczbie cykli naprężeń o mniejszej amplitudzie. Sumaryczne oddziaływanie wcześniejszych naprężeń o większej amplitudzie i późniejszych mniejszych daje ilość cykli do zmęczenia pośrednią między trwałością niskocyklową i wysokocyklową.

Ilość ta zależy od właściwości materiału i od intensywności zużywania ściernego na powierzchni rolki w układzie testera lub szyny w układzie rzeczywistym.

Cechy stereologiczne produktów zużycia z szyny i rolki wykazują duży współczynnik korelacji, np. dla średniej średnicy R = 0,8. Świadczy to o poprawnym dobraniu warunków badań na testerze Amslera odwzorowujących warunki panujące w układzie rzeczywistym koło-szyna. Większa intensywność zużywania ściernego powoduje zmniejszenie intensywności zużywania zmęczeniowego (dla n = 200 obr/min, rys. 2).

Na skutek ruchu z poślizgiem i panujących znacznych naprężeń zredukowanych powstaje odkształcona plastycznie i umocniona „biała warstwa", pod którą występuje charakterystyczne ułożenie wydłużonych ziaren w obrębie warstwy powierzchniowej, rys. 3b . Zakres oddziaływania maksymalnych naprężeń jest ograniczony do około 200 μm w szynie i rolce, co wyznaczono na podstawie badań metalograficznych i symulacji MES.

Wyniki z przeprowadzonych badań szyn kolejowych typu UIC 60 w gatunku 900 A pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Dobrane za pomocą analizy wymiarowej warunki pracy węzła rolka-rolka w testerze typu Amsler odwzorowują w dobrym stopniu warunki pracy węzła rzeczywistego.
2. Stwierdzone w warunkach laboratoryjnych mikropęknięcia w warstwie powierzchniowej znajdują odzwierciedlenie w elementach układu rzeczywistego koło-szyna.
3. Przy nacisku 650 MPa styku rolka-rolka można rozróżnić dwa mechanizmy zużywania, tj. występujące od początku współpracy zużywanie ścierne i pojawiające się po określonej liczbie cykli (> 4000) zużywanie zmęczeniowe.

Literatura

1. Böhmer A,. Martin E., Knothe K., Bucher F., Klimpel T.: Beanspruchungen von Schienen unter statischen, dynamischen und thermischen Belastungen. Glasers Annalen Nr. 127, 2003, 116-130.
2. PN-79 H-04329. Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia przy wzrastającym nacisku jednostkowym na maszynie typu Amsler.
3. Żak S., Sarna J.: Ocena jakości szyn produkcji Huty Katowice. Produkcja i Eksploatacja Szyn Kolejowych, Materiały XXIII Konferencji naukowo-technicznej Huty Katowice, Rogoźnik 2003, 32-36.
4. Kapoor A., Schmid F., Fletcher D.: Managing the critical wheel/rail interface. Railway Gazette International, January 2002, 25-28.
5. Bartytzel J.: Analiza wpływu makro i mikrostruktury na właściwości użytkowe szyn kolejowych wytwarzanych z wsadu odlewanego metodą ciągłą. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu w Katowicach, Katowice 1998.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Roman Kuziak