
Tomasz BULZAK*, **Zbigniew PATER***, **Janusz TOMCZAK***

PŁYNIĘCIE METALU PODCZAS WYCISKANIA WIERTEŁ KRĘTYCH DLA RÓŻNYCH CZYNNIKÓW TARCIA

METAL FLOW IN TWIST DRILL EXTRUSION WITH DIFFERENT FRICTION FACTORS

Słowa kluczowe:

czynnik tarcia, wyciskanie, wiertło kręte

Key words:

friction factor, extrusion, twist drill

Streszczenie

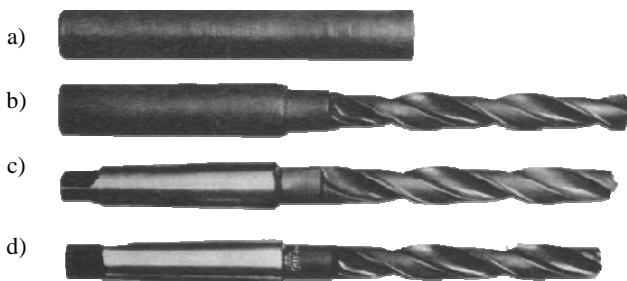
W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych procesu wyciskania współbieżnego wiertel krętych. Do badań wykorzystano oprogramowanie oparte na metodzie elementów skończonych DEFORM 3D. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla różnych sił tarcia, których wielkość określano poprzez zmianę czynnika tarcia plastycznego. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych prześledzono wpływ zmiennych parametrów tribologicznych na powierzchni kontaktu materiału kształtowanego i narzędzi na kinematykę płynięcia metalu podczas wyciskania elementów śrubowych. W wyniku wykona-

* Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej, ul. Nadbystrzycka 36, 20 – 618 Lublin, t.bulzak@pollub.pl.

nych symulacji stwierdzono, że zwiększenie sił tarcia powoduje w przypadku wyciskania wiertel krętych wyrównanie gradientu prędkości płynięcia metalu. Ponadto przedstawiono uzyskane rozkłady odkształceń w wyrobach otrzymanych na drodze numerycznej symulacji oraz zestawiono parametry siłowe procesu dla rozpatrywanych przypadków.

WPROWADZENIE

Kształtowanie plastyczne mimo dużej konkurencji ze strony obróbki ubytkowej (frezowanie i szlifowanie) jest szeroko stosowane do produkcji narzędzi skrawających, a w szczególności wiertel krętych [L. 1]. Na przestrzeni lat zostało opracowanych i wdrożonych do przemysłu wiele metod obróbki plastycznej wiertel krętych. Obecnie przemysł narzędziowy opiera się przede wszystkim na wysoko wydajnym procesie skośnego walcowania w układzie czterech segmentów, który zapewnia wydajność nieosiągalną żadnymi innymi metodami. W niektórych krajach do produkcji wiertel o dużych średnicach stosowane jest również wyciskanie współbieżne. Zastosowanie metod obróbki plastycznej do produkcji wiertel krętych ukierunkowane jest przede wszystkim pod kątem zmniejszenia zużycia materiału, poprawy właściwości mechanicznych oraz zwiększenia wydajności produkcji [L. 2]. Jednym z ciekawszych sposobów wytwarzania wiertel krętych jest wyciskanie. Proces ten pozwala kształtować wiertła o dowolnej geometrii przekroju poprzecznego w zakresie średnic \varnothing 13–70 mm oraz z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi o średnicach w przedziale \varnothing 10–50 mm. Cykl produkcyjny wyciskania wiertła krętego w zależności od jego długości i średnicy waha się w granicach od 30 do 80 sekund. Umożliwia to wytwarzanie w ciągu zmiany około 900 sztuk wiertel [L. 3]. Kolejne fazy kształtowania wiertła krętego metodą wyciskania przedstawiono na Rys. 1.



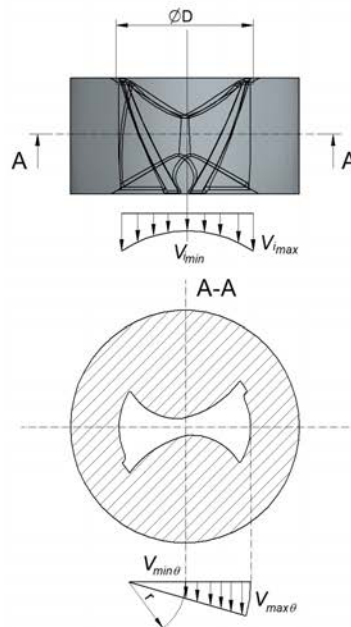
Rys. 1. Kolejne fazy wytwarzania wiertel w procesie wyciskania: a) wsad, b) półfabrykat wiertła po wyciśnięciu, c) po obróbce chwytu, d) po ostatecznym szlifowaniu i ostrzeniu [L. 4]

Fig. 1. Consecutive stages of producing drills by the extrusion process: a) billet, b) semi-finished drill after extrusion, c) after drill-shank machining, d) after final grinding and sharpening

Mimo szerokiego zastosowania w przemyśle tematyka kształtowania plastycznego wiertel krętych jest niechętnie podejmowana w specjalistycznej literaturze. Dlatego też w niniejszym opracowaniu podjęto się przedstawienia analizy płynięcia materiału podczas wyciskania wyrobów śrubowych na przykładzie wiertła krętego o średnicy $\varnothing 25$ mm.

ZALEŻNOŚCI KINEMATYCZNE

W typowych procesach wyciskania dominuje promieniowo-osiove płynięcie materiału. Wprowadzenie cyklicznej zmiany drogi odkształcenia w procesach wyciskania KoBo wymusza w kształtowanym materiale płynięcie materiału w kierunku obwodowym, co sprzyja zmniejszeniu osiowej siły kształtowania [L. 5]. Podczas wyciskania wiertel krętych sama geometria matrycy wymusza w kształtowanym materiale jego płynięcie w trzech kierunkach, tj. osiowym, obwodowym i promieniowym. Pierwszymi badaczami, którzy przedstawili opis składowych poszczególnych prędkości podczas wyciskania wiertel krętych byli Shlyakhin A.P. i Shukhat O.M. W swojej pracy zaprezentowali oni zależności opisujące kinematykę płynięcia materiału podczas wyciskania wiertel krętych, których celem było określenie optymalnych wymiarów matrycy zapewniających uzyskania dokładnego kształtu śrubowego [L. 6]. Schemat rozkładu prędkości zaproponowany przez przytoczonych autorów przedstawiono na **Rys. 2**.



Rys. 2. Schemat prędkości metalu przy wyciskaniu wiertła [L. 6]

Fig. 2. Metal flow velocity in drill extrusion

Wspomniani autorzy zaproponowali, aby wartości zredukowanych prędkości maksymalnych V_{maxi} oraz minimalnych V_{mini} wyznaczyć z następujących zależności:

$$\left. \begin{aligned} V_{mini} &= \lambda V \\ V_{maxi} &= \lambda V \sqrt{1 + \frac{\pi^2 D^2}{S^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

gdzie: V – prędkość stempla mm/s,
 λ – stopień przerobu,
 D – średnica wyciskanego wiertła mm,
 S – skok wiertła mm.

W celu wyznaczenia prędkości $V_{max\theta}$ i $V_{min\theta}$ w kierunku obwodowym konieczna jest znajomość promienia wewnętrznego matrycy r , wyrażonego następującą zależnością:

$$r = \frac{0,5D}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2 D^2}{S^2}} - 1} \quad (2)$$

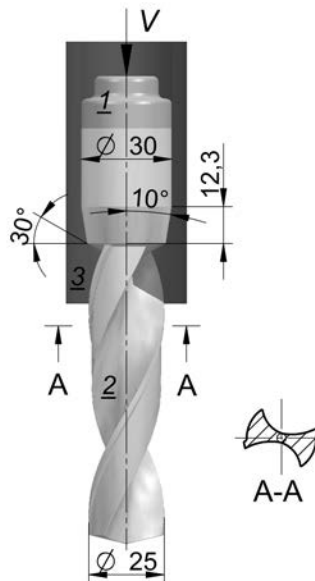
Wartości prędkości w kierunku obwodowym opisują kolejne zależności:

$$\left. \begin{aligned} V_{min\theta} &= \lambda V \frac{r}{r + 0,25D} \\ V_{max\theta} &= \lambda V \frac{r + 0,5D}{r + 0,25D} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Przedstawiony schemat prędkości płynięcia materiału (**Rys. 2**) znacząco różni się od występującego w typowych procesach wyciskania, w których zazwyczaj maksymalną prędkość płynięcia mają warstwy zlokalizowane najbliżej środka wyciskanej próbki. W przypadku wyciskania wiertła sytuacja jest odwrotna i prędkość płynięcia materiału wzrasta wzdłuż promienia wiertła wraz ze wzrostem szerokości pióra. Przedstawione wcześniej zależności opisujące kinematykę płynięcia materiału podczas wyciskania wiertła znane są od dosyć dawna, a ich opis sprowadza się do zagadnienia ruchu po torze spiralnym. Warto również podkreślić, że wyznaczone z podanych zależności prędkości opisują bardzo dobrze przemieszczanie się kolejnych warstw materiału w części kalibrującej matrycy. Aby uzupełnić wiedzę na ten temat, dokonano analizy procesu wyciskania z użyciem metody elementów skończonych pod kątem płynięcia materiału podczas kształtowania wiertła krętych. Zaproponowane badania mają na celu prześledzenie kinematyki płynięcia materiału w strefie uplastycznienia oraz jej wpływu na jednorodność odkształceń plastycznych.

MODELOWANIE NUMERYCZNE

Zaplanowaną analizę płynięcia materiału wykonano z użyciem programu DEFORM 3D. Na jej potrzeby zbudowano model geometryczny przedstawiony na **Rys. 3**. W skład modelu wchodził stempel – 1, matryca z pojemnikiem – 3 oraz materiał wsadowy – 2 modelowany jako obiekt sztywno-plastyczny. Materiał wsadowy w postaci walca o wymiarach początkowych $\varnothing 28 \times 50$ mm poddano dyskretyzacji z użyciem elementów tetragonalnych czterowęzłowych. Do opisu zachowania się materiału wsadowego (stal SW7M) przyjęto model materiałowy na podstawie krzywych płynięcia przedstawionych między innymi w opracowaniu [L. 7]. Model materiałowy stali SW7M obejmował krzywe płynięcia w zakresie temperatur 900–1150°C oraz prędkości odkształcenia 1–100 1/s. Początkowa temperatura wsadu wynosiła 1100°C, natomiast temperatura narzędzi była stała w ciągu całego procesu i wynosiła 300°C. Przyjęto również, że współczynnik wymiany ciepła między wsadem a narzędziami wynosił 10 kW/m²K, natomiast między wsadem a otoczeniem 0,2 kW/m²K. W trakcie symulacji stempel poruszał się ze stałą prędkością $V = 160$ mm/s. Stopień przerobu dla przyjętego sposobu wyciskania wiertła wynosił 4,34.



Rys. 3. Model geometryczny procesu wyciskania wiertła krętego: 1 – stempel, 2 – kształtowane wiertło, 3 – matryca z pojemnikiem

Fig. 3. Geometric model of the twist drill extrusion process: 1 – punch, 2 – drill being formed, 3 – container die

Warunki kontaktu między parami trącymi opisywał model tarcia stałego zgodnie z równaniem:

$$\tau = mk \quad (4)$$

gdzie: τ – naprężenia styczne na kontakcie materiału kształtowanego z narzędziami,

m – czynnik tarcia plastycznego $0 \leq m \leq 1$,

k – granica plastyczności na ścinanie.

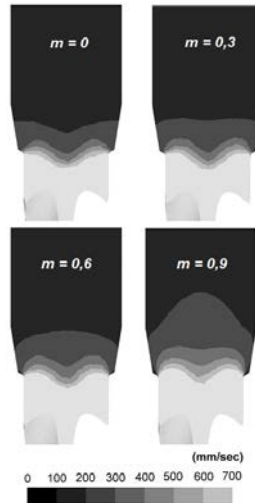
W celu rozszerzenia zaplanowanej analizy porównano również wpływ sił tarcia na przebieg procesu dla następujących czynników tarcia $m = 0; 0,3; 0,6; 0,9$.

Przyjęte czynniki tarcia odpowiadają następującym warunkom smarowania: 0,9 – wyciskanie na sucho; 0,6 – roztwór wodny NaCl na narzędzia, 0,3 – grafit w wodzie na narzędzia; 0 – warunki idealne bez tarcia. Symulacje bez tarcia wykonano w celu uzyskania możliwości porównania pozostałych schematów wyciskania z warunkami idealnymi.

REZULTATY

Na podstawie wykonanych symulacji uzyskano możliwość przeanalizowania schematu płynięcia metalu podczas wyciskania wiertel krętych oraz dokonania oceny jakościowej wpływu sił tarcia na proces. Rozkład zredukowanych prędkości płynięcia materiału w strefie plastycznej został przedstawiony na **Rys. 4**. Najmniejsze wartości prędkości dla wszystkich analizowanych przypadków zlokalizowane są w osi kształtowanego wyrobu (rdzeń wiertła). Wraz ze wzrostem odległości od osi wyrobu prędkość płynięcia materiału wzrasta, osiągając maksimum w odległości $2/3$ promienia wiertła. Zmiany prędkości wg przedstawionego schematu są warunkowane kształtem przekroju poprzecznego wiertła oraz po części spiralnym profilem matrycy. Wzrost sił tarcia na powierzchni kontaktu materiału odkształcanego i matrycy powoduje wyrównanie prędkości płynięcia materiału w strefie plastycznej. Przy czym największe wyrównanie prędkości obserwuje się dla czynnika tarcia zbliżonego do granicznego. Dla przypadku tego można zaobserwować wzrost prędkości płynięcia materiału już przed pierwszą matrycą stożkową.

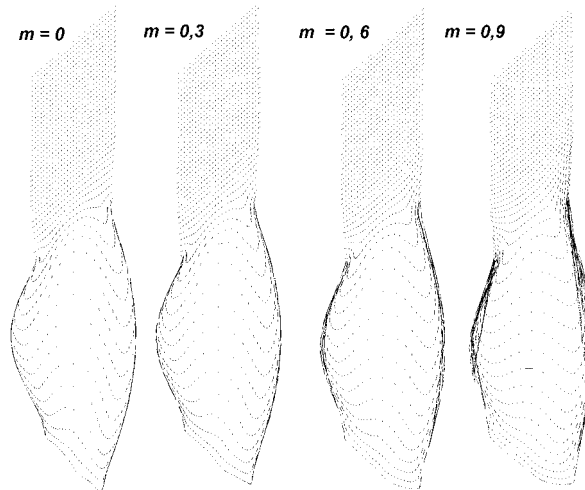
Na **Rys. 5** pokazano obraz zdeformowanych siatek koordynacyjnych naniesionych na średnicową powierzchnię materiału wsadowego. Płaszczyzna, na której zostały umieszczone te siatki pokrywa się z płaszczyzną podziału profilu wiertła przechodzącą przez środek piór w początkowej strefie matrycy. Z uzyskanego obrazu zdeformowanych siatek koordynacyjnych wynika, że zwężenie przekroju matrycy w miejscu rdzenia wiertła powoduje rozdzielanie materiału na dwie strugi. Materiał znacznie szybciej płynie w piórach wiertła, co obrazują poprzeczne linie zniekształconej siatki koordynacyjnej. Ze wzrostem tarcia na



Rys. 4. Rozkład zredukowanych prędkości płynięcia metalu

Fig. 4. Distribution of metal flow reduced velocities

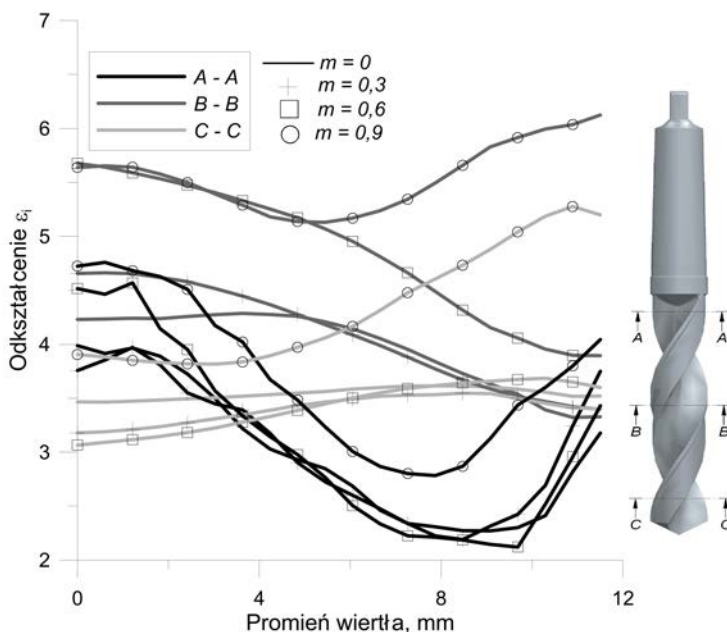
powierzchni matrycy obserwuje się wyrównanie prędkości płynięcia materiału, co uwidaczniają zniekształcone w mniejszym stopniu poprzeczne linie siatki. Zwiększone tarcie na powierzchni matrycy przekłada się również na mniejszą strzałkę ugięcia linii wzdłużnych, które przy rozdzielaniu materiału na dwie strugi oddalają się od osi kształtowanego wyrobu.



Rys. 5. Zniekształcenie siatek koordynacyjnych uzyskane dla wyciskania wiertel z różnymi czynnikami tarcia

Fig. 5. Coordinate grid distortion obtained in drill extrusion at different friction factors

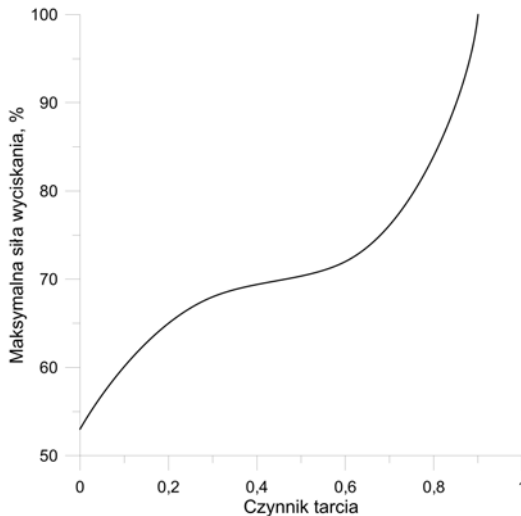
Według wielu autorów [L. 8] mniejsze zniekształcenie siatki koordynacyjnej podczas wyciskania przekłada się na bardziej jednorodne pole odkształceń plastycznych wzdłuż osi wyrobu. Równomierność odkształcenia w procesach wyciskania jest ważna, gdyż ma swoje odzwierciedlenie we własnościach mechanicznych ukształtowanych elementów. Na **Rys. 6** przedstawiony został rozkład odkształceń zredukowanych wzdłuż promienia ukształtowanych wiertel w trzech przekrojach porzeczných. Największą jednorodność odkształceń zaobserwowano w przedniej części wiertła (przekrój C-C) dla wyciskania z czynnikami tarcia $m = 0; 0,3; 0,6$; wyrównanie prędkości płynięcia przy czynniku tarcia $m = 0,9$ nie przekłada się na bardziej równomierne odkształcenie w tym miejscu. Wyciskanie z czynnikiem tarcia zbliżonym do granicznego sprzyja jednorodności odkształceń w części środkowej wiertła (przekrój B-B). Niezależnie od przyjętego czynnika tarcia największa nierównomierność odkształceń wiertła ma miejsce w jego tylnej części w przekroju A-A. Odkształcenia na powierzchni pióra (maksymalny promień) kształtowanego wiertła dla wszystkich przyjętych czynników tarcia oprócz $m = 0,9$ przyjmują zbliżone wartości na poziomie $\varepsilon_i \approx 3,5$. Spostrzeżenie to jest interesujące, gdyż zazwyczaj w procesach obróbki plastycznej wzrost tarcia na powierzchni narzędzi powoduje zwiększenie wartości odkształceń w zewnętrznych warstwach wyrobu.



Rys. 6. Rozkład intensywności odkształceń wzdłuż promienia wiertła przy różnych czynnikach tarcia

Fig. 6. Distribution of effective strain along the drill radius at different friction factors

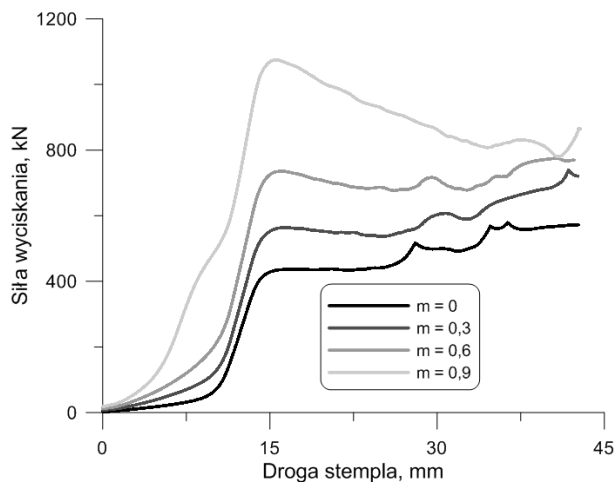
Tarcie w procesach obróbki plastycznej ma przede wszystkim istotny wpływ na wartości maksymalnych sił kształtowania. Dla analizowanego zagadnienia wpływ wielkości sił tarcia na maksymalną siłę wyciskania dla przyjętego wiertła krętego przedstawiono na **Rys. 7**. Z wykresu tego wynika, że wzrost czynnika tarcia od minimalnego (wyciskanie bez tarcia) do granicznego powoduje blisko dwukrotne zwiększenie siły wyciskania. Na szczególną uwagę zasługuje przebieg zmiany maksymalnej siły w przedziale odpowiadającym czynnikom tarcia od 0,3 do 0,6; gdzie na wykresie tym można zaobserwować w przybliżeniu stałą wartość siły maksymalnej. W celu dokładniejszej analizy tego zjawiska konieczne jest prześledzenie zmiany wartości siły wyciskania w całym zakresie drogi kształtowania. Przebieg charakterystyk siłowych procesu w funkcji drogi stempla dla analizowanych przypadków obrazuje **Rys. 8**.



Rys. 7. Maksymalna siła wyciskania wyrażona w procentach w zależności od czynnika tarcia
Fig. 7. Maximum extrusion force expressed as percentages depending on friction factor

Z krzywych przedstawionych na **Rys. 8** wynika, że siły tarcia w procesie wyciskania współbieżnego wiertła mają nie tylko wpływ na wartości maksymalne sił kształtowania, ale również na sam ich przebieg w funkcji przemieszczenia stempla. Dla przypadków wyciskania, w których na powierzchni kontaktu występowały siły tarcia można zaobserwować, że siły w końcowym stadium procesu dążą do jednej ustalonej wartości. Świadczy to przede wszystkim o poprawności przeprowadzonych symulacji, gdyż część całkowitej pracy sił wyciskania odpowiedzialna za realizację odkształceń plastycznych będzie w każdym z rozpatrywanych przypadków na podobnym poziomie. Podczas wyciskania z czynnikiem tarcia odpowiednio równym 0 oraz 0,3 siła w ustalonym procesie wzrasta, osiągając maksimum w końcowej fazie. W przypadku wyciskania z czynnikiem 0,6 siła we właściwym stadium wyciskania

ustala się na stałym poziomie w trakcie całej drogi kształtowania, natomiast dla czynnika tarcia 0,9 obserwowany jest wyraźny spadek siły wyciskania na tym etapie. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w pracy [L. 9] najbardziej korzystny jest przebieg siły wyciskania przy czynniku tarcia równym 0,6. Tłumaczy się to tym, iż przy stałej sile wyciskania naciski na powierzchni matrycy są również stałe, co przekłada się na równe odkształcenia sprężyste matrycy w trakcie głównego stadium wyciskania. Jednakowe sprężynowanie matrycy ma swoje odzwierciedlenie w zachowaniu stałego przekroju poprzecznego na długości wyrobu. Położenie maksimum na krzywej przebiegu siły również zależy od czynnika tarcia i tak przy mniejszych siłach tarcia maksymalna siła wyciskania występuje w końcowej fazie procesu, natomiast wraz ze wzrostem tarcia maksimum siły występuje w momencie wypełnienia przez materiał odkształcanej komory pojemnika.



Rys. 8. Przebieg siły wyciskania w zależności od czynnika tarcia

Fig. 8. Extrusion force depending on friction factor

Przebieg głównej siły kształtowania w procesach wyciskania z jednej strony warunkowany jest oddziaływaniem sił tarcia na powierzchni kontaktu materiału z narzędziami, natomiast z drugiej strony zależy od zmian temperatury w trakcie trwania procesu. Wzrost sił tarcia oprócz zwiększania sił niezbędnych do uzyskania wpływa również na zwiększenie temperatury kształtowanego materiału na skutek zamiany pracy sił tarcia na ciepło, co skutkuje zmniejszeniem naprężeń uplastyczniających materiał. Dla wyciskania z czynnikiem tarcia od 0 do 0,3 dominujące jest zjawisko wychładzania materiału na skutek kontaktu z chłodniejszymi narzędziami, dlatego też w stanie ustalonym procesu obserwujemy wzrost siły kształtowania. Udział zjawisk wpływających na przebieg siły w podczas wyciskania z czynnikiem tarcia $m = 0,6$ jest najbardziej zbilansowa-

ny. W tym przypadku można przyjąć, że wzrost siły kształtowania w jednostce czasu spowodowany stratami ciepła odpowiada w dużym przybliżeniu spadkowi siły na skutek zmiany powierzchni kontaktu materiału wsadowego z pojemnikiem. Podczas wyciskania z czynnikiem tarcia $m = 0,9$ w ustalonej fazie procesu dominują zjawiska powodujące spadek siły wyciskania. Z jednej strony duże siły tarcia na powierzchni kontakt materiału kształtowanego z narzędziami powodują utrzymanie w stałej temperatury w trakcie trwania procesu, a nawet powodują jej wzrost, natomiast z drugiej strony widać wpływ ciągle zmniejszającej się powierzchni kontaktu materiału ze ściankami pojemnika. Jak wynika z **Rys. 8**, odpowiednie dobranie prędkości ruchu roboczego stempla oraz temperatury początkowej realizacji procesu umożliwi realizację procesu na zbliżonym poziomie dla szerszego zakresu czynników tarcia.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych procesu wyciskania współbieżnego wiertel krętych sformułowano następujące wnioski:

1. Wyniki analizy numerycznej wskazują, że stosowanie większych czynników tarcia powoduje zmniejszenie gradientu prędkości płynięcia metalu wzdłuż promienia wiertła.
2. Zwiększenie tarcia na powierzchni kontaktu narzędzi z materiałem kształtowanym powoduje mniejsze zniekształcenie siatki koordynacyjnej, co może świadczyć o bardziej równomiernym rozkładzie własności mechanicznych wzdłuż osi kształtowanego wyrobu.
3. Uzyskanie równomiernych pól odkształceń mimo wyrównania prędkości płynięcia materiału jest bardzo trudne z uwagi na złożony kształt przekroju poprzecznego wiertła.
4. Odpowiedni dobór takich parametrów jak prędkość wyciskania oraz temperatura początkowa wsadu pozwala wyciskać wiertła przy zbliżonych parametrach siłowych dla szerszego spektrum czynników tarcia.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na korzystniejsze skutki wynikające z wyciskania przy większych siłach tarcia. Oczywiście z punktu i trwałości narzędzi do obróbki plastycznej będzie to skutkowało większym ich zużyciem.

LITERATURA

1. Wang P.: The twist drill processing methods and the economic effects analysis. Shandong Machinery, No 2, 1998, pp. 43–45.
2. Wuzhong P., Gang X.: Rolling process of twist drill. Tool Engineering, No 45, 2011, pp. 115–116.
3. Liekmeier F.: Hot extrusion of twist grill. Umformtechnik, No. 26, 1992, pp. 181–181.
4. Moers P.: Zerspanwerkzeuge aus Schnellstahl – spanlos geformt, Ind.Anzeiger, No 83, 1961, pp. 1606–1610.

5. Bochnaik W., Korbel A.: KOBO Type Forming: forging of metals under complex conditions of the process. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 134, no 1, 2003, pp. 120–134.
6. Shlyakhin A.P., Shukhat O.M. Issledovaniye protsessa goryachego vydavlivaniya zagotovok spiral'nykh sverl, *Kuznechno – shtampovochnoye proizvodstvo*. No 1, 1982, pp. 13–16.
7. Bulzak T., Pater Z.: Analiza wpływu kształtu matrycy na przebieg procesu wyciskania wiertel krętych, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, nr 8, 2012, s. 551–556.
8. Latypov M.I., et al.: Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion, *Computational Materials Science*, No 60, 2012, pp. 194–200.
9. Materniak J.: *Obróbka plastyczna: materiały pomocnicze, cz. 1 – Wyciskanie metali na zimno*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.

Summary

The paper presents the results of numerical simulations of the twist drill backward extrusion process. In the simulations, the FEM-based software DEFORM 3D was used. The numerical simulations were performed for various friction forces whose values were determined by changing the plastic friction factor. Based on the conducted numerical simulations, the effect of the variable tribological parameters of the contact surface between the material being formed and the tools on the kinematics of material flow in the extrusion process were investigated. In the effect of the performed simulations, it has been found that increasing the friction forces in a twist drill extrusion leads to the uniformity of the metal flow velocity gradient. Additionally, the strain distributions obtained in the simulations are presented and the force parameters in the investigated cases are compared.