

Beata LĘTKOWSKA\*, Włodzimierz DUDZIŃSKI\*, Stanisław FRYDMAN\*

## ZUŻYWANIE ŚCIERNE WYBRANYCH GATUNKÓW NISKOWĘGLOWYCH STALI Z BOREM W RÓŻNYCH STANACH OBRÓBKI CIEPLNEJ

### ABRASIVE WEAR FOR SELECTED GRADES OF LOW-CARBON BORON STEELS AT DIFFERENT STATES OF HEAT TREATMENT

#### Słowa kluczowe:

niskowęglowe stale z borem, zużywanie ściernie, obróbka cieplna

#### Key words:

low carbon boron steel, abrasive wear, heat treatment

#### Streszczenie

W ostatnich latach coraz szersze zastosowanie zyskują niskowęglowe, nisko-stopowe stale z borem o zwiększonej odporności na zużywanie ściernie. Stale te przy zastosowaniu zaawansowanych technologii wytwarzania osiągają bardzo dobre własności mechaniczne, przy jednocześnie umiarkowanej cenie. Stosowanie ich może przedłużyć czas eksploatacji często drogich konstrukcji, na przykład w przemyśle rolniczym i górniczym [L. 1, 2]. Dla uzyskania wysokich

---

\* Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, tel. 71 320-23-51, e-mail: beata.letkowska@pwr.wroc.pl, wladzimierz.dudzinski@pwr.wroc.pl, stanislaw.frydman@pwr.wroc.pl.

wartości parametrów wytrzymałościowych i odporności na ścieranie typową obróbką cieplną tych stali jest hartowanie i niskie odpuszczanie. Stale te jednak mogą być dostarczane przez producentów w różnych stanach, nieraz nieobejmujących hartowania, z sugestią przeprowadzenia obróbki przez kupującego. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na zużywanie ściernie oraz poddano analizie charakter zachodzącego mechanizmu zużywania na przykładzie stali B27 oraz 28MCB5 produkowanych przez liczące się w Europie koncerny hutnicze – Rautaruukki Corporation (Finlandia) i Zeneri Acciai Company (Włochy). Według producentów, stale te można stosować na okładziny, części maszyn i urządzeń, płyty krawędziowe, ostrza i łańcuchy, narzędzia, przenośniki śrubowe, płyty trudnościeralne, łopatki wentylatorów, a szczególnie w przemyśle maszyn rolniczych zarówno w częściach podlegających zużyciu, jak i elementach konstrukcyjnych [L. 3, 4].

### MATERIAŁ BADAWCZY

Do badań użyto materiał ze stali B27 oraz 28MCB5 dostarczony w postaci blach o grubości 10 mm. Pobrano z nich próbki o wymiarach 30×30×3 mm. Skład chemiczny badanych stali, wykazywany przez producentów [L. 3, 4] przedstawiono w **Tabeli 1**. Składy chemiczne obu stali są zbliżone. W obu stalach dodawane są Al lub/i Ti w celu związania azotu.

**Tabela 1. Nominalny skład chemiczny stal B27 i 28MCB5**

Table 1. Chemical composition of steel B27 and 28MCB5

Pierwiastek		B27 [3]	28MCB5 [4]
C	%	0,270	0,250–0,300
Mn	%	1,200	1,100–1,300
Si	%	0,250	0,150–0,350
P	%	Brak danych	0,030
S	%	Brak danych	0,030
Cr	%	0,300	0,200–0,500
Al	%	Brak danych	0,020–0,050
Ti	%	0,040	0,030–0,050
B	%	0,002	0,0015–0,004

Obróbka cieplna stali została przeprowadzona w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej w konwencjonalnym piecu mufowym z atmosferą ochronną. Zastosowano różne warianty czasowo-temperaturowe obróbki, które przedstawiono w **Tabeli 2**.

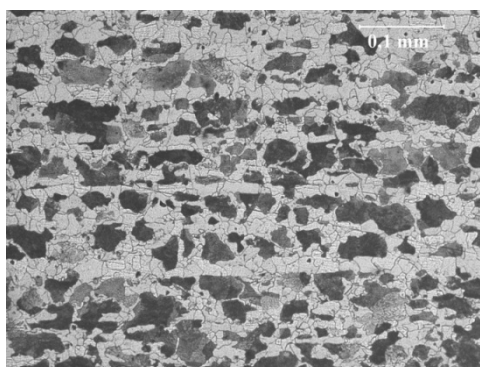
**Tabela 2. Parametry zastosowanej obróbki cieplnej**

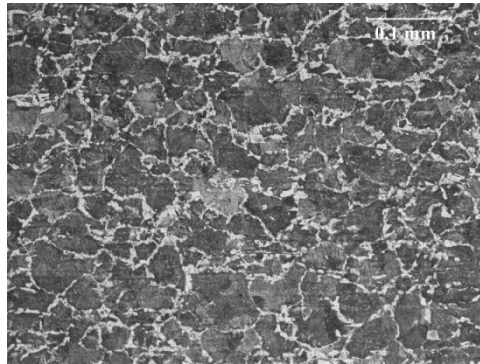
Table 2. Parameters of applied heat treatment

Parametry obróbki cieplnej	Parametry obróbki cieplnej
1 Stan dostarczenia	Po walcowaniu na gorąco
2 Hartowanie	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O
3 Hart./ H <sub>2</sub> O/Odp200°C	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O/Odpuszczanie 200°C/2h/ chłodzenie na powietrzu
4 Hart./ H <sub>2</sub> O/Odp300°C	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O/Odpuszczanie 300°C/2h/ chłodzenie na powietrzu
5 Hart./ H <sub>2</sub> O/Odp400°C	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O/Odpuszczanie 400°C/2h/ chłodzenie na powietrzu
6 Hart./ H <sub>2</sub> O/Odp500°C	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O/Odpuszczanie 500°C/2h/ chłodzenie na powietrzu
7 Hart./ H <sub>2</sub> O/Odp600°C	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O/Odpuszczanie 600°C/2h/ chłodzenie na powietrzu
8 Hart./ H <sub>2</sub> O/Odp700°C	930°C/20 min/chłodzenie H <sub>2</sub> O/Odpuszczanie 700°C/2h/ chłodzenie na powietrzu

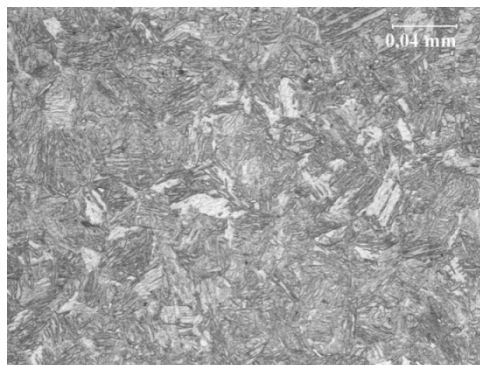
W badaniach mikroskopowych wykorzystano mikroskop świetlny Neophot 32 sprzężony z kamerą cyfrową Visitron Systems oraz elektronowe mikroskopy skaningowe JEOL JSM-5800LV oraz Tesla BS 340. Struktury badanych stali po wybranych stanach obróbki cieplnej przedstawiono na **Rys. 1–12**.

Stal B27 w stanie dostarczenia charakteryzuje się pasmowym rozłożeniem ferrytu i perlitu (**Rys. 1**). W gatunku 28MCB5 kolonie perlitu otoczone są wydzieleniami ferrytu (**Rys. 2**). Po hartowaniu strukturę obu stali stanowi niskowęglowy martenzyt listwowy (**Rys. 3 i 4**). Po hartowaniu i niskim odpuszczaniu oba gatunki mają strukturę drobnopłytkowego martenzytu odpuszczania (**Rys. 5 i 6**). Struktury badanych stali po odpuszczaniu w temperaturze 500°C również są zbliżone i stanowią troostyt odpuszczania (**Rys. 7 i 8**). Natomiast po odpuszczaniu w temperaturze 700°C występuje sorbit odpuszczania (**Rys. 9 i 10**). Struktury sorbitu odpuszczania zostały pokazane dodatkowo przy zastosowaniu metod mikroskopii skaningowej (**Rys. 11 i 12**). Widoczne wydzielenia drobnych węglików stanowią cementyt stopowy z manganem i chromem.

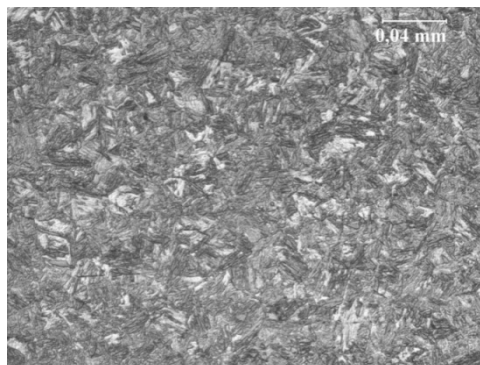
**Rys. 1. Stal B27, stan dostarczenia. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% HNO<sub>3</sub>**Fig. 1. Steel B27, delivery state. Light microscopy; Etched 5% HNO<sub>3</sub>



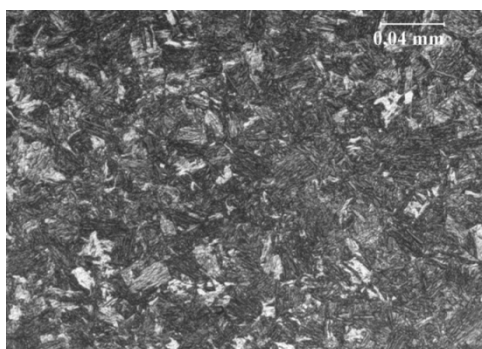
**Rys. 2. Stal 28MCB5, stan dostarczenia. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% $\text{HNO}_3$**   
Fig. 2. Steel 28MCB5, delivery state. Light microscopy; Etched 5% $\text{HNO}_3$



**Rys. 3. Stal B27, stan po hartowaniu. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% $\text{HNO}_3$**   
Fig. 3. Steel B27, state after hardening. Light microscopy; Etched 5% $\text{HNO}_3$

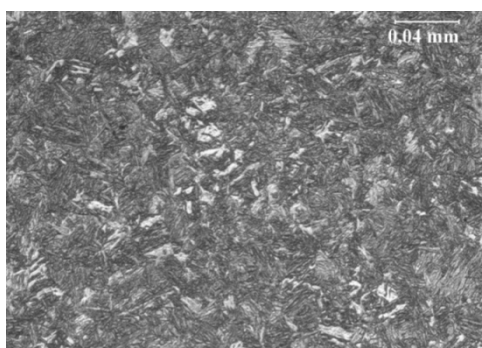


**Rys. 4. Stal 28MCB5, stan po hartowaniu. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% $\text{HNO}_3$**   
Fig. 4. Steel 28MCB5, state after hardening. Light microscopy; Etched 5% $\text{HNO}_3$



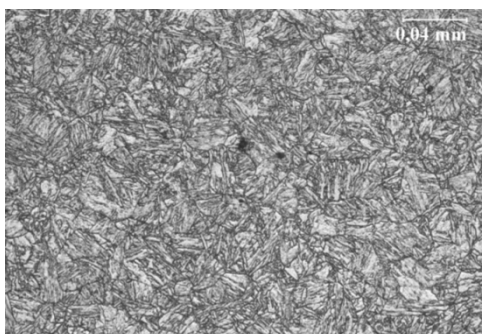
**Rys. 5. Stal B27, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 200°C. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% $\text{HNO}_3$**

**Fig. 5. Steel B27, state after hardening and tempering at temp. 200°C. Light microscopy; Etched 5% $\text{HNO}_3$**



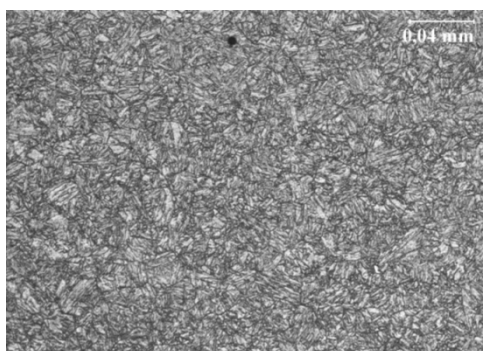
**Rys. 6. Stal 28MCB5, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 200°C. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% $\text{HNO}_3$**

**Fig. 6. Steel 28MCB5, state after hardening and tempering at temp. 200°C. Light microscopy; Etched 5% $\text{HNO}_3$**



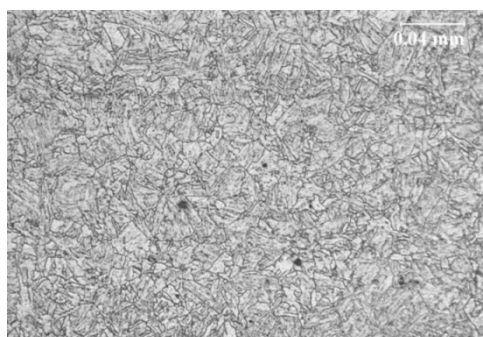
**Rys. 7. Stal B27, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 500°C. Mikroskopia świetlna; Traw. 5% $\text{HNO}_3$**

**Fig. 7. Steel B27, state after hardening and tempering at temp. 500°C. Light microscopy; Etched 5% $\text{HNO}_3$**



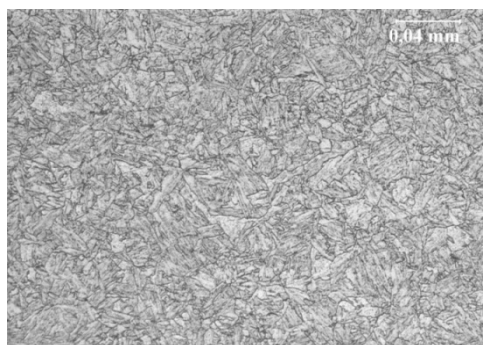
**Rys. 8. Stal 28MCB5, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 500°C. Mikroskopia świetlna;  
Traw. 5% $\text{HNO}_3$**

Fig. 8. Steel 28MCB5, state after hardening and tempering at temp. 500°C. Light microscopy;  
Etched 5% $\text{HNO}_3$



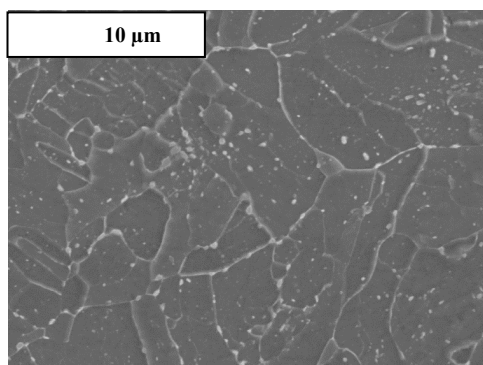
**Rys. 9. Stal B27, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 700°C. Mikroskopia świetlna; Traw.  
5% $\text{HNO}_3$**

Fig. 9. Steel B27, state after hardening and tempering at temp. 700°C. Light microscopy; Etched  
5% $\text{HNO}_3$



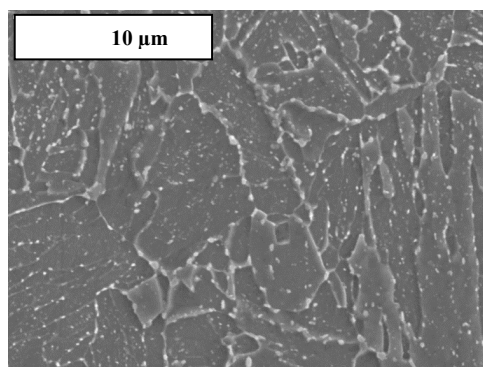
**Rys. 10. Stal 28MCB5, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 700°C. Mikroskopia świetlna;  
Traw. 5% $\text{HNO}_3$**

Fig. 10. Steel 28MCB5, state after hardening and tempering at temp. 700°C. Light microscopy;  
Etched 5% $\text{HNO}_3$



**Rys. 11. Stal B27, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 700°C. Mikroskopia skaningowa; Traw. 5%HNO<sub>3</sub>**

Fig. 11. Steel B27, state after hardening and tempering at temp. 700°C. Scanning electron microscopy; Etched 5%HNO<sub>3</sub>



**Rys. 12. Stal 28MCB5, stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 700°C. Mikroskopia skaningowa; Traw. 5%HNO<sub>3</sub>**

Fig. 12. Steel 28MCB5, state after hardening and tempering at temp. 700°C. Scanning electron microscopy; Etched 5%HNO<sub>3</sub>

## **METODYKA BADAWCZA**

Badania odporności na zużywanie ściernie zostały przeprowadzone za pomocą testera do badania ścieralności T-07 przy użyciu luźnego ścierniwa zgodnie z wymogami normy GOST 23.208-79 [L. 5] pod stałym obciążeniem  $F = 44 \text{ N}$  ( $\Delta F = 0,25 \text{ N}$ ). Jako ścierniwo został wykorzystany elektrokorund nr 90 zgodnie z normą PN-76/M-59115, a jako próbka wzorcowa stal gatunku 45 w stanie normalizowanym. Czas trwania testu został dobrany w zależności od twardości materiału i wynosił 10 lub 30 minut (odpowiednio 600 lub 1800 obrotów rolki). Celem badania było określenie względnej odporności na zużywanie ściernie K w odniesieniu do próbki wzorcowej. Tak zdefiniowany współczynnik odporności na zużywanie ściernie został określony wg następującej zależności:

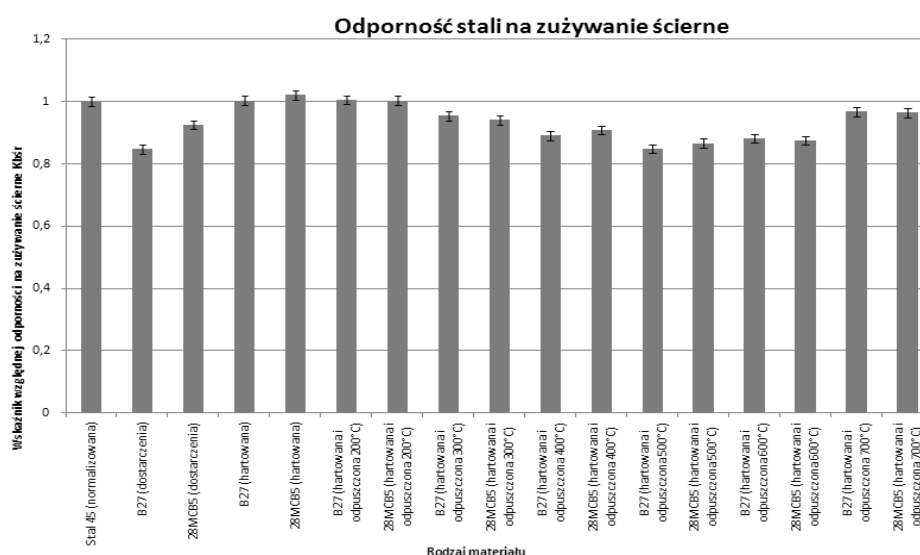
$$K_b = \frac{Z_{ww} \rho_b N_b}{Z_{wb} \rho_w N_w} [5],$$

gdzie:  $K_b$  – wskaźnik względnej odporności na zużywanie ściernie,  
 $Z_w$  – wartość zużycia wagowego próbek wzorcowych w [g],  
 $Z_b$  – wartość zużycia wagowego materiału badanego w [g],  
 $N_w$  – ilość obrotów rolki podczas badań próbki wzorcowej,  
 $N_b$  – ilość obrotów rolki podczas badań próbki,  
 $\rho_w, \rho_b$  – gęstość materiału próbki wzorcowej i badanej [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

Do pomiaru chropowatości został użyty Perthometer Concept 7.0 firmy Mahr oraz głowica Perthometer PGK 120.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wskaźniki odporności na zużywanie ściernie badanych materiałów zostały przedstawione na Rys. 13.



**Rys. 13. Wskaźniki odporności na zużywanie ściernie stali B27 i 28MCB5**

Fig. 13. Rates of resistance to abrasive wear of steels 28MCB5 and B27

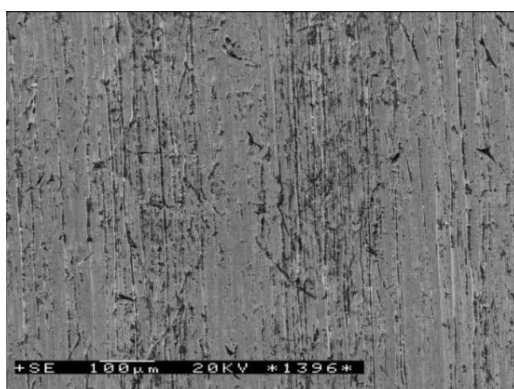
Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że największą odporność na zużywanie ściernie wykazują stany po hartowaniu. Wskaźniki odporności na zużywanie ściernie wynoszą 1,0217 dla stali 28MCB5 i 1,0041 dla stali B27. Podobne wartości wskaźników można zanotować dla stanu po hartowaniu i niskim odpuszczaniu (28MCB5 –  $K_{sr} = 1,0033$ ; B27 –  $K_{sr} = 1,0033$ ).



Wraz ze wzrostem temperatury odpuszczania wartość wskaźników odporności na zużywanie ściernie maleje, osiągając najniższą wartość w przypadku obu badanych stali dla stanu po hartowaniu i odpuszczaniu w temperaturze 500°C. Wskaźniki odporności na zużycie ściernie dla tego stanu wynoszą 0,8668 w przypadku 28MCB5 i 0,8489 dla stali B27. Po hartowaniu i odpuszczaniu w temperaturze 600°C wskaźniki zaczynają rosnąć, by osiągnąć dla stanu po hartowaniu i odpuszczaniu w temperaturze 700°C następujące wartości: dla gatunku 28MCB5 – 0,8648 a dla B27 – 0,9683.

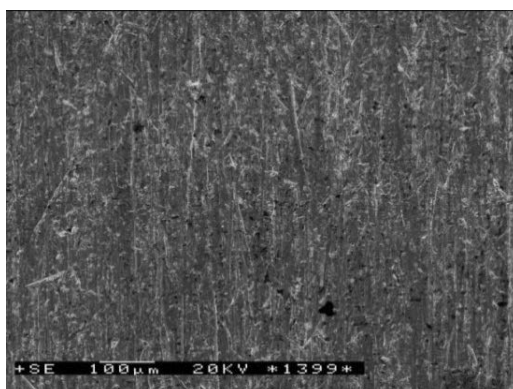
Mikroskopowe obrazy powierzchni próbek poddanych zużyciu ściernemu zostały pokazane na **Rys. 14–23**.

W przypadku stali B27 w stanie dostarczenia, rysy oraz rowki na powierzchni próbki tworzą skupiska o różnej intensywności (**Rys. 14**). Wynika to z różnej odporności na zużywanie ściernie ferrytu i perlitu, a tym samym zachodzących różnych mechanizmów zużywania ściernego. Pasma perlitu poddawane są zużyciu poprzez ścinanie nierówności, a ferrytu głównie poprzez bruzdowanie z miejscowym odkształceniem plastycznym materiału. Bruzdy są równoległe, ciągłe, tworzą na powierzchni charakterystyczne głębokie wyżłobienia, a w ich sąsiedztwo zostaje przeniesiony uprzednio wgnieciony materiał. Poddana ścierniu powierzchnię stali 28MCB5 tworzą nieregularnie, losowo ułożone rysy oraz bruzdy (**Rys. 15**). Są one krótsze i szersze niż w przypadku stali B27 i zorientowane pod różnym kątem do kierunku ściernia. W sąsiedztwie bruzd występują również ślady odkształcenia plastycznego materiału.



**Rys. 14.** Stal B27 stan dostarczenia. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa

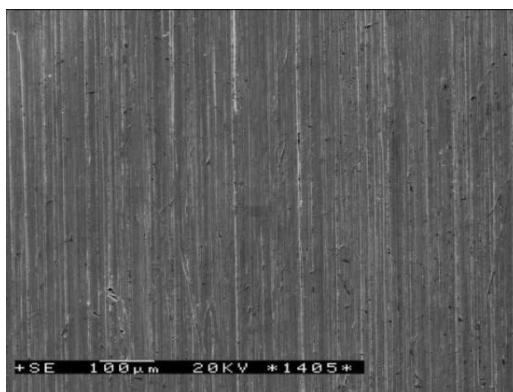
**Fig. 14.** Steel B27, delivery states. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched



**Rys. 15. Stal 28MCB5 stan dostarczenia. Powierzchnia po próbie zużywania ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

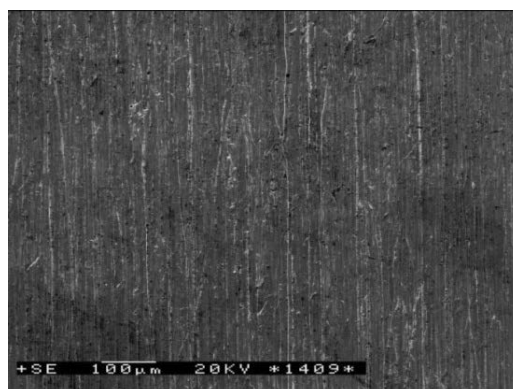
Fig. 15. Steel 28MCB5, delivery states. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched

Hartowanie powoduje jakościowe zmiany stanu powierzchni poddanej ścierniu (**Rys. 16 i 17**). Rysy i bruzdy przebiegają z podobną intensywnością oraz są równoległe do kierunku przemieszczania się ścierniwa po powierzchni. Rowki są wąskie, nie są głębokie, a w ich sąsiedztwie tylko sporadycznie występuje niewielkie odkształcenie plastyczne materiału. Skrawanie nierówności jest w tym przypadku głównym mechanizmem zużywania ściernego. Z punktu widzenia trwałości eksploatacyjnej taki mechanizm może być korzystniejszy, gdyż powoduje wygładzanie i równomierne zużycie powierzchni.



**Rys. 16. Stal B27 hartowana. Powierzchnia po próbie zużywania ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

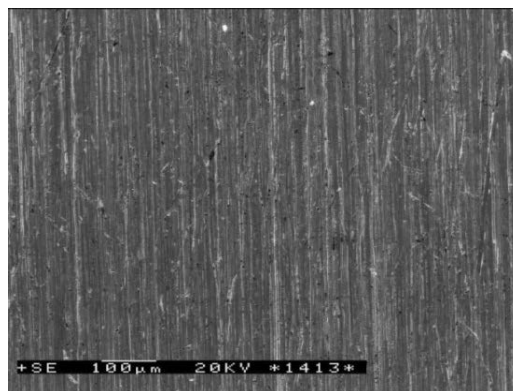
Fig. 16. Steel B27, after hardening. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched



**Rys. 17. Stal 28MCB5 hartowana. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

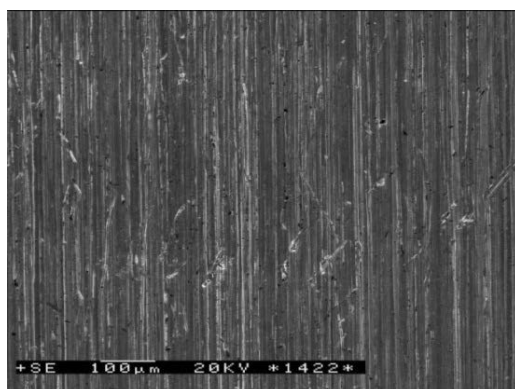
Fig. 17. Steel 28MCB5, after hardening. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched

Odpuszczanie w 200°C powoduje nieznaczne zmiany wyglądu powierzchni próbek w porównaniu ze stanem po hartowaniu. Można zauważyć, że rowki stają się coraz szersze, głębsze, a bruzdy liczniejsze. Nie tracą jednak swojej orientacji w stosunku do kierunku przesuwania się luźnego ścierniwa po powierzchni próbki, ale pojawiają się zorientowane pod różnym kątem dodatkowe drobne zarysowania powierzchni. Odkształcenie plastyczne materiału jest większe i miejscami poprzerywane przez cząstki ściernicze. **Rysunki 18 i 19** przedstawiają mikroskopowy obraz ścieranych powierzchni próbek.



**Rys. 18. Stal B27 hartowana i odpuszczania w 200°C. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

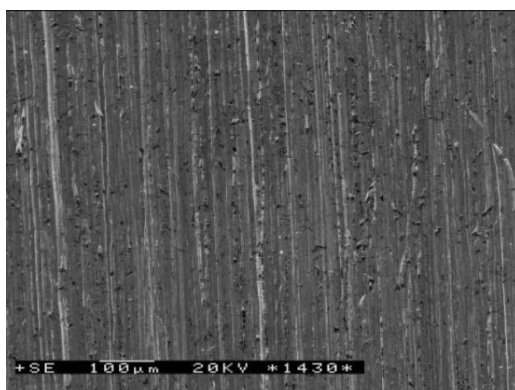
Fig. 18. Steel B27, after hardening and tempering at 200°C. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched



**Rys. 19. Stal 28MCB5 hartowana i odpuszczania w 200°C. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

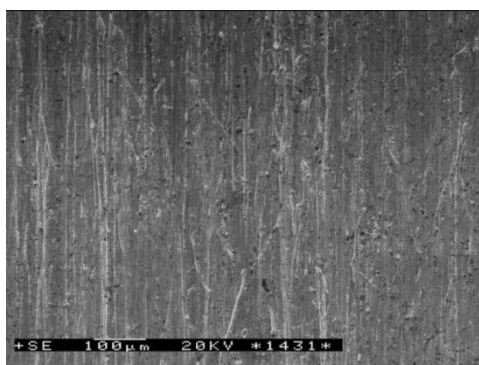
Fig. 19. Steel 28MCB5, after hardening and tempering at 200°C. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched

Pojawiające się już w nisko odpuszczonych stalach drobne różnie zorientowane rysy, ulegają intensyfikacji na powierzchni materiałów poddanych odpuszczaniu w wyższym temperaturach. Rowki oraz bruzdy stają się coraz głębsze, a odkształcenie plastyczne większe. Powierzchnie próbek pokazano na przykładzie stanu po hartowaniu i odpuszczaniu w 500°C na **Rys. 20 i 21**.



**Rys. 20. Stal B27 hartowana i odpuszczania w 500°C. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

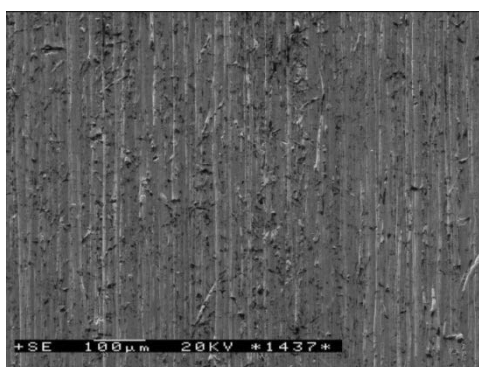
Fig. 20. Steel B27, after hardening and tempering at 500°C. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched



**Rys. 21. Stal 28MCB5 hartowana i odpuszczania w 500°C. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

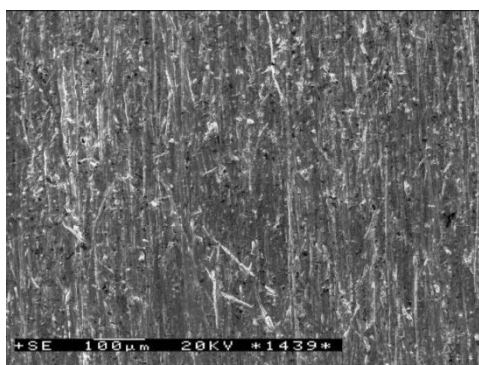
**Fig. 21. Steel 28MCB5, after hardening and tempering at 500°C. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched**

Począwszy od temperatury odpuszczania 600°C następuje wzrost wartości wskaźnika odporności na zużywanie ściernie. Na powierzchni próbek dominują bruzdy wraz z dużym odkształceniem plastycznym. Lepsza odporność na zużywanie ściernie po wysokim odpuszczaniu może wynikać z wydzielania się na granicach ziaren skoagulowanego stopowego cementytu z chromem (Rys. 11 i 12). Cementyt ten może blokować swobodny ruch ziaren ścierniwa wraz z ubytkiem materiałowym po powierzchni próbek, powodując powstanie krótkich, przerywanych bruzd. Plastyczna osnowa ferrytu może uniemożliwiać wyłupywanie przez nagromadzone ścierniwo twardego cementytu. Powierzchnie badanych próbek dla stanu po hartowaniu i wysokim odpuszczaniu pokazano na Rys. 22 i 23. W przypadku stali 28MCB5 zanika równoległa orientacja bruzd, a charakter powierzchni zbliżony jest do stanu dostarczenia (Rys. 15).



**Rys. 22. Stal B27 hartowana i odpuszczania w 700°C. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

**Fig. 22. Steel B27, after hardening and tempering at 700°C. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched**



**Rys. 23. Stal 28MCB5 hartowana i odpuszczania w 700°C. Powierzchnia po próbie zużycia ściernego. Stan nietrawiony. Mikroskopia skaningowa**

**Fig. 23. Steel 28MCB5, after hardening and tempering at 700°C. The surface condition after abrasive wear test. Scanning electron microscopy; Not etched**

Ocena jakościowa powierzchni próbek znajduje potwierdzenie w wynikach pomiarów chropowatości. Wartości parametrów  $R_a$  i  $R_{max}$  zostały pokazane w **Tabeli 3**.

**Tabela 3. Wartości parametrów  $R_a$  i  $R_{max}$  dla stali B27 i 28MCB5 w wybranych stanach obróbki cieplnej**

**Table 3. The values of the parameters  $R_a$  and  $R_{max}$  for steel B27 and 28MCB5 for the selected stages of heat treatment**

Parametry obróbki cieplnej	Stal B27		Stal 28MCB5	
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Stan dostarczenia	0,72	5,42	0,38	3,23
Hartowanie	0,31	2,57	0,30	2,54
Hart./ $\text{H}_2\text{O}/\text{Odp}200^\circ\text{C}$	0,31	2,64	0,31	2,46
Hart./ $\text{H}_2\text{O}/\text{Odp}500^\circ\text{C}$	0,38	4,35	0,42	3,75
Hart./ $\text{H}_2\text{O}/\text{Odp}700^\circ\text{C}$	0,40	3,24	0,41	4,45

Stwierdzono, że w stanie dostarczenia wartości parametrów  $R_a$  i  $R_{max}$  są średnio około 2 razy większe dla stali B27 niż 28MCB5. W przypadku obu badanych stali hartowanie powoduje spadek wartości parametru  $R_a$  do 0,31  $\mu\text{m}$  i  $R_{max}$  do 2,57  $\mu\text{m}$  dla stali B27, a dla 28MCB5 do wartości 0,30  $\mu\text{m}$  i 2,54  $\mu\text{m}$ . Jest to spowodowane zauważonym wygładzeniem powierzchni próbek. Po hartowaniu, jak również po hartowaniu i odpuszczaniu w temperaturze 200°C wartości  $R_a$  i  $R_{max}$  dla obu stali są porównywalne.

W przypadku badanych stali wzrost temperatury odpuszczania powoduje wzrost wartości parametrów chropowatości. Jest on spowodowany wystąpieniem bruzdowania wraz z odkształceniem plastycznym jako dominującym mechanizmem zużycia. W przypadku stali B27 najwyższe wartości  $R_a$  i  $R_{max}$  odnotowano dla stanu dostarczenia, a w przypadku stali 28MCB5 dla stanu po har-

towaniu i odpuszczaniu w temperaturze 700°C i wynoszą odpowiednio 0,41  $\mu\text{m}$  i 4,45  $\mu\text{m}$ .

## WNIOSKI

Najniższe wartości wskaźników odporności na zużycie ściernie dla stali B27 odnotowano dla stanu dostarczenia –  $K_{sr} = 0,8481$ , a w przypadku stali 28MCB5 dla stanu po hartowaniu i odpuszczaniu w 700°C –  $K_{sr} = 0,8668$ .

Najwyższe wartości wskaźników odporności na zużycie ściernie zanotowano dla stanu po hartowaniu oraz po hartowaniu i niskim odpuszczaniu. Po hartowaniu wskaźnik odporności na zużycie ściernie dla stali B27 wynosi 1,0041, a dla stali 28MCB5 – 1,0217. Po hartowaniu i niskim odpuszczaniu wskaźnik odporności na zużycie ściernie wynosi 1,0033 dla stali 28MCB5 oraz 1,0059 dla stali B27. Można zauważyć, że stale obrabiane cieplnie wykazują jedynie niewielką przewagę nad stalą C45 po normalizowaniu.

Sam wskaźnik względnej odporności na zużycie ściernie (określany na podstawie różnicy wagowej próbek przed i po badaniu) nie może być w przypadku badanych materiałów (o różnych mikrostrukturach) jedynym parametrem służącym do określania odporności na używanie ściernie.

Analiza powierzchni badanych próbek wykazała, że miękkie, plastyczne mikrostruktury ulegają zużyciu ściernemu głównie w wyniku bruzdowania. W przypadku struktur twardszych i bardziej kruchych ubytki materiałowe są spowodowane skrawaniem, które powoduje dodatkowo wygładzanie używanej powierzchni.

Pomiary chropowatości potwierdzają analizę jakościową powierzchni próbek.

Niskowęglowe stale z borem, które są przedmiotem badania, powinny być stosowane po obróbce cieplnej sugerowanej przez producentów. Takie zastosowanie tych stali może wydłużyć trwałość narażonych na używanie ściernie elementów maszyn.

## LITERATURA

1. Frydman S., Konat Ł., Łętkowska B., Pękalski G.: Impact resistance and fractography of low-alloy martensitic steels, Arch. of Foundry Eng., spec. iss. 1, vol. 8, 2008, s. 89–94.
2. Frydman S., Konat Ł., Pękalski G.: Properties of Hardox 400 and Hardox 500 steels in dynamic loading conditions, Proceedings of the 24th Danubia-Adria Symposium on Developments in Experimental Mechanics, Sibiu, Romania (2007) pp. 219–220.
3. Rautaruukki Corporation, P.O. Box 138, FI-00811 Helsinki, Finland.
4. Zeneri Acciai S.P.A., Via J. Gutenberg, 11/13, 25020 Poncarale (Brescia), Italy.
5. Norma GOST-23. 208–79.

### Summary

In recent years, steels with boron, which belonged to a group of abrasion resistant steels, have become increasingly popular. These steels are produced by using advanced technology of manufacturing and economically achieve very good mechanical properties. Applying these steels can extend the lifetime of expensive machining equipment in many industries, such as mining and the agriculture industry [L. 1, 2]. High values of mechanical strength and abrasion resistance are achieved after heat treatment (hardening and tempering). However, these steels are tailored to customer needs and supplied by the manufacturers. The article presents the results of abrasive wear resistance tests and analysis of the abrasive wear mechanism for two grades of steels, B27 and 28MCB5, for the delivery state and different stages of heat treatment. The steels are manufactured by two well-known European companies – Rautaruukki Corporation (Finland) and Zeneri Acciai Company (Italy). According to the manufacturers, these steels can be used for linings and wear parts for machines and equipment, edge plates, blades and chains, tools, screw conveyors, wear plates, fan blades, and especially in the agricultural machinery industry, both in parts subject to wear, as well as structural elements.