

Mirosław WITASZEK, Kazimierz WITASZEK

ZUŻYCIE W UKŁADZIE KOŁO – SZYNA BEZ I Z OBECNOŚCIĄ EFEKTÓW UTLENIANIA

Streszczenie. W ramach pracy przeprowadzono badania zużycia, na stanowisku Amslera, wybranych stali na koła i szyny kolejowe. W zależności od warunków współpracy obserwowano różne mechanizmy zużycia. Przy niewielkim poślizgu, ok. 0,03, dominowało zużycie utleniające. Natomiast dla dużych poślizgów, ok. 0,2, występowało zużycie delaminacyjne. Wyniki badań posłużyły do opracowania dwóch modeli matematycznych opisujących zależność intensywności zużycia od twardości materiału współpracujących elementów, nacisku i poślizgu. Zbudowano oddzielne modele dla zużycia utleniającego i delaminacyjnego. W artykule przedstawiono porównanie wyników obliczeń modelowych.

WEAR OF WHEEL – RAIL SYSTEM WITH AND WITHOUT OXIDATION EFFECTS

Summary. In this work some Amsler wear tests of rail and wheel steels have been carried out. For different conditions of friction two wear mechanisms have been observed. For low slip, about 0,03, it was oxidative wear, whereas high slip, about 0,2, resulted in delamination wear. On the basis of tests' results two mathematical wear models have been worked out. These models describe influence of selected parameters as material hardness of rubbing elements, pressure and slip on wear rate. One model is dedicated for oxidative wear and the second for delamination. In this paper comparison of calculations' results has been presented.

1. WPROWADZENIE

Trudne warunki współpracy elementów układu koło kolejowe – szyna powodują ich zużywanie się. Jest ono szczególnie intensywne w przypadku kół pojazdów szynowych pracujących na terenach górskich [1, 2]. Wpływ na tę intensywność wywierają mechanizmy zużycia [3 – 6]. Ich występowanie jest uzależnione między innymi od warunków pracy elementów pary ciernej. Zdaniem autorów prac [3, 4] dla układu koło – szyna decydujące znaczenie mają nacisk i poślizg. Również rodzaj i własności materiału koła i szyny wywierają wpływ na mechanizmy ich zużycia [5].

W niniejszej pracy dokonano oceny wpływu braku bądź występowania utleniania, a także wybranych parametrów charakteryzujących materiał koła i szyny oraz warunków ich

eksploatacji na intensywność procesu zużycia kół kolejowych. W tym celu przeprowadzono badania laboratoryjne zużycia próbek z polskich stali gatunków P54 i P60, stosowanych do produkcji obręczy kół kolejowych oraz stali szynowej 900A. Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania matematycznych modeli pozwalających na określanie intensywności zużycia w obecności i przy braku utleniania.

2. BADANIA ZUŻYCIA

Badania zużycia przeprowadzono na stanowisku Amslera w układzie rolka – rolka, przy tarcu tocznym z poślizgiem. Skład chemiczny i twardość badanych stali kołowych i szynowych zestawiono w tab. 1.

Tabela 1

Skład chemiczny i twardość badanych stali na obręcz i szyny według PN-84/H-84027.07 i PN-84/H-84027.06

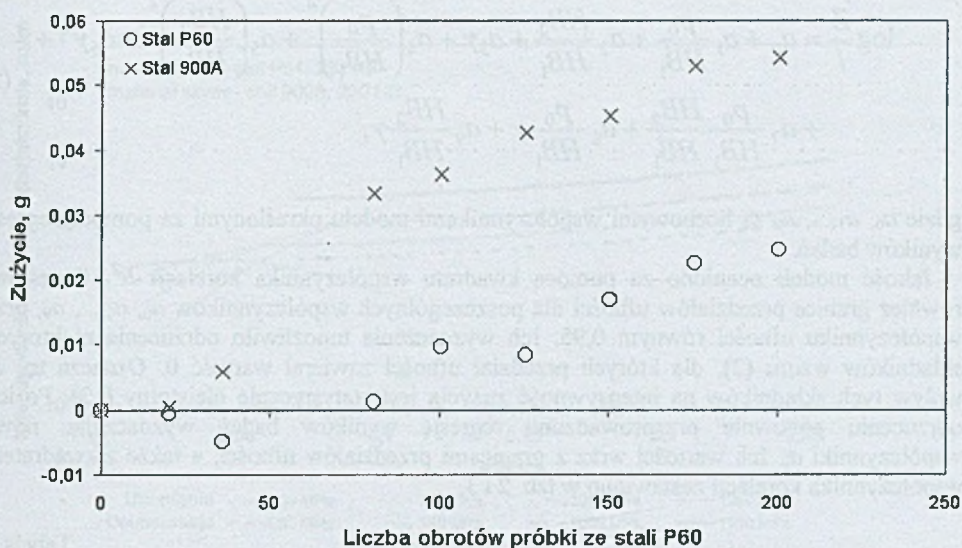
Gatunek	Skład chemiczny w %					Twardość
	C	Mn	Si	P	S	HB
P54	0,56	0,69	0,22	0,018	0,035	203
P60	0,61	0,79	0,30	0,016	0,004	247
900A ¹⁾	0,74	1,09	0,29	0,015	0,015	294
900A	0,70	1,09	0,29	0,016	0,016	243

¹⁾ materiał po ulepszeniu cieplnym

Parametrami zadawanymi w badaniach były poślizg i siła nacisku. Badania prowadzono dla poślizgu od 0,03 do 0,21. Żądaną wartość poślizgu uzyskiwano poprzez odpowiedni dobór średnicy próbek. Siłę nacisku regulowano za pomocą sprężyny. Wartość siły nacisku określano za pomocą ugięcia sprężyny i odczytywano na podziałce zabudowanej w maszynie. W badaniach zastosowano siły nacisku od 500 N do 1250 N, co odpowiadało maksymalnym naciskom Hertza od 628 do 1045 MPa. Zużycie próbek określano za pomocą wagi analitycznej z dokładnością 0,0001 g. Przykładowy przebieg zużycia w funkcji drogi tarcia przedstawiono na rys. 1.

Jak wynika z rys. 1 w początkowej fazie biegu badawczego występowały znaczne różnice przyrostów zużycia w poszczególnych pomiarach. Świadczy to o zmianach intensywności zużycia spowodowanych docieraniem się badanych elementów. Dla próbki ze stali na koła początkowo występował przyrost masy, widoczny na rys. 1 jako ujemne zużycie. Przyrost ten mógł być spowodowany utlenianiem się materiału na powierzchni roboczej. Stabilizacja intensywności zużycia w omawianym biegu badawczym nastąpiła dla 125 obrotów próbki, co świadczy o dotarciu się elementów skojarzenia. Dlatego do dalszej analizy wykorzystano tylko wyniki pomiarów zużycia ustabilizowanego.

Pomiary zużycia uzupełniono obserwacjami zużytych powierzchni za pomocą mikroskopu świetlnego oraz skaningowego. Pozwoliły one na ustalenie mechanizmów zużycia. Wyróżniono dwa mechanizmy zużycia: utleniające dla poślizgów o wartościach do 0,1 oraz płatkowe (delaminacyjne) dla poślizgów większych od 0,1. Zużycie płatkowe często jest połączeniem adhezji i zmęczenia stykowego. Towarzyszy temu często odkształcenie plastyczne materiału warstwy wierzchniej [7]. Produktami zużycia utleniającego są utlenione płatki. Produkty zużycia delaminacyjnego mają również kształt płatków, ale nie są utlenione [5].



Rys. 1. Zużycie próbek ze stali P60 i 900A przy nacisku Hertza 983 MPa i poślizgu 0,07
 Fig.1. Wear of specimens made of steel grade P60 and 900A for hertzian stress 983 MPa and slip 0,07

3. ANALIZA WYNIKÓW

W celu opracowania wyników badań zbudowano matematyczne modele zużycia, korzystając z zasad analizy wymiarowej [8, 9]:

$$\frac{Z}{l} = f\left(\frac{p_0}{HB_1}, \frac{HB_2}{HB_1}, \gamma\right), \quad (1)$$

gdzie: Z – zużycie liniowe, m,

l – droga tarcia, m,

p_0 – maksymalny nacisk Hertza, MPa,

HB_1, HB_2 – odpowiednio twardość elementu badanego i współpracującego, HB,

γ – poślizg.

Wielkości Z , l , p_0 i γ wyznaczono ze wzorów podanych odpowiednio w pracach [10, 8, 5, 9].

Z uwagi na duży zakres zmian wartości intensywności zużycia, obejmujący trzy rzędy wielkości, jako wielkość wyjściową modelu przyjęto logarytm dziesiętny intensywności zużycia. Zgodnie z zaleceniami autora pracy [11] przyjęto następującą, matematyczną postać modelu:

$$\log \frac{Z}{l} = a_0 + a_1 \frac{p_0}{HB_1} + a_2 \frac{HB_2}{HB_1} + a_3 \gamma + a_4 \left(\frac{p_0}{HB_1} \right)^2 + a_5 \left(\frac{HB_2}{HB_1} \right)^2 + a_6 \gamma^2 +$$

$$+ a_7 \frac{p_0}{HB_1} \frac{HB_2}{HB_1} + a_8 \frac{p_0}{HB_1} \gamma + a_9 \frac{HB_2}{HB_1} \gamma, \quad (2)$$

gdzie $a_0, a_1, \dots, a_9$ są liczbowymi współczynnikami modelu określonymi za pomocą regresji wyników badań.

Jakość modeli oceniono za pomocą kwadratu współczynnika korelacji R^2 . Określono również granice przedziałów ufności dla poszczególnych współczynników $a_0, a_1, \dots, a_9$, przy współczynniku ufności równym 0,95. Ich wyznaczenie umożliwiło odrzucenie niektórych składników wzoru (2), dla których przedział ufności zawierał wartość 0. Oznacza to, że wpływ tych składników na intensywność zużycia jest statystycznie nieistotny [12]. Po ich odrzuceniu ponownie przeprowadzono regresję wyników badań wyznaczając nowe współczynniki a_i . Ich wartości wraz z granicami przedziałów ufności, a także z kwadratem współczynnika korelacji zestawiono w tab. 2 i 3.

Tabela 2

Współczynniki a_i i R^2 modelu zużycia utleniającego

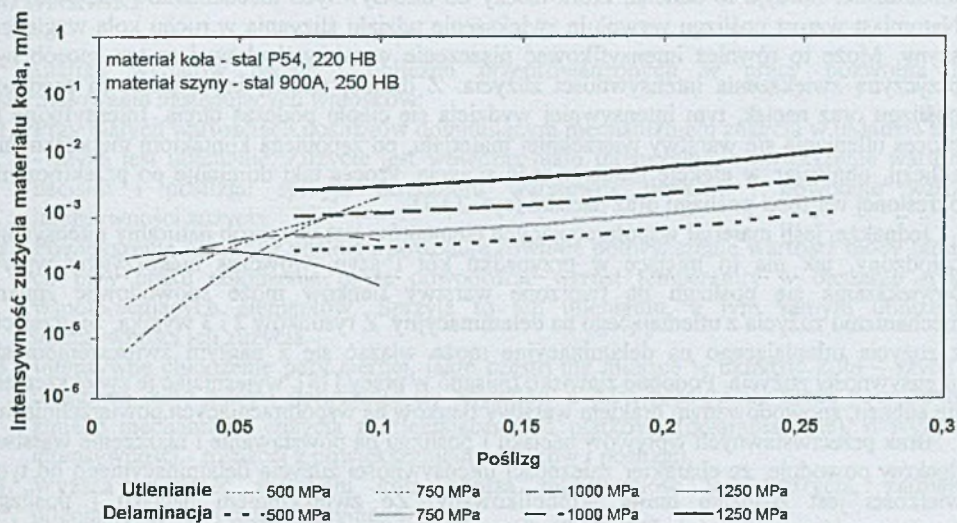
Współczynnik	Wartość średnia	Dolna granica przedziału ufności	Górna granica przedziału ufności
R^2	0,798	-	-
a_0	23,7	15,1	32,3
a_1	1,40	1,05	1,75
a_2	-57,4	-73,8	-41,0
a_3	-103,8	-138,7	-69,0
a_4	-0,108	-0,148	-0,068
a_5	25,8	18,1	33,5
a_6	-155,9	-224,4	-87,4
a_8	-10,0	-12,3	-7,7
a_9	154,4	117,7	191,1

Tabela 3

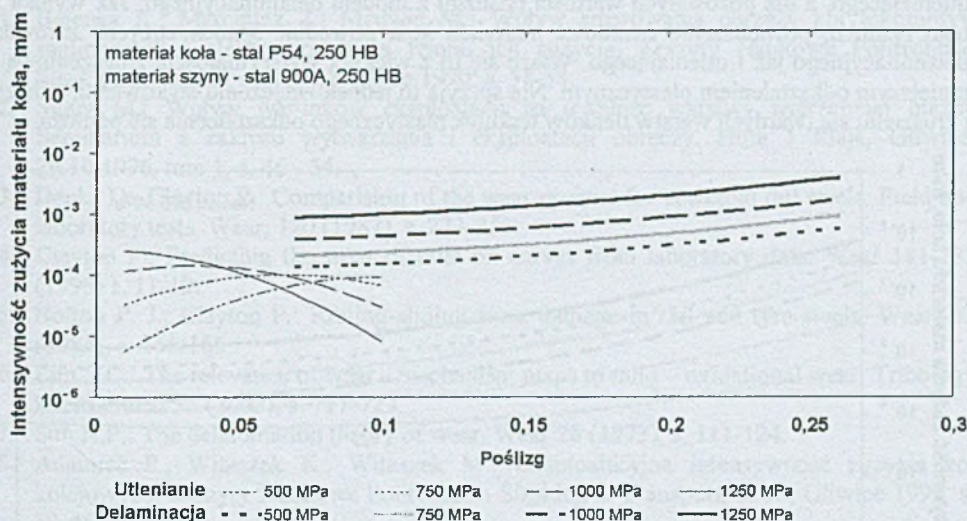
Współczynniki a_i i R^2 modelu zużycia delaminacyjnego

Współczynnik	Wartość średnia	Dolna granica przedziału ufności	Górna granica przedziału ufności
R^2	0,830	-	-
a_0	23,8	9,6	38,1
a_2	-55,4	-83,8	-27,1
a_4	0,039	0,023	0,055
a_5	27,5	13,4	41,5
a_6	10,2	8,6	11,8

W celu dokonania oceny wpływu mechanizmów zużycia oraz wybranych parametrów charakteryzujących materiał i warunki współpracy kół i szyn na intensywność zużycia sporządzono wykresy przedstawione na rys. 2 do 4. Wyniki zamieszczone na tych rysunkach dotyczą obliczeń z badań modelowych.



Rys. 2. Wpływ poślizgu oraz nacisku na intensywność zużycia materiału na koła kolejowe
Fig. 2. The influence of slip and pressure on wear rate of material for rail wheels



Rys. 3. Wpływ poślizgu oraz nacisku na intensywność zużycia materiału na koła kolejowe
Fig. 3. The influence of slip and pressure on wear rate of material for rail wheels

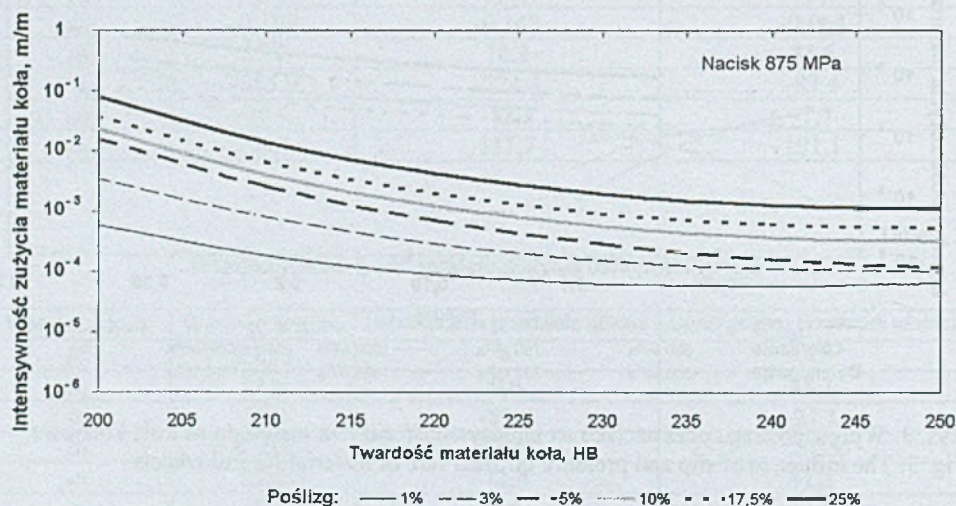
Z rysunków 2 i 3 wynika, że charakter zależności intensywności zużycia utleniającego w funkcji nacisku i poślizgu jest złożony. Początkowo wzrost nacisku i poślizgu powoduje zwiększenie intensywności zużycia. Przyczyną takiego wpływu nacisku na intensywność zużycia może być zwiększenie naprężeń w warstwie utlenionej, co powoduje intensyfikację jej wykruszania. W konsekwencji dochodzi do odsłaniania się powierzchni czystych

metalicznie. Sprzyja to adhezji, która należy do intensywnych mechanizmów zużycia [12]. Natomiast wzrost poślizgu wywołuje zwiększenie udziału ślizgania w ruchu koła względem szyny. Może to również intensyfikować niszczenie warstwy tlenków i w ten sposób być przyczyną zwiększenia intensywności zużycia. Z drugiej strony, im większe są prędkość poślizgu oraz nacisk, tym intensywniej wydzielają się ciepło podczas tarcia. Intensyfikuje to proces utleniania się warstwy wierzchniej materiału, co zapobiega kontaktom metalicznym i adhezji, obniżając w efekcie intensywność zużycia. Proces taki dominuje po przekroczeniu określonej wartości poślizgu oraz nacisku (rys. 2 i 3).

Jednakże, jeśli materiał współpracujących elementów jest w sposób naturalny intensywnie chłodzony, jak ma to miejsce w przypadku kół i szyn, wówczas niekorzystny wpływ powiększania się poślizgu na tworzenie warstwy tlenków może spowodować zmianę mechanizmu zużycia z utleniającego na delaminacyjny. Z rysunków 2 i 3 wynika, że przejście z zużycia utleniającego na delaminacyjne może wiązać się z nagłym zwiększeniem się intensywności zużycia. Podobne zjawisko opisano w pracy [13], wyjaśniając je zwiększeniem się adhezji, spowodowanym brakiem warstwy tlenków na współpracujących powierzchniach.

Brak przeciwnych wpływów nacisku i poślizgu na powstawanie i niszczenie warstwy tlenków powoduje, że charakter zależności intensywności zużycia delaminacyjnego od tych wielkości jest znacznie mniej skomplikowany. Ze zwiększeniem nacisku i poślizgu intensywność zużycia rośnie (rys. 2 i 3). Powodem tego jest podwyższenie temperatury styku, co sprzyja adhezji drugiego rodzaju (w podwyższonej temperaturze) [14].

Na rysunku 4 przedstawiono zależność intensywności zużycia materiału na koła w funkcji jego twardości. Dla poślizgu od 0,01 do 0,05 intensywność tę wyznaczano z modelu zużycia utleniającego, a dla pozostałych wartości poślizgu z modelu delaminacyjnego. Jak wynika z tego rysunku, powiększenie twardości materiału koła powoduje spadek zużycia, zarówno delaminacyjnego jak i utleniającego. Wiąże się to z większą wytrzymałością zmęczeniową i mniejszym odkształceniem plastycznym. Nie sprzyja to jednak zmęczeniu stykowemu, adhezji i kruszeniu się twardych warstw tlenków wskutek plastycznego odkształcenia się podłoża.



Rys. 4. Wpływ twardości materiału koła oraz poślizgu na intensywność zużycia materiału na koła kolejowe

Fig. 4. The influence of wheel material hardness and slip on wear rate of material for rail wheels

4. WNIOSKI

Analiza wyników badań i obliczeń przeprowadzonych w pracy pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przy małych wartościach poślizgów dominującym mechanizmem zużycia w układzie koło – szyna jest utlenianie. Zużycie jest wówczas mało intensywne, a zwiększenie wartości nacisku i poślizgu sprzyja niszczeniu warstewek tlenków i powoduje wzrost intensywności zużycia.
2. Powiększenie nacisku i poślizgu powoduje również podwyższenie wartości mocy tarcia, co przy braku chłodzenia może powodować wzrost temperatury w obszarze styku współpracujących elementów. Sprzyja to ich utlenianiu, a tym samym obniżeniu intensywności ich zużycia.
3. Intensywne chłodzenie pary cierniej, jakie często ma miejsce w układzie koło – szyna z uwagi na duże masy i poruszanie się pojazdów z dużą prędkością, może powodować zmianę mechanizmu zużycia z utleniającego na płatkowe (delaminacyjne), o wyższej intensywności - rosnącej z powiększaniem nacisków i poślizgu.
4. Wyższa twardość materiału koła obniża intensywność jego zużycia, zarówno utleniającego jak i delaminacyjnego.

Literatura

1. Bejenka K., Marciniak Z., Medwid M.: Wpływ smarowania obrzeży kół lokomotyw spalinowych i elektrycznych na tempo ich zużycia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 14, Gliwice 1990, s. 51-58.
2. Sitarz M.: Wpływ warunków eksploatacji na trwałość warstwy wierzchniej bieżni. Seminarium z zakresu wytwarzania i eksploatacji obręczy. Huta 1 Maja, Gliwice, 29.10.1996, tom 1, s. 46 - 54.
3. Danks D., Clayton P.: Comparison of the wear process for eutectoid rail steels: Field and laboratory tests. Wear, 120 (1987), s. 233-250.
4. Clayton P.: Predicting the wear of rails on curves from laboratory data. Wear 181-183 (1995) s. 11-19.
5. Bolton P. J., Clayton P.: Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels. Wear, 93 (1984), s. 145-165.
6. Lim S.C.: The relevance of wear - mechanism maps to mild – oxidational wear. Tribology International 35 (2002), s. 717-723.
7. Suh N.P.: The delamination theory of wear. Wear 28 (1973), s. 111-124.
8. Adamiec P., Witaszek K., Witaszek M.: Eksploatacyjna intensywność zużycia kół kolejowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 38, Gliwice 1999, s. 39-46.
9. Adamiec P., Witaszek M., Witaszek K.: Modelowanie zużycia przy tarcii tocznym z poślizgiem. W: VI Seminarium Naukowe "Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, Katowice, 17. 05. 1998, s. 178-181.
10. M. Witaszek, K. Witaszek, S. Witaszek: Badania wpływu warunków współpracy na zużycie stali 55 przy suchym tarcii ślizgowym. XII Międzynarodowa Konferencja „Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych TEMAG 2004, s. 227-236.
11. Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa 1983.
12. Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach tarcia. Praca zbiorowa pod redakcją W. Zwierzyckiego. PWN, Warszawa - Poznań 1990.

13. Eyre T.S., Wilson E.: Effect of matrix structure and hardness on wear characteristics of S.G. cast iron. *Wear*, 14 (1969), s. 107 - 117.
14. Takeuchi E.: The mechanism of wear of spheroidal graphite cast iron in dry sliding. *Wear*, 19 (1972), s. 267-276.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Franciszek Binczyk

Abstract

Amsler wear tests of wheel steels grade P54, P60 and rail steel grade 900A have been carried out. Two mechanisms of wear have been determined: mild, oxidative wear for low slips and severe, delamination - adhesion, for high ones. Two models for wear rate calculations have been worked out - first for oxidative and second for delamination - adhesion wear. Comparison of calculations' results enabled assessment of influence of selected parameters and wear mechanism on wear rate of rail wheels.

Praca wykonana w ramach BK-230/RT1/2004.