

**Rola modyfikacji we właściwościach tribologicznych staliwa ledeburytycznego**

**The role of modification processes in ledeburitic class cast steel tribological properties**

*Janusz Krawczyk<sup>1</sup>, Edyta Rożniata<sup>1</sup>, Robert Dąbrowski<sup>1</sup>, Marcin Madej<sup>1</sup>, Jerzy Pacyna<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

<sup>1</sup> AGH – University of Science and Technology, Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

E-mail: jkrawcz@agh.edu.pl

**Streszczenie**

Praca dotyczy badań tribologicznych staliwa G200CrNi-Mo4-3-3 w stanie bez modyfikacji oraz po modyfikacji FeSi oraz FeB. Modyfikacja FeSi ograniczyła, a modyfikacja FeB wyeliminowała wydzielenia cementytu drugorzędowego w układzie Widmanstättena. Uzyskany w wyniku modyfikacji wzrost twardości oraz zmniejszenie udziału wydzielań cementytu w układzie Widmanstättena nie skutkowało wzrostem odporności na ścieranie. Modyfikacja FeSi spowodowała wzrost średniego współczynnika tarcia.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że sam proces modyfikacji (ograniczający ilość wydzielań cementytu drugorzędowego) nie jest wystarczający dla poprawy właściwości tribologicznych. Niezbędnym wydaje się zastosowanie (obok modyfikacji) również obróbki cieplnej, skutkującej wydzieleniem cementytu drugorzędowego w obszarze pierwotnego ziarna austenitu.

Słowa kluczowe: staliwo, modyfikacja, tribologia, zużycie

**Abstract**

The work focuses on tribological tests of G200CrNi-Mo4-3-3 cast steel in the state without modification as well as after modification with FeSi and FeB. The FeSi modification reduced the secondary cementite precipitation in the Widmanstätten pattern and the FeB modification eliminated it. The increase in hardness and the reduction of the cementite content in the Widmanstätten pattern obtained as a result of the modification did not increase abrasion resistance. The FeSi modification resulted in an increase of the mean friction coefficient.

The obtained test results point to the fact that the modification process itself (limiting the amount of the secondary cementite precipitations) is not sufficient to improve tribological properties. It seems necessary to apply (beside modification) also heat treatment resulting in secondary cementite precipitation in the area of primary austenite grain.

Keywords: cast steel, modification, tribology, wear

**1. Wprowadzenie**

Mikrostrukturę staliw można kształtować przez proces modyfikacji oraz obróbki cieplnej [1–9]. W przypadku staliw nadeutektoidalnych oraz podeutektycznych istnieje możliwość wpływania powyższymi metodami na morfologię wydzielań cementytu drugorzędowego oraz ledeburytycznego [1–9]. Staliew klasy ledeburytycznej (nazywanym również staliewem adamitowym [10–14]), które wzbudza szczególnie duże zainteresowanie wśród producentów oraz użytkowników walców hutniczych jest staliwo G200CrNiMo4-3-3 (dawniej oznaczane jako L200HNM) [15–23]. Stwierdzono, że istnieje możliwość

**1. Introduction**

Cast steel microstructure can be shaped by modification and heat treatment [1–9]. In the case of hypereutectoid and hypoeutectic cast steels, application of the above mentioned processes affects the morphology of the secondary and ledeburitic cementite precipitates [1–9]. A ledeburitic grade of cast steel (also known as adamite cast steel [10–14]) particularly interesting to the producers and users of steel mill rolls is G200CrNiMo4-3-3 cast steel (formerly referred to as L200HNM) [15–23]. Recently it has been found that properties of this material, tribological properties

kształtowania właściwości tego tworzywa przez zmiany w morfologii wydzielań cementytu drugorzędowego oraz ledeburtycznego [24–28], w tym również właściwości tribologicznych [29–35]. Ponieważ zmiany w mikrostrukturze uzyskiwano głównie w wyniku obróbki cieplnej, dlatego celem niniejszej pracy było określenie, czy zmiany w mikrostrukturze uzyskane w wyniku zastosowania modyfikacji mają wpływ na właściwości tribologiczne.

## 2. Materiał do badań

Materiałem do badań było staliwo G200CrNiMo4-3-3 w stanie bez modyfikacji oraz po modyfikacji FeSi(75%) oraz FeB(8%) (tab. 1). Mikrostrukturę badanych staliw przedstawiono na rysunku 1. Osnowę w badanych staliwach stanowi perlit. Modyfikacja FeSi ograniczyła, a modyfikacja FeB praktycznie wyeliminowała wydzielenia cementytu drugorzędowego w układzie Widmanstättena (rys. 1 i 2). Spowodowała ona również wzrost twardości z  $408 \pm 4$  HV do  $417 \pm 6$  HV (po modyfikacji FeSi) oraz do  $428 \pm 7$  HV (po modyfikacji FeB) (rys. 3).

Można zaobserwować, że ograniczenie (w wyniku modyfikacji) wydzielań cementytu drugorzędowego w układzie Widmanstättena sprzyja wzrostowi twardości staliwa (rys. 4). Można to tłumaczyć zwiększonym udziałem cementytu w osnowie perlitycznej w wyniku przesunięcia punktu eutektoidalnego w kierunku większego stężenia węgla, skutkiem zastosowania modyfikacji.

included [29–35], can be shaped by changes in the morphology of the secondary and ledeburitic cementite precipitates [24–28]. Since changes in the microstructure were mainly obtained by heat treatment, the aim of this study was to determine whether changes in the microstructure induced by modification could also affect the tribological properties.

## 2. Test material

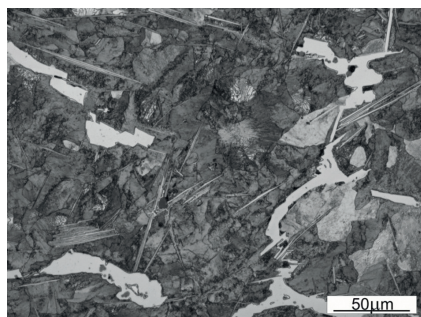
Tests were carried out on G200CrNiMo4-3-3 cast steel before and after the modification with FeSi (75%) and FeB (8%) (Table 1). Figure 1 shows the microstructure of the investigated cast steels. The matrix of these steels is composed of pearlite. The modification with FeSi was reduced and the modification with FeB practically eliminated the precipitation of secondary cementite in a Widmanstätten pattern (Figs. 1 and 2). It also resulted in hardness increase from  $408 \pm 4$  HV to  $417 \pm 6$  HV (after modification with FeSi) and to  $428 \pm 7$  HV (after modification with FeB) (Fig. 3).

It can be seen that reduced (as a result of modification) precipitation of the secondary Widmanstätten cementite promotes the growth of cast steel hardness (Fig. 4). This can be attributed to an increased content of cementite in the pearlitic matrix as a consequence of the eutectoid point shifting towards higher carbon concentration due to the application of modification.

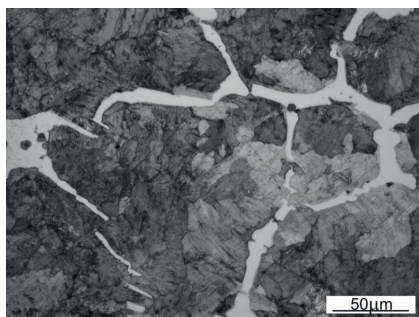
Tabela 1. Skład chemiczny (% wag.) badanych staliw

Table 1. Chemical composition (wt. %) of investigated cast steels

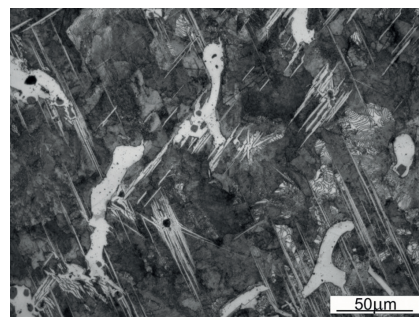
| Material/Skład chemiczny /<br>Material/Chemical composition          | C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo   | Cu   | Al   |
|----------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| Staliwo w stanie bez modyfikacji /<br>Cast steel before modification | 2,10 | 0,48 | 0,61 | 0,024 | 0,058 | 1,24 | 0,75 | 0,34 | 0,10 | 0,14 |
| Staliwo poddane modyfikacjom /<br>Staliwo poddane modyfikacjom       | 2,00 | 0,46 | 0,61 | 0,025 | 0,067 | 1,23 | 0,76 | 0,35 | 0,10 | 0,09 |



a)



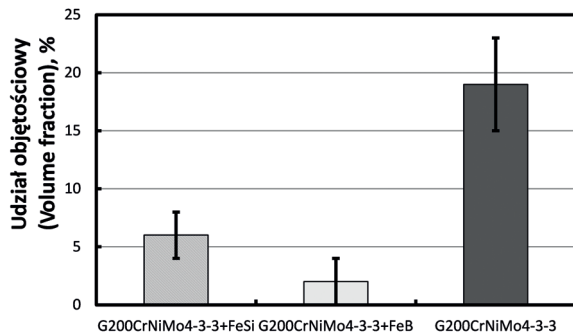
b)



c)

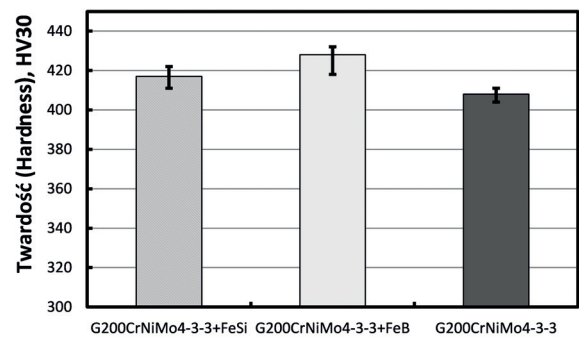
Rys. 1. Mikrostruktura badanych staliw: a) staliwo modyfikowane FeSi, b) staliwo modyfikowane FeB, c) staliwo niemodyfikowane

Fig. 1. Microstructure of investigated cast steels: a) FeSi modified cast steel, b) FeB modified cast steel, c) unmodified cast steel



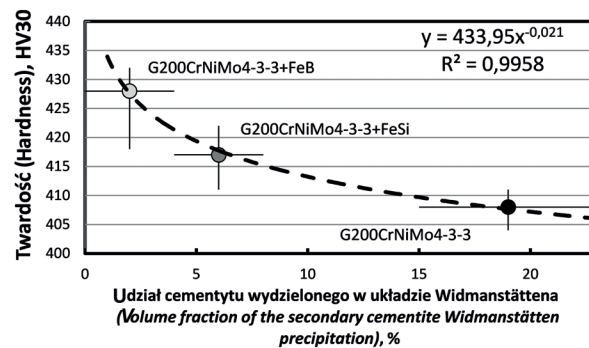
Rys. 2. Udział objętościowy cementytu drugorzędowego wydzielonego w układzie Widmanstättena

Fig. 2. The volume fraction of secondary cementite Widmanstätten precipitation



Rys. 3. Twardość badanych stali

Fig. 3. The hardness of the investigated cast steels



Rys. 4. Korelacja pomiędzy udziałem objętościowym cementytu drugorzędowego wydzielonego w układzie Widmanstättena a twardością stali,  $R^2$  – współczynnik determinacji do podanego równania

Fig. 4. The correlation between the volume fraction of the secondary cementite Widmanstätten precipitation and the hardness of cast steels,  $R^2$  – the determination coefficient for the given equation

### 3. Metodologia badań tribologicznych

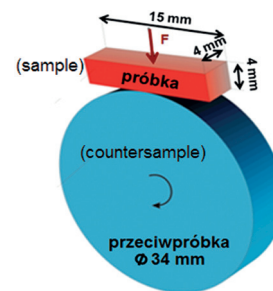
Próbkę tribologiczną wykonano w układzie klocek/pierścień przy zastosowaniu jako przeciwpróbki stali 100Cr6 o twardości 57 HRC oraz przy obciążeniu 100 N w czasie 2000 s, prędkość obrotowa 136 obr/min, droga tarcia 500 m (rys. 5).

### 3. Methodology of tribological studies

Tribological tests were performed in a block/ring system with the 100Cr6 steel of 57 HRC hardness used as a countersample, and a load of 100 N applied for the time of 2000 s, 136 RPM, road 500 m (Fig. 5).



a)



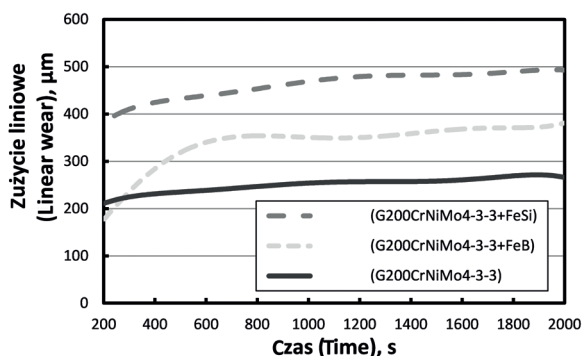
b)

Rys. 5. Badania tribologiczne: a) tribometr T-05, b) schemat układu tribologicznego

Fig. 5. Tribological tests: a) tribometer T-05, b) scheme of the tribological configuration

#### 4. Wyniki badań i ich dyskusja

Podczas prób tribologicznych mierzono w sposób ciągły zagłębianie się przeciwpróbki w próbkę stalową (rys. 6). Wartość tak mierzonego zużycia określono jako zużycie liniowe. Wielkość zużycia liniowego dla badanych staliw przedstawiono na rysunku 7. Wzrost twardości oraz zmniejszenie udziału wydzielen cementytu w układzie Widmanstättena nie skutkowało wzrostem odporności na ścieranie. Podobnie jest w przypadku modyfikacji ocenionej jako ubytek masy (rys. 8). Modyfikacja FeSi spowodowała wzrost tak określonej wielkości zużycia o 27%, a modyfikacja FeB – o 7%.

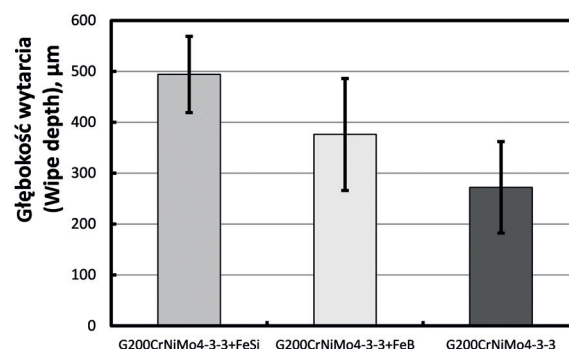


Rys. 6. Aproxymacja zmiany zużycia liniowego podczas prób tribologicznych

Fig. 6. Approximation of linear wear changes during tribological tests

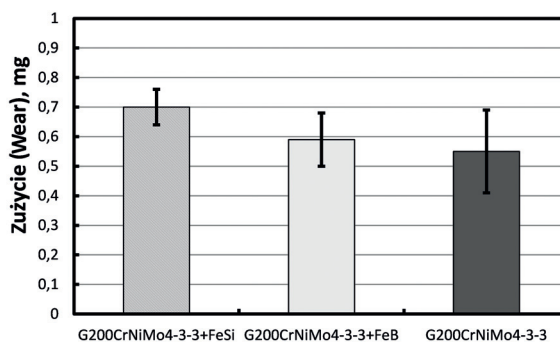
#### 4. Results and discussion

The tribological tests involved a continuous measurement of the depth of countersample penetration into the cast steel sample (Fig. 6). Thus, measured wear was defined as linear wear. The rate of linear wear obtained for the tested cast steels is shown in Figure 7. The increase in hardness and the reduction of Widmanstätten cementite precipitates did not improve the resistance to abrasion. The situation was similar in the case of wear determined as a loss of weight (Fig. 8). The modification with FeSi resulted in an increase of determined wear by 27%, and with FeB – by 7%.



Rys. 7. Wielkość zużycia liniowego badanych staliw

Fig. 7. The linear wear of the investigated cast steels



Rys. 8. Wielkość zużycia masowego badanych staliw

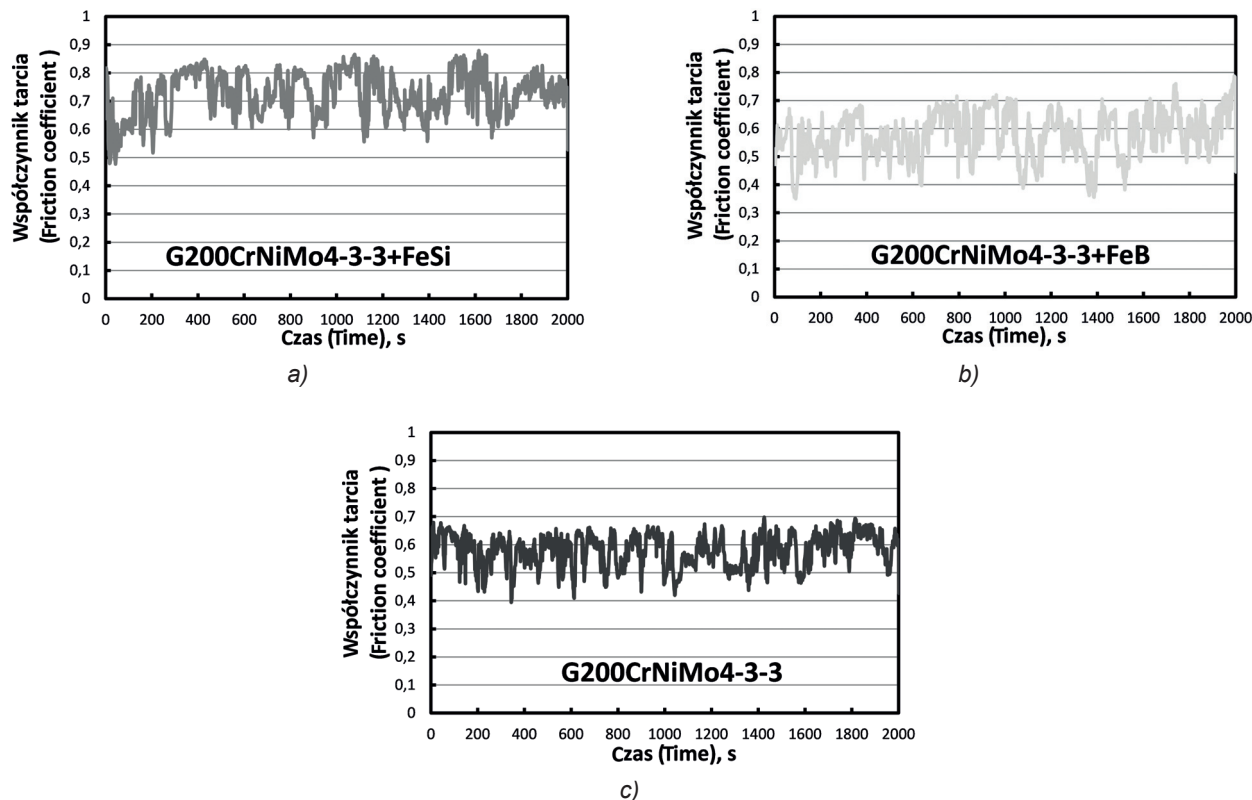
Fig. 8. The mass wear of the investigated cast steels

Również współczynnik tarcia był mierzony w sposób ciągły podczas trwania próby tribologicznej (rys. 9). Łatwiejsze porównanie zmian współczynnika tarcia podczas trwania prób tribologicznych dla badanych staliw umożliwia zastosowanie aproksymacji wielomianowej i zestawienie uzyskanych krzywych na jednym wykresie (rys. 10). Można zaobserwować, że próbki ze staliwa modyfikowanego mają podobny charakter (tendencję) zmian współczynnika tarcia. Natomiast charakter zmian współczynnika podczas próby wykonanej dla staliwa niemodyfikowanego jest wyraźnie odmienny od wyżej

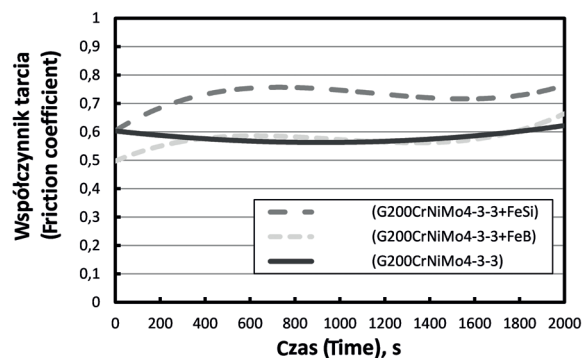
The coefficient of friction was also measured in a continuous manner during tribological tests (Fig. 9). Easier comparison of changes in this coefficient occurring in the tested cast steels during tribological tests allowed the application of polynomial approximation and plotting the obtained curves on one graph (Fig. 10). It could be observed that samples of the modified cast steel showed a similar trend of changes in the friction coefficient. On the other hand, quite different was the nature of changes in this coefficient when tested on unmodified cast steel. The FeSi modification

wymienionych. Modyfikacja FeSi spowodowała wzrost średniego współczynnika tarcia z 0,58 do 0,73, natomiast modyfikacja FeB nie wpłynęła wyraźnie na średni współczynnik tarcia (rys. 11). Jednakże analiza amplitudy lokalnych zmian współczynnika tarcia wskazuje, że modyfikacja staliwa powoduje zwiększenie tej amplitudy o około 30% (rys. 12).

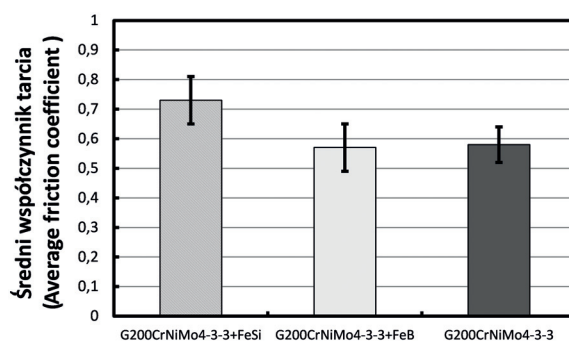
raised the average value of the friction coefficient from 0.58 to 0.73, while modification with FeB had no major effect on this value (Fig. 11). However, detailed analysis of the amplitude of local changes in the coefficient of friction has indicated that modification of cast steel raised this amplitude by approximately 30% (Fig. 12).



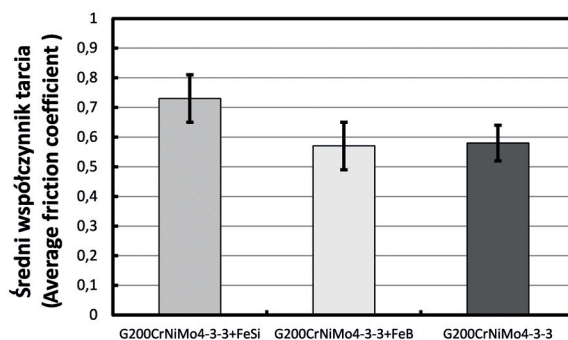
Rys. 9a–c. Zapis zmian współczynnika tarcia podczas testów tribologicznych dla przykładowych prób  
 Fig. 9a–c. Recording of the friction coefficient changes during the exemplary tribological tests



Rys. 10. Wyniki aproksymacji wielomianowej dla zmian współczynnika tarcia podczas przykładowych prób tribologicznych wykonanych na badanych staliwach  
 Fig. 10. Results of the polynomial approximation for the friction coefficient changes during tribological tests performed on the investigated cast steels



Rys. 11. Średni współczynnik tarcia badanych staliw  
 Fig. 11. The average friction coefficient of investigated cast steels

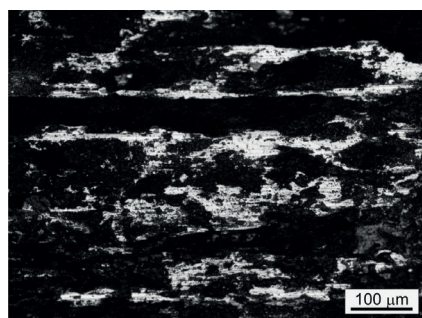


Rys. 12. Wartość odchylenia standardowego pomiarów współczynnika tarcia określająca skalę lokalnych zmian jego amplitudy

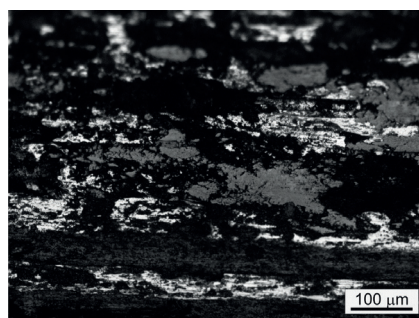
Fig. 12. The standard deviation of the measurements of the friction coefficient – determining the scale of local changes in the amplitude

Obserwacja powierzchni po próbie tribologicznej ujawniła zużycie przez wykruszanie i mikroskrawanie (rys. 13).

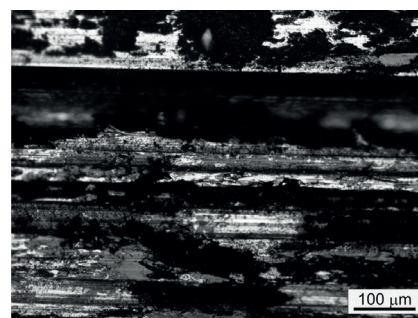
Observation of the surface after the test revealed tribological wear chipping and microcutting (Fig. 13).



a)



b)



c)

Rys. 13. Powierzchnia próbek po próbie tribologicznej

Fig. 13. The samples surface after tribological test

## 5. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że sam proces modyfikacji (ograniczający ilość wydzielań cementytu drugorzędowego, nawet w niekorzystnej ze względu na odporność na pękanie [26,27] morfologii Widmanstättena) nie jest wystarczający dla poprawy właściwości tribologicznych. Niezbędnym wydaje się zastosowanie (obok modyfikacji) również obróbki cieplnej, skutkującej wydzieleniem cementytu drugorzędowego w obszarze pierwotnego ziarna austenitu, ale już o morfologii sferoidalnej. Wyniki badań pozwalają na sformułowanie szeregu szczegółowych wniosków:

1. Zastosowanie modyfikacji (FeB) pozwala praktycznie całkowicie wyeliminować wydzielenia cementytu drugorzędowego w układzie Widmanstättena.

## 5. Summary and conclusions

Summarizing the obtained results of the research it can be concluded that the modification process alone (reducing the number of secondary cementite precipitates, even though unfavourable for Widmanstätten toughness morphology [26,27]) is not sufficient to improve the tribological properties. It seems necessary to apply (besides modification) also heat treatment, which causes secondary cementite precipitation in the grains of primary austenite but this time with a spheroidal morphology. The test results allow formulating a number of the following more detailed conclusions:

1. The modification with FeB practically eliminates the precipitation of secondary cementite in a Widmanstätten pattern.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2. Zastosowanie modyfikacji skutkuje niewielkim wzrostem twardości staliwa.</p> <p>3. Ilość wydzieleni cementytu drugorzędowego w układzie Widmanstättena pozostaje w korelacji z twardością staliwa (im więcej wydzieleni cementytu drugorzędowego o takiej morfologii tym mniejsza twardość).</p> <p>4. Nie stwierdzono wyraźnej korelacji pomiędzy twardością a odpornością na zużycie badanych staliw. W przypadku badanego wężła tarcia, twardość nie jest czynnikiem decydującym o mechanizmie zużycia.</p> <p>5. Nie stwierdzono pozytywnego wpływu modyfikacji na odporność na zużycie ściernie.</p> <p>6. Występowanie w mikrostrukturze staliwa cementytu drugorzędowego wpływa pozytywnie na stabilizację warunków tarcia ocenioną na podstawie średniej wielkości współczynnika tarcia, jego lokalnej amplitudy zmian oraz wielkości jego zmian podczas testu tribologicznego.</p> | <p>2. The use of modification slightly increases the cast steel hardness.</p> <p>3. The number of secondary cementite precipitates in a Widmanstätten pattern is correlated with cast steel hardness (the higher the number of secondary cementite precipitates of this morphology, the lower the hardness).</p> <p>4. There is no apparent correlation between the hardness and wear resistance of the investigated cast steels. In the case of the tested friction pair, hardness is not a factor determining the mechanism of wear.</p> <p>5. Modification has no positive impact on abrasive wear resistance.</p> <p>6. The presence of secondary cementite in the microstructure of cast steel positively affects the stability of the friction conditions assessed on the basis of an average value of the friction coefficient, local amplitude of its changes and the magnitude of changes during the tribological test.</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Podziękowania

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, wykonana w ramach grantu nr PBS2/B5/25/2013 „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania wielkotonażowych walców o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej”.

## Acknowledgements

This study supported by the National Research and Development Centre was made under Grant No. PBS2/B5/25/2013 “Development of innovative manufacturing technology huge tonnage rolls with increased service life.”

## Literatura/References

1. Pacyna, J., Krawczyk, J. (2001). Wpływ obróbki cieplnej na morfologię ledeburytu przemienionego w stopach podeutektycznych. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Jubilee International Scientific Conference Achievements in Mechanical & Materials Engineering*, 9–13 December 2001, Gliwice – Kraków – Zakopane, 429–434.
2. Krawczyk, J., Pacyna, J., Grodowski, P. (2002). Wpływ obróbki cieplnej na strukturę staliwa nadeutektoidalnego stosowanego na walce hutnicze. *Mat. Konf. XXX Szkoły Inżynierii Materiałowej*, 1–4 październik 2002, Kraków – Ustroń Jaszowiec, 215–220.
3. Krawczyk, J., Parzych, S. (2003). Wpływ obróbki cieplnej na morfologię ledeburytu przemienionego w staliwie L200HNM. *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego*, 2, 327–336.
4. Kokosza, A., Pacyna, J., Krawczyk, J. (2005). Nowe wielkogabarytowe walce stalowe produkowane przez Hutę Buczek Sp. z o.o. *Mat. Konf. X Konferencji Naukowo-Technicznej „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, kwiecień 2005, Wisła, Metalurgia, 45, 6–11.
5. Krawczyk, J., Pacyna, J., Rożniata, E., Rudnik, K. (2005). Koncepcja obróbki cieplnej staliwa ledeburyticznego. *Mat. Konf. X Konferencji Naukowo-Technicznej „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, kwiecień 2005, Wisła, Metalurgia, 45, 72–79.
6. Tyrała, P., Krawczyk, J., Rożniata, E. (2005). Wpływ szybkości chłodzenia na morfologię cementytu w układzie Widmanstättena w staliwie G155CrMoNi4-6-3. *Mat. Konf. Konferencji Naukowej „Inżynieria Materiałowa – wczoraj, dziś i jutro” z okazji 55-lecia Studenckiego Koła Naukowego Metaloznawców*, 10 maja 2005, Kraków, 95–98.
7. Krawczyk, J., Rożniata, E., Tyrała, P. (2005). Wpływ szybkości chłodzenia na strukturę staliwa L155HNM stosowanego na walce hutnicze. *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego*, 5, 171–177.

8. Krawczyk, J., Pacyna, J., Rożniata, E. (2006). Wpływ szybkości chłodzenia podczas obróbki cieplnej na strukturę staliwa G200CrMoNi4-6-3. *Inżynieria Materiałowa*, 27(2), 45–52.
9. Krawczyk, J., Dziurka, R., Rożniata, E. (2009). Wpływ normalizowania niepełnego staliwa G200CrNiMo4-3-3 na morfologię wydzielen cementytu drugorzędowego i ledeburitycznego. *Prace XXXVII Szkoły Inżynierii Materiałowej*, 29 września – 2 października 2009, Kraków – Krynica, 17–21.
10. Krawczyk, J., Gryszak, P., Szczygiel, A., Latała, D. (2005). Mechanizm zużywania się walca hutniczego wykonanego ze staliwa adamitowego. *Mat. Konf. XXXIII Szkoły Inżynierii Materiałowej*, 4–7 października 2005, Kraków – Ustroń, 129–136.
11. Krawczyk, J., Pacyna, J. (2005). The role of transformed ledeburite in high temperature tribology on the example of adamite rolls. *Proc. of the 11<sup>th</sup> International Scientific Conference on the Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science CAM3'S*. 6<sup>th</sup>–9<sup>th</sup> December 2005, Gliwice – Zakopane, 535–540.
12. Krawczyk, J., Kaczmarczyk, Ł., Szczygiel, A., Latała, D. (2006). Mechanizm zużywania się grafityzowanego staliwnego walca hutniczego klasy ADAMIT. *Mat. Konf. XI Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Tendencje i kierunki rozwoju produkcji walców”*. Huta Buczek Sp. z o.o., marzec 2006, Ustroń-Jaszowiec, 17–30.
13. Krawczyk, J. (2007). Zależność zużycia tribologicznego staliwa adamitowego od mikrostruktury. *Tribologia*, 38(2), 325–337.
14. Chaieb, S., Krawczyk, J., Madej, M. (2007). Wpływ obróbki cieplnej na współczynnik tarcia adamitowego staliwa ledeburitycznego w kontakcie ze stałą łożyskową. *Mat. Konf. Konferencji Naukowej z okazji 85-lecia Katedry Metaloznawstwa i Metalurgii Proszków*, maj 2007, Kraków, 100–103.
15. Krawczyk, J. (2013). Rola mikrostruktury w tribologicznym zużyciu stopów żelaza. Kraków: Wydawnictwa AGH, Rozprawy monograficzne.
16. Pacyna, J., Krawczyk, J., Kokosza, A., Szczygiel, A., Latała, D. (2001). Mechanizm zużywania się staliwnych walców bruzdowych. *Mat. Konf. XIX Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek S.A. pt. „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, 21–23 luty 2001, Wisła-Malinka, 148–156.
17. Pacyna, J., Krawczyk, J., Kokosza, A. (2001). Struktura i własności walców staliwnych – Kierunki rozwoju. *Mat. Konf. XIX Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek S.A. pt. „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, 21–23 luty 2001, Wisła-Malinka, 169–177.
18. Krawczyk, J., Mikulski, G., Rożniata, E. (2004). Własności staliwa L200HNM stosowanego na walce hutnicze. *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego*, 4, 167–173.
19. Krawczyk, J., Pacyna, J., Radwan, J., Mikulski, G. (2005). Wpływ drogi pęknięcia na własności staliwa G200CrMoNi4-6-3 stosowanego na walce hutnicze. *Mat. Konf. X Konferencji Naukowo-Technicznej „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, kwiecień 2005, Wisła, Metalurgia, 45, 94–100.
20. Krawczyk, J., Rożniata, E., Dziurka, R. (2008). Wpływ normalizowania niepełnego staliwa G200CrNiMo4-3-3 na jego własności tribologiczne. *Tribologia*, 39(3), (219), 27–35.
21. Krawczyk, J., Dziurka, R., Rożniata, E., Madej, M. (2009). Kształtowanie właściwości trybologicznych staliwa G200CrNiMo4-3-3 przez obróbkę cieplną. *Przegląd Odlewnictwa*, 4, 190–195.
22. Pacyna, J., Krawczyk, J., Bała, P., Kokosza, A., Dąbrowski, R., Rożniata, E. (2010). Nowe materiały i nowe technologie obróbki cieplnej dla hutnictwa w ofercie AGH. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 77(4), 160–166.
23. Krawczyk, J. (2013). Własności tribologiczne staliwa G200CrNiMo4-3-3 (L200HNM). *XIV Konferencja Naukowo-Techniczna: Tendencje i kierunki rozwoju produkcji walców i odlewów*, 17–19 października 2013, Białka Tatrzańska, 134–148.
24. Krawczyk, J., Radwan, J. (2003). Wpływ obróbki cieplnej na odporność na pęknięcie staliwa L200HNM. *Mat. Konf. XXXI Szkoły Inżynierii Materiałowej*, 7–10 października 2003, Kraków – Krynica, 195–200.
25. Krawczyk, J., Pacyna, J. (2004). Wpływ obróbki cieplnej na strukturę i własności staliw stosowanych na walce hutnicze. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 71(7–8), 370–374.
26. Krawczyk, J., Rożniata, E., Pacyna, J. (2005). The influence of hypereutectoid cementite morphology upon fracture toughness of chromium-nickel-molybdenum cast steel of ledeburite class. *J. Mater. Process. Technol.*, 162–163, 336–341.
27. Rożniata, E., Krawczyk, J., Dąbrowski, R., Pacyna, J. (2015). Characteristics of the G200CrNiMo4-3-3 cast steel in as cast state. *Key Eng. Mat.*, 641, 136–140.
28. Krawczyk, J., Pacyna, J., Kokosza, A., Mikulski, G., Grodowski, P. (2005). Staliwa na walce hutnicze – modyfikacja własności. *Mat. Konf. X Konferencji Naukowo-Technicznej „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, kwiecień 2005, Wisła, Metalurgia, 45, 80–87.

29. Krawczyk, J., Pacyna, J., Szczygiał, A., Latała, D. (2006). Rola morfologii ledeburytu przemienionego i cementytu drugorzędowego w tribologii walców hutniczych. *Mat. Konf. XI Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Tendencje i kierunki rozwoju produkcji walców”*. Huta Buczek Sp. z o.o., marzec 2006, Ustroń-Jaszowiec, 53–66.
30. Dziurka, R., Krawczyk, J., Rożniata, E. (2007). Wpływ normalizowania niepełnego staliwa ledeburytycznego na jego mechanizm zużycia tribologicznego. *Mat. Konf. Konferencji Naukowej z okazji 85-lecia Katedry Metaloznawstwa i Metalurgii Proszków*, maj 2007, Kraków, 112–115.
31. Krawczyk, J., Dziurka, R., Rożniata, E., Madej, M. (2008). Wysoko- oraz niskotemperaturowa tribologia staliwa stopowego klasy ledeburytycznej po normalizowaniu niepełnym. *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego*, 15, 119–124.
32. Krawczyk, J., Dziurka, R., Rożniata, E. (2009). Wpływ normalizowania niepełnego na kinetykę mechanizmu zużycia tribologicznego staliwa ledeburytycznego. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 76(6), 399–404.
33. Krawczyk, J. (2011). The effect of cast steel chemical composition on its microstructure and tribological properties in mill rolls. *J. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 47(2), 137–148.
34. Frocisz, Ł., Krawczyk, J., Madej, M. (2015) Effect of secondary carbides precipitated in Widmanstätten shape on tribological properties of cast materials. *Rudy i Metale Nieżelazne*, 60(7), 324–329.
35. Krawczyk, J. (2014). Rola warunków eksploatacji oraz morfologii mikrostruktury w zużyciu staliwnych walców hutniczych, [w:] S. Turczyn, Z. Kuźmiński, M. Dziedzic (red). *Walcownictwo 2014 (Procesy – Narzędzia – Materiały)*, VI Konferencja Naukowa, 20–22 października 2014, Ustroń. Kraków: Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, 57–62.

