
Jan PIWNIK*, **Jerzy KUPRIANOWICZ***,
Roman KACZYŃSKI*, **Łukasz CZERECH***

**ANALIZA NUMERYCZNA WPŁYWU
WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA I GEOMETRII
MATRYCY NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE
WYCISKANYCH ELEKTROD RURKOWYCH**

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE
OF THE FRICTION FACTOR AND DIE GEOMETRY
ON MECHANICAL PROPERTIES OF EXTRUDED
TUBULAR ELECTRODES**

Słowa kluczowe:

współczynnik tarcia, modelowanie numeryczne, geometria matrycy, elektrody rurkowe

Key words:

friction factor, numerical modeling, die geometry, tubular electrodes

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej wyciskania elektrod rurkowych z miedzi elektrolitycznej. Celem pracy było zbadanie wpływu geometrii matrycy oraz wartości współczynnika tarcia na proces powstawania od-

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

kształceń, naprężeń, temperatury oraz parametrów siłowych podczas współbieżnego wyciskania elektrod rurkowych. Daje to możliwość przewidywania mikrostruktury i umocnienia materiału oraz czynników technologicznych poprawiających właściwości mechaniczne wyrobu. Znajomość parametrów siłowych umożliwia racjonalny dobór pras.

WPROWADZENIE

Wyciskanie materiałów jest jedną z technik wytwarzania, którą można zaadaptować do wytwarzania miedzianych elektrod rurkowych. W procesie tym za pomocą stempla wywierany jest nacisk na wlewek umieszczony w pojemniku, co prowadzi do wypływanego materiału przez matrycę.

Współcześnie dzięki rozwojowi tej technologii stało się możliwe wyciskanie innych metali o wysokiej temperaturze topnienia, zarówno na zimno, jak i na gorąco. Technika tę można wykorzystać również do wytwarzania prętów i wyrobów z otworami o złożonych kształtach, których otrzymanie innymi metodami jest trudne lub niemożliwe.

Wyroby otrzymane za pomocą wyciskania charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, dużą dokładnością wymiarową (7, 8 klasa dokładności) oraz wysoką jakością powierzchni. Najczęściej w praktyce przemysłowej poprzez wyciskanie wykonuje się wyroby ze stopów żelaza, miedzi i aluminium. Na wartość nacisków na stemplu i w matrycy wpływa przede wszystkim wartość granicy plastyczności, współczynnik tarcia i stopień redukcji matrycy. Najdokładniejsze informacje na temat właściwości mechanicznych materiału wsadowego uzyskuje się, wyznaczając krzywą umocnienia (krzywą materiałową).

W procesie wyciskania zarówno kształt matrycy oraz jego parametry (temperatura, naprężenia i odkształcenia oraz współczynnik tarcia) mają decydujący wpływ na jakość końcową wyrobu.

Modelowanie numeryczne wyciskania jest równie złożone, jak procesy, które w nim zachodzą. W pracy [L. 13] poddano wnikliwej analizie wpływ geometrii matrycy dla wyciskania promieniowego.

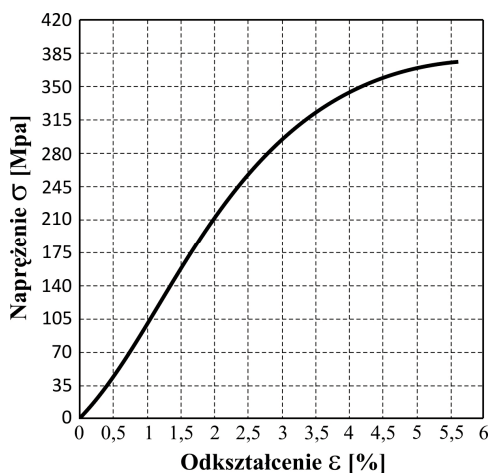
Istotnym czynnikiem znacząco wpływającym na proces wyciskania jest trajektoria przemieszczania się materiału wyciskanego [L. 3, 4]. Sterowanie kierunkiem odkształcenia umożliwia zwiększenie jednorodności struktury oraz rozdrobnienie ziaren. Zwiększając liczbę „zakrzywień” matrycy, możliwe jest uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu tworzącej się mikrostruktury, co ma bezpośredni wpływ na polepszenie właściwości mechanicznych [L. 8–11].

Wykorzystując metodę elementów skończonych, poddano wnikliwej analizie proces wyciskania z wykorzystaniem różnych kształtów matryc. Użyto w tym celu oprogramowania DEFORM 2D, umożliwiającego symulację plastycznego płynięcia materiału. Głównym celem pracy jest analiza procesów zachodzących podczas wyciskania miedzianych elektrod rurkowych oraz osza-

cowanie, który wariant geometrii matrycy i jaka wartość współczynnika tarcia najkorzystniej wpływa na proces kształtowania się mikrostruktury i umocnienia elektrod rurkowych, co ma bezpośredni wpływ na polepszenie właściwości mechanicznych wyciskanych elektrod rurkowych.

METODYKA BADAŃ

W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej wyciskania elektrod rurkowych na modelach matryc w warunkach symetrii osiowej. Taki stan procesu wyciskania pozwolił na przeprowadzenie symulacji w jednej, głównej płaszczyźnie, co umożliwiło skrócenie czasu obliczeń. Analizę numeryczną zagadnienia przeprowadzono w oparciu o metodę elementów skończonych (MES), wykorzystując prawa teorii plastycznego płynięcia z uwzględnieniem warunków plastyczności Hubera-Misesa. W tym celu użyto oprogramowania DEFORM 2D. Dane opisujące właściwości mechaniczne materiału w zakresie temperatury 20°C zdefiniowano w oparciu o krzywą naprężenie–odkształcenie dla miedzi elektrolitycznej, którą zaczerpnięto z pracy [L. 7]. Przedstawiono ją na **Rys. 1**. Materiał wlewka rozpatrywano jako jednorodny, idealnie plastyczny ze wzmocnieniem izotropowym. Pojemnik, matrycę i stempel traktowano jako sztywne.



Rys. 1. Krzywa materiałowa naprężenie–odkształcenie miedzi elektrolitycznej [L. 7]

Fig. 1. Material curve of stress–strain of electrolytic copper [L. 7]

Analizowano proces wyciskania w temperaturze 20°C ze stałą prędkością stempla $V_0 = 5$ mm/s. Założono model tarcia plastycznego opisanego równaniem (1). Porównano procesy dla dwóch wartości współczynników tarcia plastycznego pomiędzy powierzchnią kontaktu deformowanego metalu a matrycą i stemplem.

$$\tau_f = \mu \cdot k \quad (1)$$

gdzie: τ_f – naprężenia styczne na kontakcie materiału z powierzchnią narzędzia,

μ – współczynnik tarcia plastycznego (dotyczy granicy plastyczności na ścinanie) $0 \leq \mu \leq 1$,

k – granica plastyczności (ścinanie).

Wartości współczynników tarcia $\mu = 0,1$ oraz $\mu = 0,8$ przyjęto w celu stwierdzenia ich wpływu na siły wyciskania. Założone wartości odpowiadają odpowiednim środkom smarującym, których nie rozpatrywano w pracy. Aspekt smarowania jest procesem bardzo złożonym i wymaga przeprowadzenia innych obszernych analiz. Przeprowadzono cztery analizy numeryczne dla dwóch kształtów matryc osiowo-symetrycznych. Zmiennym warunkiem brzegowym w analizie numerycznej był współczynnik tarcia.

Przy opisie odkształceń oraz naprężeń efektywnych program wykorzystuje warunek plastyczności Hubera-Misesa. Odkształcenia efektywne definiowane są wg równania (2):

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (2)$$

gdzie: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – odkształcenia główne.

Naprężenia efektywne definiowane są zgodnie ze wzorem (3):

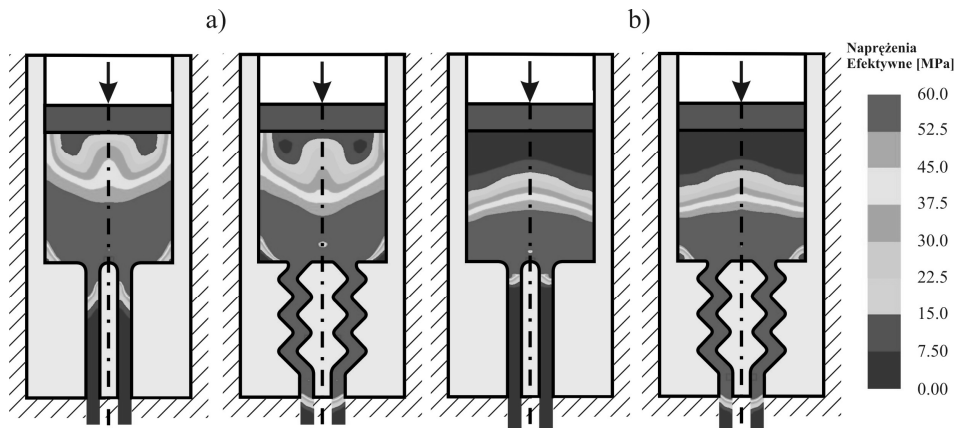
$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – naprężenia główne.

WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Przedstawiono analizę numeryczną wpływu geometrii matrycy i współczynnika tarcia na proces powstawania odkształceń, naprężeń, pól temperatury oraz parametrów siłowych podczas współbieżnego wyciskania elektrod rurkowych z miedzi elektrolitycznej. Czynniki te wpływają na jakość i właściwości mechaniczne produktu końcowego [L. 4, 12].

Kształtowanie mikrostruktury pod wpływem dużych odkształceń plastycznych i ciśnień hydrostatycznych w procesach wyciskania metali jest atrakcyjną tematyką naukową [L. 5, 12].



Rys. 3. Rozkład naprężeń efektywnych w zaawansowanej fazie wyciskania przy współczynnikach tarcia: a) $\mu = 0,8$; b) $\mu = 0,1$

Fig. 3. Effective stress distribution in advanced state of extrusion with friction factors: a) $\mu = 0.8$; b) $\mu = 0.1$

Widać, że zmiana kształtu matrycy oraz wpływ współczynnika tarcia powodują znaczne powiększenie zasięgu pól naprężeń efektywnych. Ich wartość maksymalna w materiale dla matrycy sinusoidalnej przy tarcia $\mu = 0,1$ wynosi 256 MPa, natomiast dla tarcia $\mu = 0,8$ – 458 MPa.

Zmiana geometrii matrycy powoduje uzyskanie wysokich wartości naprężeń efektywnych. Taki stan wywołuje kilkukrotne przekroczenie wartości granicy plastyczności miedzi elektrolitycznej w stosunku do wartości wyjściowej, co prowadzi do dużego umocnienia elektrod.

W strefie małych prędkości płynięcia strug plastycznych wartości naprężeń efektywnych są minimalne. Znaczną poprawę wytrzymałości produktu końcowego uzyskano dla kształtu matrycy sinusoidalnej przy współczynniku tarcia plastycznego $\mu = 0,8$. Obrazuje to **Rys. 3a**.

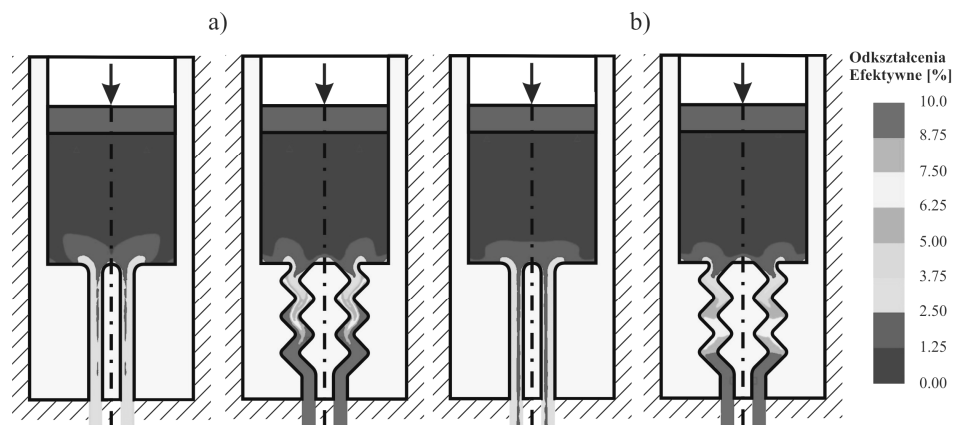
Zmiana geometrii matrycy w procesie wyciskania prowadzi do wzrostu odkształceń efektywnych, co sprzyja rozdrobnieniu ziaren.

Badania nad kształtowaniem mikrostruktury metali metodami odkształcenia plastycznego przez wyciskanie szerzej opisano w pracy [L. 5].

W zaawansowanej fazie procesu dla matrycy prostoliniowej strefa odkształceń plastycznych koncentruje się w obszarach wpływania materiału do matrycy. Odkształcenia efektywne rosną w trakcie procesu, a ich stabilizacja następuje po wyjściu metalu z matrycy. Przedstawia to **Rys. 4a i b**. Widać, że zmiana geometrii matrycy z prostoliniowej na matrycę sinusoidalną w procesie wyciskania elektrod rurkowych powoduje powstawanie większych odkształceń efektywnych.

Na **Rys. 4a i b** przedstawiono charakterystyki pól odkształceń efektywnych w warunkach tarcia o założonych wartościach: $\mu = 0,1$ i $\mu = 0,8$. Podwyższenie

współczynnika tarcia oraz zmiana kształtu matrycy znacznie wpływa na wzrost wartości naprężeń i odkształceń efektywnych.



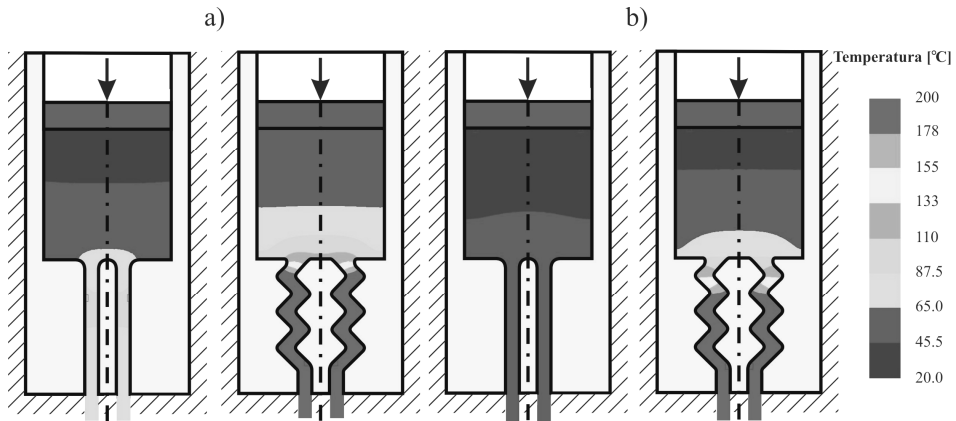
Rys. 4. Rozkład odkształceń efektywnych w zaawansowanej fazie wyciskania przy współczynnikach tarcia: a) $\mu = 0,8$; b) $\mu = 0,1$

Fig. 4. Effective strain distribution in advanced state of extrusion with friction factors: a) $\mu = 0.8$; b) $\mu = 0.1$

Materiał w polu dużych odkształceń nagrzewa się silniej od miejsc, gdzie odkształcenia osiągają wartości minimalne. Na wzrost wartości temperatury w procesach obróbki plastycznej znacznie wpływa geometria matrycy oraz wartość współczynnika tarcia. Na **Rys. 5a i b** przedstawiono lokalne rozkłady pól temperatury w procesie wyciskania elektrod rurkowych.

Podczas wyciskania elektrod przy $\mu = 0,8$ (**Rys. 5a**) wartość temperatury rośnie wzdłuż kanału matrycy. Przy niskim współczynniku tarcia $\mu = 0,1$ (**Rys. 5b**) średnia wartość temperatury w deformowanym materiale jest znacząco mniejsza w porównaniu z przypadkiem dużego współczynnika tarcia. Różnice te sięgają 35%. Dotyczy to szczególnie matrycy sinusoidalnej.

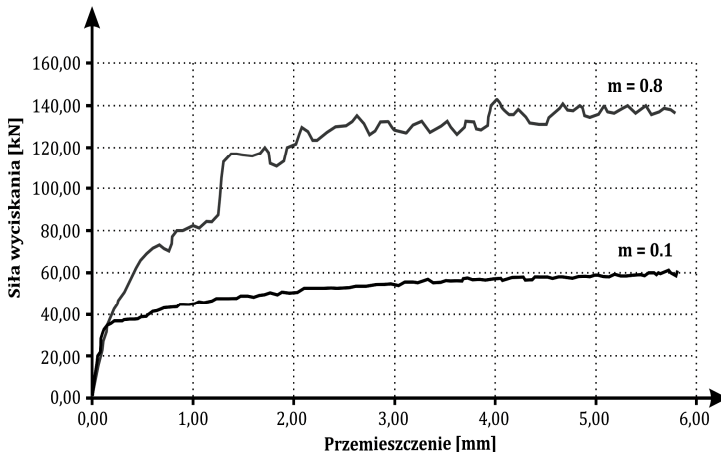
W procesie wyciskania wzrost wytrzymałości produktu uzyskuje się poprzez umocnienie materiału, zatem istotne jest termostatowanie matrycy. Zastosowanie chłodzenia w procesie wyciskania elektrod miedzianych pozwoli na obniżenie temperatury, poniżej której następuje rekrytalizacja miedzi oraz na stosowanie matryc o złożonych kształtach.



Rys. 5. Rozkład temperatur w zaawansowanej fazie wyciskania przy współczynnikach tarcia: a) $\mu = 0,8$; b) $\mu = 0,1$

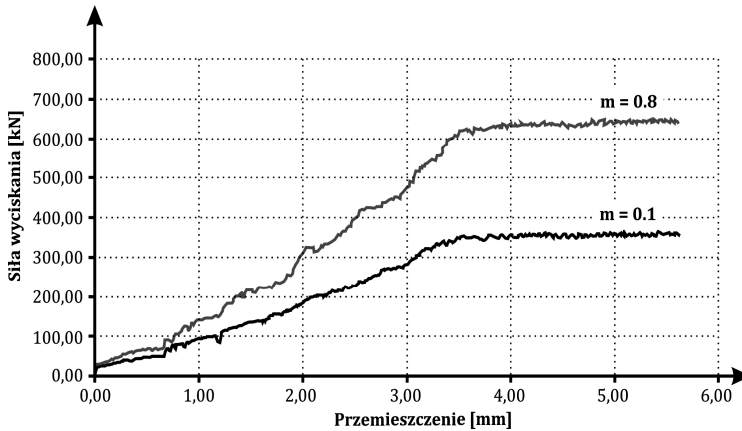
Fig. 5. Temperature distribution in advanced state of extrusion with friction factors: a) $\mu = 0.8$; b) $\mu = 0.1$

Na **Rys. 6 i 7** przedstawiono przebiegi sił występujących na stemple w procesie wyciskania elektrod rurkowych przy różnych wartościach współczynnika tarcia. Przebiegi sił przedstawiono w funkcji przemieszczenia stempla dla kształtu matrycy prostoliniowej (**Rys. 6**) i matrycy sinusoidalnej (**Rys. 7**) z uwzględnieniem dwóch współczynników tarcia.



Rys. 6. Przebiegi sił wyciskania w funkcji przemieszczenia stempla przy współczynniku tarcia $\mu = 0,1$ i $\mu = 0,8$ dla matrycy prostoliniowej

Fig. 6. Dependent of extrusion force in function of punch displacement at the friction factor $\mu = 0.1$ and $\mu = 0.8$ for rectilinear matrix



Rys. 7. Przebiegi sił wyciskania w funkcji przemieszczenia stempla przy współczynniku tarcia $\mu = 0,1$ i $\mu = 0,8$ dla matrycy sinusoidalnej

Fig. 7. Dependent of extrusion force in function of punch displacement at the friction factor $\mu = 0.1$ and $\mu = 0.8$ for sinusoidal matrix

Wraz z zaawansowaniem procesu wyciskania siła wzrasta. Stabilizacja siły następuje w momencie wyjścia metalu z matrycy. Na ich wartości wpływa kształt matrycy, współczynnik tarcia, stopień redukcji matrycy oraz parametry powierzchni materiału wsadowego i narzędzi. Świadczy o tym porównanie sił wyciskania pomiędzy matrycą prostoliniową (**Rys. 6**) i matrycą sinusoidalną (**Rys. 7**).

PODSUMOWANIE

W **Tabeli 1** zestawiono wyniki podsumowujące przeprowadzoną analizę numeryczną dla dwóch kształtów matryc osiowo-symetrycznych i dwóch wariantów współczynnika tarcia: $\mu = 0,1$ i $\mu = 0,8$. Przedstawiono wartości maksymalne dla wszystkich parametrów.

Tabela 1. Zestawienie wyników przeprowadzonej analizy numerycznej wyciskania elektrod rurkowych

Table. 1. Summary of the results of the numerical analysis of extrusion of the tubular electrodes

Współczynnik tarcia μ	Parametr (wartość maksymalna)	Matryca prostoliniowa	Matryca sinusoidalna
$\mu = 0,1$	Naprężenia – σ_e [MPa]	161	235
	Odkształcenia – ε_e [%]	4.74	10.4
	Temperatura – T [°C]	66,2	321
	Siła wyciskania – F [kN]	60	160
$\mu = 0,8$	Naprężenia – σ_e [MPa]	156	289
	Odkształcenia – ε_e [%]	4.43	15,2
	Temperatura – T [°C]	89,6	493
	Siła wyciskania – F [kN]	350	620

Po weryfikacji statystycznej stwierdzono, że na wzrost procentowy wartości uzyskanych parametrów (bez uwzględnienia parametrów siłowych) najsilniej wpływa zmiana geometrii matrycy. Na wzrost siły wyciskania efektywniej oddziałuje wartość współczynnika tarcia niż kształt matrycy.

WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Poprzez zmianę trajektorii przemieszczania metalu wyciskanego (zastosowanie matrycy o kształcie sinusoidalnym) zwiększa się wartość granicy plastyczności wyrobu w stosunku do jej wartości początkowej. W efekcie prowadzi to do polepszenia właściwości wytrzymałościowych elektrod rurkowych.
2. W warunkach wyciskania przez matryce o kształcie sinusoidalnym występują relatywnie duże wartości odkształceń i naprężeń efektywnych. Stosując tego typu matryce, możliwe jest osiągnięcie struktury drobnoziarnistej, w efekcie czego uzyskiwany jest produkt wysokojakościowy.
3. Wyniki analizy numerycznej procesu wyciskania pokazują, że zastosowanie wysokiego współczynnika tarcia plastycznego ($\mu = 0,8$) korzystnie wpływa na proces umacniania się elektrod rurkowych z miedzi elektrolitycznej, co skutkuje wydłużeniem czasu eksploatacji elektrody w trakcie pracy.
4. Proces prowadzony w warunkach wysokiego współczynnika tarcia prowadzi do wzrostu siły na stemplu. Na jej wzrost wpływa również geometria matrycy (wzrost następuje, gdy cząstki metalu zwiększają długość trajektorii płynięcia plastycznego).
5. Z rozkładu pól naprężeń efektywnych wynika, że w obszarze wyjścia materiału z matrycy wartość granicy plastyczności utożsamianej z naprężeniem efektywnym wyrobu jest znacznie wyższa od granicy plastyczności materiału wsadowego (w fazie początkowej wyciskania).

LITERATURA

1. Gierzyńska-Dolna M.: Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali, WNT, Warszawa 1983.
2. Pawłowska B., Śliwa R.: Doświadczalna analiza płynięcia materiału podczas wyciskania profili o złożonym kształcie przekroju poprzecznego. Rudy i Metale Nieżelazne, 2008/4.53, s. 220–227.
3. Piwnik J.: Mechanika plastycznego płynięcia w zagadnieniach wyciskania metali. WSE, Białystok 2010.

4. Piwnik J.: Teoria i eksperyment w analizie procesów wyciskania. Rozprawy Naukowe nr 200. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2010.
5. Lewandowska M.: Fabrication of nanocrystalline materials by hydrostatic extrusion. *Obróbka Plastyczna Metali*. T. XVII, nr 4, 2006.
6. Kobayashi S., Oh S.I., Altan T.: *Metalforming and the Finite-Element Method*. Oxford University Press. New York 1989.
7. *Atlas of stress-strain curves: Second edition*. ASM International-The Materials Information Society. Materials Park. OH 44073-0002. United States of America 2002.
8. Samsonov G.V., Paustovskii A.V.: Wear of refractory tool electrodes in electromachining, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 14, Number 5, s. 410–413,
9. Paustovskii A.V.: Wear of tool electrodes in electromachining, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Test Methods and Properties of Materials*, Volume 9, Number 4, 314–317.
10. Tsai Y.-Y., Masuzawa T.: An Index to Evaluate the Wear Resistance of the Electrode in Micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 149 (2004) /1–3, s. 304–309.
11. Yu Z.Y., Kozak J., Rajurkar K.P.: Modelling and Simulation of Micro EDM Process, *Annals of the CIRP*. 2003. 52 /1: s. 143–146.
12. Valberg H.S.: *Applied metal forming including FEM analysis*; Cambridge University Press, New York 2010.
13. Gavrus A., Francillette H., Pham D.T.: An optimal forward extrusion device proposed for numerical and experimental analysis of materials tribological properties corresponding to bulk forming processes, *Tribology International*, Vol. 47, 2012, s. 105–121.

Summary

The work presents the result of the numerical analysis of the extrusion of tubular electrodes from electrolytic copper. Numerical analysis of the issue was based on the Finite Element Method (FEM) using the software DEFORM. The aim of this study was to investigate the effect of die geometry and the value of the friction factor on the process of strain, stress, temperature, and force parameters during concurrent extrusion of tubular electrodes. This gives the possibility of predicting the microstructure and strengthening of the material and technological factors that improve the mechanical properties of the product. Force parameters allow the assessment of technological factors in the process of extrusion.

