

# Application of the cross-wedge rolling process to the manufacture of preforms for elongated forgings

## Zastosowanie procesu walcowania poprzeczno-klinowego do wytwarzania przedkuwek na odkuwki wydłużone

ZBIGNIEW PATER\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.3.7>

The article presents two examples of the use of the cross-wedge rolling process (CWR) to form preforms into forgings for the mining industry. A novelty in the discussed rolling processes was the use of flanges, which were used to form the tapered ends of preforms. The correctness of the solutions was verified by numerical simulations using the Forge® programme. Workpiece shape progressions are presented for both rolling and drop forging. Fields of temperature, effective strain and damage function in rolled preforms are also presented. Furthermore, it is shown how radial force and torque change during rolling.

**KEYWORDS:** cross-wedge rolling, CWR, preform, FEM

W artykule opisano dwa przykłady zastosowania procesu walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) do kształtowania przedkuwek na odkuwki dla górnictwa. Nowością w tych procesach walcowania było zastosowanie listew oporowych, za pomocą których formowano zakończenia stożkowe przedkuwek. Poprawność prezentowanych rozwiązań zweryfikowano w symulacjach numerycznych, które wykonano w programie Forge®. Przedstawiono progresje kształtu przedmiotu obrabianego zarówno podczas walcowania, jak i kucia matrycowego. Zaprezentowano także mapy temperatury, intensywności odkształcenia i funkcji zniszczenia w przedkuwkach walcowanych. Ponadto pokazano, jak podczas walcowania zmieniają się siła rozporowa i moment obrotowy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** walcowanie poprzeczno-klinowe, WPK, przedkuwka, MES

### Wprowadzenie

W kuciu matrycowym stawia się obecnie na prasy kuźnicze, a nie na młoty. Dzieje się tak dlatego, że podczas kucia na młotach powstają hałas i drgania, szkodliwe zarówno dla środowiska naturalnego, jak i zdrowia pracowników [1]. Jednak na prasach nie można wykonać zabiegu wydłużania, który jest niezbędny podczas kucia odkuwek długich, charakteryzujących się dużą zmiennością przekroju poprzecznego. Z tego powodu w gniazdach pras instaluje się maszyny pomocnicze do wykonania przedkuwek, stanowiących wsad do kucia matrycowego. Najczęściej takimi maszynami pomocniczymi są walcarki kuźnicze wzdłużne. Większą dokładność wykonania przedkuwek można uzyskać w procesie walcowania poprzeczno-klinowego (WPK), które w naszym kraju nie jest jednak zbyt popularne.

Proces WPK jest wykorzystywany do walcowania stopniowanych osi i wałków. Maksymalna średnica wytwarzanych części wynosi  $\varnothing 200$  mm, podczas gdy ich długość może dochodzić do 1300 mm [2, 3]. Metodą tą można więc wykonać większość przedkuwek na odkuwki wydłużone kute matrycowo. Obecnie zainteresowanie procesem WPK wyraża wiele kuźni krajowych, co jest niewątpliwie następstwem pojawienia się polskiego producenta walcarek do WPK.

W tym artykule przedstawiono przykłady kształtowania metodą WPK dwóch przedkuwek, aby przybliżyć Czytelnikom tę metodę walcowania. Nowością wobec rozwiązania klasycznego jest zastosowanie listew oporowych, które służą do uformowania stożków na końcach przedkuwki. Ze względów ekonomicznych ograniczono się przy tym wyłącznie do symulacji numerycznych tych przypadków kształtowania, które wykonano w programie Forge®. Program ten był w przeszłości wielokrotnie wykorzystywany do analizy procesów walcowania poprzecznego i skośnego, a uzyskiwane wyniki pozostawały w dobrej zgodności z rezultatami weryfikujących je badań doświadczalnych [4–10].

### Odkuwka łubki

Na rys. 1a pokazano odkuwkę łubki wytwarzaną w jednej z krajowych kuźni. Podano również jej gabaryty. Korzystając ze znanej metody – opisaną np. w [1] – bazującej na równości przekroju poprzecznego przedkuwki (będącej bryłą osiowosymetryczną)

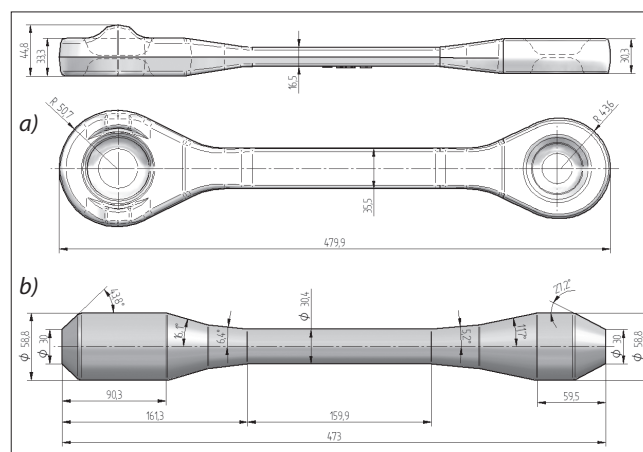


Fig. 1. The lever forging (a) and the preform used to make it (b)  
Rys. 1. Odkuwka łubki (a) oraz przedkuwka służąca do jej wykonania (b)

\* Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater – z.pater@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5504-157X> – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin, Polska

i odkuwki powiększonej o naddatek na wypływkę, zaprojektowano przedkawkę rzeczywistą, pokazaną na rys. 1b. Przedkawka ta ma klasyczny kształt z dwiema głowami połączonymi trzonem.

Na rys. 2 przedstawiono narzędzie klinowe zabezpieczające proces walcowania przedkawki. Zdecydowano się przy tym na metodę walcowania dwoma walcami, gdyż walcarki tej konstrukcji są najbardziej popularne. Główną część narzędzia stanowi klin nawinięty na oprawę o promieniu zewnętrznym  $R = 375$  mm. Oprawa jest montowana na becze walca o średnicy  $\varnothing 650$  mm. Klin jest charakteryzowany przez kąt rozwarcia  $\beta$  (równy  $6,2^\circ$  lub  $7,1^\circ$ ) oraz kąt kształtujący  $\alpha$  wynoszący  $20^\circ$ . W końcowej części narzędzia klinowego umieszczono listwy oporowe, których powierzchnie kształtujące są nachylone do oprawy pod kątem wynikającym z zakończenia stożkowego przedkawki. Bardziej szczegółowe informacje na temat projektowania narzędzi do WPK można znaleźć w [3].

Do ukształtowania przedkawki potrzebne są dwa identyczne narzędzia klinowe rozmieszczone jak na modelu wykorzystanym w symulacji, który pokazano na rys. 3. Dodatkowo należy zastosować dwie listwy prowadzące, które zabezpieczą obrabiany przedmiot przed wypadnięciem ze strefy kształtowania. Oczywiście potrzebny jest też wsad w postaci odcinka pręta o wymiarach  $\varnothing 58 \times 257$  mm.

W wykonanej symulacji numerycznej procesu walcowania założono, że walce obracają się w tym samym kierunku z prędkością  $n = 10$  obr/min. Wsad wykonany ze stali w gatunku C45, której model materiałowy przyjęto z biblioteki zastosowanego oprogramowania, przed walcowaniem jest nagrzewany do temperatury  $1180^\circ\text{C}$ . Narzędzia w trakcie kształtowania mają stałą temperaturę  $200^\circ\text{C}$ . Wymiana ciepła między narzędziami a obrabianym przedmiotem jest warunkowana przez współczynnik wymiany

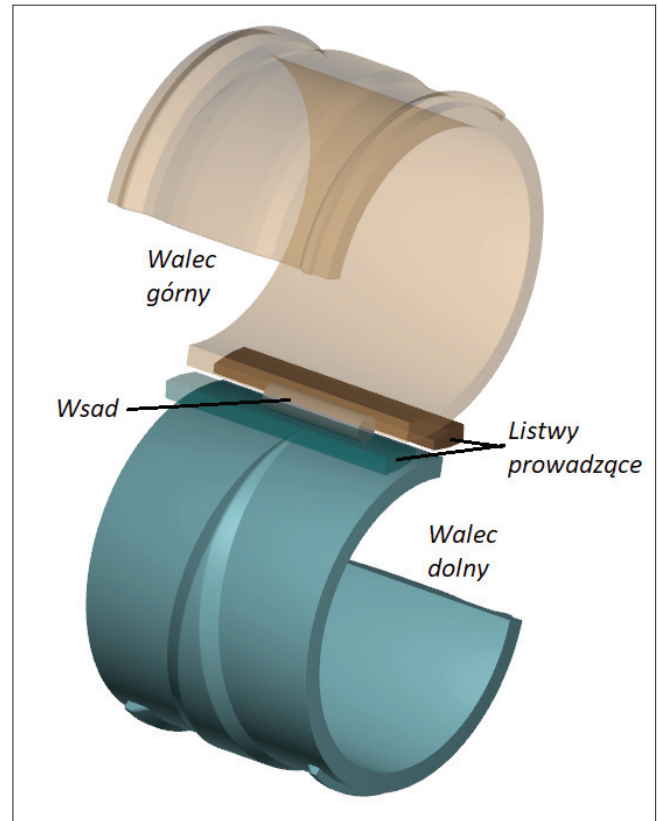


Fig. 3. Geometrical model of the CWR process of the lever preform  
Rys. 3. Model geometryczny procesu WPK przedkawki łubki

ciepła równy  $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Tarcie na powierzchniach kontaktu jest określone modelem Treski, w którym czynnik tarcia jest równy  $0,9$ .

Przyjmując podane parametry procesu WPK, wykonano symulacje procesu kształtowania przedkawki łubki, którego przebieg zilustrowano na rys. 4. Dodatkowo na rysunku pokazano, jak zmienia się temperatura materiału obrabianego przedmiotu podczas

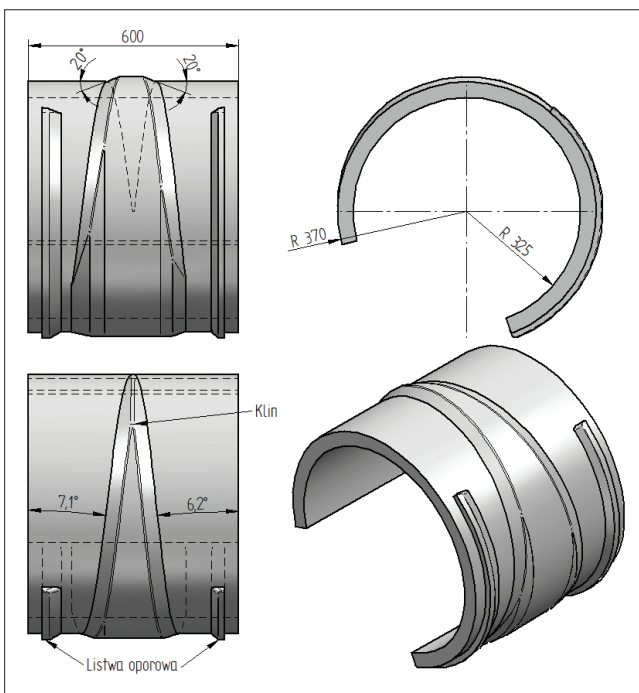


Fig. 2. Wedge tool for rolling a lever preform  
Rys. 2. Narzędzie klinowe do walcowania przedkawki łubki

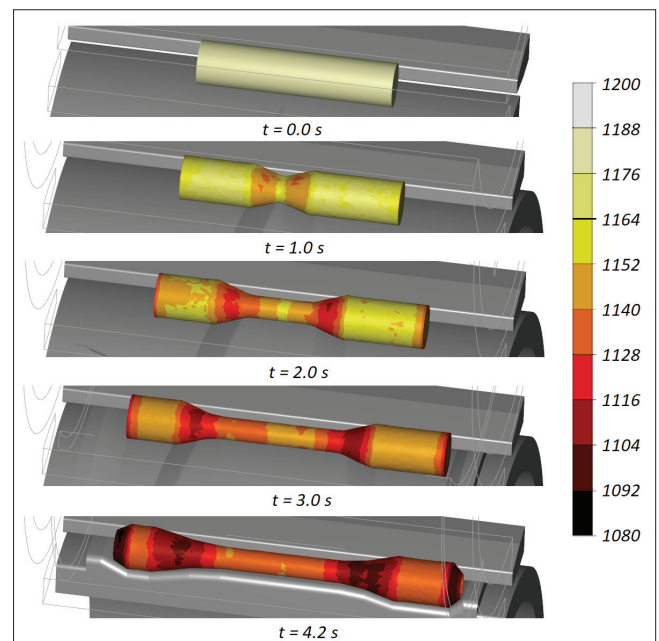


Fig. 4. Shape progression of the workpiece with marked temperature distribution  $[\text{C}^\circ]$  in the CWR process of the lever preform  
Rys. 4. Progresa kształtu przedmiotu obrabianego z zaznaczonym rozkładem temperatury  $[\text{C}^\circ]$  w procesie WPK przedkawki łubki

walcowania. Dla polepszenia widoczności rysunku ukryto górny walec oraz przednią prowadnicę.

Na początku procesu kliny wciskają się w części środkowej wsadu, kształtując pierścieniowy rowek, który jest następnie rozszerzany na wymaganą szerokość, w efekcie czego powstaje trzon przedkuwki o średnicy  $\varnothing 30,4$  mm. Zatem redukcja przekroju poprzecznego wynikająca ze zmiany średnicy ( $\varnothing 58,8$  mm  $\rightarrow$   $\varnothing 30,4$  mm) wynosi aż  $\Delta A = 73,3\%$ . W końcowej fazie walcowania końce obrabianego przedmiotu są dociskane do listew oporowych i kształtowane są zakończenia stożkowe przedkuwki, która ostatecznie uzyskuje zakładany kształt.

Zgodnie z rys. 4 zmiany temperatury obrabianego przedmiotu nie są duże. Największe spadki temperatury, sięgające  $100^\circ\text{C}$ , odnotowano na powierzchniach stożkowych walcowanych pod koniec procesu. Tak niewielkie zmniejszenie temperatury materiału pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania wynika z generowania dużych ilości ciepła z powodu zamiany na nie pracy tarcia oraz pracy odkształcenia plastycznego. Symulacja pokazuje, że przedkuwka może być poddana kuciu bez dogrzewania międzyoperacyjnego.

Na rys. 5 przedstawiono rozkład intensywności odkształcenia w przedkuwce walcowanej. Odkształcenia w trzonie przedkuwki układają się pierścieniowo (warstwowo), przyjmując największe wartości w strefie przypowierzchniowej, co jest skutkiem intensywnego płynięcia materiału w kierunku obwodowym, wywołanego działaniem sił tarcia. Taki rozkład intensywności odkształcenia jest charakterystyczny dla procesów WPK [2].

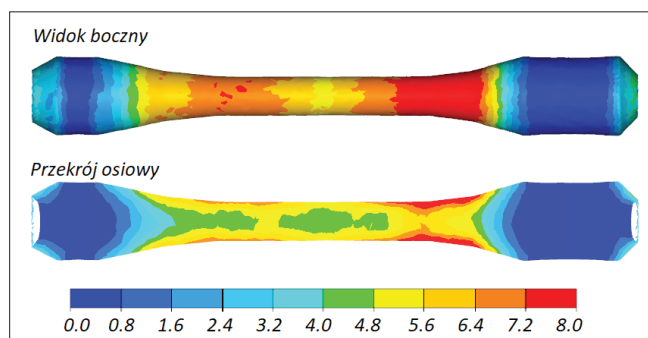


Fig. 5. Distribution of effective strain in the lever preform obtained by the CWR process

Rys. 5. Rozkład intensywności odkształcenia w przedkuwce łubki otrzymanej w procesie WPK

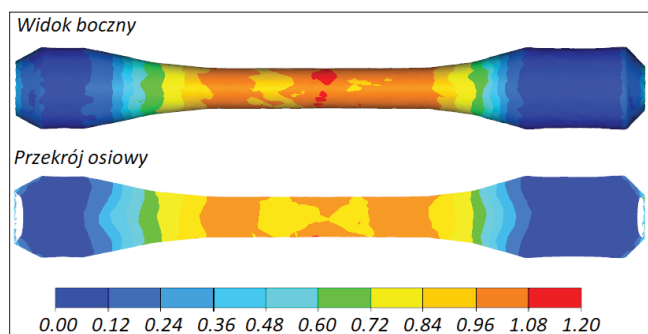


Fig. 6. Damage function distributions (according to the Cockcroft-Latham criterion) in the lever preform obtained by the CWR process  
Rys. 6. Rozkłady funkcji zniszczenia (wg kryterium Cockcrofta-Lathama) w przedkuwce łubki otrzymanej w procesie WPK

Zasadniczym ograniczeniem analizowanego procesu walcowania jest możliwość powstawania pęknięć wewnętrznych w strefie osiowej obrabianego przedmiotu, będących następstwem wystąpienia tzw. efektu Mannesmanna. O możliwości powstania pęknięcia w walcowanym wyrobie przesądza się na bazie analizy funkcji zniszczenia, której wartość nie może być większa od wartości krytycznej wyznaczonej eksperymentalnie w próbach kalibracji. Na rys. 6 pokazano rozkłady funkcji zniszczenia w badanej przedkuwce obliczone z zastosowaniem popularnego, znormalizowanego kryterium Cockcrofta-Lathama [11]. Największe wartości funkcja zniszczenia przyjmuje w trzonie korbowodu. Wynoszą one ok. 1,2. Na podstawie danych przedstawionych w opracowaniu [12] można ustalić, że wartość krytyczna funkcji zniszczenia dla stali w gatunku C45 kształtowanej w temperaturze  $950^\circ\text{C}$  wynosi 1,8; a w temperaturze  $1050^\circ\text{C}$  – aż 2,8. Daje to podstawę, by stwierdzić, że w analizowanym przypadku walcowania nie ma niebezpieczeństwa powstania pęknięcia wewnętrznego.

Dzięki MES można wyznaczyć parametry siłowe procesu WPK, takie jak siła promieniowa (rozporowa) oraz moment obrotowy na walcu, które dla rozważanego przypadku walcowania przedstawiono na rys. 7. Analiza danych zamieszczonych na rysunku pokazuje, że oba te parametry utrzymują stałą wartość w trakcie kształtowania przewężenia (trzonu) przedkuwki i ulegają zwiększeniu (o ok. 70%) w końcowej fazie kształtowania, gdy na obrabiany przedmiot oddziałują listwy oporowe. Zatem można przyjąć, że ograniczenie swobody płynięcia materiału w kierunku osiowym skutkuje gwałtownym wzrostem parametrów siłowych.

Ostatecznym sprawdzeniem poprawności przyjęcia kształtu przedkuwki było wykonanie symulacji kucia matrycowego na prasie kuźniczej odkuwki łubki. Kucie przeprowadzono w dwóch operacjach, tj. spłaszczania oraz matrycowania. Kształt przedmiotu obrabianego po każdej z tych operacji przedstawiono

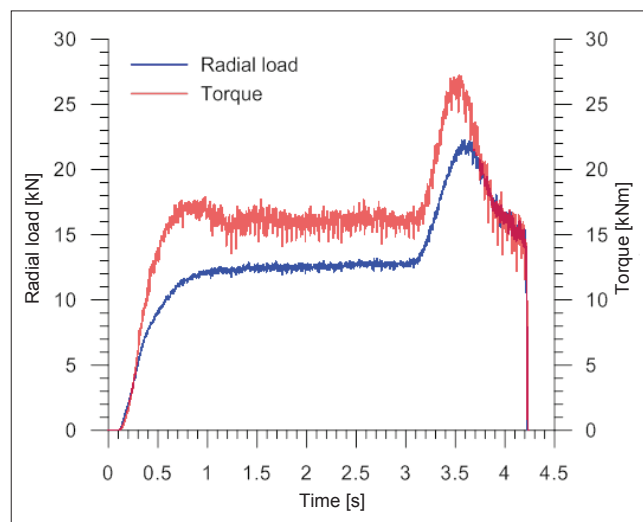


Fig. 7. Distribution of radial force and torque on the roll during the CWR process of the lever preform

Rys. 7. Rozkład siły rozporowej (promieniowej) i momentu obrotowego na walcu w procesie WPK przedkuwki łubki



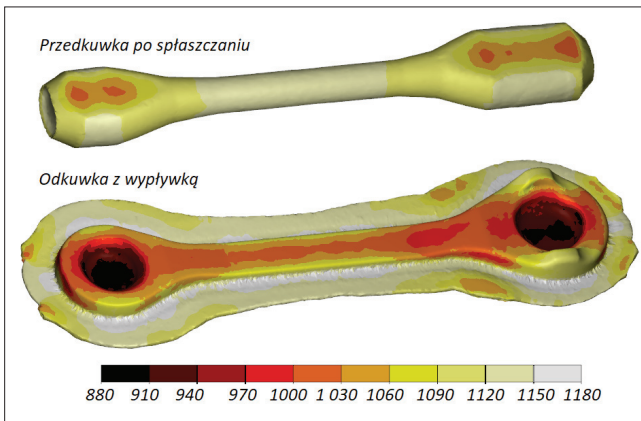


Fig. 8. Simulation results of the drop forging process of a pre-rolled lever forging, with the temperature distribution [°C]

Rys. 8. Wyniki symulacji procesu kucia matrycowego odkuwki łubki z przedkuwki walcowanej, z zaznaczonym rozkładem temperatury [°C]

na rys. 8. Uzyskano odkuwkę o prawidłowym kształcie, z równomiernie rozłożoną wypływką, co potwierdza prawidłowość przeprowadzonych prac projektowych.

### Odkuwka pałaka

Drugim rozważanym wyrobem była odkuwka pałaka, którą w wersji rozwiniętej (przed gięciem) pokazano na rys. 9a. Dodatkowo na rys. 9b przedstawiono przedkuwkę służącą do wykonania odkuwki pałaka, która odznacza się symetrycznym kształtem. Przedkuwka ta ma dwie identyczne głowy o średnicy  $\varnothing 71$  mm połączone trzonem o średnicy  $\varnothing 42$  mm.

Na rys. 10 przedstawiono narzędzie klinowe do walcowania przedkuwki pałaka. Narzędzie to jest montowane na identycznej beczce walca (o średnicy  $\varnothing 650$  mm) jak w poprzednio omawianym przypadku, co oznacza, że obie analizowane przedkuwki mogą być wytwarzane w oparciu o tę samą walcarkę. Klin do walcowania jest charakteryzowany przez dwa podstawowe kąty, tj. kąt kształtujący  $\alpha = 19^\circ$  oraz kąt rozwarcia  $\beta = 9,4^\circ$ . Natomiast listwy oporowe mają ścianę boczną nachyloną pod kątem  $30^\circ$  do osi walca.

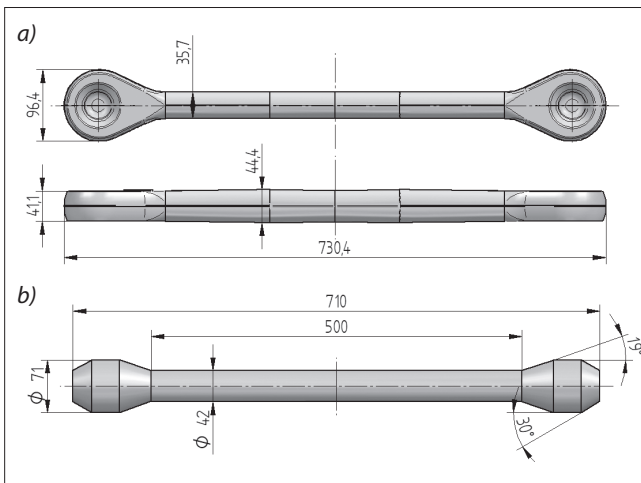


Fig. 9. The shackle forging before the bending operation (a) and the preform used to make it (b)

Rys. 9. Odkuwka pałaka przed operacją gięcia (a) oraz przedkuwka służąca do jej wykonania (b)

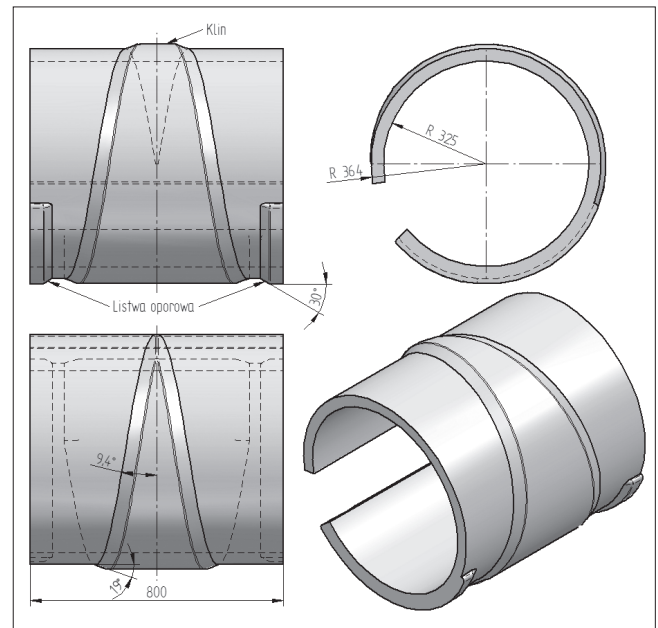


Fig. 10. Wedge tool for rolling a shackle preform

Rys. 10. Narzędzie klinowe do walcowania przedkuwki pałaka

Model geometryczny procesu WPK przedkuwki pałaka przedstawiono na rys. 11. Wsad wykorzystany w tym przypadku miał wymiary  $\varnothing 71 \times 332,5$  mm. Korzystając z tego modelu, wykonano symulację walcowania przedkuwki pałaka, w której przyjęto identyczne parametry jak w poprzednio analizowanym przypadku kształtowania.

Przebieg procesu walcowania przedkuwki zaprezentowany na rys. 12 pokazuje, że uzyskiwany jest wyrób o zakładanym kształcie. Trzon przedkuwki walcowany przy  $\Delta A = 65\%$  jest równy i wolny od jakichkolwiek wad powierzchniowych. Również zakończenie stożkowe końców przedkuwki jest prawidłowo

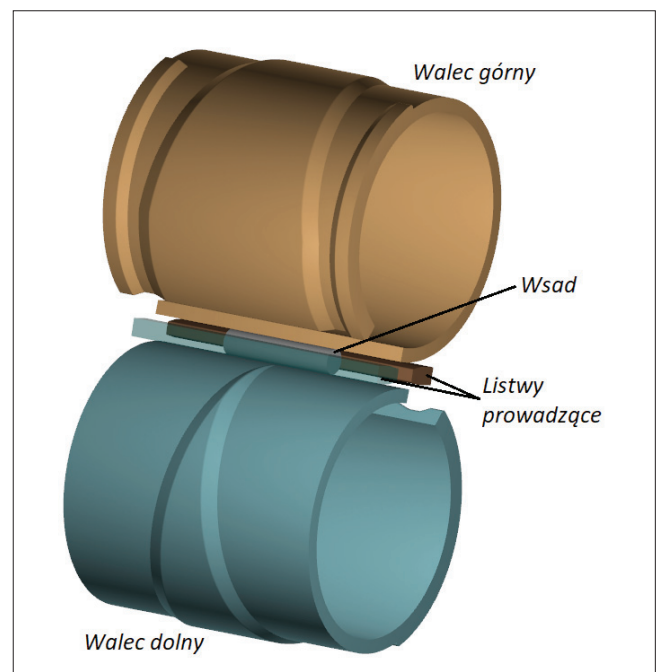


Fig. 11. Geometrical model of the CWR process of the shackle preform

Rys. 11. Model geometryczny procesu WPK przedkuwki pałaka

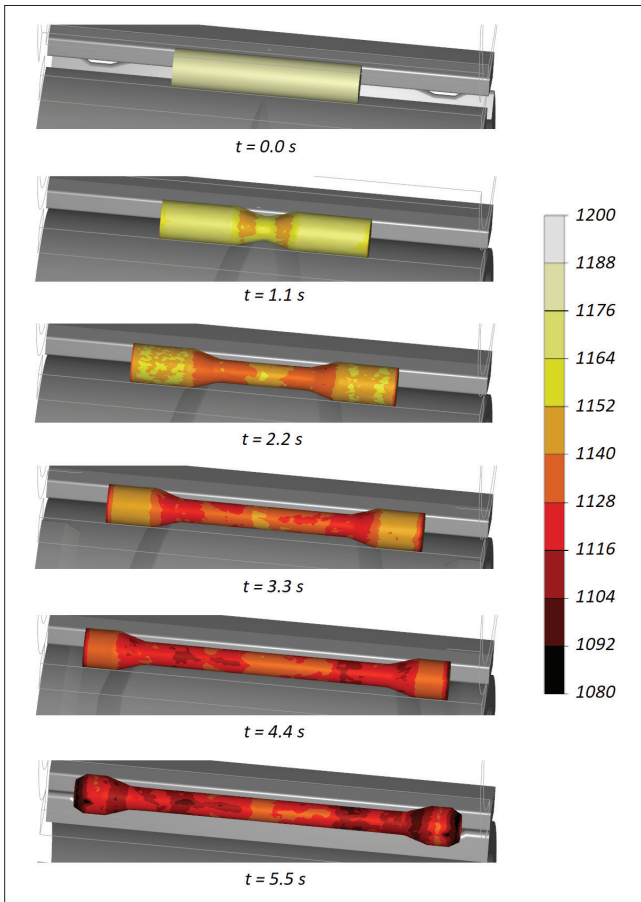


Fig. 12. Shape progression of the shackle preform during the CWR process, with temperature distribution marked [°C]

Rys. 12. Progresa kształtu przedkuwki pałąka w procesie WPK z zaznaczonym rozkładem temperatury [°C]

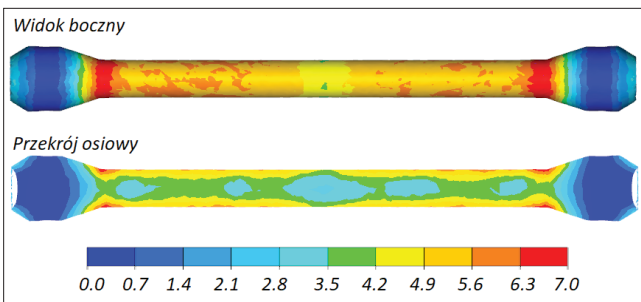


Fig. 13. Distribution of effective strain in the shackle preform obtained by the CWR process

Rys. 13. Rozkład intensywności odkształcenia w przedkuwce pałąka otrzymanej w procesie WPK

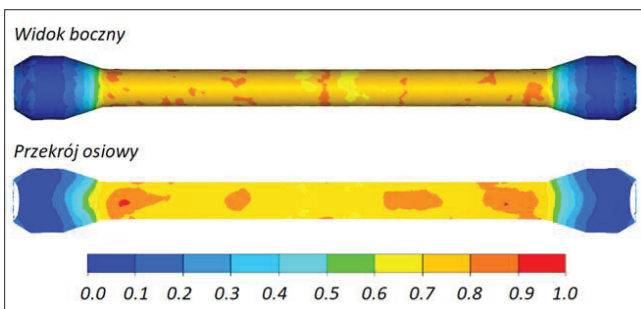


Fig. 14. Distribution of the damage function (determined according to the Cockcroft-Latham criterion) in the shackle preform obtained by the CWR process

Rys. 14. Rozkład funkcji zniszczenia (wyznaczonej zgodnie z kryterium Cockrofta-Lathama) w przedkuwce pałąka otrzymanej w procesie WPK

wykonane. Temperatura przedkuwki po walcowaniu umożliwia poddanie jej dalszej przeróbce plastycznej bez konieczności dogrzewania.

Na kolejnych rys. 13 i 14 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia oraz funkcji zniszczenia w przedkuwce pałąka otrzymanej w procesie WPK. Jakościowo prezentowane rozkłady są zgodne z wyznaczonymi dla przedkuwki łubki. Odkształcenia są rozłożone pierścieniowo, a maksymalne wartości funkcji zniszczenia są dużo mniejsze od wartości krytycznych. Zatem również w tym procesie WPK nie występuje niebezpieczeństwo pęknięcia materiału w trzonie przedkuwki.

Rozkłady parametrów siłowych (siły rozporowej i momentu obrotowego) w procesie WPK przedkuwki pałąka zaprezentowane na rys. 15 są podobne jak w poprzednio analizowanym przypadku. Charakterystyczna jest względnie stała wartość podczas kształtowania trzonu i lokalny wzrost powodowany oddziaływaniem listew oporowych. Jednakże wzrost wartości tych parametrów jest mniejszy (wynosi ok. 40%), co jest związane z mniejszym rozmiarem stożkowego zakończenia przedkuwki. Ponadto zauważono, że walcowanie przedkuwki pałąka przebiega przy większych parametrach siłowych, co z kolei wynika z większych rozmiarów obrabianego przedmiotu.

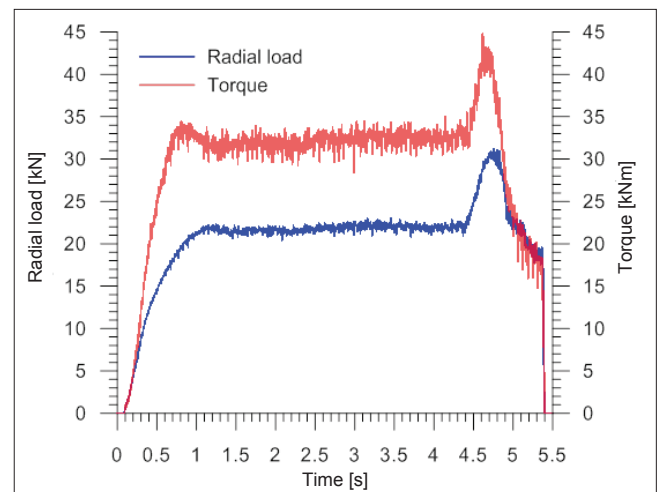


Fig. 15. Distribution of radial force and torque on the roll in the CWR process of the shackle preform

Rys. 15. Rozkład siły rozporowej (promieniowej) i momentu obrotowego na walcu w procesie WPK przedkuwki pałąka

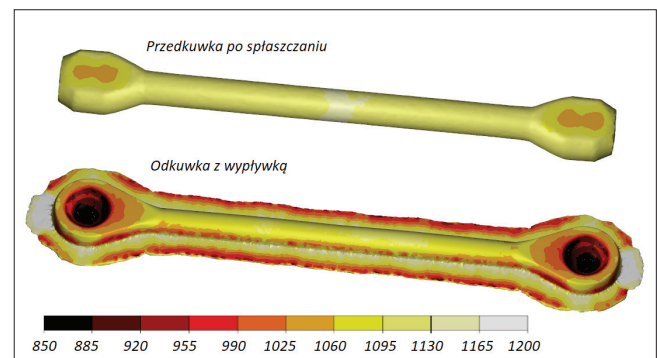


Fig. 16. Simulation results of the drop forging process of a pre-rolled shackle forging, with the temperature distribution marked [°C]

Rys. 16. Wyniki symulacji procesu kucia matrycowego odkuwki pałąka z przedkuwki walcowanej z zaznaczonym rozkładem temperatury [°C]

Również w tym przypadku kształtowania ostatecznym potwierdzeniem poprawności przyjętej konstrukcji przedkuwki była symulacja procesu kucia matrycowego. Zgodnie z rys. 16 zastosowanie przedkuwki w wersji walcowanej pozwala na uzyskanie odkuwki przy stosunkowo niewielkim naddatku materiału idącego w wpływkę.

## Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki symulacji kształtowania dwóch odkuwek wytwarzanych w jednej z krajowych kuźni. Na podstawie zrealizowanych prac badawczych sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Metodą WPK można skutecznie wytwarzać przedkuwki przeznaczone do kucia odkuwek wydłużonych.
- Zastosowanie listew oporowych pozwala na ukształtowanie stożków na końcach przedkuwek.
- Przedkuwki kształtowane metodą WPK są wolne od wad powierzchniowych i pęknięć wewnętrznych.
- Temperatura przedkuwki po walcowaniu jest wystarczająca do przeprowadzenia operacji kucia matrycowego.
- Największe siły i momenty walcowania występują podczas kształtowania zakończeń stożkowych przez listwy oporowe.

## LITERATURA

- [1] Wasiuń P. „Kucie matrycowe”. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne (1987).
- [2] Pater Z. „Cross-Wedge Rolling”. W: red. Button S.T. „Comprehensive Materials Processing”. T. 3 Elsevier Ltd. (2014): 211–279.
- [3] Pater Z. „Walcowanie poprzeczno-klinowe”. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej (2009).
- [4] Pater Z. „Study of Cross Wedge Rolling Process of BA3002-type Railway Axle”. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 16, 2 (2022): 225–231, <https://doi.org/10.12913/22998624/147310>.
- [5] Kache H., Stonis M., Behrens B.A. “Development of a warm cross wedge rolling process using FEA and downsized experimental trials”. *Prod. Eng. Res. Devel.* 6 (2012): 339–348, <https://doi.org/10.1007/s11740-012-0379-5>.
- [6] Meyer M., Stonis M., Behrens B.A. “Cross wedge rolling and bi-directional forging of preforms for crankshafts”. *Prod. Eng. Res. Devel.* 9 (2015): 61–71, <https://doi.org/10.1007/s11740-014-0581-8>.
- [7] Behrens B.A., Stonis M., Rasche N. “Influence of the forming angle in cross wedge rolling on the multi-directional forging of crankshafts”. *Int. J. Mater. Form.* 11 (2018): 31–41, <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1326-3>.
- [8] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. “FEM simulation of the cross-wedge rolling process for a stepped shaft”. *Strength of Materials.* 49, 4 (2017): 521–527, <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9895-z>.
- [9] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. “An innovative method for forming balls by cross rolling”. *Materials.* 11 (2018): e1793, 1–14, <https://doi.org/10.3390/ma11101793>.
- [10] Kruse J., Jagodzinski A., Langer J., Stonis M., Behrens B.A. “Investigation of the joining zone displacement of cross-wedge rolled serially arranged hybrid parts”. *Int. J. Mater. Form.* 13 (2020): 577–589, <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01494-3>.
- [11] Bulzak T. “Ductile Fracture Prediction in Cross-Wedge Rolling of Rail Axles”. *Materials.* 14, 21 (2021): e6638, <https://doi.org/10.3390/ma14216638>.
- [12] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Walczuk-Gągała P. “Novel damage calibration test based on cross-wedge rolling”. *Journal of Materials Research and Technology.* 13 (2021): 2016–2025, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.022>. ■