

Dr inż. Wojciech WIĘCKOWSKI, prof. dr hab. inż. Janina ADAMUS  
Politechnika Częstochowska, Częstochowa  
Kontakt: wieckowski@iop.pcz.pl

# Badania tarciovo-zużyciowe tytanu i stopów aluminium

## *Friction and wear testing of titanium and aluminium alloys*

### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodykę badań tarciovo-zużyciowych materiałów przeznaczonych do zastosowań w przemyśle lotniczym. Badaniu poddano próbki wykonane z tytanu technicznego Grade 2 i Grade 4, stopu tytanu Grade 5 oraz stopów aluminium 6061T4, 2017A i 2024. Pomiary siły tarcia oraz zużycia elementów pary trącej typu rolka-klocek przeprowadzono na testerze tribologicznym T-05. Badania prowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego, dla skoncentrowanego styku ślizgowego obciążonego siłą 150 N. Droga tarcia dla każdego testu wynosiła 330 m. Podczas badań doświadczalnych próbki współpracowały z przeciwpóbką stalową o twardości 63 HRC. Porównywano średnie wartości współczynników tarcia badanych skojarzeń materiałowych. Zaprezentowano przebiegi sumarycznego zużycia liniowego współpracujących elementów pary trącej rolka-klocek w funkcji drogi tarcia. W trakcie badań wyznaczono również ubytek masy współpracujących elementów par trących „titan-stal” i „aluminium-stal” oraz przyrost temperatury w węźle tarcia.

### Abstract

*This study presents a methodology of friction and wear testing of materials for applications in the aviation industry. Tests were carried out for specimens made of technically pure titanium Grade 2 and Grade 4, titanium alloy Grade 5 and aluminium alloys: 6061T4, 2017A and 2024. Measurement of friction and wear of the parts in the block-on-ring frictional pair were carried out on a tribological tester T-05. The study was carried out under conditions of technically dry friction for the concentrated sliding contact loaded with 150 N. Friction distance for each test was 330 m. The specimens used in the experiments were coupled with a steel counter-specimen with hardness of 63 HRC. The average values of friction coefficients for the analysed material pairs were compared. The profiles for total linear wear of both parts of the block-on-ring frictional pair were also presented. The mass loss for the parts of the “titanium-steel” and “aluminium-steel” frictional pairs and temperature increments in the frictional pair were also determined.*

**Słowa kluczowe:** tarcie, zużycie, badania tribologiczne, stopy aluminium, stopy tytanu, tester T05

**Keywords:** friction, wear, tribological investigations, aluminium alloys, titanium alloys, T05 tester

## 1. WPROWADZENIE

Dobre właściwości mechaniczne stopów tytanu i aluminium przy ich niskiej gęstości oraz wysoka odporność na korozję czyni je atrakcyjnymi materiałami dla zastosowania w wielu gałęziach przemysłu: w medycynie, lotnictwie i kosmonautyce, przemyśle samochodowym oraz wojskowym. Jednakże ich właściwości tribologiczne, tj. wysoki współ-

## 1. INTRODUCTION

*Suitable mechanical properties of aluminium and titanium alloys, including low density and high resistance to corrosion make them attractive materials for application in many industry sectors such as: medicine, aerospace, automotive and military industry. However, poor tribological properties i.e. high coefficient of friction, tendency to galling during*

czynnik tarcia, tendencja do zacierania (podczas procesów technologicznych i późniejszej eksploatacji) znacznie ograniczają ich stosowanie w układach, gdzie występują duże obciążenia kontaktowe oraz gdzie występuje tarcie ślizgowe pomiędzy współpracującymi powierzchniami [1÷4].

Właściwości tribologiczne tytanu i jego stopów oraz stopów aluminium znacząco wpływają na przebieg procesów wytwarzania, szczególnie procesów obróbki plastycznej i są często czynnikiem ograniczającym ich stosowanie. Istotnym problemem występującym podczas kształtowania wspomnianych materiałów jest zacieranie oraz tworzenie nalepień na powierzchni narzędzi co znacząco wpływa na jakość wytwarzanych wyrobów, jak też na obniżenie trwałości narzędzi [4÷7].

Zastosowanie tytanu i jego stopów w miejscach, gdzie wymagana jest odporność na zużycie wymaga lepszego zrozumienia mechanizmów związanych z tarcie i zużywaniem, dokładnego zbadania, a przez to poprawy ich właściwości tribologicznych przy zachowaniu pozostałych [8÷12]. W literaturze wskazuje się dwa główne czynniki odpowiedzialne za niskie właściwości tribologiczne stopów tytanu [13]: małą odporność na plastyczne ścinanie oraz małą ochronę wywieraną przez tlenki na powierzchni, które mogą powstawać w wyniku wysokiej temperatury wywołanej przez tarcie.

W przypadku gdy wymagana jest odporność na zużycie, stopy tytanu mogą być stosowane, jako materiał konstrukcyjny, dopiero po odpowiedniej obróbce powierzchniowej, mającej na celu zwiększenie odporności na ścieranie [14÷17]. Natomiast niekorzystne zjawiska towarzyszące kształtowaniu stopów tytanu oraz stopów aluminium można ograniczyć poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych smarów technologicznych oraz odpowiedniej obróbki powierzchniowej narzędzi [4÷7].

## 2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Prowadzone badania doświadczalne obejmowały badania tarciovo-zużyciowe materiałów stosowanych na elementy konstrukcyjne w przemyśle lotniczym.

*technological processes and during subsequent use are a limiting factor in their application for the systems with high contact load and where sliding friction occurs between the involved surfaces [1÷4].*

*Tribological properties of titanium and its alloys and aluminium alloys significantly affect manufacturing processes, particularly the processes of metal working and often limit their application. An essential problem that occurs during machining of the materials is galling and creation of aluminium or titanium protrusions on the tool surface, which considerably affects the quality of the obtained products and reduces tool life [4÷7].*

*The use of titanium and its alloys for the parts which necessitate higher resistance to wear requires better understanding of the mechanisms connected with friction and wear, thorough examination and consequently improvement in tribological properties while maintaining other parameters [8÷12]. The literature emphasizes the two major factors responsible for poor tribological properties of titanium alloys [13]: low resistance to plastic shear and low level of protection caused by the oxides on the surface which can be created as a result of high temperature caused by friction.*

*If resistance to wear is required, titanium alloys can be used as a construction material only after suitable surfacing that improves resistance to wear [14÷17]. The unfavourable effects which accompany processing of titanium and aluminium alloys can be limited by application of properly selected technological lubricants and proper surfacing of tools [4÷7].*

## 2. GOAL AND SCOPE OF THE STUDY

*The experiments were focused on friction and wear testing of the materials used for structural parts in the aviation industry.*

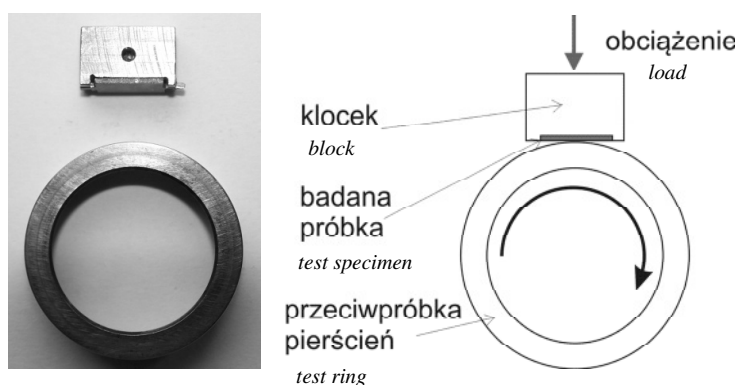
Do badań użyto następujących materiałów tytanowych: czysty tytan techniczny Grade 2 i Grade 4 oraz stop tytanu Grade 5 i stopów aluminium: 6061T4, 2017A, 2024.

Zakres badań obejmował pomiary oraz rejestrację:

- siły tarcia,
- temperatury w węźle tarcia,
- sumarycznego zużycia liniowego elementów pary tarczej dla rozpatrywanych skojarzeń materiałowych.

Badania tarciovo-zużyciowe przeprowadzono na testerze tribologicznym T05 ze skojarzeniem tarciowym typu: „rolka – klocek”, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.

Badania prowadzono wykorzystując próbki z płaską powierzchnią, ze skoncentrowanym stykiem liniowym, współpracujące z przeciwpróbką, wykonaną ze stali o twardości HRC 63. Próbkę do badań wycięte zostały z blach o grubości 0,8 mm. W związku z tym mocowanie i ustalenie położenia badanych próbek w węźle tarcia wymagało zmodyfikowania geometrii klocka.



Rys. 1. Schemat badanego węzła tarcia typu rolka-klocek - tester T05

Fig. 1. Block-on-ring frictional pair used in the tests (T05 tester)

Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2. Wielkość oporów tarcia oraz intensywność zużycia w różnym stopniu jest uzależniona od rodzaju współpracujących materiałów, wielkości nacisku, stanu współpracujących powierzchni, prędkości poślizgu oraz temperatury styku, przy czym wpływ poszczególnych czynników na współczynnik tarcia jest bardzo złożony. Zatem, zastosowane metody pomiarów i parametry badań, powinny w jak największym stopniu odwzorowywać rzeczywiste warunki pracy w celu uzyskania adekwatnych wyników badań.

The following titanium materials: technically pure titanium Grade 2 and Grade 4, titanium alloy Grade 5, and aluminium alloys: 6061T4, 2017A, 2024 were used in the study.

The tests included measurements and recording of:

- friction force,
- temperature in the frictional pair,
- total linear wear for the parts of the considered frictional pairs.

Friction and wear tests were carried out on T05 tribological tester with the frictional pair: “block-on-ring”, schematically shown in the figure 1.

The specimens with flat surface and concentrated linear contact were used for the testing. They were matched with counter-specimens made of steel with hardness of HRC 63. The specimens were cut out of the metal sheets with thickness of 0.8 mm. Positioning and fixing the specimens required a modification to the original block geometry.

A view of the test stand is presented in figure 2. The magnitude of frictional resistance and wear degree largely depend on the kind of co-acting materials, loading force, the status of the contact surfaces, sliding speed and contact temperature, whereas the effect of the individual factors on friction coefficient is very complex. Therefore, in order to achieve the reliable tests results, the measurement methods and the test parameters should take into consideration the actual processes conditions.

System sterowania Testera T-05 pozwala na regulację parametrów pracy takich jak: liczba obrotów (cykli) lub czas trwania próby, prędkość obrotowa wrzeciona oraz temperatura pracy węzła tarcia.

Badania tarciovo-zużyciowe na testerze T05 przeprowadzono przy następujących parametrach:

- rodzaj styku: skoncentrowany liniowy,
- szerokość rolki: 6,35 mm,
- średnica rolki: 35 mm,
- rodzaj ruchu: ślizgowy, obrotowy,
- prędkość poślizgu: 0,183 m/s,
- obciążenie styku: 150 N,
- sposób smarowania: bez smarowania.

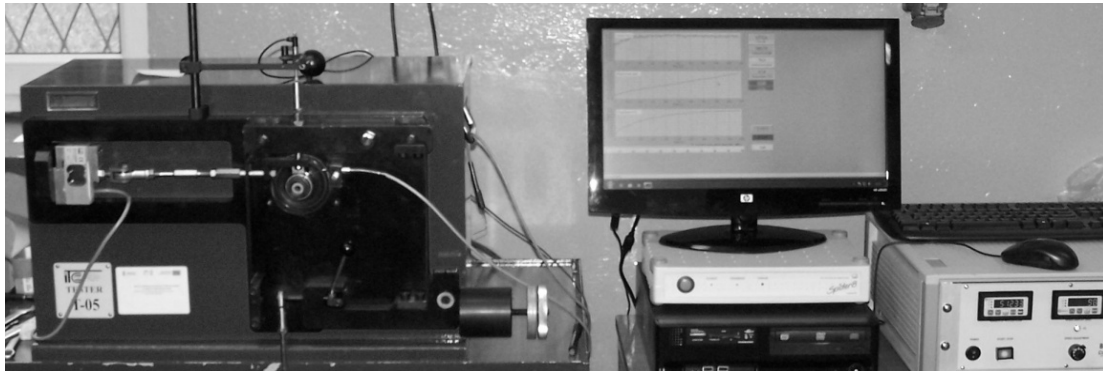
Czas trwania próby wynosił 1800 s, co odpowiadało drodze tarcia 330 m. Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia.

*The control system in T-05 tester allows for adjustment of operating parameters, including the number of rotations (cycles) or duration of the test, spindle speed and the temperature in the frictional pair.*

*Friction and wear tests on T05 tester were carried out with the following parameters:*

- *contact type: concentrated linear contact,*
- *ring width: 6.35 mm,*
- *ring diameter: 35 mm*
- *type of movement: sliding, rotating*
- *sliding speed: 0.183 m/s*
- *contact load: 150 N*
- *lubrication: none.*

*The test lasts 1800 s, what corresponds the frictional distance of 330 m. The tests were carried out at ambient temperature.*



Rys. 2. Stanowisko do badań tarciovo-zużyciowych - tester T05

Fig. 2. Test stand for friction and wear testing (T05 tester)

### 3. WYNIKI BADAŃ TARCIOWO-ZUŻYCIOWYCH

System pomiarowy testera pozwala na pomiar i rejestrację oporów ruchu w węźle tarcia (siły tarcia), sumarycznego zużycia liniowego elementów węzła tarcia (próbki i przeciwpróbki), zmiany temperatury próbki, ewentualnie temperatury środka smarnego w funkcji liczby obrotów lub czasu trwania testu. Wyniki testów są archiwizowane w postaci raportów.

W ramach badań doświadczalnych wyznaczono charakterystyki tarciovo-zużyciowe badanych skojarzeń materiałowych tj. współczynnik tarcia, zmianę temperatury próbki oraz zużycie liniowe elementów pary trącej w funkcji drogi tarcia. Ponadto określono ubytek masy badanych próbek i współpracujących z nimi przeciwpróbek.

### 3. RESULTS OF FRICTION AND WEAR TESTS

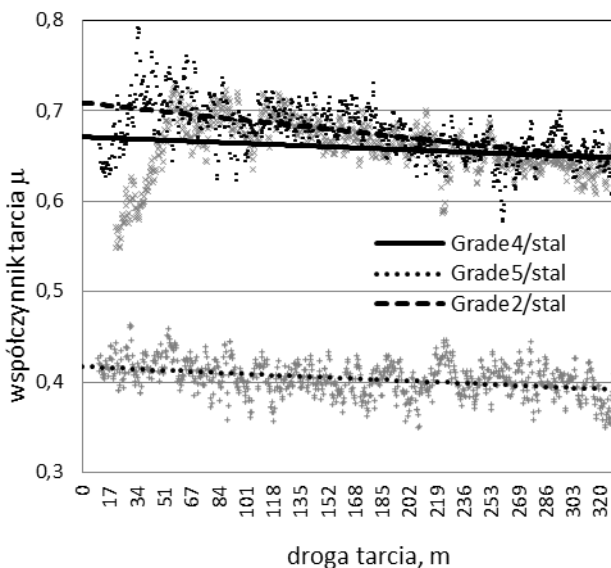
*The measuring system of the tester allows for measurement and recording the frictional resistance in the frictional pair (frictional force), total linear wear in both parts of the frictional pair (specimen and counter-specimen), changes in the lubricant temperature vs. rotational speed or duration of the test. The test results are stored in the form of reports.*

*The experiments were used to determine friction and wear profiles for the analysed material pairs i.e. friction coefficient, changes in the temperature of the specimen and linear wear of the parts of the frictional pair as a function of the frictional distance. Furthermore, mass loss of the specimens and the related counter-specimens was also determined.*

Przykładowe przebiegi zmian współczynnika tarcia wyznaczone w trakcie eksperymentów dla próbek tytanowych współpracujących z pierścieniem stalowym przedstawiono na rysunku 3. Średnie wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia wyznaczono na podstawie wyników pomiaru siły tarcia i siły nacisku, zgodnie z prawem Amontonsa- Coulomba.

Z przedstawionych wyników wyraźnie widać, iż spośród badanych próbek tytanowych współpracujących z pierścieniem stalowym najmniejsza wartość współczynnika tarcia występuje w przypadku próbek z tytanu Grade 5. Jego średnia wartość wynosi 0,4. Znacząco wyższe wartości współczynnika tarcia zanotowano dla próbek wykonanych z tytanu Grade 2 i Grade 4. Średnia wartość współczynnika tarcia w obu przypadkach wyniosła 0,65.

Przykładowe przebiegi zmian współczynnika tarcia wyznaczone w analogicznych warunkach, dla próbek ze stopów aluminium współpracujących z pierścieniem stalowym, przedstawiono na rysunku 4.



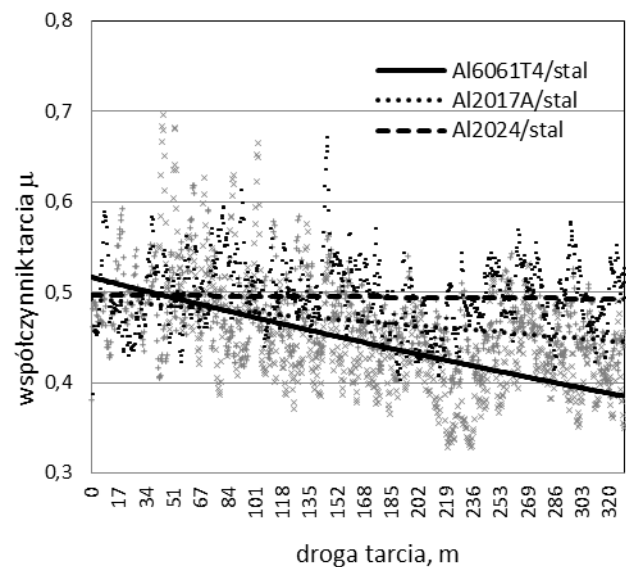
Rys. 3. Zmiany współczynnika tarcia  $\mu$  przy współpracy próbek tytanowych z pierścieniem stalowym (parametry badań: nacisk - 150 N, prędkość poślizgu - 0,183 m/s, bez smarowania)

Fig. 3. Changes of the friction coefficient  $\mu$  for titanium specimens collaborating with the steel ring (loading force: 150 N, sliding velocity: 0.183 m/s, no lubrication)

The example profile of changes in friction coefficient determined during the experiments for titanium specimens and steel rings is presented in Figure 3. Average values of friction coefficient vs. frictional distance were determined on the basis of measurements of frictional and loading forces according to the Amontons-Coulomb law.

The lowest friction coefficient for the titanium specimens collaborating with the steel ring was found for the specimens made of titanium Grade 5. Its average value was 0.4. Considerably higher values of the friction coefficient were observed for the specimens made of titanium Grade 2 and Grade 4. The average value of friction coefficient in both cases was 0.65.

The exemplary changes of the friction coefficient determined in analogous conditions for the specimens made of aluminium alloys and steel rings are presented in Figure 4.



Rys. 4. Przebieg zmian współczynnika tarcia  $\mu$  przy współpracy badanych próbek aluminium z pierścieniem stalowym (parametry badań: nacisk - 150 N, prędkość poślizgu - 0,183 m/s, bez smarowania)

Fig. 4. Changes of the friction coefficient  $\mu$  for aluminium specimens collaborating with the steel ring (pressure force: 150 N, sliding velocity: 0.183 m/s, no lubrication)

Z zaprezentowanych wyników badań wiadać, iż dla wszystkich skojarzeń materiałowych, średnie wartości współczynników tarcia, zmierzone na drodze tarcia równej 330 m, są do siebie zbliżone i oscylują wokół wartości 0,45.

Podczas trwania każdego testu dokonywano ciągłego pomiaru zużycia mierząc sumaryczne zużycie liniowe badanych próbek oraz współpracujących z nimi przeciwpróbek. Widoczne ślady zużycia powierzchni badanych próbek, w wyniku przeprowadzonych testów w warunkach tarcia technicznie suchego na drodze tarcia równej 330 m, przedstawiono na rysunku 5.

Wyniki pomiarów zużycia liniowego, będącego sumą zużycia wybranych próbek i współpracujących z nimi stalowych przeciwpróbek, w funkcji drogi tarcia przedstawiono na rysunkach 6 i 7, odpowiednio dla próbek tytanowych i aluminiowych.

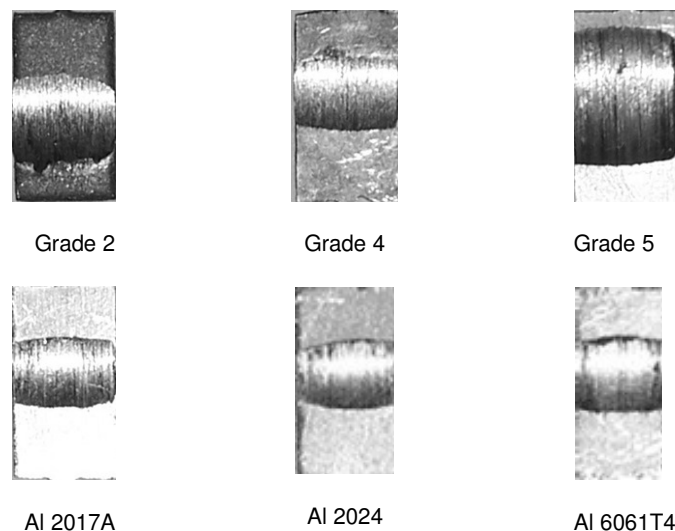
Wartość sumarycznego zużycia liniowego próbek z tytanu Grade 5 i przeciwpróbek stalowych po drodze tarcia 330 m wynosi 280  $\mu\text{m}$  i jest znacząco wyższa w porównaniu do próbek wykonanych Grade 2 i Grade 4. Mniejsze zużycie na poziomie 90  $\mu\text{m}$  odnotowano dla pary trącej: Grade 4-stal.

*The average value of the friction coefficient for all analysed materials for the frictional distance of 330 m are similar and amount to ca. 0.45.*

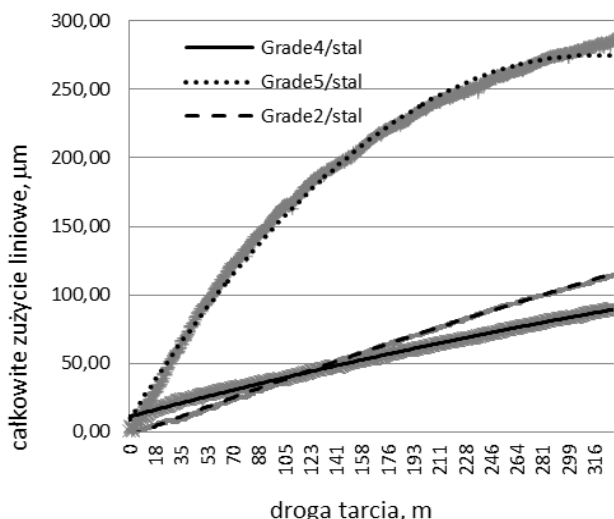
*Total linear wear of the specimen and the related counter-specimen was continuously measured during each test. Noticeable traces of wear on the specimen surface, which arise in dry conditions after the frictional distance of 330 m, are presented in figure 5.*

*The test results of linear wear being the total wear of the selected specimens and the related steel counter-specimens vs. friction distance are presented in figures 6 and 7 for titanium and aluminium specimens, respectively.*

*Total linear wear of Grade 5 titanium specimens and steel counter-specimens for the frictional distance of 330 m amounts to 280  $\mu\text{m}$  and is considerably higher compared to Grade 2 and Grade 4 specimens. The lower wear at the level of 90  $\mu\text{m}$  was found for the frictional pair: Grade 4 - steel.*

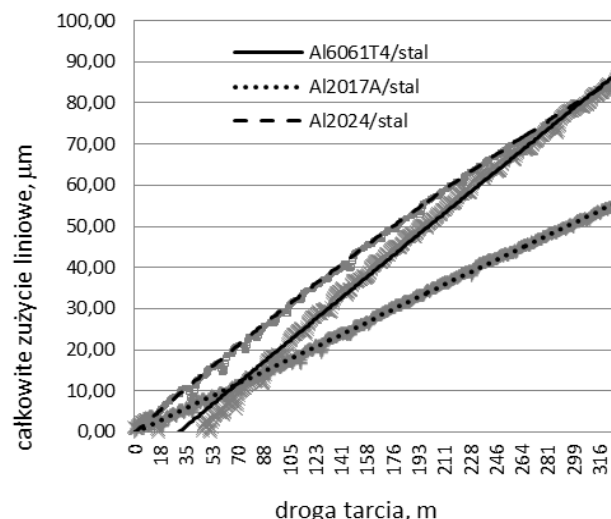


Rys. 5. Powierzchnie tytanowych i aluminiowych próbek po badaniach tarcio-zużyciowych  
 Fig. 5. The surfaces of titanium and aluminium specimens after friction and wear tests



Rys. 6. Sumaryczne zużycie liniowe badanych próbek tytanowych i pierścienia stalowego (nacisk - 150 N, prędkość poślizgu - 0,183 m/s, bez smarowania)

Fig. 6. Total linear wear of the titanium specimens and steel rings (pressure force: 150 N, sliding velocity: 0.183 m/s, no lubrication)



Rys. 7. Sumaryczne zużycie liniowe badanych próbek aluminium i pierścienia stalowego (nacisk - 150 N, prędkość poślizgu - 0,183 m/s, bez smarowania)

Fig. 7. Total linear wear of the aluminium specimens and steel ring (pressure force: 150 N, sliding velocity: 0.183 m/s, no lubrication)

Wartość sumarycznego zużycia liniowego próbki wykonanej ze stopu aluminium 2017A i przeciwpróbki stalowej po drodze tarcia 330 m wynosi 54  $\mu\text{m}$ . Dla próbek wykonanych ze stopów 2024 i 6061T4 odnotowano zużycie na poziomie 85  $\mu\text{m}$ .

Wyniki pomiarów ubytku masy badanych próbek tytanowych i aluminium oraz współpracujących z nimi przeciwpróbek stalowych przedstawiono odpowiednio na rysunkach 8 i 9. Na podstawie zaprezentowanych wyników, jak też oględzin zużytych próbek, można stwierdzić, iż praktycznie całe zużycie przypada na badaną próbkę.

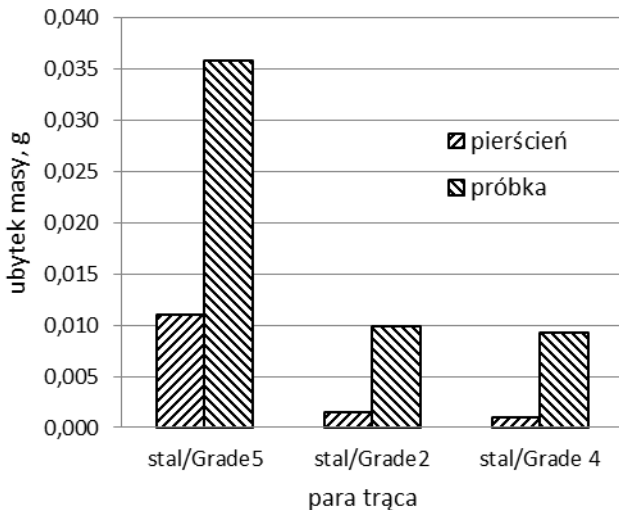
Z przedstawionych na rysunku 8 wyników pomiaru ubytku masy elementów trących wynika, iż największemu zużyciu uległa próbka tytanowa Grade 5. W tym przypadku ubytek masy próbki wynosił 0.036 g i ponad trzykrotnie przewyższał zużycie pozostałych próbek tytanowych.

Zużyciu próbki towarzyszyło zużycie przeciwpróbki, którego największa wartość rzędu 0,01 g wystąpiła przy współpracy z próbką tytanową Grade 5. Zużycie przeciwpróbek współpracujących z próbkami tytanowymi Grade 2 i Grade 4 było pomijalnie małe.

Total linear wear of 2017A aluminium specimen and the steel counter-specimen for the frictional distance of 330 m amounts to 54  $\mu\text{m}$ . Wear in the specimens made of alloys 2024 and 6061T4 was at the level of 85  $\mu\text{m}$ .

The results of mass loss measurement of the titanium and aluminium specimens and the corresponding steel counter-specimens are presented in figures 8 and 9, respectively. It was observed based on the obtained results and visual inspection of the worn specimens, that almost all wear occurred in the tested specimens.

The results of measurements of mass loss in the friction parts presented in fig. 8 show that the highest wear is observed in the titanium specimen Grade 5. In this case, mass loss reached 0.036 g and was over three times higher than other titanium specimens. Specimen wear was accompanied by the wear on the counter-specimens, with its higher value reaching 0.01 g (titanium Grade 5 specimen). Wear of counter-specimens collaborating with the specimens made of titanium Grade 2 and Grade 4 was negligibly small.



Rys. 8. Ubytek masy badanych próbek tytanowych i współpracujących z nimi przeciwpróbek stalowych

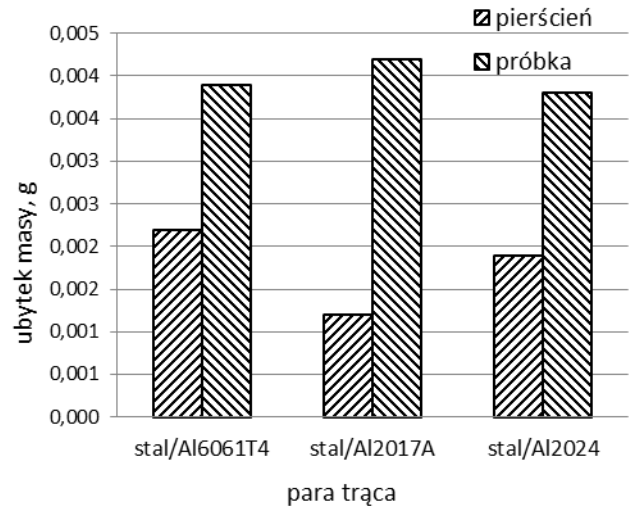
*Fig. 8. Mass loss in the titanium specimens and their steel counter-specimens*

Zaprezentowane na rysunku 9 wyniki pomiaru ubytku masy próbek aluminiowych i współpracujących z nimi stalowych przeciwpróbek odzwierciedlają zaprezentowane uprzednio wyniki zużycia liniowego. Zaobserwować można niewielkie różnice w ubytku masy zarówno próbek aluminiowych, jak i stalowych przeciwpróbek.

W trakcie prowadzonych testów rejestrowano również zmiany temperatury próbki w funkcji drogi tarcia. Podczas badania próbek tytanowych największy przyrost temperatury równy 32°C stwierdzono dla próbki tytanowej Grade 2. Natomiast najmniejszy przyrost temperatury na poziomie 17°C zaobserwowano dla próbki tytanowej Grade 5. Podczas badania próbek aluminiowych największy przyrost temperatury wynoszący 29°C zaobserwowano dla próbki wykonanej ze stopu Al2024. Natomiast w najmniejszym stopniu wzrosła temperatura próbki Al6061T4, dla której przyrost temperatury wynosił 22°C.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie współczynników tarcia próbek wykonanych z tytanu Grade 2, Grade 4 i Grade 5 oraz stopów aluminium Al2024, Al2017A i Al6061T4 współpracujących z przeciwpróbką stalową.



Rys. 9. Ubytek masy badanych próbek aluminiowych i współpracujących z nimi przeciwpróbek stalowych

*Fig. 9. Mass loss of the aluminium specimens and their steel counter-specimens*

*Measurements results of mass loss for aluminium specimens and the involved steel counter-specimens reflect the previously presented results of the linear wear. Insignificant differences in mass loss can be observed in both aluminium specimens and steel counter-specimens.*

*Changes in the specimen temperature vs. frictional distance were also recorded for the duration of the tests. During the tests carried out for the titanium specimens, the highest temperature increment of 32°C was found for titanium Grade 2. Furthermore, the lowest temperature increment of 17°C was observed for the specimen made of titanium Grade 5. During the tests carried out for aluminium specimens, the highest temperature increment of 29°C was found for Al2024 aluminium alloy. The lowest increase in the temperature was found for the specimen made of Al6061T4, with the temperature increment of 22°C.*

#### 4. CONCLUSIONS

*The study determined friction coefficients for the specimens made of Grade 2, Grade 4 and Grade 5 titanium and Al2024, Al2017A and Al6061T4 aluminium alloys collaborating with steel counter-specimens.*



W pierwszym etapie badań, we wszystkich przypadkach zaobserwowano nieznacznie większą wartość współczynnika tarcia w stosunku do wartości, jakie obserwowano podczas końcowej fazy badań. W badaniach zauważono, że spośród analizowanych blach tytanowych współczynnik tarcia dla pary stal/Grade 5 jest znacząco niższy w porównaniu do dwóch pozostałych badanych blach tytanowych. Jego średnia wartość, na drodze tarcia 330 m, wynosi ok. 0,4, natomiast dla skojarzenia stal/Grade 2 oraz stal/Grade 4 wynosi średnio 0,65. Uzyskane w analogicznych warunkach badań średnie wartości współczynnika tarcia dla badanych stopów aluminium wahały się w zakresie 0,4-0,5.

Z pomiarów sumarycznego zużycia liniowego badanych próbek i odpowiadających im stalowych przeciwpróbek wynika, iż pomimo występowania najniższych oporów tarcia, w największym stopniu zużywała się para trąca stal/Grade 5. Zużycie liniowe elementów tej pary trącej przewyższało dwukrotnie zużycie, jakie zaobserwowano podczas badań zużyciowych pozostałych skojarzeń materiałowych. Zależności te znajdują odzwierciedlenie w ubytku masy badanych próbek oraz przeciwpróbek. Dla skojarzenia stal/Grade 5 zaobserwowano kilkukrotnie większy ubytek masy, zarówno próbki, jak i przeciwpróbki, w stosunku do skojarzeń stal/Grade 2 i stal/Grade 4. W badanej grupie blach aluminiowych ubytek masy elementów współpracujących był porównywalny, przy czym największy ubytek masy próbki zaobserwowano dla skojarzenia stal/2017A, natomiast największy ubytek masy przeciwpróbki zaobserwowano dla skojarzenia stal/6061T4.

Uzyskane na tribotesterze T05 wyniki badań wskazują na niekorzystne właściwości tribologiczne badanych materiałów, tym samym na konieczność prowadzenia dalszych badań w celu zwiększenia odporności na zużycie, jak też obniżenia współczynnika tarcia. Badania te powinny być ukierunkowane na ocenę możliwości zastosowania odpowiedniej obróbki powierzchniowej materiałów i powłok przeciwadhezyjnych na narzędziach oraz na poszukiwaniu odpowiednich smarów technologicznych skutecznie rozdzielających powierzchnie trące.

*At the first stage of the tests, an insignificantly higher friction coefficient was observed for all cases compared to the values found during the final phase of the study. The study found that the coefficient of friction for the steel/Grade 5 pair is considerably lower among the analysed titanium sheets metal compared to the two other titanium materials. Its average value after the friction distance of 330 m reached ca. 0.4, whereas this parameter for the pairs steel/Grade 2 and steel/Grade 4 amounted to 0.65. Average value of friction coefficient obtained in analogous conditions of the examinations for the aluminium alloys ranged from 0.4 to 0.5.*

*Measurements of total linear wear of the analysed specimens and the related steel counter-specimens showed that despite the lowest friction resistance, the friction pair of steel/Grade 5 was worn to the highest degree. Linear wear of the elements in this friction pair was twice higher than the wear observed during wear examinations in other material pairs. These relationships are reflected in the mass loss of the specimens and counter-specimens studied. In the pair of steel/Grade 5, several-time higher mass loss was observed in both specimen and counter-specimen compared to the pair of steel/Grade 2 and steel/Grade 4. In the group of aluminium sheet metals studied, the mass loss of the paired elements was comparable, with the highest mass loss in the specimen observed for the pair of steel/2017A whereas the highest mass loss in the counter-specimen was observed for the pair of steel/6061T4.*

*The results of the study obtained using T05 tester demonstrated unfavourable tribological properties of the materials studied, including the necessity of further investigations in order to increase the resistance to wear and to reduce coefficient of friction. These examinations should be oriented at evaluation of opportunities for using a suitable surfacing of the material and application of anti-adhesion coatings on tools and searching suitable technological lubricants which effectively separate the surfaces.*

*Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

*Acknowledgements. Financial support of Structural Funds in the Operational Programme – Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund - Project "Modern material technologies in aerospace industry", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.*

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Garbacz H., Grądzka-Dahlke M., Kurzydłowski K. J.: The tribological properties of nano-titanium obtained by hydrostatic extrusion. *Wear* 263 (2007) 572-578.
- [2] Choubey A., Basu B., Balasubramaniam R.: Tribological behaviour of Ti-based alloys in simulated body fluid solution at fretting contacts. *Materials Science and Engineering* 379 (2004) 234-239.
- [3] Więckowski W., Adamus J.: Blachy aluminiowe w aspekcie zastosowań w przemyśle lotniczym. *Rudy i Metale Nieżelazne* 54/11 (2009) 769-772.
- [4] Adamus J.: Analiza kształtowania wyrobów tytanowych metodami obróbki plastycznej, Monografia nr 174, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2010.
- [5] Adamus J.: The influence of friction and lubrication on sheet-aluminium forming process. *Mat. 14th International Colloquium Tribology: Tribology and Lubrication Engineering.* (2004) 1813-1818.
- [6] Adamus J.: Wybrane problemy kształtowania wytłoczek aluminiowych. *Obróbka Plastyczna Metali* 15/3 (2004) 27-34.
- [7] Adamus J.: Tribologiczne problemy kształtowania blach tytanowych. *Tribologia* 2 (2008) 15-24.
- [8] Alam Md. O., Haseeb A.S.M.A.: Response of Ti-6Al-4V and Ti-24Al-11Nb alloys to dry sliding wear against hardened steel. *Tribology International* 35 (2002) 357-362.
- [9] Budinski K. G.: Tribological properties of titanium alloys. *Wear* 151 (1991) 203-217.
- [10] Qu J., Blau P. J., Watkins T.R., Cavin O. B., Kulkarni N. S.: Friction and wear of titanium alloys sliding against metal, polymer, and ceramic counterfaces. *Wear* 258 (2005) 1348-1356.
- [11] Cvijovic´-Alagic´ I., Cvijovic´ Z., Mitrovic´ S., Panic´ V., Rakin M.: Wear and corrosion behaviour of Ti-13Nb-13Zr and Ti-6Al-4V alloys in simulated physiological solution. *Corrosion Science* 53 (2011) 796-808.
- [12] Iijima D., Yoneyama T., Doi H., Hamanaka H., Kurosaki N.: Wear properties of Ti and Ti-6Al-7Nb castings for dental prostheses. *Biomaterials* 24 (2003) 1519-1524.
- [13] Molineri A., Straffellini G, Tesi B., Baccai T.: Dry sliding wear mechanism of the Ti6Al4V alloy. *Wear* 208 (1997) 105-112.
- [14] Taktak S., Akbulut H.: Dry wear and friction behaviour of plasma nitrided Ti-6AL-4V alloy after explosive shock treatment. *Tribology International* 40 (2007) 423-432.
- [15] Courant B., Hantzpergue J.J., Benayoun S.: Surface treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction. *Wear* 236 (1999) 39-46.
- [16] Jiang P., He X.L., Li X.X., Yu L.G., Wang H.M.: Wear resistance of a laser surface alloyed Ti-6Al-4V alloy, *Surface and Coatings Technology* 130 (2000) 24-28.
- [17] Król S., Ptacek L., Zalisz Z., Hepner M.: Friction and wear properties of titanium and oxidised titanium in dry sliding against hardened C45 steel, *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004) 364-369.