

# Numerical analysis of the cross-wedge rolling process of a railway axle

## Analiza numeryczna procesu walcowania poprzeczno-klinowego osi kolejowej

ZBIGNIEW PATER \*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2020.2.6>

The article presents an innovative method of manufacturing railway axle using two wedge rolls. The novelty of the solution consists in the simultaneous forming of axle by three pairs of wedges, which allows to significantly shorten the length of tools, leading to a reduction of the diameter of the rolls to an acceptable value. The correctness of the proposed solution was verified by means of numerical simulation. The shape progression of the formed axle, the effective strain, temperature and damage function distributions are presented. It is also shown how the force and torque on the rollers changes during rolling process.

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

W artykule przedstawiono innowacyjną metodę wytwarzania osi kolejowych za pomocą dwóch walców klinowych. Nowość rozwiązania polega na jednoczesnym kształtowaniu osi przez trzy pary klinów, co pozwala na znaczne skrócenie długości narzędzi, prowadzące do zmniejszenia średnicy walców do akceptowalnej wartości. Poprawność zaproponowanego rozwiązania sprawdzono na drodze symulacji numerycznej. Przedstawiono geometrię ukształtowanej osi oraz rozkłady intensywności odkształcenia, temperatury i funkcji zniszczenia. Pokazano również, jak w trakcie kształtowania zmieniają się siła i moment obrotowy na walcach.

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

### Wprowadzenie

Osie wagonowe są wielkogabarytowymi częściami produkowanymi w seriach liczących tysiące sztuk [1, 2]. Obecnie tego typu wyroby są wytwarzane metodami kucia swobodnego oraz kucia na kowarkach. W przypadku kucia swobodnego używa się pras hydraulicznych o nacisku 8÷15 MN, które są sprzężone z dwoma manipulatorami. Wsad do kucia stanowią wlewki o przekroju poprzecznym okrągłym lub kwadratowym, a czas wykonania pojedynczej osi wynosi kilkanaście minut. Zastosowanie kowarek skraca czas wytworzenia osi (do ok. 4 min) oraz prowadzi do zmniejszenia naddatków na obróbkę mechaniczną. W tym przypadku wykorzystywane są maszyny czteromłoteczkowe o nacisku 6,5 MN dla każdego z narzędzi.

W celu zwiększenia wydajności wytwarzania oraz zmniejszenia energochłonności produkcji osi wagonowych obecnie prowadzi się dość intensywne prace nad wykorzystaniem technologii walcowania skośnego lub poprzecznego. W procesie walcowania skośnego osiowosymetryczny wyrób jest kształtowany w wyniku sprzężenia ruchów trzech rolek (obracających się w tę samą stronę) oraz przesuwanego osiowo uchwyty, w którym mocuje się jeden z końców obrabianego przedmiotu. Rolki wykonują ruch obrotowy, a poza tym mogą być przemieszczane w kierunku prostopadłym do osi obrotu wsadu, dzięki czemu uzyskuje się możliwość zmiany średnicy kształtowanego wyrobu. Wstępne symulacje numeryczne [2, 3] pokazały, że tą metodą można skutecznie wytwarzać osie wagonowe – zarówno pełne, jak i drażone. Jak wykazano przy tym w pracy [4], proces walcowania skośnego wymaga zastosowania stosunkowo niewielkich sił i momentów. Ogromną zaletą walcowania skośnego jest także możliwość stosowania tych samych narzędzi (rolek stożkowych) do wytwarzania wyrobów o różnych kształtach [5, 6]. Problemem walcowania skośnego jest brak obrabiarek sterowanych numerycznie, które pozwalałyby na realizację tego procesu kształtowania. Dopiero powstają pierwsze instalacje, które umożliwią zweryfikowanie proponowanych rozwiązań w warunkach laboratoryjnych. Jedną z takich walcarek jest budowana na Politechnice Lubelskiej.

Z zupełnie innymi problemami mamy do czynienia w przypadku procesu walcowania poprzeczno-klinowego (WPK), który jest intensywnie wykorzystywany w warunkach przemysłowych już od lat 60. XX wieku [7]. W tym przypadku główny problem stanowi rozmiar osi kolejowych, co przekłada się na gabaryty maszyn i narzędzi. W klasycznym rozwiązaniu, w którym kolejne stopnie osi są kształtowane sukcesywnie, jeden po drugim, średnica walców może sięgać 3 m, co jest wartością nierealną. Dlatego poszukuje się alternatywnych rozwiązań. Jedno z nich, opracowane na Politechnice Lubelskiej [8], polega na walcowaniu osi w dwóch etapach. Najpierw kształtowany jest stopień centralny, a następnie (drugą parą walców) – stopnie skrajne. To rozwiązanie zapewnia zmniejszenie średnicy narzędzi do 1200 mm oraz wyeliminowanie ryzyka powstawania pęknięć wewnętrznych. Mankamentem tej metody jest natomiast konieczność

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

przemieszczania przedmiotu obrabianego z jednej pary walców do drugiej, co może pogorszyć dokładność kształtowania. Inna koncepcja bazuje na możliwości kształtowania osi kolejowych metodą walcowania wieloklinowego [9, 10], w której na obrabiany przedmiot jednocześnie oddziałują dwie lub trzy pary klinów. Takie rozwiązanie pozwala na znaczne zmniejszenie nominalnej średnicy walców – do wartości możliwych do zastosowania. Największe budowane obecnie walcarki do WPK typu D46-1500 mają walce o średnicy do 1500 mm i umożliwiają kształtowanie wyrobów w gabarytach  $\varnothing 160 \times 1300$  mm. Te maszyny stosunkowo łatwo da się rozbudować do wersji umożliwiającej kształtowanie osi kolejowych. Dlatego też postanowiono opracować koncepcję rozwiązania własnego narzędzia (walców) wieloklinowych, przeznaczonych do kształtowania osi kolejowych przy założeniu, że odległość między osiami walców wynosi 1500 mm. To rozwiązanie przedstawiono w niniejszym artykule.

### Koncepcja walcowania oraz zastosowany model numeryczny

Analizą objęto kształtowanie osi kolejowej, której kształt i wymiary przedstawiono na rys. 1. Przyjęto, że proces kształtowania będzie przebiegał z użyciem wsadu cylindrycznego o średnicy równej średnicy największego stopnia osi, tj.  $\varnothing 214$  mm. Długość wsadu wyliczono na podstawie objętości osi, którą powiększono o niewielki naddatek na odpady boczne materiału. Ostatecznie przyjęto, że długość wsadu jest równa 1645 mm.

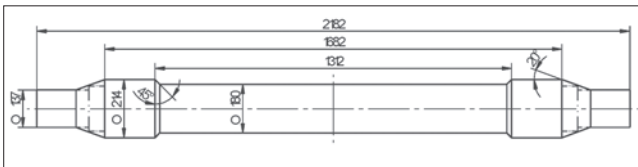


Fig. 1. Railway axle in rolled version  
Rys. 1. Oś wagonowa w wersji walcowanej

Założono, że kształtowanie zostanie zrealizowane przy pomocy dwóch walców wieloklinowych, z których jeden pokazano na rys. 2. Osie walców są równoległe do osi wsadu i oddalone od niej o 750 mm. Na każdym z walców są nacięte trzy kliny (centralny oraz dwa boczne), które jednocześnie kształtują oś. Klin centralny odpowiada za wykonanie stopnia centralnego osi o średnicy  $\varnothing 180$  mm i jest charakteryzowany przez kąt rozwarcia  $\beta = 13^\circ$  oraz kąt kształtujący  $\alpha = 15^\circ$ . Klipy boczne służące do wykonania czopów osi (o średnicy  $\varnothing 137$  mm) mają mniejsze kąty rozwarcia  $\beta = 10^\circ$  oraz większe kąty kształtujące  $\alpha = 25^\circ$ . Ponadto te klipy są nachylone do płaszczyzny symetrii walca pod kątem  $\theta = 4,2^\circ$ . To odchylenie ma za zadanie rekompensować wydłużenie przedmiotu obrabianego występujące w następstwie kształtowania klinem centralnym.

Kształtowanie osi jest realizowane w trakcie jednego obrotu walców. Walce są wyposażone w strefę wejściowo-wyjściową (zajmującą 1/12 obrotu wal-

ców), w której mają gładką powierzchnię cylindryczną o średnicy  $\varnothing 1280$  mm. Po wykonaniu obrotu robocze walce są zatrzymywane w położeniu, w którym ta strefa ogranicza – od dołu i od góry – przestrzeń roboczą walcarki, co umożliwia wypchnięcie z niej ukształtowanej osi kolejowej, po czym następuje załadunek kolejnego wsadu. Oprócz tego przestrzeń robocza jest ograniczona przez dwie listwy boczne, które utrzymują przedmiot obrabiany we właściwej pozycji podczas walcowania.

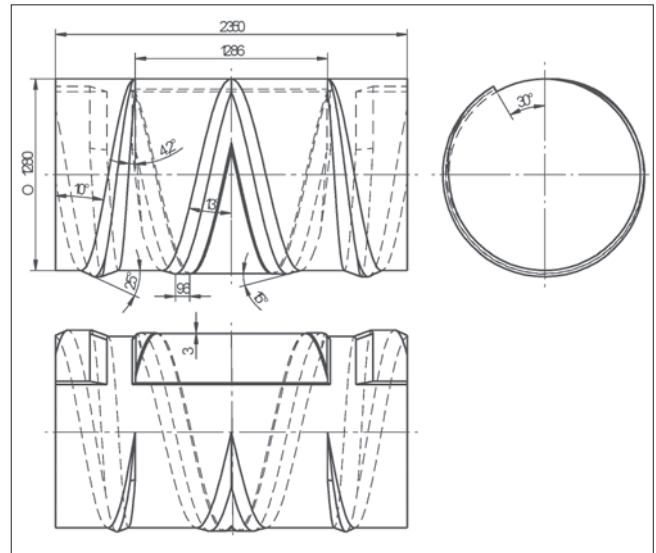


Fig. 2. Wedge roller for shaping the railway axle with the most important dimensions marked  
Rys. 2. Walec klinowy do kształtowania osi wagonowej z zaznaczonymi ważniejszymi wymiarami

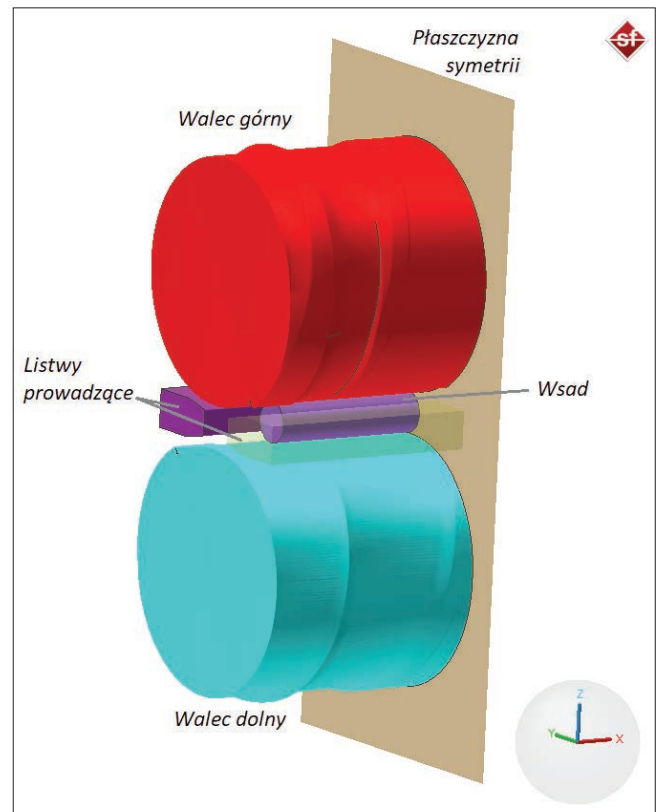


Fig. 3. Geometric model of the cross-wedge rolling process of the railway axle, taking into account the symmetry of shaping  
Rys. 3. Model geometryczny procesu walcowania poprzeczno-klinowego osi wagonowej, uwzględniający symetrię kształtowania

Do sprawdzenia poprawności proponowanego rozwiązania zbudowano model procesu (w programie Simufact.Forming), który pokazano na rys. 3. Dla uproszczenia obliczeń wykorzystano symetrię procesu i rozpatrzono kształtowanie połowy osi. Założono, że wszystkie narzędzia zachowują się jak ciała doskonale sztywne, podczas gdy przedmiot obrabiany zachowuje się jak ciało sztywno-plastyczne. Model materiałowy osi, tj. stali 42CrMo4, przyjęto z biblioteki oprogramowania. Założono, że:

- wsad przed walcowaniem był nagrany w całej objętości do temperatury 1200°C,
- temperatura narzędzi w trakcie kształtowania była stała i wynosiła 250°C dla walców oraz 350°C dla listew prowadzących, a współczynnik wymiany ciepła był równy 10 000 W/m<sup>2</sup>K.

Ponadto przyjęto, że walce obracają się z prędkością 4 obr./min. Tarcie zamodelowano, korzystając z modelu tarcia stałego, ze współczynnikiem tarcia równym 0,8.

Obrabiany przedmiot modelowano za pomocą elementów prostopadłościennych, przyjmując, że rozmiar elementu jest równy 9 mm. W trakcie obliczeń stosowano przebudowę siatki, jeżeli przyrost intensywności odkształcenia przekraczał 0,4.

## Uzyskane wyniki

Analiza numeryczna potwierdziła słuszność przyjętej koncepcji wykonywania osi kolejowej. Na rys. 4 przedstawiono przebieg kształtowania osi w funkcji czasu. Wyniki obliczeń pokazują, że proces walcowania jest stabilny i na żadnym etapie kształtowania nie występuje ograniczenie w postaci niekontrolowanego poślizgu. Tym samym potwierdzono prawidłowość doboru kątów rozwarcia klina  $\beta$ , kątów kształtujących  $\alpha$  oraz kąta odchylenia klinów bocznych  $\theta$ .

Na rys. 5 przedstawiono rozkłady intensywności odkształcenia w widoku bocznym oraz w przekroju osiowym. Jak pokazano, wielkość odkształceń zależy od redukcji przekroju poprzecznego. Tam, gdzie redukcja jest większa, większe są również wartości odkształceń. Poza tym większe odkształcenia występują w warstwach przypowierzchniowych, gdzie są wywoływane intensywnym płynięciem materiału w kierunku obwodowym, które jest powodowane siłami tarcia na powierzchni kontaktu materiał-walce. Odnotowany powierzchniowy charakter płynięcia materiału jest typowy dla procesów walcowania poprzecznego [7]. Efektem stwierdzonego płynięcia materiału jest utworzenie na czołowych powierzchniach czopów skrajnych wklęsłości, które należy usunąć w trakcie obróbki wiórowej osi.

Pomimo stosunkowo długiego czasu kształtowania temperatura materiału w odwalcowanej osi nie ulega zbyt niemu zmniejszeniu. Zgodnie z danymi pokazanymi na rys. 6 temperatura na powierzchni obrabianego przedmiotu mieści się w przedziale 960÷1120°C, a w jego środku jest większa nawet o ok. 60°C. Można zatem stwierdzić, że parametry procesu walcowania zostały dobrane prawidłowo, gdyż temperatura materiału do końca kształtowania

zawiera się w przedziale właściwym dla obróbki plastycznej na gorąco.

Zaprojektowany proces wytwarzania drążonej osi kolejowej nie stwarza warunków sprzyjających pękaniu materiału. Świadczą o tym rozkłady funkcji zniszczenia wyznaczone na podstawie znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama, pokazane na rys. 7. Maksymalne wartości tego parametru w stopniu centralnym są mniejsze niż 1, a w czopach skrajnych nie przekraczają wartości 2. Zgodnie z rezultatami badań Patera i in. [11] do pęknięcia materiału podczas walcowania poprzecznego i skośnego dochodzi (w temperaturze 1150°C), gdy wartości te wynoszą 2,46.

Proces WPK drążonej osi kolejowej przebiega przy dużych parametrach siłowo-energetycznych. Zgodnie z rys. 8 maksymalne wartości sił promieniowych (rozporowych) wynoszą blisko 7 MN. Siła promieniowa odnosi się do kształtowania całej osi i powinna być wzięta pod uwagę przy projektowaniu korpusu walcarki. Przyjęcie zbyt lekkiej konstrukcji walcarki może wpłynąć na wystąpienie zbyt dużych odchyłek średnic na kształtowanych stopniach osi.

Zapotrzebowanie na moc elektryczną walcarki można oszacować na podstawie rozkładu momentu obrotowego na walcu, pokazanego na rys. 9. Maksymalne wartości momentu występują między ósmą a dziesiątą sekundą procesu, tj. pod koniec strefy kształtowania, i wynoszą ok. 1270 kNm (dla każdego z walców). Wymaganą moc silnika służącego do napędu każdego z walców (po uwzględnieniu nadwyżki na ewentualne dodatkowe opory) można więc oszacować na ok. 600 kW. Ta wartość nie jest zbyt duża w odniesieniu do walcarek wykorzystywanych w hutnictwie. Z kolei biorąc pod uwagę, że średni moment walcowania dla całego cyklu kształtowania wynosi 876,9 kNm, wyznaczona energia potrzebna do ukształtowania pojedynczej osi jest równa 5140 kJ.



Fig. 4. Shape progression of the railway axle during the analyzed cross-wedge rolling process

Rys. 4. Progresja kształtu osi wagonowej w trakcie analizowanego procesu walcowania poprzeczno-klinowego

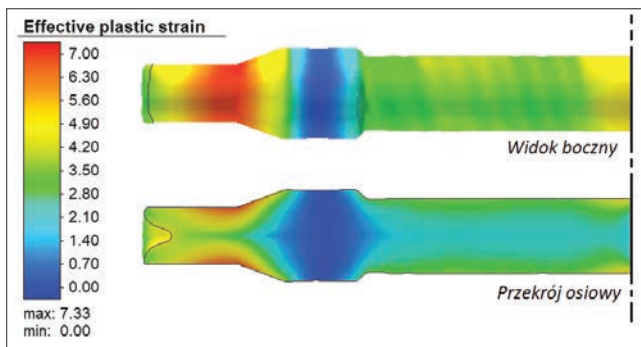


Fig. 5. Distribution of the effective strain in the railway axle obtained in the cross-wedge rolling process

Rys. 5. Rozkład intensywności odkształcenia w osi wagonowej otrzymanej w procesie walcowania poprzeczno-klinowego

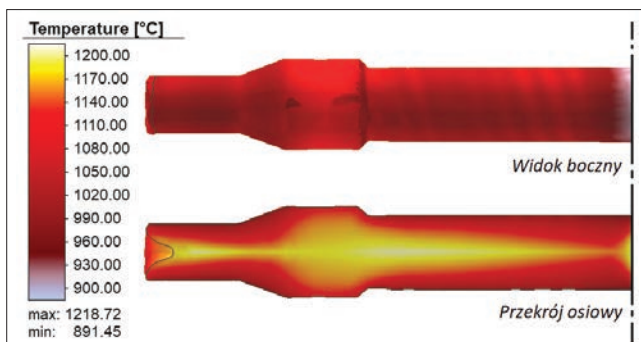


Fig. 6. Temperature distribution in the railway axle obtained in the cross-wedge rolling process

Rys. 6. Rozkład temperatury w osi wagonowej otrzymanej w procesie walcowania poprzeczno-klinowego

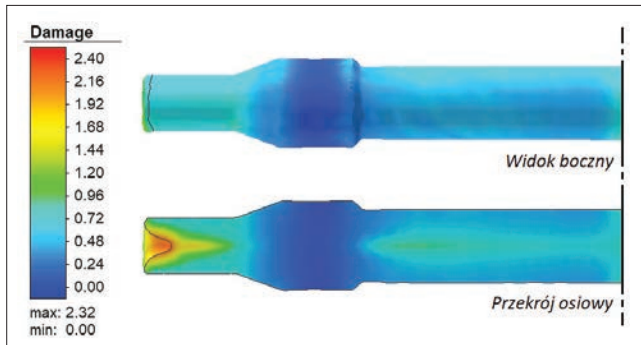


Fig. 7. Distribution of the damage function (calculated on the basis of the normalized Cockroft–Latham criterion) in the railway axle obtained in the cross-wedge rolling process

Rys. 7. Rozkład funkcji zniszczenia (obliczonej na podstawie znormalizowanego kryterium Cockrofta–Lathama) w osi wagonowej otrzymanej w procesie walcowania poprzeczno-klinowego

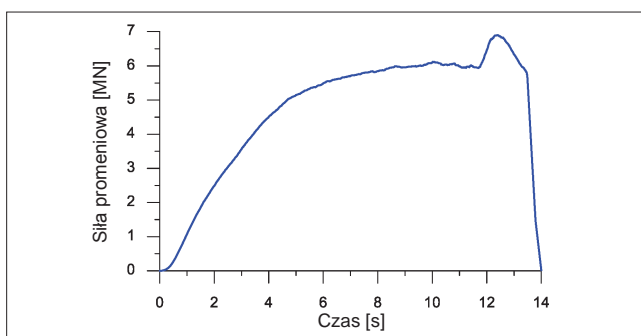


Fig. 8. Distribution of the total radial (expansion) force acting on the roller in the cross-wedge rolling process of the railway axle  
Rys. 8. Rozkład całkowitej siły promieniowej (rozporowej), działającej na walec w procesie walcowania poprzeczno-klinowego osi wagonowej

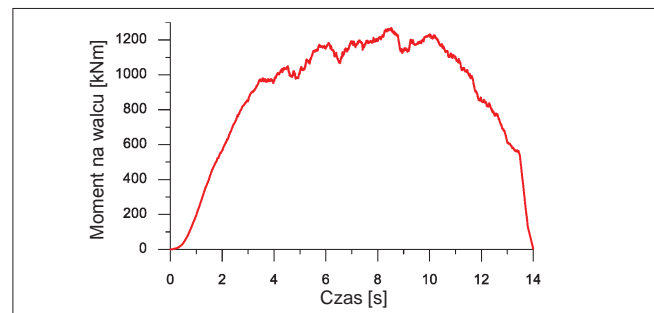


Fig. 9. Distribution of total roller torque in the cross-wedge rolling process of the railway axle

Rys. 9. Rozkład całkowitego momentu obrotowego walca w procesie walcowania poprzeczno-klinowego osi wagonowej

## Wnioski końcowe

- Za pomocą opracowanej metody walcowania wałkami wieloklinowymi będzie można skutecznie kształtować osie kolejowe.
- Osie kolejowe wytworzone metodą walcowania klinowego powinny być wolne od wad wewnętrznych w postaci pęknięć wzdłużnych.
- Mimo stosunkowo długiego czasu kształtowania temperatura przedmiotu obrabianego utrzymuje się w zakresie właściwym dla obróbki plastycznej na gorąco.
- Realizacja proponowanej metody wytwarzania osi kolejowych wymaga zastosowania walcarki o odległości między osiami walców równej 1500 mm i korpusie zdolnym do przenoszenia obciążeń na poziomie 7 MN.
- Moc walcarki zapewniającej kształtowanie osi kolejowych (pracującej z prędkością obrotową walców 4 obr/min) szacuje się na  $2 \times 600$  kW.

## LITERATURA

- [1] Shu X., Wei X., Li C., Hu Z. "The influence rules of stress about technical parameters on synchronous rolling railway axis with multi-wedge cross-wedge rolling". *Appl. Mech. Mater.* 37–38 (2010): 1482–1488, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.37-38.1482>.
- [2] Xu C., Shu X. "Influence of process parameters on the forming mechanics parameters of the three-roll skew rolling forming of the railway hollow shaft with 1:5". *Metalurgija*. 57, 3 (2018): 153–156.
- [3] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. "Numerical analysis of the skew rolling process for rail axles". *Arch. Metall. Mater.* 60, 1 (2015): 415–418, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0068>.
- [4] Pater Z. "FEM analysis of loads and torque in a skew rolling process for producing axisymmetric parts". *Arch. Metall. Mater.* 62, 1 (2017): 85–90, <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0011>.
- [5] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. "Numerical analysis of the skew rolling process for main shaft". *Metalurgija*. 54, 4 (2015): 627–630.
- [6] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. "Numerical analysis of a skew rolling process for producing a stepped hollow shaft made of titanium alloy Ti6Al4V". *Arch. Metall. Mater.* 61, 2 (2016): 677–682, <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0115>.
- [7] Pater Z. *Cross wedge rolling*, in: Button S.T. (ed.). *Comprehensive Materials Processing*. 3 (2014): 211–279. Elsevier Ltd.
- [8] Pater Z., Tomczak J. "A new cross wedge rolling process for producing rail axles". *MATEC Web of Conferences*. 190, 11006 (2018): 1–8, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819011006>.
- [9] Peng W., Zheng S., Chiu Y., Shu X., Zhan L. "Multi-wedge cross wedge rolling process of 42CrMo4 large and long hollow shaft". *Rare Metal Mat. Eng.* 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).
- [10] Zheng S., Shu X., Han S., Yu P. "Mechanism and force-energy parameters of a hollow shaft's multi-wedge synchrostep cross-wedge rolling". *J. Mech. Sci. Technol.* 33, 5 (2019): 1–10, <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0411-1>.
- [11] Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Wójcik Ł., Walczuk P. "Assessment of ductile fracture criteria with respect to their application in the modeling of cross wedge rolling". *J. Mater. Process. Technol.* 278 (2020): 116501, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116501>.