

Dr hab. inż. Zbigniew PATER, prof. PL
Politechnika Lubelska, Lublin

Siły w procesie walcowania klinowo-rolkowego

Loads in wedge-rolls rolling processes

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych w zakresie określania sił w procesach walcowania klinowo-rolkowego (WKR). Omówiono wpływ głównych parametrów procesu: kąta rozwarcia klina β i gniotu na wartość składowej stycznej F_x i promieniowej F_z siły walcowania. Przedstawiono również zmierzone przebiegi sił w procesach WKR odkuwek pełnych i drażonych.

Abstract

Results of experimental and numerical investigation of loads in wedge-rolls rolling (WRR) are presented in this paper. Influence of main WRR process parameters (forming angle α , and relative reduction) on radial and tangential component of rolling load is discussed. Measured courses of loads during WRR process of full and hollowed parts are presented, too.

Słowa kluczowe: walcowanie klinowo-rolkowe, siły, metoda elementów skończonych, eksperyment

Key words: wedge-rolls rolling, loads, finite element method, experiment

1. WPROWADZENIE

Walcowanie klinowo-rolkowe (WKR) jest nową technologią walcowania poprzeczno-klinowego (WPK). W metodzie tej w odróżnieniu od pozostałych technologii WPK wykorzystuje się tylko jeden płaski klin oraz dwie rolki kształtowe. W trakcie walcowania poruszający się ruchem posuwistym klin wciska się w materiał nadając mu pożądany kształt. Odkuwka w trakcie walcowania jest przemieszczana w kierunku pionowym, co jest następstwem wciskania się w metal występów rolek kształtowych. Rolki te są napędzane i poruszają się w czasie ruchu roboczego klina. Schemat procesu WKR na rolkach kształtowych, wraz z ważniejszymi parametrami pokazano na rys. 1.

Porównanie procesu WKR do typowych technologii WPK wykazuje szereg zalet, z których jako najważniejsze uznaje się [1]:

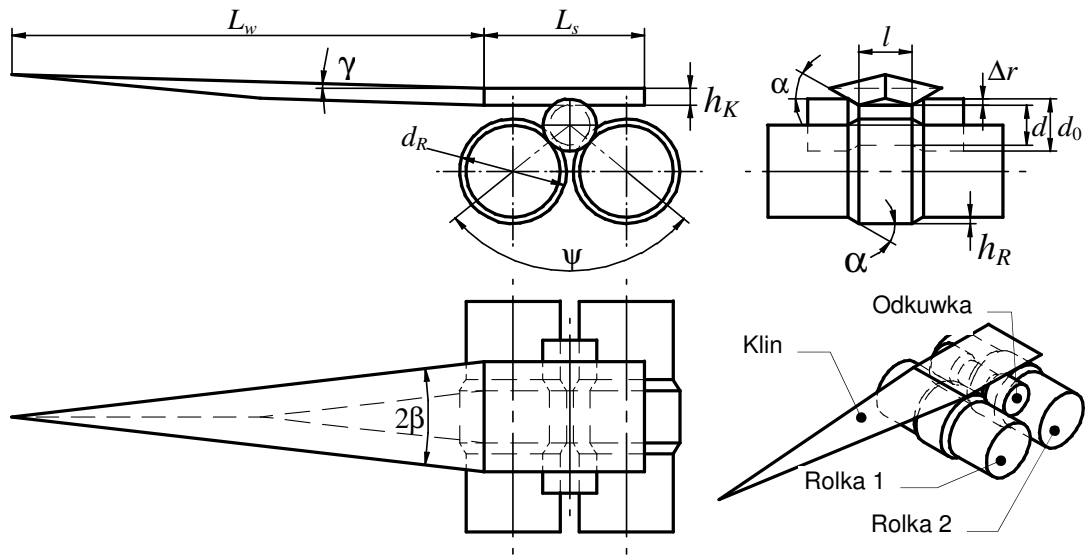
- niższe koszty wdrożenia, w efekcie stosowania tylko jednego narzędzia klinowego;
- możliwość walcowania w jednym przejściu kilku, a nawet więcej odkuwek;

- zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania pęknięć wewnętrznych w wyrobie kształtowanym;

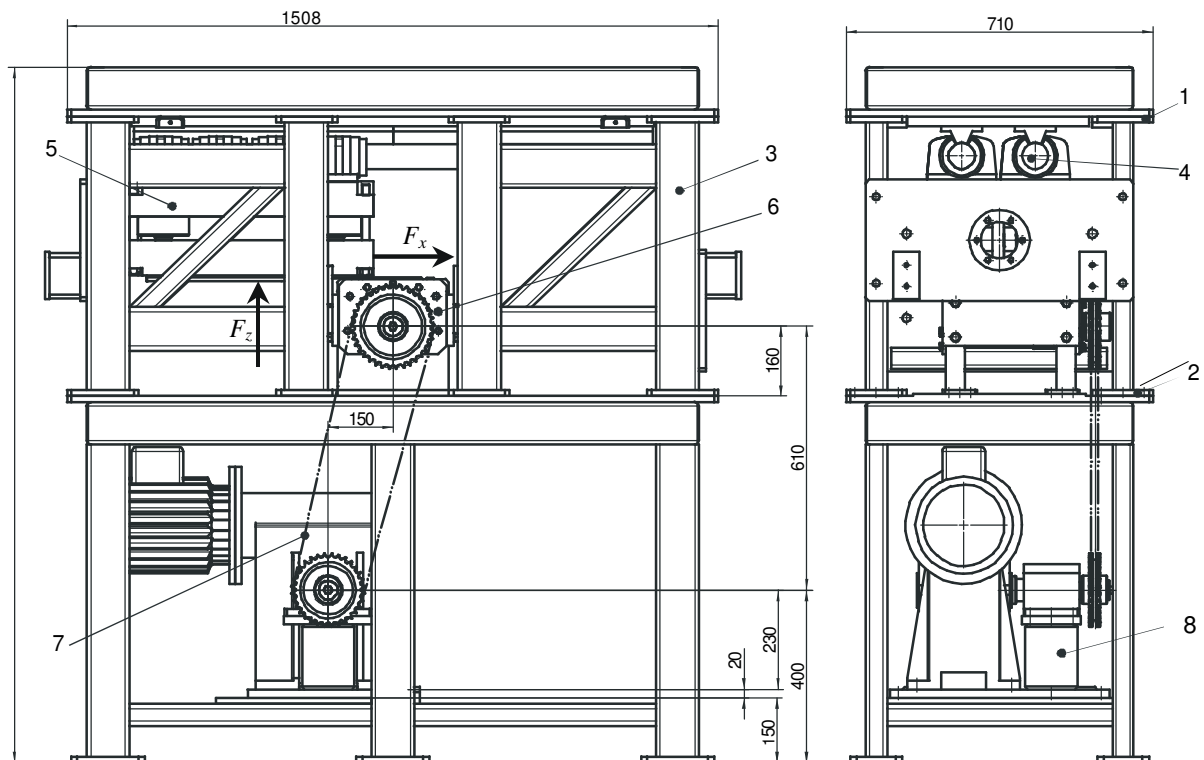
- łatwość usuwania zgorzeli.

Na podstawie wcześniejszych prac autora [1-4], można stwierdzić, że WKR można zastosować zarówno do wytwarzania przedkuwek kutek następnie na prasach jak i do kształtowania na gotowo odkuwek osiowo-symetrycznych.

Bardzo ważnym zadaniem podczas projektowania procesów walcowania poprzecznego jest określenie sił działających na narzędzia. Znajomość sił pozwala bowiem nie tylko na odpowiedni dobór urządzenia walcującego wraz z oprzyrządowaniem, ale również może być podstawą automatyzacji procesu kształtowania (obejmującej również selekcję odkuwek na wyroby dobre i wybrakowane). Zagadnieniu siłowym dotyczącym typowych procesów WPK poświęcono szereg prac, np. pozycje [5-6]. Uzupełnieniem tych opracowań jest niniejszy artykuł dotyczący sił w nowym procesie WPK, w którym wykorzystuje się tylko jeden klin kształtujący. Siły te obliczono stosując nowoczesne metody modelowania nume-



Rys. 1. Schemat walcowania klinowo-rolkowego (WKR) na rolkach profilowych
 Fig. 1. Schema of wedge rolls rolling (WRR) on profiled rolls



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do WKR, bez układu hydraulicznego: 1 – płyta górna korpusu, 2 – płyta dolna korpusu, 3 – łącznik, 4 – prowadnice z wałkami, 5 – suwak górny, 6 – przekładnia rolkowa, 7 – przekładnia łańcuchowa, 8 - motoreduktor, F_x i F_z – składowe styczna i promieniowa (rozporowa) siły walcowania

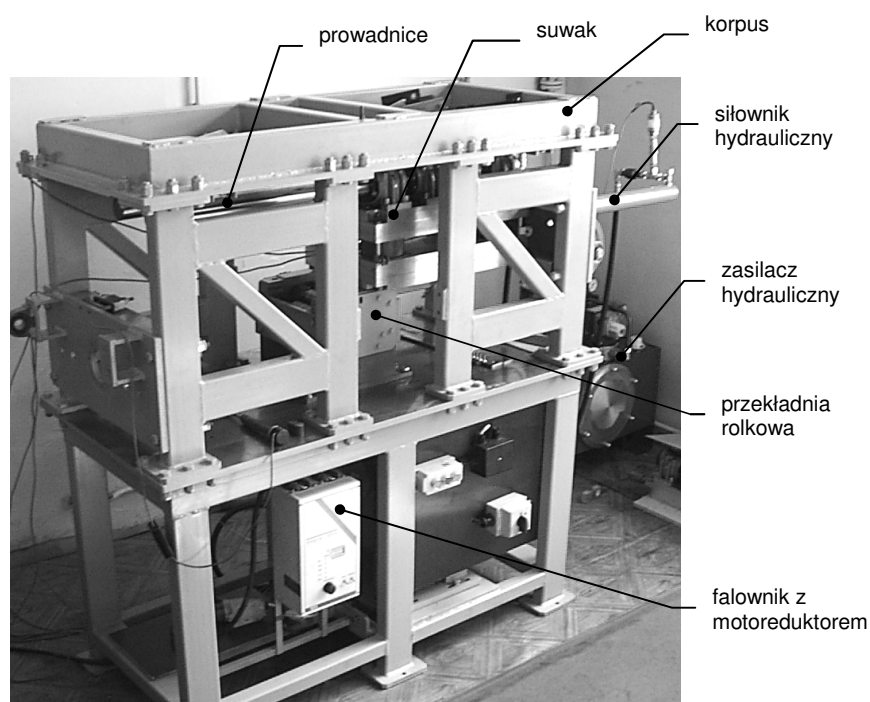
Fig. 2. Laboratory rolling mill without hydraulic system: 1 – top plate of frame, 2 – bottom plate of frame, 3 – connector, 4 – guides with shafts, 5 – top slide, 6 – forming rolls box, 7 – chain transmission, 8 – motoreducer, F_x and F_z – tangential and radial force

rycznego oraz badania doświadczalne, wykonane w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej.

2. STANOWISKO LABORATORYJNE DO BADANIA WKR

Badania doświadczalne WKR prowadzono w specjalnie do tego celu zaprojektowanej walcierce laboratoryjnej LUW-2. Rysunek walcarki (bez układu hydraulicznego) pokazano na rys. 2, na którym naniesiono również wymiary gabarytowe. Natomiast na rys. 3 pokazano zdjęcie walcarki LUW-2.

Walcarka LUW-2 składa się z korpusu, napędzanego suwaka górnego, przekładni rolkowej oraz układu napędowego. Konstrukcja walcarki umożliwia realizację procesów WKR przy siłach maksymalnych dochodzących do 200 kN. Suwak walcarki napędzany jest hydraulicznie, zaś przekładnia rolkowa napędzana jest mechanicznie przez przekładnię ślimakową i łańcuchową. Walcarka LUW-2 wyposażona została w specjalny cyfrowy układ pomiarowy pozwalający na rejestrację podstawowych parametrów kinematycznych i dynamicznych. Cechą charakterystyczną zastosowanego układu pomiarowego jest, że pomiary wszystkich parametrów odbywają się co 1 mm przesunięcia suwaka walcarki.



Rys. 3. Stanowisko laboratoryjne LUW-2 do walcowania klinowo-rolkowego

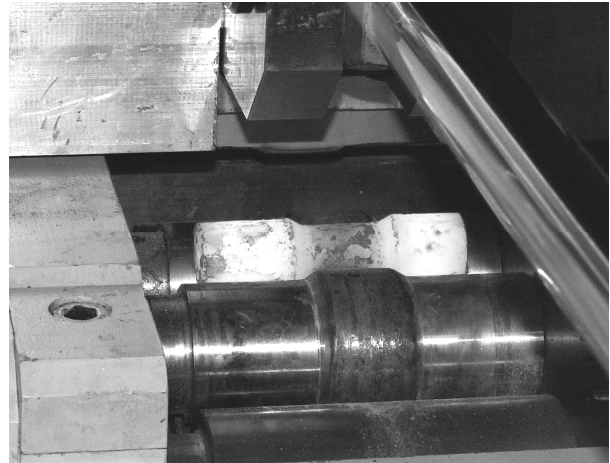
Fig. 3. Laboratory stand LUW-2 for wedge rolls rolling

Na potrzeby badań zaprojektowano szereg rolek kształtowych oraz klinów, z których niektóre pokazano na rys. 4. W trakcie badań walcowano odkuwki ze stali C45, które nagrzewano do temperatury 1150 °C (rys. 5). We wszystkich próbach na odkuwkach kształtowano pojedyncze przewężenie o długości $l = 25$ mm. W badaniach stosowano zarówno próbki wykonane z materiału pełnego jak i drażonego. Przykłady odkuwek odwalcowanych metodą WPK pokazano na rys. 6. Na uwagę zasługuje dobra jakość wykonania odkuwek, które praktycznie wolne są od wad powierzchniowych. Wykonane badania niszczące wykazały, że w przypadku walcowania z wsadów pełnych nie występuje naruszenie spójności wewnętrznej metalu. Ponadto, podczas walcowania z wsadów drażzonych występuje korzystny schemat płynięcia materiału, w efekcie którego w obszarze ukształtowanego przewężenia odkuwka posiada względnie stałą grubość ścianki.



Rys. 4. Niektóre z klinów stosowanych w badaniach eksperymentalnych procesów WKR na rolkach profilowych

Fig. 4. Some of wedges used in experimental research of WRR processes on profiled rolls



Rys. 5. Odkuwka ze stali C45 po walcowaniu na gorąco

Fig. 5. Hot rolled sample from C45 steel grade

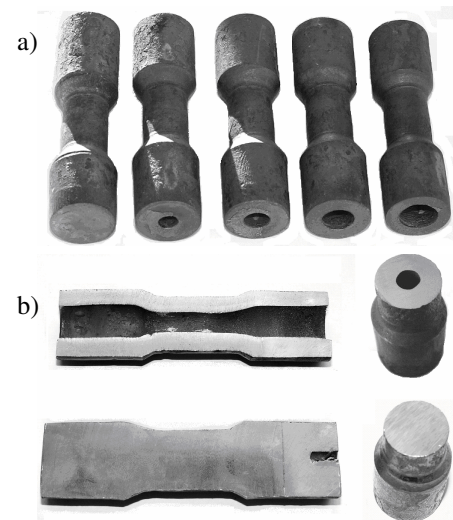


Fig. 6. Przykłady odkuwek otrzymanych metodą WKR: a) widok; b) przekroje wzdłużne i poprzeczne

Fig. 6. Examples of parts obtained by WRR method: a) view, b) longitudinal and cross sections

3. MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESU WKR

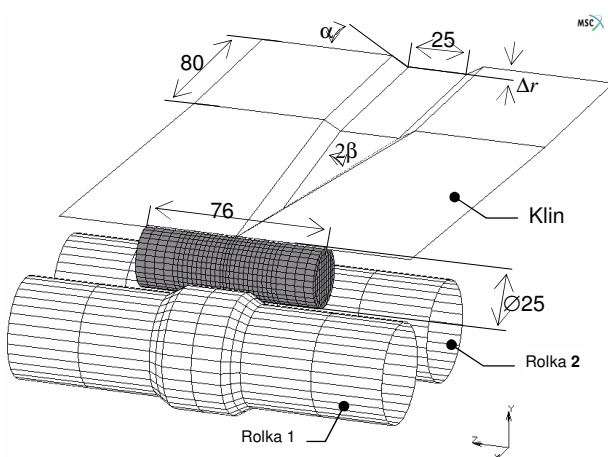
Do analizy procesu WKR rolkami profilowymi wykorzystano komercyjny pakiet oprogramowania MSC.SuperForm 2004, bazujący na przemieszczeniowej reprezentacji MES. W obliczeniach założono, że odkuwki walcowane są ze stali w gatunku C45, której model materiałowy przyjęto z biblioteki zastosowanego oprogramowania. Uwzględniając zmiany kierunku działania sił tarcia na powierzchni styku metal-narzędzie w obliczeniach korzy-

stano z modelu tarcia stałego, uzależnionego od prędkości poślizgu metalu względem narzędzia. Równocześnie przyjęto, że czynnik tarcia osiąga wartość graniczną $m = 1,0$, co jest zgodne z rezultatami prac [6, 7].

Mając na uwadze skrócenie czasu obliczeń w analizie numerycznej przyjęto następujące uproszczenia:

- narzędzia zachowują się jak ciała sztywne,
- temperatura materiału jest stała podczas kształtowania i wynosi $T = 1100^{\circ}\text{C}$,
- zaokrąglenia krawędzi narzędzi nie wywierają istotnego wpływu na przebieg kształtowania i można je pominąć.

Uwzględniając powyższe założenia na potrzeby analizy opracowano szereg modeli procesów WKR, z których jeden pokazano na rys. 7. W skład każdego z modeli wchodzi: cylindryczny wsad, klin przemieszczający się ruchem posuwistym z prędkością $0,12\text{ m/s}$ oraz dwie rolki, o średnicy maksymalnej wynoszącej 50 mm , obracające się w tym samym kierunku z prędkością kątową $\omega = 4,8\text{ rad/s}$. Pozostałe parametry procesu WKR zaznaczono na rys. 1. Podczas obliczeń zmieniono: kąt rozwarcia klina β (przyjmowano $\beta = 3^{\circ}, 5^{\circ}, 7^{\circ}, 9^{\circ}, 11^{\circ}$), kąt kształtujący α ($\alpha = 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}$) oraz gniot bezwzględny Δr ($\Delta r = 2, 3, 4, 5\text{ mm}$). Ogółem przeanalizowano 100 przypadków procesów WKR.



Rys. 7. Jeden z opracowanych modeli geometrycznych procesu WKR, wykorzystany w obliczeniach MES

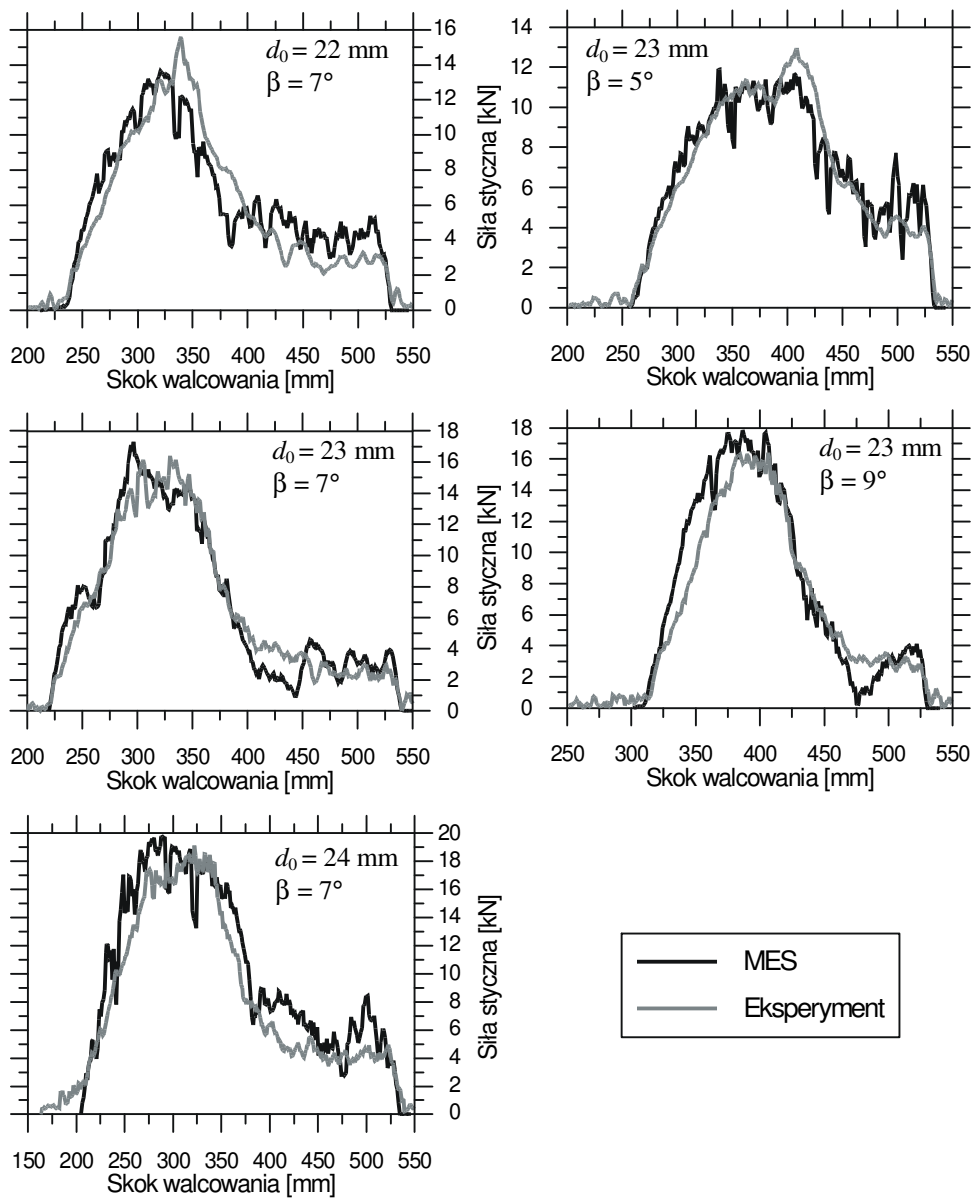
Fig. 7. One of geometrical model of WRR process applied in FEM analysis

Zatwierdzenie opracowanego modelu numerycznego nastąpiło po porównaniu rozkładu obliczonej siły stycznej F_x (odpowiadającej za wciskanie klina) z rozkładem zmierzonym. Schematyczne umiejscowienie sił stycznej F_x i promieniowej F_z w walcierce LUW-2 pokazano na rys. 2. Wykonane porównanie dotyczyło sił występujących w procesach WKR, które zrealizowano w warunkach laboratoryjnych Politechniki Lubelskiej. W procesach tych wsad nagrzewano do temperatury $T = 1150^{\circ}\text{C}$, klin poruszał się z prędkością $v = 0,12\text{ m/s}$, zaś rolki obracały się z prędkością obrotową $n = 36\text{ obr./min}$. Dla podwyższenia dokładności symulacji zatwierdzających przyjęto termomechaniczny model obliczeń, w którym uwzględniono zjawiska cieplne występujące w materiale podczas kształtowania.

Bazując na obliczeniach MES oraz wykonanych eksperymentach wyznaczono rozkłady siły stycznej F_x (wciskającej klin), w funkcji przemieszczenia klina, które pokazano na rys. 8. Analiza danych zamieszczonych na tym rysunku pokazuje doskonałą zgodność jakościową i ilościową pomiędzy przebiegami sił obliczonymi i zmierzonymi. Fakt ten stanowi potwierdzenie trafności założeń, przyjętych podczas opracowywania modelu numerycznego procesu WKR oraz jednoznacznie potwierdza przydatność MES w modelowaniu złożonych procesów kształtowania plastycznego metali.

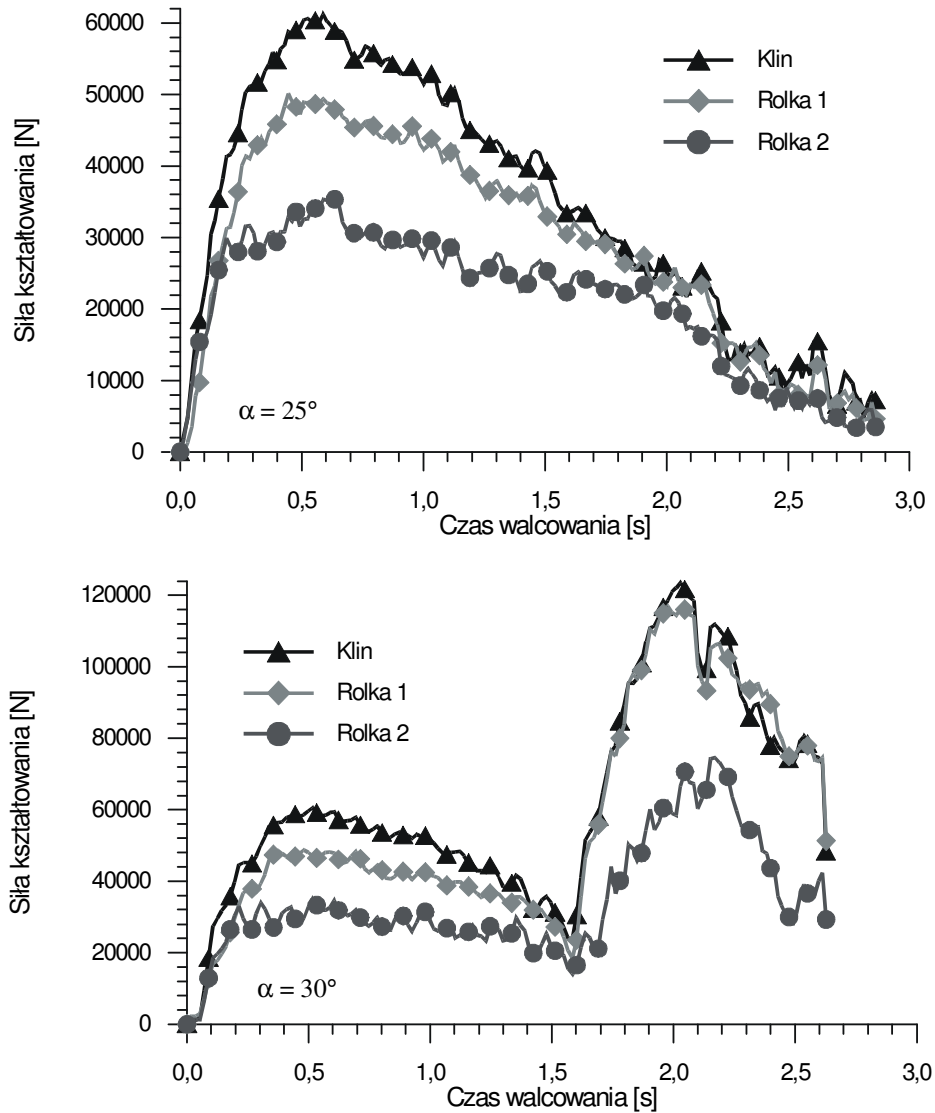
4. WYBRANE REZULTATY PRAC BADAWCZYCH

Wykonane analizy numeryczne dały pełną informację na temat sił występujących w procesach WKR. Stwierdzono, że w tym procesie kształtowania mogą wystąpić dwie typowe charakterystyki rozkładów sił, które pokazano na rys. 9. W pierwszej z nich siły osiągają wartości maksymalne wówczas, gdy klin wcina się w metal na wymaganą głębokość Δr – co ma miejsce na początku fazy kształtowania procesu WKR. Następnie siły stopniowo zmniejszają się i osiągają wartości minimalne w czasie kalibrowania.



Rys. 8. Porównanie sił stycznych (wciskających klin) obliczonych ze zmierzonymi w procesach WKR przy: $\alpha = 30^\circ$, $d = 19,3 \text{ mm}$

Fig. 8. Comparison of tangential forces (squeezing wedge), measured and calculated, in WRR processes at $\alpha = 30^\circ$, $d = 19.3 \text{ mm}$



Rys. 9. Rozkłady sił działających na poszczególne narzędzia w procesach WKR, przy: $\beta = 5^\circ$, $d_0 = 25$ mm, $\delta = 1,67$ oraz $\alpha = 25^\circ$ i $\alpha = 30^\circ$ podanych na rysunku

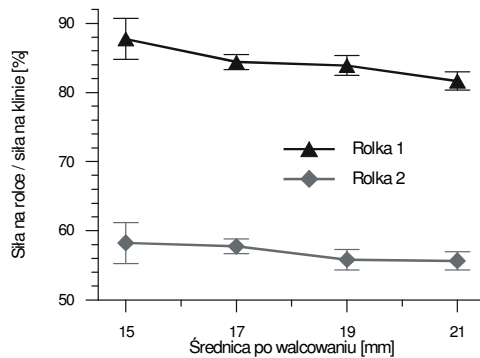
Fig. 9. The distributions of forces acting on respective tools in WRR process at: $\beta = 5^\circ$, $d_0 = 25$ mm, $\delta = 1.67$ and α shown in figure

W drugiej z odnotowanych charakterystyk, siły w początkowej fazie (w czasie wcinania klina i kształtowania) są zbliżone do tych, które odnotowano podczas walcowania przebiegającego zgodnie z charakterystyką pierwszą. Natomiast w dalszej fazie procesu (zwykle podczas przejścia do fazy kalibrowania) następuje gwałtowny wzrost sił kształtowania, które ulegają dopiero stopniowemu zmniejszaniu podczas kalibrowania.

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdza się, że występowaniu drugiej (niekorzystnej) charakterystyki rozkładu sił sprzyja stosowanie podczas WKR: mniejszych kątów

rozwarcia klina β , większych kątów kształtujących α oraz większych stopni gniotu δ .

Analiza wyników obliczeń wykazuje, że we wszystkich przypadkach największe siły występują na klinie, zaś najmniejsze na rolce 2 (oznaczenia zgodnie z rysunkiem 7). Siły na rolce 1 przyjmują wartości pośrednie. Ilościowej oceny wartości sił działających na poszczególne rolki dokonano poprzez porównanie ich do sił zarejestrowanych na klinie. Na rys. 10 zestawiono względne wartości sił działających na poszczególne rolki, w zależności od średnicy kształtowanego przewężenia.



Rys. 10. Porównanie sił działających na poszczególne rolki, w odniesieniu do siły na klinie, w procesach WKR realizowanych przy różnych d

Fig. 10. The distributions of forces acting on respective rolls (referred to wedge force) in WRR processes realized at different d

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że zmniejszenie średnicy przewężenia d (przy zachowanej średnicy wsadu d_0) powoduje nieznaczny spadek sił działających na rolki, w stosunku do siły na klinie. Ogólnie na podstawie obliczeń stwierdzono, że średnie wartości sił działających na rolkę 1 i 2 są równe odpowiednio 84,4% oraz 56,8% wartości siły działającej na klinie.

Na podstawie badań doświadczalnych uzyskano informację na temat sił występujących w procesach WKR odkuwek drażzonych. Szczególnie interesujące okazało się określenie wpływu grubości ścianki wsadu g_0 na przebieg kształtowania. Podczas prób walcowaniu poddawano tuleje o średnicy zewnętrznej $d_0 = 25$ mm oraz średnicach wewnętrznych d_n równych: $\varnothing 7,5$ mm, $\varnothing 10,0$ mm, $\varnothing 12,5$ mm i $\varnothing 15$ mm. Próbkę tę przewężano na jednakową średnicę $d = 17,2$ mm. W efekcie badań stwierdzono, że metodą WKR można kształtować odkuwki z wsadów, których grubość ścianki wynosi zaledwie $0,2 d_0$ – co jest nieosiągalne w przypadku najbardziej rozpowszechnionych dwunarzędziowych metod WPK [8].

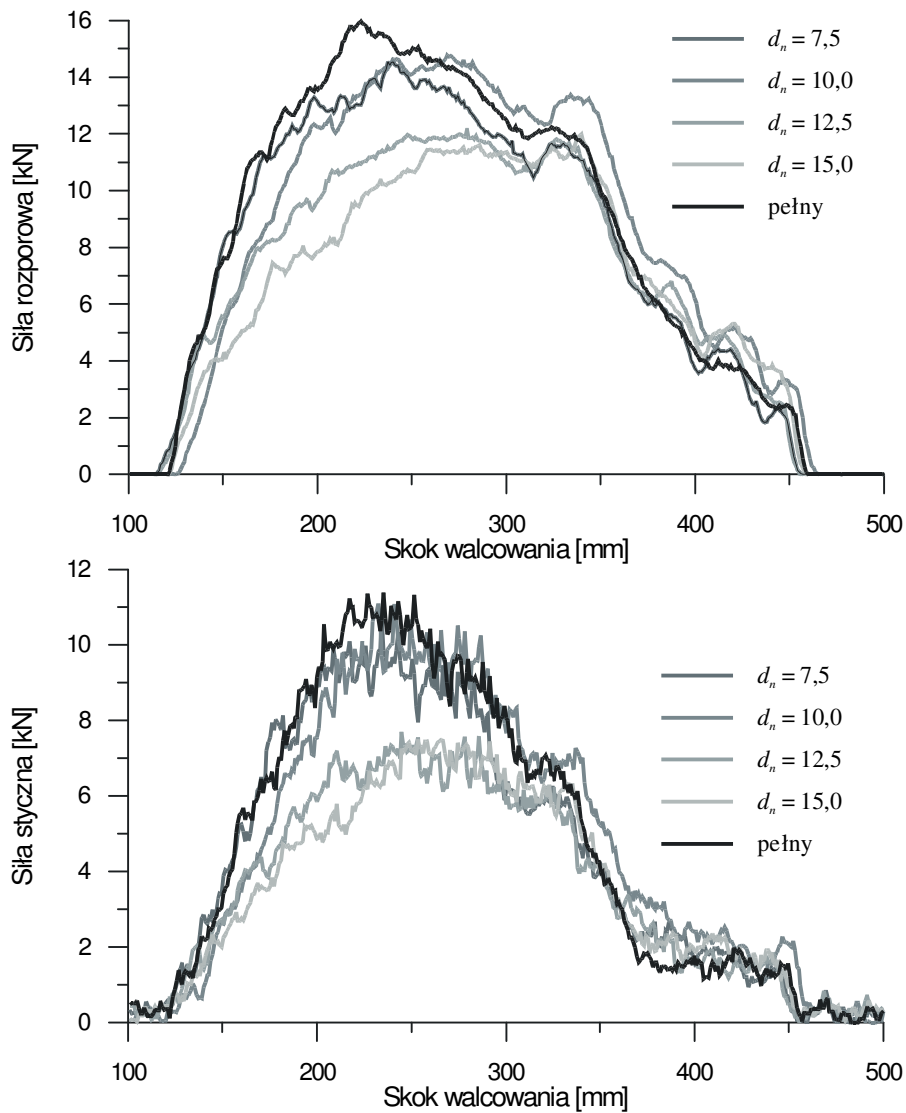
Na rys. 11 i 12 zamieszczono zmierzone rozkłady sił rozporowych F_z (prostopadłych do płaszczyzny przechodzącej przez osie rolek) i stycznych F_x (wciskających klin) działających na klin, w procesach WKR odkuwek drażzonych. Zgodnie z oczekiwaniami (podczas WKR przy $\beta = 5^\circ$ – rys. 11) zwiększenie gru-

bości ścianki wsadu prowadzi do wzrostu siły kształtowania, która jest największa dla wsadu pełnego. Prawdopodobnie ta traci na ważności wraz ze zwiększeniem kąta β . Mianowicie już podczas walcowania narzędziem z $\beta = 7^\circ$ (rys. 12) większe siły niż w trakcie walcowania z wsadu pełnego występują przy kształtowaniu z tulei o średnicy wewnętrznej równej $\varnothing 7,5$ mm oraz $\varnothing 10$ mm. Fakt ten jest następstwem zwiększenia prędkości wcinania się klina w materiał (w efekcie zwiększenia kąta β), co prowadzi do większego zniekształcenia (zgniecenia) przekroju poprzecznego tulei, niż ma to miejsce podczas walcowania z wsadu pełnego. Powstające zniekształcenie zwiększa opory ruchu obrotowego odkuwki doprowadzając do wzrostu sił kształtowania oraz zmniejszenia dokładności wykonania odkuwki. Zatem w procesach WKR odkuwek drażzonych należy przyjmować relatywnie mniejsze kąty rozwarcia klina β , niż w procesach kształtowania wałków pełnych.

5. PODSUMOWANIE

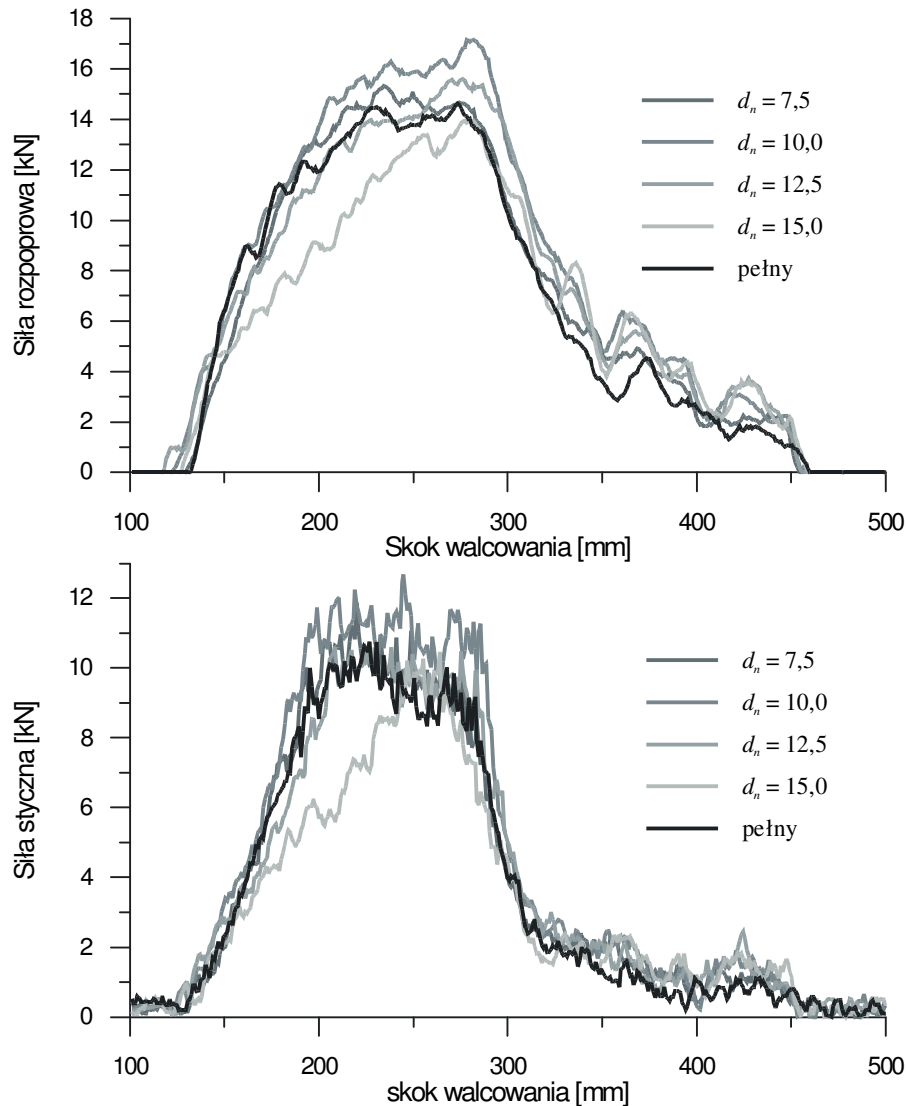
W artykule scharakteryzowano problematykę sił występujących w procesach WKR, w których stosuje się tylko jeden klin kształtujący oraz dwie rolki kształtowe. W badaniach wykorzystano modelowanie numeryczne (bazujące na metodzie elementów skończonych) oraz prototypową walcarkę LUW-2. W próbach laboratoryjnych kształtowano na gorąco odkuwki, pełne i drażone, ze stali w gatunku C45. Na podstawie badań stwierdzono, że największe siły występują na klinie, zaś najmniejsze na rolce 2 (zgodnie z rys. 1). Wykazano również, że nietrafny dobór parametrów narzędzi (w szczególności kąta kształtującego α i rozwarcia klina β) może prowadzić do prawie dwukrotnego wzrostu sił kształtowania w procesie WKR. Ponadto, zauważono, że zwiększenie kąta β podczas walcowania odkuwek drażzonych przyczynia się do zwiększenia sił oraz zmniejszenia dokładności wykonania odkuwek.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2006 jako projekt badawczy Nr 4 T08B 017 24.



Rys. 11. Rozkłady sił na klinie, zmierzone w procesach WKR odkuwek ze stali 45 przy:
 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 5^\circ$, $d_0 = 25$ mm, $d = 17,2$ mm

Fig. 11. Distribution of wedge force measured in WRR processes of C45 steel parts at:
 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 5^\circ$, $d_0 = 25$ mm, $d = 17.2$ mm



Rys. 12. Rozkłady sił na klinie, zmierzone w procesach WKR odkuwek ze stali 45 przy:
 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $d_0 = 25$ mm, $d = 17,2$ mm

Fig. 12. Distribution of wedge force measured in WRR processes of C45 steel parts at:
 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $d_0 = 25$ mm, $d = 17.2$ mm

LITERATURA

- [1] Pater Z.: Nowa technologia kształtowania metali: Walcowanie klinowo-rolkowe. Rudy i Metale Nieżelazne 2003, Nr 10-11, s. 483-485
- [2] Pater Z.: Analiza porównawcza schematów walcowania klinowo-rolkowego. Obróbka Plastyczna Metali Nr 5, 2004, s. 13-23
- [3] Pater Z.: The analysis of the strain in parts formed by means of the wedge-rolls rolling (WRR). Archives of Metallurgy and Materials Vol. 50, 2005 Issue 3, s. 675-690
- [4] Pater Z.: Analiza teoretyczna walcowania klinowo-rolkowego odkuwki typu sworzeń kulisty. W: *Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali. Monografia 2004.* Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s. 43-65
- [5] Gontarz A., Pater Z., Weroński W.: Siły w procesie walcowania poprzeczno-klinowego klinami płaskimi, *Obróbka Plastyczna Metali*, 2001, Nr 4, s. 17-23
- [6] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzeczno-klinowego, Wyd. LTN, Lublin 2001 s. 1-234
- [7] Gontarz A., Łukasik K., Pater Z., Weroński W.: Technologia kształtowania i modelowanie nowego procesu wytwarzania wkrętów szynowych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003, s. 1-329
- [8] Bartnicki J., Pater Z.: Walcowanie poprzeczno-klinowe wyrobów drążonych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005, s. 1-160