

# Modernisation of the drop forging process on the example of forming a bracket forging

## Modernizacja procesu kucia matrycowego na przykładzie kształtowania odkuwki wspornika

ZBIGNIEW PATER\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.3.3>

This paper presents an example of the manufacturing of bracket forgings formed in a dual system. Cross-wedge rolling (CWR) was proposed as the forming method for the preform. The correctness of the adopted solution was verified in numerical simulations, which were performed using the commercial software Forge®. It was shown in detail how the shape of the workpiece changes in the individual operations of the forming process. Maps of temperature, effective strain, strain rate in the preform as well as distributions of force parameters in the rolling process are presented.

**KEYWORDS:** drop forging, cross-wedge rolling, preform, FEM

W artykule przedstawiono przykład wykonywania odkuwek wspornika kształtowanych w układzie podwójnym. Jako metodę wytwarzania przedkuwki zaproponowano walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK). Poprawność przyjętego rozwiązania zweryfikowano w symulacjach numerycznych, które wykonano w komercyjnym programie Forge®. Szczegółowo pokazano, jak zmienia się kształt przedmiotu obrabianego w poszczególnych operacjach procesu kształtowania. Przedstawiono mapy temperatury, intensywności odkształcenia, prędkości odkształcenia w przedkuwce oraz rozkłady parametrów siłowych w procesie walcowania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kucie matrycowe, walcowanie poprzeczno-klinowe, przedkuwka, MES

### Wprowadzenie

W praktyce przemysłowej utrzymywany jest trend przenoszenia procesów kucia matrycowego z młotów na prasy kuźnicze. Związane jest to przede wszystkim z poprawą warunków pracy wynikającą z ograniczenia hałasu i drgań powodowanych przez młoty [1]. Nie bez znaczenia jest przy tym zmniejszająca się grupa wykwalifikowanych kowali, którzy odgrywają kluczową rolę w procesie kucia matrycowego na młotach. Dodatkowo w przypadku kucia na prasach można w łatwy sposób zautomatyzować proces produkcyjny i wyeliminować uciążliwe dla człowieka warunki pracy.

Główną zaletą kucia matrycowego na młotach jest uniwersalność procesu. W przypadku kształtowania odkuwek wydłużonych o dużej zmienności przekroju poprzecznego przeniesienie ich produkcji na prasy kuźnicze wymaga zastosowania maszyn pomocniczych, na których wykonywane są przedkuwki. Rolę taką najczęściej pełnią walcarki kuźnicze wzdłużne lub poprzeczno-klinowe.

W tym opracowaniu przedstawiono przykład modernizacji procesu kucia matrycowego odkuwki wspornika używanego w branży motoryzacyjnej. Do wykonania przedkuwki zaproponowano nowoczesną metodę walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) [2–4], która jest rozwijana na Politechnice Lubelskiej od ponad 30 lat. W efekcie zmiany technologii nie tylko zwiększono bezpieczeństwo pracy, ale też znacząco zmniejszono materiałochłonność z jednoczesnym zwiększeniem wydajności kształtowania. Analizę ograniczono do rozwiązań teoretycznych, w których bazowano na symulacjach numerycznych przeprowadzonych metodą elementów skończonych (MES). Zgodnie z rezultatami analiz, przedstawionych np. w opracowaniach [5–12], takie podejście gwarantuje uzyskanie wiarygodnych wyników przy minimalnych kosztach.

### Obiekt badań

Analizą objęto proces wytwarzania odkuwki wspornika pokazanej na rys. 1, na którym zaznaczono także wymiary gabarytowe. Element produkowany z tej odkuwki znajduje zastosowanie w samochodach wytwarzanych w Unii Europejskiej. Odkuwka ta ma masę 0,325 kg, nie jest ona jednak rozłożona równomiernie. Na jednym z końców odkuwki znajduje się poprzeczka i tam na długości 35 mm (23% długości odkuwki)

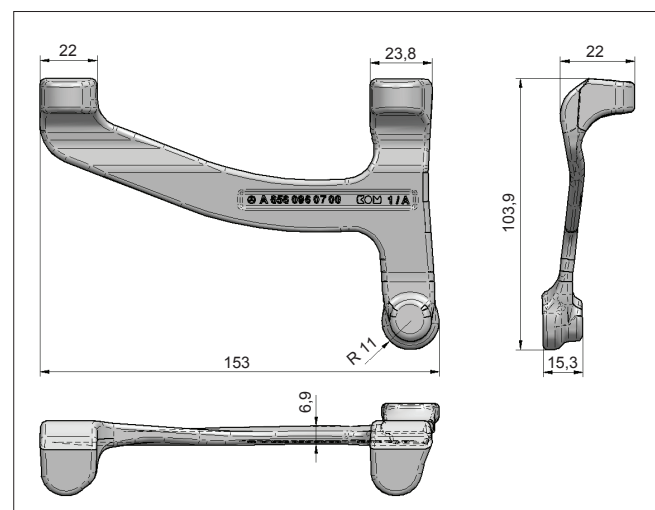


Fig. 1. Analysed bracket forging with marked overall dimensions  
Rys. 1. Analizowana odkuwka wspornika z zaznaczonymi wymiarami gabarytowymi

\* Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater – z.pater@pollub.pl, orcid.org/0000-0001-5504-157X – Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, Lublin, Polska

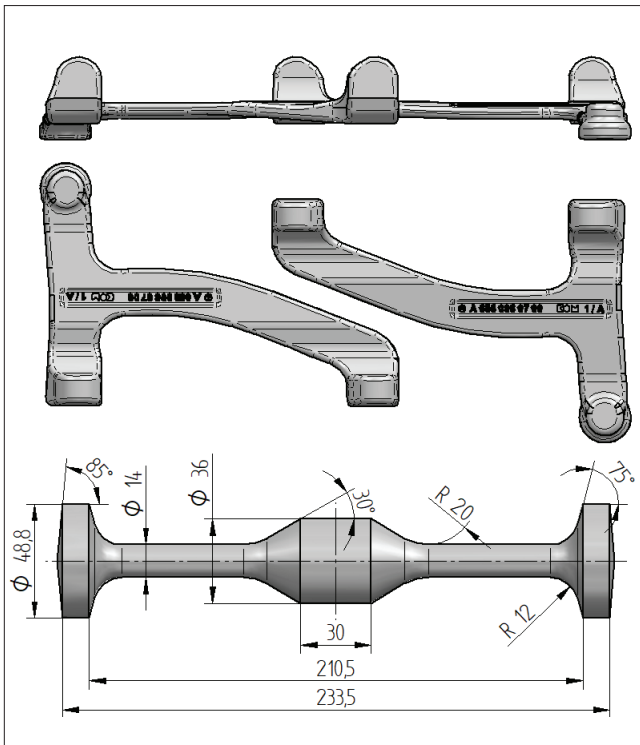


Fig. 2. Applied arrangement of forgings in the double forging process (top) and the preform accepted for forging (bottom)  
Rys. 2. Zastosowane ułożenie odkuwek w procesie kucia w układzie podwójnym (u góry) oraz przedkuwka przyjęta do kucia (u dołu)

skoncentrowane jest aż 51% jej masy. Taki kształt odkuwki powoduje, że jest ona trudna do kucia, które obecnie realizowane jest na młocie z wsadu o masie 1,160 kg. Oznacza to, że odpad materiału w tym procesie wytwarzania wynosi aż 72%.

Z myślą o zmniejszeniu materiałochłonności kształtowania zaproponowano kucie odkuwek wspornika na prasie w układzie podwójnym. Na rys. 2 przedstawiono sposób ułożenia odkuwek w procesie kucia. Częściowo zachodzą one na siebie w sposób zwiększający koncentrację masy w środkowej części przedmiotu obrabianego. Dla tak wybranego ułożenia odkuwek po przyjęciu parametrów rowka wypływkii zaprojektowano przedkuwkę, którą także pokazano na rys. 2. Przedkuwka ta ma masę 0,949 kg. Po uwzględnieniu masy dwóch odkuwek (0,650 kg) wielkość odpadu materiałowego w proponowanym procesie wytwarzania zmniejsza się do 32%. Zatem zużycie materiału w nowym procesie kucia będzie ponad dwa razy mniejsze niż w obecnie stosowanym.

Zaproponowana przedkuwka ma symetryczny kształt, co predysponuje ją do kształtowania metodą WPK. Walcowanie jest realizowane ze wsadu o średnicy równej średnicy największego stopnia ( $\varnothing 48,8$  mm na gorąco). Trzon przedkuwki ma średnicę  $\varnothing 14$  mm, co oznacza, że stopień gniotu  $\delta$  ( $\delta = d_0/d$ , gdzie:  $d_0$  – średnica wsadu,  $d$  – średnica walcowanego stopnia) charakteryzujący odkształcenie wynosi aż  $\delta = 3,49$ . Tak duża wartość stopnia gniotu nie jest możliwa do uzyskania za jednym razem, dlatego postanowiono zastosować schemat walcowania w dwóch przejściach klinów.

Na rys. 3 przedstawiono walec klinowy zaprojektowany do kształtowania przyjętej przedkuwki.

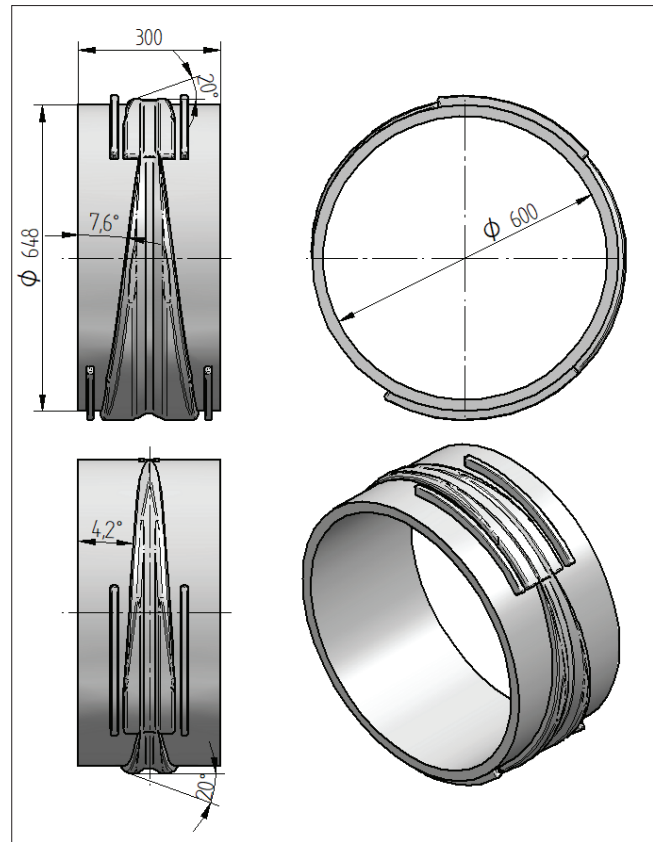


Fig. 3. Wedge tool segment used to roll a bracket preform in a dual system

Rys. 3. Klinowy segment narzędziowy wykorzystany do walcowania przedkuwki wspornika w układzie podwójnym

W pierwszym przejściu stosowany jest klin charakteryzowany kątem kształtującym  $\alpha = 20^\circ$  oraz kątem rozwarcia  $\beta = 4,2^\circ$ , natomiast dla klina używanego w drugim przejściu parametry te wynoszą  $\alpha = 20^\circ$  oraz  $\beta = 7,6^\circ$ . Dodatkowo na walcach umieszczono listwy (kołnierze) oporowe, które mają hamować płyniecie materiału w kierunku wzdłużnym. Do ukształtowania przedkuwki wykorzystuje się identyczne i obracające się w tę samą stronę walce, które są tak ułożone, że odległość między ich osiami wynosi 700 mm.

### Symulacja numeryczna

Do symulacji procesu kształtowania odkuwki wspornika wykorzystano program Forge<sup>®</sup> NxT. Na rys. 4 pokazano model geometryczny procesu walcowania przedkuwki, który wykonano w tym programie. W skład modelu wchodzi: dwa identyczne walce obracające się w tę samą stronę z prędkością 10 obr/min, dwie identyczne listwy prowadzące mające utrzymać przedmiot obrabiany w strefie roboczej walcarki oraz wsad w postaci cylindrycznego pręta o wymiarach  $\varnothing 48,8 \times 66$  mm (w stanie gorącym).

W symulacji założono, że kształtowany materiał to stal w gatunku 42CrMo4, której model przyjęto z biblioteki zastosowanego oprogramowania. W analizie uwzględniano zjawiska cieplne zachodzące podczas kształtowania, które były warunkowane przez:

- temperaturę wsadu  $1220^\circ\text{C}$ ,
- temperaturę narzędzi  $250^\circ\text{C}$ ,
- współczynnik wymiany ciepła  $10\,000\text{ W/m}^2\text{K}$ .

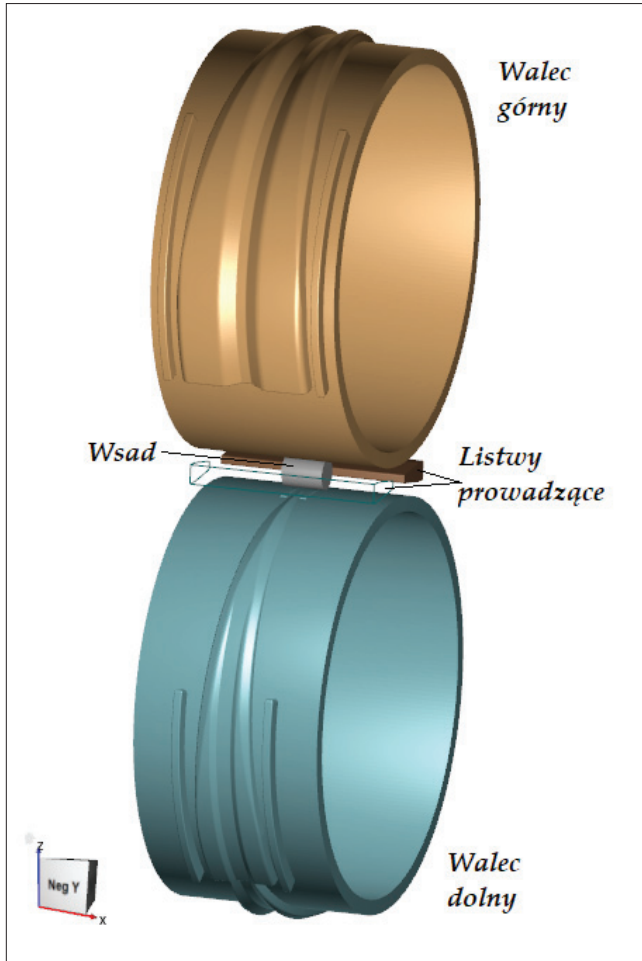


Fig. 4. Geometric model of a preform rolling built in the Forge® software environment

Rys. 4. Model geometryczny walcowania przedkewki zbudowany w środowisku programu Forge®

W efekcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że w procesie WPK można bez problemu wykonać przedkewkę o zakładanym kształcie.

Na rys. 5 pokazano, jak zmienia się kształt przedmiotu obrabianego podczas walcowania. W pierwszym przejściu następuje ukształtowanie na gotowo stopnia centralnego przedkewki o średnicy  $\varnothing 36$  mm oraz stopnia pośredniego o średnicy  $\varnothing 26$  mm. W drugim przejściu stopień pośredni jest walcowany na średnicę końcową równą  $\varnothing 14$  mm. Widoczne jest, że listwy oporowe dobrze spełniają swoją rolę, zabezpieczając stopnie skrajne przed nadmiernym pływaniem materiału w kierunku wzdłużnym.

Podczas walcowania temperatura materiału obniża się w wyniku odprowadzenia ciepła do znacznie zimniejszych narzędzi, co widać na rys. 5. Spadki temperatury są jednakże ograniczone do stref przy powierzchniowych materiału (rys. 6), a straty ciepła są częściowo rekompensowane przez ciepło generowane w wyniku pracy tarcia i pracy odkształcenia plastycznego. W konsekwencji przedkewka w całej swojej objętości ma temperaturę umożliwiającą przeprowadzenie kolejnych operacji kucia na gorąco.

Zastosowany schemat kształtowania przedkewki powoduje, że odkształcenia w strefie walcowanych stopni przyjmują bardzo duże wartości (rys. 7), co prowadzi do znaczącego rozdrobnienia ziarna.

Dzieje się tak wskutek intensywnego pływania materiału w kierunku obwodowym, wywołanego działaniem sił tarcia. Ważne jest przy tym, że pomimo intensywnego odkształcenia nie dochodzi do utraty spójności materiału. Świadczy o tym rozkład funkcji zniszczenia obliczonej zgodnie ze znormalizowanym

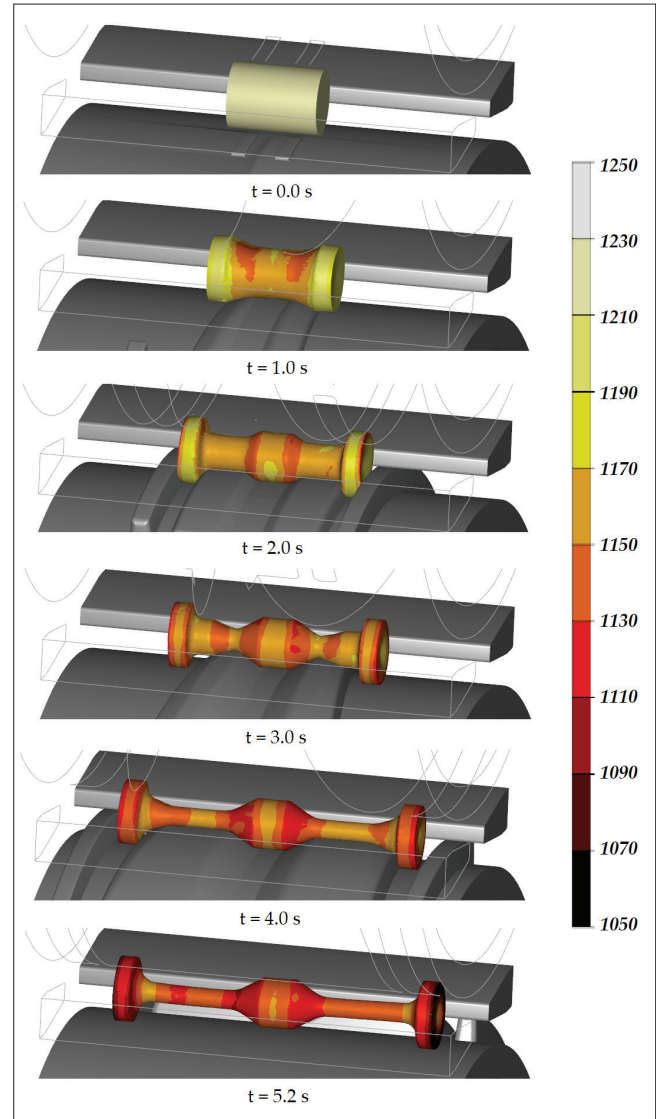


Fig. 5. Preform shape progression in the CWR process with temperature distribution marked [in °C]

Rys. 5. Progresa kształtu przedkewki w procesie WPK z zaznaczonym rozkładem temperatury [w °C]

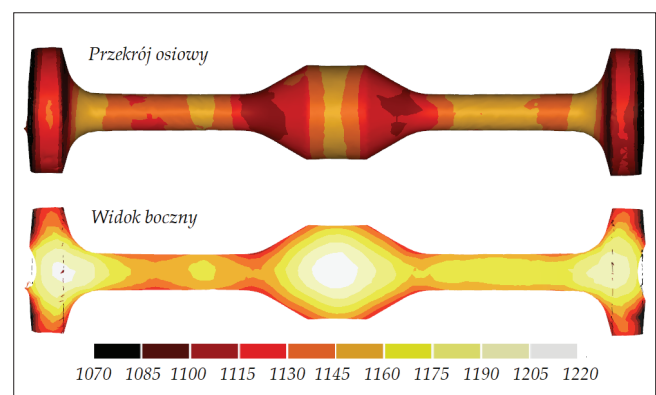


Fig. 6. Temperature distribution [in °C] in a CWR-formed preform  
Rys. 6. Rozkład temperatury [w °C] w przedkewce ukształtowanej metodą WPK



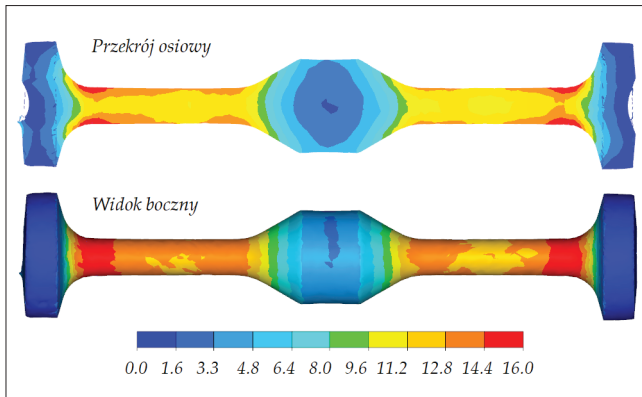


Fig. 7. Effective strain distributions in a CWR-formed preform  
Rys. 7. Rozkłady intensywności odkształcenia w przedkuwce ukształtowanej metodą WPK

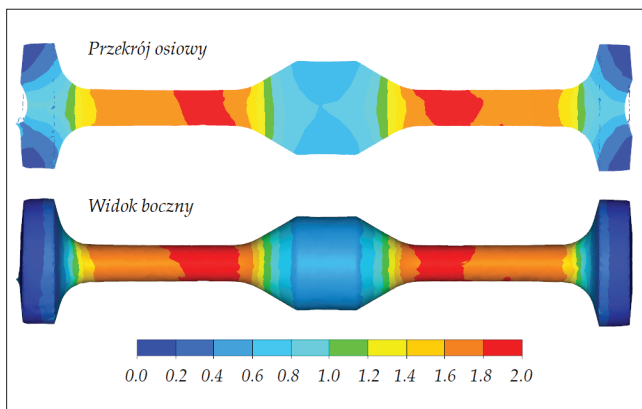


Fig. 8. Distribution of the damage function according to the Cockroft-Latham criterion in a preform formed by the CWR method  
Rys. 8. Rozkład funkcji zniszczenia według kryterium Cockrofta-Lathama w przedkuwce ukształtowanej metodą WPK

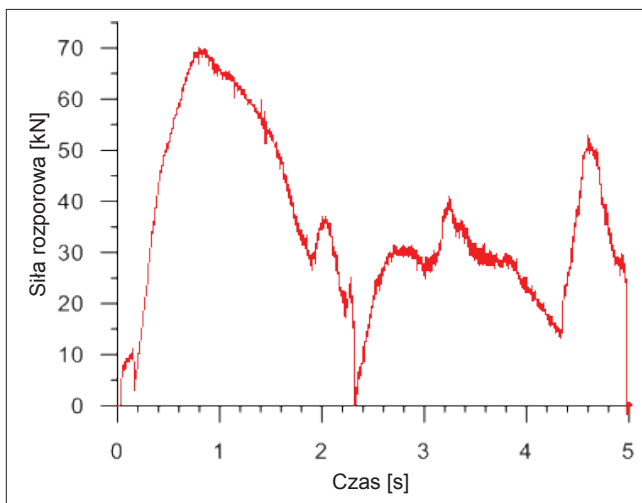


Fig. 9. Distribution of the spreading (radial) force acting on one of the rollers during the preform rolling process  
Rys. 9. Rozkład siły rozporowej (promieniowej) działającej na jeden z walców w procesie walcowania przedkuwki

kryterium Cockrofta-Lathama pokazany na rys. 8. Największe wartości funkcja ta przyjmuje w stopniu o najmniejszej średnicy od strony stopnia centralnego, gdzie prawdopodobnie dochodzi do skręcania materiału na skutek różnych prędkości obrotowych poszczególnych stopni przedmiotu obrabianego. Maksymalna wartość funkcji zniszczenia nie przekracza

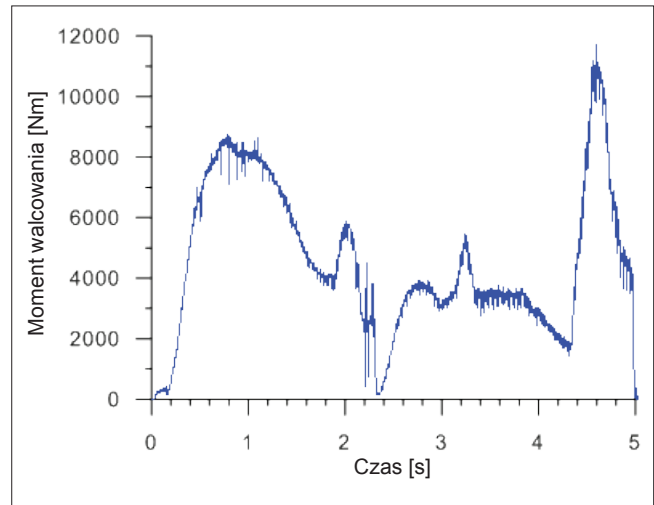


Fig. 10. Torque distribution on one of the rollers in the preform rolling process

Rys. 10. Rozkład momentu na jednym z walców w procesie walcowania przedkuwki

wartości 2 i jest znacznie mniejsza od wartości krytycznej, która dla stali w gatunku 42CrMo4 przy temperaturze 1138,7°C przyjmuje wartość 3,587 [13].

Charakterystyczne dla procesu WPK jest to, że jego realizacja przebiega przy stosunkowo małych parametrach siłowych. Na rys. 9 przedstawiono rozkład siły rozporowej (promieniowej) na jednym z walców dla cyklu walcowania. Maksymalna siła występuje w trakcie pierwszego przejścia, w którym osiąga ona wartość około 70 kN (tj. wielokrotnie mniej niż podczas kucia matrycowego). Z kolei największą wartość momentu obrotowego na walcu (około 12 000 Nm) odnotowano w końcowej fazie procesu (rys. 10), tj. wówczas, gdy stopnie skrajne zostały zamknięte w przestrzeni określonej przez listwy oporowe, listwy prowadzące i klipy. Takiej wartości momentu obrotowego, przy założonej prędkości obrotowej

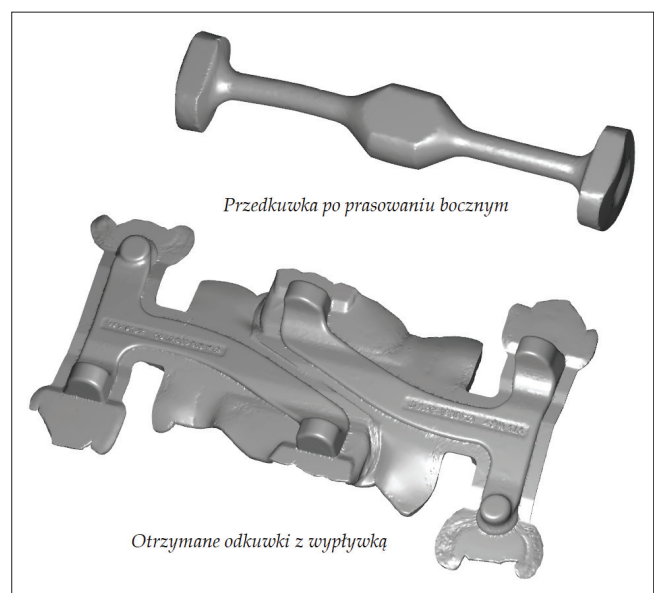


Fig. 11. Results of numerical simulation of the side pressing of the preform (top) and the drop forging of the double brackets (bottom)  
Rys. 11. Wyniki symulacji numerycznej prasowania bocznego przedkuwki (u góry) oraz kucia matrycowego wsporników w układzie podwójnym (u dołu)

walców 10 obr/min, odpowiada moc 12,6 kW wymagana do utrzymania ruchu obrotowego. Jest to wartość kilkakrotnie mniejsza od mocy dostępnych na rynku walcarek do WPK.

Przedkuvka otrzymana w symulacji procesu walcowania została wykorzystana jako wsad do zamodelowania kucia wspornika w układzie podwójnym. Kucie to przebiegało w dwóch operacjach. Najpierw zastosowano prasowanie boczne, a następnie matrycowanie, w którym użyto specjalne progi oporowe służące do hamowania płynięcia materiału w wypływkę (rys. 11). W efekcie wykonanej analizy stwierdzono, że możliwe jest kucie odkuwki wspornika w układzie podwójnym, co znacząco zwiększa wydajność wytwarzania tego elementu.

## Wnioski

Na podstawie analizy numerycznej sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Walcowanie poprzeczno-klinowe stanowi skuteczną metodę wytwarzania przedkówek na wydłużone odkuwki matrycowe.
- Zastosowanie kształtowania przedkówek w układzie podwójnym zwiększa wydajność wytwarzania i wpływa na zrównoważenie sił osiowych w procesie WPK.
- Temperatura przedkuvki po walcowaniu jest na tyle wysoka, że możliwe jest prowadzenie kolejnych operacji kucia bez konieczności dogrzewania przedkuvki.
- Kucie w układzie podwójnym może prowadzić nie tylko do wzrostu wydajności, ale także do zmniejszenia materiałochłonności wytwarzania.
- Procesy kucia na młotach mogą być przenoszone do gniazd pras kuźniczych wspomaganych przez walcarki, co jest korzystne dla środowiska naturalnego ze względu na ograniczenie emisji hałasu i drgań.

## LITERATURA

- [1] Wasiunyk P. „Kucie matrycowe”. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne (1987).
- [2] Pater Z. “Cross-Wedge Rolling”. In: “Comprehensive Materials Processing”. S.T. Button Ed. Elsevier Ltd. 3 (2014): 211–279.
- [3] Pater Z. “Development of cross-wedge rolling theory and technology”. *Steel Res. Int.* 81, 9 (2010): 25–32.
- [4] Pater Z. „Walcowanie poprzeczno-klinowe”. Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej (2009).
- [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. “Multi-wedge cross rolling of balls”. *J. Iron Steel Res. Int.* 20, 10 (2013): 46–50, [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60175-2](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60175-2).
- [9] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Bartnicki J., Tofil A. “Prediction of crack formation for cross wedge rolling of harrow tooth preform”. *Materials.* 12, 14 (2019) e2287, <https://doi.org/10.3390/ma12142287>.
- [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] Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. “Thermo-mechanical analysis of a lever preform forming from magnesium alloy AZ31”. *Arch. Metall. Mater.* 57, 4 (2012): 1211–1218, <https://doi.org/10.2478/v10172-012-0135-z>.
- [13] Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., Bulzak T., Wójcik Ł. “Determination of the Critical Value of Material Damage in a Cross Wedge Rolling Test”. *Materials.* 14, 7 (2021): e1586, <https://doi.org/10.3390/ma14071586>. ■