

Janusz KRAWCZYK*

WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE WYBRANYCH STALI KONSTRUKCYJNYCH

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE SELECTED STRUCTURAL STEELS

Słowa kluczowe:

stal konstrukcyjna, mikrostruktura, zużycie, współczynnik tarcia, tribologia

Key-words:

structural steel, microstructure, wear, friction coefficient, tribology

Streszczenie

Własności tribologiczne stali konstrukcyjnych odgrywają istotną rolę w ich przeróbce plastycznej. Mają one wpływ np. na zużycie walców hutniczych stosowanych do kształtowania z wyrobów na zimno i na gorąco. Jednakże światowa literatura jest uboga, jeśli chodzi o tego typu charakterystyki. Wynika to z trudności w wykonaniu takich badań w warunkach przemysłowych. Dlatego należy odpowiednie symulacje procesów technologicznych wykonać w warunkach laboratoryjnych.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. (12) 617-26-19, fax (12) 617-31-90, e-mail: jkrawczy@ruczaj.pl, jkrawczy@metal.agh.edu.pl.

Celem pracy było wykonanie charakterystyki materiałowej wybranych stali konstrukcyjnych pod względem ich własności tribologicznych. Badania tribologiczne wykonano dla 4 stali konstrukcyjnych: S355J0, S235JR, LRAH36 (w postaci płaskowników) oraz 18CrNiMo7-6 (w postaci odkuwki ulepszonej cieplnie).

Charakterystyka tribologiczna stali konstrukcyjnych była prowadzona pod kątem ich zużywania się w kontakcie ze stalą łożyskową 100Cr6. Testy tribologiczne wykonano na urządzeniu T-05. Układ tribologiczny był w postaci pierścienia (przeciwpróbka) trącego po powierzchni próbki. W teście tribologicznym stosowano obciążenie 100 N, próbę prowadzono przy temperaturze pokojowej przez 2000 s.

WPROWADZENIE

Badania tribologiczne mechanizmów zużywania się stopów na osnowie żelaza dotyczą w szczególności stali, staliw i żeliw stosowanych na narzędzia w plastycznej przeróbce stali [L. 1–22] lub stali konstrukcyjnych, w przypadku, których ich zastosowanie determinuje określenie własności tribologicznych, jak np. szyny kolejowe [L. 22–28] czy elementy tłumików drgań wagonów kolejowych [L. 29, 30]. Jednakże kształtowanie mikrostruktury stopów na osnowie żelaza (nawet tych wspomnianych wyżej) pod kątem ich własności tribologicznych wymaga możliwie szerokiej znajomości zależności pomiędzy mikrostrukturą, twardością a własnościami tribologicznymi. W tym celu niezbędne jest prowadzenie laboratoryjnych testów tribologicznych na możliwie szerokiej gamie materiałów na osnowie żelaza [L. 31, 32].

Celem niniejszej pracy było wykonanie charakterystyki materiałowej wybranych stali konstrukcyjnych pod względem ich własności tribologicznych.

MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiałem do badań były 4 stale konstrukcyjne: S355J0 o twardości 195 ± 13 HV30, S235JR o twardości 177 ± 6 HV30, LRAH36 o twardości 176 ± 6 HV30 (w postaci płaskowników) oraz 18CrNiMo7-6 o twardości 320 ± 10 HV30 (w postaci odkuwki ulepszonej cieplnie) o składach chemicznych podanych w **Tabeli 1**. Przeciwpróbkę wykonano ze stali łożyskowej 100Cr6 o twardości 633 HV30 (**Tab. 1**). Na **Rys. 1** przedstawiono mikrostruktury badanych stali.

Tabela 1. Skład chemiczny (% masowy) badanych stali

Table 1. Chemical composition (weight %) of investigated steels

stal	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
100Cr6 (przeciwpróbka)	1,00	0,30	0,25	0,010	0,010	1,48	-	-	-
S355J0	0,20	1,46	0,24	0,013	0,008	0,05	0,07	0,01	0,10
S235JR	0,14	0,55	0,23	0,015	0,018	0,14	0,14	0,02	0,19
LRAH36	0,17	1,50	0,29	0,013	0,015	0,05	0,08	0,01	0,24
18CrNiMo7-6	0,16	0,43	0,24	0,008	0,005	1,55	1,44	0,26	0,20

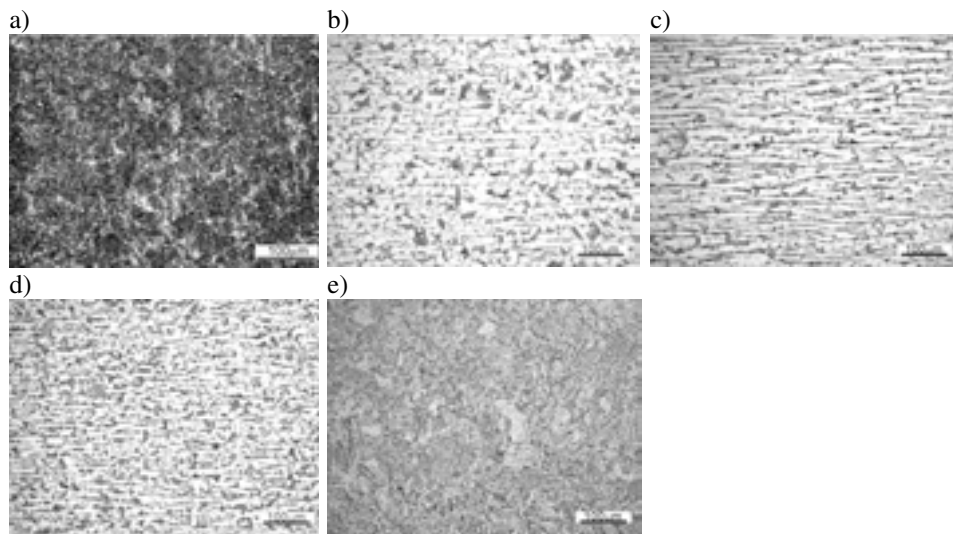
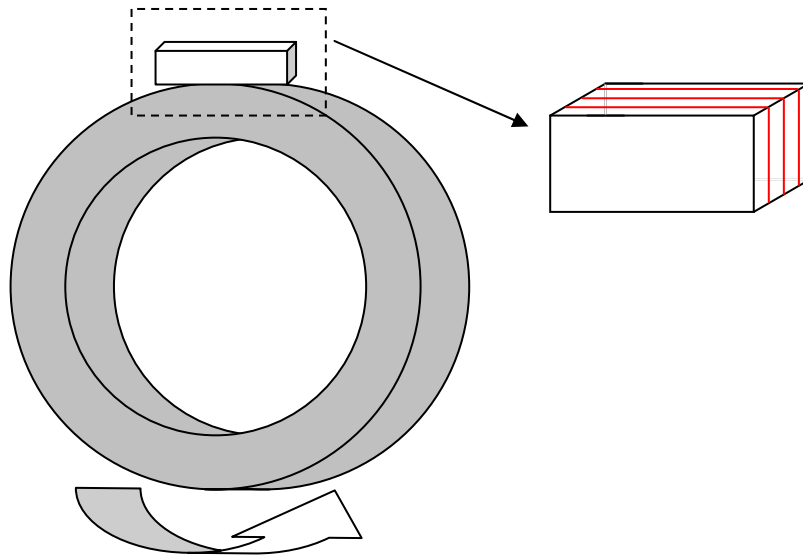
**Rys. 1. Mikrostruktura badanych stali: a) 100Cr6 (przeciwpróbka), b) S355J0, c) S235JR, d) LRAH36, e) 18CrNiMo7-6. Traw. 2% nital**

Fig. 1. Microstructure of investigated steels: a) 100Cr6 (counter sample), b) S355J0, c) S235JR, d) LRAH36, e) 18CrNiMo7-6. Etched with 2% nital

METODOLOGIA BADAŃ

Charakterystyka tribologiczna badanych stali konstrukcyjnych została wykonana w kontakcie ze stalą łożyskową 100Cr6. Testy tribologiczne wykonano na urządzeniu T-05. Układ tribologiczny był w postaci pierścienia (przeciwpróbka) trącego po powierzchni próbki. W teście tribologicznym stosowano obciążenie 100 N, próbę prowadzono przy temperaturze pokojowej przez 2000 s. Dla próbek ze stali charakteryzujących się

pasmowością zastosowano taką samą geometrię ustawienia pasm względem kierunku tarcia (**Rys. 2**).

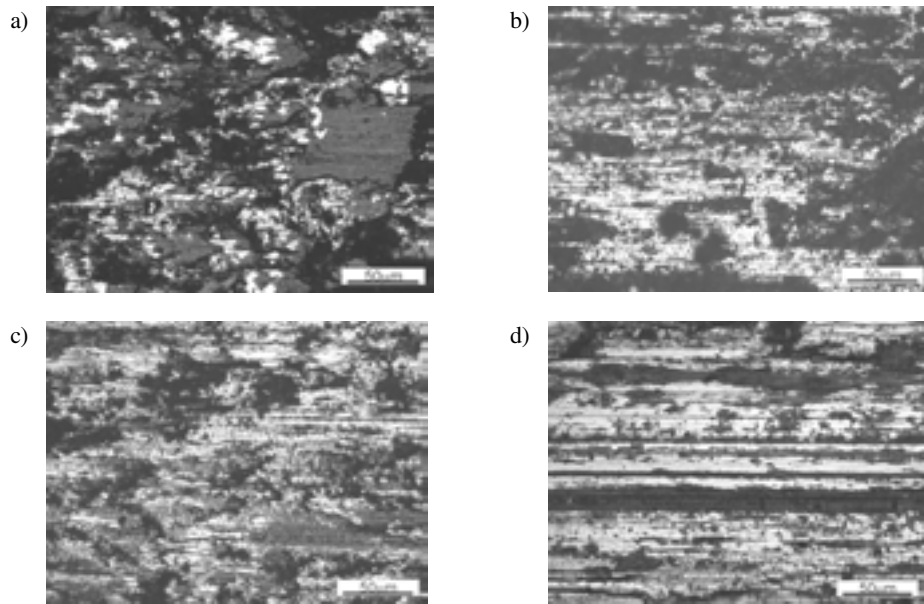


Rys. 2. Układ tribologiczny z próbkami ze stali konstrukcyjnych S355J0, S235JR i LRAH36 z zaznaczoną ich pasmowością

Fig. 2. Tribological contact scheme – microstructure banding in S355J0, S235JR, LRAH36 structural steels was marked

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

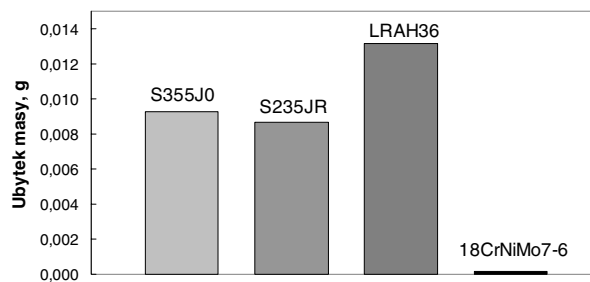
Powierzchnię próbek wykonanych ze stali konstrukcyjnych S355J0, S235JR, LRAH36 i 18CrNiMo7-6 po kontakcie tribologicznym z przeciwpóbką wykonaną ze stali łożyskowej 100Cr6 przedstawiono na **Rys. 3**. Można zauważyć, że mechanizm zużywania się stali konstrukcyjnych nieulepszanych cieplnie (S355J0, S235JR i LRAH36) zasadniczo różni się od mechanizmu zużywania się stali konstrukcyjnej ulepszonej cieplnie 18CrNiMo7-6. W przypadku stali konstrukcyjnych nieulepszanych cieplnie można zaobserwować intensywne zużycie adhezyjne, podczas gdy w przypadku stali 18CrNiMo7-6 mamy do czynienia z mikroskrąwaniem oraz bruzdowaniem. Najintensywniejsze zużycie adhezyjne występowało w przypadku stali S355J0. Natomiast w przypadku stali S235JR oraz LRAH36 można również zaobserwować wyraźne zużycie ściernie.



Rys. 3. Powierzchnia badanych próbek ze stali konstrukcyjnych po teście tribologicznym: a) S355J0, b) S235JR, c) LRAH36, d) 18CrNiMo7-6

Fig. 3. Surface of investigated samples of structural steels after tribological testing: a) S355J0, b) S235JR, c) LRAH36, d) 18CrNiMo7-6

Stopień zużycia próbek wykonanych ze stali konstrukcyjnych nieulepszanych cieplnie S355J0, S235JR i LRAH36 oraz stali konstrukcyjnej ulepszonej cieplnie 18CrNiMo7-6 przedstawiono w sposób graficzny na **Rys. 4**. Można zauważyć, iż stale konstrukcyjne nieulepszane cieplnie ulegają większemu zużyciu tribologicznemu niż stal 18CrNiMo7-6. Należy to tłumaczyć intensywnym zużyciem adhezyjnym oraz intensywnym zużyciem ściernym związanym z niską twardością tych stali.

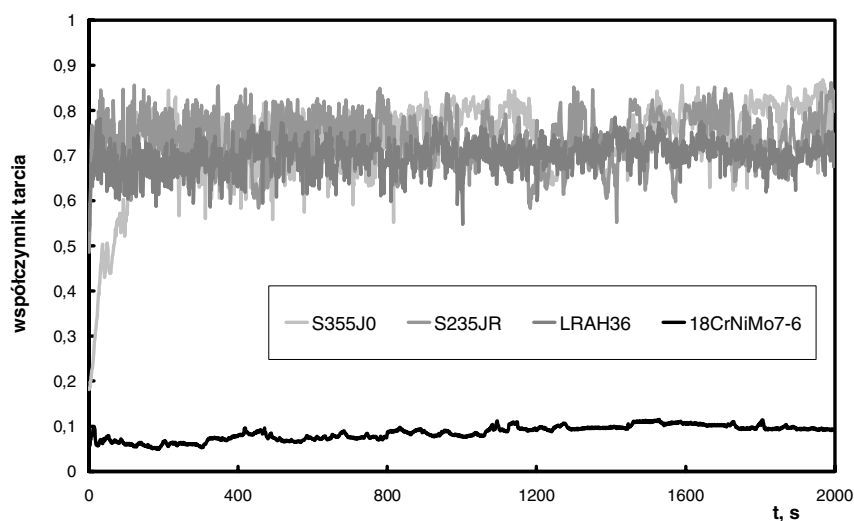


Rys. 4. Ubytek masy próbek z badanych stali konstrukcyjnych po teście tribologicznym

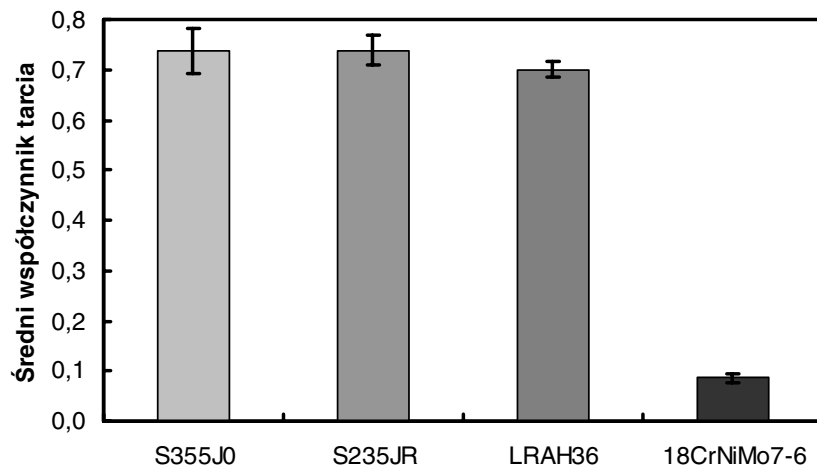
Fig. 4. Weight balance for the samples of the investigated structural steels after tribological testing

Współczynnik tarcia rejestrowano w sposób ciągły podczas trwania próby tribologicznej. Obliczano również średni współczynnik tarcia dla całego zakresu trwania próby.

Zestawienie diagramów zmian współczynnika tarcia podczas trwania prób tribologicznych dla przeciwpróbki (pierścienia) wykonanej ze stali łożyskowej 100Cr6 z próbkami z wybranych stali konstrukcyjnych przedstawiono na **Rys. 5**. Natomiast na **Rys. 6** zestawiono średnie współczynniki tarcia dla ww. prób tribologicznych. Można zaobserwować zbliżony charakter zmian współczynnika tarcia dla próbek wykonanych ze stali konstrukcyjnych nieulepszanych cieplnie. Charakteryzują się one zdecydowanie większą lokalną amplitudą zmian współczynnika tarcia w porównaniu z próbą tribologiczną, w której zastosowano stal 18CrNiMo7-6. Analizując średni współczynnik tarcia można stwierdzić, iż wysokimi (zbliżonymi) jego wartościami charakteryzują się stale konstrukcyjne nieulepszane cieplnie. Należy to wiązać z występowaniem w tym przypadku zużycia adhezyjnego oraz intensywnego zużycia ściernego. Próba tribologiczna z zastosowaniem próbki ze stali konstrukcyjnej ulepszonej cieplnie charakteryzowała się bardzo niskim średnim współczynnikiem tarcia. Można to tłumaczyć występowaniem w tym przypadku przewagi zużycia ściernego.



Rys. 5. Wykresy zmian współczynnika tarcia podczas prób tribologicznych
Fig. 5. Diagrams of friction coefficient changes during tribological tests



Rys. 6. Średni współczynnik tarcia próbek ze stali konstrukcyjnych

Fig. 6. Average friction coefficient of investigated samples of structural steels

WNIOSKI

Przedstawiane w niniejszej pracy wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Stosowanie stali konstrukcyjnych nieulepszonych cieplnie (z pasmową strukturą wydzieleni ferrytu) sprzyja, przy temperaturze pokojowej prowadzenia testu tribologicznego, zużyciu adhezyjnemu.
- 2) Stosowanie stali konstrukcyjnych ulepszonych cieplnie w kontakcie ze stalą łożyskową zmniejsza intensywność zużycia adhezyjnego w porównaniu ze stalami nieulepszonymi cieplnie.
- 3) Stosowanie stali konstrukcyjnej ulepszonej cieplnie jako przeciwpróbki do stali łożyskowej zmniejsza współczynnik tarcia w porównaniu ze stalami nieulepszonymi cieplnie.
- 4) Zużycie adhezyjne zwiększa współczynnik tarcia podczas trwania próby tribologicznej.

Podziękowania

Dr. M. Madejowi oraz mgr. Ł. Trzebuniakowi dziękuję za pomoc w przygotowaniu niniejszej pracy.

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach badań własnych AGH nr umowy 10.10.110.855.

LITERATURA

1. Belzunce F.J., Ziadi A., Rodriguez C.: Structural integrity of hot strip mill rolling rolls, *Engineering Failure Analysis* 11 (2004) 789÷797.
2. Ray A.K., Mishra K.K., Das G., Chaudhary P.N.: Life of rolls in a cold rolling mill in a steel plant-operation versus manufacture, *Engineering Failure Analysis* 7 (2000) 55÷67.
3. Krawczyk J.: Własności tribologiczne stali stopowych nadeutektoidalnych, *Tribologia* 224, 2 (2009) 39÷51.
4. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E.: Wpływ normalizowania niepełnego na kinetykę mechanizmu zużycia tribologicznego staliwa ledeburtycznego, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 76, 6 (2009) 399÷404.
5. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E., Madej M.: Kształtowanie własności trybologicznych staliwa G200CrNiMo4-3-3 przez obróbkę cieplną, *Przeгляд Odlewnictwa* 4 (2009) 190÷194.
6. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E.: The high-temperature tribology of iron matrix hypoeutectic alloy after under-annealing normalizing, *Metalurgy and Foundry Engineering* 34, 2 (2008) 125÷131.
7. Krawczyk J., Dziurka R., Roźniata E., Madej M.: Wysoko- oraz niskotemperaturowa tribologia staliwa stopowego klasy ledeburtycznej po normalizowaniu niepełnym, *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego* 15 (2008) 119÷124.
8. Krawczyk J.: Zjawiska tribologiczne zachodzące na powierzchni czopów żeliwnych walców hutniczych, *Tribologia* 219, 3 (2008) 17÷26.
9. Krawczyk J., Roźniata E., Dziurka R.: Wpływ normalizowania niepełnego staliwa G200CrNiMo4-3-3 na jego własności tribologiczne, *Tribologia* 219, 3 (2008) 27÷35.
10. Krawczyk J.: Effect of the microstructure on tribological phenomena occurring on the surface of a mill roll made of SA5T cast iron (GJSL-HV600 – GJSL-330NiMoCr12-8-3), *Archives of Foundry Engineering* 8, 2 (2008) 170÷174.
11. Pacyna J. i inni: Dobór nowych optymalnych tworzyw walców odpornych na ścieranie i posiadających dużą wytrzymałość mechaniczną dla poszczególnych asortymentów wyrobów Walcowni Dużej, *Prace Wydziału MiIM AGH, Kraków* 1999.
12. Krawczyk J., Pacyna J., Kokosza A., Mikulski G., Grodowski P.: Staliwa na walce hutnicze – modyfikacja własności, *Metalurgia* 45 (2005) 80÷87.
13. Pacyna J., Krawczyk J.: Wpływ składników strukturalnych na własności eksploatacyjne walców roboczych w walcowniach gorących, *Konferencja Naukowo-Techniczna Huty Buczek Sp. z o.o., 2007, s. 10÷12.*
14. Pacyna J., Kokosza A., Krawczyk J., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się żeliwnych walców brzdowych, *Konferencja Naukowo-*

- Techniczna Huty Buczek S.A. p.t. „Kierunki rozwoju produkcji walców”, Wisła–Malinka 21÷23 II 2001, s. 157÷169.
15. Krawczyk J., Karwat J., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizmy zużywania się walca hutniczego wykonanego z połowicznego żeliwa sferoidalnego niklowo-krzemowo-molibdenowego, XXXIV Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków–Krynica 26÷29 IX 2006, s. 99÷105.
 16. Krawczyk J., Pacyna J.: Effect of tool microstructure on the white layer formation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 17, 1–2 (2006) 93÷96.
 17. Krawczyk J., Pacyna J., Dąbrowski R.: Rola grafitu w tribologii wysokotemperaturowej stopów na osnowie żelaza na przykładzie mechanizmów zużywania się walców hutniczych, *Inżynieria Materiałowa* 151, 3 (2006) 174÷177.
 18. Krawczyk J., Kaczmarczyk Ł., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się grafityzowanego staliwnego walca hutniczego klasy Adamit, XI Konferencja Naukowo – Techniczna Huty Buczek Sp. z o.o., Ustroń–Jaszowiec III 2006, s. 17÷30.
 19. Krawczyk J., Pacyna J.: Rola morfologii ledeburytu przemienionego i cementytu drugorzędowego w tribologii walców hutniczych, XI Konferencja Naukowo-Techniczna Huty Buczek Sp. z o.o., Ustroń–Jaszowiec III 2006, s. 53÷66.
 20. Krawczyk J., Pacyna J.: The role of transformed ledeburite in high temperature tribology on the example of adamite rolls, XI International Scientific Conference On Contemporary Achievements In Mechanics, Manufacturing And Materials Science, Gliwice – Zakopane 6–9 XII 2005, s. 534÷540.
 21. Krawczyk J., Grysak P., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się walca hutniczego wykonanego ze staliwa adamitowego, XXXIII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków–Ustroń 4–7 X 2005, s. 129÷136.
 22. Pacyna J., Krawczyk J.: Warunki powstawania i własności białej warstwy, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 72, 11 (2005) 545÷553.
 23. Pacyna J., Krawczyk J.: The wear mechanisms of toughened rails, *Metallurgy and Foundry Engineering* 27, 2 (2001) 229÷235.
 24. Witaszek M.: The influence of pressure and sliding velocity on the wear of a bainitic rail steel in the presence of lubricant, *Tribologia* 220, 4 (2008) 203÷209.
 25. Edie D.T., Kolousek J., Chiddick K.C.: The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena, Proc. 5th Int. Conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Tokyo, Japan, 25–28 July 2000, 42÷49.
 26. Hiensch M., Nielsen J., Verheijen E.: Rail corrugation in the Netherlands – measurements and numerical simulations, Proc. 5th Int. Conf. Contact Me-

- chanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Tokyo, Japan, 25–28 July 2000, 81÷88.
27. Liu Q.Y., Jin X.S., Wang W.X., Zhou Z.R.: An investigation of rail corrugation in China, Proc. 5th Int. Conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Tokyo, Japan, 25–28 July 2000, 89÷95.
 28. Grohmann H.D., Schoech W.: Contact geometry and surface fatigue – minimizing the risk of headcheck formation, Proc. 5th Int. Conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Tokyo, Japan, 25–28 July 2000, 148÷153.
 29. Żaba K., Nowak S., Kawecki A., Krawczyk J., Stanisławski W., Paździeriak P.: Dobór materiałów na cierne elementy tłumików drgań w zawieszonych wagonów, Rudy i Metale Nieżelazne 53, 1 (2008) 8÷14.
 30. Krawczyk J., Żaba K., Kawecki A.: Stale jako elementy pary ciernej w tłumikach drgań zawieszonych wagonów, Tribologia 219, 3 (2008) 37÷46.
 31. Krawczyk J., Trzebunia Ł., Madej M.: Charakterystyki płaskowników ze stali konstrukcyjnych S355J0, S235JR oraz LRAH36 z uwzględnieniem własności tribologicznych, XXXVI Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków–Krynica 23÷26 IX 2008, s. 188÷193.
 32. Krawczyk J., Kot M., Zimowski S., Madej M.: Analiza mechanizmu zużycia podczas kontaktu tribologicznego wybranych stali zestawą 80CrMoV4-3, XXXVII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków–Krynica 29 IX–2 X 2009, s. 242÷248.

Recenzent:
Tomasz BUDZYNOWSKI

Summary

Tribological properties of structural steels are essential for their plastic working. They influence the wearing of metallurgical rolls applied for forming cold-rolled and hot-rolled products, among many others. However, the world scientific literature is very limited for such characteristics. This situation results from difficulties in performing the simulations under industrial conditions. Therefore, the appropriate simulations should be done under laboratory conditions.

Supplementing knowledge concerning the influence of the microstructure of structural steel on their tribological properties will allow the proper selection of materials in highly loaded friction pairs.

Performing the material characteristics of the selected structural steels in respect to their tribological properties was the aim of the presented paper.

The tribological tests were carried out for four structural steels: S355J0, S235JR, LRAH36 (produced in a form of flat bars) and 18CrNiMo7-6 (produced in a form of a quenched and tempered forging).

The tribological characteristics of these steels were investigated with regard to their wear when in contact with bearing steel (100Cr6). Tribological tests were carried out on the T-05 device. The tribological system was in the form of a ring (counter sample) rubbing the sample surface. The applied load was 100 N, the tests were performed for 2000 seconds at room temperature.

The performed investigations enabled us to determine the role of the ferrite banding in the wearing mechanism of structural steels, especially in their adhesive wear and the influence of the microstructure on the friction coefficient.