

Piotr Lacki*

**WPLYW TARCIA NA NIERÓWNOMIERNOŚĆ
ODKSZTAŁCEŃ WYROBU W PROCESIE
KUCIA SOBODNEGO**

**THE INFLUENCE OF FRICTION ON STRAIN
HETEROGENEITY OF A PRODUCT
IN AN OPEN DIE FORGING**

Słowa kluczowe:

tarcie, metoda elementów skończonych, kucie swobodne, kowadła

Keywords:

friction, Finite Element Method, open die forging, anvils

Streszczenie

Znane jest zjawisko wpływu tarcia na charakter odkształceń w obróbce plastycznej, jednak jego ilościowe opisanie wciąż stanowi ważny problem badawczy. Opory tarcia występujące w procesach kształtowania metali na gorąco takich jak: kucie, wyciskanie czy prasowanie są stosunkowo wysokie i wyrażają się wartościami $\mu = 0.15-0.37$, pomimo stosowania odpowiednio dobranych smarów technologicznych.

* Politechnika Częstochowska

Tarcie występujące pomiędzy odkształconym metalem a narzędziem hamuje płynięcie metalu, co powoduje występowanie dużej nierównomierności odkształceń w przekroju odkuwki a nawet w skrajnych przypadkach występowanie pęknięć. Istotny wpływ na jakość wyrobu (odkuwki) zwłaszcza na jej cechy kształtowo-wymiarowe wywiera również duża intensywność zużycia narzędzia, będąca funkcją m.in. oporów tarcia.

W pracy podjęto się analizy węzła tarcia, jakim jest odkuwka i kowadło do kucia swobodnego. Badania doświadczalne tych par trących jest dość trudne, a uzyskanie wyniki nie zawsze są wystarczające. Analiza numeryczna uzupełnia lukę w badaniach i rozszerza zbiór danych na temat. W pracy użyto metody elementów skończonych do opisanie zagadnienia tarcia w procesie kucia swobodnego. Zastosowano termomechaniczny model zagadnienia uwzględniający ciepło tarcia, pracę odkształcenia plastycznego i właściwości materiału zależne od temperatury. Praca zawiera wyniki symulacji komputerowej procesu kucia swobodnego przy różnych warunkach tarcia.

WSTĘP

Znane jest zjawisko wpływu tarcia na charakter odkształceń w obróbce plastycznej, jednak jego ilościowe opisanie wciąż stanowi ważny problem badawczy. Para trąca w procesach obróbki plastycznej funkcjonuje w trudnych warunkach (wysoka temperatura, duże naciski jednostkowe). Dotychczasowe badania prowadzone nad węzłami tarcia w obróbce plastycznej [2,3] kładą nacisk na analizę narzędzi jako jednego z bardziej istotnych elementów pary trącej. Należy jednak pamiętać, że tarcie i towarzyszące mu zjawiska wpływają również na kształtowany wyrób. W pracy podjęto się analizy węzła tarcia, jakim jest odkuwka i kowadło do kucia swobodnego. Badanie doświadczalne tych par trących jest dość trudne, a uzyskanie wyniki nie zawsze są wystarczające. Analiza numeryczna uzupełnia lukę w badaniach i rozszerza zbiór danych na temat. W pracy użyto metody elementów skończonych do opisanie zagadnienia tarcia w procesie kucia swobodnego. Zastosowano termomechaniczny model zagadnienia uwzględniający ciepło tarcia, pracę odkształcenia plastycznego i właściwości materiału zależne od temperatury.

MODEL NUMERYCZNY

Rozwiązanie problemu termo-mechanicznego wykonano przy pomocy programu ADINA System [1]. W tej klasie problemu model termiczny może mieć wpływ na rozwiązanie mechaniczne a model mechaniczny wpływa na rozwiązanie termiczne. Model termo-mechaniczny użyty do obliczeń uwzględnia następujące efekty:

- Wydzielanie ciepła pod wpływem odkształceń plastycznych
- Wymianę ciepła pomiędzy ciałami będącymi w kontakcie
- Wydzielanie ciepła na skutek tarcia

W przypadku modelu termomechanicznego rozwiązujemy kolejno model termiczny i mechaniczny aż do uzyskania zbieżności rozwiązania. Ten proces iteracyjny nazywany jest „TMC equilibrium iterations” [1].

Wydzielanie ciepła pod wpływem odkształceń plastycznych: Wewnętrzne ciepło generowane pod wpływem odkształceń plastycznych w jednostce objętości Q_V jest obliczone według równania (1),

$$Q_V = \omega \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

gdzie σ_{ij} - tensor naprężenia Cauchy'ego, $\dot{\epsilon}_{ij}$ - tensor prędkości odkształceń plastycznych, ω - jest parametrem, $0 \leq \omega \leq 1$, określającym część pracy odkształcenia plastycznego zamienianej na ciepło, w obliczeniach przyjęto $\omega=0.75$.

Wymiana ciepła pomiędzy ciałami będącymi w kontakcie: wymianę ciepła na powierzchni kontaktu opisuje podobne równanie jak w przypadku konwekcji. Ciepło przejmowane przez powierzchnię kontaktu przez ciało I dane jest wzorem (2):

$$q_c^I = \alpha(T^J - T^I) \quad (2)$$

gdzie α - współczynnik wymiany ciepła przez powierzchnię kontaktu, T^I i T^J - temperatury na powierzchni ciał wchodzących w kontakt. W obliczeniach przyjęto $\alpha=2100$ [W/m²K] [2]

Wydzielanie ciepła na skutek tarcia: ciepło tarcia wydzielane w jednostce czasu w węźle G jest obliczane wg. wzoru (3):

$$q_G^II = \tau \dot{U} \quad (3)$$

gdzie: τ - siła tarcia, \dot{U} - względna prędkość trących powierzchni w punkcie kontaktu.

Model materiału: założono termo-sprężysto-plastyczny model odkształcanego ciała, bazujący na modelu Hubera-Misesa z kinematycznym umocnieniem, opisującego powierzchnię płynięcia wg równania (4):

$${}^t f_y = \frac{1}{2} ({}^t s - {}^t \alpha) \cdot ({}^t s - {}^t \alpha) - \frac{1}{3} \sigma_y^2 = 0 \quad (4)$$

gdzie ${}^t s$ - jest tensorem dewiatora naprężeń ${}^t \alpha$ - opisuje przesunięcie środka powierzchni płynięcia i ${}^t \sigma_y$ - początkowe naprężenie uplastyczniające, wraz ze stowarzyszonym prawem płynięcia Hubera-Misesa opisanym wzorem (5):

$${}^t \dot{e}^P = {}^t \dot{\Lambda} ({}^t s - {}^t \alpha) \quad (5)$$

Model termo-sprężysto-plastyczny uwzględniał wpływ odkształceń sprężystych (${}^t e_{rs}^{TH}$), oraz plastycznych (${}^t e_{rs}^P$), a jego konstytutywną postać opisuje równanie:

$${}^t \sigma_{ij} = {}^t C_{ijrs}^E ({}^t e_{rs} - {}^t e_{rs}^P - {}^t e_{rs}^{TH}) \quad (6)$$

gdzie ${}^t \sigma_{ij}$ - jest tensorem naprężenia w czasie t i ${}^t C_{ijrs}^E$ - jest tensorem sprężystości w określonej temperaturze dla czasu t . Tensor ${}^t C_{ijrs}^E$ - określony przez: moduł Younga ${}^t E$ i liczbę Poissona ${}^t \nu$ zależne od temperatury. W pracy przyjęto dane materiałowe, które dla matrycy zestawiono w tablicy 1

Tablica 1. Zależność naprężenie-odkształcenie dla materiału matrycy

Table 1. Stress-strain relation for the die material

Temperatura [°C]	Naprężenie uplastyczniające [MPa]	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona
200	$\sigma = 1120 \cdot \varepsilon^{0.168}$	$2.1 \cdot 10^5$	0.29
700	$\sigma = 630 \cdot \varepsilon^{0.345}$	$1.5 \cdot 10^4$	0.29
1100	$\sigma = 230 \cdot \varepsilon^{0.12}$	1200	0.29

a dla materiału odkuwki pokazano w tablicy 2.

Tablica 2. Zależność naprężenie-odkształcenie dla materiału odkuwki

Table 2. Stress-strain relation for the forging material

Temperatura [°C]	Naprężenie uplastyczniające [MPa]	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona
200	$\sigma = 699 \cdot \varepsilon^{0.12}$	$2.1 \cdot 10^5$	0.29
700	$\sigma = 436 \cdot \varepsilon^{0.345}$	$1.0 \cdot 10^4$	0.29
1100	$\sigma = 183 \cdot \varepsilon^{0.168}$	1000	0.29

Przepływ ciepła w analizowanym procesie opisano równaniem Fouriera. Modele materiału i ich własności cieplne przyjęto jako izotropowe i zależne od temperatury. Własności materiałów dla modelu termicznego, konieczne do obliczeń przepływu ciepła, wyrażone jako funkcja temperatury przedstawia tablica 3.

Tablica 3. Dane materiałowe przyjęte do obliczeń

Table 3. Material data used for calculations

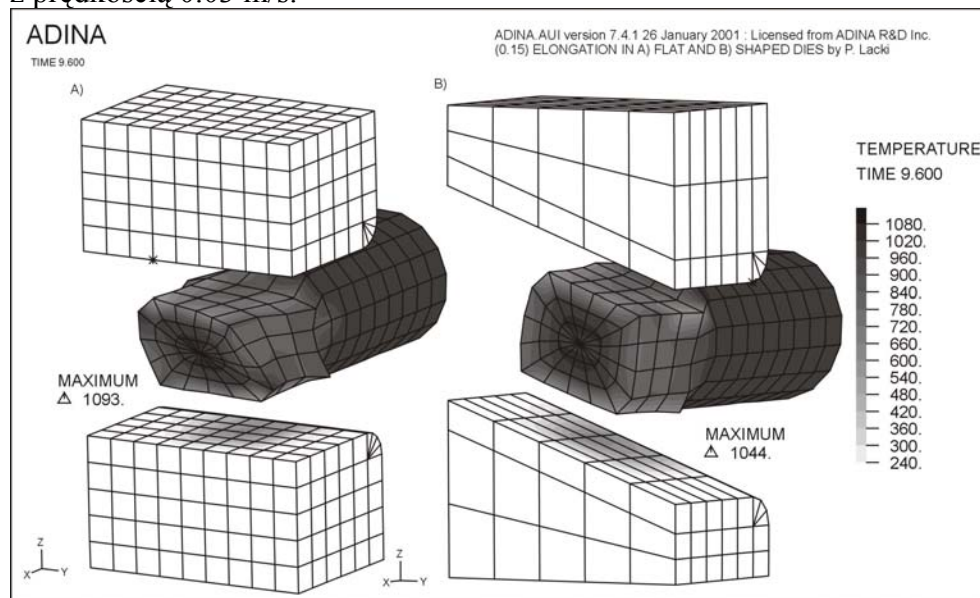
dla stali niskowęglowej (odkuwka)	dla stali stopowej (narzędzia)
przewodność cieplna $\lambda = 23.16 + 51.96e^{-2.025\theta}$ [W/mK]	przewodność cieplna $\lambda = 21.85 + 14.32 \theta^{1.831}$ [W/mK]
gęstość $\rho = \frac{7850}{(1+0.004 \cdot \theta^2)^3}$ [kg/m ³]	gęstość $\rho = \frac{7850}{(1+\gamma)^3}$ [kg/m ³]
ciepło właściwe $c_p = 689.2 + 46.16e^{3.78\theta}$ [J/kgK] dla $T \leq 575$ °C	ciepło właściwe $c_p = 474.4 + 196.7\theta + 3.786\theta^2 - 59.56\theta^3$ [J/kgK]
$c_p = 207.9 + 294.4e^{1.412\theta}$ [J/kgK] dla $T \geq 575$ °C	

$$\theta = \frac{T}{1000}; \quad \gamma = -0.334 + 0.836 \theta + 1.169 \theta^2 + 0.00827 \theta^3$$

OBLICZENIA NUMERYCZNE

Symulację komputerową kucia swobodnego przeprowadzono dla dwóch typów narzędzi kuźniczych pokazanych na Rys. 1. Kształt i parametry

technologiczne symulowanego procesu technologicznego odnoszą się do warunków laboratoryjnych i mają bardziej charakter jakościowy niż ilościowy, jakkolwiek prezentowane wyniki poprawnie odwzorowują rzeczywiste warunki laboratoryjne. W analizie przyjęto dwa 40% gnioty względne, co 90° zrealizowane narzędziem poruszającym się z prędkością 0.03 m/s.



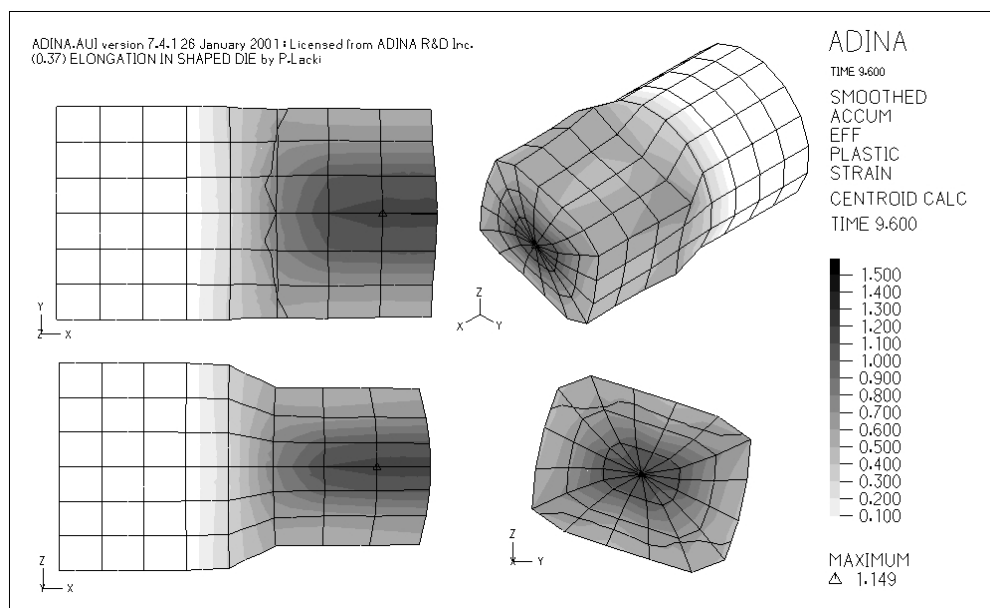
Rys. 1. Rozkład temperatury na powierzchni odkuwki i narzędzia dla dwóch typów narzędzi po drugim cyklu roboczym. Współczynnik tarcia na powierzchniach kontaktu $\mu = 0.15$

Fig. 1. Temperature distribution on the tool and forging surface for two kinds of tools after the second working cycle. Frictional coefficient on the contact surface $\mu = 0.15$

W przypadku A) jest to proste narzędzie kuźnicze o płaszczyznach roboczych prostopadłych do kierunku ruchu narzędzia, a w przypadku B) płaszczyzny robocze narzędzia są pochylone pod kątem 20° w stosunku do kierunku ruchu narzędzia A). Każdy rodzaj narzędzia został przeliczony dla wariantu tarcia ze współczynnikiem $\mu = 0.15$; oraz $\mu = 0.37$. Wyniki tych symulacji posłużyły do omówienia i zaprezentowania niektórych parametrów kucia swobodnego. W obliczeniach zasymulowano dwa ruchy robocze narzędzia kuźniczego oraz obrót odkuwki wokół własnej osi. Widok odkształconej siatki elementów

skończonych po drugim cyklu roboczym, oraz rozkład temperatury na powierzchni odkuwki i narzędzia został pokazany na Rys. 1.

Na Rys. 2. pokazano rozkład odkształceń plastycznych w odkuwce kutej w narzędziu kształtowym przy współczynniku tarcia $\mu=0.37$. Wartość maksymalnego odkształcenia plastycznego w odkuwce wynosi $\varepsilon=1.149$. Należy zauważyć, że realizując taki sam proces wydłużenia jak w przypadku narzędzi płaskich, uzyskujemy żądane wydłużenie przy mniejszej wartości maksymalnego odkształcenia plastycznego. Można, zatem przyjąć, że w odkuwce kutej w narzędziach kształtowych występuje bardziej równomierny stan odkształcenia niż w przypadku odkuwki kutej w narzędziu płaskim.



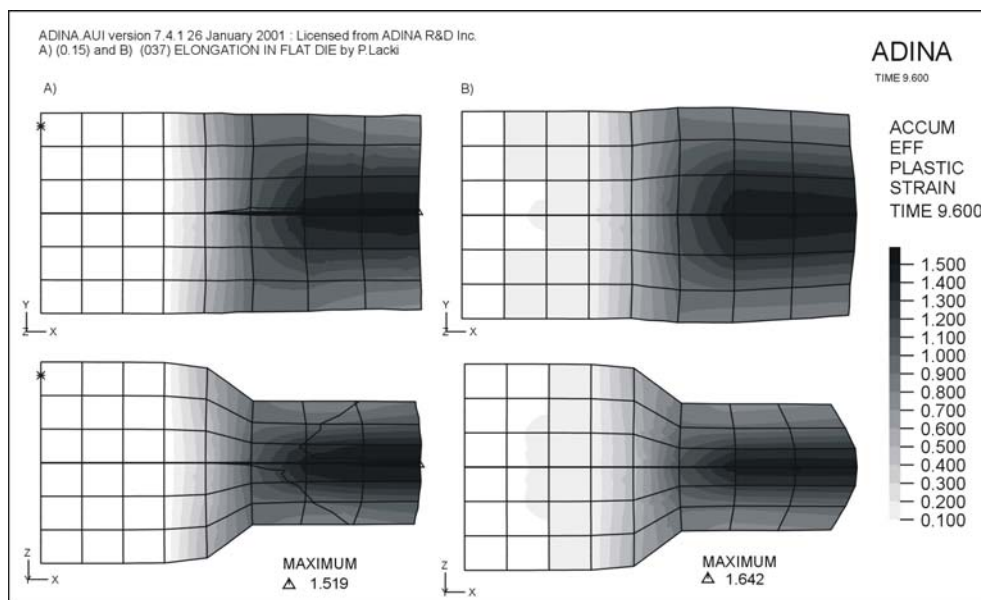
Rys. 2. Rozkład odkształceń plastycznych w odkuwce kutej w narzędziu kształtowym przy współczynniku tarcia $\mu=0.37$

Fig. 2. Distribution of plastic strains in the forging, which was deformed in the shaped tool. Frictional coefficient $\mu=0.37$

Większy opór płynięcia materiału na powierzchniach kontaktowych powoduje charakterystyczną beczkowatość odkuwki, oraz wzrost wartości odkształcenia plastycznego. Zwiększa się przez to niejednorodność odkształcenia, co niekorzystnie wpływa na własności mechaniczne odkuwki po procesie kucia. Sterowanie warunkami tarcia

na powierzchni kontaktu jest trudne, realizuje się je poprzez odpowiedni dobór smarów i chropowatości powierzchni.

Najbardziej istotnym parametrem w technologii kucia swobodnego jest wartość i charakter rozkładu odkształceń plastycznych w objętości kutego materiału. Porównując przekroje przedstawione na Rys. 3. można zauważyć, że większa wartość odkształcenia plastycznego występuje w narzędziu, dla którego przyjęto wyższy współczynnik tarcia.



Rys. 3. Rozkład odkształceń plastyczne dla płaskiej matrycy w charakterystycznych przekrojach i współczynniku tarcia A) $\mu = 0.15$; B) $\mu = 0.37$

Fig. 3. Distribution of plastic strains for the flat die in the characteristic sections. Frictional coefficient A) $\mu = 0.15$; B) $\mu = 0.37$

Wizualne porównanie przedstawionych rozkładów odkształceń plastycznych, daje tylko ich subiektywną ocenę. Z naukowego i praktycznego punktu widzenia korzystniejsze jest liczbowe porównanie odniesione do całej odkształconej objętości. Wartościami liczbowymi łatwiej jest operować, mogą one występować np. jako argumenty w procedurach optymalizacyjnych. Poniżej w tabelicy 4 zestawiono, niektóre obliczone parametry procesu kucia. Wartości takie charakteryzujące dany proces technologiczny mogą posłużyć do projektowania technologii kucia.

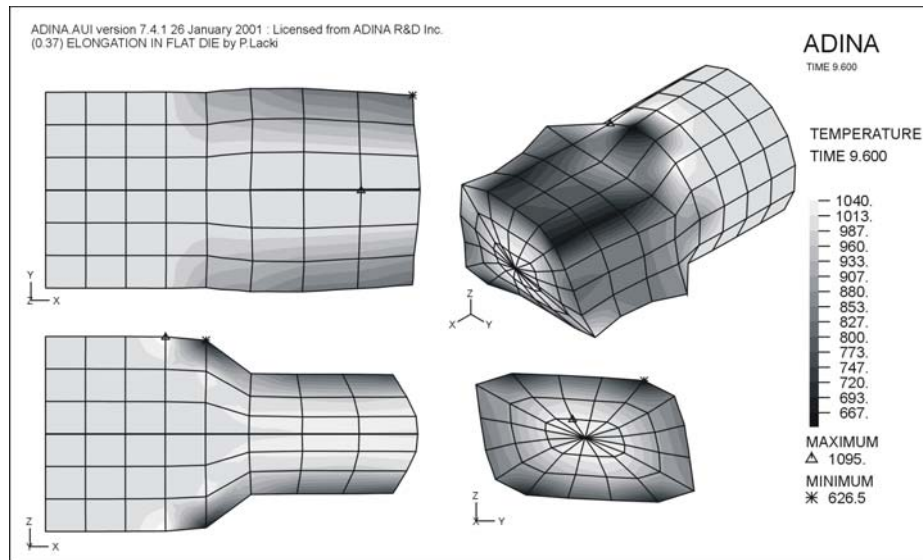
W tabeli przyjęto następujące oznaczenia: $T_{t=9.6[s]}^{MAX}$ [°C]- maksymalna temperatura w odkuwce; $T_{t=9.6[s]}^{MIN}$ [°C]- minimalna temperatura w odkuwce; ΔT [°C]- różnica krańcowych temperatur w odkuwce; ε_{MAX} – maksymalne odkształcenie w odkuwce; V_{MAX} - maksymalna objętość zajmowana przez przedział odkształcenia w objętości odkuwki; \bar{a} - średnie odkształcenie w danym przedziale.

Tablica 4. Wybrane parametry procesu kucia swobodnego dla analizowanych przypadków

Table 4. Some chosen parameters of an open die forging of the analysed cases

Rodzaj narzędzia	$T_{t=9.6[s]}^{MAX}$ [°C]	$T_{t=9.6[s]}^{MIN}$ [°C]	ΔT [°C]	ε_{MAX}	V_{MAX} [%]/ \bar{a}
Płaskie; $\mu = 0.15$	1093	478	615	1.519	33/0.875
Płaskie; $\mu = 0.37$	1095	626	469	1.642	31/1.125
Kształtowe; $\mu = 0.15$	1044	550	494	1.04	53/0.625
Kształtowe; $\mu = 0.37$	1047	589	458	1.149	47/0.625

Większe wydzielanie ciepła na skutek większego współczynnika tarcia wpływa również na podwyższenie temperatury w narzędziu. Może to mieć niekorzystny wpływ na trwałość narzędzi. Odkształcenie w narzędziach kształtowych obniża maksymalną temperaturę odkuwki, oraz podwyższa temperaturę minimalną w odniesieniu do narzędzi płaskich. Z tego względu odkuwki kute w narzędziach kształtowych mają bardziej równomierną temperaturę niż te kute w narzędziach płaskich. Rozbieżności te są wynikiem różnych warunków tarcia, jakie panują w poszczególnych narzędziach. Miejsca występowania ekstremalnych wartości nie zmieniają się. Na Rys. 4. pokazano przykładowy rozkład temperatury w odkuwce kutej w narzędziu płaskim przy współczynniku tarcia $\mu=0.37$



Rys. 4. Rozkład temperatury na powierzchni odkuwki kutej w narzędziu płaskim przy współczynniku tarcia $\mu=0.37$

Fig. 4. Temperature distribution on the forging surface, which was deformed in the flat tool. Frictional coefficient $\mu=0.37$

WNIOSKI

Istnieje możliwość efektywnej analizy procesu kucia swobodnego a prezentowana metoda może być użyta do optymalizacji procesu kucia. Dla narzędzi kształtowych obserwuje się większą jednorodność odkształceń plastycznych a wysokie wartości odkształceń plastycznych otrzymywanych dla narzędzi płaskich wpływają na wzrost temperatury w odkuwce i na powierzchni narzędzi.

Porównując różne warunki tarcia dla narzędzia kształtowego nie obserwuje się istotnych różnic w rozkładzie temperatur na przekrojach odkuwki. Również analiza wartości odkształceń plastycznych i geometrii przekroju wskazuje na brak znaczących różnic mimo dużej różnicy współczynnika tarcia. Te obserwacje pozwalają sądzić, że w narzędziach kształtowych współczynnik tarcia nie ma istotnego znaczenia. Wynika to z faktu, że w tych narzędziach, oprócz tarcia ślizgowego, występuje tarcie toczne.

LITERATURA

ADINA R&D, Inc. Theory and Modeling Guide Volume II: ADINA-T Report ARD 00-8 August 2000

Gierzyńska-Dolna M. Lacki P. The effect of hardening layers and technological lubricants on heat exchange between workpiece and die "Computers and Structures" 72 (1999) str. 165-175

Lacki P. Wpływ warstw utwardzających na własności eksploatacyjne matryc kuzniczych Obróbka Plastyczna Metali t.XI, Nr 3 str. 25-32

Recenzent:
Krzysztof KRAWCZYK

Summary

The influence of friction on the character of strains occurring during plastic working is known. Nevertheless, a quantitative description of the phenomenon is still posing a big research problem. Despite the application of good technological lubricants frictional resistance during hot metal forming processes such as: forging, extrusion or pressing are high - $\mu = 0.15-0.37$. Friction occurring between a deformed material and tool restrain material flow and as a result high strain heterogeneity occurs in the forging. Sometimes the deformed material cracks.

Intensity of tool wear resulting from frictional resistance also has an essential influence on a product quality (a forging), especially its shape and dimensions.

In the paper an attempt to analyse a frictional pair: "forging – anvil" was made. Experimental tests carried out with such frictional pair are difficult and the obtained results are not sufficient. Therefore numerical analysis can complete knowledge in this area. Finite element method was used for the description of friction in open die forging. Thermal and mechanical model, which takes into consideration heat resulting from friction, work of plastic deformation and material properties depending on temperature, was used.

The results of computer simulation of the open die forging process for different frictional condition were given.