

Łukasz FROCISZ^{*}, Janusz KRAWCZYK^{*}, Tomasz TOKARSKI^{},
Grzegorz CIOŚ^{***}, Marek PAĆKO^{*}**

OBECNOŚĆ FAZY CIEKŁEJ W OBSZARZE KONTAKTU NARZĘDZIA Z ODKUWKĄ ZE STOPU TYTANU JAKO ŹRÓDŁO KATASTROFALNEGO MECHANIZMU ZUŻYCIA

LIQUID PHASE PRESENCE IN THE CONTACT ZONE OF TOOL AND TITANIUM ALLOY DURING DIE FORGING AS A SOURCE OF A CATASTROPHIC WEAR MECHANISM

Słowa kluczowe:

mechanizm zużycia, kucie matrycowe, mikrostruktura, Ti6Al4V

Key words:

thixotropic state, wear mechanism, die forging, microstructure, Ti6Al4V

^{*} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii, Metali i Informatyki Przemysłowej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska.

^{**} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Metali Nieżelaznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska.

^{***} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska.

Streszczenie

Celem niniejszej pracy było określenie mechanizmu zużywania się materiału matrycy, jak i odkuwki tytanowej podczas procesu kucia matrycowego. Materiałem do badań była stal narzędziowa 55NiCrMoV7 z warstwą napawaną o podwyższonej zawartości Cr i Mo oraz odkuwka ze stopu Ti6Al4V. W wyniku kucia w temperaturze 940°C na powierzchni obu materiałów pojawiły się wyraźne wylębienia. Analiza metalograficzna pozwoliła stwierdzić, iż na powierzchni materiałów występują porowate struktury tlenkowe. Analiza chemiczna z tych obszarów wykazała obecność w produktach zużycia występujących na materiale matrycy – zwiększonej zawartości tytanu i aluminium. Wzajemne mieszanie materiału odkuwki i matrycy skutkowało powstaniem na powierzchni materiału niskotopliwej eutektyki. Zwiększenie temperatury na powierzchni styku najprawdopodobniej związane było z efektem egzotermicznym od odkształcenia, jak i tarcim występującym podczas procesu kucia. Zwiększony udział fazy α na powierzchni odkuwki skutkowało powstawaniem w obszarach przypowierzchniowych siatki pęknięć. Pęknięcia te powodowały dodatkową intensyfikację procesu zużycia.

WPROWADZENIE

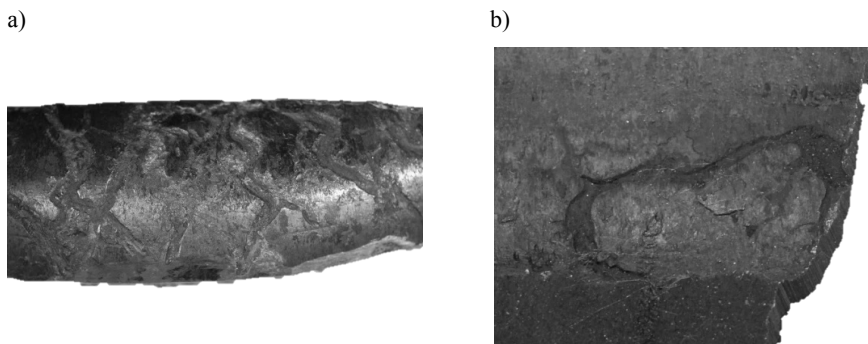
Własności materiałów narzędziowych wykorzystywanych na narzędzia kuźnicze w znaczący sposób zależne są od ich mikrostruktury. Znaczący wpływ na mikrostrukturę takich materiałów ma skład chemiczny i obróbka cieplna [L. 1, 2]. Odpowiednie zaprojektowanie obróbki cieplnej pozwala na otrzymanie narzędzi o optymalnym połączeniu własności mechanicznych i odporności na zużycie [L. 3–9]. Dobrze poznanymi mechanizmami zużycia matryc kuźniczych są mechanizmy zużycia ściernego, zmęczenia cieplnego i procesy odkształcenia plastycznego powierzchni [L. 10–12]. Często w celu poprawienia własności matryc już pracujących wykorzystuje się zabiegi napawania. Mają one na celu regenerację powierzchni matrycy i poprawę ich własności. Warstwę napawaną stanowić może ten sam materiał, stanowiący jedynie uzupełnienie uszkodzonej powierzchni matrycy, jak i stop o innym składzie chemicznym, pozwalający na uzyskanie lepszych własności mechanicznych i poprawę odporności na zużycie [L. 13].

Stopy tytanu charakteryzują się utrudnionym procesem kształtowania plastycznego, ze względu na dużą skłonność do utleniania. Obecność tlenu w strukturze stopu tytanu stabilizuje fazę α , powodując tzw. zabielenie powierzchni stopu [L. 14]. Zwiększony udział fazy α na powierzchni materiału może skutkować powstawaniem w niej pęknięć, co przekłada się na jakość powierzchni gotowego elementu [L. 15]. Na własności stopów tytanu po procesie kucia mają wpływ także: wielkość ziarna materiału wsadowego, czas trwania procesu kucia, jak i zakres temperaturowy, w którym odkształcany jest materiał [L. 16].

Problematyka zużycia materiałów kuźniczych stosowanych w przemyśle metali nieżelaznych nie została jednak jeszcze do końca opisana. Ze względu na złożoną problematykę procesów kształtowania plastycznego stopów tytanu podjęto próbę określenia mechanizmu zużywania się materiału matrycy i odkuwki tytanowej przy możliwej obecności fazy ciekłej w obszarze styku narzędzie–materiał odkuwki.

METODYKA BADAŃ

Materiałem do badań była stal narzędziowa do pracy na gorąco 55NiCrMoV7 z napoiną o większej niż dla materiału narzędzia zawartości chromu i molibdenu. Drugim materiałem poddanym badaniom był stop tytanu Ti6Al4V, który był odkształcany w matrycach zamkniętych wykonanych z analizowanej stali. Proces odkształcenia odbywał się dwuetapowo. Podczas pierwszego odkształcenia temperatura wsadu wynosiła 940°C. Materiał matrycy podgrzany był do temperatury 300°C. Odkształcenie odbywało się z prędkością 2 m/s na młocie przeciwbieżnym BECHE. Kucie odbywało się z zastosowaniem pokrycia szkłem wodnym odkuwki oraz z użyciem smaru grafitowego. Po procesie kucia wstępnego materiał został ochłodzony do temperatury otoczenia, powierzchnia została oczyszczona i ponownie pokryta szkłem wodnym. Temperatura kucia wykańczającego wynosiła również 940°C. Po procesie kucia zaobserwowano na powierzchni matrycy i odkuwki siatkę wyżłobień. Analizy mechanizmu zużycia dokonano z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego AxioVert 200MAT oraz skaningowego HITACHI SU 70, wykonując dodatkowo mikroanalizę składu chemicznego z powierzchni współpracujących materiałów metodą EDS. Obserwowano powierzchnię zużycia w przekroju poprzecznym, na zglądach nietrawionych i trawionych. Obraz powierzchni zużycia przedstawiono na **Rysunku 1**.



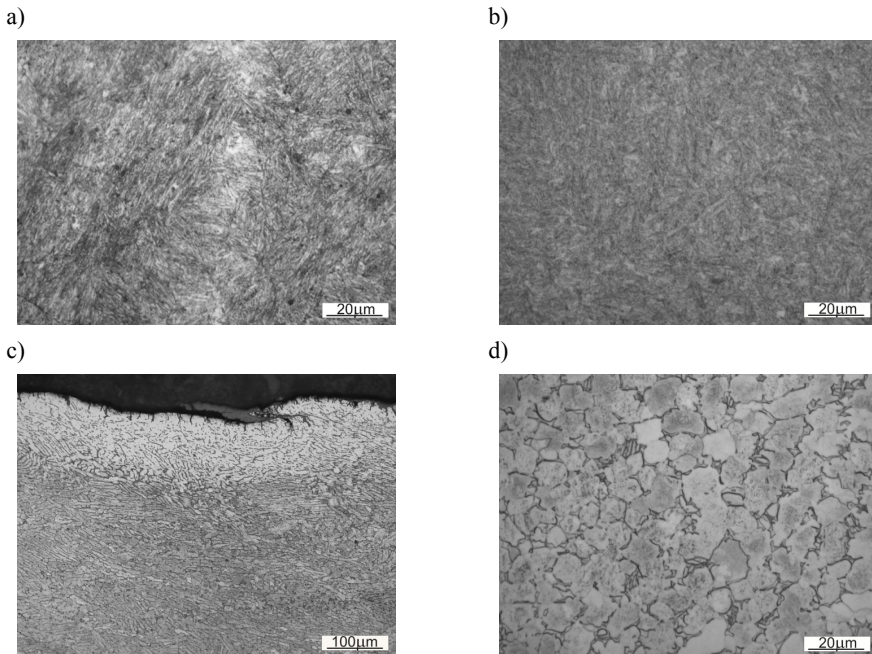
Rys. 1. Obraz makroskopowy powierzchni zużycia: a) materiał matrycy, b) materiał odkuwki

Fig. 1. Macroscopic view of wear area: a) steel die, b) forging

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

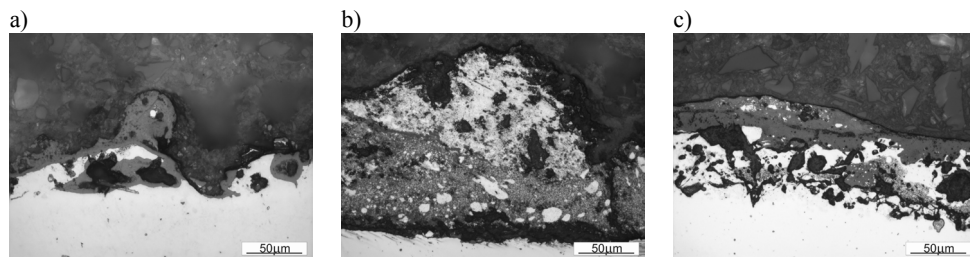
Obserwacja mikroskopowa mikrostruktury analizowanych materiałów pozwoliła stwierdzić, iż osnowę materiału matrycy stanowi martenzyt odpuszczony o morfologii iglastej. Materiał napoiny wykazuje natomiast charakterystyczną dla tego procesu strukturę kolumnową. Mikrostrukturę w obszarze napoiny również stanowił martenzyt. Mikrostrukturą materiału odkuwki była bimodalna struktura dwufazowa $\alpha+\beta$. Obserwowano równoosiowe ziarna fazy α wraz z wydzieleniami fazy β na granicach ww. ziarn. W obszarach fazy β występowały iglaste wydzielenia fazy α . Zaobserwowano również zlokalizowane przy powierzchniowo odkształcenie plastyczne materiału oraz zwiększony udział fazy α w warstwie wierzchniej materiału (**Rys. 2**).

Obserwacja powierzchni zużycia na zglądach poprzecznych pozwoliła ujawnić obecność fazy tlenkowej na powierzchni współpracujących materiałów. Struktura tlenkowa na powierzchni charakteryzowała się dużą porowatością oraz obecnością pęknięć podpowierzchniowych. Utlenianiu ulegały również krawędzie powstałych pęknięć (**Rys. 3**).



Rys. 2. Mikrostruktura badanych materiałów: a) napoina, b) materiał rodzimy matrycy, c) powierzchnia odkuwki, d) materiał rodzimy odkuwki

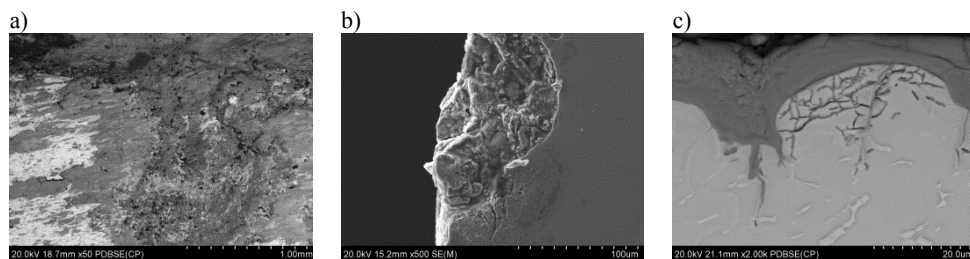
Fig. 2. Microstructure of: a) padding weld, b) steel die, c) surface area of die forging titanium alloy, d) titanium alloy



Rys. 3. Obraz produktów zużycia na powierzchni: a) odkuwki tytanowej, b, c) materiału matrycy

Fig. 3. Wear products on surface area of: a) forging material, b, c) steel die

Obserwacja z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego pozwoliła na określenie charakteru powierzchni zużycia. Obserwowano silne utlenienie na powierzchni matrycy. Dzięki obserwacji z wykorzystaniem trybu pracy BSE (*Backscattered Secondary Electrons*) mikroskopu obserwowano na powierzchni materiału kontrast fazowy pomiędzy materiałem matrycy a powierzchnią wyżłobienia (**Rys. 4a**). Obserwacja powierzchni zużycia w przekroju poprzecznym pozwoliła potwierdzić obecność w obszarach wyżłobień struktur porowatych (**Rys. 4b**). Obserwacja materiału odkuwki wykazała obecność produktów utleniania na powierzchni odkuwki, (podobnie jak miało to miejsce w przypadku matrycy) oraz dalsze utlenianie materiału w obszarach pęknięć podpowierzchniowych (**Rys 4c**).



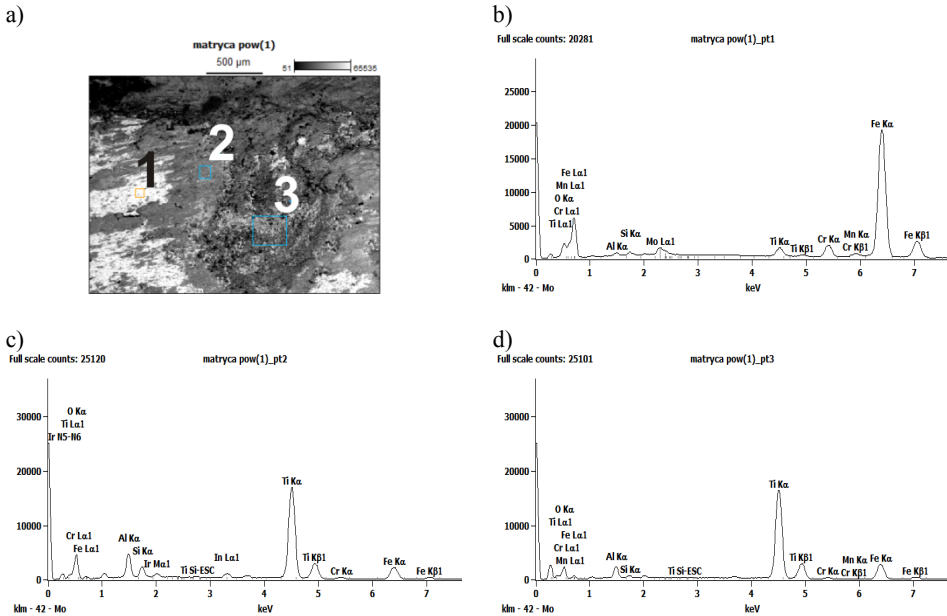
Rys. 4. Obraz powierzchni zużycia: a) powierzchni matrycy, b) powierzchni matrycy w przekroju poprzecznym, c) powierzchni odkuwki w przekroju poprzecznym, SEM

Fig. 4. Surface area of: a) die, b) die in the cross-section, c) forging titanium alloy in cross-section, SEM

Dodatkowa analiza składu chemicznego wykonana metodą EDS z powierzchni wyżłobienia dowiodła, iż w obszarach jaśniejszych skład chemiczny nie wykazuje znaczących różnic od składu chemicznego napoiny. Obserwowano niewielką ilość tytanu w punkcie 1. W punktach 2 i 3 ilość tytanu obserwowanego w wyniku analizy znacząco wzrasta. Dodatkowo obserwowano zwiększoną intensywność pikę pochodzącego od aluminium (**Rys. 5**). Analiza składu

chemicznego produktów zużycia w przekroju poprzecznym matrycy potwierdza obecność tytanu w produktach zużycia. Nie obserwuje się obecności tego pierwiastka w składzie chemicznym zastosowanej napoiny (**Rys. 6**).

Wykonane badania pozwalają stwierdzić, iż najprawdopodobniej w obszarze styku materiału narzędzia z odkuwką następowało tworzenie się fazy ciekłej. Obserwowane zarówno z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, jak i skaningowej obszary przypowierzchniowe charakteryzują się dużą porowatością, o morfologii odpowiadającej występowaniu częściowego krzepnięcia z fazy ciekłej. Może za tym przemawiać duża porowatość poniżej powierzchni materiału w obszarach częściowo utlenionych (**Rys. 3**). Obserwowany zwiększenie zawartości tytanu na powierzchni matrycy i zwiększone stężenie aluminium świadczyć może o wzajemnym mieszanii się obu materiałów (**Rys. 5d**).

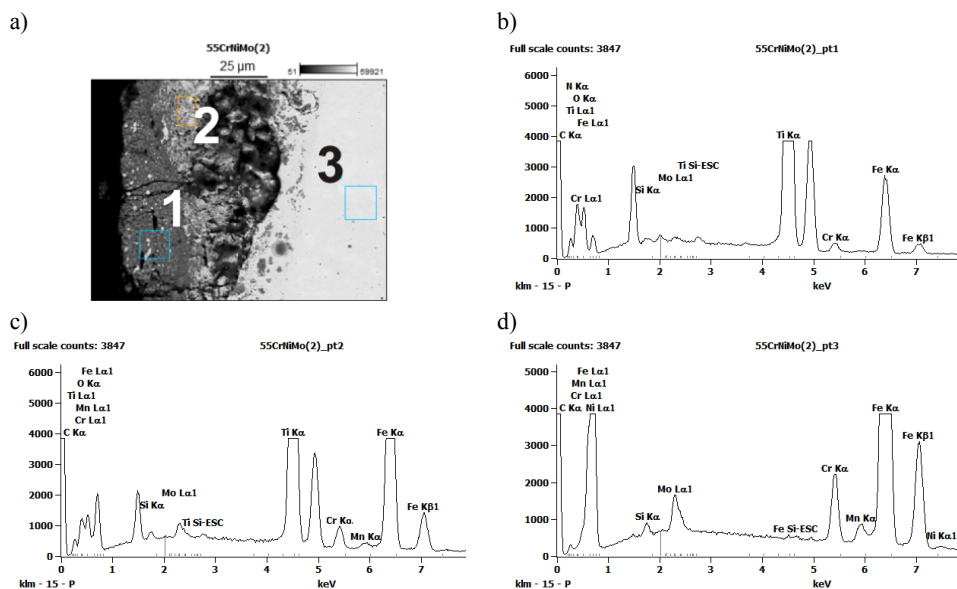


Rys. 5. Mikroanaliza składu chemicznego powierzchni matrycy: a) obszar analizowany z zaznaczonymi punktami, w których wykonywana była analiza, b) widmo rentgenowskie z obszaru 1, c) widmo rentgenowskie z obszaru 2, d) widmo rentgenowskie z obszaru 3, EDS

Fig. 5. Chemical microanalysis from the surface of steel die: a) area of the analysis, b) X-ray spectrum from point 1, c) X-ray spectrum from point 2, d) X-ray spectrum from point 3, EDS

Obecność stanu ciekłego najprawdopodobniej związana jest z występowaniem niskotopliwej eutektyki w układzie równowagi fazowej tytan–żelazo. W zakresie zawartości żelaza od 24,7 do 51,3% masowych faza ciekła występuje w temperaturach powyżej 1085°C. Dodatkowy wzrost temperatury powyżej

940°C związany jest z silnym efektem egzotermicznym występującym podczas odkształcania stopów tytanu i przez tarcie. Najprawdopodobniej zastosowanie smaru grafitowego podczas procesu odkształcania spowodowało zwiększoną stabilność fazy α w obszarach przypowierzchniowych odkuwki. Węgiel pochodzący ze smaru grafitowego dodatkowo mógł obniżyć temperaturę przemiany eutektycznej. Zwiększony udział fazy α skutkował powstawaniem na powierzchni odkuwki mikropęknięć, których krawędzie ulegały następnie utlenianiu, co dodatkowo przyczyniło się do intensyfikacji procesu zużycia (**Rys. 4c**).



Rys. 6. Mikroanaliza składu chemicznego w przekroju poprzecznym matrycy: a) obszar analizowany z zaznaczonymi punktami, w których wykonywana była analiza, b) widmo rentgenowskie z obszaru 1, c) widmo rentgenowskie z obszaru 2, d) widmo rentgenowskie z obszaru 3, EDS

Fig. 6. Chemical microanalysis from the cross-section of steel die: a) area of the analysis, b) X-ray spectrum from point 1, c) X-ray spectrum from point 2, d) X-ray spectrum from point 3, EDS

WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Na powierzchni materiału zarówno matrycy, jak i odkuwki obserwowano liczne wyżłobienia materiału. Powierzchnia wyżłobień była silnie utleniona i charakteryzowała się dużą porowatością.
2. Powierzchnia materiału odkuwki charakteryzowała się odkształconym ziarnem oraz większym udziałem fazy α . Faza ta była najprawdopodobniej sta-

bilizowana w wyniku dyfuzji węgla ze smaru grafitowego do obszarów przypowierzchniowych odkuwki. Obecność tlenu na powierzchni odkuwki dodatkowo stabilizowała fazę α .

3. Obserwacja powierzchni zużycia w przekroju poprzecznym materiału matrycy pozwoliła określić morfologię produktów zużycia. Obserwowano dużą porowatość produktów zużycia oraz morfologię przemawiającą za obecnością fazy ciekłej w styku materiałów. Dla materiału odkuwki obserwowano siatkę mikropęknięć podpowierzchniowych, które dodatkowo intensyfikowały proces zużycia.
4. Wzajemne mieszanie się materiałów matrycy i odkuwki skutkowało powstaniem na powierzchni materiału niskotopliwej eutektyki. Faza ciekła pojawiła się w wyniku podwyższenia temperatury w obszarze styku wynikającego z silnie egzotermicznego charakteru procesu kształtowania plastycznego stopów tytanu, jak i możliwego obniżenia temperatury przemiany eutektycznej spowodowanego dyfuzją węgla ze smaru grafitowego.

Podziękowania

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu badawczego nr ID245469 pt. „Wysokoobciążone węzły tribologiczne do zastosowań biomedycznych” w Programie Badań Stosowanych PBS III, nr umowy AGH 19.19.110.350.

LITERATURA

1. Davis J.R. i inni: ASM Handbook 4. Heat Treating, ASM International, 1999.
2. Brookes C.R.: Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels, Materials Park, ASM International 1999.
3. Bała P., Pacyna J.: The effect of retained austenite on the fracture toughness of high speed steels, Steel Research, vol. 58(2), 1985, s. 87–92.
4. Bała P., Pacyna J.: The influence of kinetics phase transformation during tempering on the mechanical properties of HS6-5-2 steel, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 28, 2008, s. 123–130.
5. Krawczyk J., Bała P.: Optimization of heat and thermo-chemical treatment of 50CrMoV18-30-6 steel for hot forging dies, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 54(1), 2009, s. 233–239.
6. Krawczyk J.: Zmiany w mikrostrukturze stopów na osnowie żelaza wywołane kontaktem tribologicznym ze stalą nagrzaną do zakresu występowania austenitu, Tribologia nr 4, 2012, s. 89–98.
7. Krawczyk J.: Interakcja pomiędzy tworzeniem się białej warstwy a oddziaływaniem adhezyjnym w warunkach tarcia stopów żelaza w wysokiej temperaturze, Tribologia nr 2, 2014, s. 101–110.

8. Bała P., Krawczyk J., Madej M.: Własności tribologiczne stopów z układu *Ni-Ta-Al-M* o dużej zawartości węgla, *Tribologia* nr 3, 2012, s. 21–28.
9. Śleboda T., Krawczyk J., Zimowski S., Kot M.: Wysokotemperaturowe własności tribologiczne stopów Fe–Al. *Tribologia* nr 3, 2012, s. 209–215.
10. Smolik J., Mazurkiewicz A., Walkowicz J., Tacikowski J.: Kształtowanie właściwości przeciwzużyciowych matryc kuźniczych. *Problemy Eksploatacji* nr 2, 2001, s. 215–225.
11. Smolik J.: Rola warstwy hybrydowej typu warstwa azotowana/powłoka CrN w procesie zwiększania trwałości matryc kuźniczych, *Inżynieria Materiałowa* nr 6, 2008, s. 891–894.
12. Smolik J., Walkowicz J., Tacikowski J.: Przeciwzużyciowa dwustopniowa obróbka powierzchniowa narzędzi do kucia na gorąco. *Problemy Eksploatacji* nr 4, 2000, s. 87–101.
13. Pytel S., Turek J., Okoński S., Zarębski K.: The properties and microstructure of padding welds built up on the surface of forging dies, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 10(3), 2010, s. 5–10.
14. Bylica A., Sieniawski J.: Tytan i jego stopy, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985.
15. Łukaszek-Sołek A., Krawczyk J., Bała P., Sińczak J., Bednarek S., Lipski A.: Analiza przyczyn występowania wad kuźniczych w wyrobach ze stopu tytanu, *Inżynieria Materiałowa* nr 3, 2012, s. 142–145.
16. Mitchell A.: Melting, casting and forging problems in titanium alloys, *Materials Science and Engineering A243* 1998, s. 257–262.

Summary

The wear mechanisms of titanium alloy forging and tool steel used for die forging are presented. Materials for the investigations were 55NiCrMoV7 tool steel and Ti6Al4V titanium alloy. The die forging process was performed at 940°C on backward hammer BECHE. On the surface of the die and forging, a groove net was observed after the process. Metallographic analysis indicated the presence of oxidation products on the surfaces of the tested materials. A net of micro-cracks and an increase in the α phase volume fraction was observed in the subsurface area of the titanium alloy. Chemical microanalysis from the die surface area and on the cross section revealed the presence of titanium and aluminium in the wear products. Mutual mixing of materials resulted in the formation of low-temperature eutectics on the surfaces. The exothermic effect of titanium alloy plastic deformation and the friction resulted in a temperature increase. The liquid phase caused gridding of materials surfaces. The higher volume fraction of the α phase and presence of cracks in the subsurface area of titanium alloy also probably intensify wear.