

**Janusz KRAWCZYK\***

**MECHANIZM ZUŻYCIA TRIBOLOGICZNEGO  
W ASPEKCIE ZMIAN W WARSTWIE  
WIERZCHNIEJ ROBOCZYCH WALCÓW  
HUTNICZYCH PO EKSPLOATACJI**

**THE WEAR MECHANISM IN THE ASPECT OF CHANGES  
IN THE SURFACE LAYER OF METALLURGICAL WORKING  
ROLLERS AFTER EXPLOITATION**

**Słowa kluczowe:**

walec hutniczy, biała warstwa, nalepienie, stopy żelaza, mikrostruktura

**Key words:**

mill roll, white layer, sticking, iron alloys, microstructure

**Streszczenie**

W pracy scharakteryzowano mechanizmy zużycia roboczych walców hutniczych w walcowniach gorących produktów oraz półproduktów stalowych. Zaprezentowano wyniki badań warstwy przypowierzchniowej w próbkach pobranych z siedemnastu walców po wycofaniu ich z eksploatacji. Trzy walce zosta-

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska, tel. 12 617-26-19, e-mail: jkrawcz@agh.edu.pl.

ły wykonane ze stali podeutektoidalnej, jeden ze stali eutektoidalnej, jeden ze stali nadeutektoidalnej, dwa ze staliw nadeutektoidalnych, cztery ze staliw podeutektycznych oraz sześć z żeliw połowicznych z grafitem sferoidalnym. Analiza warstw przypowierzchniowych w obszarach roboczych pozwoliła wskazać na główne mechanizmy zużycia tych narzędzi. Walce ze stali podeutektoidalnej charakteryzują się tworzeniem nalepień materiału walcowanego, tworzeniem się tzw. białej warstwy i intensywnym umocnieniem odkształceniowym. Walec ze stali eutektoidalnej charakteryzuje się tworzeniem nalepień materiału walcowanego, ale zwłaszcza białej warstwy. W walcu ze stali nadeutektoidalnej w znacznie ograniczonym zakresie występują zjawiska tworzenia się nalepień materiału walcowanego oraz białej warstwy. Walce wykonane ze staliw nadeutektoidalnych jedynie incydentalnie wykazują zjawisko tworzenia się białej warstwy, natomiast widoczna zaczyna być fragmentacja (dekohezja) warstwy wierzchniej w wyniku oddziaływań tribologicznych. Walce wykonane ze staliw podeutektycznych charakteryzują się głównie dekohezją materiału wzdłuż wydzielen cementytu ledeburytycznego oraz cementytu drugorzędowego wydzielonego w układzie Widmannstättena. Krawędzie takich pęknięć działają jak ostrza skrawające materiał walcowany. Walce z żeliw połowicznych podatne są na rozwój pęknięć wzdłuż wydzielen węglików eutektycznych, a brak wydzielen dyspersyjnych węglików drugorzędowych zaczyna sprzyjać tworzeniu się białej warstwy.

## WPROWADZENIE

Walce hutnicze używane jako narzędzia w kształtowaniu stali na gorąco podlegają szczególnie trudnym warunkom eksploatacyjnym [L. 1–3]. Trudne warunki eksploatacyjne skutkują zmianami w warstwie wierzchniej tych narzędzi, co było charakteryzowane w pracach autora [L. 4–11]. Zjawiskami związanymi ze skutkami takich warunków pracy są m.in.: tworzenie się nalepień materiału walcowanego, tworzenie się tzw. białej warstwy, intensywne umocnienie odkształceniowe, fragmentacja (dekohezja) warstwy wierzchniej w wyniku oddziaływań tribologicznych, pęknięcie wzdłuż wydzielen cementytu ledeburytycznego oraz cementytu drugorzędowego wydzielonego w układzie Widmannstättena, skrawające działanie powierzchni walca na materiał walcowany, rozprowadzanie po powierzchni oraz wypalanie grafitu wchodzącego w skład fazowy walca [L. 10–21]. Skorelowanie intensywności występowania tych zjawisk z mikrostrukturą walca wymaga zestawienia obserwacji mikrostruktury w warstwie wierzchniej tych narzędzi z szeroką gamą materiałów zastosowanych na takie walce, znacząco różniących się składnikami strukturalnymi. Zadanie takie zostało podjęte w niniejszej pracy.

## MATERIAŁ DO BADAŃ ORAZ METODOLOGIA BADAŃ

Materiał badawczy pobrano z siedemnastu roboczych walców hutniczych w obszarze ich powierzchni roboczej. Składy chemiczne pięciu stali, sześciu staliw oraz sześciu żeliw zastosowanych na badane walce hutnicze podano w **Tabeli 1**. Mikrostruktury tych tworzyw zostały zamieszczone na **Rysunku 1**.

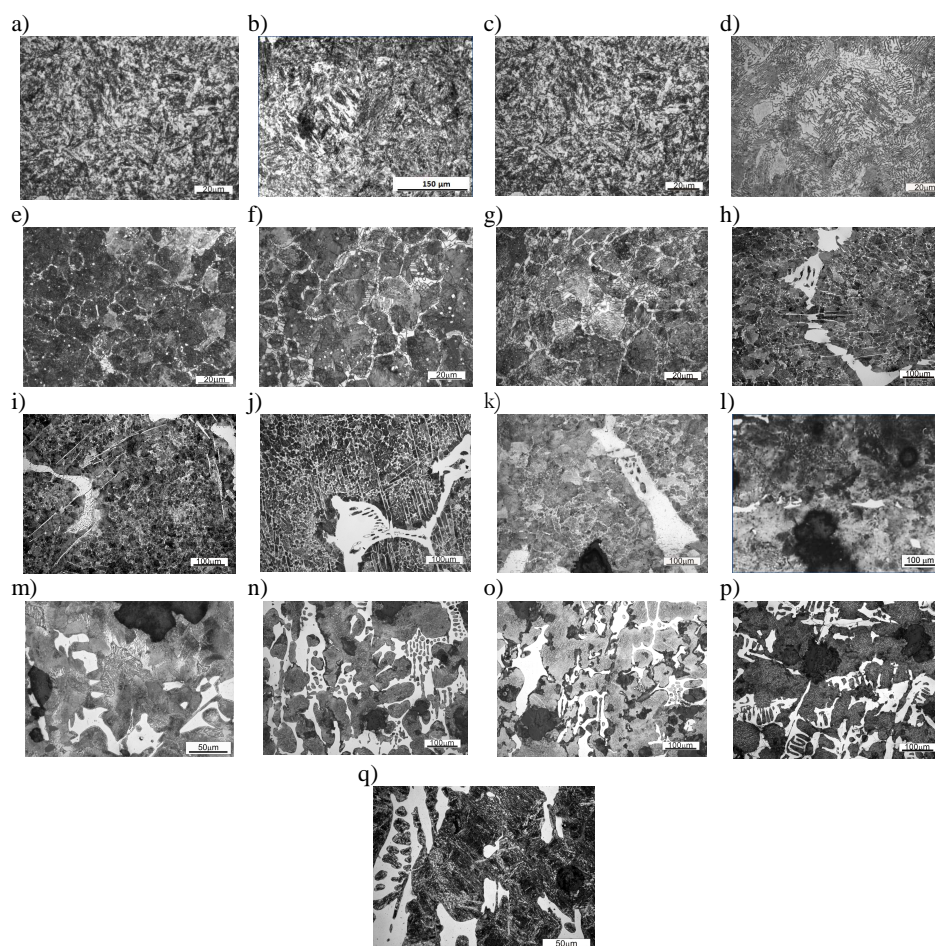
**Tabela 1. Skład chemiczny (% masowy) badanych materiałów**

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

nr walca	materiał	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
1	35MnCrMoV8-6	0,34	1,93	0,36	0,010	0,007	1,57	0,11	0,42	0,12
2	35MnCrMoV8-6	0,35	1,94	0,35	0,015	0,007	1,56	0,07	0,43	0,11
3	35MnCrMoV8-6	0,37	1,93	0,35	0,014	0,003	1,60	0,09	0,43	0,12
4	75MnV3-12	0,74	0,61	0,49	0,011	0,011	0,09	0,06	0,16	0,12
5	90CrV6	0,86	0,24	0,30	0,010	0,015	1,42	0,37	–	0,10
6	G120CrNiMo4-3-3	1,22	0,73	0,51	0,030	0,022	0,99	0,47	0,42	0,02
7	G150SiCrNi4-4-3	1,34	0,65	1,12	0,022	0,010	0,83	0,60	0,19	–
8	G200CrNiMo4-3-3	1,83	0,64	0,56	0,024	0,008	1,30	0,47	0,33	0,01
9	G200NiSiCr8-4-4	1,99	0,80	1,30	0,022	0,019	1,24	1,81	0,35	–
10	G200CrNiMo4-3-3	2,00	0,56	0,63	0,035	0,015	1,06	0,52	0,32	–
11	G200SiCrNi4-4	2,00	0,70	1,12	0,027	0,025	0,84	0,51	0,33	0,02
12	GJSL320NiSiCrMo14-8-3	3,23	0,52	2,22	0,080	0,012	0,69	3,56	0,62	–
13	GJSL320NiSiCrMo14-8-3	3,24	0,56	1,98	0,070	0,011	0,66	3,54	0,63	–
14	GJSL340NiSiMoCr10-6-12	3,36	0,97	1,55	0,09	0,014	0,11	2,40	1,17	–
15	GJSL340NiSiMoCr10-6-12	3,37	0,97	1,51	0,08	0,012	0,17	2,38	1,20	–
16	GJSL340NiSiMoCr10-6-12	3,38	1,02	1,50	0,08	0,014	0,21	2,42	1,18	–
17	GJSL330NiMoCr12-8-3	3,45	0,65	1,40	b.d.	b.d.	0,70	3,07	0,86	–

Trzy walce były wykonane ze stali podeutektoidalnej o mikrostrukturze odpuszczonego bainitu (**Rys. 1a–c**). Jeden walec wykonano ze stali eutektoidalnej o strukturze perlitycznej (**Rys. 1d**). Jeden walec wykonano ze stali nad-eutektoidalnej charakteryzującej się sferoidalnymi wydzieleniami stopowego cementytu drugorzędowego w osnowie drobnego perlitu (**Rys. 1e**). Dwa walce wykonano ze staliw nadeutektoidalnych, w których również występowały wydzielenia cementytu drugorzędowego, głównie wzdłuż granic ziarn byłego austenitu wtórnego oraz osnowa perlityczna (**Rys. 1f, g**). W przypadku czterech walców ze staliwa podeutektycznego oprócz osnowy perlitycznej oraz sferoidalnych wydzieleni cementytu drugorzędowego występował również cementyt drugorzędowy wydzielony w układzie Widmannstättena jak i ledeburyt przemieniony (**Rys. 1h–k**). Dodatkowo zwłaszcza w przypadku jednego z tych walców w mikrostrukturze można było zaobserwować wydzielenia grafitu (**Rys. 1k**). Sześć walców żeliwnych wykonano z żeliw połowicznych, w których mikrostrukturze obok wydzieleni grafitu (o sferoidalnej morfologii)

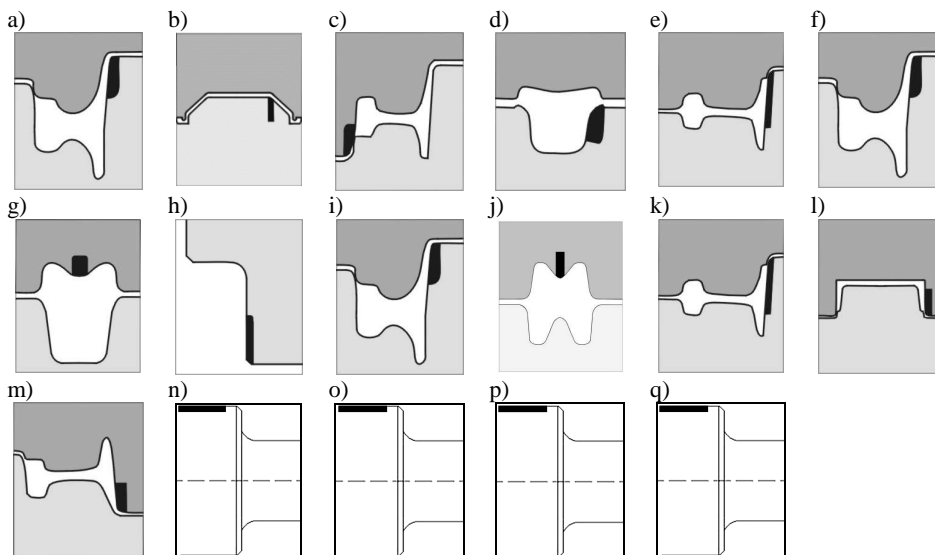
występował również cementyt ledeburytyczny (**Rys. 1l–q**). W przypadku pierwszych dwóch żeliw (**Rys. 1l, m**) osnowa była perlityczno-bainityczna (bainit wykazywał cechy morfologiczne bainitu górnego), w przypadku trzech następnych (**Rys. 1n–p**) osnowa była bainityczna z wyspami drobnego perlitu (bainit wykazywał cechy morfologiczne bainitu dolnego), a w przypadku ostatniego (**Rys. 1q**) osnowa była martenzytyczno-bainityczna (bainit wykazywał cechy morfologiczne bainitu dolnego).



**Rys. 1.** Mikrostruktura badanych walców hutniczych: a) walec nr 1, b) walec nr 2, c) walec nr 3, d) walec nr 4, e) walec nr 5, f) walec nr 6, g) walec nr 7, h) walec nr 8, i) walec nr 9, j) walec nr 10, k) walec nr 11, l) walec nr 12, m) walec nr 13, n) walec nr 14, o) walec nr 15, p) walec nr 16, q) walec nr 17. Traw. 2% nital

Fig. 1. Microstructure of investigated mill rolls: a) roll no. 1, b) roll no. 2, c) roll no. 3, d) roll no. 4, e) roll no. 5, f) roll no. 6, g) roll no. 7, h) roll no. 8, i) roll no. 9, j) roll no. 10, k) roll no. 11, l) roll no. 12, m) roll no. 13, n) roll no. 14, o) roll no. 15, p) roll no. 16, q) roll no. 17. Etched with 2% nital

Próbki do obserwacji mikrostruktury walców hutniczych pobrano z powierzchni roboczej walców. Miejsca pobrania próbek przedstawiono na schematach zamieszczonych na **Rysunku 2**.



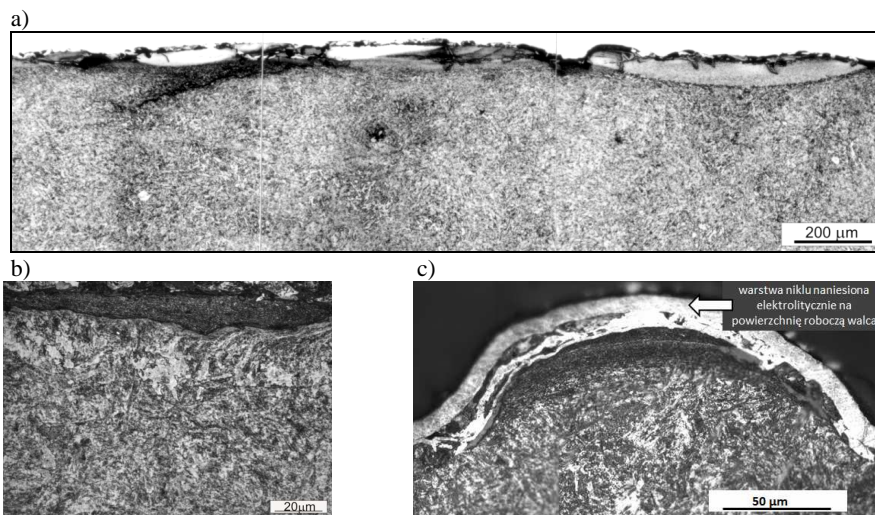
**Rys. 2.** Schematy wykrojów walców, z których pobrano materiał do badań: a) walec nr 1, b) walec nr 2, c) walec nr 3, d) walec nr 4, e) walec nr 5, f) walec nr 6, g) walec nr 7, h) walec nr 8, i) walec nr 9, j) walec nr 10, k) walec nr 11, l) walec nr 12, m) walec nr 13, n) walec nr 14, o) walec nr 15, p) walec nr 16, q) walec nr 17. Miejsce pobrania materiału do badań zaznaczono

Fig. 2. Shape of passes from rolls used to research: a) roll no. 1, b) roll no. 2, c) roll no. 3, d) roll no. 4, e) roll no. 5, f) roll no. 6, g) roll no. 7, h) roll no. 8, i) roll no. 9, j) roll no. 10, k) roll no. 11, l) roll no. 12, m) roll no. 13, n) roll no. 14, o) roll no. 15, p) roll no. 16, q) roll no. 17. Places of sampling blackened

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

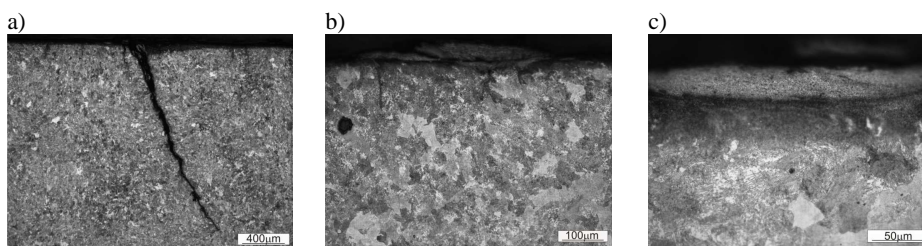
Walce ze stali podeutektoidalnej charakteryzują się tworzeniem się tzw. białej warstwy (**Rys. 3a**), powstawaniem nalepień materiału walcowanego (**Rys. 3b**) oraz intensywnym umocnieniem odkształceniowym (**Rys. 3c**). Należy przy tym zauważyć, że wszystkie opisane powyżej zjawiska nie występują permanentnie na powierzchni, lecz lokalnie, przy czym z dużą częstotliwością. Stwierdzono ponadto występowanie interakcji pomiędzy tworzeniem się białej warstwy a powstawaniem nalepień [**L. 22**]. Można również stwierdzić, że tworzenie się białej warstwy sprzyja powstawaniu pęknięć zmęczeniowo-cieplnych (**Rys. 3a**). Należy jednak zaznaczyć, że pęknięcia zmęczeniowo-cieplne tworzą się również bez udziału (powstawania) białej warstwy.

Walec ze stali eutektoidalnej obok tworzenia się pęknięć zmęczeniowo-ciepłowniczych (**Rys. 4a** – występujących w przypadku praktycznie wszystkich rodzajów walców do pracy na gorąco), charakteryzuje się tworzeniem nalepień materiału walcowanego (**Rys. 4b**), ale zwłaszcza tworzeniem się białej warstwy (**Rys. 4c**). Podstawową przyczyną intensyfikacji takich zjawisk na powierzchni walca perlitycznego jest niska temperatura tworzenia się austenitu w warstwie roboczej. Utworzenie się austenitu jest niezbędne do powstawania białej warstwy oraz sprzyja połączeniu adhezyjnemu pomiędzy narzędziem a walcowanym materiałem, który ma również strukturę austenityczną.



**Rys. 3. Charakterystyczne zmiany w mikrostrukturze w obszarze warstwy wierzchniej walców hutniczych ze stali 35MnCrMoV8-6: a) biała warstwa – walec nr 1, b) nalepienie – walec nr 2, c) odkształcenie plastyczne – walec nr 3. Traw. 2% nital**

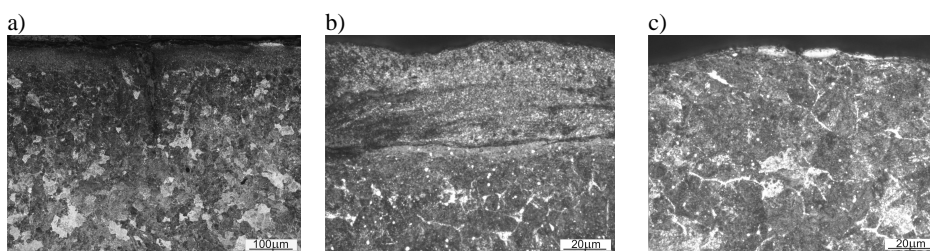
Fig. 3. Characteristic changes in the microstructure in the surface layer of 35MnCrMoV8-6 steel mill rolls: a) white layer - roll no. 1, b) sticking of hot-processed steel material – roll no. 2, c) plastic deformation - roll no. 3. Etched with 2% nital



**Rys. 4. Charakterystyczne zmiany w mikrostrukturze w obszarze warstwy wierzchniej walca hutniczego ze stali 75MnV3-12: a) pęknięcie – walec nr 4, b) nalepienie – walec nr 4, c) biała warstwa – walec nr 4. Traw. 2% nital**

Fig. 4. Characteristic changes in the microstructure in the surface layer of 75MnV3-12 steel mill roll: a) crack – roll no. 5, b) sticking of hot-processed steel material – roll no. 5, c) white layer – roll no. 5. Etched with 2% nital

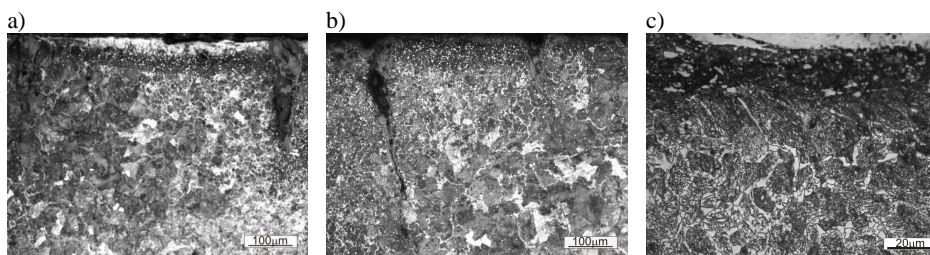
W walcu ze stali nadeutektoidalnej w znacznie ograniczonym zakresie występują zjawiska tworzenia się nalepień materiału walcowanego oraz tworzenia się białej warstwy (**Rys. 5**). Istotne jest występowanie w mikrostrukturze tego walca stopowych węglików drugorzędowych (cementyt stopowy). Węglik ten pozostają w mikrostrukturze pomimo zajścia przemiany austenicznej w osnowie perlitycznej. To powoduje, że tworzenie się połączeń adhezyjnych pomiędzy warstwą wierzchnią walca a walcowanym materiałem jest utrudnione. Austenitzowanie materiału walca na większej głębokości jest utrudnione, podobnie jak intensywne odkształcenie plastyczne tych obszarów. Znakomicie utrudnia to tworzenie się grubej białej warstwy.



**Rys. 5. Charakterystyczne zmiany w mikrostrukturze w obszarze warstwy wierzchniej walca hutniczego ze stali 90CrV6: a) pęknięcie – walec nr 5, b) nalepienie – walec nr 5, c) biała warstwa – walec nr 5. Traw. 2% nital**

Fig. 5. Characteristic changes in the microstructure in the surface layer of 90CrV6 steel mill roll: a) crack – roll no. 5, b) sticking of hot-processed steel material – roll no. 5, c) white layer – roll no. 5. Etched with 2% nital

Walce wykonane ze stali nadeutektoidalnych jedynie incydentalnie wykazują zjawisko tworzenia się białej warstwy (**Rys. 6a**), natomiast widoczna zaczyna być fragmentacja (dekohezja) warstwy wierzchniej w wyniku oddziaływań tribologicznych (**Rys. 6b, c**).



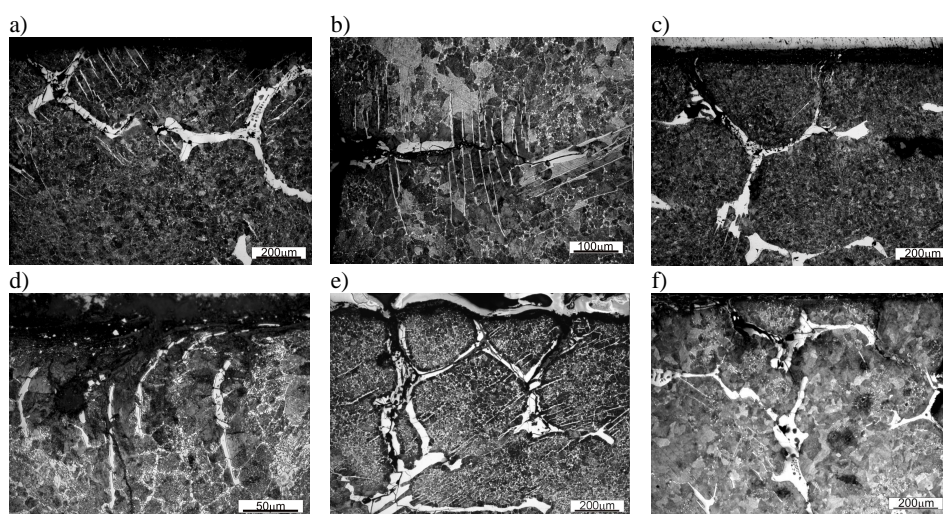
**Rys. 6. Charakterystyczne zmiany w mikrostrukturze w obszarze warstwy wierzchniej walców hutniczych ze stali nadeutektoidalnych: a) biała warstwa – walec nr 6, b) pęknięcie oraz odkształcenie plastyczne – walec nr 6, c) dekohezja – walec nr 7. Traw. 2% nital**

Fig. 6. Characteristic changes in the microstructure in the surface layer of hypereutectoid cast steel mill rolls: a) white layer – roll no. 6, b) crack and plastic deformation – roll no. 6, c) decohesion during plastic deformation – roll no. 7. Etched with 2% nital

Walce wykonane ze staliw podeutektycznych charakteryzują się głównie dekohezją materiału wzdłuż wydzieliń cementytu ledeburytycznego oraz cementytu drugorzędowego wydzielonego w układzie Widmannstättena (**Rys. 7**). Krawędzie takich pęknięć działają jak ostrza skrawające materiał walcowany (**Rys. 8**).

Walce z żeliw połowicznych podatne są na rozwój pęknięć wzdłuż wydzieliń węglików eutektycznych (**Rys. 9**), a brak wydzieliń dyspersyjnych węglików drugorzędowych zaczyna sprzyjać tworzeniu się białej warstwy (**Rys. 10**). Dodatkowo grafit występujący w mikrostrukturze tych walców tylko w ograniczonym zakresie ulega rozpraszaniu na powierzchni walca (**Rys. 11a**).

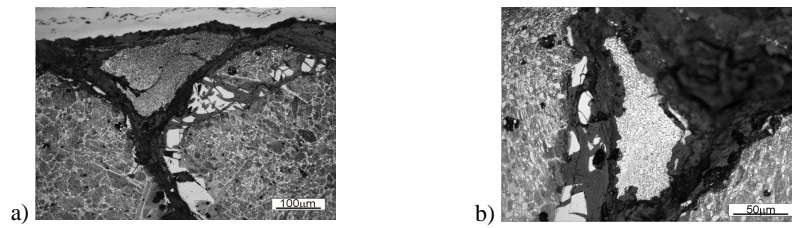
Grafit może również ulegać „wypaleniu” i pozostać po nim krater, co udokumentowano również w przypadku walca hutniczego wykonanego ze staliwa grafityzowanego (**Rys. 11b**).



**Rys. 7.** Charakterystyczne zmiany w mikrostrukturze w obszarze warstwy wierzchniej walców hutniczych ze staliw podeutektycznych: a) dekohezja wzdłuż cementytu ledeburytycznego – walec nr 8, b) dekohezja wzdłuż cementytu Widmannstättena – walec nr 8, c) dekohezja wzdłuż cementytu ledeburytycznego – walec nr 9, d) dekohezja wzdłuż cementytu Widmannstättena – walec nr 9, e) dekohezja wzdłuż cementytu ledeburytycznego – walec nr 10, f) dekohezja wzdłuż cementytu ledeburytycznego – walec nr 11. Traw. 2% nital

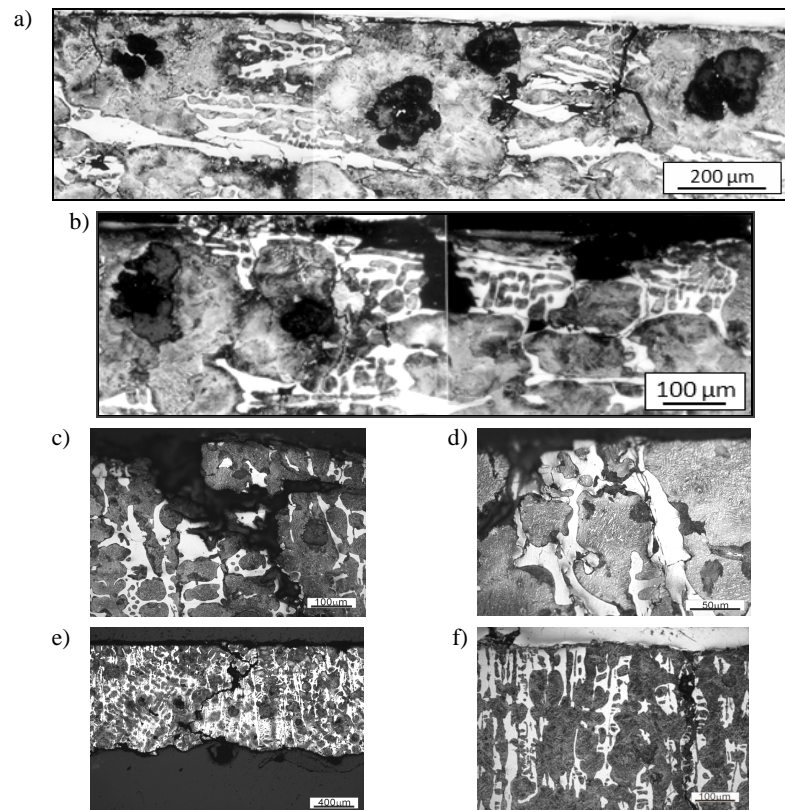
Fig. 7. Characteristic changes in the microstructure in the surface layer of hypoeutectic cast steel mill rolls: a) decohesion along ledeburitic cementite – roll no. 8, b) decohesion along Widmannstätten cementite – roll no. 8, c) decohesion along ledeburitic cementite – roll no. 9, d) decohesion along Widmannstätten cementite – roll no. 9, e) decohesion along ledeburitic cementite – roll no. 10, c) decohesion along ledeburitic cementite – roll no. 11. Etched with 2% nital





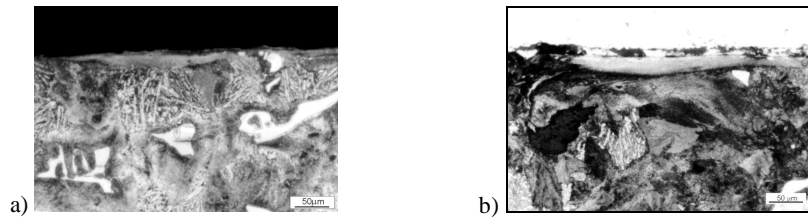
**Rys. 8. Mikroskrawające oddziaływanie krawędzi obszarów wykruszeń w walcu ze staliwa G200CrNiMo4-3-3 - walec nr 10. Traw. 2% nital**

Fig. 8. The effect of microcutting of the chipping areas edge of cast steel G200CrNiMo4-3-3 roll no. 10. Etched with 2% nital



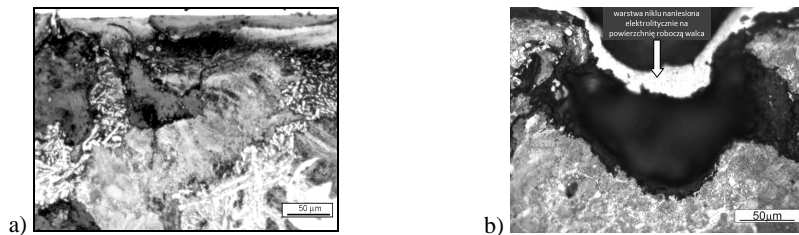
**Rys. 9. Pęknięcia wzdłuż cementytu ledeburycznego w warstwie wierzchniej walców hutniczych z żeliw połowicznych: a) walec nr 12 – GJSL320NiSiCrMo14-8-3, b) walec nr 13 – GJSL320NiSiCrMo14-8-3, c) walec nr 14 – GJSL340NiSiMoCr10-6-12, d) walec nr 15 – GJSL340NiSiMoCr10-6-12, e) walec nr 16 – GJSL340NiSiMoCr10-6-12, f) walec nr 17 – GJSL330NiMoCr12-8-3. Traw. 2% nital**

Fig. 9. Decohesion along ledeburitic cementite in the surface layer of mottle cast iron mill rolls: a) roll no. 12 – GJSL320NiSiCrMo14-8-3, b) roll no. 13 – GJSL320NiSiCrMo14-8-3, c) roll no. 14 – GJSL340NiSiMoCr10-6-12, d) roll no. 15 – GJSL340NiSiMoCr10-6-12, e) roll no. 16 – GJSL340NiSiMoCr10-6-12, f) roll no. 17 – GJSL330NiMoCr12-8-3. Etched with 2% nital



**Rys. 10. Biała warstwa na powierzchni walców z żeliwa GJSL320NiSiCrMo14-8-3: a) walec nr 12, b) walec nr 13. Traw. 2% nital**

Fig. 10. White layers on the surface of the cast iron GJSL320NiSiCrMo14-8-3 rolls with: a) roll no. 12, a) roll no. 13. Etched with 2% nital



**Rys. 11. Zachowanie się wydzielenń grafitu w strefie przypowierzchniowej: a) walec z żeliwa GJSL320NiSiCrMo14-8-3 – walec nr 13, b) walec ze staliwa nr 11 – G200SiCrNi4-4, Traw. 2% nital**

Fig. 11. The morphology of graphite precipitation in the surface zone: a) cast iron GJSL320NiSiCrMo14-8-3 – roll no. 13, b) cast steel G200SiCrNi4-4 – roll no. 11. Etched with 2% nital

## WNIOSKI

Wykonane obserwacje warstwy przypowierzchniowej roboczych walców hutniczych walcowni gorących stali skłaniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Brak występowania węglików drugorzędowych sprzyja tworzeniu się nalepień na powierzchni walców hutniczych.
2. Brak występowania węglików drugorzędowych sprzyja tworzeniu się białej warstwy na powierzchni walców hutniczych.
3. Szczególnie sprzyjające warunki tworzenia się nalepień materiału walcowanego występują w przypadku perlitycznej struktury walca hutniczego.
4. Wprowadzenie do mikrostruktury walca hutniczego dużego udziału węglików drugorzędowych może skutkować dekohezją materiału w wyniku lokalnej koncentracji odkształcenia plastycznego.
5. Występowanie cementytu drugorzędowego wydzielonego w układzie Widmannstättena sprzyja tworzeniu się pęknięć na powierzchni walca.
6. Ciągła siatka cementytu ledeburytycznego (eutektycznego) sprzyja rozwojowi pęknięć w warstwie wierzchniej walców.

7. Rozprowadzanie grafitu (będącego składnikiem mikrostruktury żeliwnych walców hutniczych) po powierzchni roboczej walca jest silnie ograniczone.

### 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”.

### LITERATURA

1. Mercado-Solis R.D., Talamantes-Silva J., Beynon J.H., Hernandez-Rodriguez M.A.L.: Modelling surface thermal damage to hot mill rolls, *Wear* 263 (2007) 1560–1567
2. Colás R., Ramírez J., Sandoval I., Morales J.C., Leduc L.A.: Damage in hot rolling work rolls, *Wear* 230 (1999) 56–60.
3. Chang D.-F.: Thermal stresses in work rolls during the rolling of metal strip, *Journal of Materials Processing Technology* 94 (1999) 45–51.
4. Pacyna J., Krawczyk J., Kokosza A., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się staliwnych walców bruzdowych. *Mat. XIX Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek S.A. pt. „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, Wisła-Malinka, 21÷23 lutego 2001, s. 148–156.
5. Pacyna J., Kokosza A., Krawczyk J., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się żeliwnych walców bruzdowych. *Mat. XIX Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek S.A. pt. „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, Wisła-Malinka, 21÷23 lutego 2001, s. 157–168.
6. Krawczyk J., Gryszak P., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się walca hutniczego wykonanego ze staliwa adamitowego. *Mat. XXXIII Szkoły Inżynierii Materiałowej, Kraków – Ustroń, 4÷7 października 2005*, s. 129–136.
7. Krawczyk J., Karwat J., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizmy zużywania się walca hutniczego wykonanego z połowicznego żeliwa sferoidalnego niklowo-krzemowo-molibdenowego. *Mat. Konf. XXXIV Szkoły Inżynierii Materiałowej, Kraków – Krynica, 26÷29 września 2006*, s. 99–105.
8. Krawczyk J., Kaczmarczyk Ł., Szczygieł A., Latała D.: Mechanizm zużywania się grafityzowanego staliwnego walca hutniczego klasy ADAMIT. *Mat. XI Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Tendencje i kierunki rozwoju produkcji walców”*. Huta Buczek Sp. z o.o., Ustroń – Jaszowiec, marzec 2006, s. 17–30.
9. 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* 2, 8 (2008) 170–174.
10. Krawczyk J., Pacyna J., Szczygieł A., Latała D.: Rola morfologii ledeburytu przemienionego i cementytu drugorzędowego w tribologii walców hutniczych. *Mat. XI Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Tendencje i kierunki rozwoju*

- produkcji walców”. Huta Buczek Sp. z o.o., Ustroń – Jaszowiec, marzec 2006, s. 53–66.
11. Krawczyk J., Pacyna J.: The role of transformed ledeburite in high temperature tribology on the example of adamite rolls. Proc. of the 11th International Scientific Conference on the Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science CAM3'S. Gliwice – Zakopane, 6th–9th December 2005, p. 535–540.
  12. Pacyna J., Krawczyk J.: Wpływ składników strukturalnych na własności eksploatacyjne walców roboczych w walcowniach gorących. Mat. Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek Sp. z o.o., styczeń 2007, s. 10–12.
  13. Krawczyk J., Pacyna J., Fronczek R., Juszcak K.: Rola mikrostruktury w zużywaniu się żeliwnych walców hutniczych. Mat. Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek Sp. z o.o., styczeń 2007, s. 23–30.
  14. Krawczyk J., Szarański M.: Wpływ współczynnika rozszerzalności cieplnej na tworzenie się pęknięć zmęczeniowo-cieplnych w stalowych walcach hutniczych. Mat. Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek Sp. z o.o., styczeń 2007, s. 32–37.
  15. Krawczyk J.: Zależność pomiędzy współczynnikiem rozszerzalności cieplnej a zużywaniem się elementów konstrukcji i narzędzi. Tribologia 2, 38, 212 (2007) 339–352.
  16. Krawczyk J.: Zmiany w mikrostrukturze stopów na osnowie żelaza wywołane kontaktem tribologicznym ze stalą nagrzaną do zakresu występowania austenitu. Tribologia 4, 43, 244 (2012) 89–98.
  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 3, 27 (2006) 174–177.
  18. Krawczyk J.: Mechanism of a white layer formation as a result of tribological contacts. Inżynieria Materiałowa 34, 194, 4 (2013) 310–313.
  19. Pacyna J., Krawczyk J.: Warunki powstawania i własności białej warstwy. Hutnik – Wiadomości Hutnicze 11, 72 (2005) 545–553.
  20. Krawczyk J., Pacyna J.: Effect of tool microstructure on the white layer formation. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 1–2, 17 (2006) 93–96.
  21. Krawczyk J.: Rola mikrostruktury w tribologicznym zużyciu stopów żelaza, Rozprawy, Monografie 274, Wydawnictwa AGH, Kraków 2013.
  22. Krawczyk J.: Interakcja pomiędzy tworzeniem się białej warstwy a oddziaływaniem adhezyjnym w warunkach tarcia stopów żelaza w wysokiej temperaturze. Tribologia 2, 45 (2014) 101–110.

## Summary

**The work characterizes the wear mechanisms of steelwork working rollers in hot rolling mills of steel products and semi-products. It presents the results of the examinations of the surface layer of samples obtained from seventeen rollers after they had been removed from operation. Three**

rollers were made of hypoeutectoid steel, one of eutectoid steel, one of hypereutectoid steel, two of hypereutectoid cast steels, four of hypoeutectoid cast steels, and six were made of mottle cast iron with spheroidal graphite. The analysis of the surface layers in the working areas made it possible to point to the main wear mechanisms of these tools. The hypoeutectoid steel rollers were characterized by the formation of “stickings” of the rolled material, the formation of the “white layer” and an intense work hardening. The eutectoid steel roller was characterized by the formation of “stickings” of the rolled material, but especially by the formation of the white layer. In the roller made of hypereutectoid steel, the phenomena of “stickings” of the rolled material as well as the formation of the white layer are significantly limited. The rollers made of hypereutectoid cast steels exhibit the white layer phenomenon only incidentally, while showing visible fragmentation (decohesion) of the surface layer as a result of tribological interactions. The hypoeutectoid cast steel rollers were characterized mainly by the material’s decohesion along the precipitates of the ledeburitic cementite and secondary cementite precipitated in the Widmannstätten system. The edges of such cracks work like blades, which cut the rolled material. The rollers made of mottle cast iron are prone to the development of cracks along the eutectic carbide precipitates, and the lack of dispersive secondary carbide precipitates favours the formation of the white layer.

