

Dr inż. Tomasz Trzepieciński, email: tomtrz@prz.edu.pl
Katedra Przeróbki Plastycznej, Politechnika Rzeszowska
Mgr inż. Stanisław Warchoń, email: warchols@prz.edu.pl
Katedra Konstrukcji Maszyn, Politechnika Rzeszowska

OPTIMALIZACJA KSZTAŁTU WSADU W PROCESIE KSZTAŁTOWANIA WYTŁOCZEK Z WYKORZYSTANIEM MES

Streszczenie: Praca zawiera przykład zastosowania programu ABAQUS do symulacji numerycznej procesu kształtowania wytłoczki prostokątnej. W modelu numerycznym uwzględniono zmianę współczynnika tarcia oraz właściwości mechanicznych wraz ze zmianą orientacji względem kierunku walcowania. Przedstawiono także metodykę oraz wyniki badań oporów tarcia przy pomocy tribotestera. Głównym celem badań była optymalizacja kształtu wsadu zapewniającego otrzymanie wytłoczki prostokątnej o równomiernej wysokości.

BLANK SHAPE OPTIMIZATION IN THE FORMING PROCESS OF DRAWPIECES USING FEM

Abstract: The work contains an example of application of the ABAQUS program to numerical simulation of the forming process of rectangular drawpiece. In the numerical model the variations of the friction coefficient and mechanical properties including rolling direction were taken into consideration. The methodology and results of frictional resistance studies by using tribometer has been presented. The main objective of the work was the blank shape optimization assured obtaining the rectangular drawpiece with uniform height.

1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych czynników determinujących otrzymanie żądanej dokładności wymiarowo-kształtowej wytłoczki jest dobór optymalnych parametrów procesu, w szczególności. Lokalny stan naprężeń i odkształceń w wytłoczce jest nieliniową funkcją wielu czynników, między innymi warunków tarcia, nacisków jednostkowych, anizotropii plastycznej materiału blachy. Siły tarcia wywierają ważny wpływ na rozkład i wartość odkształceń w wytłoczce [1]. Zjawiska powierzchniowe i procesy zachodzące w strefie kontaktu zależą m.in. od materiału i topografii powierzchni blachy oraz narzędzia, zastosowanego smaru oraz wpływu otoczenia [2]. Do czynników zależnych od samego procesu należy zaliczyć wielkość nacisków normalnych, długość strefy poślizgu oraz prędkość odkształcenia.

Zastosowanie symulacji numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych (MES) do procesu kształtowania blach pozwala na ustalenie prawidłowych warunków i parametrów wytłaczania bez konieczności praco- i czasochłonnego wytwarzania prototypów narzędzi w procesie produkcyjnym. W przypadku kształtowania wytłoczek nieosiowosymetrycznych jednym z najważniejszych parametrów wpływających na końcowy kształt wytłoczki jest początkowy kształt oraz wymiary blachy. W praktyce przemysłowej do optymalizacji kształtu wsadu początkowego stosuje się metodę prób i błędów [3] oraz zależności empiryczne [4]. Do określania początkowego kształtu wsadu stosowana jest również metoda elementów skończonych [5, 6] oraz przybliżone metody geometryczne [7].

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiałem zastosowanym do realizacji badań były stalowe blachy głębokotłoczne 08J kategorii tłoczności SB o grubości 1 mm. W próbie jednoosiowego rozciągania wyznaczono wartości podstawowych parametrów mechanicznych blachy (Tabela 1).

Próbki do badań wycięto z arkusza blachy wzdłuż (0°), w poprzek (90°) oraz pod kątem 45° do kierunku walcowania. Do matematycznego opisu umocnienia odkształceniowego materiału zastosowano równanie potęgowe Hollomona (1).

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

gdzie: σ - naprężenie, C i n - stałe materiałowe, ε - odkształcenie.

Zależność (1) jest powszechnie stosowana w programach symulujących procesy przeróbki plastycznej na zimno, gdzie w stopniu zadowalającym spełnia swoje zadanie [8,9].

Tabela 1. Wybrane właściwości mechaniczne blachy 08J kategorii tłoczności SB

Orientacja próbki	Granica plastyczności R_{eL} , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Stała materiałowa C, MPa	Wykładnik krzywej umocnienia n	Współczynnik anizotropii r
0°	162	310	554	0,21	1,55
45°	163	322	542	0,20	1,27
90°	168	312	530	0,21	1,67

Próby tarcia zrealizowano przy pomocy testera T01-M, typu trzpień-tarcza (rys. 1), w warunkach tarcia technicznie suchego. Końcówkę trzpienia stanowiła zablokowana kulka o średnicy 10 mm wykonana ze stopu łożyskowego ŁH-15. Kulka przemieszczała się po powierzchni próbki, której prędkość obwodowa wynosiła 38 mm/s. Trzpień testera obciążono ciężarem 1,3 kg, co odpowiada sile nacisku $P_N = 12,81$ N.

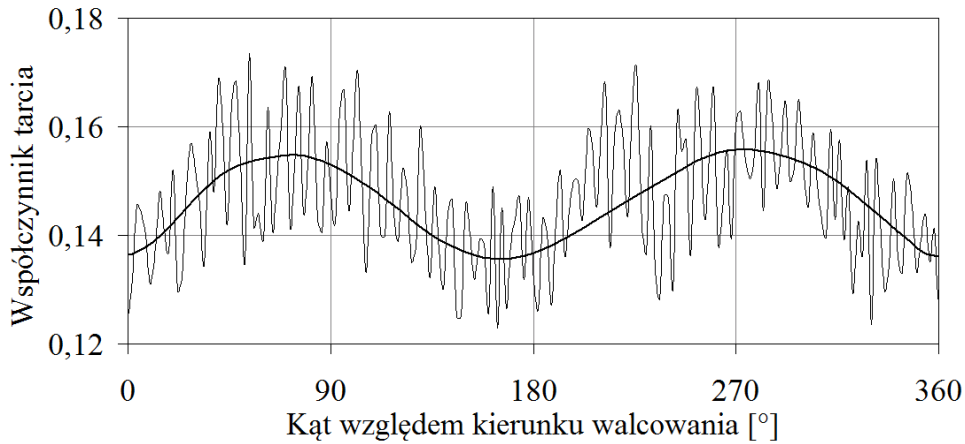


Rys. 1. Widok elementów tribotestera.

Wykorzystano komputerową aparaturę pomiarową umożliwiającą ciągłą rejestrację siły obwodowej P_T w trakcie badań. Wartość współczynnika tarcia wyznaczano dla pierwszego obrotu próbki z zależności (2).

$$\mu = \frac{P_T}{P_N} \quad (2)$$

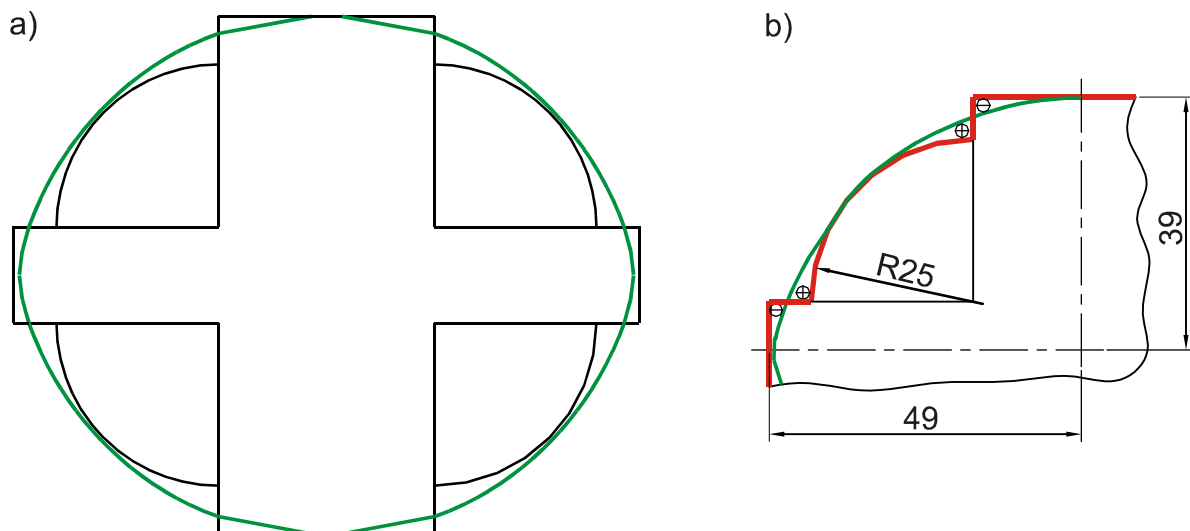
Analiza przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia w zależności od kąta obrotu trzpienia testera po powierzchni blachy (rys. 2) pozwala stwierdzić cykliczność tych zmian. Przebieg linii aproksymującej wyniki pomiarów stanowi odzwierciedlenie anizotropii topografii powierzchni blachy. Potwierdzeniem są różnice w wartości całkowitej wysokości profilu R_t mierzonego wzdłuż ($R_t = 9,7 \mu\text{m}$) i w poprzek ($R_t = 11,6 \mu\text{m}$) względem kierunku walcowania blachy.



Rys. 2. Zmiana wartości współczynnika tarcia w zależności od kąta do kierunku walcowania.

3. MODELOWANIE NUMERYCZNE

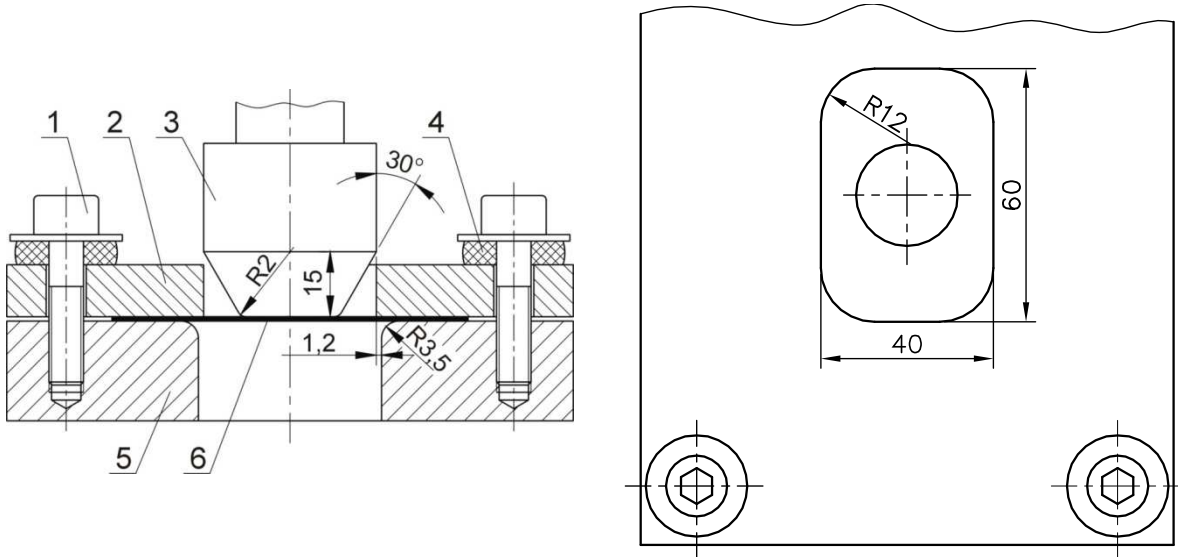
Przybliżone wymiary wsadu (linia czerwona na rys. 3) wyznaczono analitycznie. Promień naroża wsadu ustalono jak dla naczyń cylindrycznych, natomiast wymiary materiału na płaskie ścianki wyznaczono jak dla wyrobów giętych. Należy podkreślić, że wartości minimalnych współczynników wytłaczania wytłoczek prostokątnych są znacznie mniejsze aniżeli dla wytłoczek osiowosymetrycznych. Część materiału ze ściskanej strefy naroża przemieszcza się w ścianki płaskie stąd opory kształtowania naroża są mniejsze niż opory kształtowania wyrobu cylindrycznego. Ponadto ścianki płaskie przenoszą część siły koniecznej do ukształtowania naroża. Z uwagi na nieciągłość kształtu wsadu przeprowadzono korektę zarysu w ten sposób, że ilość materiału dodanego do naroża jest równa ilości materiału odejętego z obszaru wyznaczonego dla ścianki płaskiej.



Rys. 3. Kształt wsadu (a) oraz korekta zarysu (b).

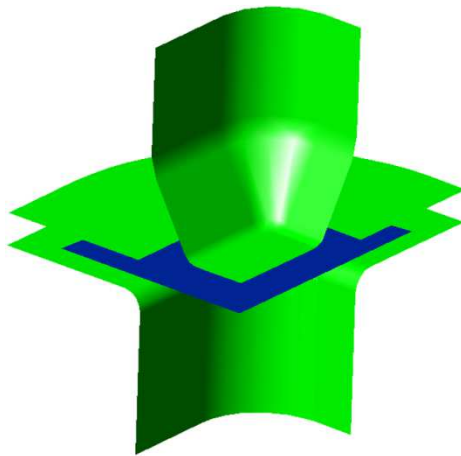
Kształt narzędzi oraz charakterystyczne wymiary narzędzi przedstawiono na rysunku 4. Zmianę stanu naprężeń w strefie kołnierza zrealizowano przez użycie dociskacza, aby nie dopuścić do warunków sprzyjających utracie stateczności blachy przejawiającej się fałdowaniem kołnierza. Niekorzystne oddziaływanie dociskacza polegające na

zmniejszeniu odkształceń granicznych blachy zminimalizowano przez zastosowanie docisku elastycznego. W tym celu pod łby śrub dociskowych założono podkładki z tworzywa elastomerowego. Obwodowe naprężenia ściskające występujące w kołnierzu powodują wzrost grubości blachy. Docisk elastyczny zapobiega również zakleszczeniu blachy pod dociskaczem, czego konsekwencją może być wzrost oporów kształtowania i zerwanie blachy.



Rys. 4. Kształt oraz wymiary przyrządu do kształtowania wytłoczek prostokątnych: 1 – śruba dociskowa, 2 – płyta dociskowa, 3 – stempel, 4 – podkładka elastomerowa, 5 – matryca, 6 – blacha.

Geometrię narzędzi do programu ABAQUS zaimportowano z systemu Autodesk INVENTOR. Wszystkie narzędzia zamodelowano jako nieodkształcalne, co pozwoliło na przedstawienie ich geometrii w modelu numerycznym za pomocą zewnętrznych powierzchni. Ze względu na symetrię procesu kształtowania zamodelowano $\frac{1}{4}$ geometrii (rys. 5). Wprowadzone warunki brzegowe blokowały odpowiednie kierunki przemieszczeń dla węzłów leżących w płaszczyznach symetrii. Model numeryczny blachy został zdyskretyzowany za pomocą 3104 elementów powłokowych 4-węzłowych typu S4R [10], natomiast powierzchnia narzędzi została dyskretyzowana elementami powłokowymi typu R3D4 [10] w liczbie 9586.



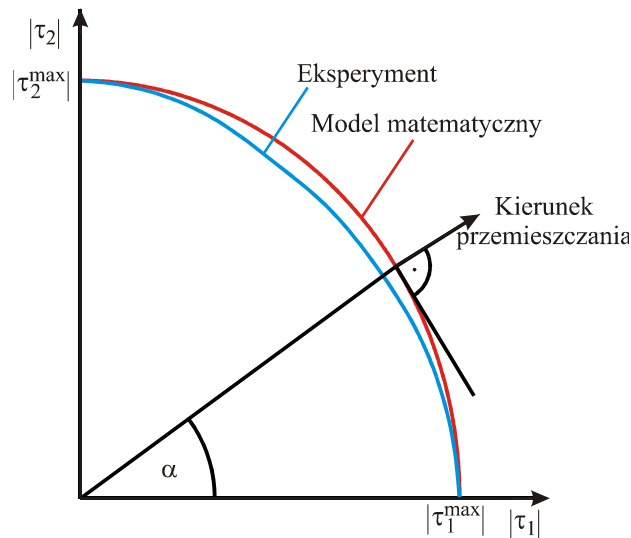
Rys. 5. Model geometryczny narzędzi.

Obserwacje zmian wartości współczynnika tarcia dla blachy stalowej 08J w funkcji kąta obrotu kulki testera (rys. 2) wykazały cykliczność zmian, co potwierdza anizotropię

właściwości trybologicznych blachy. W celu uwzględnienia anizotropii oporów tarcia w modelu numerycznym wykorzystano eliptyczny model tarcia (rys. 6) o równaniu

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu_1^{\max} \cdot \cos \alpha \\ \mu_2 &= \mu_2^{\max} \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad \alpha \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

gdzie μ_1, μ_2 - wartość współczynnika odpowiednio wzdłuż i w poprzek kierunku walcowania blachy, α - kąt między kierunkiem przemieszczania i kierunkiem walcowania blachy.



Rys. 6. Anizotropowy model tarcia.

Anizotropię właściwości mechanicznych blachy w modelu MES określono za pomocą warunku plastyczności Hill'a [11] (4), który jest stosowany do opisu odkształceń plastycznych blach stalowych.

$$\bar{\sigma}^2 = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{zx}^2 + 2M\tau_{yz}^2 + 2N\sigma\tau_{xy}^2 \quad (4)$$

gdzie $\bar{\sigma}$ - naprężenie uplastyczniające, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ - składowe stanu naprężenia wyznaczone w głównych osiach ortotropii: x – równoległej do kierunku walcowania, y - prostopadłej do kierunku walcowania oraz z – normalnej do płaszczyzny blachy. Wartości parametrów F, G, H, L, M, N są równe:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right), \quad G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right), \quad H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right), \\ L &= \frac{1}{2R_{23}^2}, \quad M = \frac{1}{2R_{13}^2}, \quad N = \frac{1}{2R_{12}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

Wartości współczynników naprężeń głównych R_{11}, R_{22}, R_{33} oraz współczynniki naprężeń stycznych R_{12}, R_{23}, R_{31} wyznaczonych dla głównych osi anizotropii x, y, z wynoszą:

$$R_{11} = \frac{\sigma_0}{\sigma_{av}}, \quad R_{22} = \frac{\sigma_{90}}{\sigma_{av}}, \quad R_{33} = \frac{\sigma_N}{\sigma_{av}}, \quad R_{12} = R_{23} = R_{31} = \frac{1}{\sqrt{2R_{45}^2 + 1}} \quad (6)$$

gdzie $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$ - naprężenia uplastyczniające wyznaczone w próbie jednoosiowego rozciągania pasków blachy wyciętych wzdłuż, w poprzek oraz pod kątem 45° względem

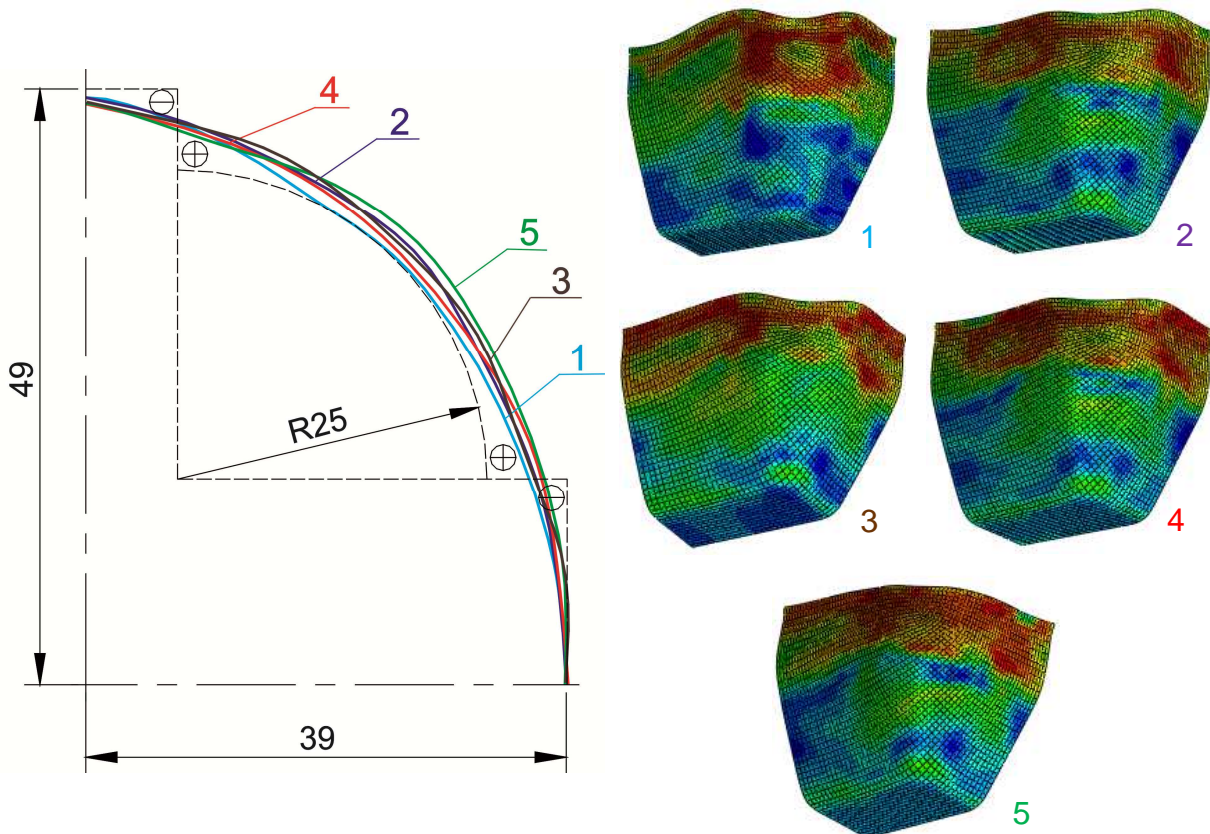
kierunku walcowania, σ_{av} - średnia wartość naprężenia uplastyczniającego wyznaczana według (7), σ_N - naprężenie uplastyczniające na kierunku grubości blachy (8)

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}}{4} \quad (7)$$

$$\sigma_N = \sigma_0 \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{r_0+r_{90}}} \quad (8)$$

gdzie r_0 , r_{45} , r_{90} - współczynniki anizotropii.

Przeprowadzono szereg symulacji numerycznych kształtowania wyłoczek dla różnych kształtów wsadu (1-5 na rys. 7). Obserwując zachowanie się materiału podczas kształtowania korygowano zarys teoretyczny wsadu (1 na rys. 7) wyznaczony analitycznie. Celem analiz był dobór kształtu wsadu zapewniającego otrzymanie wyłoczki o równej wysokości wzdłuż górnej krawędzi zakładając tolerancję różnicy wysokości 0,25 mm. Dla zarysu 5 na rys. 7 różnica wysokości wyłoczki wzdłuż górnej krawędzi wynosi 0,21 mm. Nieprawidłowo dobrany kształt wsadu wpływa na nierównomierność płynięcia materiału głównie w okolicy naroża wyłoczki, gdzie występuje największy gradient naprężeń.



Rys. 7. Optymalizacja kształtu wsadu.

4. PODSUMOWANIE

Anizotropia płaska materiału wyrażająca się odmiennym przebiegiem zależności naprężenie – odkształcenie w zależności od orientacji względem kierunku walcowania powoduje zróżnicowanie stanu odkształceń w poszczególnych częściach wyłoczki. Różny charakter odkształceń blachy w poszczególnych miejscach wyłoczki prowadzi do nierównomiernej zmiany grubości blachy. Ponadto nieosiowosymetryczny kształt wyłoczki

oraz anizotropia oporów tarcia sprawia, że dobór kształtu i wymiarów wsadu zapewniających otrzymanie elementu o zadanej geometrii jest niezwykle trudne. Kształt oraz wymiary wsadu są jednym z najważniejszych czynników wpływających na dokładność wymiarową i geometryczną wytłoczki. Zastosowanie MES stwarza możliwość projektowania procesów wytłaczania blach bez stosowania czasochłonnej i kosztownej metody prób i błędów przy optymalizacji liczby operacji, kształtu wsadu czy doborze odpowiedniego kształtu narzędzi.

LITERATURA

- [1] Stachowicz F., Trzepieciński T., *ANN application for determination of frictional characteristics of brass sheet metal*, Journal of Artificial Intelligence, 1 (2004), 81-90.
- [2] Świątkowski K., *Sposoby oceny wielkości tarcia na powierzchniach kontaktu niemetalicznego materiału modelowego i narzędzia*, Obróbka Plastyczna, 11 (2000) 21-30.
- [3] Cope J. S., *You can draw rectangular shells by following certain rules*, Amer. Machinist, 97 (1953) 156-159.
- [4] Gopinathan V., *Optimum blank profile determination for rectangular deep drawing*, Indian Journal of Technology, 15 (1977), 330-333.
- [5] Iseki H., Murota T., *On the determination of the optimum blank shape of non-axisymmetric drawn cup by the finite element method*, Bulletin JSME, 29 (1986) 1033-1040.
- [6] Gea H. C., Ramamurthy R., *Blank design optimization on deep drawing of square shells*, IIE Transactions, 30 (1998), 913-921.
- [7] Kim N., Kobayashi S., *Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method*, International Journal of Machine Tool Design and Research, 26 (1986) 125-135.
- [8] Trzepieciński T., *3D elasto - plastic FEM analysis of the sheet drawing of anisotropic steel sheet metals*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (2010), 95-106.
- [9] Stachowicz F., Trzepieciński T., *Modelowanie numeryczne procesu kształtowania wytłoczek prostokątnych*, Rudy i Metale Nieżelazne, 10-11 (2005), 582-585.
- [10] *ABAQUS version 6.7 - Theory Manual*, Inc., Hibbit, Karlsson & Sorenson, Dassault Systèmes, 2007.
- [11] Hill R., *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*, Proceedings of the Royal Society of London, A 193 (1948), 281–297.