

Dr inż. Piotr LACKI

Politechnika Częstochowska, Instytut Obróbki Plastycznej, Inżynierii Jakości i Bioinżynierii, Częstochowa

Analiza numeryczna wybranych testów trybologicznych stosowanych w procesach obróbki plastycznej

Numerical analysis of some tribological tests used in metal forming processes

Streszczenie

Coraz powszechniej stosowana symulacja numeryczna procesów obróbki plastycznej wymaga przyjęcia odpowiednich warunków brzegowych w tym także założeń dotyczących praw tarcia opisujących wzajemne oddziaływanie par kontaktowych. W pracy zaprezentowano numeryczną analizę wybranych testów trybologicznych, dla których dokonano oceny wpływu stosowanych praw tarcia na analizowany proces technologiczny. W szczególności przedstawiono symulację numeryczną procesu spęczania pierścienia dla różnych wariantów modeli tarcia.

Abstract

Numerical simulations, which are used in metal forming processes more and more common, need assuming of the suitable boundary conditions. This also concerns frictional laws, which describe interactions between frictional elements. The paper gives knowledge on tribological relations between frictional pair: "tool – deformed metal". An assessment of the influence of the assumed frictional laws on the technological process has been given. Upsetting process of the ring using different frictional models has been analysed.

Słowa kluczowe: tarcie, modele tarcia, spęczanie pierścieni, kucie, symulacja MES

Key words: friction, frictional models, upsetting of the ring, forging, MES simulation

1. WSTĘP

W zagadnieniach numerycznej symulacji obróbki plastycznej problematyka tarcia jest bardzo ważna ze względu na fakt, że procesy tarcia bezpośrednio wpływają na efekty technologiczne uzyskiwane w procesach obróbki plastycznej. Na wartość współczynnika tarcia największy wpływ mają: temperatura w węzle tarcia, prędkość odkształcenia, rodzaj smarowania, chropowatość powierzchni.

Najczęściej stosowanym sposobem określenia warunków tarcia dla procesów obróbki plastycznej jest spęczanie pierścienia o standaryzowanych wymiarach. Metoda spęczania pierścieni jest jedną z metod, która opiera się o pomiar wielkości pośrednich, zależnych od warunków tarcia. Współczynnik tarcia w tej

metodzie wylicza się na podstawie krzywych wyznaczonych wg metody Schroeder&Webster [10] rozwijanej w dalszych latach przez Male&Cockrofta [8], Burgdorfa [1]. Metoda ta zakłada, że na skutek tarcia pierścień będzie zmieniał swoją średnicę zewnętrzną i wewnętrzną w zależności od współczynnika tarcia na powierzchni kontaktu.

Metoda spęczania próbki przesuwanej między dwoma płaskimi kowadłami opisana w pracy Pavlova [9] jest oparta na procesie spęczania. Próbka poddana naciskom kowadeł jest jednocześnie przesuwana mechanizmem śrubowym. Metoda spęczania próbki przesuwanej między dwoma płaskimi kowadłami, jest jedną z metod, w której dokonuje się pomiaru sił stycznych i normalnych. W trakcie odkształcenia zmieniają się także własności od-

kształcanego materiału na skutek umocnienia i wpływu temperatury. Z tych powodów wartość współczynnika tarcia jest pewnym uśrednieniem jego wartości z całej powierzchni tarcia, Dobrucki [2,3]. Warunki analizowanej próby (prędkość poślizgu, stopień odkształcenia i nacisk jednostkowy) są w niej dość jednoznacznie określone. Próbę tą cechują nieduże różnice w prędkości poślizgu na powierzchni kontaktu. Obserwuje się również niewielką rozbieżność w wynikach pomiaru sił tarcia w porównaniu z innymi metodami.

2. PRZYJĘTE MODELE TARCIA

Analiza aktualnego stanu modelowania obszaru kontaktu wykazała, że istnieje wiele teorii, oraz wyników badań doświadczalnych. Modele tarcia budowane na bazie doświadczeń eksperymentalnych mają najczęściej ograniczone zastosowanie. Ich funkcje prognostyczne ograniczają się do warunków i parametrów stosowanych w eksperymencie. W procesie spęczania istotną rolę odgrywa zmienna w szerokim zakresie względna prędkość powierzchni kontaktowych, oraz chropowatość powierzchni. Te podstawowe parametry zostały zastosowane do zbudowania modeli tarcia i zastosowane w numerycznej symulacji procesu spęczania. W pracy przeanalizowano trzy warianty modelu tarcia. Problem rozważano w skali makroskopowej. Przyjęcie takiego założenia wiąże się z przyjęciem założeń upraszczających w stosunku do topografii powierzchni kontaktowych. W pracy założono prostoliniową powierzchnię kontaktu, warunki tarcia opisano przez zmienny współczynnik tarcia na powierzchniach kontaktu.

Model 1. W modelu tym przyjęto, występowanie współczynnika tarcia określonego dla powierzchni oddzielonych warstwą tlenku, ponadto założono występowanie zjawiska powstawania i niszczenia warstwy tlenku na wierzchołkach nierówności. Proces ten opisano przy użyciu teorii prawdopodobieństwa. Współczynnik tarcia na powierzchni kontaktu określany był dla pojedynczych elementów skończonych i wprowadzany do węzłów powierzchni kontaktowych wg schematu (1).

$$\mu = \begin{cases} A_1 \rightarrow P(A_1) \\ A_2 \rightarrow 1 - P(A_1) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

A_1 – współczynnik tarcia dla powierzchni pokrytych warstwą tlenku,

A_2 – współczynnik tarcia na wierzchołkach bez warstwy tlenku,

$P(A_1)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia współczynnika tarcia o wartości A_1 .

W pracy przyjęto $A_1 = 0.15$, $A_2 = 0.5$, $P(A_1) = 0.9$.

Numeryczne modelowanie spęczania metodą elementów skończonych wymaga podzielenia okresu spęczania na kroki czasowe. Dokładność obliczeń wzrasta z ilością użytych kroków czasowych. W każdym kroku czasowym ustalane są warunki tarcia. Algorytm losuje dla każdego węzła powierzchni kontaktowej współczynnik tarcia. Możliwe są dwie wartości współczynnika tarcia zależne od prawdopodobieństwa $P(A_1)$. Wartości współczynników tarcia i prawdopodobieństwa $P(A_1)$ przyjmowane dla tego modelu muszą być ustalone na drodze badań doświadczalnych. Zaprezentowane odwzorowanie topografii powierzchni styku jest efektywne w odniesieniu do metody elementów skończonych. Wprawdzie możliwe jest odwzorowanie geometrii styku na podstawie pomiarów przy użyciu profilografu, ale użycie takiej geometrii w metodzie elementów skończonych jest nieefektywne.

Model 2. Model ten zakłada istnienie statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia. W modelowaniu spęczania zmienia się nie tylko względna prędkość powierzchni kontaktu ale również może dojść do zmiany kierunku ruchu. W takim przypadku względna prędkość powierzchni kontaktu wchodzi w zakres występowania statycznego współczynnika tarcia. W modelu założono graniczną wartość prędkości powierzchni kontaktu przy której następuje zmiana współczynnika tarcia. Poniżej przedstawiono model tarcia opisany zależnością (2), dla którego występuje skokowa wartość współczynnika tarcia:

$$\mu = \begin{cases} A_1 & \text{if } \dot{u} \leq A_3 \\ A_2 & \text{if } \dot{u} > A_3 \end{cases}, \quad (2)$$

gdzie \dot{u} jest wartością względną prędkości powierzchni kontaktu.

Współczynnik tarcia przyjmuje wartość A_1 jeśli względna wartość prędkości powierzchni kontaktu osiąga wartość większą lub równą wartości A_3 , w pozostałych przypadkach przyjmowana jest wartość A_2 . W pracy przyjęto $A_1 = 0.57$, $A_2 = 0.12$, $A_3 = 4 \cdot 10^{-7}$.

Model 3. Model ten również jest funkcją względną prędkości powierzchni kontaktu, przy czym zmiana wartości współczynnika następuje liniowo, a nie skokowo jak w przypadku modelu 2. Równanie (3) prezentuje matematyczną postać modelu 3.

$$\mu = \begin{cases} A_1 + \frac{\dot{u}}{A_2}(A_3 - A_1) & \text{if } \dot{u} \leq A_2 \\ A_3 & \text{if } \dot{u} > A_2 \end{cases} \quad (3)$$

W równaniu tym A_1 i A_3 reprezentują wartości graniczne współczynnika tarcia, natomiast stała A_2 jest prędkością graniczną. Zarówno w modelu 2 i 3 współczynnik tarcia jest obliczany po każdym kroku czasowym. Dokładność tych modeli zależy od szybkości zmian względnej prędkości powierzchni kontaktu. W celu zwiększenia dokładności obliczeń numerycznych oraz uzyskania zbieżności rozwiązania dla elementów kontaktowych należy zwiększyć gęstość kroku czasowego. Model numeryczny szybciej uzyskuje zbieżność dla warunków tarcia, w których można przewidzieć wartość współczynnika tarcia.

3. MODEL NUMERYCZNY

Symulację numeryczną wykonano przy użyciu programu ADINA System v. 8.1. Program oparty jest na metodzie elementów skończonych. Program umożliwia włączenie własnego modelu tarcia, przy użyciu procedury „User-Supplied friction models”. Opisane modele tarcia zostały zaimplementowane w ADINA System. Ze względu na osiowo symetryczny charakter problemu spęczania pierścienia

przyjęto w tym przypadku dwuwymiarowy osiowo-symetryczny model zagadnienia.

Dla modelu przesuwania i spęczania płaskiej próbki między płaskimi kowadłami przyjęto dwuwymiarowy płaski stan naprężenia. Geometria tej próby pozwalała przyjąć takie uproszczenie.

Para trąca w prezentowanych modelach składa się z narzędzia i odkształcanej próbki. Narzędzie zamodelowano jako materiał sprężysty. W obliczeniach numerycznych przyjęto następujące dane materiałowe opisujące własności narzędzia:

– Moduł Younga $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ [Pa]; Współczynnik Poissona $\nu = 0.29$

Model materiału odkształcanej próbki założono jako sprężysto-plastyczny z umocnieniem izotropowym i przyjęto następujące dane materiałowe w zakresie sprężystym:

– Moduł Younga $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ [Pa]; Współczynnik Poissona $\nu = 0.29$

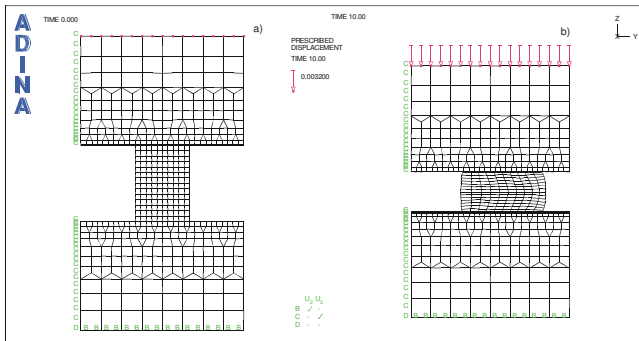
W zakresie plastycznym:

– Granica plastyczności $\sigma_{pl} = 20 \cdot 10^6$ [Pa]; Moduł wzmocnienia $n = 10 \cdot 10^6$ [Pa].

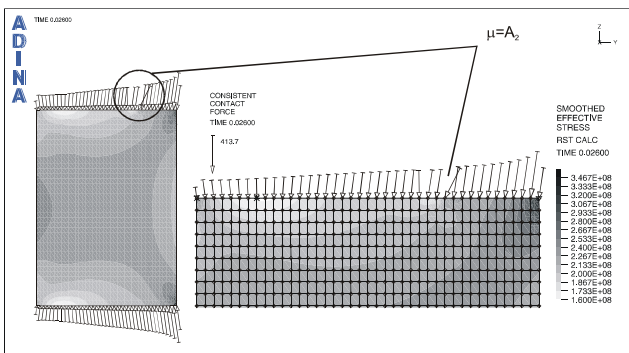
4. ANALIZA SPĘCZANIA PIERŚCIENIA

Problem rozpatrywano jako zagadnienie osiowosymetryczne. Na rys. 1 pokazano siatkę elementów skończonych, warunki brzegowe i początkowe dla modelu spęczania pierścienia. Warunek brzegowy typu C zaznaczony na rysunku oznacza oś symetrii. Warunek ten powoduje możliwość ruchu węzłów w kierunku Z, uniemożliwia natomiast ruch w kierunku Y. Dolne kowadło jest utwierdzone. Warunek brzegowy typu B oznacza, że węzły oznaczone tym symbolem mogą poruszać się tylko w kierunku osi Y. Do górnego kowadła przyłożono przemieszczenie wymuszające ściskanie pierścienia. Na rys. 2 zaznaczono siłę, która powstaje na skutek wystąpienia współczynnika tarcia o wartości A_2 .

W trakcie całego cyklu odkształcenia większy współczynnik tarcia pojawia się z określonym prawdopodobieństwem.



Rys. 1. Siatka elementów skończonych, warunki brzegowe i początkowe dla modelu spęczania pierścienia
 Fig. 1. Mesh of the finite elements, boundary and initial conditions for the model of the ring test



Rys. 2. Rozkład sił kontaktowych na powierzchni kontaktu dla 1 modelu tarcia.

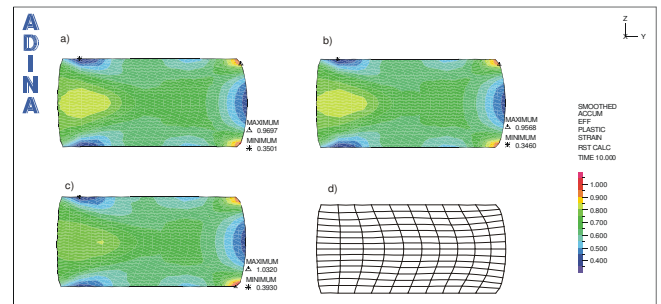
Rozkład naprężeń zredukowanych [Pa]

Fig. 2. Distribution of the contact forces on the contact surface for the first frictional model.
 Distribution of the effective stresses [Pa]

Zmiana wartości współczynnika tarcia powoduje lokalną koncentrację naprężeń zredukowanych. Pojawiające się losowo zmiany naprężeń w obszarze kontaktu odwzorowują oddziaływanie mikrogeometrii powierzchni. Ten model tarcia najlepiej oddaje charakter zjawisk kontaktowych zachodzących podczas deformacji. Należy jednak zwrócić uwagę, że podczas tarcia następuje ciągła zmiana geometrii styku, a opisany model tarcia odnosi się do początkowego stanu mikrogeometrii.

Na rys. 3 przedstawiono rozkład odkształceń plastycznych dla różnych wariantów tarcia. Z przedstawionych wykresów wynika, że największą wartość odkształceń plastycznych zaobserwowano dla 3 wariantu tarcia $\varepsilon = 1.032$ maksima w pozostałych przypadkach wynoszą odpowiednio dla 1 wariantu $\varepsilon = 0.9568$, a dla 2 wariantu $\varepsilon = 0.468$. Obserwacje próbek potwierdzają istnienie dużej wartości odkształceń

plastycznych zlokalizowanych w okolicach zewnętrznej krawędzi pierścienia. Występujące minima też różnią się między sobą o około 5%.



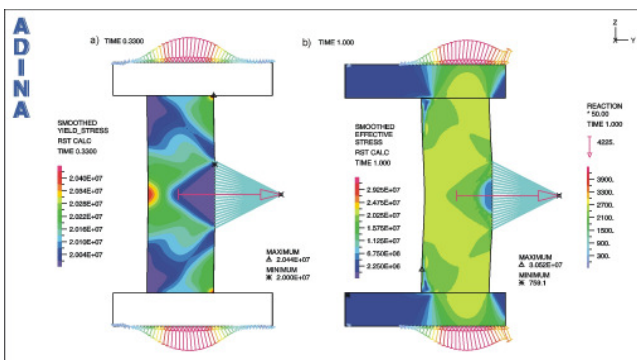
Rys. 3. Rozkład odkształceń plastycznych dla:
 a) 1 modelu tarcia, b) 2 modelu tarcia,
 c) 3 modelu tarcia, d) linie płynięcia materiału dla 3 modelu tarcia

Fig. 3. Distribution of the plastic strains:
 a) first frictional model, b) second frictional model,
 c) third frictional model, d) lines of the metal flow for the third frictional model

Z porównania wykresów widać, że model tarcia różnicuje stan odkształceń plastycznych w objętości pierścienia. Na rys. 3 pokazano widok linii płynięcia materiału dla 3 wariantu tarcia. Linie te pokazują charakter zmian odkształcenia i sposób przemieszczania się materiału w objętości pierścienia. W procesach obróbki objętościowej odkształcenie plastyczne jest jednym z ważniejszych parametrów używanych przy projektowaniu tej technologii. Warunki tarcia mają istotny wpływ na wielkość i rozkład odkształceń plastycznych w objętości kształtowanej odkuwki, dlatego należy właściwie dobrać model tarcia do określonego procesu technologicznego obróbki objętościowej. Rozkład odkształceń plastycznych prezentowanych na rys. 3. różni się w zależności od przyjętego modelu tarcia. Z przedstawionych wykresów wynika, że maksymalną wartość odkształceń plastycznych zaobserwowano dla 3 modelu tarcia $\varepsilon = 1.032$, stanowi to około 10% różnicy w stosunku do najmniejszej obserwowanej wartości współczynnika tarcia. Maksymalne odkształcenia zlokalizowane są w okolicach zewnętrznej krawędzi pierścienia. Minimalne wartości odkształcenia plastycznego występują na powierzchniach kontaktu w okolicy mniejszej średnicy pierścienia, oraz pośrodku zewnętrznej części powierzchni swobodnej.

5. PRÓBA SPĘCZANIA I PRZESUWANIA PRÓBKI POMIĘDZY PŁASKIMI KOWADŁAMI

Na rys. 4 pokazano wyniki symulacji próby tarcia pomiędzy dwoma płaskimi kowadłami przy zastosowaniu 1 wariantu tarcia ze stałym współczynnikiem. Rys. 4a) pokazuje naprężenie uplastyczniające w czasie 0.33 s. Charakter tych naprężeń nie zmienia się znacząco podczas całego procesu spęczania próbki. W trakcie procesu zmieniają się w niewielkim stopniu wartości tego naprężenia. Na przekroju próbki można wyróżnić charakterystyczne trójkątne pole o małym naprężeniu uplastyczniającym w obszarze uchwytu próbki. Powstaje ono na skutek usztywnienia konstrukcji poprzez uchwyt ciągnący próbkę. Dwa pozostałe obszary o niewielkim naprężeniu uplastyczniającym występują w narożach po przeciwnej stronie próbki. Wartości ekstremalne naprężenia uplastyczniającego nie są duże. Podobny charakter zależności występuje dla naprężeń zredukowanych pokazanych na rys.4b. Na rysunku tym pokazano również naprężenia zredukowane w płaskich kowadłach spęczających próbkę. Naprężenia te zmieniają się w kowadłach w dużo większym stopniu niż w próbce. Największe wartości w miejscu styku z próbką.



Rys. 4. Schemat symulacji próby tarcia pomiędzy dwoma płaskimi kowadłami – 1 wariant tarciaznaczono reakcje w podporach kowadeł [N] oraz: a) naprężenie uplastyczniające [Pa] w czasie 0.33 s, b) naprężenie zredukowane [Pa] w czasie 1s

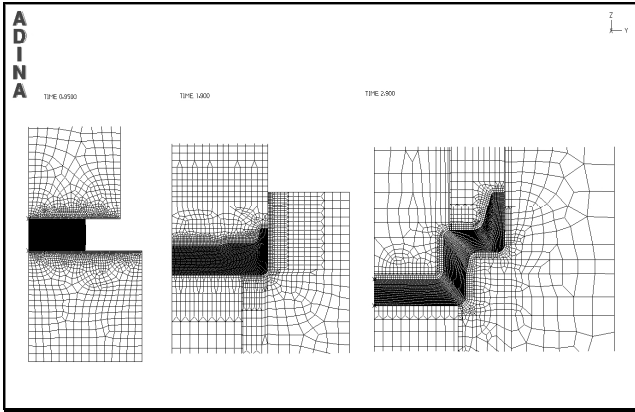
Fig. 4. Simulation scheme of the frictional test carried out between two flat anvils, first frictional variant - reactions in the anvil supports were marked [N], a) yield stress [Pa] for $t = 0.33s$, b) effective stress [Pa] for $t = 1s$

Charakter zmian obciążenia w kowadłach można zaobserwować po reakcjach w podporach kowadła. Rozkład sił kontaktowych pokazuje niejednorodny rozkład ich wartości na powierzchni kontaktu. Wraz ze wzrostem stopnia spęczania próbki rosną również odkształcenia plastyczne. Charakter pola odkształceń plastycznych jest zbliżony do pola naprężeń uplastyczniających. Wartości odkształceń plastycznych są jednak bardziej zróżnicowane i narastają w trakcie spęczania. W okolicach uchwytu próbki i w okolicach krawędzi po drugiej stronie przekroju są miejsca praktycznie nieodkształcone.

Maksymalne wartości odkształcenia plastycznego obserwuje się na krawędziach natarcia próbki, oraz w środku próbki po przeciwległej stronie niż uchwyt. Zróżnicowany stopień odkształcenia prowadzi do zmian geometrii próbki a w szczególności do zmian na powierzchni kontaktu. W wyniku tych zmian dochodzi do zróżnicowania sił kontaktowych na powierzchni styku. Największe zmiany występują w okolicach krawędzi próbki, gdzie wskutek szczególnego stanu naprężenia i odkształcenia w trakcie spęczania nie dochodzi do styku. Podobne zjawiska obserwuje się w badaniach doświadczalnych Dobrucki, Odrzywołek [14].

6. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA MODELU TARCIA

Warunki tarcia mają zasadniczy wpływ na wymiary i ostateczną geometrię odkuwki po procesie kucia matrycowego. Przyjęty model tarcia zależny od względnej prędkości powierzchni kontaktu powoduje wyższe opory tarcia niż model tarcia ze stałą wartością współczynnika tarcia. Na rys. 5. pokazano wyniki obliczeń zmiany geometrii odkuwki w trzech kolejnych operacjach kucia matrycowego. Dla czasu $t = 0.95 s$ pokazano zmianę geometrii odkuwki po operacji spęczania, dla czasu $t = 1.9 s$ po operacji matrycowania wstępnego i dla czasu $t = 2.9 s$ zaprezentowano zmianę geometrii odkuwki po kuciu w wykroju wykańczającym.

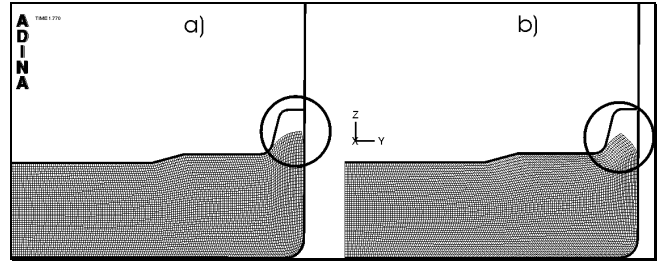


Rys. 5. Zmiana geometrii odkuwki dla trzech operacji kucia matrycowego

Fig. 5. Change of the forging geometry during three operations of the die forging process

Rys. 6 pokazuje różnice w geometrii odkuwki wynikającą z przyjęcia różnych warunków tarcia między narzędziem i odkuwką. W trakcie procesu kucia matrycowego pierścieni łożysk tocznych górna krawędź odkuwki może ulegać zakuciu na powierzchni matrycy o nachyleniu $15^{\circ}30''$ do osi symetrii odkuwki jeśli w procesie technologicznym nie zapewni się odpowiedniego smarowania. Prezentowany przykład pokazuje w jaki sposób warunki tarcia – modele przyjęte w obliczeniach, wpływają na wyniki uzyskiwane w symulacjach numerycznych. W rozpatrywanym przypadku właściwe określenie warunków tarcia miało kluczowe znaczenie dla optymalizacji rzeczywistego procesu kucia łożysk tocznych. Opierając się jedynie na modelu ze stałym współczynnikiem tarcia uzyskuje się niepełny obraz płynięcia materiału w wykrojach matryc. Niemniej jednak rozbudowane modele tarcia wymagają przyjęcia stałych definiujących warunki tarcia, które są dość trudne do określenia w warunkach przemysłowych.

Stwierdzono, że numeryczny model odkuwki z przyjętymi warunkami tarcia zależnymi od względnej prędkości powierzchni kontaktu jest bardziej zbliżony do geometrii odkuwek uzyskiwanych w rzeczywistym procesie technologicznym kucia odkuwek pierścieni łożysk tocznych.



Rys. 6. Wpływ warunków tarcia na geometrię odkuwki po drugiej operacji kucia

a) 1 wariant tarcia, b) 3 wariant tarcia

Fig. 6. An influence of the frictional conditions on the forging geometry after second operation a) first variant of friction, b) third variant of friction

7. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski:

1. Przyjęcie modelu tarcia z losową wartością współczynnika tarcia w węzle siatki MES powoduje trudności w prowadzeniu obliczeń. W przypadku modeli tarcia z przewidywalną wartością współczynnika tarcia w trakcie obliczeń uzyskanie zbieżności rozwiązania jest łatwiejsze.
2. W przypadku spęczania pierścieni model tarcia wpływa na rozkład odkształceń plastycznych w objętości kutego pierścienia, oraz na geometrię powierzchni swobodnych. Różnice pomiędzy wariantami nasilają się wraz ze wzrostem stopnia odkształcenia.
3. Współczynnik tarcia zależny od prędkości zastosowany w obliczeniach numerycznych może wykazać występowanie drgań relaksacyjnych typu stick-slip.

LITERATURA

- [1] Burgdorf M.: Über die Ermittlung des Reibwertes für verfahren der Massivumformung durch den Ringstauchversuch Ind. Anz. 1967, t. 89 No 39.
- [2] Dobrudzki W.: Hipoteza tarcia szczepno-poślizgowego na powierzchniach styku ciał sztywnych (narzędzi) z ciałami elastoplastycznymi. Obróbka Plastyczna t. II z. 3 (1962) s. 449-488.
- [3] Dobrudzki W., Odrzywołek E.: Analiza metod wyznaczania współczynnika tarcia między narzędziem i metalem w stanie płynięcia plastycznego, opartych na procesie spęczania. Obróbka Plastyczna t. XVIII z. 4 (1979) s. 189-199.
- [4] Lacki P.: Simulation of friction in upsetting process. International Journal of Applied Mechanics

- and Engineering, 2004, vol. 9, Special issue: "ITC 2004", p. 247-255.
- [5] Lacki P.: Wpływ tarcia na nierównomierność odkształceń wyrobu w procesie kucia swobodnego. *TRIBOLOGIA* Nr 4/2003(190) rok XXXIV s. 289-300.
- [6] Lacki P.: Wybrane aspekty opisu parametrów kucia swobodnego. *Przegląd Mechaniczny* 6/2001 s. 38-41.
- [7] Lacki P.: Zastosowania wybranych modeli tarcia w numerycznej analizie procesów obróbki plastycznej. XI Konferencja KomPlasTech 2004 „INFORMATYKA W TECHNOLOGII METALI”. Materiały konferencyjne. Ed. M. Pietrzyk, J. Kusiak, F. Grosmann, A. Piela, Wyd. „Akapit”, Kraków s. 163-170.
- [8] Male A. T., Cockroft M. G.: A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. *J. of the Institute of Metals*. V. 93 (1964-65) s. 38-46.
- [9] Pavlov I. M.: *Teoriya prokatki*. Metallurgizdat Moskwa 1960.
- [10] Schroeder W., Webster D.A., Press Forging Thin Section: effects of friction, area and thickness on Pressures. *Trans ASME, J. Appl. Mech.* 71 (1949) s. 289-294.