

Damian KRASKA¹
Tomasz TRZEPIECIŃSKI²

ANALIZA NUMERYCZNA ODKSZTAŁCEŃ BLACHY DC04 W PROCESIE KSZTAŁTOWANIA WYTŁOCZEK OSIOWOSYMETRYCZNYCH

Artykuł zawiera wyniki symulacji numerycznych metodą elementów skończonych procesu formowania wytłoczek cylindrycznych z wykorzystaniem metody jawnej (explicit) całkowania równań ruchu w warunkach kontaktu z tarcie izotropowym i anizotropowym. Przedstawiono wyniki eksperymentalne oraz numeryczne uzyskane w programie Abaqus 6.14-5. Celem badań eksperymentalnych była analiza płynięcia materiału pod wpływem zadawanych obciążeń. Wyniki te wykorzystano do weryfikacji wyników symulacji numerycznych. Stwierdzono, że chociaż anizotropia oporów tarcia decyduje o wysokości występow na krawędzi wytłoczki, wpływ warunków tarcia na ostateczny kształt wytłoczki i rozkład grubości ścianki jest stosunkowo niewielki w porównaniu z wpływem anizotropii materiałowej. Badania wykazały również, że analiza numeryczna uwzględniająca dyskretyzację blachy za pomocą 3-węzłowych trójkątnych elementów typu shell S3R zapewnia najlepsze przybliżenie wyników symulacyjnych do danych eksperymentalnych, gdy uwzględnia się w modelu numerycznym jednocześnie anizotropię materiałową oraz anizotropię oporów tarcia.

Słowa kluczowe: Abaqus, anizotropia, kształtowanie blach, metoda elementów skończonych

1. Wprowadzenie

Projektowanie i analiza operacji kształtowania blachy wymagają znajomości mechanizmów odkształcenia, właściwości materiału i warunków brzegowych. Analityczna analiza procesu formowania jest bardzo złożona, ze względu na silnie nieliniowy charakter równań matematycznych. Z tego powodu modelowanie numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych (MES) jest obecnie szeroko stosowanym podejściem, ponieważ zapewnia uwzględnienie dużej liczby

¹ Damian Kraska, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: kraska94@gmail.com

² Autor do korespondencji/corresponding author: Tomasz Trzepieciński, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651714, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

parametrów technologicznych, a czas trwania analizy zależy przede wszystkim od rodzaju i liczby elementów skończonych.

Dokładność wyników numerycznych jest uzależniona od kilku parametrów, w tym od typu elementu, modelu materiału i warunków brzegowych. Poprawność modelu materiałowego i poprawność eksperymentalnego wyznaczania właściwości materiału są jednym z najważniejszych elementów koniecznych do poprawnego przeprowadzenia modelowania MES. Do symulacji procesów kształtowania blach najczęściej stosuje się elementy membranowe nieprzenoszące momentów gnących, elementy typu shell [m.in. 1, 2], elementy typu solid [m.in. 3, 4] oraz elementy hybrydowe solid-shell [5]. Zastosowanie siatki elementów skończonych typu shell pozwala na uzyskanie odpowiedniej dokładności obliczeń przy jednoczesnej oszczędności w postaci skrócenia czasu obliczeń [6]. Gdy materiał wykazuje właściwości anizotropowe, tj. wartość parametrów materiału zależy od orientacji względem kierunku walcowania arkusza, nieprawidłowy dobór kryterium plastyczności może nie odzwierciedlać właściwie złożonego zachowania materiału. Zniekształcenie kształtu powierzchni plastyczności ze względu na stan mikrostruktury materiału nosi nazwę anizotropii plastycznej (normalnej lub płaskiej). Anizotropia normalna, będąca podstawowym parametrem blach głębokotłocznych charakteryzuje się wpływem tekstury krystalograficznej na odkształcenie w kierunku normalnym do płaszczyzny blachy. Anizotropia płaska występuje, gdy właściwości mechaniczne w płaszczyźnie blachy zmieniają się wraz z kierunkiem pomiaru. Z technologicznego punktu widzenia o możliwości kształtowania blachy decydują również wartości promienia zaokrąglenia matrycy oraz stempla. Promień zaokrąglenia krawędzi matrycy powinien być możliwie duży. Przy kształtowaniu wyłoczek osiowosymetrycznych, w zależności od stosunku grubości materiału g do średnicy półwyrobu D , wartość promienia zaokrąglenia krawędzi matrycy dla pierwszej operacji ciągnięcia przyjmuje się z zakresu 2-6 g . Odpowiedni dobór promienia zaokrąglenia krawędzi stempla umożliwia zmniejszenie granicznej wartości współczynnika odkształcenia. W wytłaczaniu wielooperacyjnym stosowanie małych promieni zaokrąglenia krawędzi stempla powoduje znaczne zmniejszenie grubości materiału w przekroju niebezpiecznym ze względu na pękanie [7]. Według Romanowskiego [7] promień zaokrąglenia stempla należy dobierać z zakresu 2-4 g .

Liczni autorzy zaproponowali wiele warunków fizycznych, które muszą być spełnione, aby materiał anizotropowy przeszedł ze stanu sprężystego w stan plastyczny. Głównym celem tych kryteriów, w odniesieniu do blach, jest uwzględnienie anizotropii wywołanej procesem walcowania. Najważniejsze z nich to równania opracowane przez wymienionych dalej autorów (w nawiasach podano rok opracowania/publikacji): Barlat (1989, 1991, 1994, 1996, 2003), Bassani (1977), Budiansky (1984), Ferron (1994), Gotoh (1977), Hill (1948, 1979, 1990, 1993), Logan (1983), Montheillet (1991), Vegter (2006). Szczegółowe omówienie wymienionych kryteriów oraz szeroki przegląd innych warunków plastyczności można znaleźć, między innymi, w pracy Banabica [8].

Metoda elementów skończonych (MES) jest, obok metody elementów dyskretnych, jedną z najczęściej stosowanych metod numerycznych do symulacji procesów kształtowania blach. Do symulacji konwencjonalnych procesów przeróbki plastycznej metali oraz procesów odbywających się w warunkach dużych prędkości odkształcenia metali znalazły zastosowanie takie programy, jak: Abaqus, Ansys, AutoForm, DynaForm, LS-Dyna oraz MSC.Marc. Istotą MES jest zastąpienie modelu ciągłego obiektu modelem dyskretnym, który przyjmuje postać układu równań algebraicznych. Podczas obliczeń dyskretyzacji podlegają następujące wielkości fizyczne: obciążenia, przemieszczenia, naprężenia, odkształcenia, które są reprezentowane za pomocą funkcji ciągłych. Matematyczny model ośrodka ciągłego otrzymany metodą elementów skończonych stanowi zagadnienie opisane układem równań różniczkowych zwyczajnych z odpowiednimi warunkami brzegowymi, których rozwiązanie wymaga przybliżonego całkowania tych równań względem czasu. Programy obliczeniowe wykorzystujące MES, z jawnym całkowaniem równań ruchu względem czasu stosowanym w niniejszej pracy, są bardzo popularne do symulacji procesów kształtowania blach [9, 10].

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych metodą elementów skończonych kształtowania wytłoczek cylindrycznych. Celem badań eksperymentalnych była analiza płynięcia materiału w celu wykorzystania tych wyników do weryfikacji wyników symulacji numerycznych. W modelach MES uwzględniających metodę jawną całkowania równań ruchu wzięto pod uwagę różne podejścia do modelowania materiału oraz zjawisk kontaktowych (izotropię oraz anizotropię).

2. Badania eksperymentalne

Wytłoczki osiowosymetryczne zostały ukształtowane z blachy stalowej DC04 o grubości 1 mm. Wartości podstawowych parametrów mechanicznych tego materiału zostały określone w próbie jednoosiowego rozciągania, zgodnie z procedurą opisaną w PN-EN ISO 6892-1:2010 [11]. Próbkę do określenia właściwości mechanicznych wycięto pod kątem 0° , 45° i 90° w stosunku do kierunku walcowania blachy. Określono następujące parametry (tab. 1.): wytrzymałość na rozciąganie R_m , umowną granicę plastyczności $R_{p0,2}$, wydłużenie A_{50} , wykładnik umocnienia n , współczynnik umocnienia K i współczynnik anizotropii Lankforda r . Rozciągnięto po pięć próbek dla każdej orientacji (0° , 45° i 90°) i określono średnie wartości parametrów (tab. 1.). W nawiasach podano odchylenia standardowe wartości parametrów mechanicznych.

Współczynnik anizotropii normalnej r , nazywany współczynnikiem Lankforda, jest określany jako stosunek odkształcenia rzeczywistego na szerokości próbki do odkształcenia rzeczywistego na grubości próbki poddanej jednoosiowemu rozciąganiu.

Tabela 1. Podstawowe parametry mechaniczne blachy stalowej DC04

Table 1. Basic mechanical parameters of DC04 steel sheet

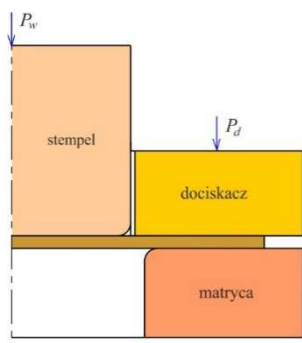
Orientacja próbki	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50}	C [MPa]	n	r
0°	176 (5,53)	301 (6,18)	0,42 (1,08)	500 (8,46)	0,19 (0,008)	1,81 (0,08)
45°	180 (11,23)	293 (0,38)	0,39 (0,36)	497 (9,97)	0,17 (0,005)	1,88 (0,06)
90°	192 (13,27)	315 (0,71)	0,41 (0,72)	477 (10,12)	0,17 (0,007)	1,40 (0,07)

W praktyce pomiary wydłużenia odcinka pomiarowego są obarczone mniejszym błędem niż pomiary grubości blachy, dlatego korzystając z prawa stałej objętości materiału przed i po odkształceniu, wartość współczynnika anizotropii r można zapisać jako:

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{L_0 b_0}{L b}} \quad (1)$$

gdzie: b_0 , b – odpowiednio początkowa i końcowa (po odkształceniu) szerokość próbki; L_0 , L – długość próbki przed i po odkształceniu do uzyskania wymaganego wydłużenia.

Cylindryczne wytłoczki zostały wykonane przy użyciu tłoczni, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Wytłoczki bez kołnierza zostały ukształtowane z krążków o średnicy 56 mm. Zastosowano dociskacz, aby zapobiec fałdowaniu się kołnierza wytłoczki. Siła docisku dociskacza jest wymuszana przez przykręcenie płyty dociskowej do korpusu tłoczni za pomocą klucza dynamometrycznego. Zwiększenie momentu klucza dynamometrycznego o $M = 15 \text{ N}\cdot\text{m}$ powoduje wzrost nominalnej siły nacisku o $P_d = 1 \text{ kN}$. Średnica cylindrycznego stempla wynosiła 29,3 mm, a średnica otworu w matrycy – 32,3 mm. Promienie zaokrągleń krawędzi stempla i matrycy były równe $\rho_s = \rho_m = 3 \text{ mm}$.



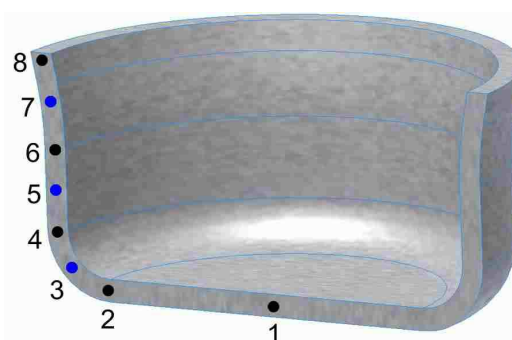
Rys. 1. Schemat tłoczni

Fig. 1. Schematic of a stamping tool

Kształtowanie wytłoczek zrealizowano w temperaturze pokojowej za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Wyniki modelowania numerycznego zweryfikowano na podstawie pomiarów grubości ścianek wytłoczek w charakterystycznych punktach (rys. 2.). Wytłoczki przecięto wzdłuż kierunku walcowania blachy za pomocą piły mechanicznej w celu zminimalizowania wpływu ciepła na strukturę przekroju poprzecznego materiału. Następnie powierzchnie przecięcia szlifowano za pomocą papieru ściernego, kolejno o ziarnistości P80, P200, P800 i P2000. Na podstawie zdjęć zmian grubości (rys. 3.), wykonanych za pomocą urządzenia przez Alicona InfiniteFocusG4, pomiar grubości ścianek wytłoczek został przeprowadzony w module 2DImageMeasurement.

Rys. 2. Lokalizacja charakterystycznych punktów pomiaru grubości ścianki wytłoczki

Fig. 2. The location of the characteristic points of drawpiece wall thickness measurement



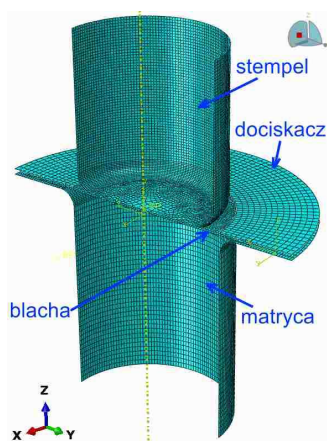
3. Modelowanie numeryczne

Model numeryczny 3D formowania wytłoczek został przygotowany w programie Abaqus 6.14-5, używanym do komputerowej analizy procesów kształtowania blach [2, 12]. Geometria narzędzi w symulacji numerycznej (rys. 3.) odpowiadała rzeczywistej geometrii tłoczniaka.

Powierzchnię narzędzi zdyskretyzowano za pomocą czterowęzłowych, nieodkształcalnych, czworokątnych elementów typu R3D4. Aby określić optymalne parametry modelu numerycznego, poddano analizie następujące zmienne cechy modelu:

- gęstość siatki materiału blachy: 4475, 11160, 30876 elementów,
- typ elementów dyskretyzujących blachę: S3R, S4, S4R, S4RS,
- model materiałowy: izotropowy, anizotropowy,
- model tarcia: izotropowy, anizotropowy.

Do opisu zachowania się materiału zastosowano dwa podejścia oparte na modelu sprężysto-plastycznym. W pierwszym podejściu do zdefiniowania materiału izotropowego zastosowano kryterium plastyczności według von Misesa [13].



Rys. 3. Model numeryczny procesu wyłaczania blachy

Fig. 3. Numerical model of the sheet stamping process

W drugim modelu numerycznym anizotropię materiału określono za pomocą kryterium plastyczności Hilla (1948) [14], które jest powszechnie stosowane do symulacji kształtowania blach stalowych. Kryterium Hilla (1948) jest rozwinięciem funkcji izotropowej von Misesa i jest wyrażone dla składowych stanu naprężenia w układzie kartezjańskim jako:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(F(\sigma_{22} - \sigma_{33}))^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (2)$$

gdzie $\bar{\sigma}$ jest naprężeniem zredukowanym, a indeksy 1, 2, 3 odpowiadają odpowiednio kierunkowi walcowania, kierunkowi poprzecznemu względem kierunku walcowania i kierunkowi normalnemu do powierzchni arkusza. Stałe F , G , H , L , M oraz N określają stan anizotropii materiału i są równe:

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right), \quad H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (3)$$

$$L = \frac{3}{2R_{23}^2}, \quad M = \frac{3}{2R_{13}^2}, \quad N = \frac{3}{2R_{12}^2}$$

Parametry R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} oraz R_{23} zdefiniowano w programie Abaqus na podstawie obliczeń przeprowadzonych w programie MSC.Marc, uwzględniających dane materiałowe (tab. 1.). Właściwości sprężyste materiału blachy określono przez zdefiniowanie wartości następujących parametrów: moduł Younga $E = 2,1$ GPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,3$. Gęstość materiału wynosiła $\rho = 7860$ kg·m⁻³. Umocnienie odkształceniowe, o charakterze izotropowym, zaimplementowano w modelu numerycznym, wykorzystując potęgowe prawo Hollomona:

$$\sigma = K\varphi^n \quad (4)$$

z parametrami określonymi w tab. 1.

Zastosowano pięć punktów całkowania na grubości blachy. Ta liczba punktów całkowania jest wystarczająca do uzyskania akceptowalnej dokładności rozwiązania [15]. Bezpośrednie całkowanie jawne wykorzystywano w modelu do analizy nieliniowości wynikających z dużych przemieszczeń, nieliniowości materiału i nieliniowości warunków brzegowych. W procedurze jawnej zakłada się spełnienie równań ruchu z początku kroku czasowego i ekstrapoluje się rozwiązanie na czas Δt . Algorytmy całkowania jawnego wykorzystują następującą postać dyskretnych równań ruchu:

$$M \cdot \ddot{r} = R - F \quad (5)$$

gdzie: M – macierz mas, r – wektor przemieszczeń międzywęzłowych, F oraz R – wektory wewnętrznych i zewnętrznych sił węzłowych.

Podczas rozwiązywania równania (4) dla czasu t_n wyznacza się rozwiązanie dla chwili następnej $t_{n+1} = t_n + \Delta t$, najczęściej opierając się na algorytmie różnic centralnych.

Aby opisać warunki kontaktu między blachą a narzędziami, przyjęto klasyczny model tarcia według prawa Coulomba, w którym relacja między naprężeniem tarcia τ i naprężeniami tarcia σ jest wyrażona jako:

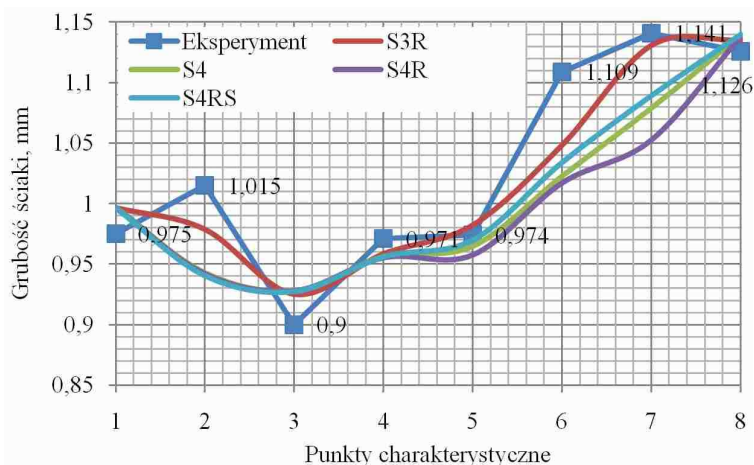
$$\tau = \mu\sigma \quad (6)$$

Anizotropowy eliptyczny model tarcia został zaimplementowany przez określenie różnych współczynników tarcia w dwóch prostopadłych kierunkach na powierzchni styku. Aby zastosować model tarcia anizotropowego wbudowany w programie Abaqus, wprowadzono dwa współczynniki tarcia ($\mu = 0,12$ i $\mu = 0,15$). Metodologia badawcza oraz urządzenie do określania współczynnika tarcia anizotropowego zostały opisane we wcześniejszych pracach autorów [m.in. 2, 16]. W izotropowym modelu tarcia uwzględniono średni współczynnik tarcia $\mu = 0,135$.

4. Wyniki

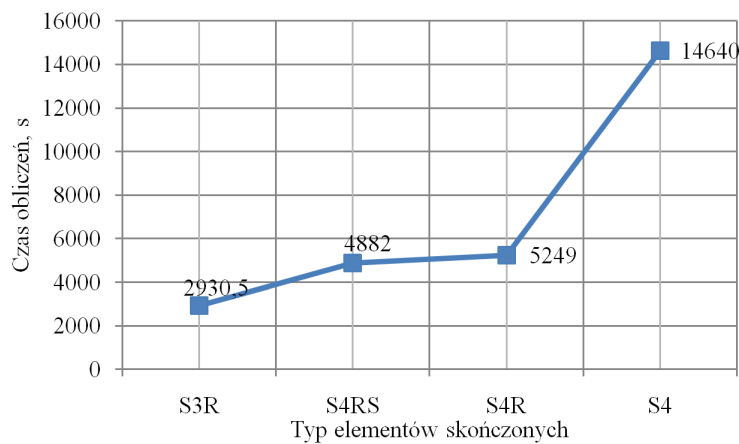
W odniesieniu do wpływu typu elementu skończonego na dokładność przewidywania zmian grubości ścianki wytłoczki najlepsze przybliżenie danych eksperymentalnych zaobserwowano dla elementów typu S3R. Najmniejszą wartość błędów prognozowania grubości obserwuje się na górnej krawędzi wytłoczki (pkt 8 na rys. 4.). Przedstawione na rys. 5. rozkłady grubości blachy dotyczą wytłoczki kształtowanej z krążka o średnicy 56 mm.

Typ elementu skończonego znacząco decyduje o czasie obliczeń. Czas obliczeń dla modelu zawierającego elementy typu S4 jest prawie pięciokrotnie dłuższy niż w przypadku symulacji modelu blachy dyskretyzowanej elementami typu S3R (rys. 5.). Przedstawione na rys. 6. rozkłady grubości ścianki wytłoczek świadczą o tym, że o ile typ elementu jest decydujący, jeżeli chodzi o czas obliczeń, o tyle zarówno rozkład, wartość maksymalnej grubości ścianki oraz miejsce jej występowania są bardzo zbliżone do analizowanych typów elementów.



Rys. 4. Rozkład grubości ścianek wytłoczek cylindrycznych wzdłuż kierunku walcowania blachy

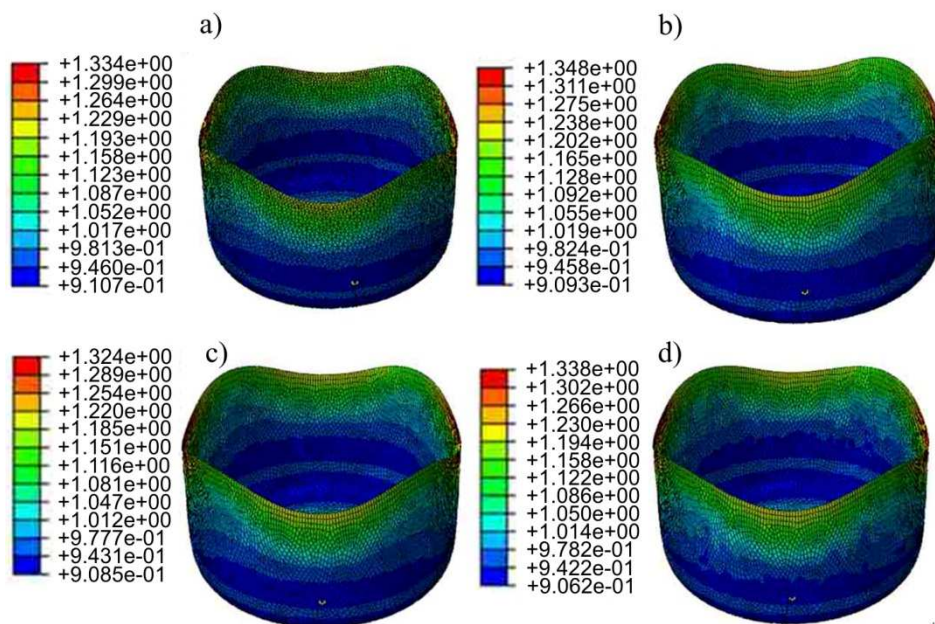
Fig. 4. Distribution of wall thickness of a cylindrical drawpiece along the sheet rolling direction



Rys. 5. Czas trwania symulacji dla poszczególnych typów elementów skończonych

Fig. 5. Duration of calculation for specific types of finite elements

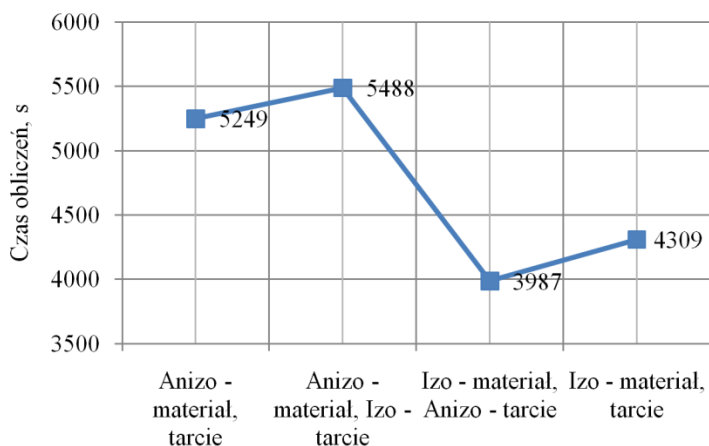
Jak wcześniej wykazano, najlepsze przybliżenia danych eksperymentalnych zapewnia wykorzystanie elementów typu S3R, dla których przeprowadzono analizę wpływu modelu materiału i modelu tarcia na zmianę rozkładu grubości ścianki. Uwzględnienie w modelu numerycznym izotropowych właściwości materiałowych blachy, w połączeniu z obydwoma modelami tarcia, powoduje znaczne przeszacowanie grubości ścianki wytłoczki w obszarze kołnierza. Najlepsze dopasowanie danych numerycznych do danych eksperymentalnych jest widoczne dla strefy ścianki walcowej bocznej, krawędzi wytłoczki oraz punktu leżącego w środku dna wytłoczki.



Rys. 6. Rozkład grubości wytłoczki osiowosymetrycznej z podziałem na typ elementów: a) S3R, b) S4, c) S4R, d) S4RS

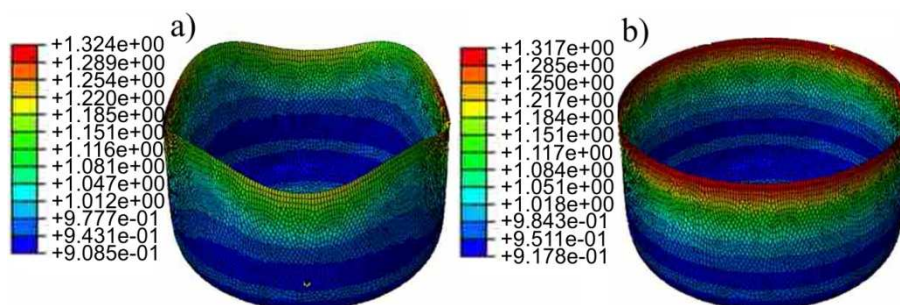
Fig. 6. Distribution of wall thickness of a drawpiece in relation to element type: a) S3R, b) S4, c) S4R, d) S4RS

Uwzględnienie w symulacji anizotropowości materiału, w połączeniu z obydwoma modelami tarcia, wymaga większej mocy obliczeniowej komputera i zajmuje najwięcej czasu (rys. 7.). Anizotropia materiałowa jest decydującym czynnikiem z punktu widzenia możliwości zasymulowania tworzenia się uch wytłoczki (rys. 8.). Założenie modelu anizotropowego tarcia przy modelu izotropowym materiału nie zapewnia odwzorowania płynięcia materiału zgodnego z eksperymentem. Wysokość wytłoczki jest bardzo zbliżona na obwodzie wyrobu. Można więc stwierdzić, że założenie modelu anizotropowego materiału z izotropią tarcia jest rozwiązaniem bardziej poprawnym niż sytuacja odwrotna, uwzględniająca model izotropowy materiału z anizotropią tarcia.



Rys. 7. Wpływ konfiguracji modeli materiału i tarcia na czas obliczeń

Fig. 7. The effect of friction and material models configuration on the computation time



Rys. 8. Rozkład grubości wytłoczki osiowosymetrycznej z podziałem na charakterystykę materiału i tarcia: a) model anizotropowy materiału i tarcia, b) model izotropowy materiału i anizotropowy tarcia

Fig. 8. The distribution of wall thickness of a cylindrical drawpiece for different modeling strategies: a) anisotropy of both material and friction, b) isotropic material and frictional anisotropy

5. Podsumowanie

Właściwa analiza numeryczna procesu kształtowania blachy wymaga uwzględnienia wielu nieliniowości związanych między innymi z zachowaniem się materiału, w tym ze zjawiskiem utwardzania odkształceniowego oraz warunkami brzegowymi. Badania wielu autorów koncentrują się głównie na odpowiednim doborze modelu materiałowego blachy. Badania kształtowania cylindrycznych wytłoczek przeprowadzone w tym artykule potwierdzają jednak, że aby dokładnie przewidzieć płynięcie materiału, należy uwzględnić również anizotropię oporów tarcia, wynikającą z kierunkowości topografii powierzchni. Choć

anizotropia oporów tarcia wpływa na wysokość powstających występów na krawędzi wytłoczki, wpływ zjawiska tarcia na nierównomierne płynięcie materiału blachy na obwodzie wytłoczki jest stosunkowo niewielki w porównaniu z anizotropią materiału. Jawna procedura całkowania równań ruchu w warunkach nieliniowości związanych z dużymi przemieszczeniami, właściwościami materiału i warunkami brzegowymi wykazała, że trójwymiarowy trójkątny element S3R typu shell, który jest zdegenerowaną wersją elementu S4R, zapewnia najlepszą prognozę grubości ścianki wytłoczki. Wyniki badań muszą zostać w przyszłości potwierdzone w odniesieniu do przewidywania płynięcia blachy dla różnych materiałów anizotropowych i modeli tarcia.

Literatura

- [1] Bergman G., Oldenburg M.: A finite element model for thermomechanical analysis of sheet metal forming, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 59 (2004) 1167-1186.
- [2] Trzepieciński T., Gelgele H.L.: Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method, *Int. J. Mater. Form.*, 4 (2011) 357-359.
- [3] Mataix V., Rossi R., Oñate E., Flores F.G.: Advanced solid elements for sheet metal forming simulation, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 734 (2016) 032128.
- [4] Chung W., Kim B., Lee S., Ryu H., Joun M.: Finite element simulation of plate or sheet metal forming processes using tetrahedral MINI-elements, *J. Mech. Sci. Tech.*, 28 (2014) 237-243.
- [5] Wang P., Chalal H., Abed-Meraim F.: Explicit dynamic analysis of sheet metal forming processes using linear prismatic and hexahedral solid-shell elements. *Eng. Computation*, 34 (2017) 1413-1445.
- [6] Feresthteh-Saniee F., Montazeran M.H.: A comparative estimation of the forming load in the deep drawing process, *J. Mater. Process. Tech.*, 140 (2003) 555-561.
- [7] Romanowski W.P.: *Tłoczenie na zimno. Poradnik*, WNT, Warszawa 1962.
- [8] Banabic D.: *Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
- [9] Bambach M., Hirt G.: Error analysis in explicit finite element analysis of incremental sheet forming, *AIP Conf. Proc.*, 908 (2007) 859-864.
- [10] Chen L.: Comparisons of explicit and implicit finite element methods for sheet Metal forming, *Adv. Mater. Res.*, 936 (2014) 1836-1839.
- [11] PN-EN ISO 6892-1: 2010. *Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*.
- [12] Li P., He J., Liu Q., Yang M., Wang Q., Yuan Q., Li Y.: Evaluation of forming forces in ultrasonic incremental sheet metal forming, *Aerosp. Sci. and Technol.*, 63 (2017) 132-139.
- [13] Mises R.: *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*, nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1913 (1913) 582-592.
- [14] Hill R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proc. Royal Soc.*, A193 (1948) 281-297.

- [15] Larsson M.: Computational characterization of drawbeads: A basic modelling method for data generation, *J. Mater. Process. Tech.*, 209 (2009) 376-386.
- [16] Trzepieciński T.: 3D elasto-plastic FEM analysis of the sheet drawing of anisotropic steel sheet, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 10 (2010) 95-106.

NUMERICAL ANALYSIS OF DEFORMATIONS OF DC04 SHEET METAL IN THE AXISYMMETRIC STAMPING PROCESS

Abstract

This article presents the results of FEM (finite element method) numerical simulations of forming cylindrical drawpieces using the explicit integration procedure in the presence of contact conditions with isotropic and anisotropic friction. The experimental and numerical results obtained in the Abaqus 6.14-5 program are presented. The aim of the experimental research was to analyse material flow in the forming process. These results were used to verify the results of numerical simulations. It has been found that although frictional resistance anisotropy determines the height of the ears of a drawpiece, the influence of the frictional conditions on the final shape of the drawpiece and wall thickness distribution is relatively small compared to the effect of material anisotropy. The research has also shown that numerical analysis with the workpiece discretised by 3-node triangular shell elements S3R provides the best approximation of simulation results to experimental data in the conditions when numerical anisotropy and anisotropy of frictional resistance are included in the numerical model.

Keywords: Abaqus, anisotropy, sheet metal forming, finite element method

DOI: 10.7862/rm.2018.13

Przesłano do redakcji: 01.04.2018

Przyjęto do druku: 26.04.2018