ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 48 Nr kol. 1604

Piotr ADAMIEC, Jerzy DZIUBIŃSKI, Henryk BĄKOWSKI

ZUŻYCIE POWIERZCHNIOWE SZYN

Streszczenie. W pracy przedstawiono formy zużywania szyn kolejowych ze szczególnym uwzględnieniem łuszczenia. Badano typowe zużywanie się eksploatacyjne typu spalling szyn zwykłych i obrobionych cieplnie na stanowisku Amslera w układzie rolka-rolka. Zamieszczono wyniki badań zużycia wagowego, intensywności zużycia, wyniki badań produktów zużycia oraz wyniki obliczeń zużycia szyn z wykorzystaniem mechaniki pękania. Stwierdzono, że dominującym procesem zużywania się stali szynowej jest proces powierzchniowego łuszczenia się (spalling) wskutek dużych odkształceń i powstałych zawalcowań prowadzących do lokalnego odrywania się cząstek.

SURFACE WEAR OF RAILS

Summary. Types of rails wear have been discussed with the special considering of the spalling type. Service rails wear of the spalling type of rails heat treatment and without teat treatment on the Amsler stand in the roller-roller system has been tested. Result of the weight wear test, the intensity of wear, the wear products test and the rail wear calculation based on the fracture mechanics have been presented. It has been found the dominant type of the rail steel wear is the spalling type as a result of large strains on the surface, leading to the local tearing off of particles.

1. WPROWADZENIE

Szyny stanowią bardzo ważny element toru stanowiący o bezpieczeństwie jazdy. Ich zużywanie się decyduje o trwałości i niezawodności szyn, tzn. o czasie i prawdopodobieństwie uzyskania tzw. zużycia dopuszczalnego. Wielkość takiego zużycia wynosi w zależności od warunków eksploatacyjnych od 12 do 16 mm [1].

W torze występują różne formy zużycia szyn. Najczęściej spotyka się zużycie typu spalling w postaci łuszczenia i odrywania się cząstek w warstwie wierzchniej. Mogą występować również formy zużycia typu wybuksowań (scuffing) lub wykruszeń zmęczeniowych (shelling), o których wspomina się w pracy [2]. Przykłady różnych postaci zużycia zostały skatalogowane według UIC [3].

Według Zaczkowskiego [4] o trwałości i niezawodności szyn decyduje ich normalne zużycie eksploatacyjne, które zwykle przyjmuje formę zużywania się poprzez łuszczenie (spalling).

W pracy badano formy zużywania się szyn typu spalling, które modelowano na urządzeniu Amslera za pomocą układu rolka-rolka, z których jedna rolka stanowiła próbkę stali szynowej, natomiast druga rolka jako przeciwpróbka była wykonana ze stali łożyskowej ŁH 15 po obróbce cieplnej. W próbach tych produkty zużycia występowały w postaci drobnych cząstek odrywających się od powierzchni.

Zużycie takie można opisać za pomocą modelu Archarda jako zużycie ubytkowe proporcjonalne do nacisku i drogi, a odwrotnie proporcjonalne do twardości próbek:

$$Z = C \cdot \frac{p \cdot S}{H} \tag{1}$$

gdzie:
Z - zużycie wagowe g,
C - współczynnik proporcjonalności,
P - nacisk w MPa,
S - droga tarcia w m,
H - twardość w MPa.

Zużycie typu spalling można również opisać za pomocą modelu Suh [5], wykorzystującego mechanikę pękania. W modelu takim występuje wzrost szczeliny równoległej do powierzchni. Wzrost ten jest zgodny z równaniem Parisa opisującym wzrost szczeliny zmęczeniowej:

$$\frac{dC}{dN} = \beta \cdot (\Delta K)^n \tag{2}$$

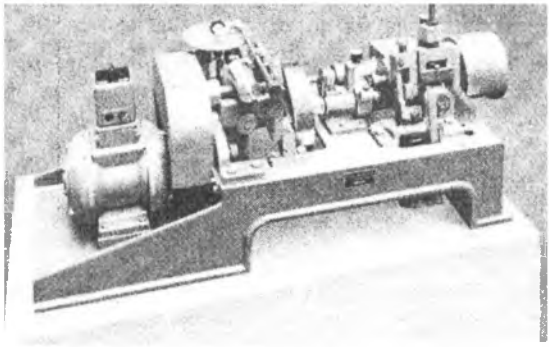
gdzie:
dC - przyrost szczeliny,
dN - przyrost cykli zmęczeniowych,
ΔK - zakres współczynnika intensywności naprężeń,
β, n - stałe materiałowe.

Modele te wykorzystano do analizy uzyskanych wyników zużywania się stali szynowych. Badano zużywanie się próbek wykonanych z szyn zwykłych S49 nie obrabianych cieplnie o średniej twardości 260 HB i szyn UIC 60 po obróbce cieplnej o średniej twardości 330 HB. Obydwie partie szyn wykonane były ze stali St90PA (0,60÷0,80% C; 0,80÷1,30% Mn; 0,10÷0,50% Si), przy czym szyny nie obrobione cieplnie charakteryzują się własnościami mechanicznymi na poziomie R_m>880 MPa, A_5>10%, twardość ok. 260 HB i strukturze perlitycznej o odległości między płytkami cementytu ok. 0,20 μm, natomiast szyny obrabiane cieplnie posiadają własności rzędu: R_m>1080 MPa, A_5>10%, KCU>25 J/cm^2, twardość 320 – 390 HB i wykazują strukturę drobnopłytkowego perlitu o odległościach między płytkami ok. 0,10 μm.

2. PRZEPROWADZENIE BADAŃ

2.1. Badania zużycia wagowego szyn

Badania modelowe zużywania się szyn przeprowadzono na stanowisku Amslera (rys.1) wykorzystując próbki ze stali szynowych w postaci rolek o średnicy nominalnej 42,5 mm i szerokości 10 mm przy nacisku p_{Hertza} = 587 MPa oraz przeciwpróbkę ze stali łożyskowej ŁH15 o średnicy 38,8 mm i szerokości 10 mm, uzyskując poślizg 0,78%.



Rys. 1. Maszyna do badania ścieralności typu Amsler
Fig. 1. Amsler machine for the wear investigation

Właściwości stali szynowej zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Właściwości mechaniczne stali w gatunku 900A

Rodzaj szyny	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A_5 [%]	KCU [J/cm^2]	HB
Obrobiona cieplnie	1230	750	13,6	31	356
Surowa po walcowaniu	973	515	12	26	288

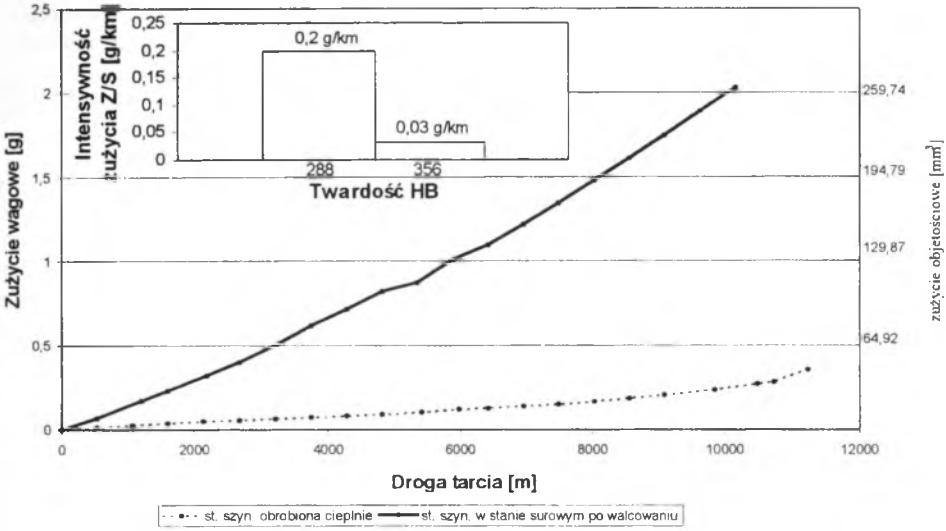
W czasie badań dokonywano pomiaru ubytków wagowych oraz rejestrowano produkty zużycia w formie drobnych płytek. Do oceny wielkości produktów zużycia wykorzystano mikroskop optyczny Neophot wyposażony w kamerę telewizyjną umożliwiający komputerową analizę wielkości uzyskanych płytek. Wyniki badań zużycia przedstawiono w tablicy 2 i na rys. 2.

Tablica 2

Wymiary cząstek zużycia

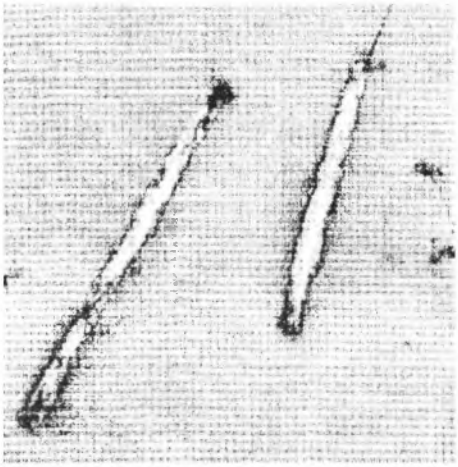
Stan stali	Obciążenie, poślizg	Wymiary cząstek zużycia			
		Średnica cząstek μm	Odchylenie standardowe σ μm	Wskaźnik kształtu	Grubość cząstek μm
Po obróbce cieplnej	Nacisk L=587 MPa, Poślizg γ= 0,78 %	180 ÷ 251 / 208	4,1	0,99	19,3 ÷ 30,3 / 24
Bez obróbki cieplnej	Nacisk L=587 MPa, Poślizg γ= 0,78 %	383 ÷ 463 / 432	74,0	0,97	32,5 ÷ 38,9 / 36

Uwaga: średnie wielkości obliczono z 20 pomiarów



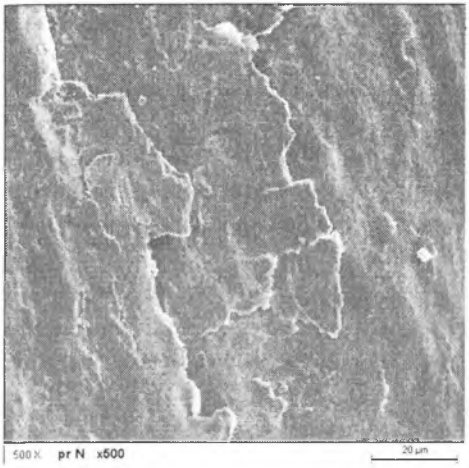
Rys. 2. Zużycie stali szynowych [6]
Fig. 2. Wear of steel raili [6]

Przykłady produktów zużycia przedstawiono na rys. 3 – 6.

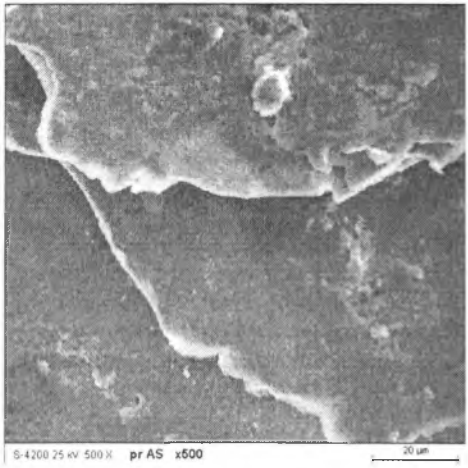


Rys. 3. Produkty zużycia stali szynowej po obróbce cieplnej, pow. 150x
Fig. 3. Particles as wear product of heat treatment rail, Mag 150x

Rys. 4. Produkty zużycia stali szynowej surowej nie obrobionej cieplnie, pow. 150x
Fig. 4. Particles as wear product of rail without heat treatment, Mag 150x



Rys. 5. Powierzchnia zużycia stali szynowej obrobionej cieplnie, pow. 500x
Fig. 5. The surface wear of heat treatment rail, Mag 500x



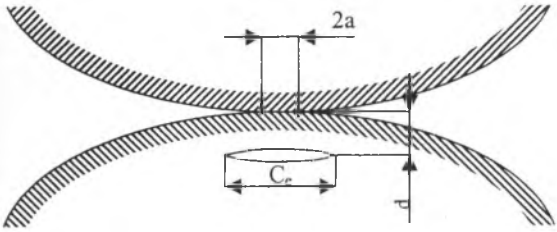
Rys. 6. Powierzchnia zużycia stali szynowej surowej nie obrobionej cieplnie, pow. 500x
Fig. 6. The surface wear of rail without heat treatment, Mag 500x

2.2. Obliczenie zużycia szyn z zastosowaniem mechaniki pękania

Do obliczeń zużycia objętościowego szyn wykorzystano wzór (3) i model (rys. 7) podany w pracy [7]:

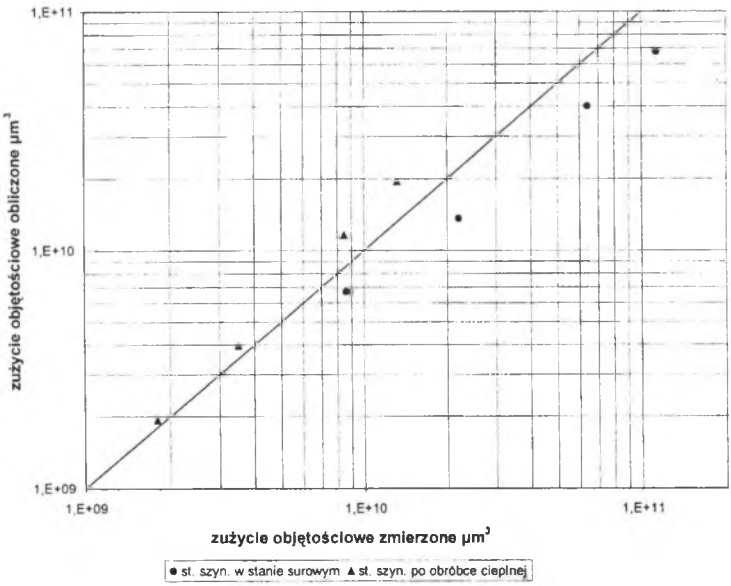
$$V = \left\{ \delta \cdot \left[\bar{k} \cdot \gamma \cdot H \cdot \sqrt{a} \right]^n \cdot p \cdot S + C_e \right\} \cdot d \cdot C_e \tag{3}$$

gdzie:
$\delta = \alpha \cdot \beta$ - stała,
α - współczynnik proporcjonalności,
β - stała w równaniu Parisa opisującym wzrost szczeliny zmęczeniowej,
n - wykładnik w równaniu Parisa,
γ - współczynnik proporcjonalności,
H - twardość,
$\bar{k}$ - bezwymiarowa wielkość zależna od współczynnika tarcia μ, grubości zużytej cząstki d i długości pęknięcia C_e,
p - obciążenie, naprężenie kontaktowe,
S - droga tarcia,
d - grubość zużytej cząstki,
C_e - długość pęknięcia,
a - połowa długości kontaktu nierówności z powierzchnią przy czym, $C_e = 3 \cdot a$, $D = 2 \cdot a$,
D - średnica zużytej cząstki.



Rys. 7. Model wzrostu szczeliny zmęczeniowej:
2a – szerokość styku równa średnicy cząstki D, d – odległość pęknięcia od powierzchni, a zarazem grubość płytki, C_e – długość pęknięcia zmęczeniowego
Fig. 7. Growth model of fatigue crack:
2a - width contact is make the diameter of particle D, d - crack distance from surface as well thickness of particles, C_e - length of fatigue crack

Przy obliczeniach brano pod uwagę drogę tarcia S współpracującej pary trybologicznej i naprężenie kontaktowe p. Stałe β i n dla stali szynowych w stanie surowym po walcowaniu $\beta = 2{,}56 \cdot 10\text{-}7\ \mathrm{GPa}^{-4}\ \mu\mathrm{m}^{-1}$, $n = 4$ oraz dla stali obrobionych cieplnie $\beta = 5{,}67 \cdot 10\text{-}7\ \mathrm{GPa}^{-4}\ \mu\mathrm{m}^{-1}$, $n = 4$ przyjęto z pracy [8]. Wartość α przyjęto jako 10000, co oznacza liczbę kontaktów na 1 m równą ok. 5870000 przy naciskach 587 MPa. Wartość $\bar{k}$ przyjęto za [5] dla współczynnika tarcia $\mu = 0{,}5$ równą $\bar{k} = 0{,}1$. Wartość C_e i d wyznaczono z badań metalograficznych cząstek zużycia (tabl. 2). Wyniki obliczeń i pomiarów zużycia zestawiono na rys. 8.



Rys. 8. Porównanie wyników obliczonych i eksperymentalnych zużycia szyn
Fig. 8. Comparison of calculated and experimental wear results of rails

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W pracy modelowano eksploatacyjne zużycie szyn na stanowisku Amslera. Badano próbki ze stali szynowych w gatunku 900A surowych nie obrobionych cieplnie i obrobionych cieplnie.

Stwierdzono proporcjonalność ubytków wagowych do drogi tarcia dla obu badanych stali (rys. 2), przy czym uzyskane zależności różniły się istotnie intensywnością zużycia (Z/S wzór 1), która była odwrotnie proporcjonalna do twardości badanych stali (rys. 2). W badanych stalach szynowych istotnie różnią się także produkty zużycia. W przypadku szyn surowych cząstki osiągały średnicę prawie 500 μm, a ich grubość wynosiła 36 μm (tabl. 2). Cząstki w tym przypadku są prawie dwukrotnie większe od cząstek zużycia stali obrobionych cieplnie, których średnica wynosi ok. 200 μm, a grubość 24 μm. Różnice te widoczne są również na powierzchni zużycia próbek (rys. 5 i 6). Na powierzchniach tych widać wyraźne efekty zawalcowań typowe dla bardzo dużych lokalnych odkształceń, które powodują łuszczenie się na powierzchniach, przy czym wielkość produktów tego łuszczenia jest odwrotnie proporcjonalna do twardości badanych stali (tabl. 2, rys. 3 i 4). Wykorzystanie do analizy wyżej opisanego zużywania się stali szynowych modelu Suh (wzór 3), pozwala na stwierdzenie zgodności obliczeń z eksperymentem, co najmniej co do rzędu wielkości (rys. 7). Metoda obliczeń zużycia wydaje się być poprawna przy założeniu określenia średnicy D i grubości cząstek d na podstawie badań metalograficznych oraz poprawnej interpretacji tych wielkości przy posługiwaniu się wzorem (3), tzn. $D=2\cdot a$ oraz $C_e=3\cdot a$, gdzie D jest średnicą cząstek, natomiast $2\cdot a$ jest wielkością kontaktu obliczonego wzorami Hertza, a C_e jest długością pęknięcia podpowierzchniowego. Umożliwia to wstępne przewidywanie zużycia eksploatacyjnego szyn na podstawie obliczeń zużycia zgodnie z modelem Suh.

4. WNIOSKI

1. Dominującym procesem zużywania się stali szynowej jest proces powierzchniowego łuszczenia się (spalling) wskutek odkształceń i powstałych zawalcowań prowadzących do lokalnego odrywania się cząstek.
2. Wielkość tych cząstek dochodzi do 0,25 mm^2, przy grubości do 0,05 mm, przy czym wielkość ta zależy wyraźnie od twardości stali, tzn. w przypadku szyn twardych (356 HB) obserwuje się większe ilości mniejszych cząstek, których wielkość nie przekracza 0,1 mm^2, a grubość wynosi ok. 0,02 mm. Przy badaniu szyn surowych (288 HB) cząstki były prawie dwukrotnie większe.
3. Wykorzystanie do oceny zużywania się szyn obliczeniowego modelu Suh pozwala określić przybliżone ich zużycie.

Literatura

1. Adamiec P., Dziubiński J., John A.: Zużycie i trwałość szyn kolejowych. Przegląd Mechaniczny nr 7-8, 2002, ss. 54-58.
2. Report Nr 1 ERRI D173 – Review of rolling contact fatigue in rails. Utrecht 1990.
3. ERRI D173/RP15 – A proposal for revision of the 1979 edition of the UIC catalogue of rail defects. Utrecht 1997.
4. Zaczkowski W.: Intensywność eksploatacji na sieci PKP i w innych zarządach kolejowych. Drogi Kolejowe nr 11, 1989, ss. 229-233.
5. Fleming J. R., Suh N. P.: Mechanics of crack propagation in delamination wear. Wear, 44 (1977), pp. 39-56.
6. Bąkowski H.: Wpływ obróbki cieplnej na własności warstwy wierzchniej. Praca Magisterska, Politechnika Śląska, Katowice 2002 (praca nie publikowana).
7. Adamiec P., Dziubiński J.: Zastosowanie mechaniki pękania do oceny zużycia. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej nr 50, Kielce 1993, ss. 121-128.
8. Dziubiński J., Szymański A.: Abbrennstumpfschweissen von Schienen und mechanische Eigenschaften der Verbindungen. Schweissen und Schneiden nr 1, 1990, pp. 22-25.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Edmund Tasak

Abstract

Surface wear of rails it has been investigated. It has been found the dominant type of rails wear is the spalling type as result of large strains on the surface leasing to the local tearing off particles.

Praca wykonana w ramach BK-221/RT1/2003