

dr hab. inż. Zbigniew Pater, prof. PL, mgr inż. Janusz Tomczak

Politechnika Lubelska, Lublin

WALCOWANIE POPRZECZNO-KLINOWE ODKUWEK O PRZEKROJU POPRZECZNYM RÓŻNYM OD KOŁOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono rezultaty analizy numerycznej procesów walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) części o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. Analizowano dwa przypadki kształtowania przebiegające przy różnych parametrach procesu. W obliczeniach zastosowano oprogramowanie MSC.SuperForm 2005, bazujące na MES. Szczegółowo omówiono zagadnienia związane z projektowaniem kształtu narzędzi klinowych. Podano obliczoną progresję kształtu wyrobów podczas walcowania, stan odkształcenia, rozkłady sił oraz mapy temperatur.

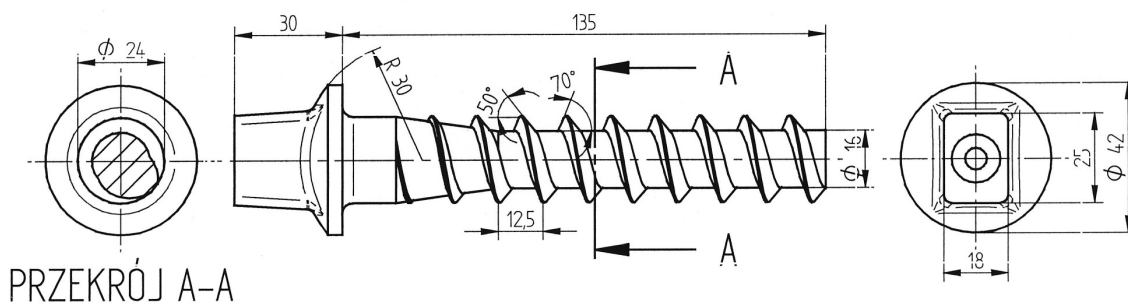
Słowa kluczowe: walcowanie poprzeczno-klinowe, MES, narzędzia

1. Wprowadzenie

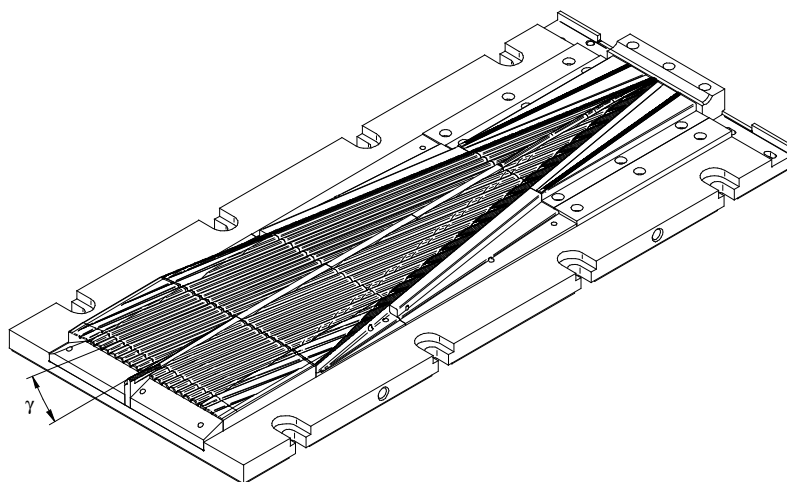
Walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) jest nowoczesną technologią wytwórczą wyrobów typu stopniowanych osi i wałów. W procesie tym dwa lub trzy kliny (umieszczone na walcach bądź płaskich płytach walcarek) wcinają się we wsad kształtując wyrób (odkuwkę), charakteryzujący się symetrią osiową. Typowe odkuwki wytwarzane tą technologią posiadają powierzchnie walcowe, stożkowe i sferyczne [1-2].

Możliwości technologiczne WPK mogą być rozszerzone w efekcie takiego skalibrowania narzędzi (klinów), które umożliwić będzie walcowanie odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego.

Przykładem takiego rozwiązania może być nowa technologia walcowania gwintu na wkrętach kolejowych – rys. 1, w której zastosowano proces WPK [3]. Wytwarzanie gwintu wg nowej technologii wymaga stosowania segmentów klinowych, na powierzchni których nacięto rowki służące do kształtowania poszczególnych zwojów gwintu. Kąt γ jaki tworzą rowki (rys. 2) z kierunkiem przemieszczania klinów równy jest kątowi nachylenia linii śrubowej kształtowanego gwintu. W efekcie takiego rozwiązania metodą WPK walcowana jest odkuwka, której przekrój poprzeczny (pokazany na rys. 1) jest różny od kołowego.



Rys. 1. Wkręt szynowy P49A, którego część gwintowa kształtowana jest metodą WPK



Rys. 2. Narzędzie klinowe służące do walcowania gwintu wkrętów szynowych, kształtowanych w układzie podwójnym

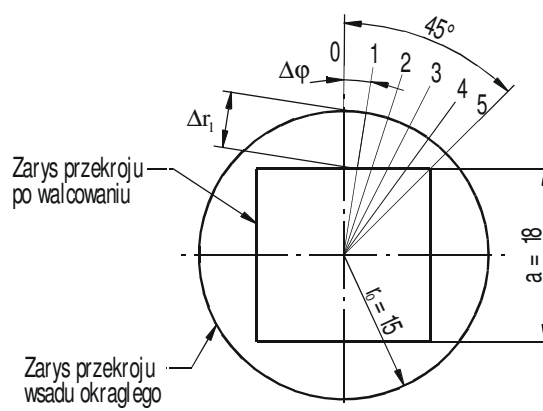
W ramach prezentowanego opracowania przedstawia się nowe rozwiązania narzędzi (klinów), których zastosowanie umożliwi kształtowanie stopni wałków o przekrojach różnych od kołowego (np. owalnych, kwadratowych, sześciokątnych, prostokątnych i innych). Ponadto bazując na opracowanej metodzie kalibrowania klinów możliwe będzie również kształtowanie technologią WPK stopni mimośrodowych osi i wałów.

2. Kształtowanie powierzchni roboczej narzędzi

Koncepcja rozwiązania umożliwiającego walcowanie wyrobów o praktycznie dowolnym przekroju bazuje na odpowiednim okresowym sprofilowaniu powierzchni kalibrujących klina. Profil ten dobiera się w taki sposób by stanowił on obwiednię kształtowanego stopnia wałka. Poniżej szczegółowo przedstawia się schemat postępowania zmierzającego do określenia profilu narzędzi umożliwiających walcowanie stopnia odkuwki o przekroju kwadratowym. Na rys. 3 pokazano zarys kwadratowego przekroju poprzecznego stopnia odkuwki (o boku $a = 18$ mm), który zamierza się uzyskać w procesie walcowania z wsadu o średnicy $\varnothing 30$ mm. Ze względu na podwójną symetrię zarysu w analizowanym przypadku wystarczy wyznaczyć profil narzędzia zapewniający wykonanie przez odkuwkę $\frac{1}{4}$ obrotu, czyli o kąt $\varphi = 90^\circ$. Przy czym na długości narzędzia odpowia-

dającej obrotowi odkuwki o kąt $\varphi = 45^\circ$ następuje zmniejszenie gniotu bezwzględnego od wartości maksymalnej $\Delta r_{\max} = r_0 - a/2$ do wartości minimalnej $\Delta r_{\min} = r_0 - a/\sqrt{2}$. Dalszemu obrotowi wyrobu ($45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$) towarzyszy zaś zwiększenie gniotu, przyrastającego w sposób odwrotny do jego spadku obserwowanego w czasie poprzedniej $1/8$ obrotu. Dlatego też w podanym przykładzie wystarczy ustalić profil narzędzia na długości odpowiadającej obrotowi odkuwki o kąt 45° . Kąt ten dzieli się na n równych części, z czego wynika podział kątowy $\Delta\varphi$ równy

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi}{n} \quad (1)$$



Rys. 3. Schemat ilustrujący sposób wyznaczania gniotu bezwzględnego Δr_i , w procesach WPK wyrobów o przekroju poprzecznym różnym od kołowego

Następnie określa się wartość gniotu bezwzględnego Δr_i , w płaszczyznach wzdłużnych określonych kolejnymi liniami $i = 0, 1, 2, \dots$. W analizowanym przykładzie jest to

$$\Delta r_i = r_0 - \frac{a}{2 \cdot \cos(i \cdot \Delta \varphi)} \quad (2)$$

O wyliczoną wartość Δr_i należy obniżyć powierzchnię kalibrującą narzędzia (w sposób pokazany na rys. 4) przyjmując jednocześnie, że odległość Δx_i (określająca przemieszczenie klina w trakcie wykonywania przez odkuwkę obrotu o kąt $\Delta \varphi$) może być obliczona na podstawie następującej zależności:

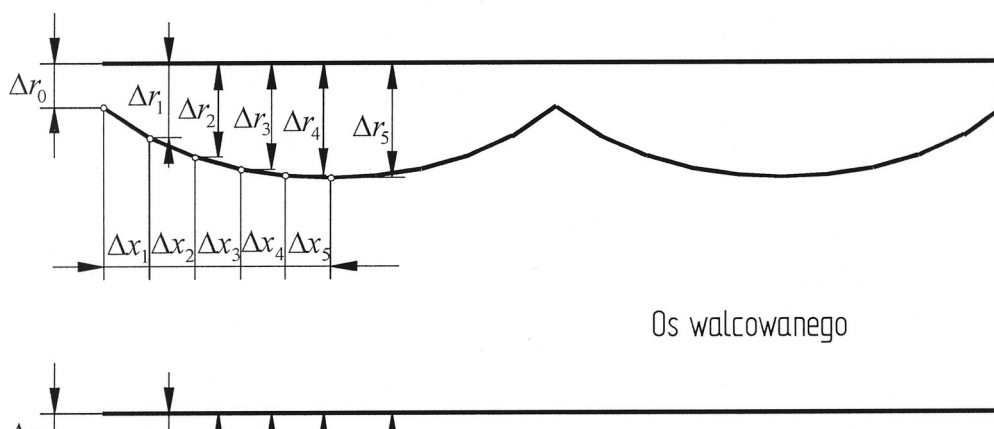
$$\Delta x_i = \Delta \varphi \cdot r_t, \quad (3)$$

gdzie: r_t – promień toczy odkuwki.

Wartość promienia toczonego ulega zmianie w trakcie procesu WPK i jest zależna m.in. od wartości kątów klina (kształtującego α i rozwarcia β), zastosowanego stopnia gniotu δ oraz temperatury kształtowanego metalu T [4-5]. W przypadkach, gdy odkuwka poza strefą kształtowania toczy się po klinie, z pewnym uproszczeniem można przyjmować, że promień toczy r_t równy jest promieniowi wsadu r_0 .

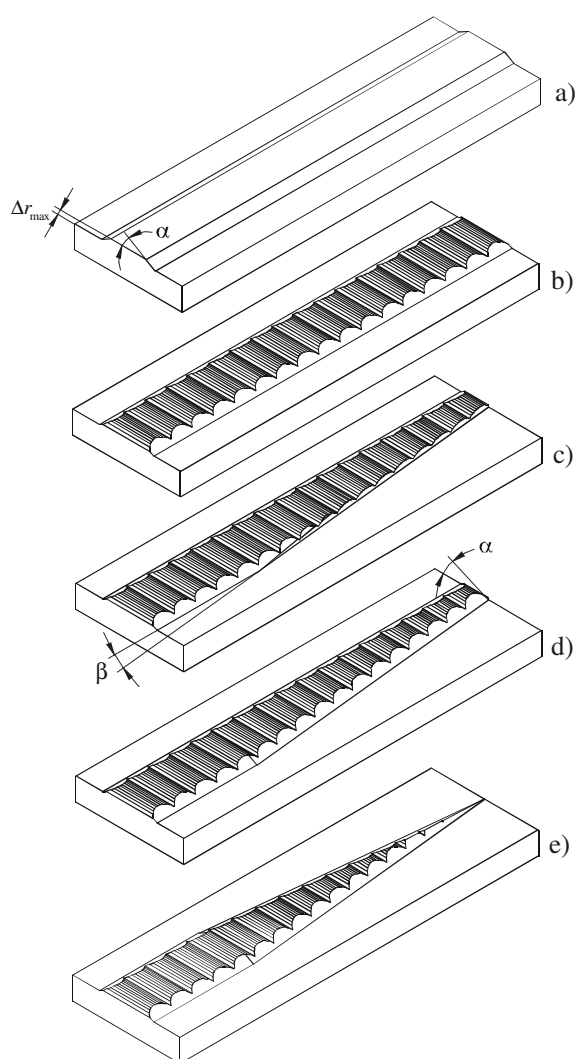
Stosując takie uproszczenie można już bez większych problemów zaprojektować kliny umożliwiające odwalcowanie stopni odkuwki o przekroju kwadratowym. Oczywiście przystępując do prac projektowych w pierwszej kolejności należy ustalić wartości kątów α i β klinów, które dobiera się w sposób identyczny jak w klasycznych procesach WPK – opisany np. w pracach [6, 7].

Znajomość kątów α i β umożliwia wykonanie projektu narzędzi. Omówienie kolejności prac związanych z konstrukcją narzędzi klinowych przedstawiono w oparciu o przestrzenny system komputerowo wspomaganego projektowania (CAD 3D). Pierwszy etap prac stanowi wykonanie bryły, której przekrój poprzeczny odpowiada zarysowi wzdłużnemu kształtowanego przewężenia. Wysokość profilu klina przyjmuje się za równą wartości maksymalnej gniotu Δr_{max} (w naszym przypadku wynosi ona $r_0 - a/2$) – rys. 5a. Następnie profiluje się powierzchnię kalibrującą klinów wycinając w niej w sposób okresowy wgłębienia o zarysie z rys. 4, ustalonym na podstawie obliczeń. Tak sprofilowane narzędzie pokazuje rys. 5b. Następnie startując ze środka występu odcina się (pod kątem β) jego część płaszczyzną prostopadłą do powierzchni podstawy narzędzia (rys. 5c).



Rys. 4. Sposób profilowania powierzchni kalibrującej klinów mający na uzyskanie możliwości kształtowania wyrobów o przekroju poprzecznym kwadratowym

Kolejny etap stanowi sfazowanie, pod kątem α do podstawy, powierzchni pionowej uzyskanej w poprzedniej operacji. W wyniku takiego zabiegu uzyskuje się powierzchnię kształtującą klina, jednoznacznie określoną przez kąty α i β (rys. 5d). Dalsze prace projektowe dotyczą wykonania (w sposób analogiczny do omówionego poprzednio) powierzchni kształtującej na drugiej połowie narzędzia (rys. 5e). Wprowadzenie promieni zaokrąglenia krawędzi roboczych oraz dodanie sfazowań umożliwiających płynne zejście odkuwki z klinów kończy konstrukcję klina.



Rys. 5. Schemat ilustrujący sposób konstruowania narzędzia klinowego, zabezpieczającego walcowanie odkuwki z kwadratowym przekrojem poprzecznym

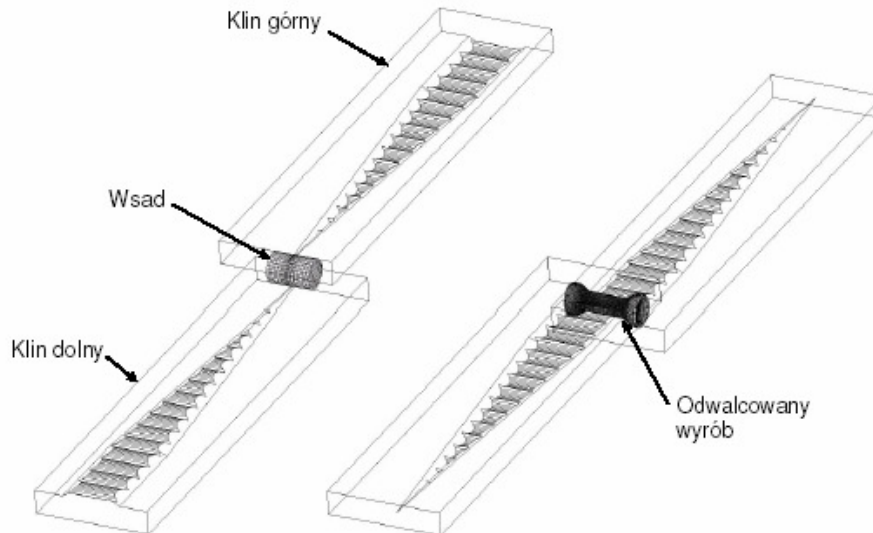
3. Weryfikacja numeryczna

Dla sprawdzenia możliwości wytwarzania metodą WPK odkuwek posiadających stopnie o przekroju poprzecznym różnym od kołowego wykorzystano modelowanie numeryczne, bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). Obliczenia wykonano stosując komercyjny pakiet oprogramowania MSC.SuperForm 2004, wykorzystujący reprezentację przemieszczeniową MES. Skuteczność zastosowania tego oprogramowania w badaniach procesu WPK, potwierdzona była wielokrotnymi weryfikacjami doświadczalnymi realizowanymi zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych [8-10]

Na rys. 6 przedstawiono model geometryczny narzędzi oraz wsadu opracowany dla procesu WPK wałka posiadającego centralny stopień o przekroju kwadratu. Narzędzia projektowano w systemie CAD 3D Solid Edge, a następnie eksportowano do programu MSC.SuperForm 2004. Przyjęto następujące główne parametry narzędzia klinowego: kąt kształtujący $\alpha = 30^\circ$, kąt rozwarcia klina $\beta = 5^\circ$. Założono, że w trakcie procesu walcowania przemieszczają się ruchem posuwistym obydwie kliny, z tą samą prędkością równą 0,2 m/s. Przyjęto, że wsadem do walcowania jest odcinek pręta o wymiarach $\varnothing 30 \times 45$ mm.

W obliczeniach założono, że materiał z którego wykonywana jest odkuwka to stal w gatunku C45. Model materiałowy tej stali przyjęto z biblioteki zastosowanego oprogramowania MES. Przyjęto, że materiał przed walcowaniem jest nagrzewany do temperatury 1100°C , zaś temperatura klinów jest jednakowa i wynosi 150°C . Pozostałe parametry przyjęte w obliczeniach to: współczynnik wymiany ciepła między materiałem a otoczeniem $350 \text{ W/m}^2\text{K}$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami $10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ oraz temperatura otoczenia 30°C .

Ze względu na poślizgi metalu po powierzchniach narzędzi w obliczeniach zastosowano model tarcia stałego uzależniony od prędkości poślizgu. Model ten opisuje zależność:



Rys. 6. Opracowany na potrzeby obliczeń MES model geometryczny procesu WPK odkuwki o przekroju poprzecznym kwadratowym

$$\tau = -mk \operatorname{arctg} \left(\frac{v_p}{a_p} \right) \frac{v_p}{|v_p|}, \quad (4)$$

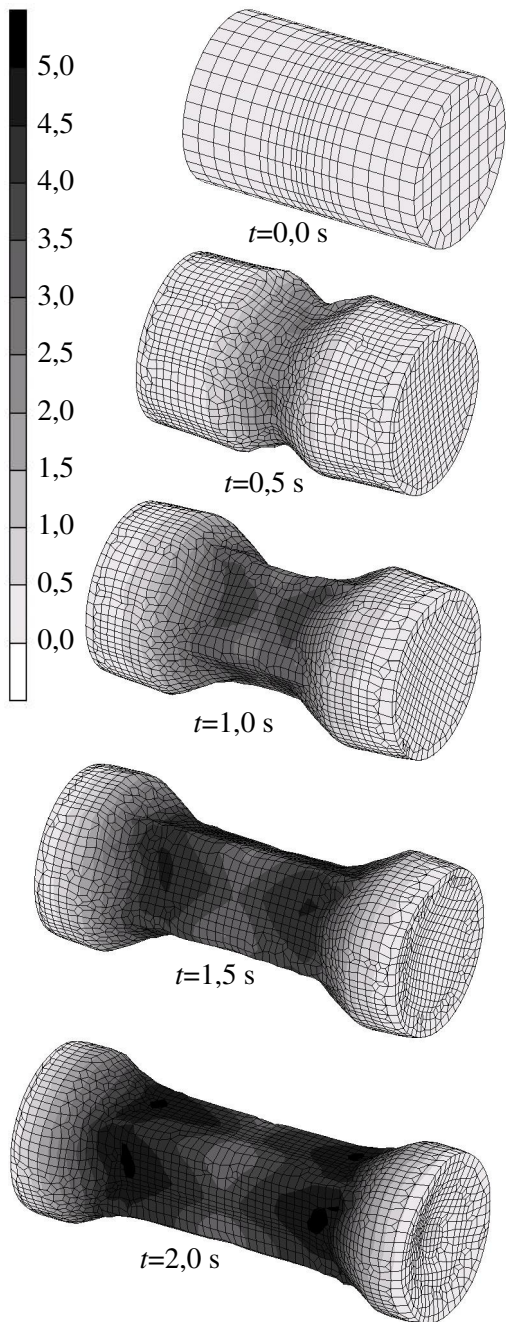
gdzie: m – czynnik tarcia, k – granica plastyczności materiału przy czystym ścinaniu, v_p - wektor prędkości poślizgu, a_p – współczynnik o kilka rzędów mniejszy od prędkości poślizgu. W bieżącej analizie, bazując na rezultatach prac badawczych opisanych w pracy [3], przyjęto graniczną wartość czynnika tarcia $m = 1$.

Na podstawie wykonanych obliczeń prześlędzono zmiany kształtu odkuwki zachodzące w trakcie procesu walcowania. Na rys. 7 przedstawiono progresję kształtu odkuwki w zależności od czasu trwania procesu. Z rysunku tego wynika, że początkowo proces walcowania odkuwki o przekroju kwadratowym przebiega w sposób identyczny jak podczas walcowania typowego. Mianowicie kliny wcinają się w materiał kształtując na jego obwodzie rowek klinowy. Przy czym wówczas w obszarze kształtowanego przewężenia odkuwka ulega silnej owalizacji, charakterystycznej dla procesów WPK. Jest to szczególnie widoczne na rys. 8 (dla czasu $t = 0,2$ s), na którym pokazano jak zmienia się przekrój poprzeczny odkuwki, w jej płaszczyźnie symetrii. W momencie, gdy w kontakt z materiałem wchodzi część narzędzia z wykonanym nacięciem obserwuje się, że

materiał zostaje wciśnięty w narzędzie. W ten sposób kształtowane są naroża przekroju, przy czym ze względu na obtaczanie odkuwki po powierzchni narzędzi w dalszej fazie procesu naroża te ulegają zaokrągleniu – co uznaje się za cechę charakterystyczną tej metody kształtowania.

Korzystając z rys. 7 i 8 można wstępnie określić jak rozkładają się odkształcenia w odkuwce walcowanej. Stwierdza się warstwowy rozkład odkształceń, które układają się w ten sposób, że w warstwach powierzchniowych występują odkształcenia największe i zmniejszają się w kierunku do osi odkuwki. Na uwagę zasługuje fakt, że kształt poszczególnych warstw jest zbliżony do zarysu przekroju poprzecznego, czyli kwadratu o zaokrąglonych narożach.

Na rys. 9 przedstawiono rozkład siły walcowania obliczony w ramach analizy MES. Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że siła ta charakteryzuje się dużą zmiennością, zwiększającą się w miarę wzrostu zaawansowania procesu. Taki rozkład siły wynika ze zmieniającego się w trakcie procesu gniotu. W przypadku gdy gniot ten jest największy maksimum lokalne uzyskuje również siła walcowania. Natomiast, gdy Δr osiąga wartość minimalną, to również i siła kształtowania jest najmniejsza. Zatem podczas walcowania odkuwki o przekroju kwadratowym jednemu jej obrotowi odpowiadać będą cztery cykle zmian siły walcowania.



Rys. 7. Obliczona MES progresja kształtu oraz rozkład intensywności odkształcenia w odkuwce o przekroju poprzecznym kwadratowym

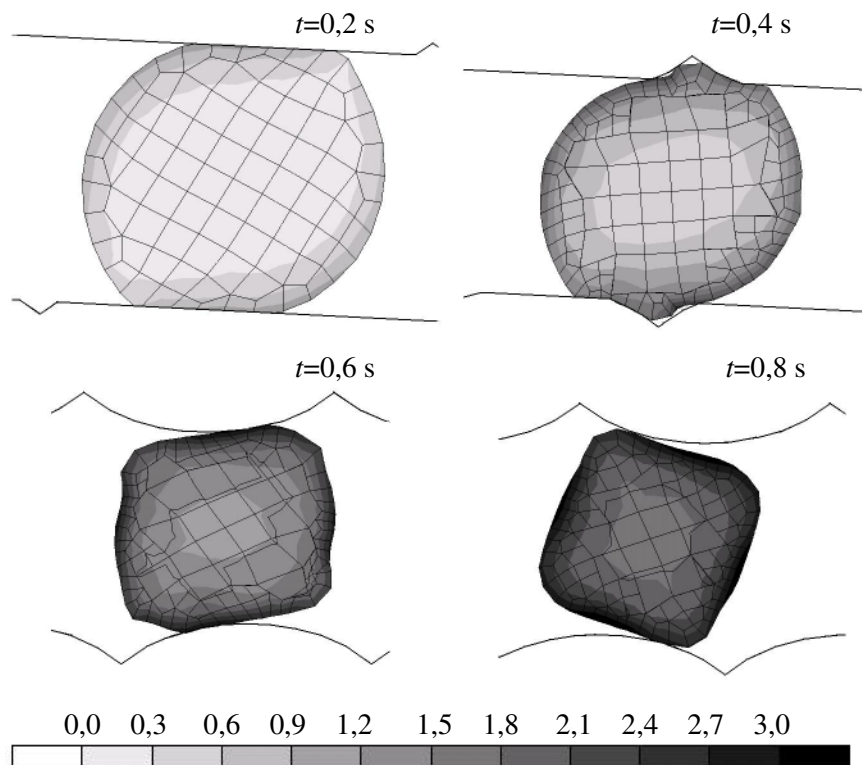
Należy zauważyć, że taki cykliczny rozkład siły nie ma miejsca w typowych procesach WPK i należy go uznać za kolejną cechę charakterystyczną analizowanych procesów walcowania.

Stosując podany sposób kalibrowania narzędzi można również zaprojektować kliny, które będą kształtować odkuwkę o przekroju owalnym zmieniającym się

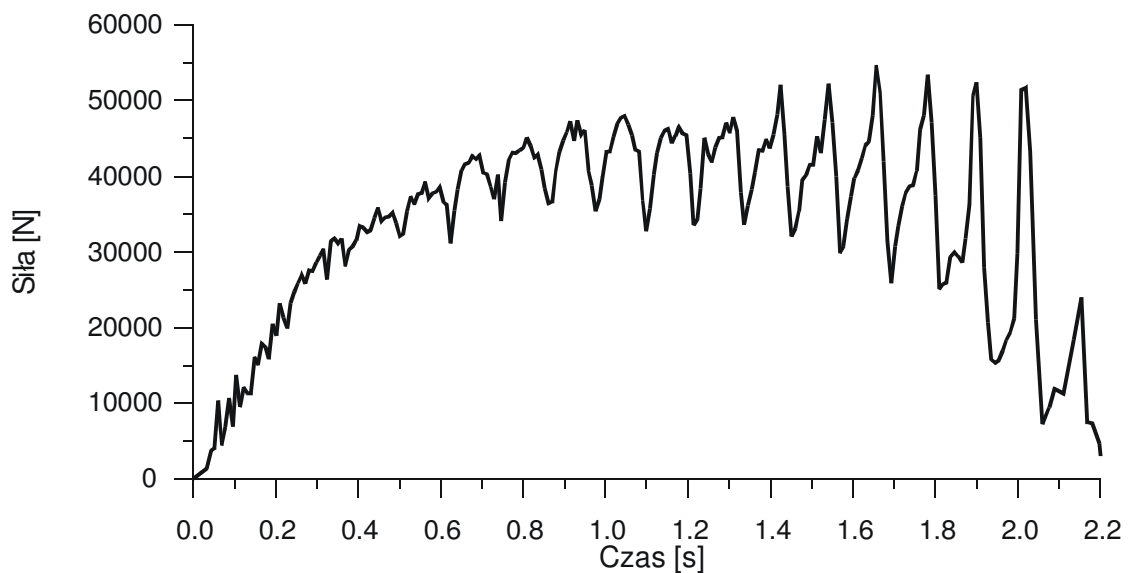
w zależności od współrzędnej osiowej z tego przekroju (rys. 10). W takim przypadku prace projektowe (w sposób opisany w punkcie 2) przeprowadza się oddzielnie dla dwóch skrajnych przekrojów kształtowanego przewężenia. Na rys. 11 pokazano projekt klina zabezpieczającego wykonawstwo odkuwki o zakładanym kształcie. Natomiast rys. 12 przedstawia progresję kształtu odkuwki z rys. 10, obliczoną w wyniku wykonanej symulacji numerycznej. Z rysunku tego wynika, że zastosowanie metody WPK jest w pełni uzasadnione do kształtowania odkuwek z owalnym przekrojem poprzecznym. Na rys. 12 pokazano również jak zmienia się siła kształtowania podczas walcowania stożkowej, owalnej części odkuwki. Widoczne jest, że w tym przypadku siła ta również oscyluje, ale oscylacje te nie są aż tak widoczne jak w przypadku walcowania odkuwki o przekroju kwadratowym. Fakt ten tłumaczy się płynną zmianą kształtu nacinanego profilu, która w sposób znaczący ogranicza nagłe skoki wartości siły.

Na rys. 13 pokazano finalny kształt odkuwki wraz z trzema wybranymi przekrojami poprzecznymi. Analiza kształtów tych przekrojów wskazuje, że odbiegają one nieznacznie od zakładanego do uzyskania kształtu owalu. Dodatkowo w strefie centralnej obserwuje się nieznaczne skręcenie tego przekroju w stosunku do skrajnych części przewężenia. Należy jednakże zauważyć, że zaobserwowane niedokładności wykonania są nieistotne, gdyż planowane jest wykorzystywanie tego schematu walcowania przy wytwarzaniu przedkuwek, gdzie tolerancje wykonawcze są szerokie.

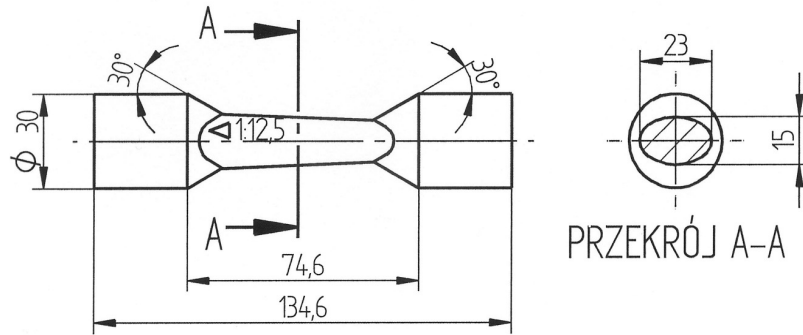
Ciekawe spostrzeżenia nasuwają się z analizy danych przedstawionych na rys. 14, na którym pokazano obliczony rozkład temperatur w owalnej odkuwce stożkowej. Z rysunku tego widać, że najniższe temperatury ma metal w strefie przypowierzchniowej, w której stykał się on z powierzchnią narzędzi. Jednakże pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania (2,5 s) temperatura ta nadal mieści się w zakresie zalecanym przy kształtowaniu tej stali, w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Fakt ten jest niewątpliwie skutkiem zamiany pracy tarcia oraz odkształcenia plastycznego na ciepło, co rekompensuje w pewnym stopniu straty ciepła odprowa-



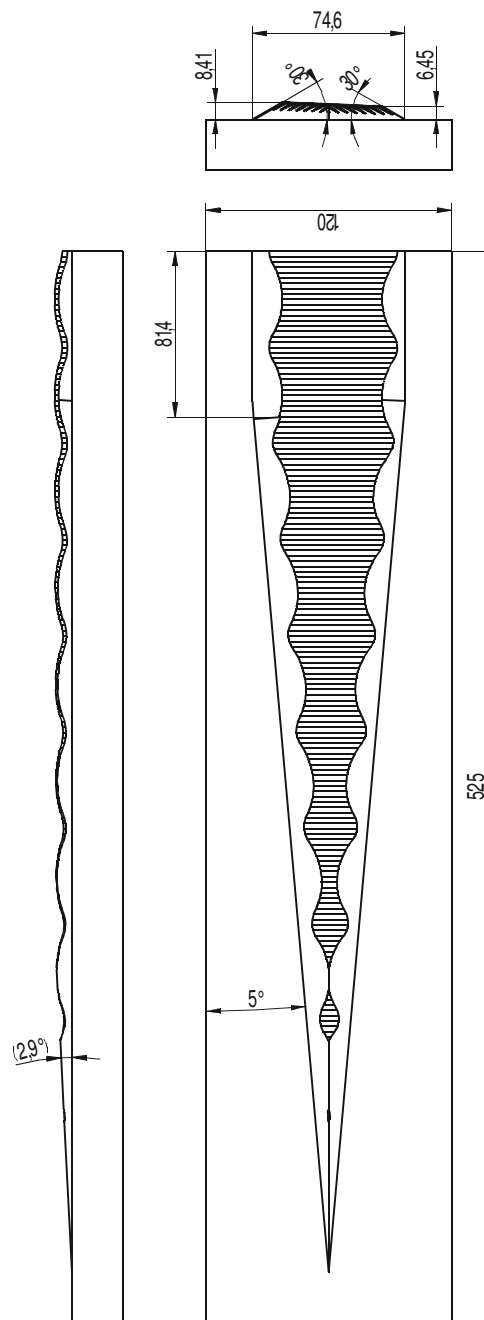
Rys. 8. Rozkład intensywności odkształcenia w przekroju poprzecznym odkuwki, pokrywającym się z płaszczyzną symetrii



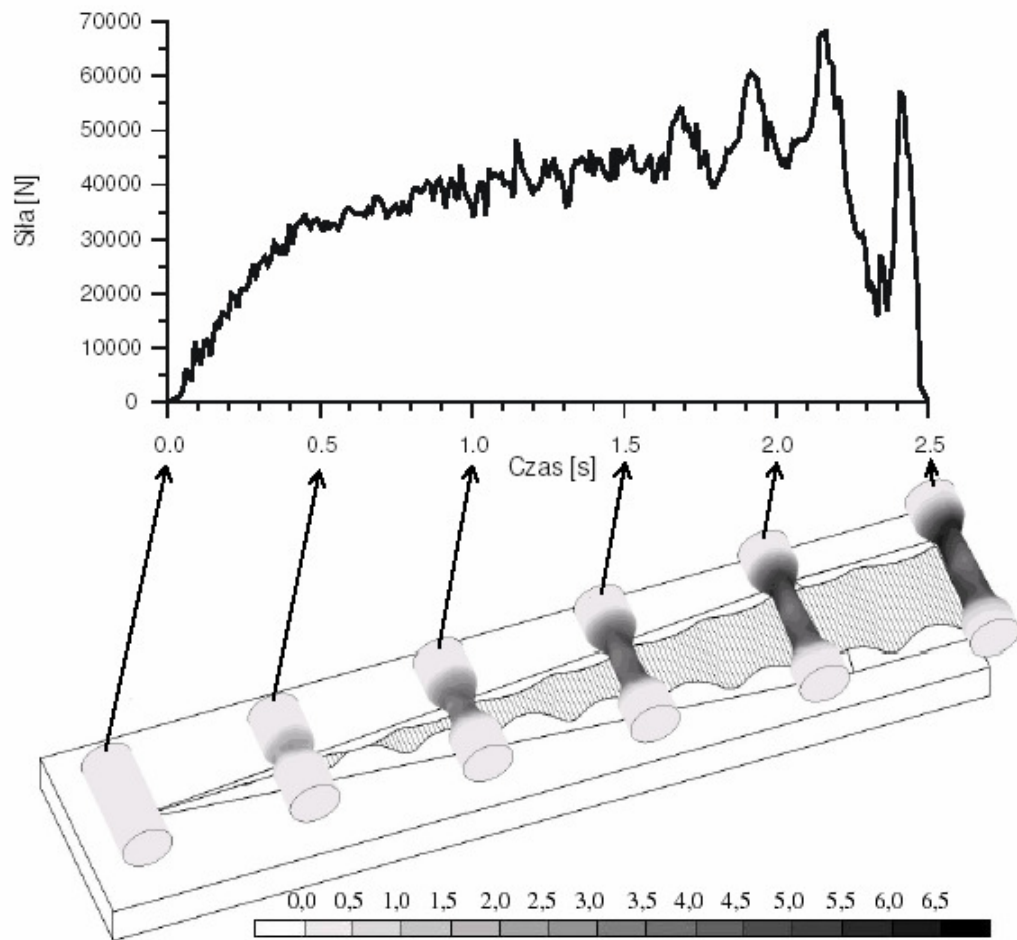
Rys. 9. Obliczony rozkład siły działającej na klin w procesie walcowania odkuwki o przekroju poprzecznym kwadratowym



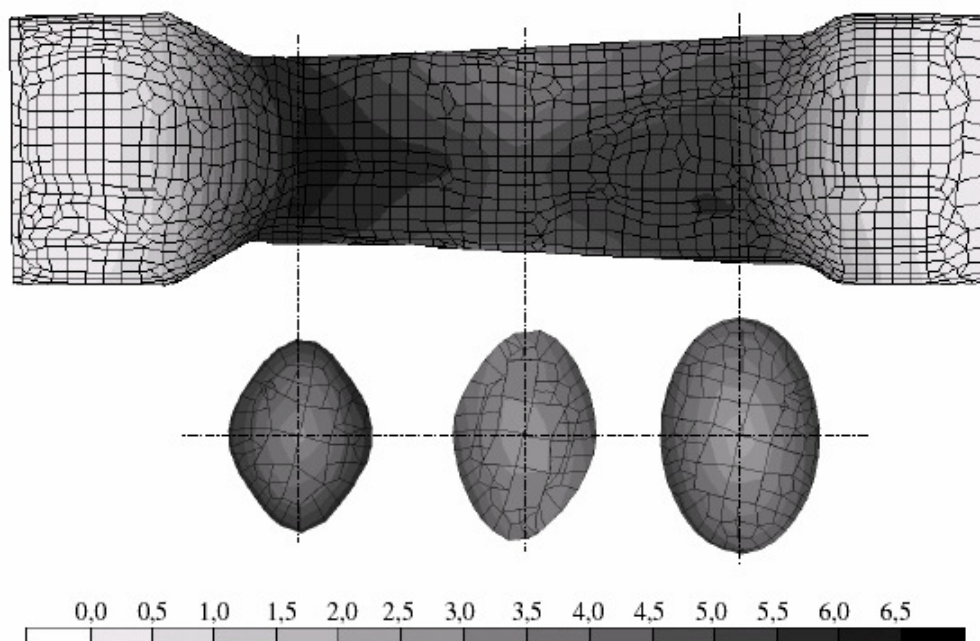
Rys. 10. Podstawowe wymiary odkuwki analizowanej w drugim przykładzie obliczeniowym



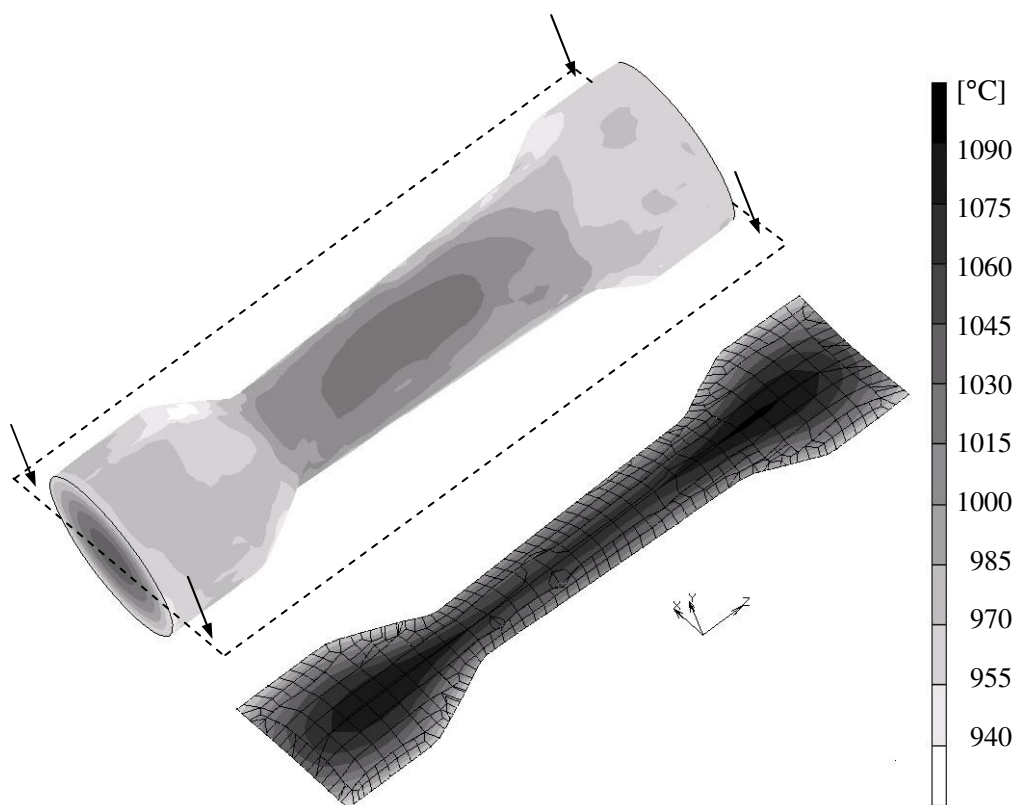
Rys. 11. Główne parametry narzędzia klinowego służącego do kształtowania odkuwki z rys. 10



Rys. 12. Progresa kształtu, rozkład intensywności odkształcenia i siła kształtowania w procesie WPK odkuwki posiadającej stopień stożkowy o przekroju owalnym



Rys. 13. Obliczone kształt i rozkład intensywności odkształcenia odkuwki z rys. 10, kształtowanej metodą WPK



Rys. 14. Obliczony rozkład temperatury, w odkuwce z rys. 10, po procesie WPK

dzanego do narzędzi. Równocześnie w strefie osiowej metal ma temperaturę najwyższą, co również jest korzystne. Bowiem w tej części wyrobu najczęściej dochodzi do utworzenia pęknięć wewnętrznych. Jednakże zgodnie z rezultatami prac [11] prawdopodobieństwo wystąpienia tych pęknięć maleje wraz ze wzrostem temperatury kształtowanego metalu.

4. Podsumowanie

W opracowaniu omówiono metodykę projektowania narzędzi klinowych, których użycie umożliwia walcowanie odkuwek o przekroju poprzecznym różnym od kołowego. Słuszność zaproponowanej koncepcji kształtowania wykazano w drodze symulacji numerycznych dwóch przypadków walcowania poprzeczno-klinowego (WPK), w których kształtowano wyroby o przekroju kwadratowym i owalnym. Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że ze względu na zmieniający się w trakcie walcowania gniot w omawianych procesach walcowania występują oscylacje siły. Po-

nadto, ciągle obtaczanie odkuwki po powierzchni narzędzi klinowych uniemożliwia wykonanie tą metodą wyrobów, których przekrój poprzeczny posiadał będzie naroża zakończone na ostro. W najbliższej przyszłości planowane jest wykonanie badań doświadczalnych weryfikujących opisaną nową metodę walcowania poprzeczno-klinowego.

Literatura

- [1] Pater Z., Weroński W.: *Podstawy procesu walcowania poprzeczno-klinowego*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996
- [2] Fu X. P., Dean T. A. Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process. *International Journal of Machinery Tools Manufacture Design, Research and Application* 1993 vol. 33 s. 367 – 400
- [3] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W.: *Technologia kształtowania i modelowanie nowego proce-*

- su wytwarzania wkrętów szynowych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003
- [4] Chao-Fu Z. Method of determining the rolling radius of workpiece for cross wedge rolling process. W: *Proceedings of 2nd International Conference on Rotary Metalworking Processes* October 6th – 8th 1982, Stratford upon Avon UK s. 27 – 32
- [5] Pater Z., Weroński W. Kinematyka płynięcia materiału oraz promień toczny w procesach walcowania poprzeczno – klinowego. *Obróbka Plastyczna Metali* 1995 nr 4 s. 17 – 26
- [6] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno-klinowego*, Wyd. LTN, Lublin 2001
- [7] Pater Z. Strategia doboru parametrów narzędzi do walcowania poprzeczno – klinowego. W: *Mat. Konferencji Metal Forging'99* 20-22 wrzesień 1999, Częstochowa - Kokotek s. 135-145
- [8] Pater Z., Gontarz A., Łukasik K., Weroński W.: *Modelirovanie procesov poperečno – klinovoj prokatki*. Wyd. NUPT, Kiev 2003
- [9] Dong Y., Lovell M., Tagavi K. Analysis of slip in cross – wedge rolling: an experimentally verified finite – element model. *Journal of Materials Processing Technology* 1998 vol. 80 – 81 s. 273 – 281
- [10] Bartnicki J., Pater Z. The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts. *Journal of Materials Processing Technology* 155-156 (2004), s. 1867-1873
- [11] Andreev G. V., Klušín V. A., Makušok E. M., Segal V. M., Ščukin V. Ja. *Poperečno – klinovaja prokatka*. Minsk: Nauka i Technika 1974

CROSS – WEDGE ROLLING OF PARTS WITH NON - CIRCULAR CROSS SECTION

Abstract

In this paper, the results of numerical calculations of the forming of parts with non – circular cross section by cross – wedge rolling method (CWR) are presented. Two variants of this type of forming with different process parameters were analyzed. During numerical calculations software MSC. SuperForm 2004 was used. The schema of designing of wedge tools was discussed. In this work, the results of numerical analysis of CWR process, shape progression, state of strain, distribution of forces and temperature are shown.

Key words: cross-wedge rolling, FEM, tools