Marcin KRUPA, Henryk BAKOWSKI

## OCENA ZUŻYCIA SZYN KOLEJOWYCH PRZY TARCIU TOCZNO -ŚLIZGOWYM

**Streszczenie**. W pracy przeprowadzono badania zużycia próbek ze stali szynowej w gatunku 900A obrabianej cieplnie na stanowisku badawczym Amslera. Analizowano zmiany struktury warstwy wierzchniej w zależności od drogi toczenia.

# ASSESSMENT OF RAILS' WEAR DURING ROLLING – SLIDING FRICTION

**Summary.** This work presents results of wear tests of heat trated rail steel grade 900A. These tests have been carried out on Amsler machine. Microstructural changes depending on rolling distance have been analysed.

## 1. WSTĘP

Transport kolejowy wbrew wielu wcześniejszym prognozom odgrywa wciąż znaczną rolę w gospodarkach poszczególnych krajów. Rosnąca prędkość pociągów, zwiększana masa przewożonych towarów powodują wzrost atrakcyjności tego środka transportu. Jednakże wzrastające obciążenia w transporcie szynowym wpływają na zużycie eksploatacyjne szyn, podstawowego elementu nawierzchni kolejowej.

Szynom kolejowym stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące zarówno parametrów metalurgicznych, jak i właściwości mechanicznych i cech geometrycznych. W rezultacie wprowadzenia metod wytwarzania stali, takich jak: proces konwektorowo-tlenowy, odtlenianie bez użycia aluminium oraz odgazowanie próżniowe, uzyskano znaczne ograniczenie zawartości wodoru, zmniejszenie ilości wtrąceń niemetalicznych i ujednorodnienie składu chemicznego. W wyniku zabiegów obróbki cieplnej poprzez rozdrobnienie struktury perlitycznej otrzymano wysoką wytrzymałość i twardość szyn.

Mimo wysokich parametrów wytrzymałościowych gwarantowanych przez producentów szyny należą do wyrobów hutniczych, których zużycie eksploatacyjne jest ciągłym problemem w światowym kolejnictwie. Dlatego konieczne się staje przeprowadzenie badań mających na celu poznanie charakteru ich zużycia, gdyż są elementem odpowiadającym za bezpieczeństwo transportu kolejowego.

#### 2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy było określenie formy zużywania się stali o strukturze perlitycznej podczas pracy w węźle tarcia typu rolka – rolka. Węzeł ten modeluje parę cierną koła pojazdu szynowego – szyna [1,2]. Obciążenie rolek zostało tak dobrane, aby uzyskane maksymalne naciski Hertza odpowiadały naciskom powstającym pomiędzy kołami wagonów pasażerskich a szynami.

Badania przeprowadzono wykorzystując próbki wykonane ze stali szynowej w gatunku 900A obrobionej cieplnie. Dobór średnic próbki i przeciwpróbki umożliwił uzyskanie poślizgu 0,29%, przy obciążeniu 200 N. Uzyskano w ten sposób nacisk ok. 260 MPa, który pozwolił na otrzymanie zużycia zmęczeniowego powierzchni.

Zakres pracy obejmuje:

- badania modelowe na stanowisku Amslera,
- badania metalograficzne na mikroskopie świetlnym.

## 3. METODYKA BADAŃ

#### 3.1. Materiały stosowane w badaniach

Do badań wykorzystano stal szynową w gatunku 900A obrobioną cieplnie o składzie chemicznym i własnościach mechanicznych podanych w tablicach 1 i 2. Zarówno skład chemiczny, jak i własności tej stali są zgodne z wymaganiami karty UIC 860.

Tablica 1

Analiza wytopowa szyny UIC 60 ze stali w gatunku 900A

С %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Cu %	Al %
0,730	1,040	0,300	0,019	0,013	0,020	0,010	0,030	0,003

Tablica 2

Własności mechanicznych stali w gatunku 900A obrabianej cieplni

Re, MPa	Rm, MPa	A5,%	KCU, J/cm <sup>2</sup>	HB
750	1230	13,6	31	356

Przeciwpróbka wykonana została ze stali łożyskowej ŁH 15 o twardości 62 HRC. Wymiary próbek i przeciwpróbek zestawiono w tablicy 3. Średnice rolek zostały tak dobrane, aby uzyskać odpowiednią wartość poślizgu ( $\gamma = 0.29\%$ ).

Tablica 3

Średnice zewnętrzne próbki i przeciwpróbki umożliwiające uzyskanie odpowiedniego

	Średnica próbki	Średnica przeciwpróbki	Szerokość prób. i przeciwpr.	
Į	a <sub>p</sub> [mm]			
ļ	44	39,97	10	

Sposób wytoczenia próbki z główki szyny przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat sposobu wycinania próbek z szyny Fig. 1. Scheme of specimen machining from rails

#### 3.2. Urządzenia badawcze

Do badań wykorzystano stanowisko badawcze Amsler. Układ badawczy tworzą dwie rolki toczące się wzajemnie po sobie rys.2. Prędkość kątowa dolnej rolki jest 1,104 razy większa niż górnej. Prędkości liniowe na obwodzie rolek oraz poślizg można dodatkowo regulować poprzez odpowiedni dobór ich średnic.



Rys. 2. Schemat układu badawczego na stanowisku Amslera Fig. 2. Scheme of research system on Amsler machine

Rolki umocowane są na dwóch obracających się wałkach: dolnym i górnym. Na wałku górnym mocowano próbkę wykonaną z badanego materiału, natomiast na wałku dolnym przeciwpróbkę. Rolki dociskane są do siebie za pomocą mechanizmu sprężynowego. W trakcie badań rejestrowano siłę tarcia pomiędzy próbką a przeciwpróbką.

W badaniach wykorzystano również wagę laboratoryjną do pomiaru zużycia wagowego o dokładności do 0,0001 g oraz mikroskop świetlny i kamerę umożliwiające wykonanie zdjęć powierzchni oraz warstwy podpowierzchniowej próbki.

#### 3.3. Parametry badań

Badania prowadzono przy następujących parametrach:

-	prędkość obrotowa	200 obr/min
_	obciażenie	200 N

- poślizg 0,29 %,
- nacisk 258 MPa.

Próbka oraz przeciwpróbka są napędzane oddzielnie, dlatego poślizg pomiędzy badanymi rolkami jest funkcją parametrów geometrycznych (promieni rolek). Przełożenie pomiędzy wałkiem dolnym a górnym równe jest 1,104. Dlatego do obliczenia poślizgu wykorzystano następującą zależność [3,4]:

$$\gamma = \frac{2 \cdot (1,104 \cdot R_1 - R_2)}{1,104 \cdot R_1 + R_2} \cdot 100\%$$

gdzie:

 $R_1$  – promień przeciwpróbki w mm,  $R_2$  – promień próbki w mm,  $\gamma$  – poślizg w %.

W celu obliczenia maksymalnych nacisków Herza  $p_0$  na powierzchni badanych próbek zastosowano empiryczny wzór [3,4]:

$$p_0 = 0.418 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot E \cdot (R_1 + R_2)}{a \cdot R_1 \cdot R_2}}$$

gdzie:

Q – siła docisku = 200N, E – moduł Younga = 2\* 10<sup>5</sup> MPa, R<sub>1</sub> – promień przeciwpróbki w mm, R<sub>2</sub> – promień próbki w mm, a – szerokość styku = 10 mm.

## 4. WYNIKI BADAŃ

Modelowanie zużycia na stanowisku Amslera przeprowadzono w seriach badawczych po 4000 cykli (obrotów próbki). Każdorazowo po zakończeniu serii demontowano próbkę, a następnie ważono i rejestrowano stan powierzchni tocznej za pomocą mikroskopu świetlnego oraz kamery (rys. 3).



- Rys. 3. Stan powierzchni tocznej próbki po 100 000 cykli widoczne mikropęknięcia: a powiększenie 30x, b – powiększenie 150x
- Fig. 3. Mikrocracks on rolling surface of specimen after 100 000 revolutions: a magnification 30x, b – magnification 150x

Wyniki badań oraz zaobserwowane zmiany próbki zapisywano w karcie pomiarowej zawierającej numer serii, stan licznika obrotów, liczbę cykli, wagę próbki, siłę tarcia oraz uwagi.

Po zakończeniu badań, tj. 730 000 cykli, próbka została pocięta celem wykonania zgładu metalograficznego. Sposób wykonania zgładu przedstawia rys. 4.

Zgład ten umożliwił obserwację na mikroskopie świetlnym struktury oraz zmian wewnętrznych próbki szczególnie pod powierzchnią toczną (rys. 5).



Rys. 4. Sposób wycinania zgładów z próbki Fig. 4. Way of microsection machining from specimen



- Rys. 5. Odkształcona plastycznie warstwa podpowierzchniowa próbki z pęknięciami. Powiększenie 100x. Trawiono nitalem
- Fig. 5. Plastically deformed subsurface layer of specimen with cracks. Magnification 100x, nital etched

#### 4.1. Określenie ubytku masy próbki

Na podstawie pomiarów liczby cykli oraz masy próbki sporządzono wykres zależności ubytku masy Zg od całkowitej drogi tarcia (rys. 6).



Rys. 6. Ubytek masy próbki Zg w funkcji drogi toczenia Fig. 6. Mass loss of specimen Zg vs. distance rolled

Po zakończeniu badań przy 730000 cykli, co odpowiada 101 km pokonanym przez próbkę, ubytek masy wyniósł 0,77 g, co stanowi 0,75 % ubytku masy próbki.

#### 4.2. Określenie współczynnika tarcia

Na rysunku 7 przedstawiono zmiany współczynnika tarcia  $\mu$  zarejestrowane podczas badań w funkcji drogi tarcia.



Rys. 7. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi pokonanej przez próbkę Fig. 7. Friction coefficient vs. distance rolled

Na podstawie otrzymanych wartości współczynnika tarcia  $\mu$  obliczono jego wartość średnią wynoszącą 0,072. W literaturze podaje się, że wartość współczynnika tarcia dla dwóch stalowych ciał toczących się swobodnie po sobie wynosi 0,05. Po uwzględnieniu wartości poślizgu  $\gamma = 0,29\%$  i obciążenia 200 N uzyskana średnia wartość  $\mu$  jest zgodna z oczekiwaniami, co świadczy też o poprawności wykonania badań oraz pomiarów.

## 4.3. Określenie głębokości odkształcenia oraz długości pęknięć warstwy wierzchniej

Pomiar odkształcenia warstwy wierzchniej próbki oraz długości pęknięć podpowierzchniowych dokonano za pomocą programu komputerowego obsługującego mikroskop świetlny. Zasadę tego pomiaru przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Pomiar głębokości odkształcenia warstwy wierzchniej. Powiększenie 500x. Trawiono nitalem

Fig. 8. Measurement of outer layer deformation depth. Magnification 500x. Nital etched

Na podstawie tych pomiarów obliczono wartość średnią odkształcenia równą 135 μm. Określono również średnią długość pęknięć podpowierzchniowych równą 131 μm.

## 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Obserwacje powierzchni próbki wykazały, że do około 12 000 cykli nie występowały istotne zmiany jej powierzchni. Po przekroczeniu 12 000 cykli na powierzchni próbki zauważono pojawienie się brązowego nalotu, co może wskazywać na proces utleniania się. Następnie po 20 000 cykli zauważono stopniowe zanikanie powstałej wcześniej warstewki tlenków i pojawianie szaromatowego śladu współpracy, który przy ok. 57 000 cykli zajął całą powierzchnię toczną próbki. To stopniowe rozszerzanie się śladu wynika z docierania się powierzchni próbki z powierzchnią przeciwpróbki. Podczas tego docierania obserwowano zmiany współczynnika tarcia, gdzie najpierw nastąpił jego wzrost do wartości 0,11, a następnie stabilizacja na poziomie 0,06 – 0,08 aż do zakończenia badań.

Przy około 57 000 cykli pojawiły się poprzeczne bruzdy (rys. 9). Po obserwacji na mikroskopie warstwy podpowierzchniowej próbki stwierdzono, że są to pęknięcia zmęczeniowe, co widać na rys. 10.



Rys. 9. Poprzeczne mikropęknięcia powstałe na próbce. Powiększenie 30x

Fig. 9. Mikrocracks on worn surface of specimen. Magnification 30x



- Rys. 10. Pęknięcia w warstwie wierzchniej próbki. Widoczna utworzona płytka (1). Powiększenie 400x. Trawiono nitalem
- Fig. 10. Cracks in outer layer of specimen. 1 - flake-like wear particle. Magnification 400x. Nital etched

Na podstawie obserwacji podczas badań stwierdzono następujący model zużycia:

- docieranie się powierzchni próbki z przeciwpróbką,
- inicjacja pęknięć podpowierzchniowych próbki,
- rozszerzanie się pęknięcia,
- propagacja pęknięcia do powierzchni próbki,
- cykliczne tworzenie się płytek na powierzchni i następnie ich odrywanie wskutek współpracy z przeciwpróbką. (rys. 11c)



- Rys. 11. Schemat zużywania się próbki: a inicjacja pęknięcia, b propagacja pęknięcia do powierzchni próbki, c - tworzenie płytek, d - usuwanie płytek
- Fig. 11. Scheme of specimens wear: a-initiation crack, b propagation crack to surface, c - formation wear flake, d - elimination wear flake

Występowanie powyższego modelu zużycia potwierdza zdjęcie z rys. 10.

Podczas obserwacji zgładu na mikroskopie świetlnym zauważono zmiany w strukturze warstwy wierzchniej, która odkształciła się plastycznie w kierunku przeciwnym do kierunku

(rys. 11a)

(rvs.11b)

toczenia. Odkształcenie ziaren perlitu jest wynikiem obciążeń styku rolka – rolka. Powstałe pęknięcia zmęczeniowe przebiegają wzdłuż granic steksturowanych ziaren perlitu.

#### 6. WNIOSKI

Na podstawie wyników badań oraz obliczeń stwierdzono, że:

- 1. Podczas pracy stali szynowej gatunku 900A przy tarciu tocznym z poślizgiem 0,29% występują dwa typowe procesy: docieranie i zużywanie ustabilizowane.
- 2. Wiodącym procesem zużycia podczas docierania jest utlenianie.
- 3. W trakcie ustabilizowanego zużywania się próbki z badanej stali szynowej ubytek materiału następuje głównie w wyniku zmęczenia stykowego, a powstające produkty zużycia mają kształt płatków. Zużyciu temu towarzyszy odkształcenie plastyczne materiału warstwy wierzchniej. Inicjacja pęknięć prowadzących do powstawania produktów zużycia ma miejsce na granicach odkształconych ziarn perlitu.

#### Literatura

- 1. Muster H., Schmedders H., Wick K., Pradier H.: Rail roling contact fatigue. The performance of naturalyy hard and hed-hardened rails in trac, Wear nr 191(1996) 54-64.
- 2. Grassie S., Nilsson P., Bjurstrom K., Frick A., Hansson L.: Alleviation of rolling contact fatigue on Sweden's heavy haul railway, Wear nr 253 (2002).
- 3. Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
- 4. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.

Recenzent: Doc. dr hab. Roman Kuziak

#### Abstract

In this work wear mechanisms of perlitic rail steel grade 900A during rolling friction with slip of 0,29% have been determined. Two periods: running in and steady wear have been found out. During running in the main wear mechanism is oxidation. Material loss during steady wear is caused by contact fatigue of outer layer.

Praca wykonana w ramach BW-452/rt1/2003