

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE**

---

**EXPLO-SHIP 2004**

---

Aleksy Patejuk

**Wpływ stanu warstwy wierzchniej na wybrane właściwości  
elementów maszyn ze stopu tytanu Ti-6Al-3Mo-2Cr**

Słowa kluczowe: stop tytanu Ti-6Al-3Mo-2Cr, azotowanie, mikrostruktura,  
wytrzymałość zmęczeniowa

*Przedstawiono wyniki badań mikrostruktury i wybranych właściwości mechanicznych stopu tytanu Ti-6Al-3Mo-2Cr poddanej procesom azotowania. Zbadano wpływ stanu powierzchni oraz sposobu azotowania na wybrane właściwości mechaniczne badanego stopu. Stwierdzono, że poziom wytrzymałości zmęczeniowej stopu tytanu Ti-6Al-3Mo-2Cr, w bardzo istotnym stopniu jest uzależniony od stanu warstwy wierzchniej próbek poddanych badaniom (elementów maszyn).*

**The Influence of Top Layer State on Selected Properties  
of the Machines Alloy Ti-6Al-3Mo-2Cr Elements**

Key words: titanium alloy Ti-6Al-3Mo-2Cr, plasma, microstructure, fatigue strength

*This research was concerned with the investigation of microstructure and selected mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-3Mo-2Cr after plasma nitriding processes. The influence of surface state and the nitriding method on selected mechanical properties of examined alloy was investigated. It was found that that the level of fatigue strength of titanium alloy Ti-6Al-3Mo-2Cr depends significantly on top layer state of examined samples (machines' elements).*

## Wstęp

Dotychczasowe doświadczenie eksploatacyjne wskazuje, że szersze zastosowanie stopów tytanu w budowie maszyn jest w znacznym stopniu ograniczone małą odpornością na zużycie ścierne i skłonnością do tworzenia tzw. „zadziórów” na współpracujących powierzchniach [1]. Jednak z drugiej strony, stopy tytanu w porównaniu do innych tworzyw metalicznych są materiałem konstrukcyjnym charakteryzującym się wieloma bardzo pożądanymi cechami. Do najważniejszych zalet tych stopów zalicza się:

- wytrzymałość względną ( $R_m/\rho$ ) – największa ze znanych stopów konstrukcyjnych,
- odporność korozyjną – lepsza niż stali kwasoodpornej i stopów Cr-Ni,
- kruchość na zimno – mniejsza niż stopów Al oraz stali austenitycznych.

Z tych też względów, stopy tytanu znalazły zastosowanie przede wszystkim w przemyśle maszynowym. Udział tych materiałów w wielu konstrukcjach inżynierskich jest znaczny, np. w silnikach lotniczych wykorzystywanych do napędu samolotów, których prędkość przekracza 2,5 M, sięga 85% całkowitej masy silnika. W silnikach tych, ze stopów tytanu wykonuje się praktycznie wszystkie główne jego elementy, takie jak: kadłub, tarcze sprzężarek, łopatki robocze i kierujące, pierścienie dystansowe itp.

Do jednego z najczęściej wykorzystywanych w budowie maszyn, żarowytrzymałych stopów tytanu, zalicza się dwufazowy ( $\alpha + \beta$ ) stop tytanu – Ti-6Al-3Mo-2Cr. Ma on również dobrą biokompatybilność w środowisku ludzkich komórek i tkanek. Stąd znajduje zastosowanie między innymi jako element np. zespalania odłamków kostnych. Z tego materiału wykonuje się wszczepy protetyczne i endoprotezy stawów [2, 3]. Jednak ma on i wady. Jedną z nich jest mała twardość oraz niezbyt dobra odporność na zużycie przez tarcie. Dlatego też stosuje się różne techniki obróbek powierzchniowych, które eliminują jego wady. Do metod tych należą: nagniatanie powierzchniowe, mikro-kulowanie oraz obróbki cieplno-chemiczne – w szczególności oparte na metodach PVD i CVD. Perspektywnymi wydają się także techniki wytwarzania warstw powierzchniowych w warunkach wyładowania jarzeniowego. Do tych metod należą szeroko stosowane azotowanie jarzeniowe oraz węglowodorkowanie w warunkach aktywacji elektrycznej środowiska gazowego [4, 5].

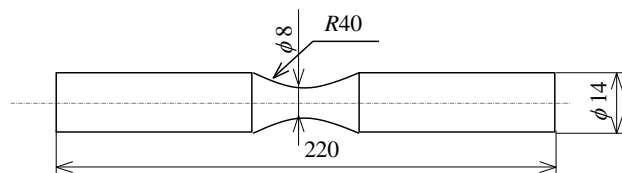
Celem niniejszego artykułu było ustalenie wpływu stanu warstwy wierzchniej oraz temperatury eksploatacji elementów maszyn wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-3Mo-2Cr, na wybrane właściwości mechaniczne – w szczególności wytrzymałość zmęczeniową tego stopu. Powodem zainteresowania się tym problemem stały się doniesienia eksploatacyjne sygnalizujące problem, iż

niektóre elementy konstrukcyjne pracujące w podwyższonej temperaturze ulegają przedwczesnemu uszkodzeniu – pękają [6, 7].

## 1. Materiał do badań i sposób przygotowania próbek

Badania przeprowadzono na dwufazowym stopie tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr. Przed wykonaniem próbek materiał wejściowy w postaci pręta pocięto na elementy o założonej długości. Następnie elementy te poddano obróbce cieplnej, obowiązującej przy realizacji typowych procesów produkcyjnych części maszyn wykonywanych z tego materiału [8 – 10], tj.: wygrzewanie w temperaturze  $1143 \pm 10$  K przez 2 godziny, następnie chłodzenie z piecem do temperatury  $923 \pm 20$  K i wygrzewanie w tej temperaturze przez okres 2 godzin. Wygrzewanie materiału wejściowego, przeznaczonego do wykonania próbek do badań, przeprowadzono w piecu komorowym PEK-4 bez atmosfery ochronnej.

Próbki do badań wytrzymałości doraźnej wykonano zgodnie z normą: PN-91/H-04310 i PN-81/H-64314. W badaniach zastosowano próbki o średnicy 6 mm oraz 30-milimetrowy odcinek pomiarowy. Natomiast próbki do badań wytrzymałości zmęczeniowej miały kształt cylindryczny oraz wymiary zgodnie z rysunkiem 1.



Rys. 1. Próбка do badań zmęczeniowych  
Fig. 1. A sample used for fatigue tests

W pierwszym etapie badań (oznaczonym umownie A) w zakresie stanu warstwy wierzchniej, próbki do badań wytrzymałości doraźnej oraz wytrzymałości zmęczeniowej wykonano w dwóch wariantach stanu warstwy wierzchniej, tj.:

- A-1 – toczenie + szlifowanie (uzyskując  $R_a = 0,4 - 0,7 \mu\text{m}$ ),
- A-2 – toczenie + szlifowanie + mikrokulowanie  
(uzyskując  $R_a = 0,5 - 0,8 \mu\text{m}$ ).

Natomiast w drugim etapie badań (oznaczonym umownie B) w zakresie stanu warstwy wierzchniej ukształtowanej metodą toczenia i szlifowania (uzyskując  $R_a = 0,4 - 0,7 \mu\text{m}$ ), próbki do badań zmęczeniowych wykonano w czterech wariantach obróbki cieplno-chemicznej, tj.:

- B-1 – bez obróbki cieplnej (wykonywano w tych samych warunkach jak A1),
- B-2 – azotowane gazowo (w atmosferze zdysocjowanego amoniaku),
- B-3 – azotowane gazowo (w atmosferze technicznego azotu),
- B-4 – azotowane jarzeniowo.

## 2. Rodzaje badań i sposób ich wykonania

W ramach realizacji zaplanowanego cyklu badań eksperymentalnych wykonano następujące badania:

- geometrii powierzchni WW,
- twardości i mikrotwardości,
- wytrzymałości doraźnej,
- wytrzymałości zmęczeniowej.

Analizę mikrostruktury przeprowadzono na zglądach metalograficznych, wykonanych sposobem tradycyjnym (polerowanie + trawienie), stosując powiększenie rzędu 400 – 500×. Udział poszczególnych składników fazowych w stopie określono na podstawie komputerowej metody analizy obrazu Video-met.

Pomiary mikrotwardości wykonywano na mikrotwardościomierzu firmy Leitz, przy obciążeniu 0,19 N. Natomiast pomiary twardości przeprowadzono metodą Brinella, stosując kulkę  $\phi$  10 i obciążenie 29,4 kN. Wyniki pomiarów opracowano statystycznie, opierając się na liczebności próby minimum 10 pomiarów.

Próby zmęczeniowe wykonano na maszynie zmęczeniowej MUI-6000, przy częstotliwości obrotów 100 Hz. Badania realizowano w warunkach zginania obrotowego (zgodnie ze schematem zginania dwustronnego).

Do nagrzewania próbek wykorzystano rurowy piec oporowy. Pomiar temperatury realizowano z wykorzystaniem termoelementu NiCr-Ni umieszczonego tak, żeby spoina termoelementu znajdowała się podczas badań w bezpośrednim sąsiedztwie badanej próbki.

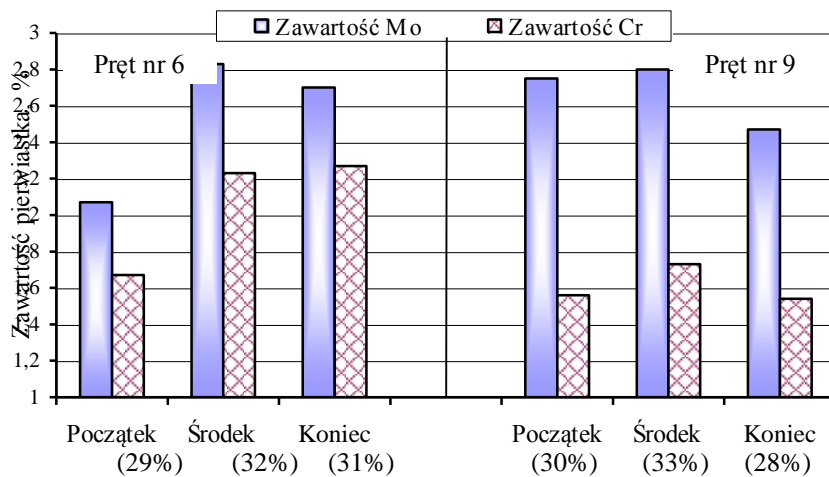
## 3. Analiza wyników badań

Eksplatacyjne przypadki utraty właściwości mechanicznych elementów konstrukcji inżynierskich wykonanych ze stopu Ti-6Al-2Mo-2Cr, wykazywały iż występuje zauważalna korelacja mikrostruktury z właściwościami mechanicznymi badanego stopu [11]. Przeprowadzone badania na próbkach wyciętych z dziesięciu prętów wybranych losowo z dostawy prętów stopu Ti-6Al-2Mo-2Cr, potwierdziły, że w obrębie prętów z tego samego wytopu występują różnice

zarówno w składzie chemicznym (rys. 2), jak również proporcji składników fazowych w stopie (ilości fazy  $\alpha$  i  $\beta$ ). Jednak mieszczą się one w obrębie składu chemicznego obowiązującego dla tego gatunku materiału [8]. Należy zaznaczyć, że zróżnicowane zawartości, np. Mo i Cr w badanych prętach, powodują oprócz zauważalnej zmiany proporcji składników fazowych mikrostruktury, również pojawienie się zróżnicowanej twardości (rys. 3). Przykładowo, w przypadku badanego pręta oznaczonego umownie nr 9, twardość na jego początku jest około 10% wyższa w porównaniu z twardością zarejestrowaną w końcowej części tego pręta (rys. 3).

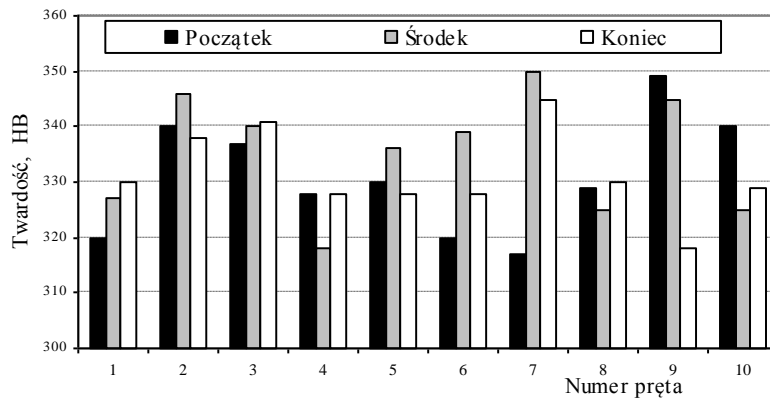
W związku z powyższym w drugiej części badań eksperymentalnych postanowiono wykorzystać tylko te pręty, które miały stosunkowo niewielkie rozrzuty składu chemicznego i przeanalizować wpływ innych czynników (poza składem chemicznym), wpływających na właściwości mechaniczne tego materiału. Pręty, z których wykonano próbki do dalszych badań, były oznaczone numerami 5 i 8 (rys. 3).

Przeprowadzone badania wykazały, że umocnienie WW próbek przez mikrokulowanie, nie przyniosło zauważalnych zmian rejestrowanych poziomów wytrzymałości na rozciąganie, w stosunku do próbek tylko szlifowanych. W obydwu przypadkach uzyskiwano porównywalne wartości takich parametrów, zawierające się w następujących przedziałach:  $R_m = 1350 - 1420$  MPa,  $R_{02} = 1100 - 1160$  MPa,  $Z = 34 - 40\%$ ,  $A_5 = 18 - 26\%$ .



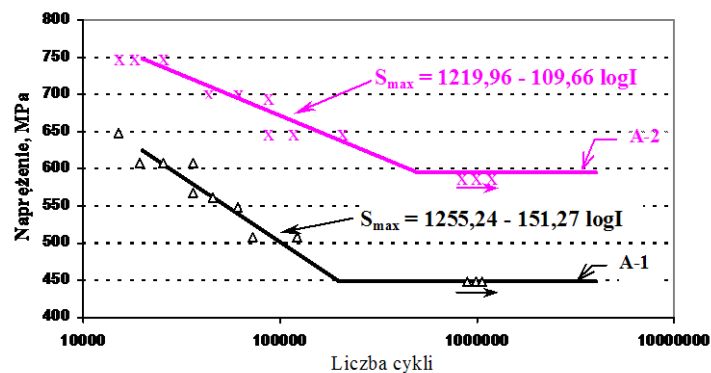
Rys. 2. Rozkład zawartości Mo i Cr w zależności od miejsca analizy składu chemicznego w pręcie – w nawiasach podano udział fazy  $\beta$  w poszczególnych strefach pręta

Fig. 2. Decomposition of Mo and Cr contents in relation to the location of chemical composition analysis in the test bar –  $\beta$  phase share in particular areas of the bar are given in brackets



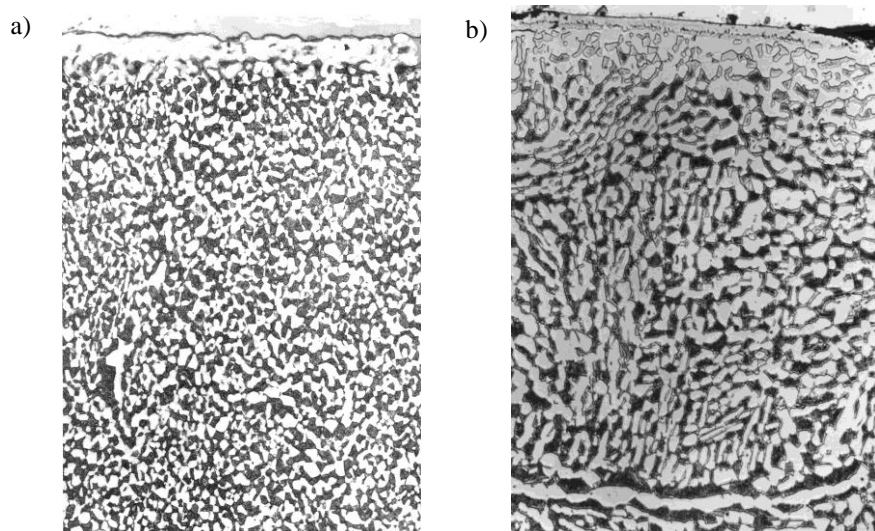
Rys. 3. Histogram średniej twardości prętów stopu tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr  
 Fig. 3. The histogram of the average strength of titanium alloy Ti-6Al-2Cr bar

Natomiast odmiennie zachowywały się próbki wykonane z materiału Ti-6Al-3Mo-2Cr, z umocnioną warstwą wierzchnią w badaniach zmęczeniowych. W tym przypadku próbki (z umocnioną warstwą wierzchnią) posiadały wyraźnie zwiększoną trwałość oraz wytrzymałość zmęczeniową w stosunku do próbek tylko po szlifowaniu. Pomimo, iż po operacji mikrokułowania nie nastąpiła wyraźna poprawa chropowatości powierzchni (potwierdzona pomiarami struktury stereometrycznej powierzchni), to jednak wprowadzenie naprężenia ściskającego w warstwie wierzchniej (objawiające się między innymi wzrostem mikrotrwałości), zauważalnie wpłynęło na poziom właściwości zmęczeniowych stopu Ti-6Al-3Mo-2Cr (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ stanu WW na wytrzymałość zmęczeniową stopu Ti-6Al-2Mo-2Cr (oznaczenie próbek jak na wstępie)  
 Fig. 4. The influence of WW state on fatigue strength of alloy Ti-6Al-2Mo-2Cr (the sample notation is that given at the beginning)

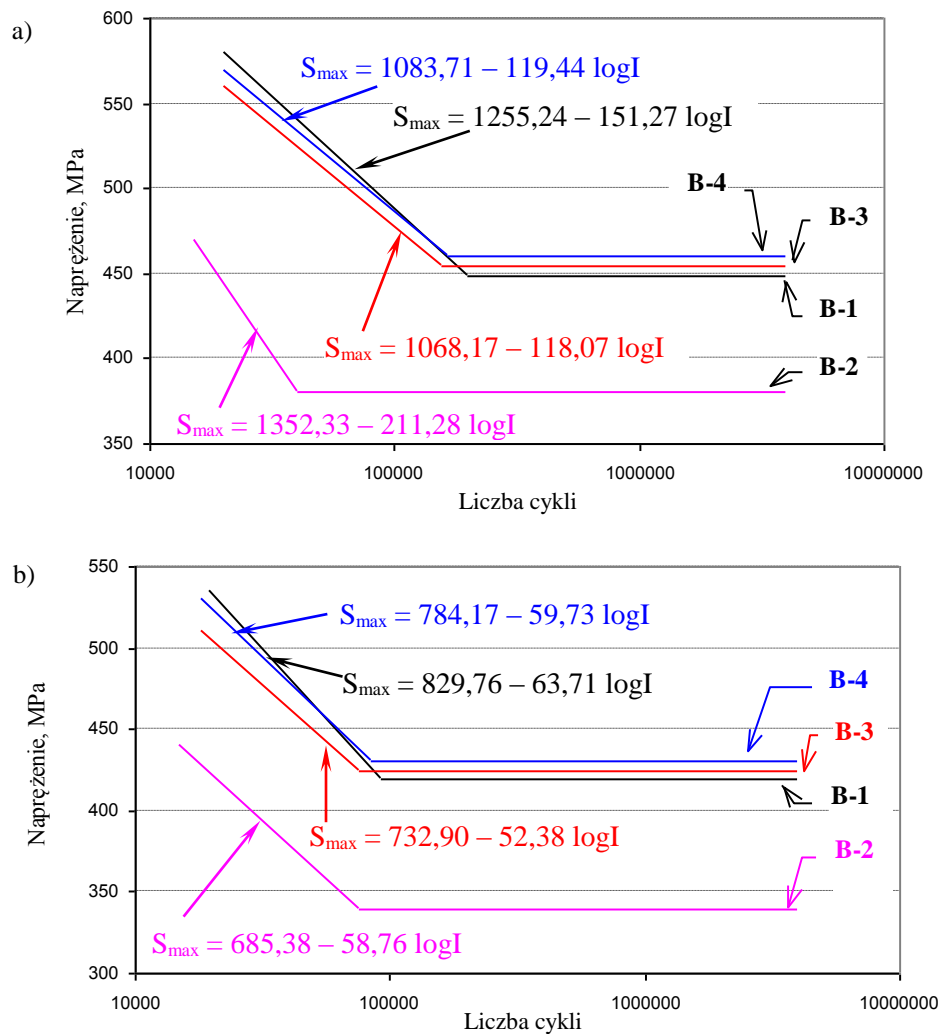
W kolejnym etapie badań przeanalizowano wpływ procesu azotowania na właściwości zmęczeniowe. Proces azotowania realizowano niezależnie od wariantu technologicznego w tej samej temperaturze – wynoszącej 870°C (ustalonej na podstawie uprzednio wykonanych wstępnych prób [12]). Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe potwierdziły, że najbardziej prawidłową budową warstwy naazotowanej charakteryzowały się próbki azotowane gazowo w atmosferze technicznego azotu oraz jarzeniowo (rys. 5). Natomiast mikrostruktura warstwy naazotowanej metodą gazową w atmosferze zdysocjowanego amoniaku wykazywała cechy budowy nieprawidłowej, objawiające pojawieniem się mikropęknięć i rozwarstwień w obrębie naazotowanej strefy (szczególnie intensywnie tuż przy powierzchni).



Rys. 5. Mikrostruktura warstwy naazotowanej w stopie Ti-6Al-2Mo-2Cr wytworzona metodą azotowania: a) gazowego (w atmosferze technicznego azotu), b) jarzeniowego, pow. 500×  
Fig. 5. Microstructure of the nitrided layer in Ti-6Al-2Mo-2Cr alloy obtained by nitridation method: a) gaseous (in technical nitrogen atmosphere), b) plasma, magnification 500×

Przeprowadzone badania wytrzymałości zmęczeniowej wykazały, że bardzo istotny wpływ na poziom wytrzymałości zmęczeniowej wywierają warunki realizacji procesu obróbki cieplnej – azotowania (rys. 6). Należy przy tym zaznaczyć, że realizacja procesu azotowania w atmosferze zdysocjowanego amoniaku, niezależnie od temperatury wykonanych badań wytrzymałości zmęczeniowej, wywiera niekorzystny wpływ na poziom tej wytrzymałości zmęczeniowej. Natomiast zarówno proces azotowania gazowego w atmosferze azotu technicznego, jak również azotowanie jarzeniowe nieznacznie jednak pogarsza właści-

wości zmęczeniowe w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Przy czym w zakresie trwałości zmęczeniowej uzyskane wyniki układają się na podobnym poziomie, przy jednoczesnej tendencji jej poprawy (zwiększenia poziomu trwałości zmęczeniowej).



Rys. 6. Wytrzymałość zmęczeniowa stopu Ti-6Al-3Mo-2Cr-1 z naazotowaną warstwą wierzchnią badana w temperaturze: a) pokojowej (290 K), b) 550 K (symbolami I, II, III i IV oznaczono warianty próbek zgodnie z przyjętym na wstępie systemem oznaczeń)

Fig. 6. The fatigue strength of Ti-6Al-3Mo-2Cr alloy with nitrified top layer tested in the temperature of: a – 290 K, b – 550 K (variant samples were marked with I, II, III and IV symbols according to the denotation system established at the beginning)



## **Wnioski**

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Poddany badaniom przemysłowy dwufazowy stop tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr miał zauważalne różnice w składzie chemicznym (w obrębie tego samego wytopu).
2. Różnice w składzie chemicznym wywierają zauważalne zmiany składu fazowego stopu oraz poziomu twardości badanych prętów stopu tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr.
3. Stan warstwy wierzchniej ukonstruowanej metodą mikrokulowania wydanie poprawia właściwości zmęczeniowe badanego stopu.
4. Zastosowanie azotowania gazowego w atmosferze zdysocjowanego amoniaku znacząco obniża właściwości zmęczeniowe badanego stopu tytanu.
5. Zastosowanie azotowania gazowego w atmosferze azotu technicznego i azotowania jarzeniowego, podwyższa trwałość zmęczeniową badanego stopu, przy nieznacznym obniżeniu wytrzymałości w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.
6. Uzyskane wyniki badań właściwości mechanicznych i wytrzymałości zmęczeniowej próbek z prętów pochodzących z tzw. „wytopów produkcyjnych”, pozwalają na prognozowanie właściwości użytkowych elementów z stopu tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr.

## **Literatura**

1. Ciszewski A., Romanowski T., *Obróbka oraz łączenie tytanu i jego stopów*, WNT, Warszawa 1968.
2. Patejuk A., Sobiecki J., Mańkowski P., *Wpływ procesu azotowania i węgloazotowania jarzeniowego na właściwości elementów maszyn wykonanych ze stopu tytanu*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie, nr 68, 2003, s. 351 – 358.
3. Grossman F., *Zastosowanie tytanu i jego stopów w medycynie*, Materiały I Konferencji Biomateriałów w Stomatologii, Ustroń 1995, s. 40.
4. Muraleedharan T. M., Meletis E I., *Surface modification of pure titanium and Ti-6Al-4V by intensified plasma ion nitriding*, Thin Solid Films 221, 1992, s. 104.
5. Patejuk A., Sobiecki J. R., Mańkowski P., *Azotowanie i węgloazotowanie jarzeniowe dwufazowego stopu tytanu*, I Sympozjum Naukowe „Podwyższenie trwałości elementów silnika spalinowego”, Warszawa 2003, s. 59 – 64.

6. *Badania łopatki I stopnia nr 15.11.0871/K, Sprawozdanie CLM nr 255/93, WSK PZL-Rzeszów.*
7. *Badania łopatek i aparatów kierujących pękniętych w czasie próby, Sprawozdanie Pracowni Badań i Ekspertyz nr 68/93, WSK PZL-Rzeszów.*
8. OST-1 90173-75, *Warunki techniczne. Pręty walcowane ze stopów tytanowych, wymagania techniczne.*
9. OST-1 90009-86, *Warunki techniczne. Półfabrykaty ze stopów tytanu do wyrobu łopatek, 1986.*
10. *Specjalne warunki techniczne odbioru odkuwek matrycowych łopatek wirnika sprężarki i części z nich wykonanych ze stopu WT3-1, Rzeszów 1993.*
11. *Badania metalograficzne łopatki I stopnia sprężarki ze stopu WT3-1, Sprawozdanie Pracowni Badań i Ekspertyz, nr 80/93, WSK PZL-Rzeszów.*
12. Bogdanowicz Z., Patejuk A., *Modyfikacja stopu tytanu metodą azotowania w aspekcie zastosowań w nowoczesnych silnikach spalinowych, VI Sympozjum Naukowo-Techniczne, Jurata 2003, s. 67 – 74.*

*Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.*

#### **Recenzenci**

prof. dr hab. inż. Jerzy Honczarenko  
dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM

#### **Adres Autora**

dr inż. Aleksy Patejuk  
Politechnika Białostocka  
Wydział Mechaniczny  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok