

**Janusz KRAWCZYK\***

**ZMIANY W MIKROSTRUKTURZE STOPÓW  
NA OSNOWIE ŻELAZA WYWOŁANE  
KONTAKTEM TRIBOLOGICZNYM ZE STAŁĄ  
NAGRZANĄ DO ZAKRESU WYSTĘPOWANIA  
AUSTENITU**

**CHANGES IN THE MICROSTRUCTURE OF IRON BASED  
ALLOYS DURING TRIBOLOGICAL CONTACT  
WITH STEEL HEATED TO THE AUSTENITE RANGE**

**Słowa kluczowe:**

zużycie, tribologia, biała warstwa, zmęczenie cieplne, węgliki

**Key words:**

wear, tribology, white etching layer, thermal fatigue, carbides

**Streszczenie**

Kształtowanie plastyczne stali na gorąco (w tym kucie) odbywa się najczęściej w temperaturze występowania austenitu. Dlatego własności tribologiczne narzędzi stosowanych w przeróbce plastycznej na gorąco powinny odnosić się do warunków, w których mają one kontakt z nagrzaną do zakresu austenitu stałą. W pracy przedstawiono zjawiska występujące na powierzchni materiałów na-

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel 12 617-26-19.

rzędziowych w wyniku ww. kontaktu tribologicznego, które mają wpływ na mikrostrukturę w ich warstwie wierzchniej. Określono wpływ mikrostruktury materiałów narzędziowych na osnowie żelaza na: tworzenie i utrzymywanie się na powierzchni tzw. białej warstwy oraz nalepień, występowanie pęknięć zmęczeniowo-cieplnych, podatność na odkształcenie plastyczne, wykruszanie materiału narzędzia (w tym węglików) jak i zmian w mikrostrukturze warstwy wierzchniej wywołanych oddziaływaniem cieplnym.

## WPROWADZENIE

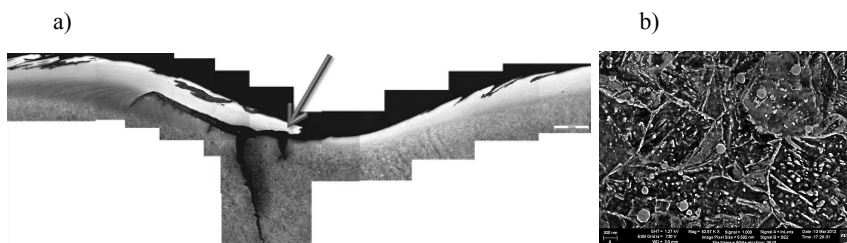
Uzyskanie austenitu w mikrostrukturze stali pozwala na jej łatwiejsze kształtowanie. Wynika to z korzystnej struktury krystalicznej RSC (regularnej ściennie centrowanej) charakterystycznej dla żelaza  $\gamma$ . Struktura krystaliczna RSC charakteryzuje się najgęstszym możliwym upakowaniem atomów w przestrzeni i występują w niej zarówno płaszczyzny krystalograficzne o najgęstszym możliwym upakowaniu atomów, jak i kierunki najgęstszego możliwego upakowania atomów. Te płaszczyzny oraz kierunki tworzą systemy łatwego poślizgu. Dlatego metale krystalizujące w strukturze krystalicznej RSC (np. Al, Cu) charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami plastycznymi. W przypadku stopów żelaza (stali) strukturę krystaliczną typu RSC można uzyskać w temperaturze otoczenia, stosując odpowiednie dodatki np. niklu i manganu. Stale takie nazywamy austenitycznymi. Niestety, w przypadku stali niestopowych oraz niskostopowych dla uzyskania struktury austenitycznej wymagane jest jej nagrzanie (w zależności od składu chemicznego) do temperatury przekraczającej temperaturę  $A_{C1}$ , tj. ok.  $700^{\circ}\text{C}$  (najczęściej ok.  $900^{\circ}\text{C}$ ). Taki zabieg powoduje drastyczną zmianę zjawisk tribologicznych oraz czynników oddziałujących na narzędzia używane w przeróbce plastycznej na gorąco (realizowanej najczęściej w zakresie występowania austenitu w mikrostrukturze materiału obrabianego plastycznie). Zagadnienie to jest istotne przy projektowaniu warunków np. kucia stali na gorąco, jak i projektowania narzędzi dla takiego procesu. Specyfika zjawisk zachodzących podczas kucia stali na gorąco została już opisana na wybranych przykładach w pracach [L. 1–4].

W niniejszej pracy przedstawiono zjawiska, które związane z oddziaływaniem tribologicznym materiałów narzędziowych na osnowie żelaza ze stałą nagrzaną do zakresu występowania austenitu. Zdefiniowano wpływ parametrów materiału na ww. zjawiska występujące w warstwie wierzchniej narzędzia, co pozwoliło na optymalizację parametrów materiału stosowanego na narzędzia do kucia na gorąco.

## BIAŁA WARSTWA

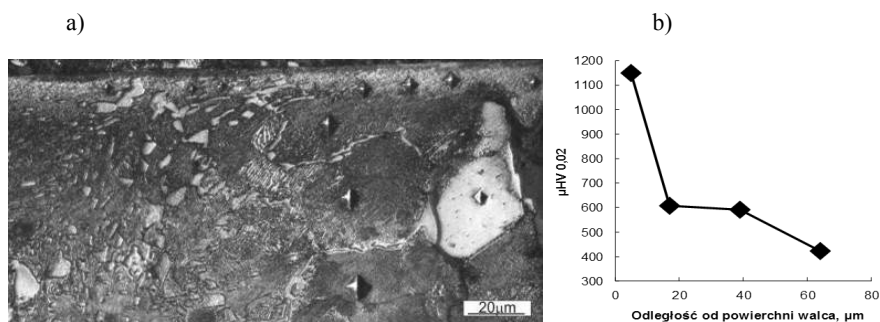
Tworzenie białej warstwy jest zjawiskiem, którego występowanie na powierzchni narzędzia jest intensyfikowane nagrzaniami kształtowanego materiału

do zakresu temp. występowania austenitu. Pomimo dużej częstotliwości występowania tego zjawiska oraz licznych z nim związanych doniesień literaturowych [L. 5] nadal brak ogólnie uznanej koncepcji tworzenia się białej warstwy [L. 6]. Na podstawie licznych obserwacji oraz badań powstała jednak [L. 5] następująca propozycja zdefiniowania tego zjawiska: białą warstwą należałoby nazywać trudno trawiącą się warstwę wierzchnią materiału, charakteryzującą się wysoką (powyżej 1000 HV) twardością oraz dużą kruchością, utworzoną w wyniku bardzo szybkiego nagrzania do wysokich (odpowiadających zakresowi istnienia austenitu) temperatur, któremu towarzyszy bardzo silne odkształcenie (zdefektowanie struktury) krystalicznej, a następnie natychmiastowe oziębienie, zwykle do temperatury otoczenia. Przykład tworzenia się białej warstwy na narzędziu podczas kucia został przedstawiony w pracy [L. 1]. Morfologię takiej białej warstwy przedstawiono na **Rys. 1**. Twardość w obszarze białej warstwy wynosi ok. 900  $\mu\text{HV}0,3$ , a średnica ziarna jest poniżej 1  $\mu\text{m}$ .



**Rys. 1.** Biała warstwa powstała na stemple ze stali X32CrMoV3-3 podczas kucia bufora zderzaka kolejowego: a) morfologia białej warstwy [L. 1], b) mikrostruktura białej warstwy w zaznaczonym miejscu

Fig. 1. The white layer on the surface of the X32CrMoV3-3 steel stamp after the bumper forgings production: a) white layer morphology [L. 1], b) white layer microstructure from marked area

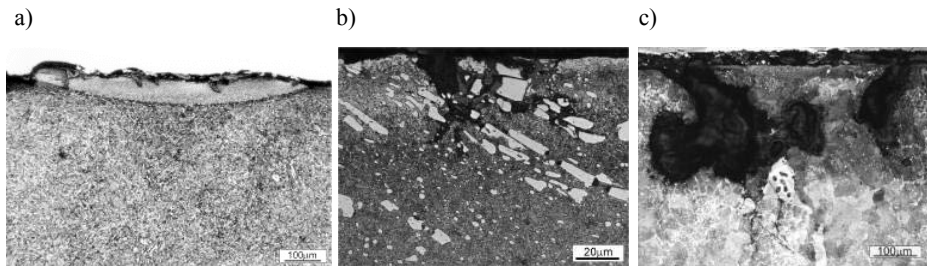


**Rys. 2.** Biała warstwa powstała na powierzchni roboczej walca hutniczego wykonanego ze staliwa G200SiCrNi4-4: a) mikrostruktura w warstwie wierzchniej ze śladami pomiaru twardości, b) zależność twardości od odległości od powierzchni roboczej walca

Fig. 2. The white layer on the surface of the G200SiCrNi4-4 cast steel mill roll: a) microstructure of the surface area of the mill roll with hardness indentation marks, b) changes of hardness with the distance from the working surface of the mill roll

Tworząca się na powierzchni narzędzi (w wyniku oddziaływania tribologicznego ze stalą nagrzaną do zakresu austenitycznego) biała warstwa może uzyskiwać twardości znacznie wyższe niż 900 HV (**Rys. 2**).

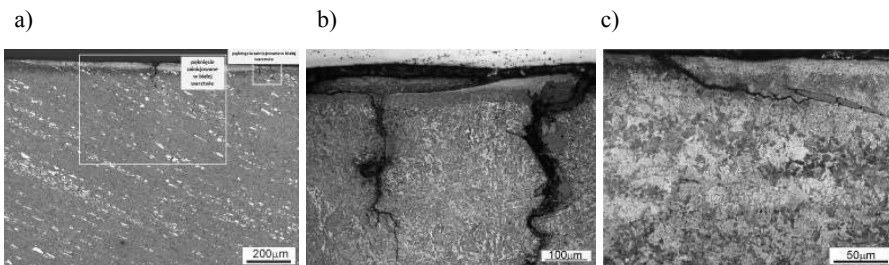
Biała warstwa tworzy się szczególnie łatwo, w przypadku gdy mikrostruktura stopu jest jednorodna i składa się z jednego składnika strukturalnego, występowanie w niej węglików pierwoszo- lub/i drugorzędowych oraz/lub wydzieleni grafitu utrudnia tworzenie białej warstwy oraz jej zachowanie na powierzchni narzędzia (**Rys. 3**).



**Rys. 3.** Mikrostruktura warstwy wierzchniej narzędzi i jej wpływ na białą warstwę: a) walec hutniczy ze stali bainitycznej, b) rolka osprzętowa walcowni drobnej ze stali X165CrV12 z węglnikami pierwotnymi i wtórnymi w mikrostrukturze, c) walec hutniczy ze staliwa G200SiCrNi4-4 z wydzieleniami grafitu w mikrostrukturze

Fig. 3. The microstructure of the tools surface and its influence on the white layer formation: a) bainitic steel mill roll, b) X165CrV12 steel roll with primary and secondary carbides, c) G200SiCrNi4-4 cast steel mill roll with graphite precipitations

Zapobieganie tworzeniu się grubej białej warstwy jest istotne ze względu na sprzyjanie przez nią powstawaniu pęknięć (**Rys. 4**).

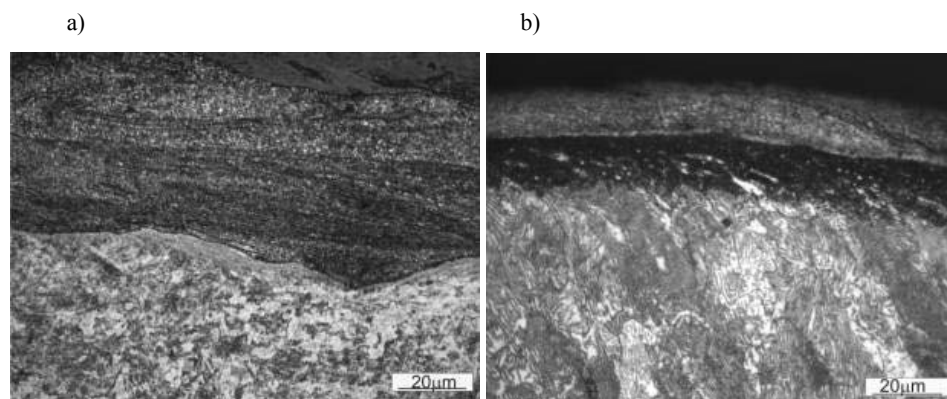


**Rys. 4.** Pęknięcia inicjowane przez białą warstwę: a) rolka osprzętowa walcowni drobnej ze stali X165CrV12, b) walec hutniczy ze stali bainitycznej, c) rolka osprzętowa walcowni drobnej ze stali C55

Fig. 4. Cracks caused by the white layer: a) X165CrV12 steel roll, b) bainitic steel mill roll, c) C55 steel roll

## ZUŻYCIE ADHEZYJNE – NALEPIENIA

Zużycie adhezyjne jest szczególnie niepożądane w przypadku narzędzi. Stosowanie narzędzi, w których mikrostrukturze występuje jeden składnik strukturalny, np. perlit lub bainit, w przypadku gdy materiał obrabiany został nagrzanany do mikrostruktury austenitycznej powoduje, że w wyniku nagrzania warstwy wierzchniej narzędzia wytworzy też się austenit i połączenie adhezyjne narzędzia i materiału obrabianego będzie następować bardzo łatwo (**Rys. 5**). Wprowadzenie do mikrostruktury narzędzia węglików drugo- lub/i pierwszorzędowych oraz wydzielenia grafitu będzie ograniczało w ww. warunkach tworzenie się nalepień na jego powierzchni.

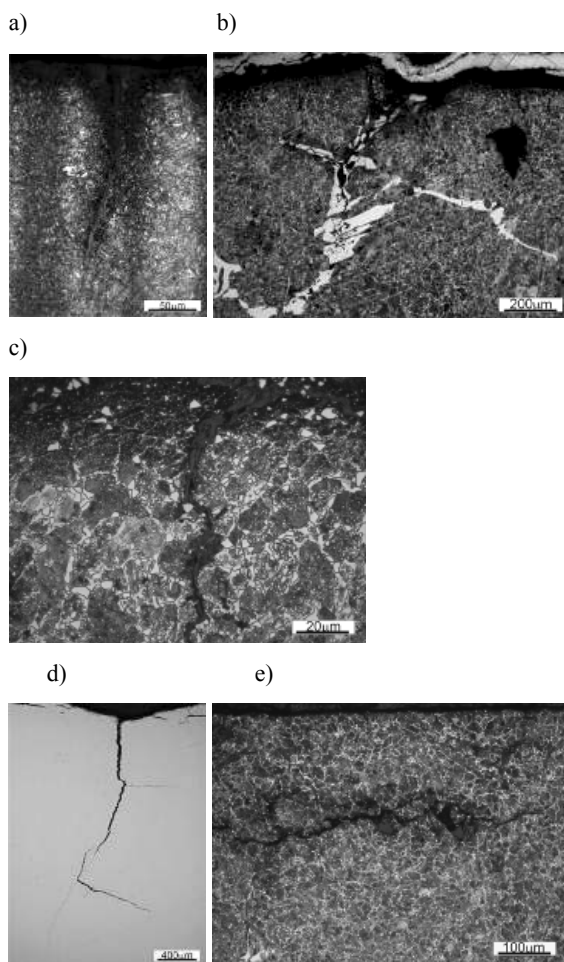


**Rys. 5. Nalepienia na powierzchni walców hutniczych: a) walec hutniczy ze stali bainitycznej, b) walec hutniczy ze stali perlitycznej**

Fig. 5. Sticking on the surface of mill rolls: a) bainitic steel mill roll, b) pearlitic steel mill roll

## PEKNIĘCIA ZMĘCZENIOWO-CIEPLNE

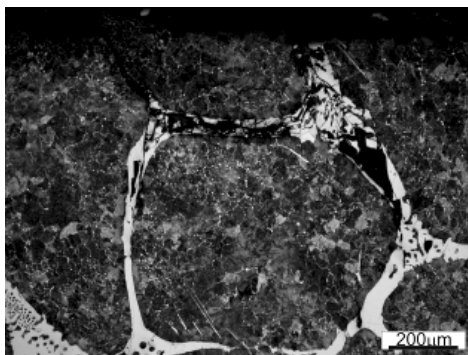
Kontakt tribologiczny ze stalą nagrzaną do zakresu występowania austenitu niesie ze sobą niebezpieczeństwo powstawania pęknięć zmęczeniowo-cieplnych. Istotną rolę w tworzeniu się pęknięć zmęczeniowo-cieplnych ma struktura pasmowa (zwłaszcza pasma wydzielenia węglików), jak i kształt powierzchni oraz położenie punktu występowania największych naprężeń stycznych (**Rys. 6**). Rozwój tych pęknięć może sprzyjać wykruszaniu się dużych fragmentów materiału narzędzia (**Rys. 7**).



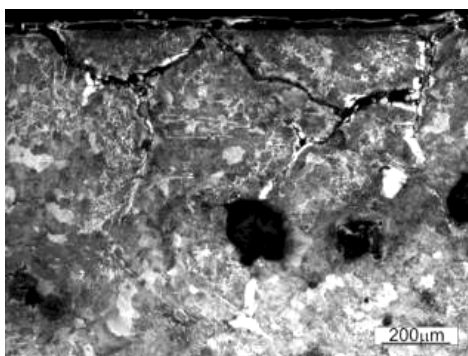
**Rys. 6. Pęknięcia zmęczeniowo-cieplne: a) w pasmowej mikrostrukturze stempla ze stali X38CrMoV5-3, b) w pasmach cementytu ledeburitycznego w walcu hutniczym ze staliwa G200CrNiMo4-3-3, c) wzdłuż siatki wydzielen cementytu drugorzędowego w walcu hutniczym ze staliwa G200NiSiCr8-4-4, d) wynikające z kształtu powierzchni stempla wykonanego ze stali X38CrMoV5-3 (zgląd nietrawiony), e) wynikające z usytuowania największych naprężeń stycznych w walcu hutniczym ze staliwa G150SiCrNi4-4-3**

**Fig. 6. Fatigue-thermal cracks: a) in banded microstructure of X38CrMoV5-3 steel stamp, b) in ledeburitic cementite of G200CrNiMo4-3-3 cast steel mill roll, c) through secondary cementite precipitation net in G200NiSiCr8-4-4 cast steel mill roll, d) resulting from the shape of the surface of the X38CrMoV5-3 steel stamp (not etched), e) resulting from the location of the largest shearing stresses in the G150SiCrNi4-4-3 cast steel mill roll**

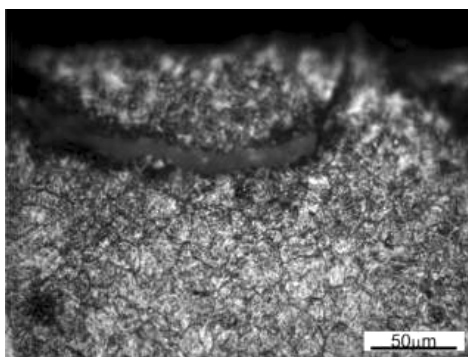
a)



b)

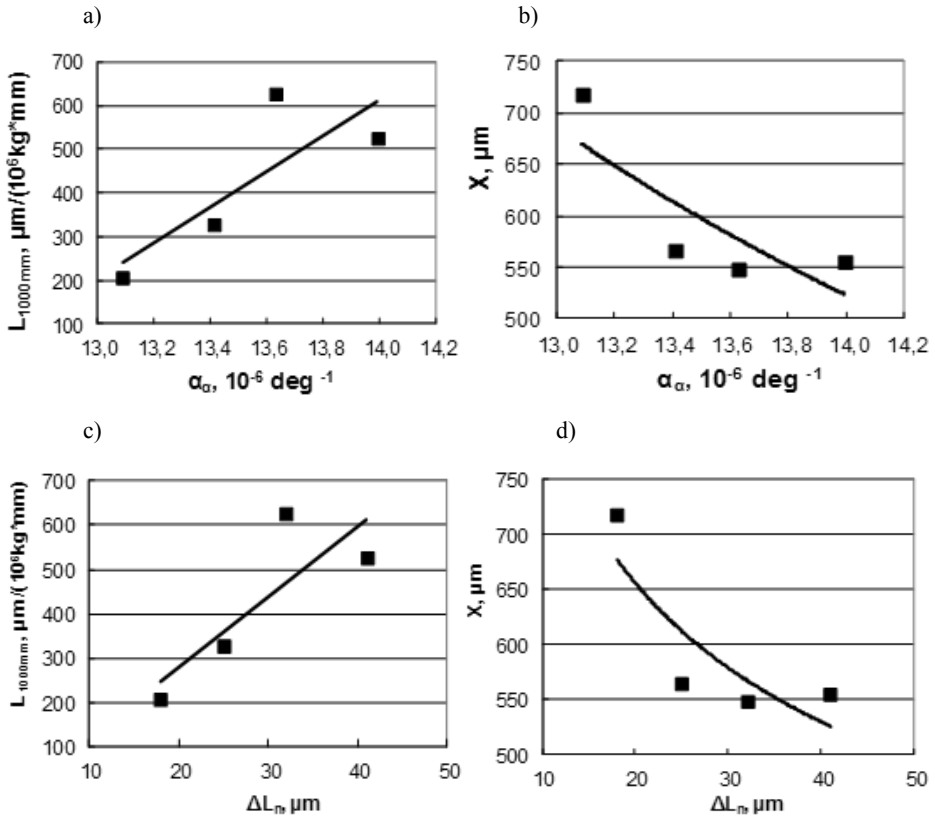


c)



**Rys. 7. Wykruszanie materiału narzędzi indukowane pęknięciami zmęczeniowo-cieplnymi:**  
a) walec hutniczy ze staliwa G200CrNiMo4-3-3, b) walec hutniczy ze staliwa G200SiCrNi4-4, c) stempel wykonany ze stali X38CrMoV5-3

Fig. 7. Spalling of the material of tools induced by fatigue-thermal cracking: a) G200CrNiMo4-3-3 cast steel mill roll, b) G200SiCrNi4-4 cast steel mill roll, c) X38CrMoV5-3 steel stamp



Rys. 8. Wpływ efektów dylatacyjnych na pęknięcia w warstwie wierzchniej stalowych walców hutniczych: a) wpływ współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej na średnią długość pęknięcia odniesioną do długości przekroju i ilości odwalcowanej stali, b) wpływ współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej na średnią odległość pomiędzy pęknięciami, c) wpływ wielkości skurczu związanego z przemianą austenityczną na średnią długość pęknięcia odniesioną do długości przekroju i ilości odwalcowanej stali, d) wpływ wielkości skurczu związanego z przemianą austenityczną na średnią odległość pomiędzy pęknięciami

Fig. 8. The influence of expansion parameters on the cracks in the surface layer of cast steel mill rolls: a) the influence of thermal expansion coefficient on the average length of the crack referring to the length of section and amount of rolling steel, b) the influence of thermal expansion coefficient on the average distance between cracks, c) the influence of the shrinkage size connected with the eutectoidal transformation on the average length of the crack referring to the length of section and amount of rolled steel, d) the influence of the shrinkage size connected with the eutectoidal transformation on the average length of the average distance between cracks

Pęknięcia zmęczeniowo-ciepne tworzą się w narzędziach łatwiej, gdy ich materiał charakteryzuje się dużym współczynnikiem liniowej rozszerzalności cieplnej oraz występuje w nich duży skurcz wywołany przemianą austenityczną (Rys. 8).



## PODSUMOWANIE

Optymalizacja doboru narzędzi, które będą miały podczas kucia kontakt ze stałą nagrzaną w zakres występowania austenitu, powinna polegać na doborze materiału charakteryzującego się: występowaniem węglików drugo- i/lub pierwszorzędowych, brakiem pasmowości, niewystępowaniem ciągłej siatki węglików, małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej (w zakresie występowania ferrytu) oraz małym skurczem związanym z przemianą austenityczną.

## Podziękowania

Autor dziękuje za konsultacje oraz pomoc w realizacji niniejszych badań: prof. dr. hab. inż. Jerzemu Pacynie, dr. inż. Piotrowi Bale, dr. inż. Bogdanowi Pawłowskiemu, dr. inż. Tomaszowi Ślebodzie, mgr. inż. Marcinowi Szarańskiemu, mgr. Wojciechowi Targoszowi, mgr. inż. Michałowi Mrozkowi, mgr. inż. Witoldowi Potońcowi, mgr. inż. Łukaszowi Kaczmarczykowi, mgr. inż. Piotrowi Grysakowi, mgr. inż. Kazimierzowi Sikorze, mgr. inż. Dariuszowi Latale oraz Stanisławowi Malikowi.

*Badania realizowane w ramach Projektu „Opracowanie nowych zaawansowanych technologii kucia materiałów wysokotopliwych” Nr WND-POIG.01.03.01-12-004/09 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

## LITERATURA

1. Krawczyk J.: Mechanizm powstawania białej warstwy w kontekście zużycia narzędzi podczas kształtowania stalowych elementów konstrukcyjnych, *Tribologia: teoria i praktyka*, 42, 4, 2011, 135–143.
2. Bednarek S., Krawczyk J., Bała P., Łukaszek-Sołek A., Śleboda T., Wojtaszek M., Chyła P.: Analiza oddziaływania materiału wsadowego na mechanizm zużycia wkładek matrycowych formujących w procesie kształtowania elementów zderzaka kolejowego, *Tribologia: teoria i praktyka*, 42, 4, 2011, 33–41.
3. Łukaszek-Sołek A., Krawczyk J., Bednarek S., Sińczak J., Śleboda T., Bała P.: Charakterystyka zużycia stempla podczas wyciskania stalowych elementów, *Tribologia: teoria i praktyka*, 42, 4, 2011, 153–161.
4. Skubisz P., Krawczyk J., Sińczak J.: Ocena wpływu parametrów procesu kucia stalowej piasty na zużycie trzpienia formującego, *Problemy Eksploatacji*, 4, 2011, 45–52.
5. Pacyna J., Krawczyk J.: Warunki powstawania i własności białej warstwy, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 72, 11, 2005, 545–553.
6. Barbacki A., Józwiak K., Dynak K.: Biała warstwa – próba definicji, warunki powstawania, właściwości, *Inżynieria Materiałowa* 27, 5, 2006, 862–867.

### Summary

**Hot forming of steel (including forging) is most often performed in the austenite region. Because of that, tribological properties of tools used in hot processing should be related to the conditions of their contact with steel heated up into the austenite region. This work is focused on the phenomena occurring on the surface of tool materials during tribological contact. The influence of the microstructure of iron based tools on: white layer formation, white layer and sticking presence on the tools surface, thermal and fatigue cracks, tool material formability, spalling of tool materials (including spalling of carbides) as well as the changes in the microstructure of the white layer induced by the temperature gradients.**