

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Analiza numeryczna odkształceń i naprężeń w procesie wyciskania materiału perforowanego

JAN PIWNIK¹, MACIEJ LESZCZYŃSKI²

¹ POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ZAKŁAD INŻYNIERII PRODUKCJI

² CENTRALNY OŚRODEK BADAWCZO ROZWOJOWY APARATURY BADAWCZEJ I DYDAKTYCZNEJ
COBRABiD sp. z o.o.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, tarcie, wyciskanie, materiały perforowane

STRESZCZENIE

Zaprezentowano analizę odkształceń powstających w procesie numerycznego wyciskania na zimno przy użyciu programu Deform 3D perforowanych materiałów ze stopu aluminium. Do analizy przyjęto model materiału sztywno-plastyczny ze wzmocnieniem. Przeanalizowano wpływ współczynnika tarcia na naprężenia i odkształcenia oraz parametr uszkodzenia w próbkach perforowanych z otworami w osi symetrii próbki. Wyniki analizy zestawiono w postaci rozkładów połowych. Dokonano analizy przy wyciskaniu próbek perforowanych bez tarcia, jak również w jego obecności. Zestawiono siły wyciskania dla poszczególnych współczynników tarcia w funkcji przemieszczenia stempla.

Numerical analysis of strain and stress during perforated material extrusion process

Keywords: numerical modeling, friction, extrusion, perforated materials

ABSTRACT

Analysis of strain during numerical cold extrusion of aluminum alloy using Deform 3D was presented. The rigid-plastic material model was applied. The influence of the friction coefficient on effective stress, effective strain and damage parameters in perforated specimens with holes located on the symmetry axis were analysed. Results of the analysis were presented as effective stress, effective strain and damage parameter distributions. The analysis was carried out for perforated specimens extrusion with and without friction. Forces of extrusion processes were compared on the graph as a function of extrusion ram displacement for each friction coefficient value.

1. WSTĘP

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu tarcia na proces wyciskania materiałów perforowanych. Wprowadzenie nieciągłości w strukturze materiału zmienia sposób deformacji materiału oraz rozkłady sił wyciskania [1-10]. Do analizy przyjęto próbkę z płaskiego bloku wykonanego ze stopu aluminium osłabionego szeregiem otworów w osi symetrii. Analizowano wpływ współczynnika tarcia na pola naprężeń efektywnych oraz pola odkształceń ekwiwalentnych w obszarach deformacji plastycznej w płaskim stanie odkształcenia. Przebadano wpływ współczynnika tarcia na parametr uszkodzenia. Zbadano wpływ tarcia na siły działające na stempel podczas wyciskania. Zagadnienia wpływu współczynnika tarcia w procesach wyciskania poruszano uprzednio w pracach [1-3, 6-7, 10-14]. Do analizy przyjęto model materiału sztywno-plastyczny ze wzmocnieniem. W analizie posłużono się programem Deform 3D wykorzystującym metodę elementów skończonych.

2. METODA, PRÓBK I MATERIAŁ

Na Rysunku 1 pokazano schemat wyciskania w próbce niezdeformowanej z otworami o średnicy 5 mm. Wygenerowano siatkę modelu składającą się z około 80 000 czworościennych elementów skończonych. Próbkę wyciskano przez otwór szerokości 15 mm. Wyciskanie współbieżne realizowano „na zimno” z prędkością posuwu stempla 1 mm/s. Jako materiał badanych próbek przyjęto aluminium EN AW-2024 wg PN EN 573-3 (odpowiednik PA7 wg PN-79/H-82160) z bazy danych programu o następujących właściwościach mechanicznych: umowna granica plastyczności $\sigma_{p0,2}=270$ MPa, wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_m=390$ MPa, moduł Younga $E=68900$ MPa, współczynnik Poissona $\nu=0,33$, współczynnik przewodnictwa ciepła $180,2$ W/(m·K), pojemność cieplna $2,433$ J/(K·m³), emisyjność $0,7$. Charakterystykę materiałową EN AW-2024 dla założonego modelu materiału pokazano na Rysunku 2. Tarcie określono z zależności (1):

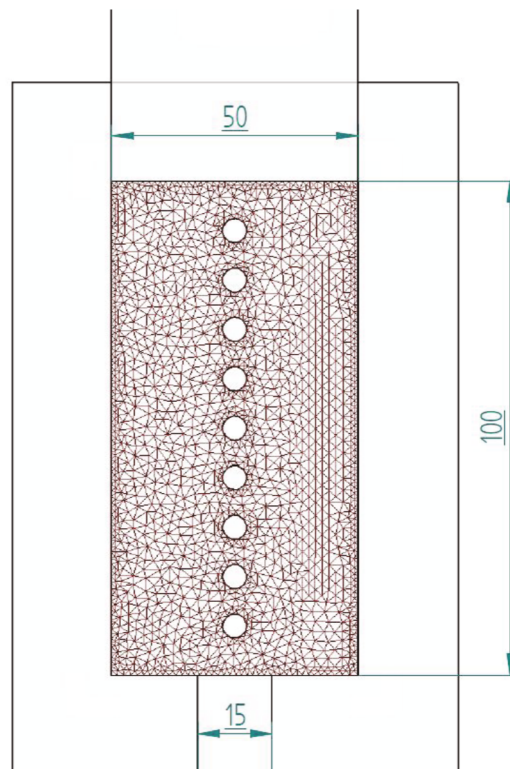
$$\tau=f \cdot k \quad (1)$$

gdzie:

f – współczynnik tarcia

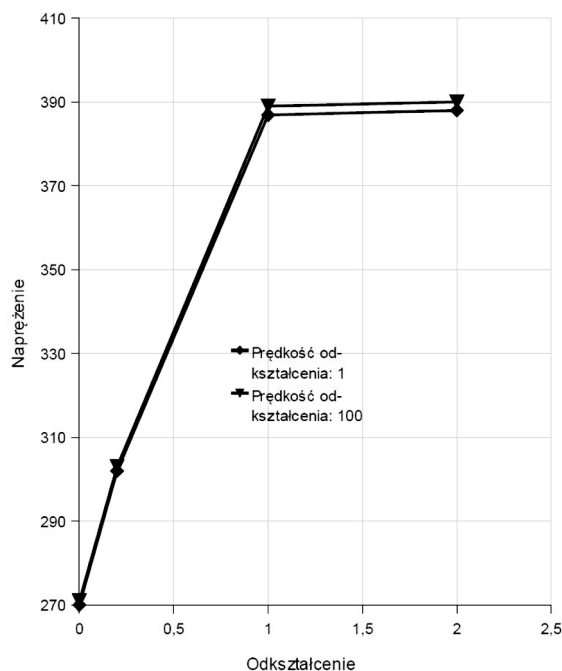
k – tnące naprężenie uplastyczniające

Tarcie jest w tym przypadku naprężeniem tnącym na kontakcie matrycy lub stempla z wyciskany materiałem.



Rysunek 1 Siatka elementów skończonych wygenerowana przez program Deform 3D w próbce z otworami o średnicy 5 mm; schemat stanowiska do analizy

Figure 1 Finite elements net generated by Deform 3D for specimen with 5 mm holes; analysis diagram



Rysunek 2 Charakterystyka materiałowa. Wykres zależności między naprężeniem [MPa] a odkształceniem względnym [%]

Figure 2 Material characteristics. Stress [MPa] - strain [%] curve

3. ANALIZA I WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki analizy porównawczej zestawiono jako:

- wpływ tarcia na naprężenia efektywne;
- wpływ tarcia na odkształcenia ekwiwalentne;
- wpływ tarcia na siły działające na stempel;
- wpływ tarcia na parametr uszkodzenia.

Naprężenia efektywne (w literaturze polskiej nazywane naprężeniami zredukowanymi, naprężeniami zredukowanymi Hubera-Misesa, a w angielskiej naprężeniami efektywnymi lub naprężeniami von Misesa) są funkcją trzech składowych normalnych i trzech tnących zorientowanych w kartezjańskim układzie współrzędnych o osiach oznaczonych x, y, z (2).

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} \quad (2)$$

Do wyznaczania naprężeń efektywnych Deform 3D posługuje się uproszczoną formą równania (2) przy lokalnie zorientowanym (w punkcie) układzie współrzędnych o osiach oznaczonych 1, 2, 3. Możliwe jest takie zorientowanie lokalnego układu współrzędnych, w którym naprężenia tnące są równe zero, natomiast niezerowe mogą być tylko naprężenia normalne. Zabieg ten nie zmienia wartości naprężeń efektywnych. Wówczas naprężenia efektywne opisuje zależność (3).

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3)$$

Podobnie jak w przypadku naprężeń efektywnych, Deform 3D posługuje się lokalnym układem współrzędnych o osiach oznaczonych 1, 2, 3, który pozwala na wyznaczenie odkształceń ekwiwalentnych (w literaturze polskiej określanymi także jako odkształcenia zredukowane Hubera-Misesa) w postaci zależności tylko głównych składowych tensora odkształceń, przy czym pozostałe składowe są równe zero (4).

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (4)$$

W celu umożliwienia analizy wyników posłużono się połowymi rozkładami wartości naprężeń efektywnych oraz odkształceń ekwiwalentnych. Wartości te naniesiono w postaci kolorów na wyciśnięte próbki. Poszczególnym kolorom przypisane są odpowiednie wartości naprężeń lub od-

kształceń. Dzięki takiemu zabiegowi w łatwy sposób zlokalizowano obszary, gdzie występują największe wartości naprężeń oraz odkształceń.

Do wyznaczania parametru uszkodzenia posłużono się modelem uszkodzenia Cockrofta-Lathama opisanym równaniem (5):

$$D = \int \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_p} d\varepsilon \geq C_{CL} \quad (5)$$

gdzie:

D – bezwymiarowa energia odkształcenia związana z rozciąganiem;

σ_p – granica plastyczności;

σ_{\max} – maksymalna wartość naprężenia głównego w kierunku rozciągania;

C_{CL} – stała materiałowa (zależna od rodzaju materiału).

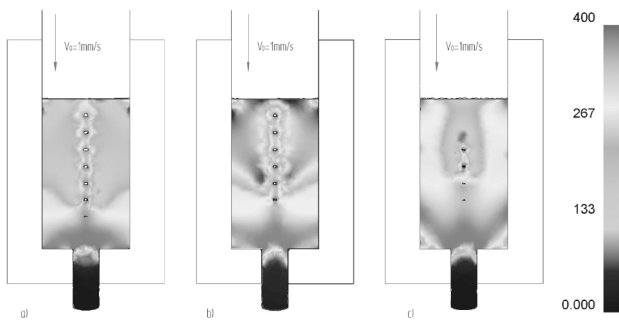
Zgodnie z tym kryterium pęknięcie (rozdzielenie materiału) następuje wówczas, gdy wartość całki osiągnie wartość krytyczną C_{CL} . Pęknięcie plastyczne następuje, gdy praca wykonana przez maksymalne naprężenie σ_{\max} osiągnie wartość krytyczną C_{CL} . Wartość σ_p w tym przypadku jest równa wartości umownej granicy plastyczności $\sigma_{p0,2} = 270$ MPa.

3.1 Wpływ tarcia na naprężenia efektywne

Rozkłady naprężeń efektywnych dla próbki perforowanej z otworami o średnicy 5 mm zestawiono na Rysunku 3. Widać wyraźny wpływ tarcia na kształty i zasięg obszaru uplastycznienia. Zasięg obszaru uplastycznienia pokrywa się z obszarem występowania naprężeń efektywnych większych lub równych granicy plastyczności (w tym przypadku umownej granicy plastyczności równej 270 MPa). Intensywność uplastycznienia rośnie ze wzrostem współczynnika tarcia. Największe naprężenia zaobserwowano na kontakcie próbki z matrycą, w regionach sąsiadujących z otworem wypływowym oraz w osi symetrii w otoczeniu otworów.

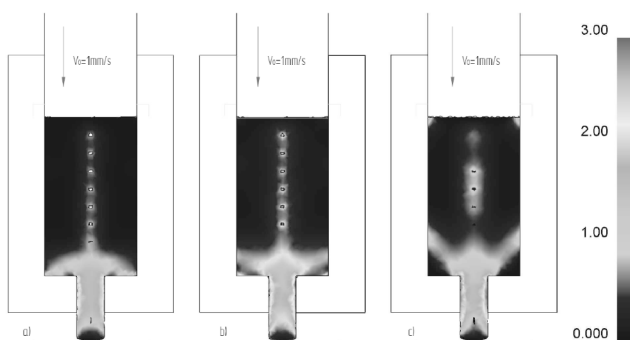
3.2 Wpływ tarcia na odkształcenia ekwiwalentne

Na Rysunku 4 zestawiono rozkłady odkształceń ekwiwalentnych dla próbki perforowanej z otworami o średnicy 5 mm w osi próbki na tym samym etapie wyciskania. Rysunek 4a) pokazuje próbkę wyciskaną przy współczynniku tarcia równym zero. Natomiast na Rysunku 4b) i 4c) pokazano próbki wyciskane przy współczynniku tarcia równym odpowiednio 0,2 i 0,8. Widać znaczne różnice w wielkości i kształcie obszaru uplastycznienia



Rysunek 3 Rozkłady naprężeń efektywnych [MPa] w próbkach z jednym rzędem otworów o średnicy 5 mm przy trzech współczynnikach tarcia: a) $f=0$ (bez tarcia); b) $f=0,2$; c) $f=0,8$

Figure 3 Effective stress distributions in specimens without perforations at three friction coefficients: a) $f=0$ (without friction); b) $f=0,2$; c) $f=0,8$



Rysunek 4 Rozkłady odkształceń ekwiwalentnych w próbkach z jednym rzędem otworów o średnicy 5 mm przy trzech współczynnikach tarcia: a) $f=0$ (bez tarcia); b) $f=0,2$; c) $f=0,8$

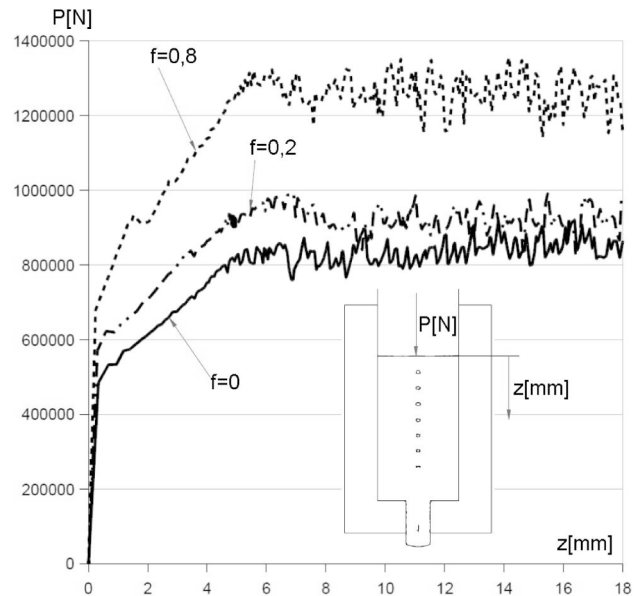
Figure 4 Effective strain distributions in specimens without perforations at three friction coefficients: a) $f=0$ (without friction); b) $f=0,2$; c) $f=0,8$

przy różnych współczynnikach tarcia. Największe odkształcenia plastyczne obserwuje się w rejonie otworu wpływowego oraz w osi symetrii próbki w obszarze perforacji (jasne kolory na rozkładach połowych odpowiadają maksymalnym odkształceniom). Dla lepszego zobrazowania wyników skala maksymalnych odkształceń ekwiwalentnych została zawężona do wartości 3. Wówczas wszystkie odkształcenia większe niż 3 będą wyświetlane na połowym rozkładzie jako maksymalne. W pełnym zakresie obserwuje się deformacje o wartościach od 6 do 8.

3.3 Wpływ tarcia na rozkłady sił

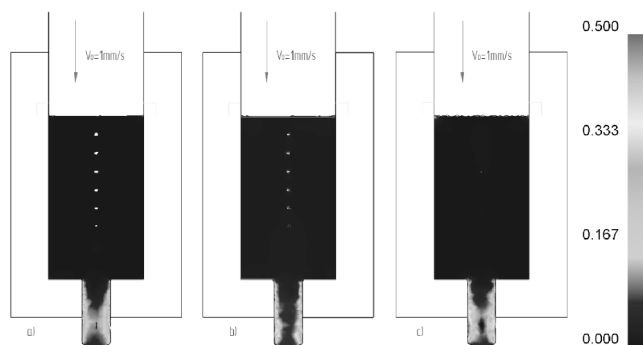
Na Rysunku 5 pokazano wpływ tarcia na siły wyciskania. Zestawienia dokonano w postaci przebiegów zależności wartości siły wyciskania w funkcji przemieszczenia stempla. Wyznaczono przebiegi dla próbek perforowanych z otworami o średnicy

5 mm w osi próbki. Obserwuje się wzrost siły wyciskania wraz ze wzrostem wartości współczynnika tarcia. Dla próbki wyciskanej przy współczynniku tarcia równym zero wartość siły w przybliżeniu jest równa 800-850 kN. Natomiast przy maksymalnym badanym współczynniku tarcia wartość ta utrzymuje się na poziomie 1250-1300 kN.



Rysunek 5 Wpływ tarcia na zależność siły nacisku [N] od przemieszczenia stempla [mm] w próbkach z jednym rzędem otworów o średnicy 5 mm

Figure 5 The influence of friction coefficient on the force of the ram in function of the ram stroke in specimens with one row of 5 mm holes



Rysunek 6 W=Rozkłady parametru uszkodzenia w próbkach z jednym rzędem otworów o średnicy 5mm przy trzech współczynnikach tarcia: a) $f=0$ (bez tarcia); b) $f=0,2$; c) $f=0,8$

Figure 6 Damage distributions in specimens without perforations at three friction coefficients: a) $f=0$ (without friction); b) $f=0,2$; c) $f=0,8$

3.4 Wpływ tarcia na parametr uszkodzenia Cockrofta i Lathama

Na Rysunku 6 przedstawiono rozkłady parametru kumulacji uszkodzeń przy przemieszczeniu stempla równym 14 mm dla próbek z otworami o średnicy 5 mm.

Wraz ze wzrostem współczynnika tarcia obserwuje się wzrost obszarów występowania maksymalnych uszkodzeń. Dla lepszego zilustrowania wyników zawężono skalę do maksymalnej wartości uszkodzenia równej 0,5. W pełnym zakresie obserwuje się występowanie maksymalnych uszkodzeń o wartościach od 7,5 do 8,5.

4. WNIOSKI

Tarcie jest niezwykle istotnym czynnikiem wpływającym na sposób deformowania się materiałów perforowanych i na końcowe właściwości wyrobu. Znajomość zagadnień wpływu tarcia na proces wyciskania pozwala przewidzieć uzyskanie żądanej struktury materiału wyjściowego. Badania numeryczne są bardzo ważne ze względu na trudności związane z opisem zagadnienia metodami teorii plastyczności.

Przy wyciskaniu próbek perforowanych obserwujemy istotny wpływ tarcia na naprężenia oraz

odkształcenia. Maksymalne naprężenia efektywne lokalizują się w obszarze otworów, w narożach oraz w obszarze wyjścia materiału z matrycy. Analizując odkształcenia obserwujemy wyraźny wpływ tarcia na charakter rozkładów odkształceń ekwiwalentnych. Interesujący jest sposób deformacji otoczenia otworów i ich zamykania się. Użyteczna w praktyce jest zależność współczynnika tarcia od wartości sił w miejscach kontaktu narzędzia i próbki. Początkowa część przebiegu odpowiada etapowi zapływania otworów.

Wzrost współczynnika tarcia powoduje wzrost wartości parametru uszkodzenia. Jakościowo i ilościowo różny rozkład uszkodzeń obserwuje się głównie w obszarze wyjścia materiału z matrycy. Dalsze zaawansowane badania numeryczne pozwolą na określenie struktury i cech wytrzymałościowych wyrobu. Wyniki dają wskazówki do planowania eksperymentów technologicznych.

LITERATURA

- [1] Piwnik J.: Modelowanie procesów plastycznego płynięcia; Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1992.
- [2] Piwnik J.: Mechanika procesów wyciskania metali; Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1991.
- [3] Lacki P.: Analiza numeryczna wybranych testów tribologicznych stosowanych w procesach obróbki plastycznej; *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XIX nr 4, 119–128, 2008.
- [4] Tvergaard V.: Behaviour of voids in a shear field; *International Journal of Fracture*, t. 158 nr 1, 41–49, 2009.
- [5] Li E.L., Chen X., Wang H., Wang X., Li Z.H.: Morphological evolution of a void under thermal and mechanical loads; *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, t. 14 nr 1, 69–72, 2009.
- [6] Piwnik J.: Mechanika plastycznego płynięcia w zagadnieniach wyciskania metali; Wyższa Szkoła Ekonomiczna, Białystok 2010.
- [7] Piwnik J.: Modelowanie procesów wyciskania materiałów niejednorodnych; *Rozprawy Inżynierskie*, t. 32 nr 2, 275–288, 1987.
- [8] Ono S., Minami K., Iwadate T., Murai E.: Three-dimensional simulation on the internal void closure in a ultra large ingot using a pre-cooling ingot forging process; *Journal of the Japan Society for Technology*, t. 35 nr 405, 1200–1206, 1994.
- [9] Wang Z., Ren M.: Investigation of the mechanism of void closing and optimization of forming procedure for large forgings; *Advanced Technology of Plasticity*, nr 2, 1181–1186, 1993.
- [10] Piwnik J.: Teoria i eksperyment w analizie procesów wyciskania; Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2010.
- [11] Lacki P.: Analiza numeryczna procesu wyciskania przeciwbieżnego z udziałem tarcia aktywnego; *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XXI nr 2, 119–128, 2010.

- [12] Grzesiak J., Sinczak J., Skubisz P.: Numerical modeling of extrusion process in superplastic flow range; Metallurgy and Foundry Engineering, t. 32 nr 1, 41–48, 2006.
- [13] Kazanowski P., Libura W.: Modelowanie pola odkształceń i naprężeń podczas wyciskania przez matryce o różnej geometrii; Rudy i Metale Nieżelazne, t. 45 nr 4, 262–275, 2000.
- [14] Łukaszek-Sołek A., Sinczak J., Bednarek S.: Wpływ tarcia na rozkład odkształceń oraz trwałość narzędzi w procesie wyciskania przeciwbieżnego – modelowanie numeryczne; Obróbka Plastyczna Metali, t. XVIII nr 4, 11–18, 2007.