

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Plastyczne kształtowanie lotniczych stopów Al (w tym Al - Li) oraz Ti Plastic forming of aeronautical Al (including Al - Li) and Ti alloys

Politechnika Śląska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska, Politechnika Częstochowska

Wyniki badań Results

Sposób tłoczenia blach z materiałów trudno odkształcalnych, zwłaszcza ze stopów tytanu

Method of sheet-metal forming of almost undeformable materials, especially titanium alloys

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej, własnych badań doświadczalnych i analizy wyników przeprowadzonych obliczeń numerycznych opracowano niekonwencjonalną metodę tłoczenia, pozwalającą na kształtowanie blach z materiałów trudno odkształcalnych, takich jak np. stop tytanu Ti6Al4V, w temperaturze otoczenia, mimo, iż przeprowadzone wcześniej badania tłożności tej blachy, w tym próba miseczkowania metodą Erichsena (rys. 1) wykazały, że jest to niemożliwe.

On the basis of technical literature survey, own experimental studies and analysis of the numerical calculations an unconventional method of sheet-metal forming was developed. The method allows for forming of almost undeformable materials, such as Ti6Al4V titanium alloys, at ambient temperature, while earlier studies, e.g. Erichsen cupping test showed that it is impossible (Fig. 1).



Rys. 1. Widok próbek po próbie tłożności wg metody Erichsena a) Grade 2, b) Ti6Al4V
Fig. 1. View of the cups after Erichsen cupping test a) Grade 2, b) Ti6Al4V

Głębokość wytłoczenia w momencie pęknięcia wytloczki w próbie miseczkowania Erichsena: Grade 2 - 12 mm, Ti6Al4V - 3 mm.

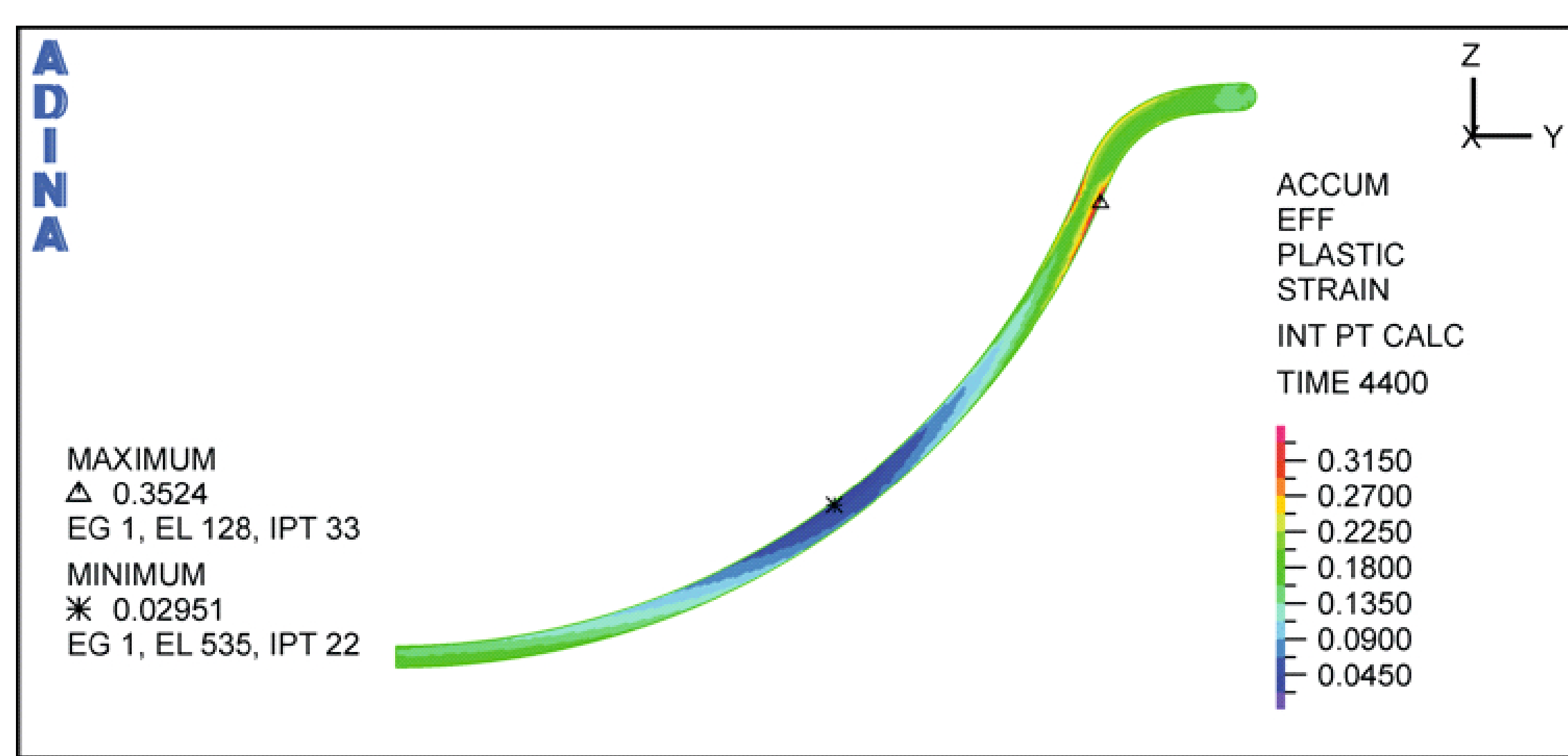
W wyniku opracowanego sposobu tłoczenia ukształtowano wytloczki w postaci czaszy kulistej o średnicy 48 mm. Wyniki kolejnych prób kształtowania, aż do uzyskania poprawnie ukształtowanej wytloczki pokazano na rysunku 2.

Cup depth at the rupture moment in Erichsen cupping test: Grade 2 - 12 mm, Ti6Al4V - 3 mm.

As a result of the developed method a spherical cup with the diameter of 48 mm was obtained. Some attempts to obtain the properly shaped cup are shown in Figure 2.



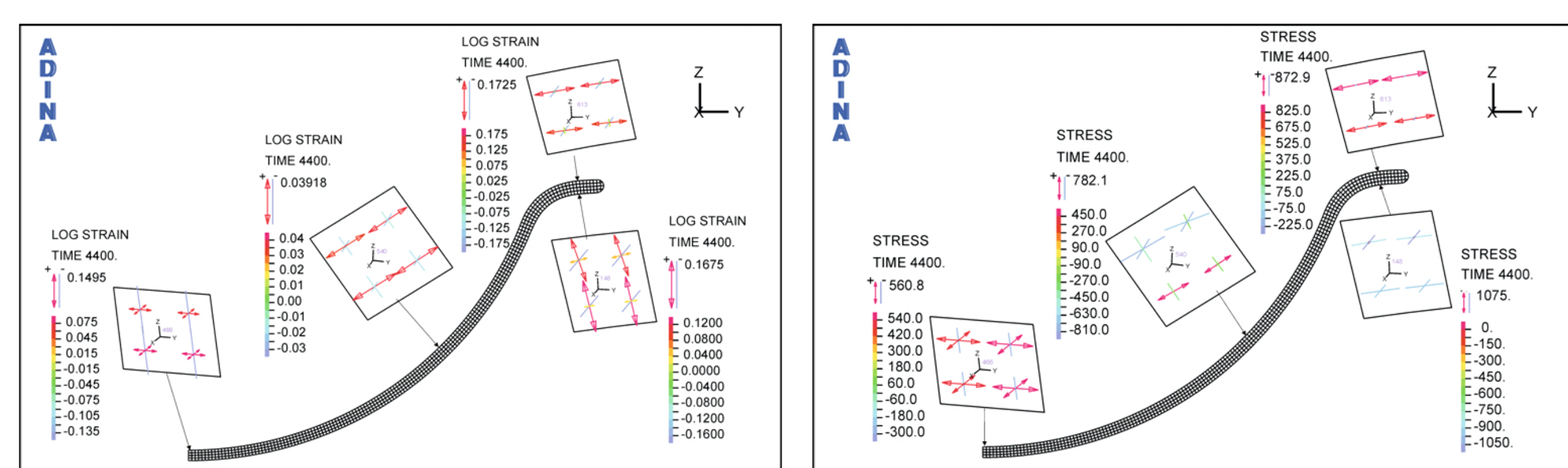
Rys. 2. Wyniki prób kształtowania czaszy kulistej z blachy ze stopu tytanu Ti6Al4V a) przy niewłaściwie dobranych parametrach procesu i średnicy wytloczki, b) właściwie ukształtowana wytloczka
Fig. 2. Test results of forming the spherical cup from Ti6Al4V titanium alloy a) with improper b) with correct forming parameters



Rys. 3. Rozkład odkształceń plastycznych na przekroju wytloczki - wyniki obliczeń numerycznych
Fig. 3. Plastic strain distribution in the cup section - numerical simulation results

Największe odkształcenia występują w okolicy przejścia ścianki wytloczki w część kołnierkową, gdzie w próbach eksperymentalnych najczęściej dochodziło do pęknięcia wytloczki.

The highest deformation is when the cup wall transforms in a flange part; during the experiments in this area the fracture usually occurs



Rys. 4. Odkształcenia w wybranych obszarach wytloczki - wyniki obliczeń numerycznych
Fig. 4. Strains in the chosen area of the cup - numerical simulation results

Rys. 5. Naprężenia [MPa] w wybranych obszarach wytloczki - wyniki obliczeń numerycznych
Fig. 5. Stresses [MPa] in the chosen area of the cup - numerical simulation results

Opisy opracowanego sposobu tłoczenia oraz urządzenia do tłoczenia blach z materiałów trudno odkształcalnych, zwłaszcza ze stopów tytanu zostały przedstawione odpowiednio w zgłoszeniu patentowym Nr PAT-24/18/11/11 i Nr PAT-24/19/11/11 z dnia 18 listopada 2011 roku.

The descriptions of the forming method and the tool for sheet-metal forming of almost undeformable materials, especially titanium alloys are respectively given in the patents: N° PAT-24/18/11/11 and N° PAT-24/19/11/11 dated on 18 November 2011

Wnioski Conclusions

Dotychczasowe metody kształtowania blach trudno odkształcalnych sprowadzają się do kształtowania w podwyższonych temperaturach (m.in. kształtowanie nadplastyczne). Opracowany sposób tłoczenia blach z materiałów trudno odkształcalnych, zwłaszcza ze stopów tytanu jest sposobem kształtowania na zimno, tj. w temperaturze otoczenia. Metoda ta pozwala na oszczędność energii niezbędnej do nagrzania blach tytanowych, celem polepszenia ich plastyczności, i zachowanie umocnienia powstałego podczas kształtowania plastycznego materiału na zimno. Pozwala również na uniknięcie konieczności zabezpieczania materiału przed zwiększoną absorpcją azotu, tlenu i wodoru w głąb tytanu wraz ze wzrostem temperatury i wynikające stąd niekorzystne zmiany strukturalne powodujące obniżenie późniejszych właściwości użytkowych wyrobów tytanowych.

Previous sheet-metal forming methods of almost undeformable materials come down to form at higher temperatures (eg. superplastic forming). The developed method of sheet-metal forming of almost undeformable materials, particularly titanium alloys, is a cold forming method, i.e. at ambient temperature. The method saves the energy required to heat the metal titanium to a required temperature, in order to improve their formability, and also allows to keep strain hardening resulting from cold forming. Additionally, the method avoids the need for protection of the material - titanium against an increased absorption of nitrogen, oxygen and hydrogen with the temperature increase. Therefore, unfavourably structural changes, which affects further material formability is avoided.

Wyniki badań Results

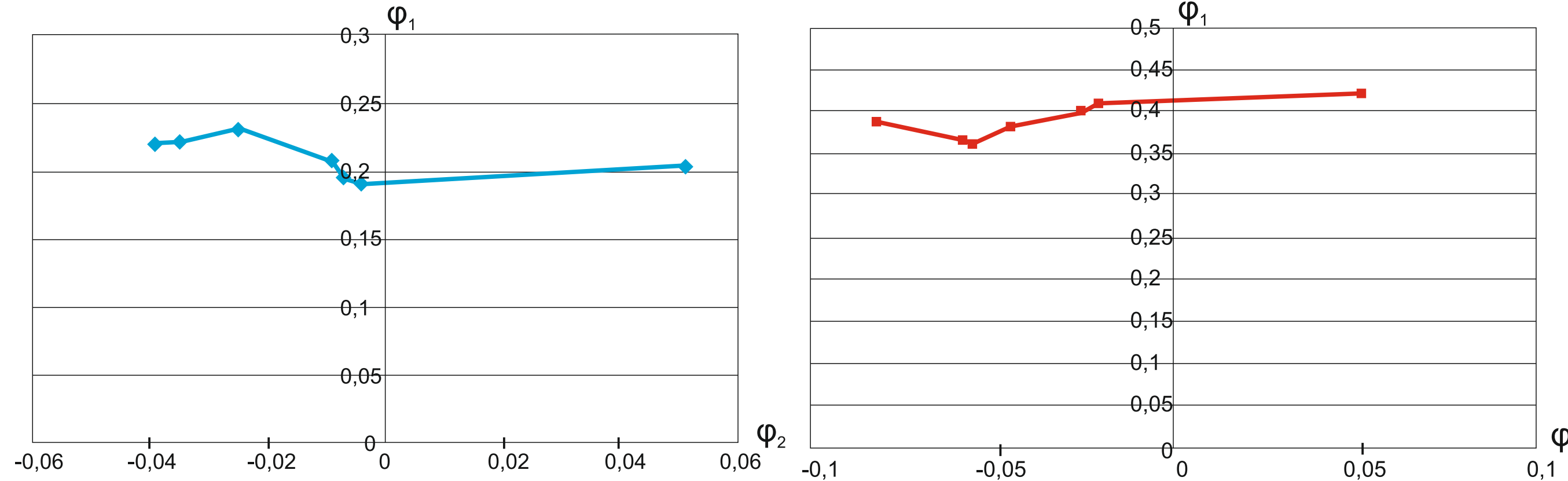
Analiza wyników badań krzywych odkształceń granicznych blach aluminiowych

Analysis of forming limit curves for aluminium sheets

Do oceny tłożności blach wykorzystuje się różne rodzaje prób. Ocena własności plastycznych, oparta na znajomości krzywych odkształceń granicznych jest jedną z najbardziej przydatnych metod, zwłaszcza w odniesieniu do wytloczek o skomplikowanych kształtach. Jest oparta na wykorzystaniu wykresów odkształceń granicznych i polega na badaniach porównawczych stanu odkształcenia wytloczki z graniczną krzywą tłożności blachy. W tym celu wykorzystuje się siatki pomiarowe, nanoszone na powierzchnię blachy przed procesem tłoczenia. W tej metodzie istotne jest wyznaczenie odkształcenia granicznego, przy którym następuje utrata stateczności. Znajomość tego odkształcenia wymagana jest do porównania z wartościami odkształceń maksymalnych w badanym lub projektowanym elemencie. Odkształcenia mogą więc zawierać się w strefie odkształceń bezpiecznych lub w strefie niebezpiecznej. Strefa niebezpieczna oznacza możliwość pęknięcia wytloczki. Znajomość odkształceń granicznych blachy pozwala również zmniejszyć ryzyko pęknięcia wytloczki, między innymi dzięki odpowiedniemu doborowi warunków tłoczenia np. siły docisku, smarowania.

Various types of tests are used for assessment of blanks drawability. Assessment of plastic properties based on the knowledge of forming limit curves is one of the most useful methods, especially with regard to drawpieces that have complex shapes. The method is based on the application of forming limit diagrams. The comparative studies of drawpieces deformation and sheet drawability curve are performed. For this purpose measuring grids are used. They are applied to blank surface before stamping process starts. It is important to determine the limit strain at which stability is lost. Limit strain is compared with values of maximum strain in the tested or designed element. Thus strains may occur either in the safe zone of deformation, or in the critical zone. In the critical zone there is possibility of drawpiece rupture. Knowledge of blank limit strain can also reduce the risk of drawpiece cracking, among others, by proper selection of stamping parameters such as hold-down force, lubrication.

Badania doświadczalne przeprowadzono dla blach aluminiowych: PA2 o grubości 0,75 mm oraz A1r o grubości 0,8 mm. Celem badań było doświadczalne wyznaczenie krzywej odkształceń granicznych. Do badań wykorzystano próbki kołowe o średnicy 200 mm z bocznymi wycięciami (od promienia wycięcia R=0 mm do R=80 mm). Próbki wycięto na nożycach krążkowych, a następnie naniesiono na ich powierzchniach siatkę metodą elektrochemiczną przy wykorzystaniu urządzenia Erichsena. Tłoczenie próbek wykonano na maszynie wytrzymałościowej Heckert 990.01/3. Pomiar odkształcenia badanych próbek wykonano za pomocą mikroskopu optycznego. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dokonano odpowiednich obliczeń, tj: odkształceń ϕ_1 i ϕ_2 .



Rys. 1. Krzywa odkształceń granicznych dla blachy aluminiowej PA2
Fig. 1. The forming limit curve for aluminum PA2 sheet

Rys. 2. Krzywa odkształceń granicznych dla blachy aluminiowej A1r
Fig. 2. The forming limit curve for aluminum A1r sheet

Na podstawie wykresów można zauważyć, że badane krzywe są zależne między innymi od właściwości materiałowych blachy, z której została wykonana próbka. Na położenie krzywych mogą także mieć wpływ parametry procesu, takie jak prędkość i temperatura badania.

Wnioski Conclusions

Krzywa odkształceń granicznych jest graficzną reprezentacją granicznych odkształceń, jakich materiał blachy nie może przekroczyć ze względu na utratę stateczności prowadzącą do pęknięcia wytloczki. Porównując krzywe przedstawione na rys. 1 i 2 można wywnioskować, że dla blachy PA2 w procesach kształtowania utrata stateczności i pęknięcie wytloczki może nastąpić przy znacznie mniejszych wartościach odkształceń głównych aniżeli w przypadku blachy A1r. Oznacza to, że blachę A1r można poddać bardziej skomplikowanemu kształtowaniu lub większej głębokości tłoczenia.

Forming limit curve is a graphical representation of the limit strain that can't be exceeded in sheet material as stability can be lost and ruptures may occur. Comparison of the curves presented in Figures 1 and 2 shows that in case of PA2 aluminium alloy during sheet-metal forming processes loss of stability and ruptures may occur for smaller values of principal strains. On the other hand, for A1R material higher values of principal strains can be introduced without loss of element consistency, which means that it is possible to perform more complicated forming or deeper stamping.

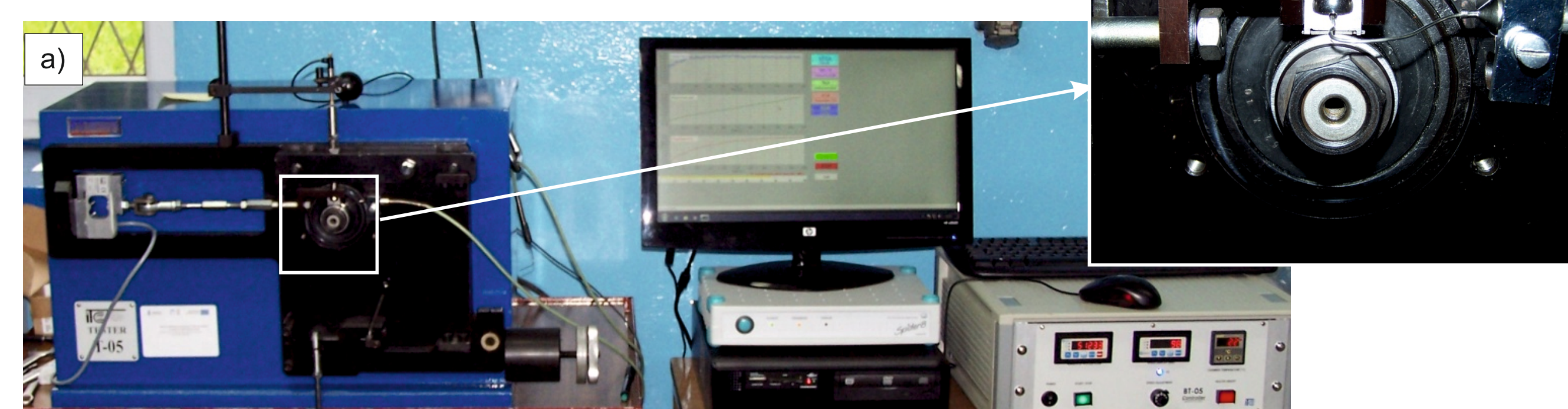
Wyniki badań Results

Badania tarciowo-zużyciowe par trących wykonanych z materiałów stosowanych w lotnictwie na testerze T05

Frictional and wear tests on T05 tester for the frictional pairs made of the materials used in aviation

Badania dotyczyły doświadczalno-porównawczej analizy właściwości tarciowo-zużyciowych materiałów stosowanych na elementy konstrukcyjne w przemyśle lotniczym. Materiał próbki: czyisty tytan techniczny Grade 2 i Grade 4, stop tytanu Grade 5, aluminium: 6061T4, 2017A oraz 2024. Matreial przeciwpróbkki: stal łożyskowa. Styk skoncentrowany liniowy.

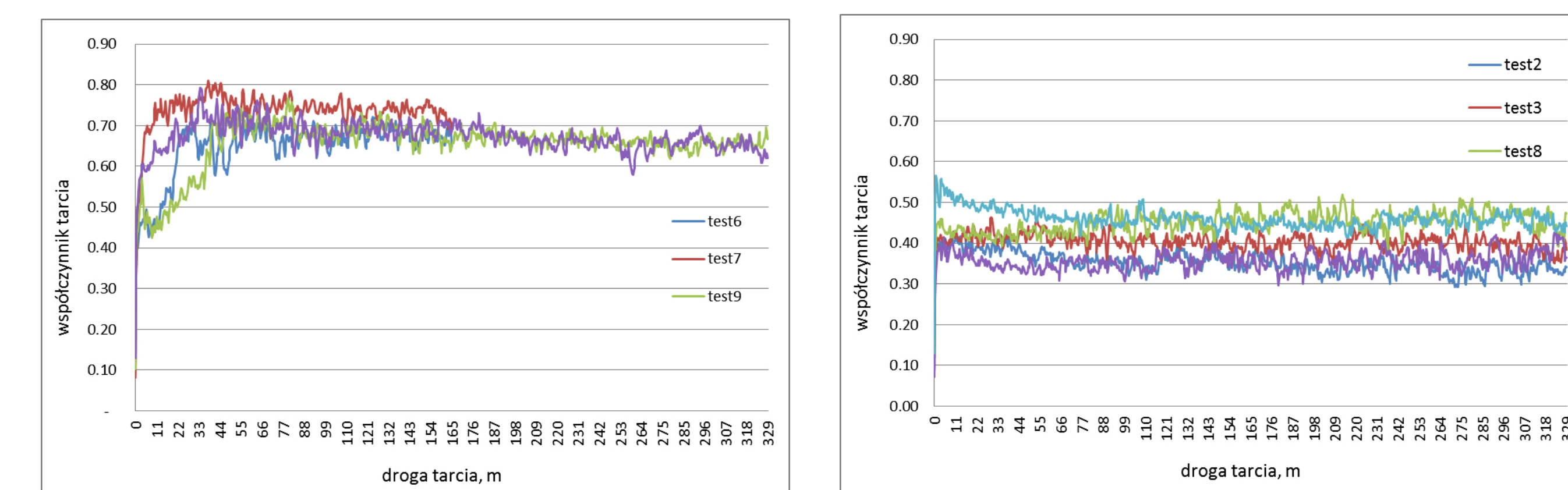
The tests included comparative study on friction and wear properties of the materials used for structural elements in aviation. Material of the samples: commercially pure titanium Grade 2 and Grade 4, titanium alloy Grade 5, and aluminium: 6061T4, 2017A and 2024. Matreial of the counter-sample: bearing steel. Contact: concentrate and linear.



Rys. 1. Stanowisko do badań tarciowo-zużyciowych: a) tester T05, b) widok węzła tarcia typu rolka-kłoczek
Fig. 1. Frictional and wear test stand: a) T05 tester, b) view of the frictional pair: ring - block

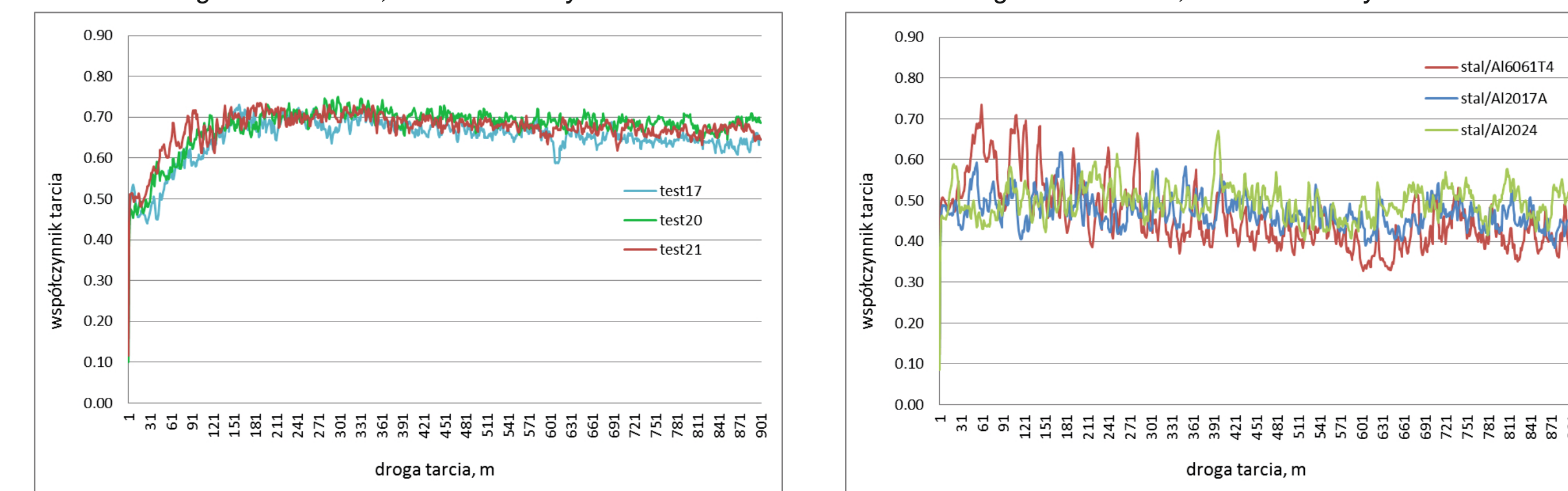
Współczynnik tarcia w funkcji drogi tarcia (współczynnik tarcia określono na podstawie pomiaru siły tarcia).

Friction coefficients versus frictional path (friction coefficient was determined on the basis of measurements of frictional force)



Rys. 2. Współczynnik tarcia - para tarcia: stal - Grade 2; siła docisku - 150 N; prędkość tarcia - 0,183 m/s
Fig. 2. Friction coefficient - frictional pair: steel - Grade 2; loading force - 150 N; friction velocity - 0.183m/s

Rys. 3. Współczynnik tarcia - para tarcia: stal - Grade 5; siła docisku - 150 N; prędkość tarcia - 0,183 m/s
Fig. 3. Friction coefficient - frictional pair: steel - Grade 5; loading force - 150 N; friction velocity - 0.183m/s

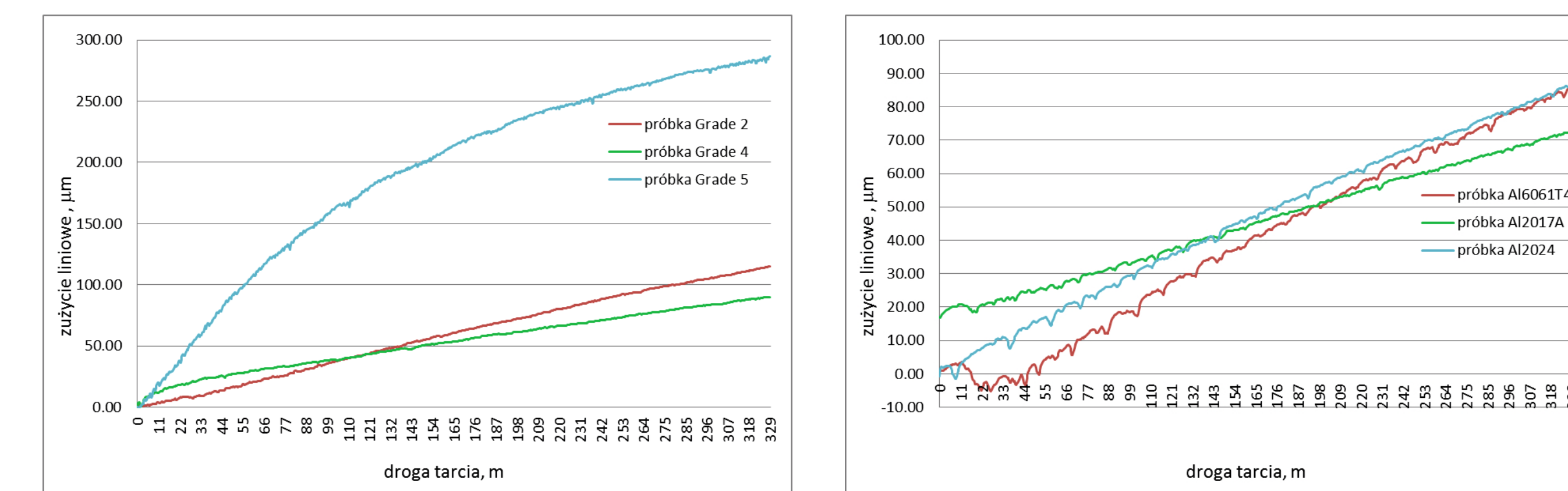


Rys. 4. Współczynnik tarcia - para tarcia: stal - Grade 4; siła docisku - 150 N; prędkość tarcia - 0,183 m/s
Fig. 4. Friction coefficient - frictional pair: steel - Grade 4; loading force - 150 N; friction velocity - 0.183m/s

Rys. 5. Współczynnik tarcia - para tarcia: stal - stop aluminiowy; siła docisku - 150 N; prędkość tarcia - 0,183 m/s
Fig. 5. Friction coefficient - frictional pair: steel - aluminium alloy; loading force - 150 N; friction velocity - 0.183m/s

Zużycie liniowe, będące sumą zużycia próbek i współpracujących z nimi stalowych przeciwpróbek, w funkcji drogi tarcia.

Linear wear, which is the total wear of the samples and counter-samples, as a function of frictional distance



Rys. 6. Przebieg sumarycznego zużycia liniowego badanych próbek tytanowych i współpracującego pierścienia stalowego (siła docisku - 150 N, prędkość tarcia - 0,183 m/s)
Fig. 6. Course of the total linear wear of the titanium samples collaborating with steel ring (loading force - 150N, frictional velocity - 0.183 m/s)

Rys. 7. Przebieg sumarycznego zużycia liniowego badanych próbek aluminiowych i współpracującego pierścienia stalowego (siła docisku - 150 N, prędkość tarcia - 0,183 m/s)
Fig. 7. Course of the total linear wear of the aluminium samples collaborating with steel ring (loading force - 150N, frictional velocity - 0.183 m/s)

Wnioski Conclusions

Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie współczynników tarcia dla różnych par trących: tytan (Grade 2, 4 i 5) - stal oraz aluminium (Al2024, Al2017A i Al6061T4) - stal. Spośród badanych par: tytan - stal współczynnik tarcia par: Grade5-stal jest znacząco niższy w stosunku do dwóch pozostałych, badanych materiałów tytanowych. Jego średnia wartość na drodze tarcia 330 m wynosi ok. 0,4, podczas gdy dla skojarzenia stal/Grade2 oraz stal/Grade4 wynosi średnio 0,65. Średnia wartość współczynnika tarcia dla badanych par trących aluminium-stal, w analogicznych warunkach, waha się w granicach 0,4 - 0,5. Pomimo najniższych oporów tarcia w największym stopniu zużywała się para tarcia stal/Grade5. Zużycie liniowe elementów tej pary trącej przewyższało dwukrotnie zużycie, jakie zaobserwowano podczas badań zużyciowych pozostałych skojarzeń materiałowych. Zależności te znajdują swoje odzwierciedlenie w ubytku masy badanych próbek oraz przeciwpróbek. Dla skojarzenia stal/Grade5 zaobserwowano kilkakrotnie większy ubytek masy zarówno próbki, jak i przeciwpróbkki w stosunku do skojarzeń stal/Grade2 i stal/Grade4. W badanej grupie blach aluminiowych ubytek masy próbek był porównywalny, przy czym największy ubytek masy próbki zaobserwowano dla skojarzenia stal/2017A, natomiast największy ubytek masy przeciwpróbkki zaobserwowano dla skojarzenia stal/6061T4.

The carried out tests allowed for determination of friction coefficients for the different frictional pairs: titanium (Grade 2, 4 and 5) - steel, and aluminium (Al2024, Al2017A and Al6061T4) - steel. Among the examined frictional pairs: titanium - steel, the friction coefficient for the frictional pair: Grade5 - steel was significantly lower compared to the other tested titanium materials. Its average value, on the frictional distance 330 m, was about 0,4, while the averaged friction coefficient for the frictional pairs: Grade4 - steel and Grade2 - steel was 0,65. In the similar conditions, the average value of the friction coefficient for the tested aluminium alloys ranges from 0,4 - 0,5.

Despite the low frictional resistance the greatest wear was observed for the frictional pair: Grade5 - steel. In the case of this pair linear wear was twice bigger than the wear of the other tested materials. These relationships are reflected in weight loss of the samples and counter-samples. The weight loss was several times larger than for the frictional pairs: Grade2 - steel and Grade 4 - steel.

In the group of aluminium materials the weight loss was comparable; the largest weight loss of the sample was observed for the frictional pair: 2017A - steel, while the largest weight loss of the counter-sample was observed for the frictional pair: 6061T4 - steel.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

W zakresie realizowanych badań zespół P.Cz. współpracuje z podmiotami przemysłowymi:

- WSK Rzeszów. Prowadzone badania dotyczą opracowania technologii tłoczenia na zimno części ze stopów Ti stosowanych na elementy kadłuba nośnego silnika lotniczego. Prace koncentrują się na modelowaniu numerycznym procesu tłoczenia przedstawionej części. W symulacji numerycznej analizie poddaje się siłę docisku, warunki tarcia, rodzaj materiału itp.
- PZL Mielec. Prowadzone badania dotyczą wykorzystania wytloczki przygotowanych w technologii "tailor-welded blanks"

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

1. Adamus J.: **Technological difficulties in forming sheet-titanium products. Technological problems of forming of titanium alloys**. XIX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH pt.: Advanced Forming Technologies and Nano-Structured materials, Opalenica k.Poznania 6-9.V.2012

Publikacje

1. Więckowski W., Lacki P., Adamus J.: **Modelowanie numeryczne procesu gięcia owiewki tytanowej**. Inżynieria materiałowa (w druku)