

PODSTAWY ANALIZY PROCESU KUCIA MATRYCOWEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY LINII POŚLIZGU I CHARAKTERYSTYK

BASIS OF THE CLOSED-DIE FORGING ANALYSIS USING THE SLIP-LINE FIELD METHOD

Artykuł przedstawia podstawy analizy procesu kucia w matrycach otwartych z wykorzystaniem metody linii poślizgu i charakterystyk. Rozważania skoncentrowane są na procesie kucia poprzez wyciskanie (złożony schemat płynięcia metalu) przedmiotów typu trzpień z kołnierzem, przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia. Prezentowana praca przedstawia zasady konstrukcji siatki linii poślizgu, rozwiązywania statyki oraz kinematyki procesu kształtowania plastycznego.

Słowa kluczowe: kucie matrycowe, metoda linii poślizgu i charakterystyk

The basis of closed-die forging analysis using the slip-line field method has been presented in this article. The consider is included the closed-die forging with a flash. It is assured extrusion process (parts with the boss) in plane strain conditions. The article concerns the principles of construction the slip-line field, and the corresponding hodograf for two-dimensional flow.

Keywords: closed-die forging, slip-line field method.

1. Wstęp

Od kilkunastu lat obserwuje się intensywny rozwój technologii komputerowej. Rozwijane są również nowe metody analizy procesów kształtowania plastycznego metali, które w pełni wykorzystują możliwości komputerowe. Coraz częściej powstają techniki analizy bazujące na konwencjonalnych metodach, takich jak metoda ocen granicznych czy metoda linii poślizgu. Takim przykładem jest sekwencyjna technika analizy oparta na górnej ocenie (z ang. UBET – upper-bound elemental technique), bądź jej modyfikacja, wykorzystująca kinematyczne podstawy metody linii poślizgu (z ang. UBST – upper-bound stream elemental technique) [1, 2].

Analiza procesów obróbki plastycznej takimi metodami pozwala na szybkie uzyskiwanie informacji na temat rozpatrywanego procesu. Dokładność wyników zależy od przyjętych uproszczeń i jest mniejsza niż w przypadku metody elementów skończonych (MES). Jednakże, mogą one być bezpośrednio interpretowane przez odpowiednie procedury programu, który implementuje daną metodę. Natomiast MES nie może przeprowadzać takich bezpośrednich interpretacji [1, 2, 3].

Jedną ze wspomnianych konwencjonalnych metod, jest metoda linii poślizgu i charakterystyk. Niniejszy artykuł przedstawia podstawy analizy procesu kucia matrycowego wyrobów typu trzpień z kołnierzem z wykorzystaniem tej metody, przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia.

2. Metoda linii poślizgu i charakterystyk

Metoda ta jest oparta na zjawisku towarzyszącym odkształceniom plastycznym. Zjawisko to polega na pojawianiu się na powierzchni odkształcanego materiału charakterystycznych krzywych, które nazwano liniami poślizgu, gdyż wzdłuż nich występuje wzajemne przemieszczanie materiału [4].

Metoda linii poślizgu i charakterystyk pozwala na wyznaczanie stref plastycznych w odkształcanym wyrobie, rozkładu naprężeń oraz nacisków na powierzchni styku materiału z narzędziem, zarówno w płaskim jak i osiowo-symetrycznym stanie odkształcenia. Pozwala ona również na wyznaczenie prędkości płynięcia materiału [5, 6].

2.1. Rozwiązanie statyczne

Analiza procesów obróbki plastycznej tą metodą oparta jest na rozwiązywaniu szeregu problemów brzegowych i charakterystycznych [4, 5, 6], które umożliwiają zbudowanie ortogonalnej siatki linii poślizgu. Składa się ona z rodzin linii α i β (rys. 1.) spełniających ogólne równanie charakterystyk, które ma następującą postać [4]:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\left(\varphi \mp \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

gdzie: x, y – współrzędne linii w prostokątnym układzie kartezjańskim; φ – parametr kątowy zgodnie z rys. 1.

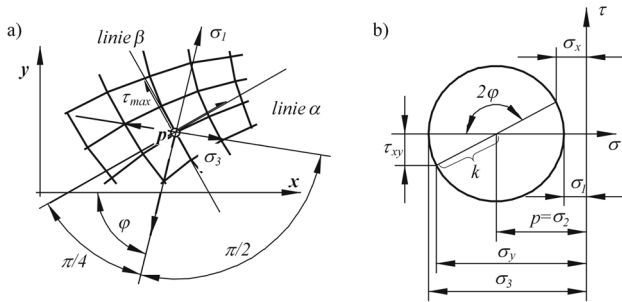
Styczne do linii poślizgu w punktach węzłowych stanowią kierunki wzdłuż których naprężenia styczne τ osiągają wartość maksymalną. Na rys. 1. przedstawiono schemat takiej siatki oraz panujący stan naprężenia w przykładowym punkcie węzłowym za pomocą koła Mohra. Wspomniany stan naprężenia (przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia i materiału idealnie plastycznego) wyznaczany jest przez rozwiązanie układu równań (2) i zastosowanie warunku plastyczności (3), które są przedstawione w postaci [2, 4, 7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2 \quad (3)$$

gdzie: $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – naprężenie w kartezjańskim układzie współrzędnych $\{x, y\}$; k – granica plastyczności materiału przy czystym ścinaniu.

W praktyce, stan naprężenia w punktach węzłowych siatki charakterystyk opisują dwa parametry, tj. średnie ciśnienie p oraz parametr kątowy φ (ich znaczenie ilustruje rys. 1b.). Sposób rozwiązania układu równań (2) i (3) oraz sposób wyznaczania współrzędnych punktów węzłowych, który oparty jest na geometrii analitycznej, jest szerzej omówiony w literaturze specjalistycznej, np. [4, 7].



Rys. 1. Siatka linii poślizgów a i b (a) oraz koło Mohra (b) przedstawiające interpretację stanu naprężenia w punkcie węzłowym; σ , τ – naprężenia, p – średnie ciśnienie, φ – parametr kątowy, k – granica plastyczności przy czystym ścinaniu

2.2. Wyznaczanie prędkości płynięcia

Wyznaczone pole prędkości przemieszczeń materiału metodą charakterystyk, określa kinematykę płaskiego stanu odkształcenia. Aby móc je określić, wymagana jest uprzednia znajomość stanu naprężenia. Kinematykę plastycznie odkształcanego materiału, przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia, opisuje równanie stowarzyszonego prawa płynięcia (4) oraz warunek nieściśliwości (5), które są wyrażone w następującej postaci [2, 4, 7]:

$$(\sigma_x - \sigma_y) \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) - 4\tau_{xy} \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

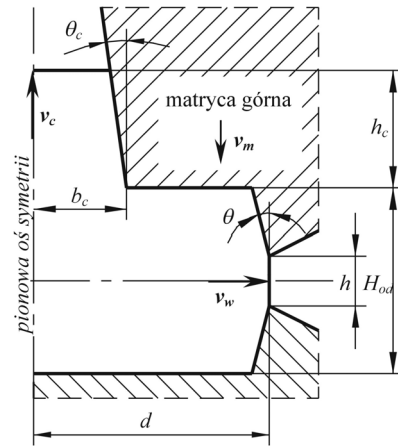
Pole prędkości przemieszczeń materiału można przedstawić w sposób graficzny za pomocą hodografu prędkości, który jest budowany na płaszczyźnie prędkości. Wektory poszczególnych prędkości są odkładane od wspólnego punktu, zwanego biegunem. Pole prędkości przemieszczeń umożliwia analizę stanu odkształcenia, ustalenie stref odkształcanych plastycznie oraz obszarów martwych w których występuje tylko odkształcenie sprężyste [7]. Zasady budowy hodografu są identyczne jak zasady budowy siatki poślizgu i w pewnym stopniu hodograf jest jej odwzorowaniem, gdyż charakterystyki pola prędkości przemieszczeń pokrywają się z liniami poślizgu.

3. Analiza procesu kucia

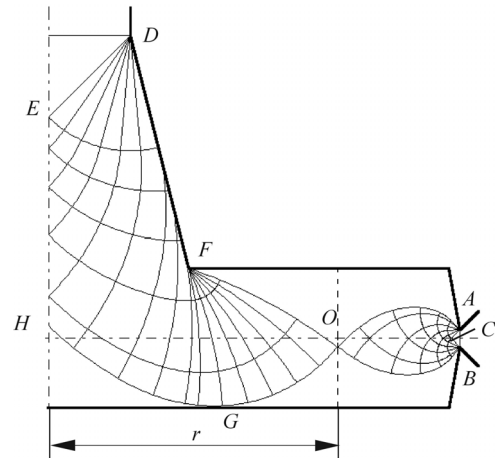
Obiektem analizy jest proces kucia matrycowego charakteryzujący się złożonym schematem płynięcia. Część materiału, znajdującego się w stanie plastycznym, jest wyciskana w kierunku czopa, natomiast pozostała jego część jest wypychana w stronę wypływki. Na rys. 2. przedstawiono schemat omawianego procesu.

Analiza jest przeprowadzana przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia, natomiast materiał jest idealnie plastyczny, izotropowy i jednorodny. Podobna analiza była przeprowadzana przez Biswas'a i Ramesh'a [8]. Wykazali oni, że użycie metody linii poślizgu i charakterystyk do analizy tego typu procesu kucia zapewnia uzyskanie szerokiego spektrum wyników (np. kształtu strefy plastycznej, kinematyki płynięcia metalu czy efektywności wypełnienia wykroju matrycy przez materiał).

Na rys. 3. przedstawiono przykładową konstrukcję siatki linii poślizgu sporządzoną przy pomocy autorskiego programu „ForgeSLF”. Określa ona obszar plastyczny odkuwki, który składa się z dwóch stref.



Rys. 2. Schemat procesu kucia matrycowego; θ , θ_c – kąt pochylecia kuźniczego, d – szerokość wykroju, H_{od} – wysokość wykroju, h – wysokość otwartego rowka wypływki, h – wysokość wyciśniętego czopa, b_c – szerokość podstawy czopa, v – prędkości przemieszczeń



Rys. 3. Siatka linii poślizgu; A-G – charakterystyczne punkty, O – punkt neutralny, r – odległość punktu neutralnego od pionowej osi odkuwki

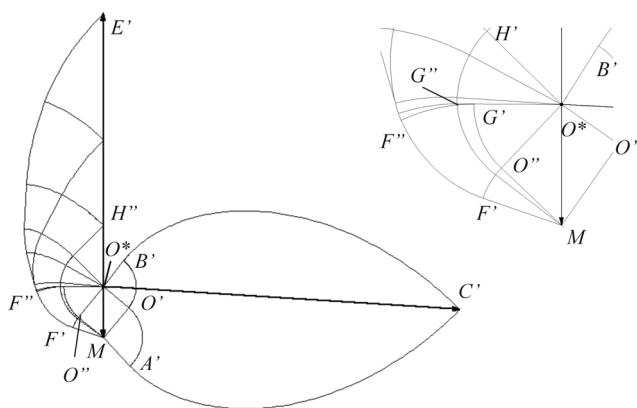
Pierwszy region, określony polem *DEGOF*, obejmuje materiał płynący w kierunku czopa odkuwki. Konstrukcję tej siatki rozpoczyna się od powierzchni swobodnej wyciskanego występu (pionowa linia od punktu D na rys. 3.). Rozwiązując zagadnienia charakterystyczne jest ona wykreślana, tak aby wypełniła wykroj matrycy. Obszar objęty przez skonstruowaną siatkę jednoznacznie określa strefę plastyczną.

Drugi region (pole *ABO*) określa materiał, który jest wypychany w stronę wypływki. Konstrukcję siatki dla tej strefy przeprowadza się w podobny sposób, z tym że, rozpoczyna się ją od powierzchni swobodnej wypływki (linia *AB* na rys. 3.).

Kluczową czynnością analizy jest określenie lokalizacji punktu neutralnego *O* oddzielającego wspomniane dwie strefy materiału. W tym celu wymagana jest znajomość stanu naprężenia panującego w punktach węzłowych wcześniej sporządzonych siatek linii poślizgu. Sposób odnajdywania położenia tego punktu (oparty na metodzie odwrotnych odległości) jest szerzej omówiony w literaturze specjalistycznej, np. [4]. W niniejszym opracowaniu zostanie przedstawiona jedynie idea tego rozwiązania. Mianowicie, polega ona na wielokrotnym losowaniu punktu znajdującego się w obrębie wykroju matrycy, a następnie określaniu jest stanu naprężenia, dla dwóch rozpatrywanych siatek linii poślizgu, panujący w naj-

bliższym otoczeniu tego punktu. Dla każdej iteracji obliczany jest błąd, który stanowi sumę różnicy funkcji parametrów stanu naprężenia. Ostatecznie przyjmowany jest ten punkt, dla którego obliczony błąd był najmniejszy.

Na rys. 4. przedstawiono hodograf prędkości przemieszczenia odpowiadający siatce linii poślizgu z rys. 3. Konstrukcja jego oparta jest na tych samych zasadach, co konstrukcja siatki linii poślizgu. Każdy punkt wspomnianej siatki ma odwzorowanie na hodografie. Zasady budowy hodografu prędkości, dla podobnych procesów kształtowania, wyczerpująco są omówione w literaturze specjalistycznej [8, 9].



Rys. 4. Hodograf prędkości; O^* - biegun hodografu (szczegółowy opis w tekście)

Biegun O^* reprezentuje wszystkie punkty strefy martwej przylegającej do dolnej matrycy. Natomiast punkt M odpowiada punktom strefy martwej przylegającej do matrycy górnej. Punkt neutralny O na płaszczyźnie prędkości jest reprezentowany przez wierzchołki czworoboku $O^*O'MO''$. Odcinek O^*M stanowi wektor prędkości matrycy górnej v_m . Prędkości wypływu materiału w wypływkę v_w i prędkość przemieszczania się powierzchni swobodnej czopa v_c są przedstawione jako odcinki, odpowiednio O^*C' i O^*E' .

5. Literatura

- [1] Wang J. P.: *The UBST approach to the stress analysis of plane-strain upsetting with a newly constructed model of slip-line field*. Journal of Materials Processing Technology 58 (1996) 267-273.
- [2] Wang J. P., Lin Y.T.: *The load analysis of plane-strain forging processes using the upper-bound stream-function elemental technique*. Journal of Materials Processing Technology 47 (1995) 345-359.
- [3] Lee J.H., Kim Y.H., Bae W.B.: *An upper-bound elemental technique approach to the process design of asymmetric forgings*. Journal of Materials Processing Technology 72 (1997) 141-151.
- [4] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: *Obróbka plastyczna. Obliczanie sił kształtowania*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2002.
- [5] Samołyk G.: *Wykorzystanie metody linii poślizgu do numerycznej analizy procesu ciągnięcia*. Mat. konf. I sympozjum doktoranckie. Współczesne technologie w budowie maszyn, maj 2002, Lublin. Wyd. Pol. Lubelskiej, 2002, s. 109-115.
- [6] Samołyk G.: *Numeryczne wyznaczanie pola naprężeń metodą linii poślizgu w procesie wyciskania współbieżnego*. Mat. konf. 23 MSN, maj 2002, Zielona Góra. Mechanika. Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2002, s. 128-133.
- [7] Wasiuńk P.: *Teoria procesów kucia i prasowania*. WNT, Warszawa 1991
- [8] Biswas S. K., Ramesh M.: *Study of forging design using slip-line fields*. Journal of Materials Processing Technology, 25 (1991) s.1-13.
- [9] Johnson W., Kudo H.: *The mechanics of metal extrusion*. Manchester University Press, Manchester 1962.

Konstrukcję hodografu rozpoczyna się od naniesienia odcinka O^*M (np. o jednostkowej długości reprezentującej prędkość matrycy) oraz wykreślenia czworoboku $O^*O'MO''$. Położenie punktów O' i O'' jest zdeterminowane przez wartości parametru kąтового φ w punkcie węzłowym O należącego, odpowiednio, do siatki części wypływowej i czopa. Oznacza to, że odcinek $O'M$ jest równoległy do stycznej linii poślizgu OA w punkcie węzłowym O . Wszystkie kąty wierzchołkowe wyżej wymienionego czworoboku są sobie równe, a ich wartość wynosi 90° .

Następnie, analizując skrajne linie poślizgu OF , OG , OA i OB , wykreśla się na płaszczyźnie prędkości siatkę promieniowe hodografu, odpowiednio $O''MF'$, $O''O^*G'$, $O'MA'$ i $O'O^*B'$. Kolejnym krokiem jest rozwinięcie konstrukcji, analizując pozostałe skrajne linie poślizgu.

4. Podsumowanie

Obecnie w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej są prowadzone prace mające na celu opracowanie nowej techniki analizy sekwencyjnej przedstawionego procesu kucia matrycowego. Na podstawie wstępnych analiz ustalono, że wykorzystanie do tego celu metody linii poślizgu i charakterystyk pozwala w wystarczającym przybliżeniu uzyskiwać takie informacje, jak rozkład naprężenia, prędkości przemieszczenia materiału, odkształcenia włókien materiału w strefie plastycznej oraz rozkład nacisków powierzchniowych (siły kształtowania). W przypadku przedstawionego procesu kucia matrycowego, za pomocą wstępnie opracowanego autorskiego programu „ForgeSLF” udało się przeprowadzić symulację procesu i określić wysokość, na jaką zostanie wyciśnięty czop. Weryfikacja MES wykazała, że uzyskana wysokość odkuwki oraz wyznaczona siła kucia pozostają w dobrej zgodności, zarówno jakościowej jak i ilościowej. Ponadto w porównaniu z czasem obliczeń ogólnodostępnych komercyjnych programów MES (FormFEM 1.5., MSC.SuperForm 2000), opracowany program „ForgeSLF” jest około dziesięciokrotnie szybszy (przy ustawieniach zapewniających wysoką dokładność analizy). Również program ten zapewnia zdecydowanie lepszą stabilność obliczeń.

Mgr inż. Grzegorz Samołyk

Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: gsam@archimedes.pol.lublin.pl