

Jan PIWNIK*, **Maciej LESZCZYŃSKI***

ANALIZA NUMERYCZNA WPŁYWU TARCIA NA STAN NAPRĘŻENIA W PROCESIE WYCISKANIA MATERIAŁU PERFOROWANEGO

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE FRICTION COEFFICIENT ON STRESS DURING THE EXTRUSION PROCESS OF PERFORATED MATERIAL

Słowa kluczowe:

modelowanie numeryczne, tarcie, wyciskanie, materiały perforowane, naprężenia

Key words:

numerical modeling, friction, extrusion, perforated materials, stress

Streszczenie

Zaprezentowano analizę numeryczną naprężeń, sił i temperatury powstających w procesie osiowo-symetrycznego wyciskania na zimno perforowanych próbek ze stopu aluminium z użyciem programu Deform 3D. Do analizy przyjęto model sztywno-plastyczny ze wzmocnieniem. Przeanalizowano wpływ współczynnika tarcia na naprężenia efektywne oraz kontaktowe w próbkach perforowanych z otworami różnej wielkości w osi symetrii próbki. Dokonano analizy

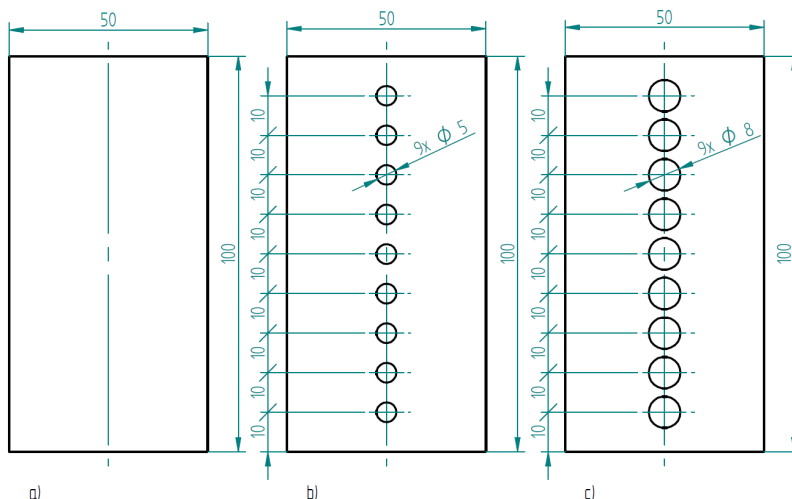
* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Produkcji, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.

porównawczej sił wyciskania działających na stempel przy różnych współczynnikach tarcia. Porównano temperatury uzyskane przy wyciskaniu próbek perforowanych bez tarcia, jak również w obecności tarcia. W celu dokładnej analizy zagadnienia zestawiono wyniki wyciskania próbek perforowanych z wynikami uzyskanymi w próbkach bez otworów.

WPROWADZENIE

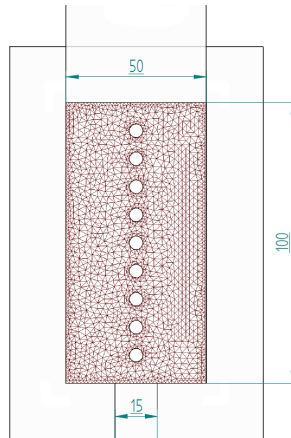
W wyniku procesów wyciskania tworzyw z inkluzjami powstają nowe, atrakcyjne materiały o nierozpoznanych dotąd właściwościach fizycznych i użytkowych. Detale wykonane z materiałów osłabionych wieloma otworami cechuje między innymi duża zdolność do tłumienia drgań.

Celem niniejszej pracy jest analiza naprężeń powstających podczas deformacji materiału przy wyciskaniu bloku płaskiego ze stopu aluminium osłabionego wieloma otworami w osi symetrii. Istotnym czynnikiem w tym procesie jest tarcie. Analizowano wpływ współczynnika tarcia na pola naprężeń efektywnych w obszarach deformacji plastycznej w płaskim stanie odkształcenia. Przebadano wpływ różnych wielkości współczynnika tarcia na naprężenia kontaktowe. Zbadano siły działające na stempel podczas wyciskania. Do analizy z wykorzystaniem programu Deform 3D przyjęto model materiału sztywno-plastycznego ze wzmocnieniem. Deform 3D posługuje się metodą elementów skończonych przy wykonywaniu obliczeń.



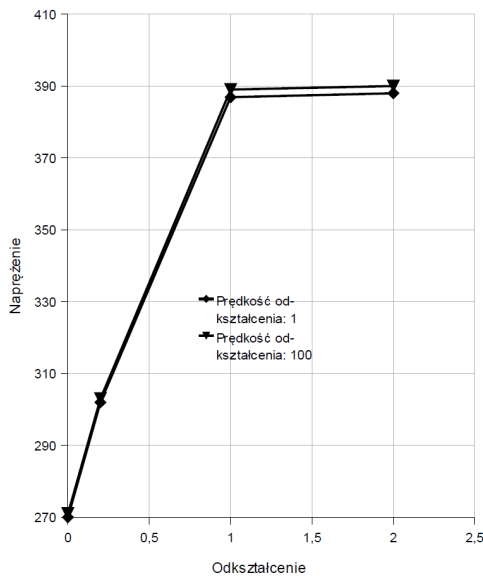
Rys. 1. Usytuowanie otworów w próbkach; a) próbka bez otworów, b) próbka z otworami o średnicy 5 mm, c) próbka z otworami o średnicy 8 mm

Fig. 1. Location of holes in specimens; a) specimen without holes, b) specimen with 5 mm holes, c) specimen with 8 mm holes



Rys. 2. Siatka elementów skończonych wygenerowana przez program Deform; schemat stanowiska do analizy

Fig. 2. Finite elements net generated by Deform software; analysis diagram



Rys. 3. Charakterystyka materiałowa. Wykres zależności między napężeniem [MPa] a odkształceniem względnym [%]

Fig. 3. Material characteristic. Stress [Mpa] – strain [%] curve

Opis zjawisk towarzyszących wyciskaniu materiałów perforowanych jest w literaturze stosunkowo nowy. Problematykę wyciskania materiałów z różnego rodzaju inkluzjami można znaleźć w pracach [L. 1–5, 7, 11, 13, 14, 16].

PROGRAM I WARUNKI BADAŃ

Przebadano wpływ wartości współczynnika tarcia w trzech rodzajach próbek pokazanych na **Rys. 1**. Numerycznej analizie poddano próbki o wymiarach 50x100 mm i grubości 10 mm. Wyciskanie numeryczne (numeryczną symulację wyciskania) realizowano z wykorzystaniem programu DEFORM 3D w płaskim stanie odkształcenia. Wygenerowano siatkę czworobocianowych elementów skończonych modelu składającą się z około 80 000 elementów. Na **Rys. 2** pokazano schemat stanowiska do wyciskania oraz siatkę elementów skończonych dla próbki niezdeformowanej z otworami o średnicy 5 mm. Próbkę wyciskano przez otwór szerokości 15 mm. Wyciskanie współbieżne realizowano „na zimno” z prędkością posuwu stempla 1 mm/s. Do badań przyjęto stop 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 $R_{p0,2} = 270$ MPa, wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 390$ MPa, moduł Young'a $E = 68\,900$ MPa, współczynnik Poisson'a $\nu = 0,33$, współczynnik przewodnictwa ciepła $180,2$ [W/(m · K)], pojemność cieplna $2,433$ [J/(K · m³)], emisyjność 0,7. Założono model materiału sztywno-plastyczny ze wzmocnieniem. Charakterystykę materiałową (wykres zależności między naprężeniem a odkształceniem względnym) EN AW-2024 dla założonego modelu materiału pokazano na **Rys. 3**. Została wykorzystana charakterystyka materiałowa z bazy danych programu. Jest możliwe zdefiniowanie dokładnej charakterystyki materiałowej dla konkretnego stopu aluminium (ściskanego lub rozciąganego). Do celów analizy nie jest konieczne definiowanie dokładnej charakterystyki, ponieważ interesujący jest rozkład naprężeń efektywnych, kontaktowych oraz sił, a nie ich wartości. Tarcie określono z zależności (1):

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

gdzie:

f – współczynnik tarcia

k – tnące naprężenie uplastyczniające.

Przez tarcie należy rozumieć naprężenia tnące pochodzące od tarcia na kontakcie matrycy i stempla z wyciskaną próbką. Tarcie jest w tym przypadku funkcją naprężenia uplastyczniającego oraz bezwymiarowego współczynnika tarcia f .

Naprężenia efektywne program Deform 3D wyznacza z warunku plastyczności Hubera-Misesa. Naprężenia efektywne (zwane także w polskiej literaturze naprężeniami zredukowanymi lub naprężeniami zredukowanymi Hubera-Misesa, a w anglojęzycznej naprężeniami efektywnymi lub naprężeniami von Misesa) określono z zależności (2):

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

W tym przypadku naprężenia efektywne są funkcją 3 składowych normalnych i 3 składowych tnących tensora naprężeń. Jest możliwe lokalnie (w punkcie) takie zorientowanie osi współrzędnych, że naprężenia tnące tensora naprężeń są równe zero. Wówczas wartość naprężeń efektywnych (zredukowanych) jest taka sama, ale niezerowe mogą być tylko składowe normalne tensora naprężeń. W tak nowo dobranym lokalnym układzie współrzędnych o osiach oznaczonych jako 1, 2 i 3 można zapisać naprężenia efektywne zależnością (3):

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

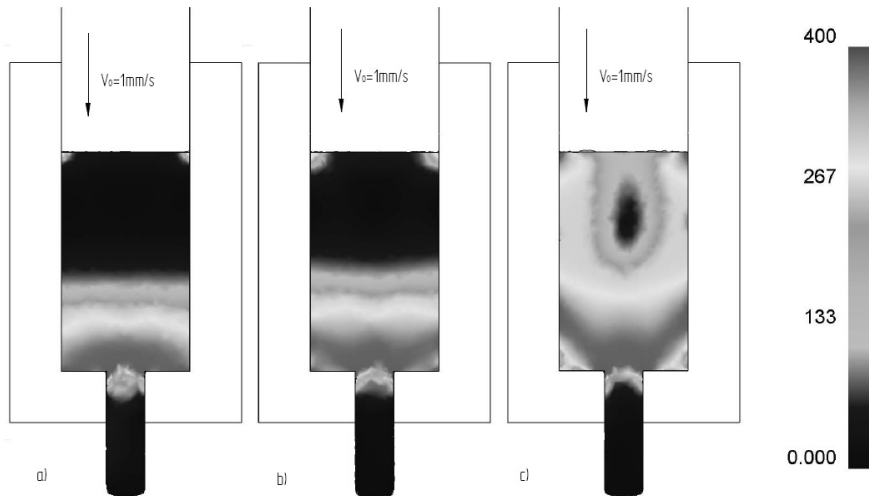
WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Wyniki obliczeń zestawiono w formie:

- wpływu tarcia na naprężenia efektywne;
- wpływu tarcia na naprężenia kontaktowe w postaci wykresów obrazujących wartości naprężeń w miejscach kontaktu;
- wpływu tarcia na siły działające na stempel w postaci wykresów obrazujących wartość siły w czasie;
- wpływu tarcia na temperaturę w postaci rozkładów temperatury.

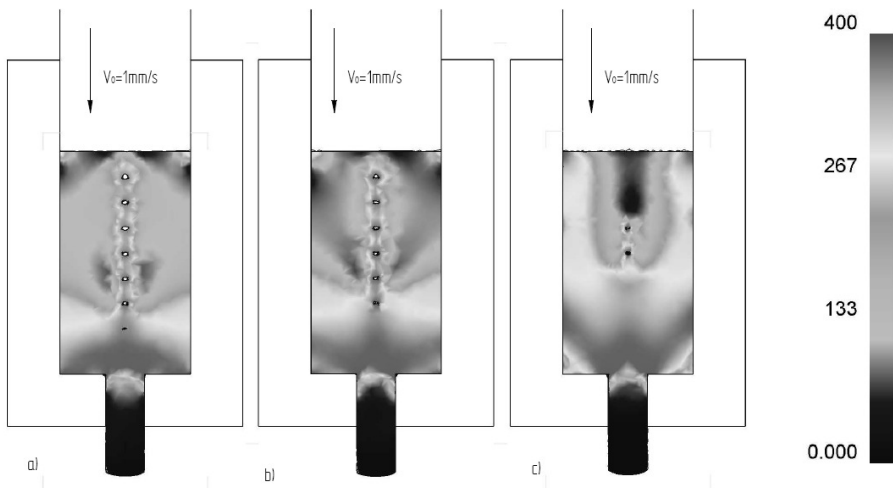
Wpływ tarcia na naprężenia efektywne

Rozkłady naprężeń efektywnych w obszarze uplastycznienia zestawiono na **Rys. od 4 do 6**. Na **Rys. 4** pokazano wpływ tarcia na rozkład naprężeń efektywnych w próbce jednorodnej (bez otworów). Obecność tarcia w znaczący sposób zmienia rozkłady naprężeń efektywnych w obszarze uplastycznienia. Przy tarcu równym zero obszar występowania dużych naprężeń efektywnych jest niewielki w porównaniu z próbkami wyciskanyymi z udziałem tarcia. Rozmiar obszaru uplastycznienia powiększa się wraz ze wzrostem współczynnika tarcia. Przy tarcu równym zero obszar występowania największych naprężeń efektywnych jest zlokalizowany w sąsiedztwie otworu wypływowego matrycy. Przy tarcu równym $f = 0,8$ naprężenia efektywne obserwuje się prawie w całym obszarze próbki. Największe naprężenia zaobserwowano na powierzchni kontaktu próbki z matrycą oraz w obszarach sąsiadujących z otworem wypływowym. W przypadku próbek perforowanych (**Rys. 5 i 6**), z otworami o średnicy 5 mm i 8 mm, największe naprężenia efektywne pojawiają się także w otoczeniu otworów. Przy maksymalnym tarcu obserwujemy wzrost niejednorodności rozkładu naprężeń efektywnych.



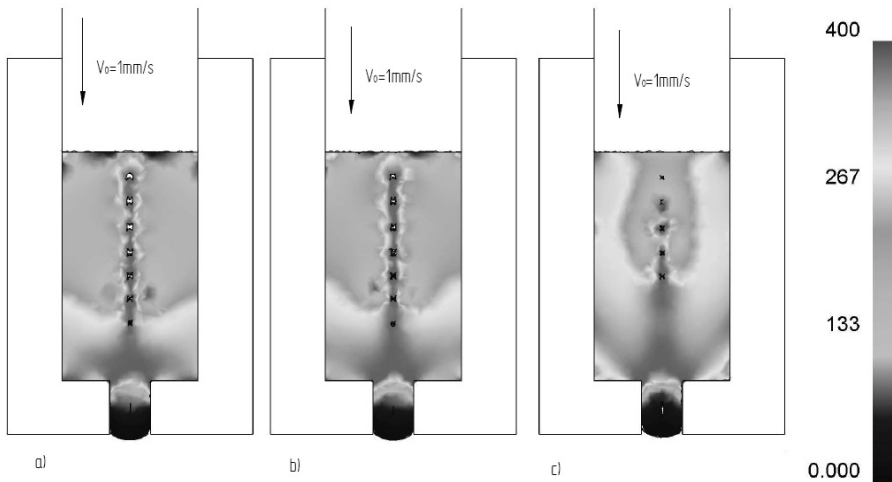
Rys. 4. Rozkłady naprężeń efektywnych w próbkach bez perforacji przy trzech współczynnikach tarcia plastycznego: a) $f = 0$ (bez tarcia); b) $f = 0,2$; c) $f = 0,8$

Fig. 4. Effective stress distributions in specimens without perforations at three plastic friction coefficients: a) $f = 0$ (without friction); b) $f = 0.2$; c) $f = 0.8$



Rys. 5. Rozkłady naprężeń efektywnych w próbkach z jednym rzędem otworów o średnicy 5 mm w osi próbki przy trzech współczynnikach tarcia plastycznego: a) $f = 0$ (bez tarcia); b) $f = 0,2$; c) $f = 0,8$

Fig. 5. Effective stress distributions in specimens with one row of 5 mm holes in the symmetry axis of the specimen at three plastic friction coefficients: a) $f = 0$ (without friction); b) $f = 0.2$; c) $f = 0.8$

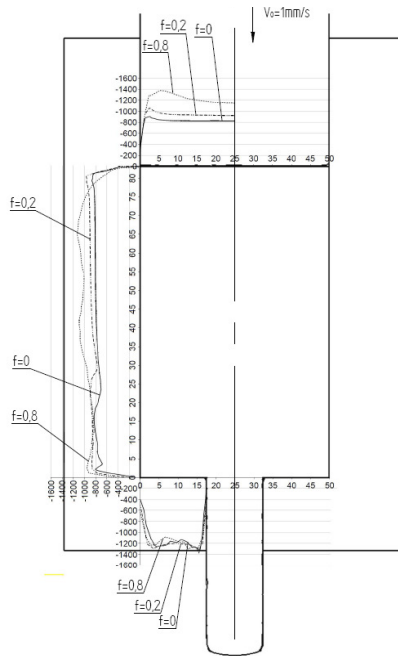


Rys. 6. Rozkłady naprężeń efektywnych w próbkach z jednym rzędem otworów o średnicy 8 mm w osi próbki przy trzech współczynnikach tarcia plastycznego: a) $f = 0$ (bez tarcia); b) $f = 0,2$; c) $f = 0,8$

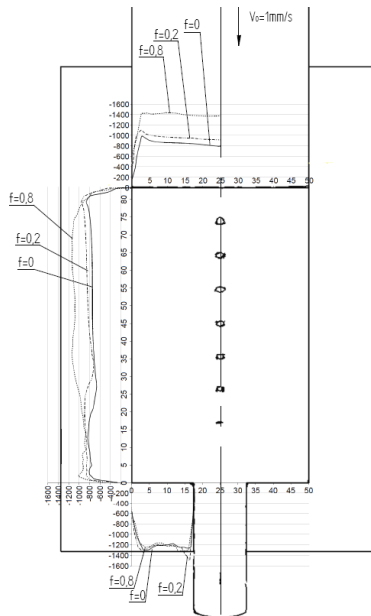
Fig. 6. Effective stress distributions in specimens with one row of 8 mm holes in the symmetry axis of the specimen at three plastic friction coefficients: a) $f = 0$ (without friction); b) $f = 0.2$; c) $f = 0.8$

Wpływ tarcia na naprężenia kontaktowe

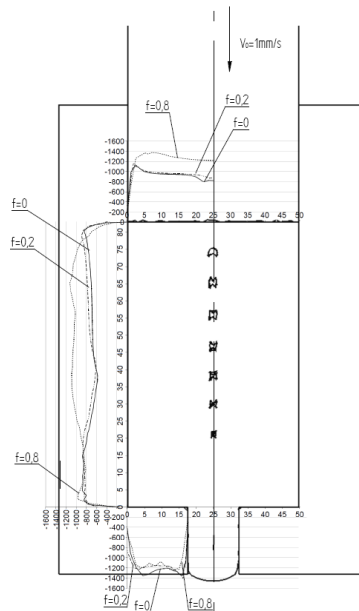
Na **Rys. od 7 do 9** zestawiono rozkłady naprężeń kontaktowych w postaci przebiegów wartości naprężeń wzdłuż powierzchni kontaktu matrycy i stempla z próbką. Przebiegi naniesiono na schematy próbek w celu lepszego zobrazowania wartości w poszczególnych punktach kontaktu. Ponieważ proces wyciskania przebiega osiowo-symetrycznie, charakterystyki naniesiono na połowę próbki. Charakterystyki naprężeń kontaktowych dla drugiej połowy próbki stanowią lustrzane odbicie charakterystyk względem osi symetrii próbki wykreślonej na schemacie. Na **Rys. 7** pokazano wpływ tarcia na wartości naprężeń kontaktowych dla próbki jednorodnej. Widać znaczny wzrost wartości naprężeń kontaktowych wraz ze wzrostem wartości współczynnika tarcia. Dla próbek perforowanych na **Rys. 8 i 9** pokazano wpływ tarcia na wartości naprężeń kontaktowych. Podobnie jak dla próbek bez otworów widać wyraźny wzrost wartości naprężeń wraz ze wzrostem wartości współczynnika tarcia. Przy maksymalnym współczynniku tarcia we wszystkich przypadkach obserwuje się dużą niejednorodność wartości naprężeń kontaktowych w obszarach kontaktu próbki z matrycą i stemplem.



Rys. 7. Naprężenia kontaktowe w próbkach bez otworów
 Fig. 7. Contact stress in specimens without holes



Rys. 8. Naprężenia kontaktowe w próbkach z otworami o średnicy 5 mm w osi próbki
 Fig. 8. Contact stress in specimens with 5 mm holes in the symmetry axis of the specimen

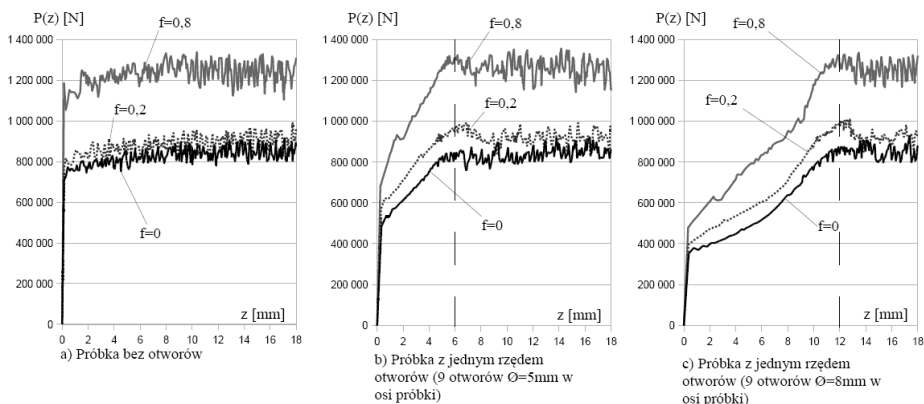


Rys. 9. Naprężenia kontaktowe w próbkach z otworami o średnicy 8 mm w osi próbki
 Fig. 9. Contact stress in specimens with 8 mm holes in the symmetry axis of the specimen

Wpływ tarcia na rozkłady sił

Na **Rys. 10** pokazano wpływ tarcia na siły występujące na stemplu w procesie wyciskania. Zestawienia dokonano w postaci przebiegów zależności wartości siły działającej na stempel w funkcji przemieszczenia stempla. W próbce jednorodnej (**Rys. 10a**) obserwuje się wzrost wartości siły działającej na stempel wraz ze wzrostem wartości współczynnika tarcia. Wpływ tarcia zaobserwowano także w próbkach z perforacjami (**Rys. 10b i 10c**). W przypadku próbek perforowanych widać dodatkowo wpływ średnicy otworów perforacji na siłę działającą na stempel. Ujawnia się on w postaci zmniejszenia sił działających na stempel w początkowej fazie wyciskania próbek oraz zmniejszoną szybkością przyrostu siły w funkcji przemieszczenia stempla. W próbce z otworami o średnicy 5 mm w osi próbki (**Rys. 10b**) przyrost siły następuje do momentu, gdy przemieszczenie stempla osiąga wartość około 6 mm. W próbce z otworami o średnicy 8 mm w osi próbki (**Rys. 10c**) przyrost siły następuje do wartości przemieszczenia stempla wynoszącego około 12 mm. Na przebiegach sił dla próbek z otworami (**Rys. 10b oraz 10c**) zaznaczono pionową kreskowaną linią wartość przemieszczenia stempla, dla którego siła jest w przybliżeniu równa sile wyciskania dla próbki bez otworów w stanie ustalonym. W obu przypadkach można przyjąć, że jest to moment, kiedy otwory częściowo zapływają,

tworząc blok aluminium, który zachowuje się jak próbka jednorodna. Stwierdzono to na podstawie obserwacji numerycznie wyciskanych próbek. Także na podstawie obserwacji stwierdzono, że w żadnym przypadku próbki nie zapływają całkowicie zanim nie zostaną przecięnięte przez otwór wypływowy matrycy.

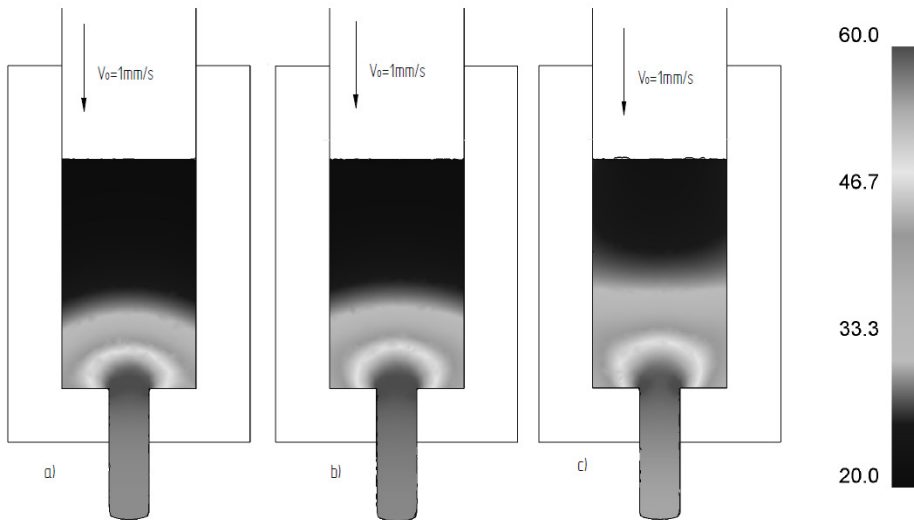


Rys. 10. Wpływ tarcia na zależność siły nacisku stempla od przemieszczenia stempla w próbkach o następujących konfiguracjach otworów: a) próbki bez otworów, b) próbki z jednym rzędem otworów o średnicy 5 mm w osi próbki, c) próbki z jednym rzędem otworów o średnicy 8 mm w osi próbki

Fig. 10. The influence of friction coefficient on the force of the ram in function of the ram stroke in specimens: a) specimens without holes, b) specimens with one row of 5 mm holes in the symmetry axis of the specimen, c) specimens with one row of 8 mm holes in the symmetry axis of the specimen

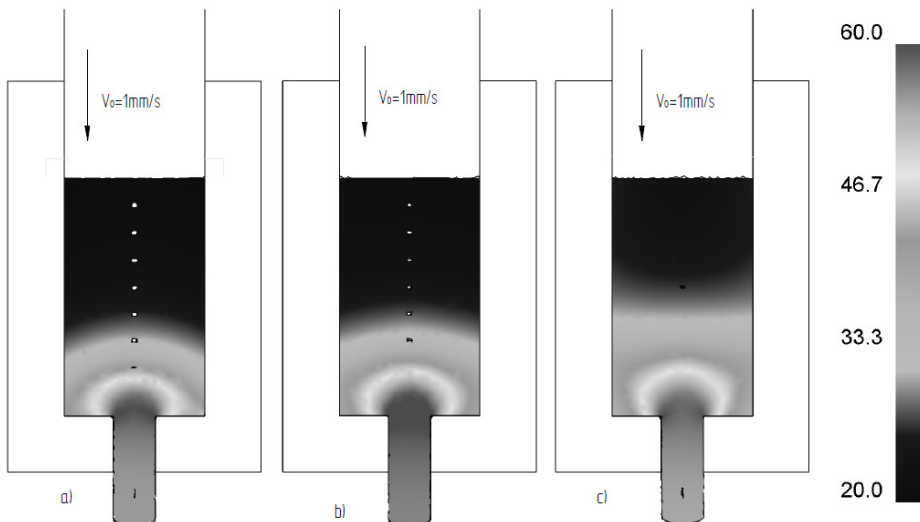
Wpływ tarcia na temperaturę

Na **Rys. od 11 do 13** przedstawiono rozkłady temperatur przy przemieszczeniu stempla równym 15 mm. Na tym etapie dla każdego rodzaju próbki siła wyciskania jest ustalona (przebiegi sił w funkcji przemieszczenia stempla pokazano na **Rys. 10**). Na **Rys. 11** pokazano wpływ tarcia na rozkłady temperatury dla próbek bez otworów. Wraz ze wzrostem współczynnika tarcia zwiększa się obszar występowania maksymalnej wartości temperatury. W przypadku próbki wyciskanej bez tarcia wartości maksymalne temperatury występują w strefie otworu wypływowego. Wraz ze wzrostem współczynnika tarcia obserwuje się wzrost temperatury w obszarze kontaktu próbki z matrycą. Analogicznie dla próbek z otworami (**Rys. 12** oraz **13**) maksymalna temperatura wyciskania występuje w strefie otworu wypływowego, a wraz ze wzrostem współczynnika tarcia obserwuje się wzrost temperatury także w strefie kontaktu matrycy z próbką.



Rys. 11. Rozkłady temperatury w próbkach bez otworów przy trzech współczynnikach tarcia plastycznego: a) $f = 0$ (bez tarcia); b) $f = 0,2$; c) $f = 0,8$

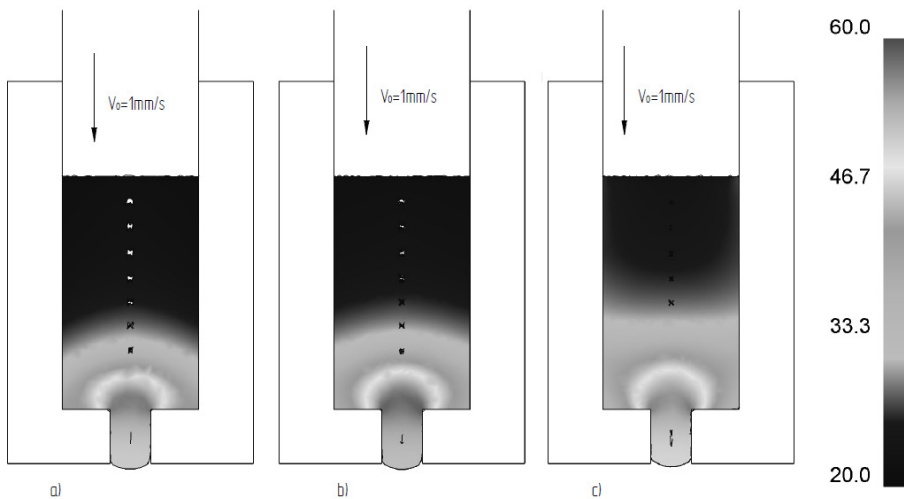
Fig. 11. Temperature distributions in specimens without holes at three plastic friction coefficients: a) $f = 0$ (without friction); b) $f = 0.2$; c) $f = 0.8$



Rys. 12. Rozkłady temperatury w próbkach osłabionych jednym rzędem otworów o średnicy 5 mm w osi próbki przy trzech współczynnikach tarcia plastycznego: a) $f = 0$ (bez tarcia); b) $f = 0,2$; c) $f = 0,8$

Fig. 12. Temperature distributions in specimens with one row of 5 mm holes in the symmetry axis of the specimen at three plastic friction coefficients: a) $f = 0$ (without friction); b) $f = 0.2$; c) $f = 0.8$

W przypadku próbek perforowanych w początkowej fazie deformacji siła wyciskania jest nieustalona (przebiegi sił w funkcji przemieszczenia stempla pokazano na **Rys. 10**). Obserwuje się zmiany wielkości obszaru występowania maksymalnych temperatur wraz ze wzrostem wartości współczynnika tarcia. Maksymalne temperatury przy współczynniku tarcia równym zero występują w obszarze otworu wypływowego oraz w obszarze deformacji otworów. Wraz ze wzrostem współczynnika tarcia obszar występowania maksymalnych temperatur powiększa się w obszarze otworu wypływowego i zmienia w obszarze perforacji.



Rys. 13. Rozkłady temperatury w próbkach osłabionych jednym rzędem otworów o średnicy 8 mm w osi próbki przy trzech współczynnikach tarcia plastycznego: a) $f = 0$ (bez tarcia); b) $f = 0,2$; c) $f = 0,8$

Fig. 13. Temperature distributions in specimens with one row of 8 mm holes in the symmetry axis of the specimen at three plastic friction coefficients: a) $f = 0$ (without friction); b) $f = 0.2$; c) $f = 0.8$

WNIOSKI

Przedstawione wyniki analizy numerycznej wpływu tarcia na pola naprężeń i temperatury w obszarze uplastycznienia wykazały różnice w charakterze wpływu tarcia na proces. Przy wyciskaniu próbek bez otworów obserwujemy jednoczesny wpływ tarcia na naprężenia i temperaturę wraz ze wzrostem współczynnika tarcia. Największe naprężenia i temperatura występują w narożach oraz w rejonie otworu wypływowego.

Jakościowo inaczej działa tarcie na rozkłady naprężeń efektywnych i temperaturę w próbkach z otworami. Największe wartości naprężeń lokalizują się w obszarze otworów. Obserwujemy tu zupełnie odmienny charakter tych rozkładów w porównaniu z próbką jednorodną. Widać też różnice w charakterze przebiegu naprężeń kontaktowych.

Znaczące różnice obserwuje się, analizując wartości sił wyciskania próbek perforowanych i próbki bez otworów. Można przyjąć, że z chwilą zapełnienia otworów następuje ustalenie się siły wyciskania, która po zapełnieniu w przybliżeniu odpowiada wartości siły wyciskania dla próbki bez otworów. Można na podstawie tych zależności ustalić parametry zapełniania otworów. Interesująca jest różnica wartości sił i naprężeń kontaktowych w próbkach różniących się parametrem otworów. Obserwujemy tu dużą niejednorodność rozkładów temperatur i naprężeń efektywnych w obszarze uplastycznienia. Pokazane rozkłady polowe pozwalają na sformułowanie inżynierskich wytycznych dotyczących metod ujednorodniających strukturę materiału. Pokazane różnice w rozkładach polowych w próbkach jednorodnych i z perforacjami wymagają dalszych zaawansowanych badań numerycznych i doświadczalnych.

LITERATURA

1. Piwnik J.: Modelowanie procesów plastycznego płynięcia; Politechnika Białostocka, Rozprawy Naukowe; nr 14; 1992.
2. Piwnik J.: Mechanika procesów wyciskania metali; Politechnika Białostocka, Rozprawy Naukowe; nr 6; 1991.
3. Lacki P.: Analiza numeryczna wybranych testów trybologicznych stosowanych w procesach obróbki plastycznej; *Obróbka Plastyczna Metali*; t. XIX, nr 4; 2008; 119–128.
4. Tvergaard V.: Behaviour of voids in a shear field; *Int J Fract* 158; 2009; 41–49.
5. Li Er-li, Chen Xi, Wang Hua, Wang Xi, Li Zhong-Hua: Morphological Evolution of a Void under Thermal and Mechanical Loads; *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*; 14(1); 2009; 69–72.
6. Lacki P.: Analiza numeryczna procesu wyciskania przeciwbieżnego z udziałem tarcia aktywnego; *Obróbka Plastyczna Metali*; t. XXI nr 2; 2010; 119–128.
7. Piwnik J.: Mechanika plastycznego płynięcia w zagadnieniach wyciskania metali; Wyższa Szkoła Ekonomiczna, Białystok 2010.
8. Grzesiak J., Sinczak J., Skubisz P.: Numerical modelling of extrusion process in superplastic flow range; *Metallurgy and Foundry Engineering*; nr 1; 2006.
9. Kazanowski P., Libura W.: Modelowanie pola odkształceń i naprężeń podczas wyciskania przez matryce o różnej geometrii; *Rudy i Metale Nieżelazne*; nr 4; 2000.
10. Łukaszek-Sołek A., Sinczak J., Bednarek S.: Wpływ tarcia na rozkład odkształceń oraz trwałość narzędzi w procesie wyciskania przeciwbieżnego; modelowanie numeryczne; *Obróbka Plastyczna Metali*; nr 4; 2007.

11. Piwnik J.: Modelowanie procesów wyciskania materiałów niejednorodnych; *Rozprawy Inżynierskie*; 32,2; 1987; 275–288.
12. Cho J.R., Bae W.B., Kim Y.H., Choi S.S., Kim D.K.: Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion; *J. Mater. Process Technol.*; 80/81; 1998; 161–165.
13. 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; *J.JSTP*; 35 (405); 1994, 1200–1206.
14. Wang Z., Ren M.: Investigation of the mechanism of void closing and optimization of forming procedure for large forgings; *Adv. Technol. Plast. (2)*; 1993; 1181–1186.
15. Watanabe K.: Closing behavior of internal cavities in havy ingot forging; *Research report of Kyusyukyoursitsu University*; 26; 13–18.
16. Piwnik J.: Teoria i eksperyment w analizie procesów wyciskania; *Politechnika Białostocka, Rozprawy naukowe*; nr 200; 2010.
17. Gierzyńska-Dolna M.: *Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali*; WNT, Warszawa 1983.

Summary

Numerical analysis of stress, forces, and temperature during axisymmetrical cold extrusion of an aluminium alloy specimen was presented using Deform 3D. The rigid-plastic model was applied. The influence of a friction coefficient on effective and contact stresses in perforated specimens with various holes located on the symmetry axis were analysed. Forces of the extrusion acting on the extrusion ram were analysed considering the influence of various friction coefficient values. Temperatures during extrusion processes with and without friction were compared. For exact analysis of the problem results of the extrusion, perforated specimens were compared with the results of the extrusion of non-perforated specimens.