

Dr inż. Janusz Tomczak
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater
Mgr inż. Tomasz Bulzak

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: j.tomczak@pollub.pl

Wpływ parametrów technologicznych na przebieg procesu obciskania obrotowego

Słowa kluczowe: obciskanie obrotowe, drążone wałki wielostopniowe, MES

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu obciskania obrotowego skrajnych stopni odkuwki wielostopniowego wałka drążonego. Symulacje numeryczne procesu przeprowadzono metodą elementów skończonych (MES), przy zastosowaniu komercyjnego pakietu oprogramowania Simufact Forming w wersji 11.0. Omówiono obszar wykorzystania elementów drążonych w przemyśle i przybliżono korzyści płynące z ich stosowania. Poprzez modelowanie numeryczne określono wpływ podstawowych parametrów obciskania obrotowego (stopnia gniotu δ , grubości ścianki g_0 , początkowej średnicy wsadu D , prędkości postępowej v i obrotowej n narzędzi) na kształt otrzymanych wyrobów. Wyznaczono parametry siłowe procesu siły nacisku narzędzi i momenty obrotowe. Opisane rezultaty badań numerycznych potwierdzają możliwość wytwarzania odkuwek wielostopniowych wałków drążonych ze wsadu w postaci odcinków rury metodami obróbki plastycznej.

1. Wstęp

Obciskanie obrotowe jest nowoczesnym procesem kształtowania plastycznego metali i ich stopów. Obecnie jest ono stosowane głównie do miejscowej redukcji przekroju poprzecznego elementów drążonych (półfabrykatów tłoczonych, rur, tulei i innych). Proces charakteryzuje się szeregiem zalet, wynikających z kinematyki ruchu narzędzi [5, 8]. Podjęto zatem prace badawcze nad rozszerzeniem możliwości technologicznych obciskania obrotowego, i zaproponowano jego stosowanie do kształtowania bardziej złożonych części maszyn, typu wielostopniowe wałki i osie drążone.

Powszechną tendencją, obserwowaną w światowym przemyśle jest wzrastające zapotrzebowanie na elementy drążone, które coraz częściej wypierają pełne zamienniki [4, 11]. Związane jest to przede wszystkim z dążeniem do obniżania kosztów produkcji oraz eksploatacji maszyn. Jednym ze sposobów zmniejszenia kosztów wytwarzania jest

ograniczenie zużycia materiałów i robocizny dzięki zastosowaniu wyrobów rurowych w miejsce dotychczas stosowanych elementów litych. Drażone odpowiedniki części maszyn posiadają porównywalne do elementów pełnych własności wytrzymałościowe (przy obciążeniach zginających i skręcających), przy jednoczesnym znacznym zmniejszeniu ich masy. W konsekwencji urządzenia, w skład których wchodzi wyroby drażone są lżejsze, a przez to zużywają mniej energii i są bardziej przyjazne dla środowiska (mniejsze zużycie paliw i mniejsza emisja spalin). Stąd są one coraz częściej stosowane, w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, gdzie zmniejszenie masy pojazdów oraz maszyn latających pozwala zwiększyć osiągi techniczne (moc, prędkość, ładowność, zwrotność itp.) i jednocześnie zmniejszyć koszty ich eksploatacji [1, 10, 12].

Rozwijając procesy rotacyjnego kształtowania metali i ich stopów, opracowano w Politechnice Lubelskiej nowatorską metodę obciskania obrotowego, którą można zastosować do wytwarzania osiowosymetrycznych odkuwek drażonych osi i wałków [6, 7]. Zaproponowana technologia pozwala na kształtowanie odkuwek z półfabrykatów w postaci odcinków handlowych rur lub tulei przy pomocy prostych konstrukcyjnie narzędzi.

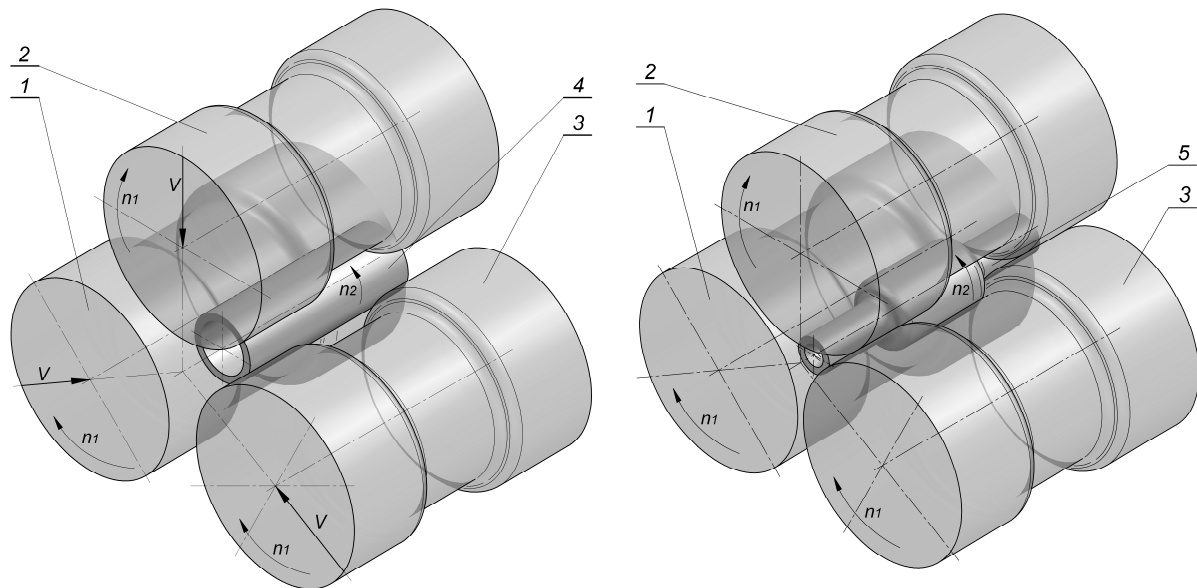
W celu określenia warunków stabilności kształtowania ze względu na możliwość wystąpienia zakłóceń w postaci niekontrolowanego poślizgu (utrata zdolności do wykonywania ruchu obrotowego przez wyrób kształtowany) oraz zgniecenia odkuwki, a także w celu ustalenia związków zachodzących między poszczególnymi parametrami procesu przeprowadzono szereg symulacji numerycznych obciskania obrotowego.

2. Istota procesu obciskania obrotowego

Obciskanie obrotowe polega na kształtowaniu półfabrykatu trzema rolkami cylindrycznymi, obracającymi się w tym samym kierunku, które jednocześnie przemieszczają się promieniowo w kierunku osi kształtowanego elementu. Wsad w kształcie odcinka rury lub tulei umieszczony jest między rolkami i w trakcie obciskania obracany jest przez narzędzia dookoła własnej osi. W efekcie oddziaływania narzędzi następuje zmiana średnicy zewnętrznej wyrobu, czemu towarzyszy wzrost grubości ścianki wsadu. Zwiększenie grubości ścianki ukształtowanych wyrobów można uznać za zjawisko korzystne ze względów wytrzymałościowych. Wyroby kształtowane proponowaną metodą charakteryzują się osiowosymetrycznym kształtem. W stosunku do obecnie stosowanych technik wytwarzania wyrobów drażonych, obciskanie obrotowe ma szereg zalet, z których najważniejsze to: polepszenie własności wytrzymałościowych wyrobu, zwiększenie wydajności produkcji,

mniejsze koszty wdrożeniowe i produkcyjne oraz stosunkowo prosta mechanizacja i automatyzacja procesu.

Przykładowy proces kształtowania wielostopniowego wałka drążonego (z dwoma skrajnymi przewężeniami) metodą obciskania obrotowego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat procesu obciskania obrotowego osiowosymetrycznej odkuwki drążonej, w którym trzy narzędzia wykonują ruch obrotowy i jednocześnie przemieszczają się w kierunku osi wsadu: 1, 2, 3 – kształtowe rolki robocze, 4 – wsad w postaci odcinka rury, 5 – wyrób; a) początek procesu, b) koniec procesu

Cechą charakterystyczną procesu obciskania obrotowego jest stopniowa redukcja średnicy półfabrykatu (rys. 2) przez obracające się narzędzia, którą można zdefiniować stopniem gniotu:

$$\delta = D/d, \quad (1)$$

gdzie: D – średnica zewnętrzna półfabrykatu przed procesem, d – średnica zewnętrzna czopa po procesie obciskania.

Redukcja średnicy wsadu powoduje promieniowy kierunek płynięcia materiału, w wyniku którego następuje zwiększenie grubości ścianki o Δg w stosunku do wartości początkowej zastosowanej rury (wsadu):

$$\Delta g = g - g_o, \quad (2)$$

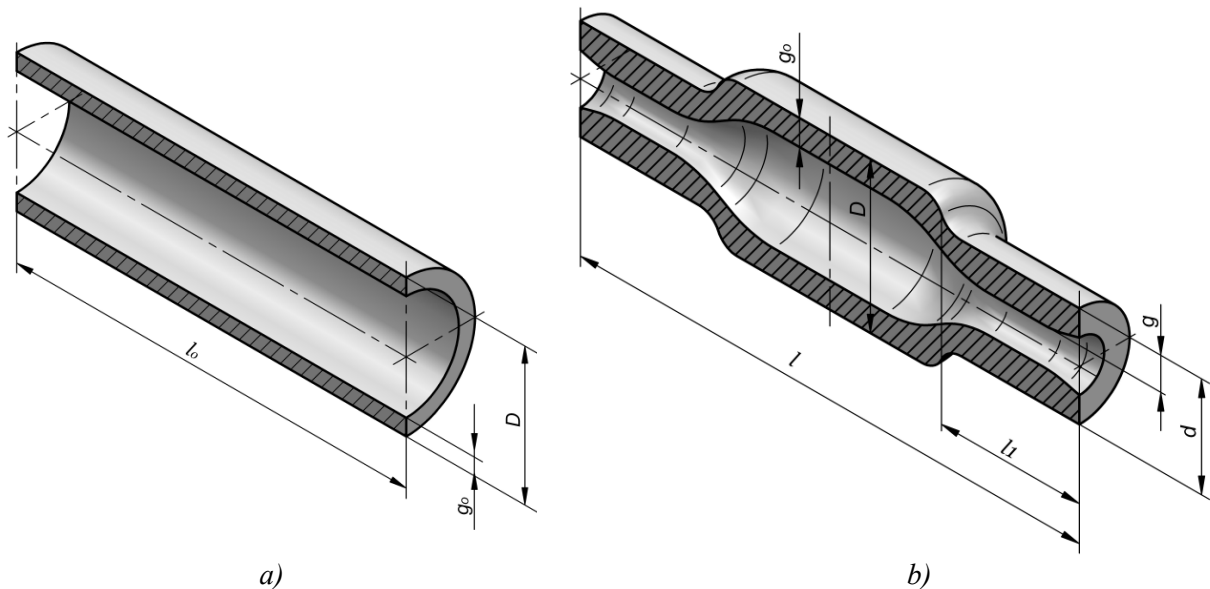
gdzie: g – grubość ścianki ukształtowanej odkuwki, g_o – grubość ścianki wsadu.

W trakcie kształtowania metal przemieszcza się również wzdłuż osi odkuwki, co powoduje zwiększenie jej długości o Δl w stosunku do długości początkowej wsadu:

$$\Delta l = l - l_o, \quad (3)$$

gdzie: l – długość odkuwki, l_o – długość wsadu.

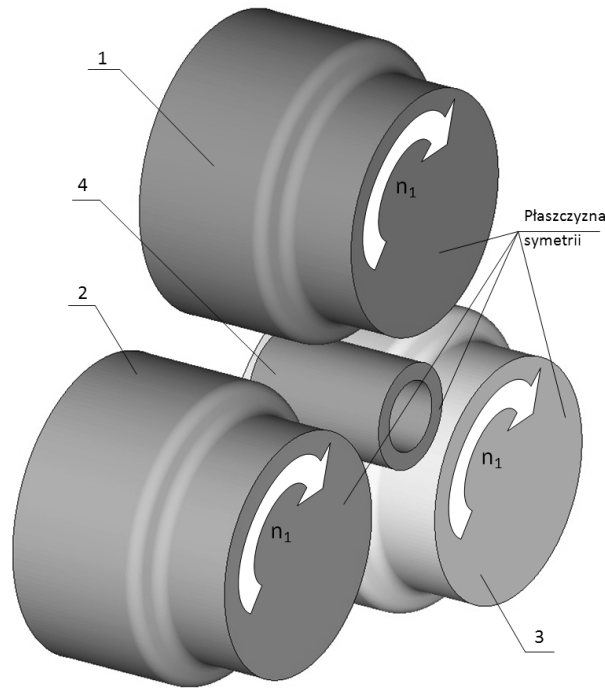
Oczywistym jest, że wzrost grubości ścianki oraz długości odkuwki jest zależny od zastosowanych parametrów obciskania. Szczególnie istotne znaczenie ma wartość przyjętego stopnia gniotu δ , stosunek początkowej grubości ścianki g_0 do średnicy początkowej wsadu g_0/D oraz stosunek prędkości postępowej v narzędzi w kierunku osi wsadu do ich prędkości obrotowej n .



Rys. 2. Kształt i wymiary wsadu zastosowanego w procesie obciskania obrotowego – a) oraz ukształtowanej odkuwki z dwoma skrajnymi czopami – b)

3. Analiza numeryczna obciskania obrotowego zewnętrznego stopnia osiowosymetrycznej odkuwki drążonej

Celem określenia wpływu wybranych parametrów (δ , g_0/D i v/n) procesu obciskania obrotowego na wzrost grubości ścianki Δg oraz długości odkuwki Δl wykonano szereg symulacji numerycznych kształtowania drążonej odkuwki ze skrajnymi czopami. Model geometryczny jednego z analizowanych procesów obciskania obrotowego, w którym dla skrócenia czasu obliczeń zastosowano symetrię kształtowania przedstawiono na rys. 3. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych (MES), przy użyciu pakietu oprogramowania Simufact Forming w wersji 11.0, który w przeszłości wielokrotnie był stosowany do analizy rotacyjnych procesów kształtowania plastycznego metali i stopów, a otrzymane wyniki z powodzeniem były weryfikowane w czasie badań doświadczalnych [2, 9, 3].

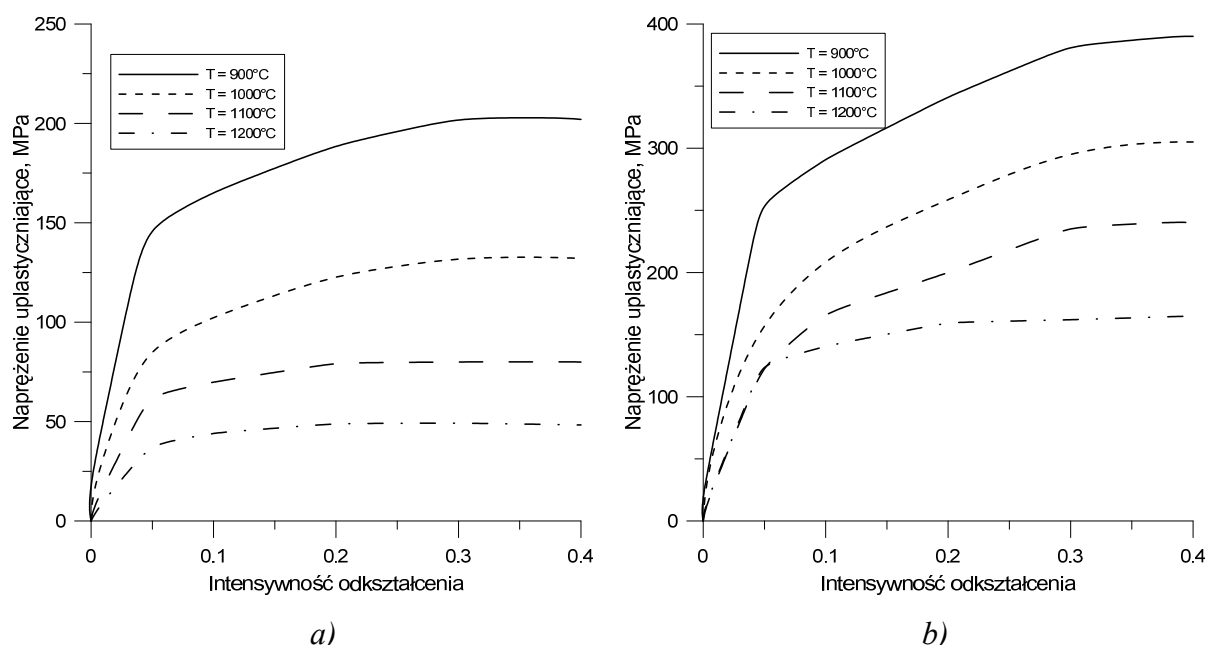


Rys. 3. Model geometryczny procesu obciskania obrotowego skrajnych stopni drążonej odkuwki wałka (opis w tekście)

Model składał się z trzech jednakowych rolek wielostopniowych – 1, 2, 3 oraz wsadu – 4. Narzędzia (rolki) obracają się ze stałą prędkością $n_1 = 60$ obr/min w tym samym kierunku oraz przemieszczają w kierunku osi wsadu ze stałymi prędkościami v . Wsad stanowi rura o średnicy zewnętrznej $\varnothing 42,4$ mm, długości $l_o = 120$ mm oraz grubości ścianki g_o . Półfabrykat modelowano za pomocą ośmiowęzłowych elementów sześciennych pierwszego rzędu. Grubość początkową ścianek półfabrykatów g_o przyjęto według ich dostępności w handlu i wynosiły one odpowiednio: 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm oraz 11 mm. Założono przy tym, że półfabrykaty są wykonane ze stali konstrukcyjnej węglowej w gatunku C45. Materiał ten jest powszechnie stosowany na wszelkiego rodzaju koła zębate, wały, osie, wałki uzębione, korbowody i inne średnio obciążone elementy maszyn. Model materiałowy stali C45 zaczerpnięto z bazy danych oprogramowania Simufact Forming, a przykładowe krzywe płynięcia przedstawiono na rysunku 4. Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach to: temperatura początkowa wsadu – 1150 °C, sztywny model narzędzi o stałej temperaturze 150 °C, czynnik tarcia na powierzchni styku metal-narzędzie $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem – 10 kW/m²K oraz między materiałem a otoczeniem – 0,2 kW/m²K.

W trakcie symulacji numerycznych założono, że we wszystkich wariantach narzędzia (rolki kształtowe) obracają się ze stałą prędkością, natomiast parametrem, który jest

zmieniany w trakcie procesu to prędkość przemieszczania się trzech rolek w kierunku osi wsadu. Zmieniano również wartość stopnia gniotu δ w zakresie od 1,2 do 2,1 oraz grubości ścianek półfabrykatów. Zestawienie głównych parametrów, przy których prowadzono symulacje obciskania obrotowego skrajnych stopni odkuwki wałka drążonego zamieszczono w tabeli 1.



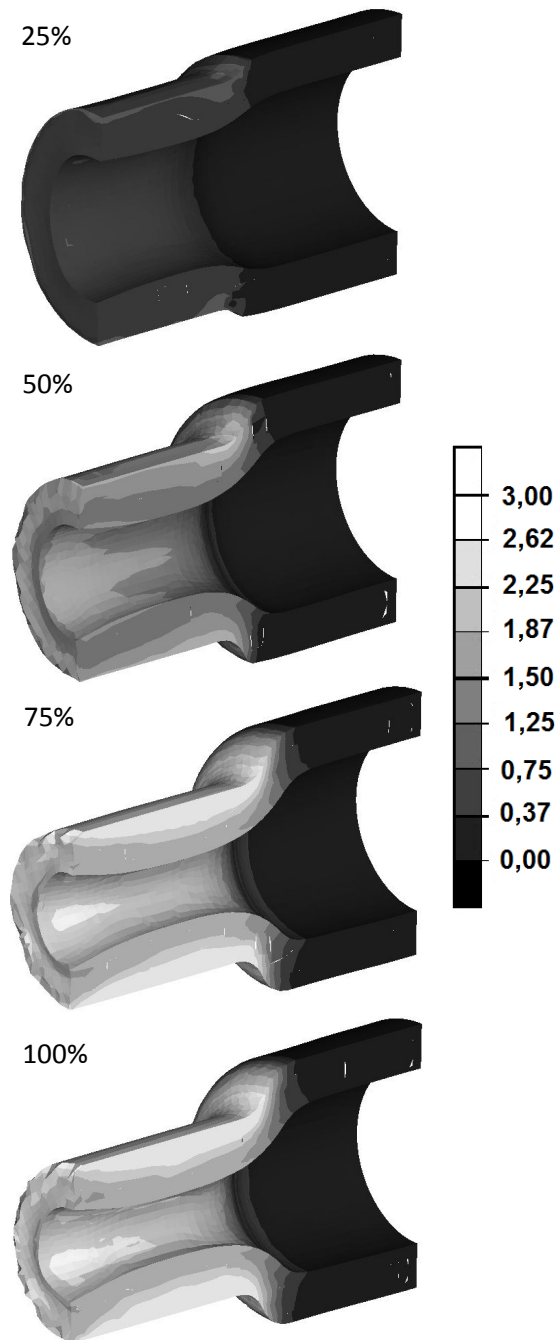
Rys. 4. Krzywe płynięcia stali C45: a) dla prędkości odkształcenia $0,1 \text{ s}^{-1}$, b) dla prędkości odkształcenia 100 s^{-1}

Tab. 1. Parametry technologiczne stosowane w trakcie symulacji MES procesu obciskania obrotowego skrajnego stopnia

Prędkość obrotowa narzędzi	n [obr/min]	60						
Prędkość liniowa narzędzi [mm/s]	v [mm/s]	0,5	1	2	4	6	8	10
Stosunek prędkości postępowej do obrotowej	v/n [mm/obr]	0,46	0,92	1,84	3,69	5,54	7,38	9,23
Średnica zewnętrzna półfabrykatu	D [mm]	42,4						
Grubość ścianki	g_o [mm]	3	5	7	9	11		
Stosunek grubości ścianki do średnicy wsadu	g_o/D	0,07	0,12	0,16	0,21	0,26		
Stopień gniotu	δ	1,2	1,5	1,8	2,1			

W efekcie wykonanych obliczeń uzyskano możliwość przeanalizowania kinematyki płynięcia materiału w procesie obciskania obrotowego odkuwek drążonych. Na rysunku 5 przedstawiono progresję kształtu wyrobu w zależności od stopnia zaawansowania procesu dla jednego z rozważanych przypadków obciskania. Wyraźnie widać, iż w wyniku redukcji średnicy zewnętrznej wsadu następuje przemieszczanie materiału w kierunku osi odkuwki,

co powoduje wzrost grubości ścianki. Można zaobserwować również przemieszczenia materiału wzdłuż osi odkuwki, szczególnie w obszarach przypowierzchniowych, co przyczynia się do zwiększenia jej długości w stosunku do długości początkowej wsadu oraz utworzenia wklęsłych powierzchni czołowych (lei). W ostatnim etapie obciskania wyłączany jest ruch postępowy narzędzi, a pozostawiany ruch obrotowy. W efekcie następuje skalibrowanie kształtu odkuwki i usunięcie nierówności powstałych w początkowych fazach procesu.

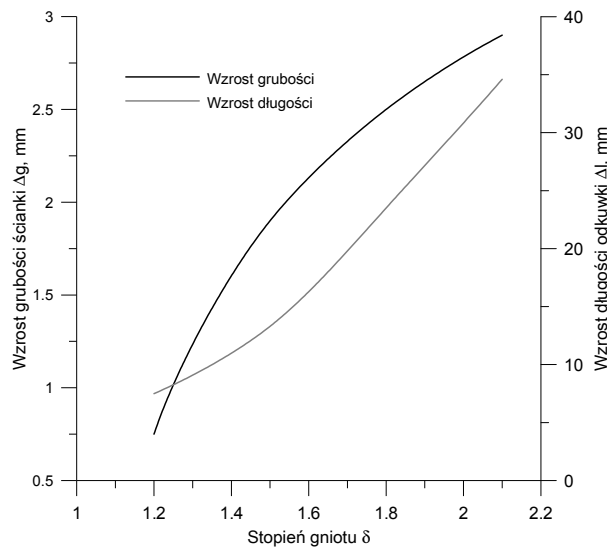


Rys. 5. Wyznaczona numerycznie progresja kształtu odkuwki wałka drążonego z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia

Na rysunku 5 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia na powierzchni i w przekroju kształtowanego półfabrykatu. W obszarze oddziaływania narzędzi materiał jest odkształcany na wskroś, w wyniku czego płynie on w kierunku osi wsadu, a odkształcenia nie są jednorodne w przekroju obciskanych stopni. W obszarach przypowierzchniowych materiał podlega większym odkształceniom w stosunku do stref centralnych (zlokalizowanych w pobliżu ścianki wewnętrznej). Jest to charakterystyczne dla rotacyjnych procesów obróbki plastycznej i wiąże się z kinematyką procesu, w którym występują duże różnice prędkości obwodowych kształtowanego półfabrykatu (ze względu na zmieniający się promień narzędzi). W efekcie dochodzi do poślizgów pomiędzy kształtowanym materiałem, a narzędziami i generowania znacznych odkształceń w kierunku obwodowym (przez siły tarcia).

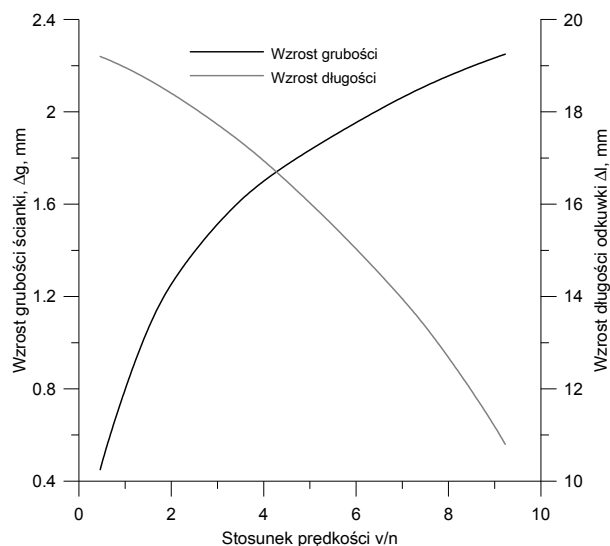
W trakcie symulacji numerycznych określono wpływ podstawowych parametrów kształtowania (δ , g_o/D i v/n) na wzrost grubości ścianki Δg oraz długości odkuwki Δl . W rezultacie prowadzonych obliczeń stwierdzono, że:

- wzrost wartości stopnia gniotu δ w zakresie od 1,2 do 2,1 powoduje zwiększenie grubości ścianki Δg oraz zwiększenie długości odkuwki Δl (rys. 6),



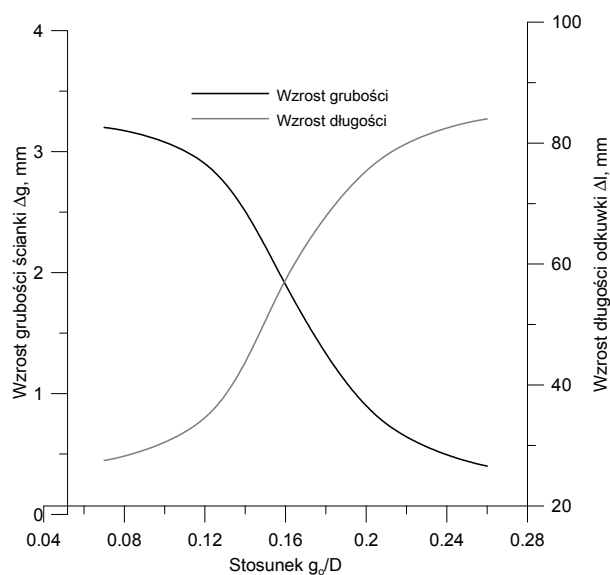
Rys. 6. Wpływ stopnia gniotu δ na wzrost grubości ścianki oraz długości obciskanej odkuwki, wyznaczony przy: $g_o = 5 \text{ mm}$, $v = 6 \text{ mm/s}$

- wzrost prędkości postępowej narzędzi v w stosunku do ich prędkości obrotowej n powoduje intensywne zwiększenie grubości ścianki Δg oraz obniżenie wydłużenia odkuwki Δl (rys. 7),



Rys. 7. Wpływ prędkości przemieszczania się promieniowego narzędzi w stosunku do ich prędkości obrotowej na zmianę grubości ścianki oraz długości odkuwki wyznaczony przy: $\delta = 1,5$, $g_o = 7 \text{ mm}$

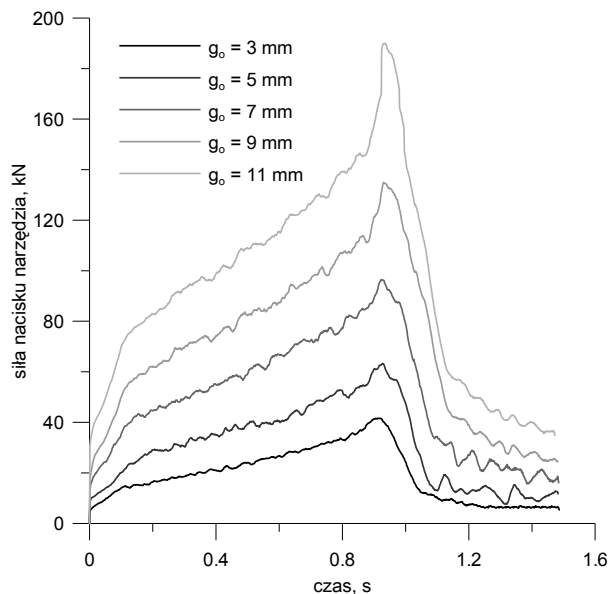
- zwiększenie stosunku grubości początkowej ścianki g_o do średnicy wsadu D (g_o/D) powoduje zmniejszenie przyrostu grubości Δg ścianki oraz zwiększenie wydłużenia odkuwki Δl (rys. 8).



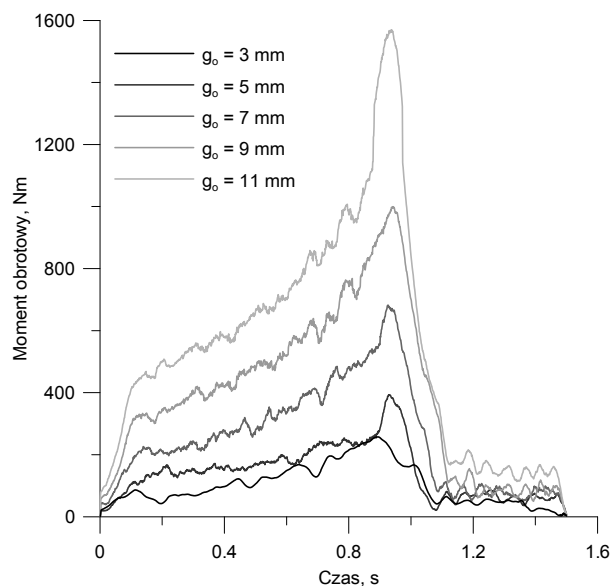
Rys. 8. Wpływ grubości początkowej ścianki w stosunku do średnicy wsadu na zmianę grubości ścianki oraz długości odkuwki, wyznaczony przy: $\delta = 2,1$, $v = 8 \text{ mm/s}$

Równie ważnymi parametrami, które analizowano podczas prowadzonych symulacji numerycznych były przebiegi sił i momentów kształtowania. Trafne oszacowanie wartości maksymalnych tych parametrów ułatwia poprawne opracowanie technologii oraz konstrukcji narzędzi i agregatu kuźniczego. Ponadto znajomość charakterystyk siłowych pozwala w łatwy sposób monitorować przebieg procesu pod kątem pojawienia się zjawisk, zakłócających jego

stabilny przebieg. Przykładowe przebiegi parametrów siłowych (siły nacisku narzędzia oraz momentu obrotowego) wyznaczone MES w trakcie symulacji obciskania obrotowego przedstawiono na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Wyznaczony numerycznie przebieg sił nacisku narzędzia w procesie obciskania obrotowego dla: $\delta = 1,5$, $v = 6$ mm/s



Rys. 10. Wyznaczony numerycznie przebieg momentu obrotowego na jednym narzędziu w procesie obciskania obrotowego dla: $\delta = 1,5$, $v = 6$ mm/s

Cechą charakterystyczną otrzymanych rozkładów jest ich zbliżony kształt, przy czym ze wzrostem grubości ścianki wsadu, zwiększają się wartości siły nacisku narzędzi i momentu obrotowego. Proces obciskania odkuwki można podzielić na dwa podstawowe etapy. W pierwszym etapie procesu przemieszczające się promieniowo narzędzia redukują średnicę zewnętrzną wsadu, czemu towarzyszy stopniowy wzrost parametrów siłowych. Pod koniec

pierwszej fazy obciskania widoczny jest gwałtowny wzrost sił i momentów, wywołany kontaktem środkowego stopnia odkuwki (nieodkształcanego) z narzędziami. W drugim etapie, podczas kalibrowania (wyłączony jest ruch postępowy narzędzi) usuwane są nierówności powstałe w pierwszej fazie obciskania. W rezultacie obserwuje się gwałtowny spadek parametrów siłowych procesu.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza procesu obciskania obrotowego potwierdziła możliwość kształtowania drążonych odkuwek stopniowanych wałków i osi. Wielowariantową analizę numeryczną procesu obciskania obrotowego wykonano metodą elementów skończonych (MES) w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia. W trakcie symulacji w dużym stopniu potwierdzono słuszność przyjętych założeń technologiczno – konstrukcyjnych, wyznaczono kinematykę płynięcia materiału, a przede wszystkim określono wpływ wybranych parametrów obciskania (δ , g_0/D i V/n) na kształt uzyskanych wyrobów. Wykazano, że największy wpływ na zwiększenie grubości ścianki odkuwki Δg ma prędkość przemieszczania się narzędzi. Wraz ze zwiększeniem prędkości narzędzi v obserwuje się większy przyrost grubości ścianki, zaś przy mniejszych prędkościach materiał płynie intensywniej w kierunku osiowym, co powoduje zwiększenie długości odkuwki. Również istotny wpływ na kinematykę płynięcia materiału ma grubość początkowa ścianki zastosowanego wsadu. Wzrost grubości g_0 zwiększa opory odkształcenia plastycznego w kierunku promieniowym, co powoduje zmniejszenie przyrostu grubości ścianki odkuwki, przy jednoczesnym gwałtownym zwiększeniu jej długości. Intensywność wzrostu grubości i długości zależy nie tylko od stopnia gniotu, ale także uzależniona jest od dwóch pozostałych parametrów (g_0/D i v/n).

Reasumując można stwierdzić, że opracowany proces pozwala na kształtowanie osiowo-symetrycznych odkuwek drążonych z półfabrykatów rurowych. Dzięki temu możliwe jest znaczne zmniejszenie robocizny i zużycia materiałów, przy równoczesnej poprawie własności wytrzymałościowych ukształtowanych elementów. Jednocześnie pozwala to zmniejszyć koszty wytwarzania oraz eksploatacji maszyn i urządzeń. Przeprowadzone badania procesu obciskania obrotowego odkuwek drążonych dały obiecujące wyniki, jednak pełne poznanie procesu oraz zjawisk ograniczających stabilny jego przebieg jest warunkowane wykonaniem pełnej analizy teoretyczno – doświadczalnej.

Literatura

1. Ashby M, Jones D. Materiały inżynierskie. Tom I – Właściwości i zastosowanie. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne. Warszawa 1995.
2. Bartnicki J, Pater Z. Walcowanie poprzeczno-klinowe wyrobów drążonych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin 2005.
3. Li X, Wang M, Du F. The coupling thermal - mechanical and microstructural model for the FEM simulation of cross wedge rolling. Journal of Materials Processing Technology 2006; 172: 202 – 207.
4. Neugebauer R, Kolbe M, Glass R. New warm forming processes to produce hollow shafts. Journal of Materials Processing Technology 2001; 119: 277 – 282.
5. Pater Z. Walcowanie poprzeczno-klinowe. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin 2009.
6. Pater Z, Tomczak J. Method for plastic forming of toothed shafts. Zgłoszenie Patentowe Europejskie nr EP 11461501.
7. Pater Z, Tomczak J. Rotary Compression of Hollow Parts by Cross Rolling. Zgłoszenie Patentowe Europejskie nr EP 11461502.
8. Pater Z. Nowa technologia kształtowania metali: Walcowanie klinowo-rolkowe. Rudy i Metale Nieżelazne 2003; 10-11: 483 – 485.
9. Tomczak J, Pater Z, Gontarz A. Termomechaniczna analiza kształtowania plastycznego wałka ze stopu tytany Ti6Al4V. Mechanik 2012; 3: 205 – 211.
10. Tomczak J, Pater Z. Analysis of metal forming process of a hollowed gear shaft. Metalurgija 2012; 51: 497 – 500.
11. Urankar S, Lovell M, Morrow C, Kawada K. Establishment of failure conditions for the cross-wedge rolling of hollow shafts. Journal of Materials Processing Technology 2006; 177: 545 – 549.
12. Wong C.C, Lin J, Dean T.A. Effects of roller path and geometry on the flow forming of solid cylindrical components Journal of Materials Processing Technology 2005; 167: 344 – 353.

Badania realizowane w ramach projektu badawczego własnego Nr 6234/B/T02/2011/40