

dr hab. inż. Janina ADAMUS, prof. nadzw., mgr Katarzyna DYJA, dr inż. Wojciech WIĘCKOWSKI
Politechnika Częstochowska
E-mail: janina.adamus@gmail.com

Wpływ warunków tarcia na rozkład odkształceń podczas tłoczenia wybranych elementów

Influence of frictional conditions on strain distribution in sheet-metal forming of some parts

Streszczenie

Procesy tłoczenia blach stanowią jedną z ważniejszych technologii kształtowania wyrobów cienkościennych. Rozpatrując proces tłoczenia jako system tribologiczny, szczególną uwagę należy zwrócić na smar technologiczny, który znacząco wpływa na jakość otrzymanywanych elementów. W artykule omówiono wpływ smaru technologicznego na rozkład odkształceń w wytłoczkach. Przedstawiono wyniki badań współczynnika tarcia w próbie przeciągania pasa blachy oraz wyniki analiz numerycznych procesu tłoczenia blach.

Abstract

Sheet-metal forming processes are one of the most important technologies used for forming sheet-metal parts. Considering sheet-metal forming process as a tribological system, particular attention should be paid to the technological lubricant, which significantly affects quality of the produced components. The article discusses an impact of the technological lubricant on a strain distribution in the drawn-parts. The friction coefficients which have been determined in the strip drawing test, as well as the results of numerical analyses of the sheet-metal forming process are given.

Słowa kluczowe: blacha, tłoczenie, system tribologiczny, smar technologiczny

Keywords: sheet, sheet-metal forming, tribological system, technological lubricant

1. WPROWADZENIE

Procesy tłoczenia blach umożliwiające produkcję szerokiej gamy elementów metalowych, znajdują zastosowanie w wielu branżach przemysłowych, poczynając od przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego poprzez sprzęt AGD, a kończąc na drobnej galanterii metalowej.

Prawidłowe zaprojektowanie procesu tłoczenia wymaga rozwiązania wielu problemów technologicznych, przy uwzględnieniu stanów naprężeń i odkształceń występujących w blasze. W trakcie procesu kształtowania materiał wytłoczki ulega odkształceniom plastycznym, których duże wartości mogą prowadzić do wystąpienia zjawisk ograniczających możliwości uzyskania prawidłowo ukształtowanych wyrobów bez wad. Najczęściej spotykane wady i ograniczenia to: utrata stateczności i pęknięcie blachy, fałdowanie kołnierza i nie-

1. INTRODUCTION

The processes of sheet-metal forming which allow for manufacturing of a wide range of metal products have been used in a number of industry sectors, starting from automotive and aircraft industries through to household goods manufacturing and ironmongery.

Proper design of sheet-metal forming process requires solving a number of technological problems with consideration for stress and strain states that are present in sheet metal. During formation, material is subjected to plastic strain. Substantial levels of this strain might lead to phenomena that limit chances for obtaining good drawn-parts without defects. The most frequent defects and limitations include: losing stability and cracking of the sheet metal, wrinkling of the flange and unsupported areas of the drawn-part, excessive

podpartych obszarów wytłoczki, nadmierne pocienienie ścianek wytłoczki, zarysowania i zatarcia na zewnętrznych powierzchniach wytłoczki oraz zużycie narzędzi.

Czynniki mające wpływ na przebieg procesu tłoczenia blach oraz na niebezpieczeństwo pojawienia się niekorzystnych zjawisk można podzielić na [1–6]:

- czynniki związane z rodzajem kształtowanego materiału, m.in.: wielkość naprężenia uplastyczniającego, stosunek granicy plastyczności do wytrzymałości na rozciąganie, wykładnik umocnienia oraz współczynnik anizotropii,
- czynniki związane z rodzajem narzędzia, głównie cechy geometryczne narzędzia.

Dodatkowo istotnym czynnikiem decydującym o możliwości uzyskania dobrych wytłoczek o żądanych właściwościach użytkowych jest tarcie występujące pomiędzy tłoczoną blachą a narzędziem [7, 8]. Ze względu na wysokie naciski, jakie występują na powierzchniach kontaktowych, zjawisko tarcia w procesach obróbki plastycznej znacznie różni się od tarcia występującego w częściach maszyn i ma bezpośredni wpływ na:

- rozkład naprężeń i odkształceń w kształtowanym materiale, wskutek czego powstaje niejednorodny stan odkształcenia, a więc również niejednorodne właściwości materiału wyrobu,
- maksymalne odkształcenia, możliwe do uzyskania bez naruszenia spójności materiału,
- wzrost siły koniecznej do odkształcenia oraz zużycia energii,
- wzrost nacisków na powierzchniach roboczych narzędzi, co prowadzi do ich szybkiego zużycia,
- występowanie zjawiska nalepiania się kształtowanego materiału na powierzchni robocze narzędzia, co również przyspiesza ich zużycie i istotnie wpływa na jakość powierzchni wyrobów.

Autorzy prac [9–12] zwracają uwagę, że tarcie może wywoływać zarówno negatywny, jak i pozytywny wpływ na przebieg procesów obróbki plastycznej. W celu wyeliminowania negatywnych skutków tarcia w procesach tłoczenia wyrobów z blach, dąży się do ograniczenia opo-

thinning of the drawn-part walls, scratches on external surfaces of the drawn-part and tool wear.

Factors that affect sheet-metal forming process and increase the risk of unfavourable phenomena are divided into [1–6]:

- *factors connected with the grade of deformed material, such as the magnitude of yield stress, yield to tensile strength ratio, strain-hardening exponent and anisotropy coefficient,*
- *factors connected with the type of tool, with particular focus on tool geometry.*

An additional important factor that determines the ability to obtain quality drawn-parts with specific functional properties is friction that occurs between the sheet metal and the tool [7, 8]. Due to high pressure that occurs at the contact surface, the phenomenon of friction during metal forming differs substantially from the friction observed in machines. Furthermore, it has a direct effect on:

- *distribution of stress and strain in the volume of the deformed material, which causes a non-uniform strain and, consequently, non-uniform product properties,*
- *maximum attainable material deformation without loss of its cohesion,*
- *increase in the force necessary for forming and energy consumption,*
- *increased pressure on tool's working surfaces, which leads to their fast wear,*
- *occurrence of the phenomenon of sticking the deformed material to tool's working surfaces, which accelerates wear and essentially affects the product surface quality.*

The authors of the studies [9–12] emphasized that friction might have both negative and positive effect on metal forming processes. In order to eliminate negative effects of friction during the processes of sheet metal forming, the attempts are usually made to limit friction resistance between

rów tarcia pomiędzy kształtowanym materiałem a powierzchniami roboczymi matrycy i dociskacza oraz zwiększenia tarcia pomiędzy stemplem a kształtowaną blachą. Podstawowym sposobem ograniczania sił tarcia w obróbce plastycznej jest odpowiednie smarowanie. Ze względu na różnorodność procesów kształtowania, a co za tym idzie różnorodność warunków tarcia, smary dobiera się do konkretnych procesów oraz rodzaju kształtowanych materiałów. Podstawową rolą smarów technologicznych jest zmniejszenie współczynnika tarcia, a tym samym oporów tarcia i siły tłoczenia. Wielkość oporów tarcia w dużym stopniu jest uzależniona od rodzaju kształtowanego materiału, wielkości nacisku, chropowatości współpracujących powierzchni, prędkości poślizgu oraz temperatury. Wpływ poszczególnych czynników na współczynnik tarcia jest złożony. Warstwa smarna pomiędzy odkształcanym metalem i narzędziem izoluje całkowicie lub częściowo współpracujące powierzchnie, ograniczając tym samym powstawanie wad wytłoczek wynikających ze skłonności kształtowanego materiału do zatarć i tworzenia nalepień [13–15]. Ponadto smar technologiczny wpływa na stan naprężenia i odkształcenia w kształtowanym wyrobie, stanowiący istotne kryterium przy ocenie tłoczności blach.

W pracy przedstawiono wyniki badań współczynnika tarcia dla blach stalowych kształtowanych przy zastosowaniu różnych smarów technologicznych oraz wyniki symulacji numerycznych procesu tłoczenia blachy stalowej prowadzonych z uwzględnieniem zróżnicowanych warunków tarcia.

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Główny cel badań to określenie wpływu smaru technologicznego na rozkład odkształceń podczas procesu tłoczenia elementów z blach stalowych. Analizy dokonano w oparciu o symulację numeryczną tłoczenia próbek o zróżnicowanej geometrii. Obliczenia numeryczne wykonano z wykorzystaniem programu PAMStamp 2G, specjalnie dedykowanego procesom tłoczenia blach. Niezbędne do przeprowadzenia symulacji numerycznej dane materiałowe takie, jak: granica plastyczności $R_{p0.2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz wykładnik umocnienia n wyznaczono doś-

the deformed material and working surfaces of the die and the blank-holder and to increase friction between the punch and the sheet metal. The basic method to limit friction forces in metal forming is lubrication. Due to a variety of formation processes and, consequently, a variety of friction conditions, lubricants are selected for specific processes and the grade of deformed material. The fundamental aim of using technological lubricants is to reduce the coefficient of friction and stamping forces. Friction resistance is largely dependent on the type of the deformed metal, pressure, roughness of mating surfaces, sliding speed and temperature. The effect of individual factors on friction coefficient is complex. Lubricating layer between the deformed metal and the tool separates surfaces either totally or partially, thus limiting the frequency of the defects in drawn-parts that result from the tendency of the deformed material for galling [13–15]. Furthermore, technological lubricants affect stress and strain state in the drawn-part, which represents an essential criterion for evaluation of sheet metal drawability.

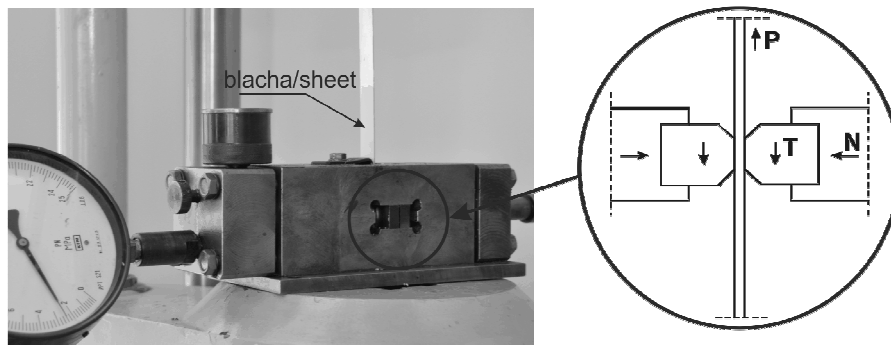
This study presents the results of the examinations of the friction coefficient for deformed sheets using different technological lubricants, and results of numerical simulations of sheet-metal forming carried out for varied friction conditions.

2. GOAL AND SCOPE OF STUDY

The main goal of the study was to evaluate the effect of technological lubricants on strain distribution during the process of sheet-metal forming. Analysis was carried out based on numerical simulation of the samples with varied geometry. Numerical calculations were performed using the PAMStamp 2G software dedicated specifically to sheet-metal forming processes. The data necessary for numerical simulation, such as yield stress $R_{p0.2}$, ultimate stress R_m and strain-hardening exponent n were found empirically from a static tensile test. Coefficients of fric-

wiadczalnie w statycznej próbie rozciągania. Współczynniki tarcia określono w tzw. próbie przeciągania pasa blachy, na stanowisku badawczym (rys. 1), umożliwiającym pomiar siły tarcia oraz siły docisku elementów roboczych narzędzia do powierzchni blachy. Narzędzie wykonano ze stali NC10. Do badań doświadczalnych wykorzystano blachę stalową AMS 5504 (stal nierdzewna AISI 410) o grubości 0,75 mm. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności smarów technologicznych.

tion were determined in the so called strip drawing test on a test stand (Fig. 1) that allowed for measurement of friction force and the hold-down force that acted from working dies on the sheet metal surface. The tool was made of steel NC10. The empirical tests were performed using AMS 5504 steel sheet metal (stainless steel AISI 410) with thickness of 0.75 mm. The studies were carried out under conditions of dry friction and in the presence of technological lubricants.



Rys. 1. Stanowisko do przeciągania pasa blachy

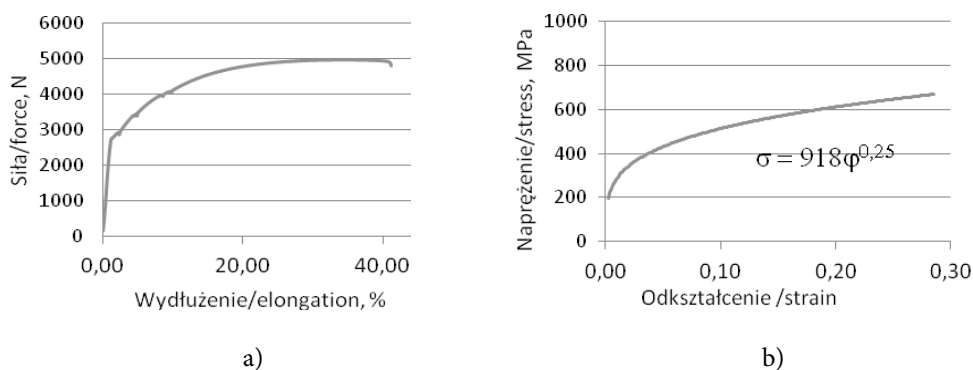
Fig. 1. Strip drawing test stand

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Opracowane wyniki statycznej próby rozciągania przedstawiono na rysunku 2 w postaci krzywej rozciągania i krzywej umocnienia. Krzywą umocnienia materiału analizowanej blachy wykreślono zgodnie z równaniem Hollomona: $\sigma = K \cdot \epsilon^n$, gdzie K jest stałą materiałową, a n wykładnikiem umocnienia. Podstawowe parametry mechaniczne zamieszczono w tabeli 1.

3. RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTS

The results of tensile test are presented in Figure 2 in the form of a stress-strain curve and strain-hardening curve. Strain-hardening curve for the analysed sheet-metal was determined according to the Hollomon's equation: $\sigma = K \cdot \epsilon^n$, where K denotes material constant and n is strain-hardening exponent. The basic mechanical parameters are presented in Table 1.



Rys. 2. Stal AMS 5504: a) krzywa rozciągania, b) krzywa umocnienia

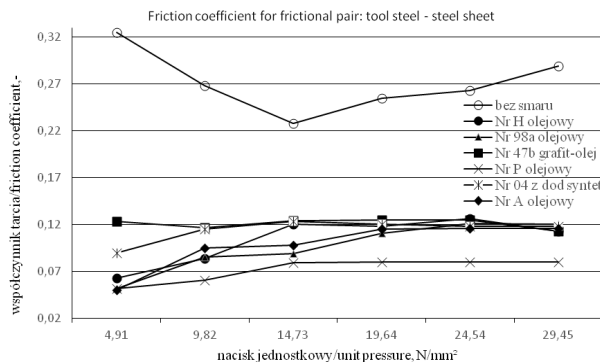
Fig. 2. AMS 5504 steel: a) tensile force vs. elongation, b) stress-strain curve

Tab. 1. Parametry mechaniczne blachy AMS 5504
 Tab. 1. Mechanical parameters for AMS 5504 sheet

Właściwość Properties Material Material	Granica plastyczności Yield strength $R_{p0.2}$, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength R_m , MPa	Wydłużenie A_{80} , % Elongation A_{80} , %	Stała materiałowa Material constant K, MPa	Wykładnik umocnienia Strain-hardening exponent n , -
AMS 5504	287,80	517,40	43,00	918,44	0,25

Wyniki badań eksperymentalnych współczynnika tarcia przedstawia rysunek 3.

Results of experimental testing of friction coefficient are presented in Figure 3.



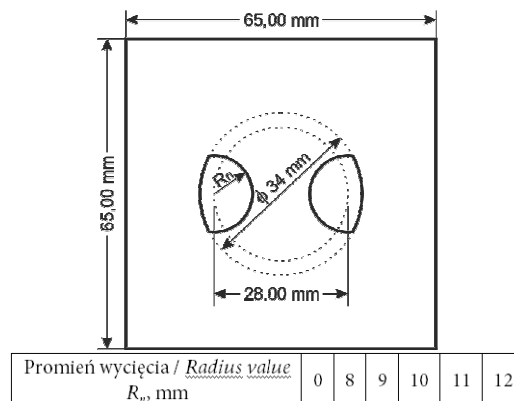
Rys. 3. Współczynniki tarcia – para trąca: „stal-stal”
 Fig. 3. Friction coefficients – frictional pair: “steel-steel”

4. ANALIZA WPŁYWU WARUNKÓW TARCIA NA BADANY PROCES TŁOCZENIA

4. ANALYSIS OF EFFECT OF FRICTIONAL CONDITIONS ON TESTED SHEET-METAL FORMING PROCESS

Analizę numeryczną przeprowadzono dla procesu tłoczenia 6 wykrojek o zróżnicowanej geometrii poprzez wielkość promienia wycięcia R_n (rys. 4). Analizowano wpływ warunków tarcia na pocienienie ścianki wytłoczki oraz rozkład odkształceń, zwłaszcza w momencie pęknięcia wytłoczek.

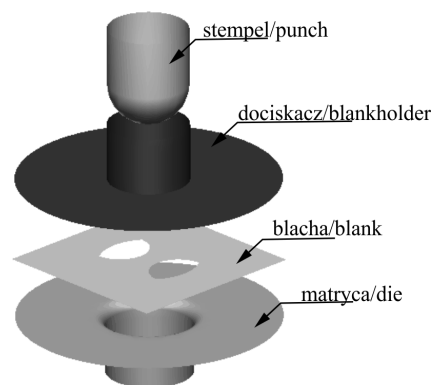
Numerical analysis was carried out for forming 6 steel blanks with varied geometry by radius value of the cutouts R_n (Fig. 4). The effect of friction conditions on thinning of the drawn-part wall and strain distribution was analysed, especially at the point of drawn-part cracking.



Rys. 4. Geometria materiału wyjściowego
 Fig. 4. Blank geometry

Model numeryczny procesu tłoczenia przedstawiono na rysunku 5. Narzędzie składa się z półkulistego stempla o promieniu 14 mm, matrycy ciągowej o średnicy wewnętrznej 30 mm i promienia zaokrąglenia ciążowego 5 mm oraz dociskacza o średnicy wewnętrznej 34 mm. W obliczeniach przyjęto siłę docisku równą 15 kN. Ponadto założono izotropowe właściwości wytrzymałościowe tłoczonych blach z uwzględnieniem uplastycznienia materiału dla warunku podanego w 1948 r. przez R Hilla. W obliczeniach, właściwości materiałowe przyjęto zgodnie z tabelą 1. Symulacje numeryczne przeprowadzono przy założeniu warunków tarcia technicznie suchego na powierzchniach kontaktu „blacha-stempel”, tj. $\mu=0,3$ oraz z uwzględnieniem smarowania na powierzchniach kontaktu: „blacha-dociskacz” i „blacha-matryca”, tj. $\mu=0,05$.

Numerical model of forming process is presented in Figure 5. The tool consists of the hemispherical punch with radius 14 mm, the die with an inner diameter of 30 mm and a filet radius of 5 mm, and the blank-holder with the inner diameter of 34 mm. A blank-holder force of 15 kN was assumed in the calculations. Moreover, the computations assumed isotropic strength properties of the analysed sheets with regard for Hill'48 yield criterion. Material properties for the computations were assumed according to Table 1. Numerical simulations were carried out for the conditions of dry friction at the contact between sheet-metal and punch ($\mu=0.3$), and assumption of lubrication at the surfaces of contact between die and sheet-metal and between sheet-metal and blank-holder ($\mu=0.05$).

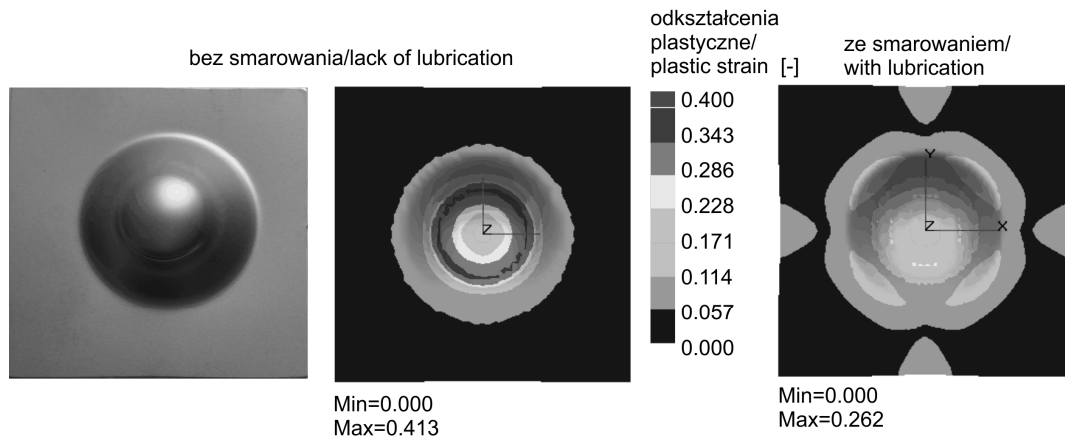


Rys. 5. Model numeryczny procesu tłoczenia

Fig. 5. Numerical model of sheet-metal forming process

Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych dla procesu tłoczenia pełnego wsadu przy uwzględnieniu zróżnicowanych warunków tarcia przedstawiono na rysunkach 6÷8. Rozkłady odkształceń plastycznych w wytłoczce, uzyskanej podczas tłoczenia w warunkach tarcia suchego, w chwili jej pęknięcia w porównaniu z odkształceniami, jakie mają miejsce podczas tłoczenia ze smarowaniem przedstawiono na rysunku 6. W przypadku braku smarowania pęknięcie materiału wytłoczki wystąpiło przy zagłębieniu stempla równym 11,7 mm, natomiast w warunkach smarowania powierzchni roboczych matrycy i dociskacza, przy takim samym zagłębieniu stempla, nie zaobserwowano pęknięcia wytłoczki.

Example results of numerical and experimental tests for the process of stamping of a non-grooved blank with consideration for varied friction conditions are presented in Figures 6 to 8. Distribution of plastic strain in a drawn-part obtained during stamping under conditions of dry friction at the moment of its cracking compared to deformations that occur during stamping with lubrication are presented in Figure 6. Without lubrication, cracking of drawn-part material occurred at the depth of the punch of 11.7 mm, whereas under conditions of lubrication of working surfaces of the die and blank-holder with the same punch depth, no cracking in the drawn-part was observed.

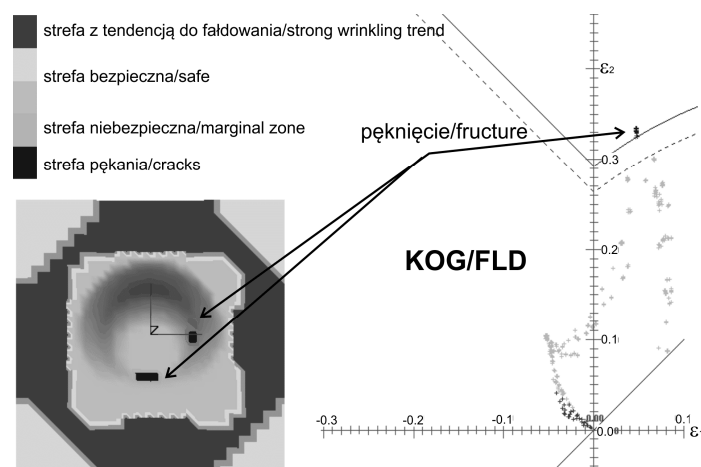


Rys. 6. Rozkład odkształceń plastycznych w wytłoczce wykonanej z pełnego wsadu ($R_n=0\text{mm}$) przy zagłębieniu stempla równym 11,7 mm

Fig. 6. Plastic strain distribution in drawn-part made using non-grooved blank ($R_n=0\text{mm}$), with punch depth of 11.7 mm

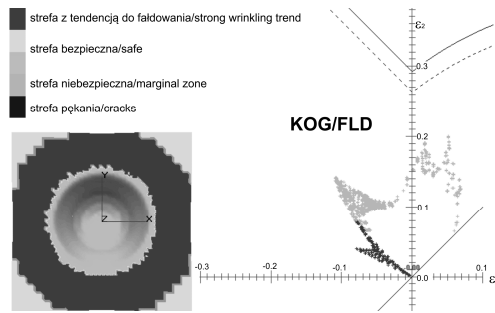
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono rozkład odkształceń w wytłoczkach kształtowanych odpowiednio w warunkach tarcia technicznie suchego i ze smarowaniem na styku „matryca-błacha-dociskacz”. Wyznaczone w obliczeniach numeryczne odkształcenia porównano z krzywą odkształceń granicznych (KOG) kształtowanej blachy, powyżej której następuje pęknięcie blachy. Poniżej krzywej odkształceń granicznych znajduje się strefa niebezpieczna, która jest zazwyczaj wprowadzana pomiędzy strefę bezpieczną i strefę pęknięcia, aby zagwarantować, że nie wystąpi pęknięcie wytłoczki wskutek niewłaściwego określenia położenia krzywej odkształceń granicznych.

Figures 7 and 8 present the strain distribution in the drawn-part respectively under conditions of dry friction and with lubrication at the contact surfaces: “die-deformed sheet-blank-holder”. Strains, which were determined in the numerical calculations, have been compared with forming limit curve (FLC) of the deformed sheet. Above the curve there is a fracture zone and under the curve there is a marginal zone, which is usually introduced between the safe and failure zones to guarantee that a fracture due to an inaccurate assessment of the FLC location is unlikely.



Rys. 7. Porównanie odkształceń w wytłoczce wykonanej z pełnego wsadu ($R_n=0\text{mm}$) z KOG: bez smarowania, zagłębienie stempla $h=11,7\text{mm}$

Fig. 7. Comparison of strain in drawn-part made using non-grooved blank ($R_n=0\text{mm}$) with FLD: without lubrication, punch depth $h=11.7\text{mm}$

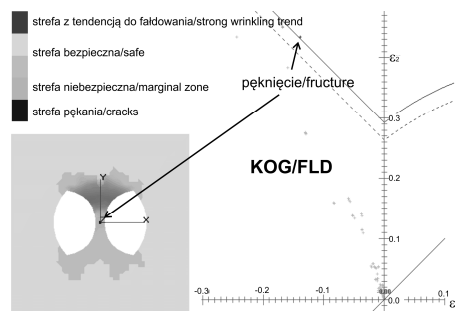


Rys. 8. Porównanie odkształceń w wytłoczce wykonanej z pełnego wsadu ($R_n=0\text{mm}$) z KOG: ze smarowaniem, zagłębienie stempla $h=11,7\text{ mm}$

Fig. 8. Comparison of strain in drawn-part made using non-grooved blank ($R_n=0\text{mm}$) with FLD: lubrication, punch depth $h=11.7\text{ mm}$

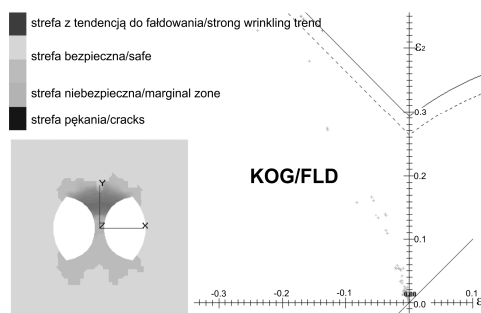
Dla porównania przedstawiono również wyniki obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych dla procesu tłoczenia wsadu z wycięciem $R_n=12\text{mm}$ (rys. 9 i 10). W przypadku braku smarowania podczas próby tłoczenia, pęknięcie materiału wystąpiło przy zagłębieniu stempla równym $7,2\text{ mm}$, natomiast podczas smarowania na styku „blacha-dociskacz” i „blacha-matryca” pęknięcie pojawiło się przy zagłębieniu stempla równym $7,3\text{ mm}$.

For comparison purposes, the results of numerical calculations and experimental examinations for the forming process of grooved specimen with $R_n=12\text{ mm}$ are also presented (Fig. 9 and 10). Without lubrication during the stamping test, material cracking occurred for stamp depth of 7.2 mm , whereas lubrication at the contact surface “die-sheet metal-blank holder” caused that cracking was observed for the punch depth of 7.3 mm .



Rys. 9. Porównanie odkształceń w wytłoczce wykonanej z wsadu z wycięciem $R_n=12\text{mm}$ z KOG: bez smarowania, zagłębienie stempla $h=7,2\text{ mm}$

Fig. 9. Comparison of strain in drawn-part made of grooved blank ($R_n=12\text{mm}$) with FLD: without lubrication, punch depth of $h=7.2\text{ mm}$



Rys. 10. Porównanie odkształceń w wytłoczce wykonanej z wsadu z wycięciem $R_n=12\text{mm}$ z KOG: smarowanie na styku „matryca-blacha-dociskacz”, zagłębienie stempla $h=7,2\text{ mm}$

Fig. 10. Comparison of strain in drawn-part made of grooved blank ($R_n=12\text{mm}$) with FLD: lubrication at contact surface: “die-sheet-metal-blank-holder”, punch depth of $h=7.2\text{ mm}$

Analiza wyników obliczeń numerycznych procesu tłoczenia uwidacznia wyraźny wpływ smarowania na rozkład odkształceń plastycznych w materiale wytłoczki, a tym samym głębokość tłoczenia wytłoczek pozbawionych wad. Różnice w wartościach odkształceń oraz głębokości tłoczenia w dużej mierze zależą od geometrii zastosowanych wsadów (schematu odkształceń). Najbardziej widoczne są dla wsadów pełnych.

5. POSUMOWANIE

W celu poprawy warunków tribologicznych w procesach tłoczenia blach, a zwłaszcza uniknięcia nalepiania się materiału kształtowanej blachy na powierzchnie narzędzia, konieczne jest rozdzielanie materiałów pary trącej, tj. narzędzia i kształtowanego materiału blachy poprzez zastosowanie np. smarów technologicznych.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały istotny wpływ smarowania na rozkład odkształceń w kształtowanym materiale, co w konsekwencji przekłada się na możliwą do uzyskania graniczną wysokość wytłoczki.

PODZIĘKOWANIA

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.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Adamus J.: *Wpływ właściwości materiałowych na jakość wytłoczek*. II Ogólnopolska Konferencja Naukowa: QUALITY 2004. Doświadczenia i Efekty Funkcjonowania Systemów Zarządzania Jakością w Przedsiębiorstwach, 2004, s. 20–26.
- [2] Boljanovic V.: *Sheet metal forming processes and die design*. Industrial Press, New York 2004.
- [3] Marciniak Z.: *Konstrukcja tłoczników*. Ośrodek Techniczny A. Marciniak Sp. z o.o., Warszawa 2002.
- [4] Mangudkar U.V., Hiremath R.B.: *Formability analysis and its parameters – a review paper*. *Journal of Engineering Research and Application* vol. 3/6 (2013), s. 300–303.
- [5] Suchy I.: *Handbook of die design*. McGraw-Hill Professional Publishing 2006.
- [6] Saxena R., Dixit P.: *Finite element simulation of earing defect in deep drawing*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* nr 45 (2009), s. 219–233.

Analysis of the results of numerical calculations for forming process revealed a noticeable effect of lubrication on distribution of plastic strain in the material of drawn-part, thus pointing to the drawn-part depth without defects. Differences in strain and drawn-part depth largely depend on geometry of the blanks (strain scheme). They are the most noticeable for non-grooved blanks.

5. CONCLUSION

In order to improve tribological conditions in sheet-metal forming processes, especially to avoid of protrusion of the deformed sheet on the tool surface, it is necessary to separate the materials of the frictional pair i.e. tool and the sheet metal through application of e.g. technological lubricants.

The numerical calculations revealed an essential effect of lubrication on strain distribution in the deformed material, which consequently affects the maximum attainable drawn-part height.

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”, No. POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

-
- [7] Jurkovic M., Jurkovic Z., Buljan S.: *The tribological state test in metal forming processes using experiment and modelling*. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* vol. 18 (2006), s. 384–386.
 - [8] Cora N., Agcayazı A., Namiki K., Sofuoglu H., Koc N.: *Die wear in stamping of advanced high strength steels – Investigations on the effects of substrate material and hard-coatings*. *Tribology International* no. 52 (2012), s. 50–60.
 - [9] Gierzyńska M.: *Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali*. WNT 1983.
 - [10] Adamus J., Dyja K.: *Wpływ tarcia i smarowania na proces kształtowania blach*. *Rudy i Metale Nieżelazne* R. 59 nr 4 (2014), s. 191–196.
 - [11] Gierzyńska-Dolna M., Adamus J.: *Rola i zadania smarów technologicznych w procesach obróbki plastycznej metali*. *Przegląd Mechaniczny* nr 16 (1995), s. 11–18.
 - [12] Adamus J.: *Zastosowanie powłok przeciwadhezyjnych w narzędziach do tłoczenia*. *Trybologia* nr 4 (190) 2003, s. 11–21.
 - [13] Adamus J.: *Lubrication in sheet metal forming processes. Proceedings of the Review Conference on Scientific Cooperation between Austria, Poland and their World-Wide Partners, especially from Middle-European Countries*. Wyd. PAN Scientific Centre of the Polish Academy of Science Vienna, April 23–27 2003, s. 434–441.
 - [14] Linde G.: *Predicting galling behaviour in deep drawing processes*. PhD Thesis, University of Twente 2011.
 - [15] Adamus J.: *Simulation of the Sheet-Metal Working Process with Friction and Lubrication*. *Tribologia* R. 37 nr 4 (2006), s. 7–18.