

# 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

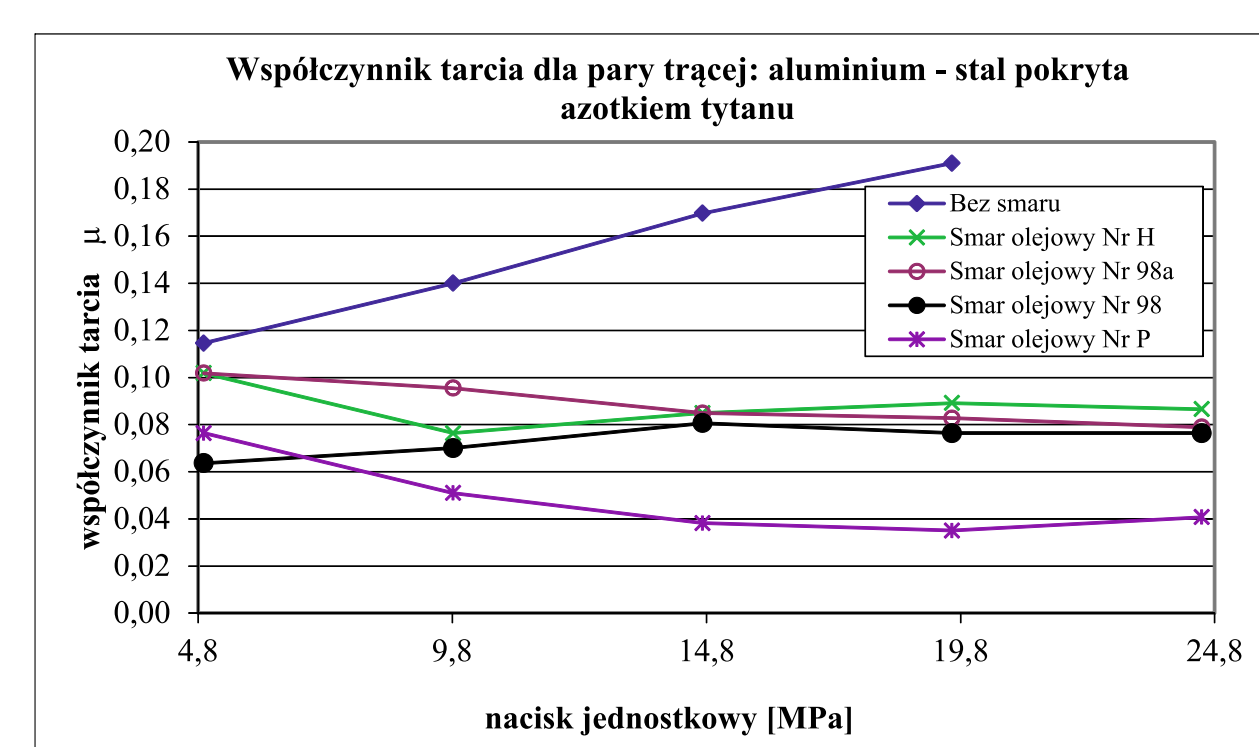
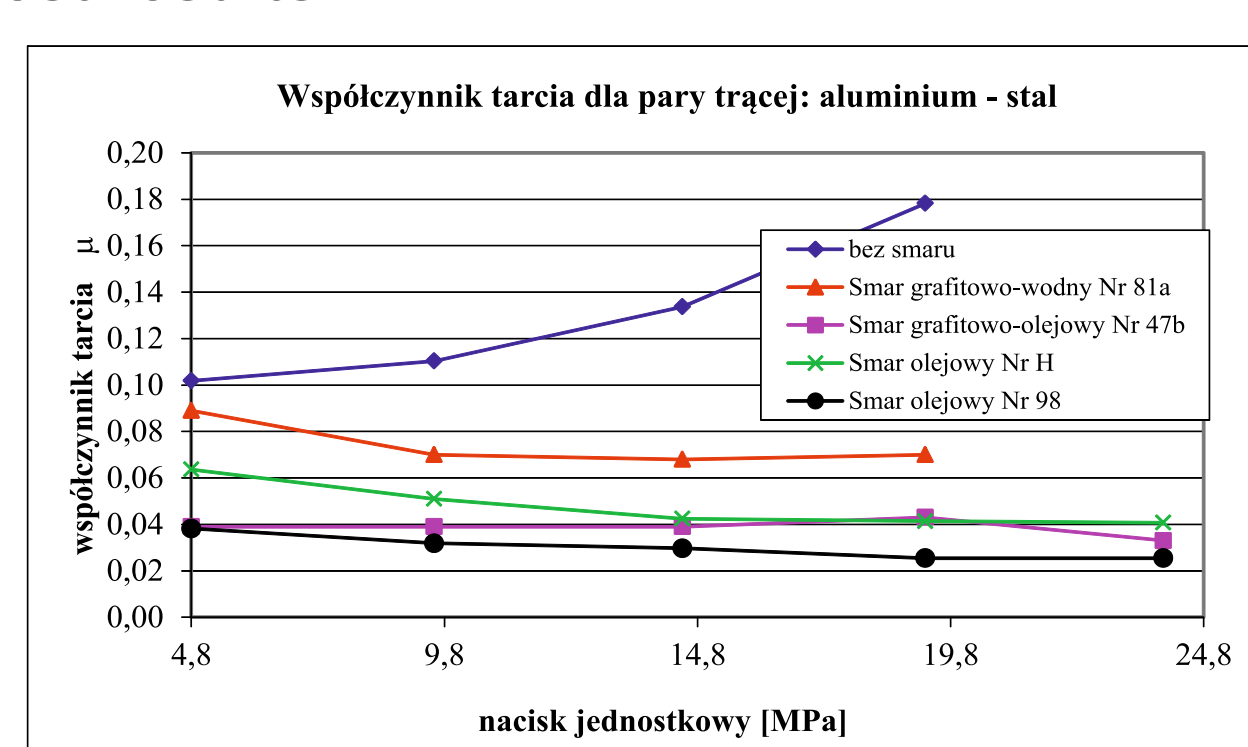
### Wyniki badań Results

#### Badanie współczynnika tarcia w próbie przeciągania pasa blachy Testing of friction coefficient using „strip drawing” test

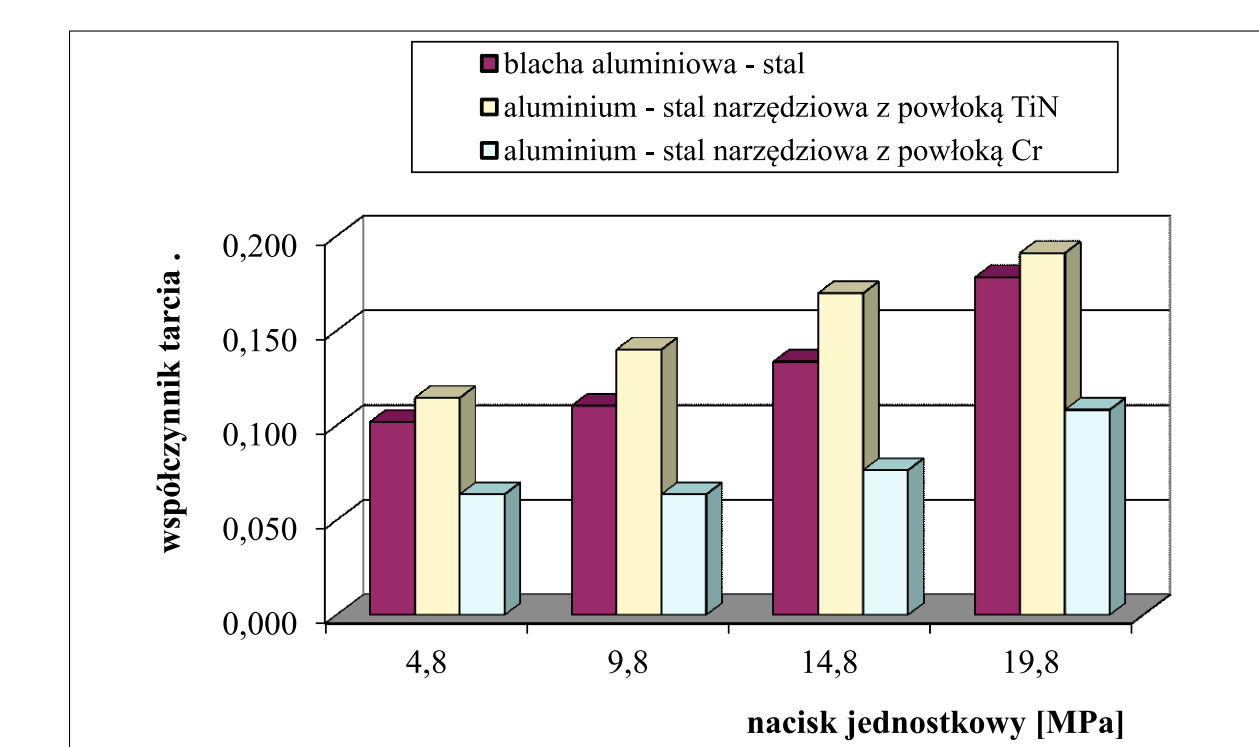
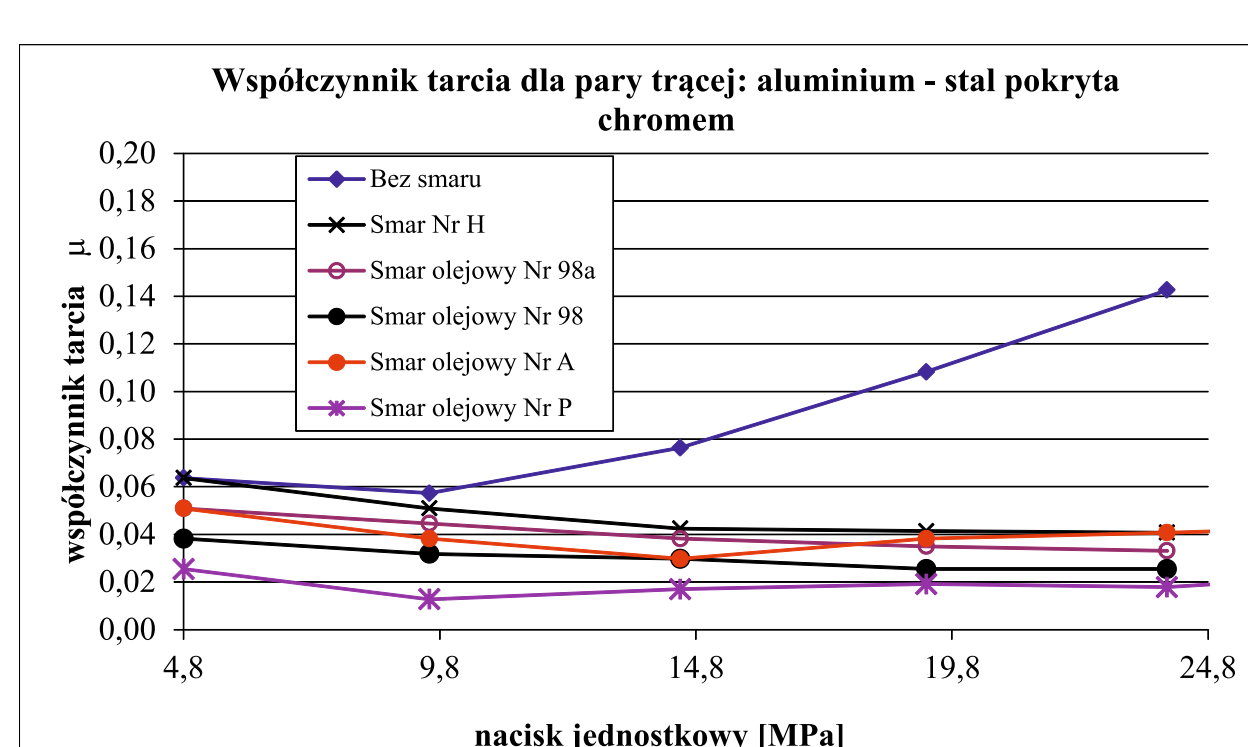
Celem badań było wyznaczenie wpływu smarów technologicznych i warstw przeciwdziałających na opory tarcia występujące przy kształtowaniu blach aluminiowych. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego i w obecności smarów technologicznych. Wkładki narzędziowe wykonano ze stali Nc6, zastosowano następującą obróbkę: szlifowanie i polerowanie, chromowanie i azototytanowanie.

The tests aimed at determination of the influence of the technological lubricants and antiadhesive layers on frictional resistance during forming aluminium sheets. The tests were carried out in dry condition (without lubrication) and with lubrication. Tool inserts were made of Nc6 tool steel, the following surfacing: grinding and polishing, chrome and titanium nitride coating were applied

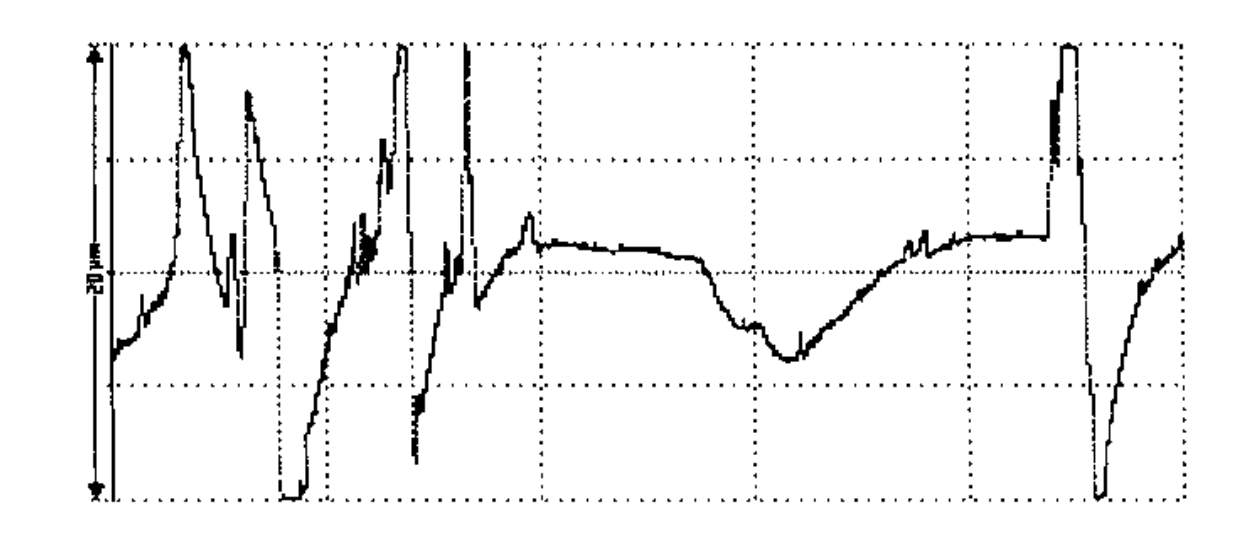
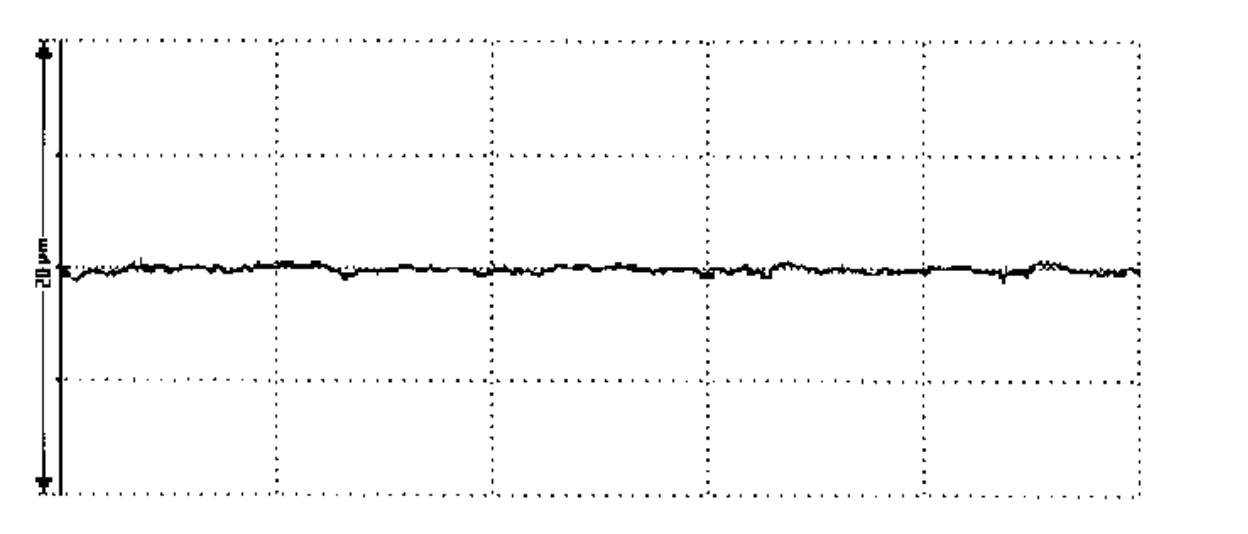
#### Wyniki badań Test results



Rys. Współczynniki tarcia dla pary trącej „aluminium – stal z powłoką TiN”  
Fig. Frictional coefficients for frictional pair „aluminium – steel with TiN layer”



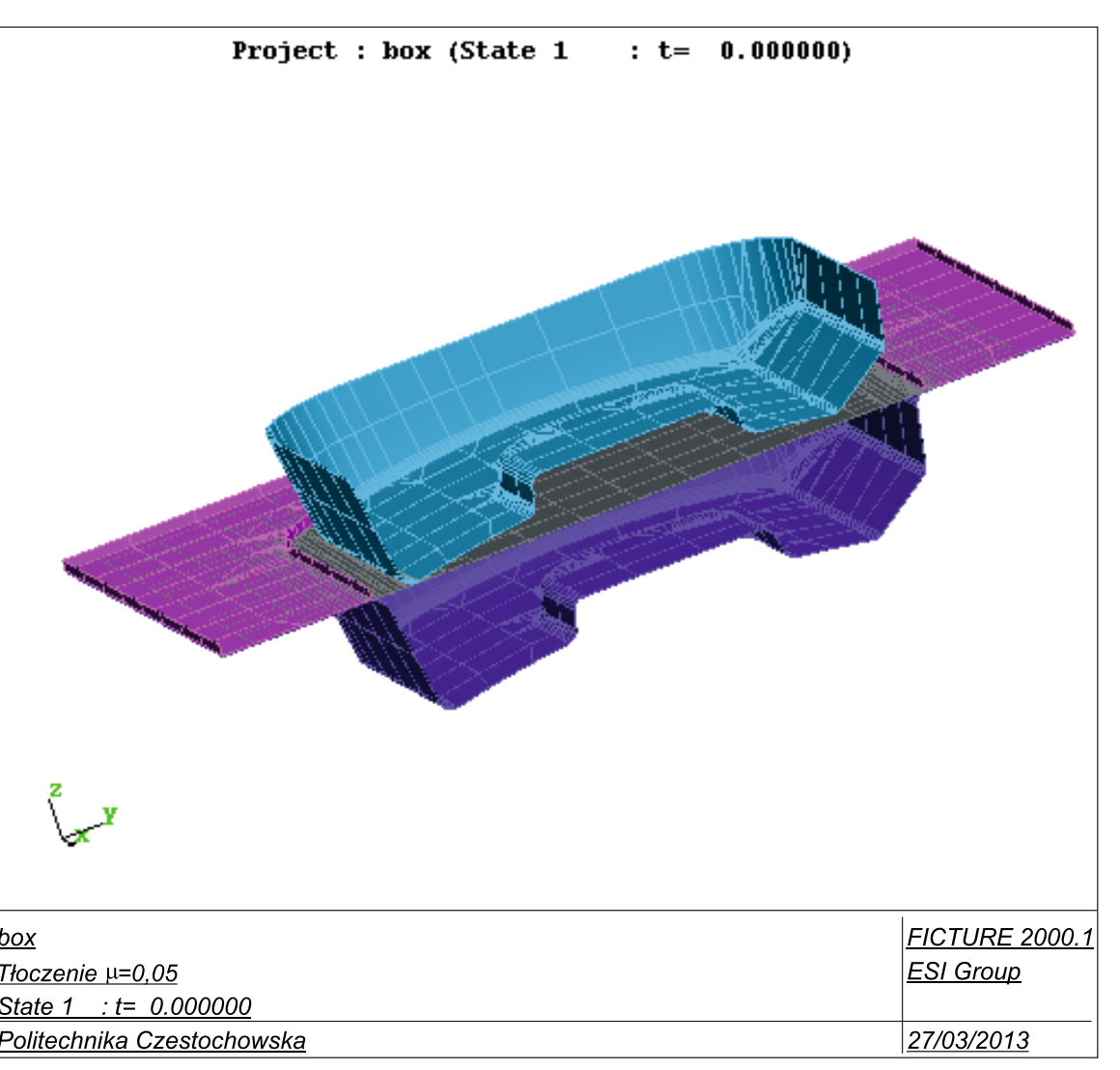
Rys. Porównanie współczynnika tarcia dla różnych par trących w warunkach tarcia technicznie suchego  
Fig. Comparison in frictional coefficients for different frictional pairs in dry conditions



Rys. Chropowatość powierzchni - parametr Ra: a) ze smarem b) bez smaru. Para trąca: „aluminium - stal”; droga tarcia - 1m, nacisk jednostkowy - 10 MPa  
Fig. Surface roughness - Ra parameter: a) with lubrication, b) dry conditions. Frictional pair: aluminium – steel”; frictional path - 1 m, unit pressure - 10 MPa

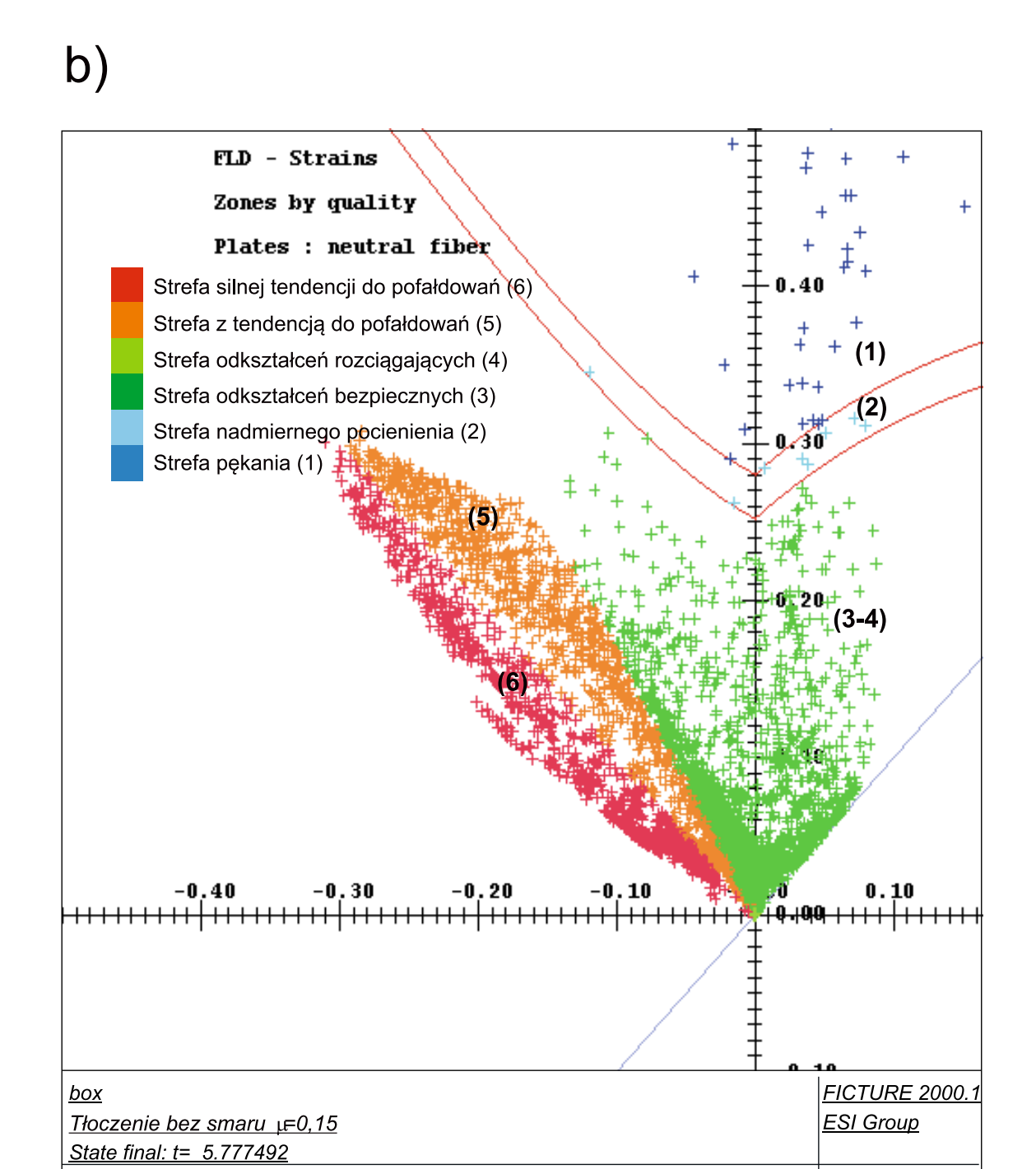
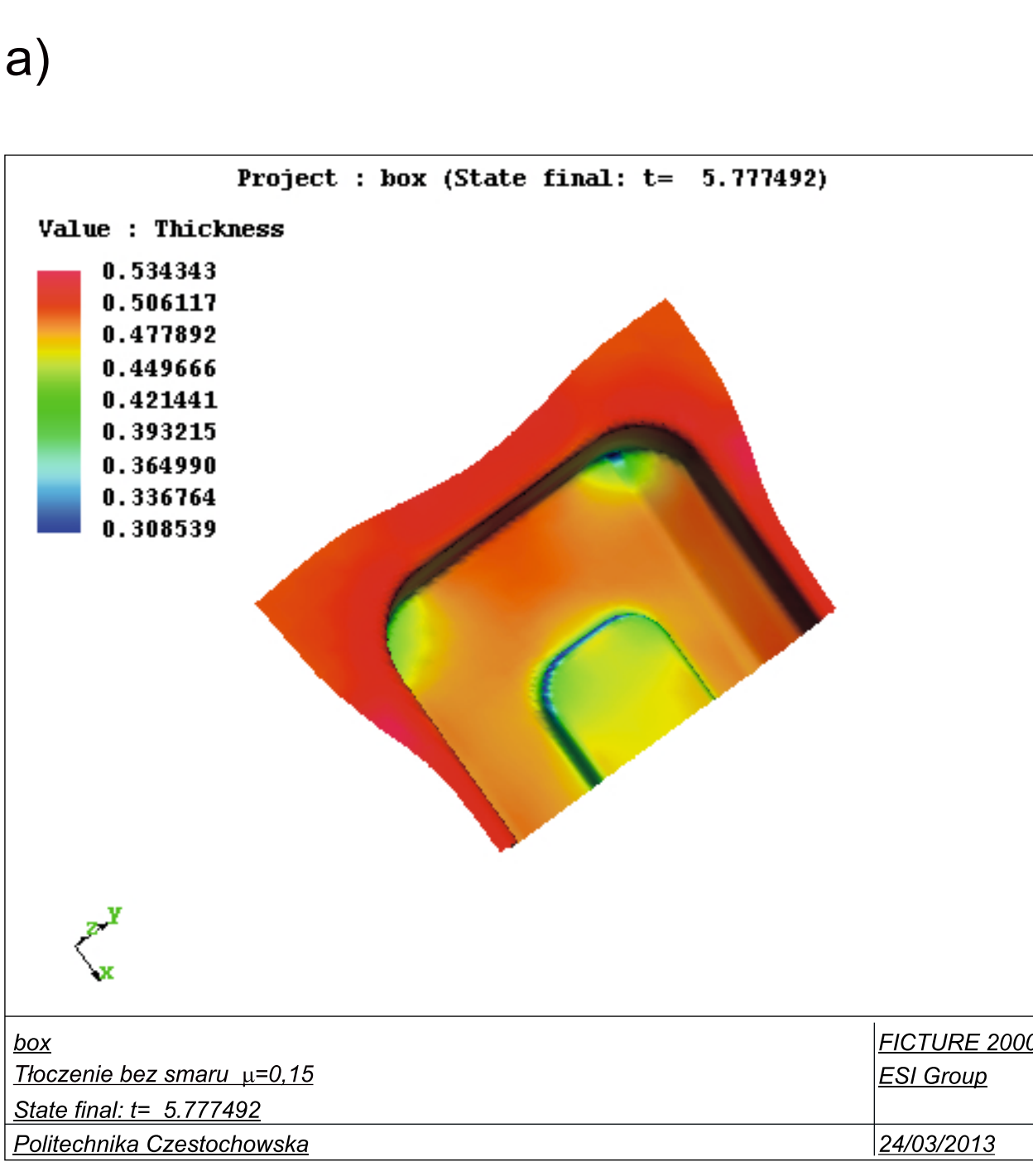
#### Wpływ stosowania smarów technologicznych na proces kształtowania blach (symulacja numeryczna) An influence of technological lubrication on the sheet-metal forming process (numerical simulation)

Z analizy przeprowadzonych obliczeń widać wyraźny wpływ tarcia na wielkość odkształceń w wyciągach. W przypadku tłoczenia bez smaru w pewnych obszarach wyciągki występują duże, lokalne pocienienie ścianek, co w efekcie prowadzi do pęknięcia (rys. a). Z porównania wielkości odkształceń w wyciągach z krzywymi odkształceń granicznych kształtowanej blachy (FLD - rys. b) wynika, że zostało przekroczone graniczne odkształcenie blachy, a w rzeczywistym procesie tłoczenia można się spodziewać, że dojdzie do naruszenia spójności materiału i pęknięcia wyciągki. Po zastosowaniu smarowania na powierzchni styku: matryca – blacha obserwuje się wyraźne zmniejszenie pocienienia ścianek wyciągki (rys. c), a z rysunku d widać, że odkształcenia w różnych strefach wyciągki są mniejsze od granicznych odkształceń, które może przenieść blacha, a więc można ukształtować wyciągkę bez pęknięcia.

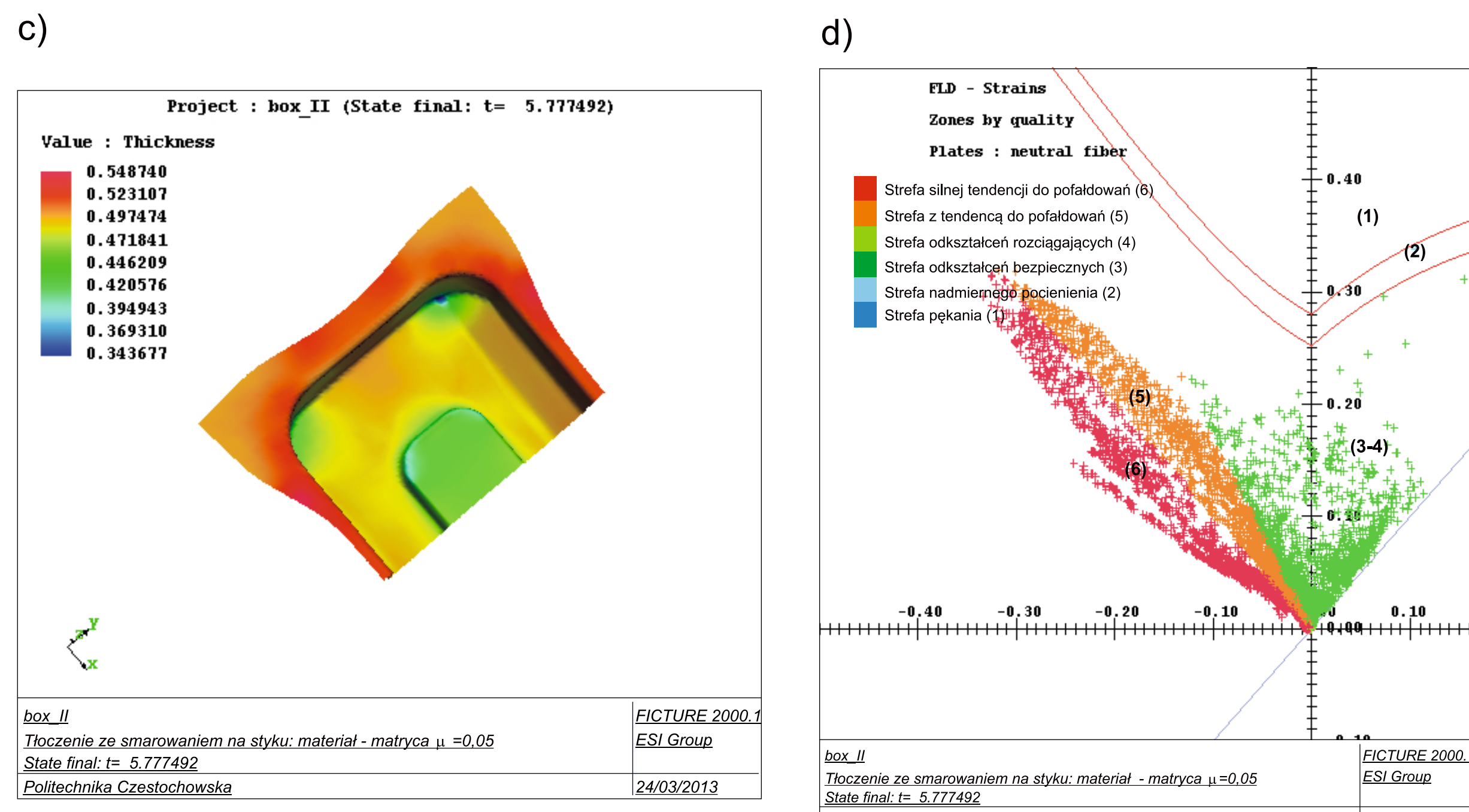


Rys. Model MES procesu tłoczenia  
Fig. FEM model of the sheet-metal forming process

An analysis of the calculations shows a clear effect of friction on the strain values in the drawn-part. During stamping without lubrication there is large local thinning of the walls in certain areas of the drawn-part, which in turn leads to cracks (Fig. a). A comparison of the plastic strains occurring in the drawn-part with the forming limit diagram (FLD) shows that the limit strain has been exceeded, so it can be expected that the crack will appear in a real stamping process. Lubricant application at the contact surface: “die – sheet” reduces wall thinning (fig. c). Figure d shows that the plastic strains in the various zones of the drawn-part are smaller than the limit one, which can be transferred by the sheet, so the drawn-part without cracks can be shaped.



Rys. Wyniki obliczeń numerycznych: a) i b) – bez smarowania, c) i d) – ze smarowaniem  
Fig. Numerical calculation results: a) and b) – dry condition, c) and d) with lubrication



Rys. Wyniki obliczeń numerycznych: a) i b) – bez smarowania, c) i d) – ze smarowaniem  
Fig. Numerical calculation results: a) and b) – dry condition, c) and d) with lubrication

### Wnioski Conclusions

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych można wyciągnąć następujące wnioski:

- smarowanie nie tylko wpływa na zmniejszenie współczynnika tarcia, ale również zapobiega powstawaniu „nalepień” odkształcanego metalu na narzędziu, głównie przyczyną zużycia adhezyjnego narzędzia,
- spośród badanych powłok przeciwdziałających najlepszym wynikiem uzyskano dla powłoki chromowej,
- zastosowanie powłoki azotku tytanu na powierzchni wkładek narzędziowych nie spowodowało obniżenia współczynnika tarcia dla badanych blach - wystąpiło wyraźne pogorszenie wyników,
- właściwie dobrany smar technologiczny może w znaczny sposób obniżyć opory tarcia pomiędzy odkształcaną blachą a narzędziem, należy jednak zwrócić szczególną uwagę na właściwy dobór smaru do danego gatunku blachy,
- tarcie jest istotnym czynnikiem wpływającym na rozkład odkształceń wyciągki, szczególnie na maksymalne pocienienie ścianek wyciągki, które decyduje o jej wytrzymałości. Dlatego, optymalizacja procesu tłoczenia powinna być prowadzona pod kątem minimalnego pocienienia ścianek wyciągki.

On the basis of experiments and numerical calculations it can be stated that:

- lubrication, not only reduces the friction coefficient, but also prevents against formation of protrusions of the deformed material on the tool, which is the main reason of adhesive tool wear,
- among the tested layers the best results were obtained for the chromium layer,
- application of TiN layer on the surface of tool inserts did not result in lowering friction coefficient - a clear deterioration of the results was observed,
- properly selected technological lubricant can significantly reduce the frictional resistance between the tool and deformed sheet, but it is necessary to pay special attention to the proper selection of the lubricant to the metal kind,
- friction between the deformed sheet and tool essentially affects the strain distribution, especially maximum wall thinning, which decides the drawn-part strength. Therefore optimisation should be carried out taking in to consideration minimal wall thinning.

### Wyniki badań Results

#### Badanie właściwości mechanicznych blach aluminiowych stosowanych w przemyśle lotniczym. Examination of the mechanical properties of aluminum sheets used in the aerospace industry

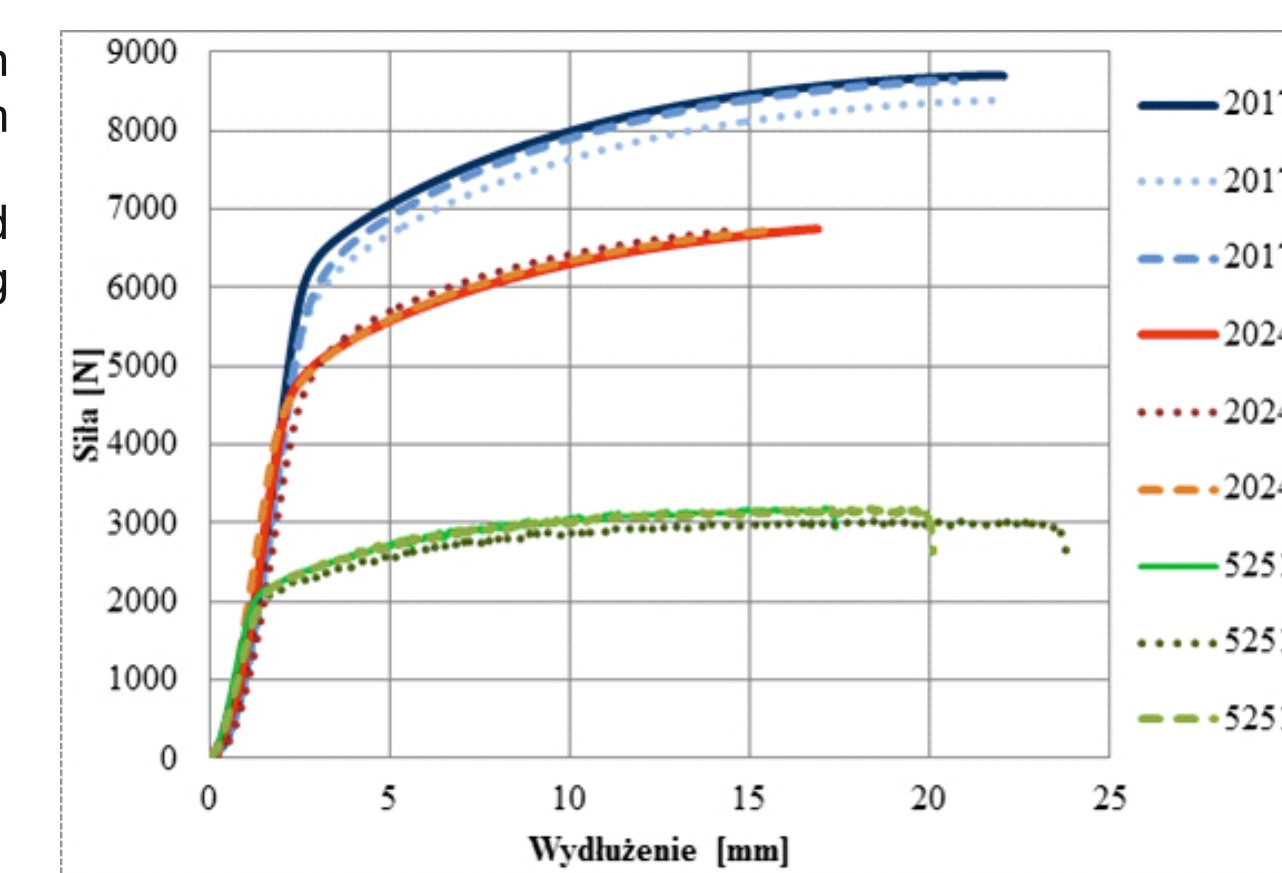
Ciągłe dążenie do obniżenia ciężaru konstrukcji skutkuje rozwojem nowych materiałów konstrukcyjnych. Ostatnie lata wskazują na wzrost zainteresowania materiałami ze stopów aluminium. Aluminium, przede wszystkim jego stopy charakteryzują się dobrą wytrzymałością i względnie dobrą plastycznością. Ponadto mają dobrą odporność na korozję. Ze stopów aluminium wykonuje się m.in. konstrukcje nośne i poszycia samolotów i elementy mocujące. A constant pursuit of reduction of the construction weight results in the development of new structural materials. Recent years show an increase in interest in aluminum alloys. Aluminum, in particular its alloys have good strength and relatively good plasticity. In addition, they have good resistance to corrosion. Aluminum alloys are used for supporting structures and aircraft skin or fasteners.

#### Wyniki badań Test results

Właściwości mechaniczne wybranych materiałów aluminiowych wyznaczono w statycznej próbie rozciągania zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2011. Analizowano trzy stopy aluminium: 5251, 2024, 2017A. Mechanical properties of some aluminium materials were determined in the static tensile test according to PN-EN ISO 6892-1:2011. Three aluminium alloys: 5251, 2024, 2017A were tested.

Tabela. Wyniki statycznej próby rozciągania badanych blach (próbki pobrano pod kątem 0, 45 i 90° względem kierunku walcowania)  
Table. Test results of the static tensile test for the analysed sheets (the samples were taken at 0, 45 i 90° to rolling direction)

Właściwość	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_{50}$ %	$K$ MPa	$n$
5251 - 0°	141,45	213,49	17,06	322,21	0,156
5251 - 45°	135,52	202,19	21,55	307,38	0,157
5251 - 90°	142,52	212,44	19,26	318,69	0,153
2024 - 0°	325,57	472,24	14,69	447,74	0,169
2024 - 45°	319,57	458,03	14,27	682,60	0,141
2024 - 90°	297,20	443,23	13,28	649,47	0,143
2017A - 0°	313,11	438,22	21,30	651,03	0,148
2017A - 45°	283,66	420,67	21,69	634,33	0,157
2017A - 90°	293,40	429,06	17,05	624,06	0,142



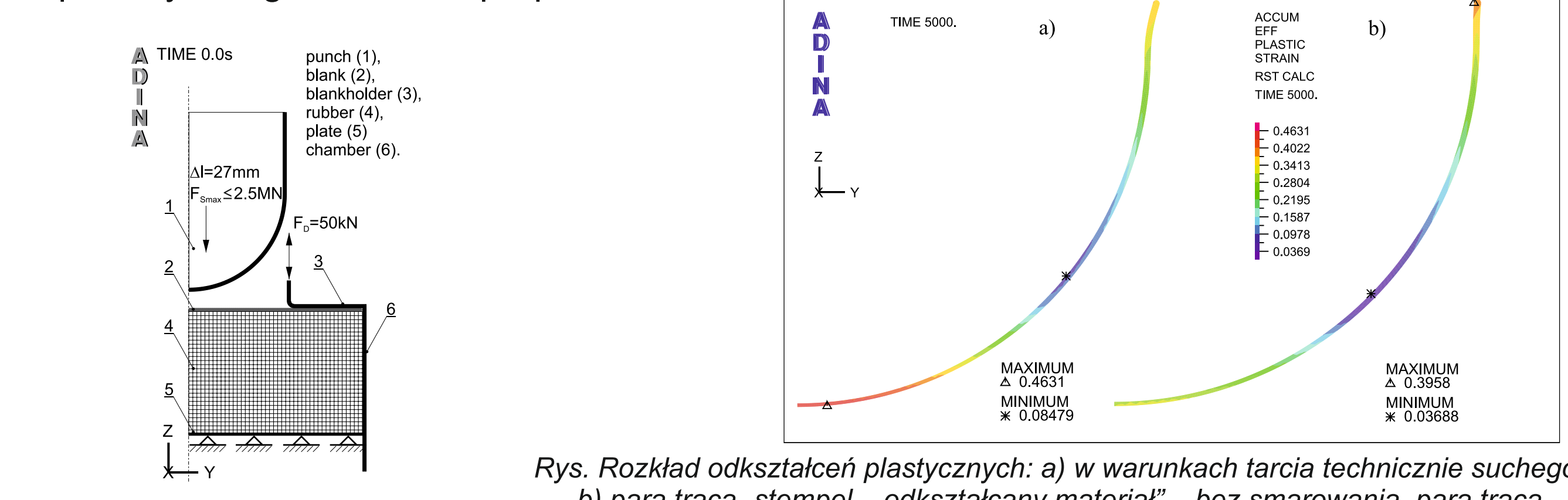
Rys. Przykładowe wyniki badań  
Fig. Exemplary test results

### Wyniki badań Results

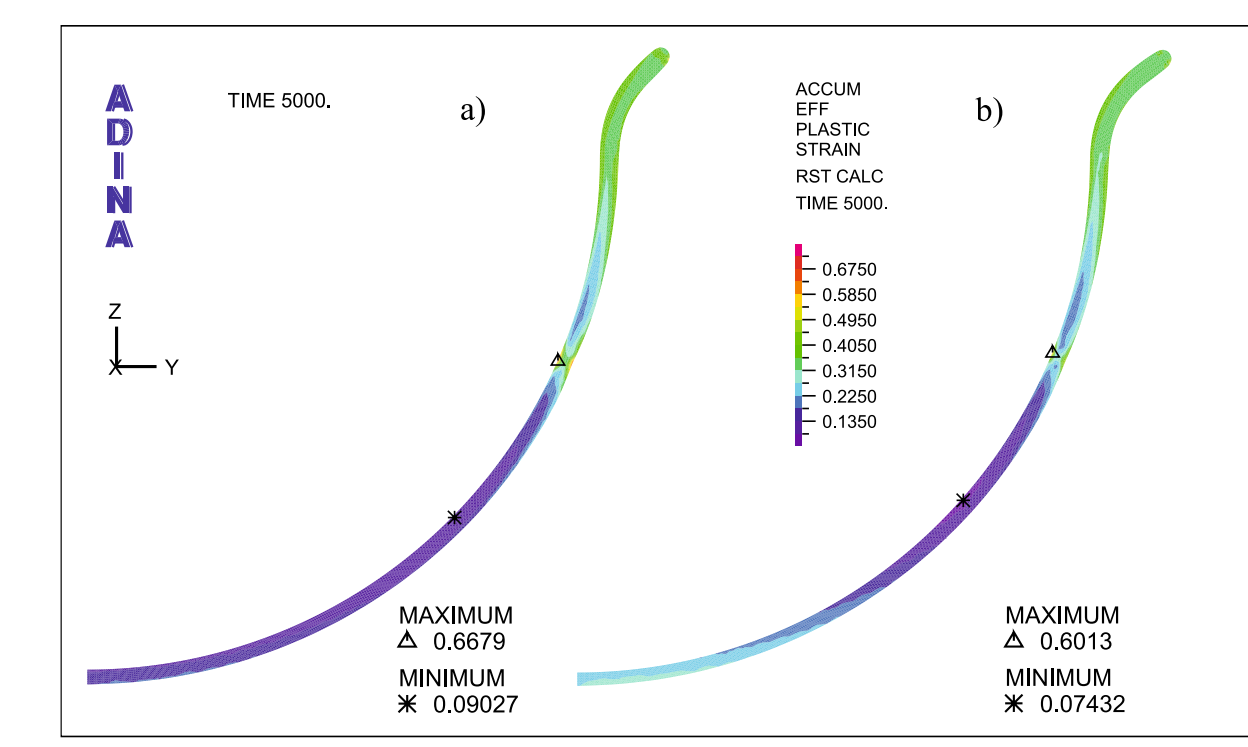
#### Numeryczno-doświadczalna analiza kształtowania na zimno blach tytanowych Numerical and experimental analysis of cold forming of titanium alloy sheets

Przeprowadzono numeryczno-doświadczalną analizę pól elastycznych kształtowania blach tytanowych. Analizę numeryczną wykonano przy użyciu programu ADINA System v. 8.6, opartym na metodzie elementów skończonych (MES). Analizowano kształtowanie czaszy kulistej o średnicy 48 mm, z blachy ze stopu tytanu Ti6Al4V o grubości 0,8 mm. Dane materiałowe niezbędne do symulacji numerycznej, takie jak: wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , granica plastyczności  $R_e$ , współczynnik anizotropii  $R$  czy wykładnik umocnienia  $n$  wyznaczono doświadczalnie. Kształtowanie przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym w tym celu stanowisku (Lacki P., Adamus J. zgłoszenie patentowe No P.398250, 07.02.2012 and No P.398236, 27.02.2012).

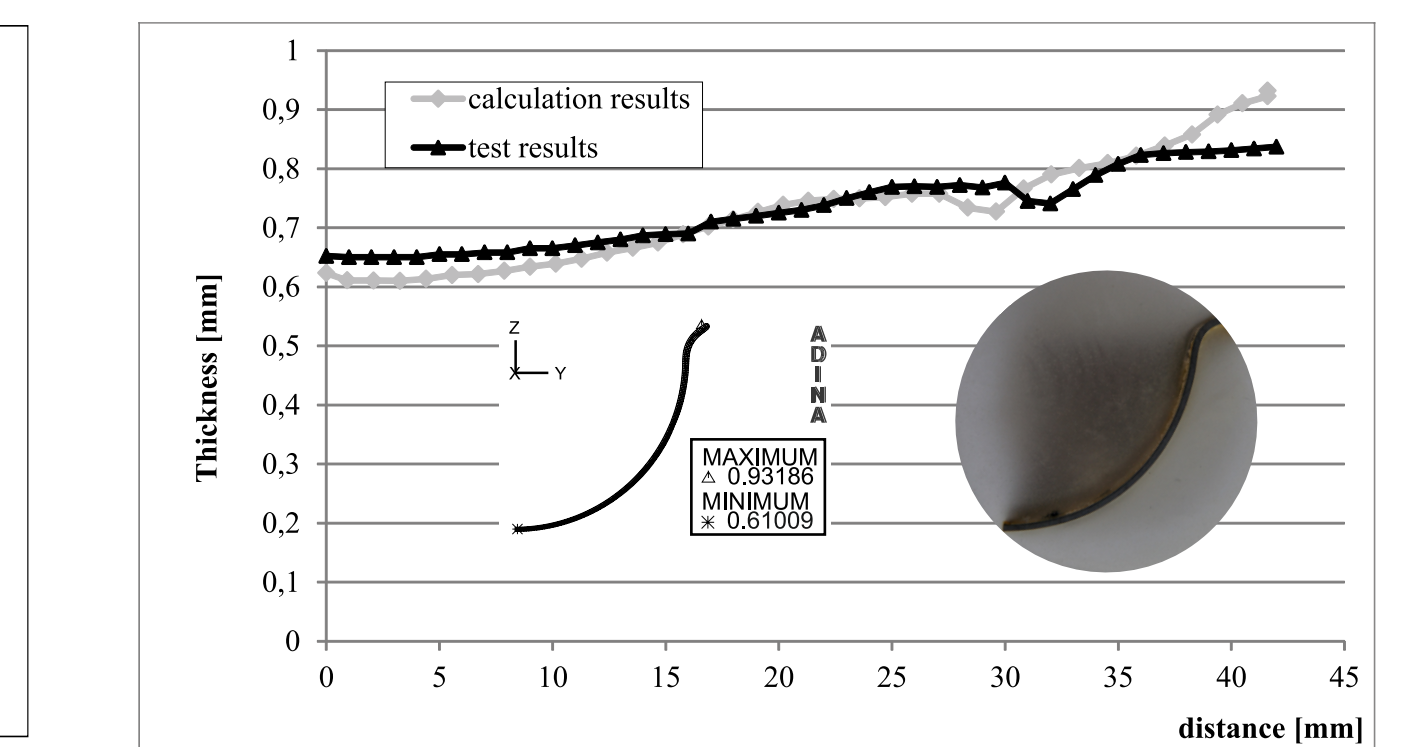
An experimental and numerical analysis of semi-flexible forming titanium sheets was carried out. The numerical analyses were carried out with the ADINA System v. 8.6 basing on the Finite Element Method (FEM). A spherical drawn-part with diameter of 48 mm made of Ti6Al4V titanium sheet with thickness of 0,8 mm was analysed. The necessary for the numerical calculations material data, such as tensile strength  $R_m$ , yield point  $R_e$ ,  $R$ -value and hardening coefficient  $n$ , was determined experimentally. The forming process was done on a specially designed for this purpose device.



Rys. Rozkład odkształceń plastycznych: a) w warunkach tarcia technicznie suchego, b) para trąca „stempel – odkształcany materiał” – bez smarowania, para trąca „dociskacz – odkształcany materiał – wkładka elastyczna” – ze smarowaniem  
Fig. Plastic strain distribution: a) dry condition for all frictional pairs, b) dry condition for the frictional pair “punch – deformed material” and lubrication for the frictional pairs “blank-holder – deformed material – elastic pad”



Rys. Rozkład odkształceń w wyciągce: a) stała siła docisku, b) liniowo rosnąca siła docisku  
Fig. Strain distribution in the drawn-part: a) a constant holding-down force, b) linearly increasing holding-down force



Rys. Porównanie pocienienia ścianek wyciągki rzeczywistej z obliczonymi numerycznymi.  
Fig. A comparison of the drawn-part wall thickness between the test and calculation results

### Wnioski Conclusions

- Przeprowadzone doświadczenia tłoczenia półelastycznego potwierdziły możliwość kształtowania trudno odkształcalnych blach ze stopu tytanu Ti6Al4V w temperaturze otoczenia. Materiał elastyczny np. guma, dociskając blachę do stempła powoduje powstawanie dodatkowych naprężeń znaczących w kształtowanej blaszce, co zwiększa możliwości uzyskania większych odkształceń.
- Potwierdzono efektywność stosowania symulacji numerycznych w badaniu procesów kształtowania półelastycznym narzędziem. Mimo, że symulacje numeryczne są bardzo skomplikowane, ponieważ wymagają połączenia jednoczesnego odkształcenia blachy i gumy (duże odkształcenia gumy powodują znaczną deformację siatki), pozwoliły na wyłuszczenie dlategogo rzeczywiste wyciągki pękają w określonym miejscu.
- W przyszłości symulacje numeryczne będą się koncentrowały na projektowaniu tego typu procesów pod kątem poszukiwania optymalnych parametrów, pozwalających na zmniejszenie pocienienia blachy i bardziej jednorodny rozkład odkształceń plastycznych.
- The carried out experiments confirm that semi-flexible forming allow for stamping almost unworkable titanium sheets at ambient temperature. An elastic contact between the elastic material e.g. rubber and rigid punch improves forming conditions. Inducing the additional compressive stresses in the deformed material allows for achieving higher rates of deformation.
- Effectiveness of the numerical simulations in exploration of the elastic forming method was proved. However, the numerical simulations are very complicated because they need to combine deformation of the sheet-metal and rubber (large deformation of the rubber causes significant mesh distortion) they explains why the real drawn-parts crack.
- In future, the numerical simulations will be concentrated on the design of such processes and searching the process parameters allowing for decrease in thinning of the drawn-part wall and more uniform plastic strain distribution.

### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

- W zakresie realizowanych badań zespół P.Cz. współpracuje z podmiotami przemysłowymi:
  - WSK Rzeszów. Przeprowadzone 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. Przeprowadzone badania dotyczą wykorzystania wyciągki przygotowanych w technologii “tailor-welded blanks”

### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

- Referaty**
  - Lacki P., Adamus J., Wieckowski W., Winowiecka J.: **Modelling of stamping process of titanium tailor-welded blanks**. 20th Conference Computer Methods in Materials Science KomPlasTech 2013, 13-16.01.2013 Zakopane
  - Adamus J., Lacki P.: **Possibility of the increase in titanium sheets' drawability** Wyd. Key Engineering, SheMet 2013 - International Conference on Sheet Metal, 25-27.0.2013 Belfast
  - Adamus J., Lacki P.: **Investigation of sheet-titanium forming with flexible tool – experiment and simulation**. Key Engineering, SheMet 2013 - International Conference on Sheet Metal, 25-27.0.2013 Belfast
- Publikacje**
  - Lacki P., Adamus J., Wieckowski W., Winowiecka J.: **Modelling of stamping process of titanium tailor-welded blanks**. Computer Methods in Materials Science Vol.13 (2012) Nr 2, 339-344
  - Adamus J., Lackner J., Major Ł.: **A study of the impact of anti-adhesive coatings on the sheet-titanium forming processes**. Archives of Civil and Mechanical Engineering Vol.13 (2013), 64-71
  - Adamus J., Lacki P.: **Investigation of sheet-titanium forming with flexible tool – experiment and simulation**. Key Engineering Materials Vol. 549 (2013), 31-38
  - Lacki P., Adamus J.: **Possibility of the increase in titanium sheets' drawability**. Key Engineering Materials Vol. 549 (2013), 31-38
  - Lacki P., Adamus J., Wieckowski W., Winowiecka J.: **Evaluation of drawability of titanium welded sheets**. Archives of Metallurgy and Materials Vol. 58 Issue 1 (2013), pp. 139-143
  - Winowiecka J., Wieckowski W., Zawadzki M.: **Evaluation of drawability of tailor-welded blanks made of titanium alloys grade 2 || grade 5**. Computational Materials Science Vol. 77 (2013), pp.108–113

**Prace mgr, dr, hab. Prace doktorskie**  
Tytuł: **Winowiecka J.: Analiza zagadnień występujących w procesach tłoczenia blach stosowanych w przemyśle lotniczym.** . Promotor: dr hab. inż. Piotr Lacki, Prof. Pcz  
Autor: Julita Winowiecka  
Promotor: dr hab. inż. Piotr Lacki, Prof. Pcz  
Status: w trakcie realizacji

**Zgłoszenia patentowe**  
P.398250: Sposób wytwarzania wyrobów blaszanych z materiału trudno odkształcalnego. Data zgłoszenia: 27.02.2012  
P.398236: Narzędzie do tłoczenia wyrobów blaszanych z materiału trudno odkształcalnego. Data zgłoszenia: 27.02.2012