

# Numerical simulation of a cross-wedge rolling process in a mill with horizontally stacked rolls

## Symulacja numeryczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego osi kolejowej w walcarni z poziomo ułożonymi walcami

ZBIGNIEW PATER  
TOMASZ BULZAK  
JANUSZ TOMCZAK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.5-6.7>

This paper presents simulations of the cross wedge rolling (CWR) process of a railway axle. It is assumed that the rolls are arranged horizontally, which should facilitate both the loading of the charge and the unloading of the rolled product. Simulations were performed in the Forge® programme, based on the finite element method (FEM). It was found that the adopted rolling scheme and design of wedge tools ensures the achievement of a correctly formed railway axle, free of internal (cracks) and external defects (overlapping, bending). The force parameters determined in the simulations can be used in the design works of the rolling mill guaranteeing the railway axle forming process.

**KEYWORDS:** cross-wedge rolling, railway axle, FEM

Przedstawiono symulacje procesu walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) osi kolejowej. Przyjęto, że walce ułożone są poziomo, co powinno ułatwić zarówno załadowanie wsadu, jak i wyładowanie odwalcowanego wyrobu. Symulacje wykonano w programie Forge®, bazującym na metodzie elementów skończonych (MES). Stwierdzono, że przyjęty schemat walcowania oraz konstrukcja narzędzi klinowych zapewniają uzyskanie prawidłowo ukształtowanej osi kolejowej, wolnej od wad wewnętrznych (pęknięć) i zewnętrznych (zawalcowań, wygięć). Określone w symulacjach parametry siłowe można wykorzystać w pracach projektowych walcarki zabezpieczającej proces kształtowania osi kolejowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** walcowanie poprzeczno-klinowe, oś kolejowa, MES

### Wprowadzenie

Osie kolejowe to wyroby wielkogabarytowe (o masie powyżej 400 kg), produkowane w dużych seriach. Obecnie osie wytwarza się głównie poprzez kucie swobodne oraz kucie na kowarkach [1]. Równoległe z rozwojem dotychczas stosowanych technologii trwają prace nad nowymi metodami produkcji tych wyrobów, charakteryzującymi się mniejszą materiałochłonnością oraz energochłonnością. Za jedną z takich nowych metod uznaje się walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK) [2].

Główny problem w procesie WPK osi kolejowych stanowią gabaryty narzędzi. Zakłada się, że długość klinów odpowiednia do ukształtowania osi w przypadku walcowania narzędziami płaskimi powinna być równa około 6 m. Oznacza to, że średnica walców klinowych może dochodzić do 2 m. Z myślą o ograniczeniu rozmiarów narzędzi rozważano w przeszłości zastosowanie walcowania równoległego, w trakcie którego oś jest kształtowana równocześnie przez trzy pary klinów. Stosując takie rozwiązanie, Pater i in. [3] zmniejszyli nominalną średnicę walców do 1,6 m, ale moment obrotowy potrzebny do ukształtowania osi wyniósł aż 1,4 MNm. Jednak to nie bardzo duży moment obrotowy jest głównym problemem walcowania równoległego. Jak wykazał Bulzak [4], jest nim dużo większa skłonność do pęknięcia materiału w strefie osiowej obrabianego przedmiotu. Aby ograniczyć prawdopodobieństwo pęknięcia, proponowano walcowanie w dwóch operacjach [3] oraz stosowanie wybrania w powierzchni kalibrującej klinów, redukującego liczbę cykli odkształcenia [5].

W literaturze specjalistycznej można znaleźć opracowania dotyczące walcowania osi drążonych zarówno z użyciem [6], jak i bez użycia trzpienia [7]. W tych procesach również stosowano walcowanie równoległe, w trakcie którego korzystano aż z pięciu par klinów jednocześnie. Jednak próby walcowania, przeprowadzone w skali 1 : 5 przez Peng i in. [8], pokazały, że osie wykonane tym sposobem mają wiele wad kształtu. Ostatecznie zaproponowano więc, by stopień centralny osi kolejowej był walcowany przez jedną parę klinów, tak jak to ma miejsce w przypadku osi pełnych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono najnowszą koncepcję WPK osi kolejowych opracowaną na Politechnice Lubelskiej. Zakłada ona użycie walców klinowych, których osie obrotu są oddalone od siebie o 1,8 m. Przy czym dzięki rozdzieleniu kształtowania stopnia centralnego od kształtowania stopni bocznych znacząco zredukowano moment obrotowy. W analizie założono poziome ułożenie walców, które uznano za korzystne ze względu na ułatwienia w załadunku wsadu oraz wyładunku odwalcowanego wyrobu, które można przeprowadzić z wykorzystaniem suwnicy.

\* Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater, z.pater@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5504-157X> – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin, Polska  
Dr inż. Tomasz Bulzak, t.bulzak@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0002-0525-8321> – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin, Polska  
Dr hab. inż. Janusz Tomczak, j.tomczak@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3781-1432> – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Lublin, Polska

## Zakres analizy

Analizą objęto proces WPK osi kolejowej typu BA3002, zgodnie ze standardem EN1326. Na rys. 1 przedstawiono tę oś w wersji przyjętej do kształtowania, która powstała po uwzględnieniu 5 mm naddatków na obróbkę skrawaniem. Założono przy tym, że średnica wsadu jest równa największej średnicy osi i wynosi 216 mm.

Na rys. 2 przedstawiono schemat rozważanego procesu WPK. Podczas walcowania wykorzystuje się dwa identyczne narzędzia mocowane na walcach o średnicy  $\varnothing 1400$  mm. Odległość między osiami obrotu współpracujących walców wynosi 1800 mm. Narzędzia są wyposażone w trzy kliny. Pierwszy z nich (charakteryzowany przez kąty  $\alpha = 15^\circ$  oraz  $2\beta = 34^\circ$ ) jest umieszczony centralnie, natomiast dwa pozostałe (charakteryzowane przez kąty  $\alpha = 22^\circ$  i  $\beta = 11^\circ$ ) są umieszczone symetrycznie względem siebie, na bokach narzędzia. Dodatkowo narzędzie jest wyposażone w dwie ścieżki prowadzące dla prawidłowego spozycjonowania wsadu oraz w dwa noże boczne, które z kolei służą do odcinania odpadów materiału. Oprócz walców w kształtowaniu osi bierze udział listwa podtrzymująca, która jest ustawiona tak, by oś obrotu przedmiotu obrabianego znajdowała się poniżej płaszczyzny przechodzącej przez osie walców. Wartość odległości  $e$  osi obrotu od wspomnianej płaszczyzny jest ważnym parametrem, który należy dobrać na etapie projektowania procesu WPK. W bieżącej analizie założono, że:  $e = 8$  mm.

Symulacje numeryczne wykonano w programie Forge® NxT. Program ten w przeszłości był wielokrotnie używany w analizie procesów walcowania poprzecznego i skośnego [9–12], a wyniki obliczeń

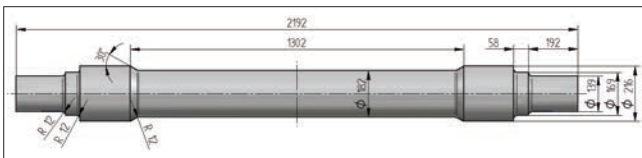


Fig. 1. Rolled railway axle to be analysed  
Rys. 1. Analizowana oś kolejowa w wersji walcowanej

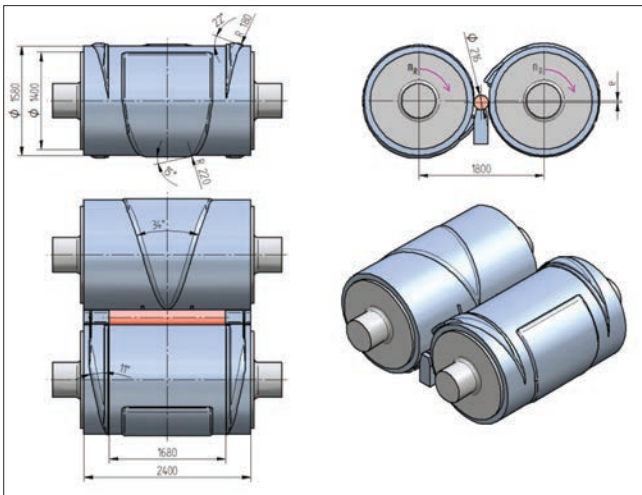


Fig. 2. Schematic of the CWR process of a railway axle in a rolling mill with horizontally stacked rolls  
Rys. 2. Schemat procesu WPK osi kolejowej w walcierce z poziomo ułożonymi walcami

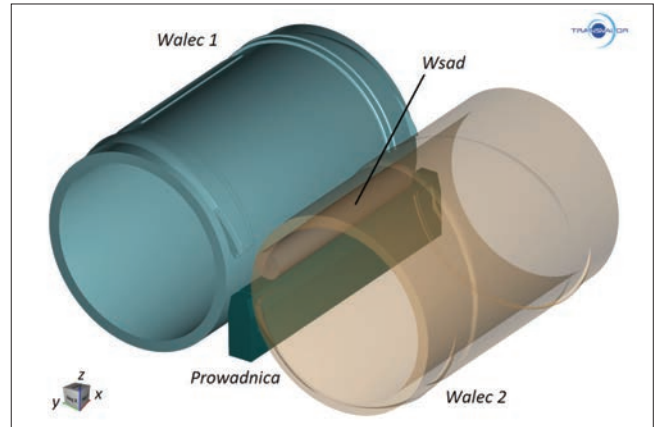


Fig. 3. Geometrical model of the analysed CWR process created in the Forge® programme  
Rys. 3. Model geometryczny analizowanego procesu WPK wykonany w programie Forge®

pozostawały w dobrej zgodności z rezultatami badań doświadczalnych.

Na rys. 3 przedstawiono model geometryczny procesu WPK osi kolejowej. W skład modelu wchodzi: dwa jednakowe walce, listwa podtrzymująca oraz wsad. Narzędzia są modelowane jako ciała doskonale sztywne, a wsad (przedmiot obrabiany) – jako ciało odkształcalne plastycznie. W symulacji założono, że wsad o wymiarach  $\varnothing 216 \times 1650$  mm jest wykonany ze stali w gatunku 42CrMo4. Model materiałowy tej stali jest opisany równaniem:

$$\sigma_p = 1827,07 e^{-0,00289T} \varepsilon^{-0,1123} e^{-0,4879/\varepsilon} \dot{\varepsilon}^{0,14368}$$

gdzie:  $\sigma_p$  – napężenie uplastyczniające [MPa];  $T$  – temperatura [ $^\circ\text{C}$ ];  $\varepsilon$  – intensywność odkształcenia;  $\dot{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia [ $\text{s}^{-1}$ ].

Przyjęto, że wsad przed kształtowaniem jest nagrany do temperatury  $1240^\circ\text{C}$ , walce mają temperaturę  $250^\circ\text{C}$ , a prowadnica  $350^\circ\text{C}$ . Wymiana ciepła między narzędziami a przedmiotem obrabianym jest określona przez współczynnik wymiany ciepła równy  $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Tarcie na powierzchni kontaktu opisuje model tarcia stałego i czynnik tarcia równy 0,9. Kinematykę procesu określa prędkość obrotowa walców równa 1,5 obr/min.

Przedmiot obrabiany był modelowany za pomocą 4-węzłowych elementów czworobocznych. W trakcie obliczeń stosowano opcję przebudowy siatki, która następowała automatycznie, gdy przyrost odkształcenia w którymkolwiek z węzłów przekroczył wartość 0,4. Na rys. 4 przedstawiono podział na elementy wsadu oraz odwalcowanej osi kolejowej wraz z odpadami bocznymi odciętymi w końcowej fazie kształtowania.

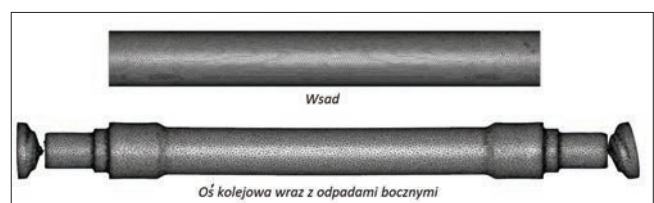


Fig. 4. Partition of a workpiece into four-node tetragonal elements  
Rys. 4. Podział przedmiotu obrabianego na 4-węzłowe elementy czworoboczne

## Rezultaty

Zastosowanie MES pozwoliło na dokładne prześledzenie przebiegu kształtowania osi kolejowej, co przedstawiono na rys. 5. Z rysunku tego widać, że najpierw klin centralny kształtuje stopień środkowy. Następnie kliny boczne walcują stopnie skrajne o mniejszej średnicy. Na końcowym etapie procesu noże boczne odcinają odpady końcowe. Ostatecznie oś kolejowa uzyskuje zakładany kształt.

Ze względu na małą prędkość obrotową walców (1,5 obr/min) proces kształtowania osi trwa 40 s. Tak długi czas nie powoduje jednak spadku temperatury poniżej wartości zalecanej do walcowania w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Świadczy o tym rozkład temperatury w osi walcowanej przedstawiony na rys. 6. Najmniejszą temperaturę ma materiał w warstwach przypowierzchniowych, gdzie došlo do kontaktu z chłodniejszymi narzędziami. Natomiast w strefie osiowej przedmiotu obrabianego temperatura materiału jest zbliżona do temperatury wsadu. Taki korzystny rozkład temperatury jest wynikiem zarówno dużej pojemności cieplnej przedmiotu obrabianego, jak i zamiany pracy odkształcenia plastycznego na ciepło.

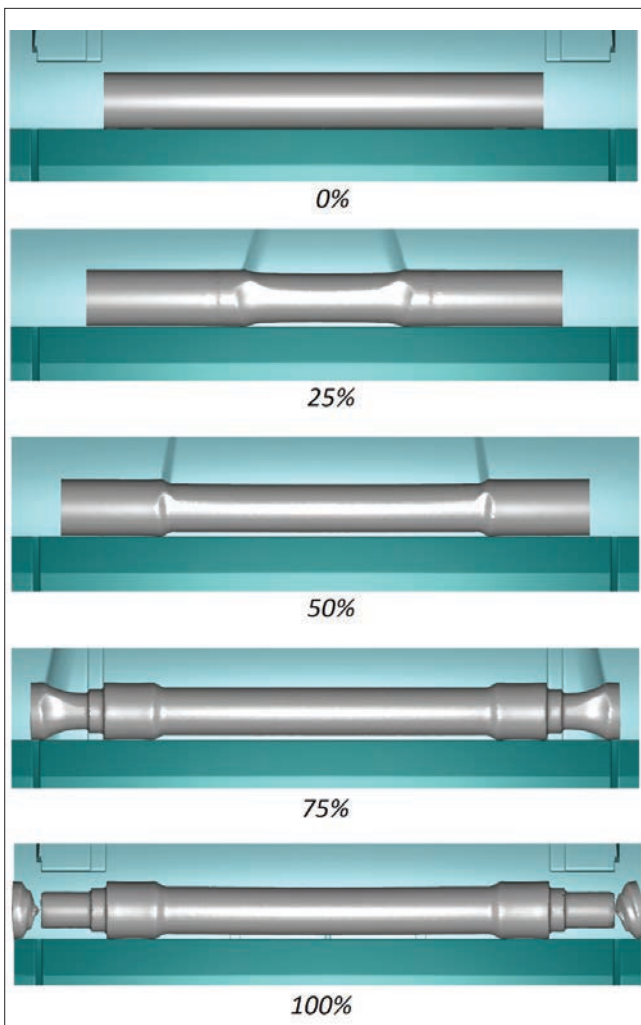


Fig. 5. Workpiece shape progression in the CWR process of a railway axle  
Rys. 5. Progresja kształtu przedmiotu obrabianego w procesie WPK osi kolejowej

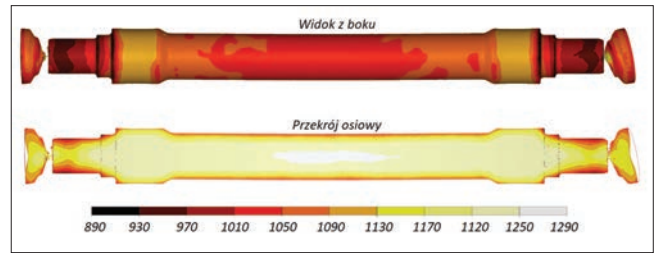


Fig. 6. Temperature distribution [°C] in the rolled railway axle  
Rys. 6. Rozkład temperatury [°C] w odwalcowanej osi kolejowej

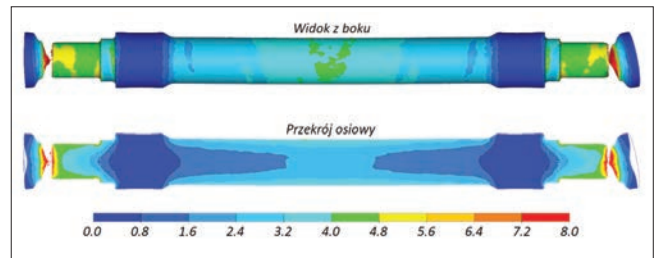


Fig. 7. Effective strain distribution in the rolled railway axle  
Rys. 7. Rozkład intensywności odkształcenia w odwalcowanej osi kolejowej

Na rys. 7 przedstawiono rozkład intensywności odkształcenia w osi kolejowej odwalcowanej w analizowanym przypadku WPK. Rozkład ten jest typowy dla procesów walcowania poprzecznego. Odkształcenia są rozłożone warstwowo i przyjmują największe wartości na powierzchniach zewnętrznych, gdzie działają siły tarcia wywołujące płynięcie materiału w kierunku obwodowym. Oczywiście wraz ze wzrostem redukcji przekroju poprzecznego następuje zwiększenie intensywności odkształcenia.

Jednym z ograniczeń procesu WPK jest powstawanie pęknięć wewnętrznych w strefie osiowej przedmiotu obrabianego. Na rys. 8 pokazano rozkład funkcji zniszczenia obliczonej zgodnie z kryterium Cockcrofta-Lathama. Największe wartości funkcja ta ma na powierzchniach czołowych, gdzie miało miejsce rozcięcie materiału w efekcie działania noży tnących. Natomiast w stopniu centralnym przedmiotu obrabianego maksymalna wartość funkcji zniszczenia jest mniejsza od 1,5. W tym miejscu materiał ma temperaturę rzędu 1200°C (patrz rys. 6). Wartość krytyczna zniszczenia, przy której dochodzi do pęknięcia materiału dla stali 42CrMo4 kształtowanej przy temperaturze 1200°C wynosi 3,55 [17]. Można zatem stwierdzić, że w analizowanym przypadku walcowania nie wystąpi pęknięcie materiału w strefie osiowej przedmiotu obrabianego.

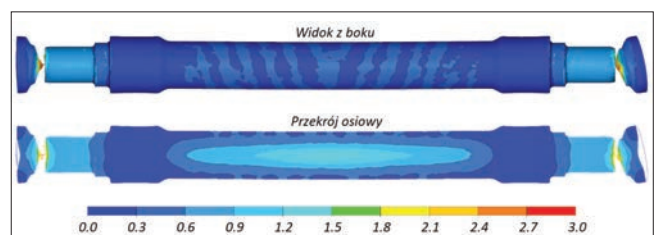


Fig. 8. Damage function distribution (calculated according to the Cockcroft-Latham criterion) in the rolled railway axle  
Rys. 8. Rozkład funkcji zniszczenia (obliczony zgodnie z kryterium Cockcrofta-Lathama) w odwalcowanej osi kolejowej



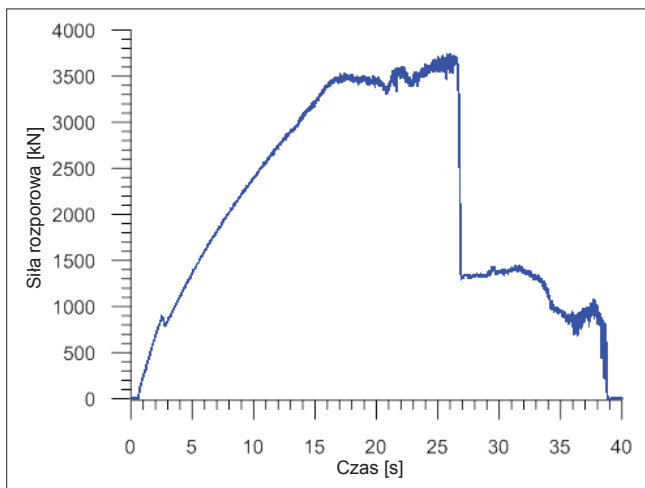


Fig. 9. Distribution of load (radial) in the process of CWR of a railway axle

Rys. 9. Rozkład siły rozporowej (promieniowej) w procesie WPK osi kolejowej

Na rys. 9 zaprezentowano rozkłady siły promieniowej w procesie WPK osi kolejowej. Największe siły występują w końcowej fazie kształtowania stopnia centralnego, gdy dodatkowo rozpoczyna się walcowanie stopni skrajnych. Maksymalna wartość siły wynosi 3736 kN. Wartość ta powinna być wzięta pod uwagę podczas konstruowania walcarki zabezpieczającej proces WPK osi kolejowej.

Na rys. 10 przedstawiono rozkład momentu obrotowego wyznaczony numerycznie dla analizowanego przypadku walcowania. Maksymalna wartość momentu obrotowego wynosi 779,7 kNm. Ta wartość momentu obrotowego oraz prędkość obrotowa walców dają podstawę do wyznaczenia mocy walcarki. Zakładając około 50% nadwyżkę mocy, można przyjąć, że walcarka do kształtowania osi kolejowych mogłaby być napędzana dwoma silnikami prądu stałego o mocy 180 kW każdy.

Zastosowanie walcowania w układzie poziomo ułożonych walców i jednej prowadnicy podpierającej przedmiot obrabiany wymaga takiego ustawienia prowadnicy, by oś obrotu kształtowanego wyrobu

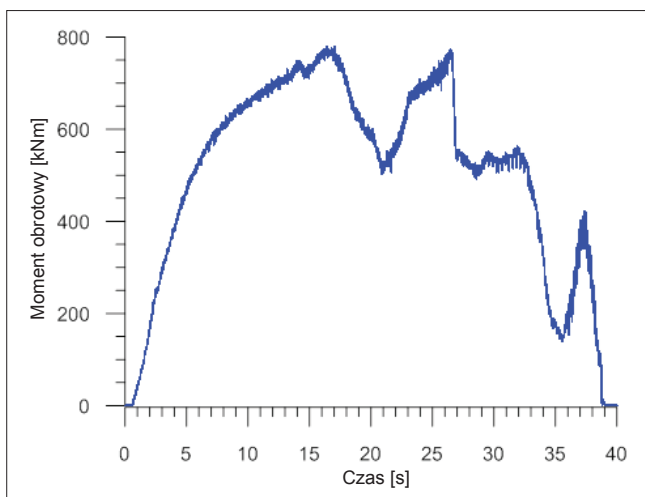


Fig. 10. Torque distribution on the roll in the CWR process of a railway axle

Rys. 10. Rozkład momentu obrotowego na walcu w procesie WPK osi kolejowej



Fig. 11. Bending of the railway axle as a result of too much lowering of the workpiece axis in relation to the rolls axes ( $e = 20$  mm)

Rys. 11. Wygięcie osi kolejowej będące efektem zbyt dużego obniżenia osi przedmiotu obrabianego w stosunku do osi walców ( $e = 20$  mm)

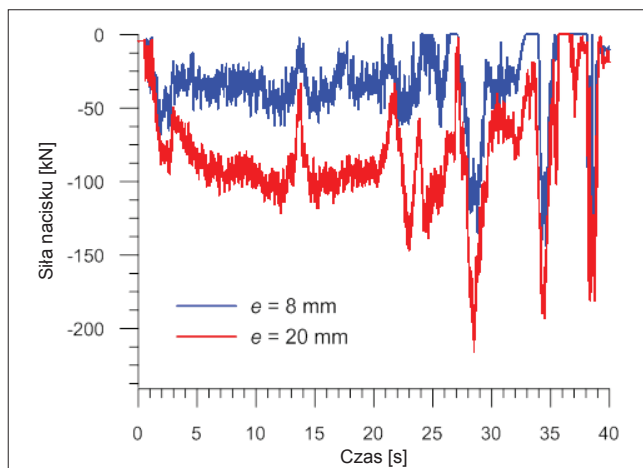


Fig. 12. Effect of lowering the workpiece axis in relation to the rolls axes on the pressure force on the guide

Rys. 12. Wpływ obniżenia osi przedmiotu obrabianego w stosunku do osi walców na siłę nacisku na prowadnicę

znajdowała się poniżej płaszczyzny przechodzącej przez osie walców. Zastosowana w tej analizie odległość  $e$ , wynosząca 8 mm, została dobrana właściwie, o czym świadczy prawidłowy przebieg procesu WPK pokazany na rys. 5. Aby wykazać, jak parametr  $e$  wpływa na przebieg kształtowania, wykonano dodatkową symulację, w której przyjęto, że  $e = 20$  mm. W takim przypadku walcowania doszło do wygięcia centralnego stopnia osi, co zostało zilustrowane na rys. 11. Odnotowane wygięcie jest efektem zwiększenia siły dociskającej przedmiot obrabiany do listwy.

Na rys. 12 przedstawiono rozkłady siły nacisku na prowadnicę w obu rozważanych przypadkach WPK. Zwiększenie odległości  $e$  z 8 mm do 20 mm spowodowało wzrost średniej siły nacisku o ponad 140% (z 31,3 kN do 76,2 kN). W następstwie wzrostu siły wystąpiło niepożądane wygięcie osi kolejowej.

## Wnioski

Na podstawie analizy numerycznej sformułowano następujące wnioski:

- Pełne osie kolejowe mogą być skutecznie wytwarzane metodą walcowania poprzeczno-klinowego (WPK).
- Poprzez rozdzielanie w czasie kształtowania poszczególnych stopni osi można zmniejszyć moment obrotowy na walcu do wartości akceptowalnej, wynoszącej poniżej 800 kNm.
- Stosowanie małej prędkości obrotowej walców (1,5 obr/min) nie powoduje zbyt dużych spadków temperatury kształtowanego materiału.
- W procesie WPK osi kolejowej nie powinno dochodzić do pęknięć wewnętrznych.

• W przypadku WPK z poziomo ułożonymi walcami i jedną listwą podtrzymującą należy odpowiednio dobrać położenie listwy, której zbytne obniżenie może doprowadzić do niepożądanego wygięcia osi kolejowej.

#### LITERATURA

- [1] Gronostajski Z., Pater Z., Madej L., et al. "Recent development trends in metal forming". *Arch. Civ. Mech. Eng.* 19, 3 (2019): 898–941, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.04.005>.
- [2] Pater Z. "Cross-Wedge Rolling". In: S.T. Button, ed. "Comprehensive Materials Processing". 3 (2014): 211–279, Elsevier Ltd.
- [3] Pater Z., Tomczak J. "A new cross wedge rolling process for producing rail axles". *MATEC Web of Conferences*. 190 (2018): 11006, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819011006>.
- [4] Bulzak T. "Ductile fracture prediction in cross-wedge rolling of rail axles". *Materials*. 14, 21 (2021): 6638, <https://doi.org/10.3390/ma14216638>.
- [5] Pater Z. "Numerical analysis of the cross-wedge rolling process of a railway axle". *Mechanik*. 93, 2 (2020): 18–21: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2020.2.6>.
- [6] Hu B., Shu X., Yu P., Peng W. "The strain analysis at the broadening stage of the hollow railway axle by multi-wedge cross wedge rolling". *Applied Mechanics and Materials*. 494–495 (2014): 457–460, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.494-495.457>.
- [7] Sun B., Zheng X., Shu X., Peng W., Sun P. "Feasibility study on forming hollow axle with multi-wedge synchrostep by cross wedge rolling". *Applied Mechanics and Materials*. 201–202 (2012): 673–677, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.201-202.673>.
- [8] Peng W., Sheng S., Chiu Y., Shu X., Zhan L. "Multi-wedge cross wedge rolling process of 42CrMo4 large and long hollow shaft". *Rare Metal Materials and Engineering*. 45, 4 (2016): 836–842, [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)30084-4](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)30084-4).
- [9] Pater Z. "Study of cross wedge rolling process of BA3002-type railway axle". *Advances in Science and Technology Research Journal*. 16, 2 (2022): 225–231, <https://doi.org/10.12913/22998624/147310>.
- [10] Silva M.N.L., Pires G.H., Button S.T. "Damage evolution during cross wedge rolling of steel DIN 38MnSiV55". *Procedia Engineering*. 10 (2011): 752–757, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.125>.
- [11] 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>.
- [12] 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>.
- [13] 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>.
- [14] 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>.
- [15] 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>.
- [16] 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>.
- [17] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Wójcik Ł. "Conception of a three roll cross rolling process of hollow rail axles". *ISIJ International*. 61, 3 (2021): 895–901, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-530>. ■