

WPŁYW KSZTAŁTU POWIERZCHNI ROBOCZEJ ROLEK PROSTUJĄCYCH PROSTOWNIC PIONOWEJ I POZIOMEJ NA STAN NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W SZYNIE KOLEJOWEJ – ETAP DRUGI BADAŃ

THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF WORKING SURFACE OF STRAIGHTENING ROLLERS OF VERTICAL AND HORIZONTAL STRAIGHTENING MACHINES ON THE STATE OF RESIDUAL STRESSES IN RAILWAY RAIL – SECOND STAGE OF RESEARCHES

W artykule przedstawiono wyniki drugiego etapu prac nad wpływem kształtu rolek prostownic na stan naprężeń własnych w szynach prowadzonych w ramach projektu dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Badania obejmowały symulacje numeryczne procesu prostowania szyn z zastosowaniem nowego kalibrowania rolek prostownic pionowej oraz poziomej, wyznaczenie map rozkładu naprężeń w szynie po prostowaniu w kolejnych rolkach obu prostownic, a także pomiary naprężeń własnych w szynach po operacji prostowania w warunkach przemysłowych. Badania wykonano na szynach typu 60E1 w gatunku R260. Uzyskano zmniejszenie naprężeń własnych rozciągających w środku osi symetrii stopki szyny, aż do średnich wartości 32 MPa tj. o ponad czterokrotnie mniej w stosunku do poziomu osiąganego przy użyciu tradycyjnej technologii.

Słowa kluczowe: szyna kolejowa, naprężenia własne, proces prostowania, rolki prostujące

1. WPROWADZENIE

Szyna kolejowa stanowi najważniejszy i zarazem najdroższy element infrastruktury kolejowej, dlatego też stawiane są jej wysokie wymagania odnośnie wysokiego poziomu właściwości mechanicznych, w tym odporności na kruche pęknięcie, wytrzymałości zmęczeniowej i odpowiedniego poziomu wskaźnika szybkości rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [1÷9]. Nowoczesne szyny kolejowe muszą charakteryzować się także wysokimi cechami geometrycznymi, przede

The paper presents the results of the second stage of work on the influence of the shape of straightening rollers on the state of residual stresses in rails, conducted as part of a project co-financed by the National Centre for Research and Development. The tests included numerical simulations of the rail straightening process using a new roll pass design of vertical and horizontal straightener rollers, determination of stress distribution maps in the rail after straightening in successive rollers of both straightening machines, as well as measurement of residual stresses in the rails after straightening operation in industrial conditions. The tests were carried out on R260 grade 60E1 rails. The reduction of tensile residual stresses in the centre of symmetry axis of the rail foot was obtained up to an average level of 32 MPa, i.e. by more than four times less in relation to the level achieved using traditional technology.

Keywords: railway rail, residual stresses, straightening process, straightening rollers

1. INTRODUCTION

The rail is the most important and also the most expensive element of the railway infrastructure, which is why high requirements are set for a high level of mechanical properties, including resistance to brittle cracking, fatigue strength and an appropriate level of fatigue crack development rate [1–9]. Modern railway rails must also have high geometrical features, above all, low dimensional deviations and straightness along the entire length of the rails. European standard

wszystkim niskimi odchyłkami wymiarowymi i prostością na całej długości szyn. Europejska norma EN 13674-1 [9] dopuszcza maksymalną odchyłkę prostości w płaszczyźnie pionowej 0,3 mm na długości pomiarowej 3 m. Tak szczególne wymagania w zakresie wynikają z konieczności obniżenia amplitudy drgań w płaszczyźnie pionowej szyny podczas eksploatacji toru. Dotrzymanie tak wysokich parametrów prostości w sposób nieunikniony wiąże się z wprowadzeniem naprężeń własnych do szyny podczas operacji prostowania.

Znaczenie naprężeń własnych w szynach związane jest z ich bezpośrednim wpływem na zachowanie się szyny w torze. Wynika to z sumarycznego oddziaływania naprężeń własnych z naprężeniami termicznymi i dynamicznymi pochodzącymi od eksploatacji. Dlatego też, średni poziom naprężeń eksploatacyjnych zależy wprost od wielkości naprężeń własnych w szynie odziedziczonych po procesie produkcji. Obniżenie naprężeń własnych skutkuje zmniejszeniem naprężeń eksploatacyjnych, co w rezultacie prowadzi do spowolnienia rozwoju pęknięć inicjowanych przez powierzchniowe lub podpowierzchniowe nieciągłości lub zmiany strukturalne występujące w główce lub stopce szyny.

Parametrem wyrażającym odporność na pękanie materiałów jest współczynnik intensywności naprężeń, który zależy między innymi od przyłożonego naprężenia oraz długości pęknięcia. Ma on bezpośredni wpływ na trwałość eksploatacyjną szyn w torze, także w aspekcie rozwijania się w warstwie przypowierzchniowej główki szyny wad kontaktowo-zmęczeniowych RCF (Rolling Contact Fatigue). Wady te powstają od naprężeń będących wynikiem oddziaływania kół przejeżdżających pociągów i w sposób istotny wpływają na bezpieczeństwo transportu kolejowego. Prowadzą do rozwoju pęknięć powierzchniowych, które następnie propagują w głąb materiału szyny, co może doprowadzić do pęknięcia szyny, a tym samym spowodować przerwę w toku szynowym. W szczególności należy tutaj wymienić wady typu head checking (Rys. 1), squat i wybuksowania (Rys. 2). Head checking obserwowany jest jako drobne pęknięcia występujące w odległości od siebie od 2 do 20 mm na krawędzi jezdnej zewnętrznej szyny w łukach, na szynach iglicowych w rozjazdach oraz sporadycznie na prostych odcinkach toru. Przyczyną powstawania tego typu wad są naprężenia stykowe powodujące zmęczenie powierzchni kontaktu tocznego i silne deformacje plastyczne, skutkujące przekroczeniem sił spójności materiału i tworzeniem się pęknięć, początkowo rozwijających się prawie równoległe

EN 13674-1 [9] allows a maximum straightness deviation in the vertical plane of 0.3 mm over a measuring length of 3 m. Such specific requirements in the range result from the need to reduce the vibration amplitude in the vertical plane of the rail during track use. Compliance with such high straightness parameters is inevitably associated with the introduction of residual stresses into the rail during the straightening operation.

The significance of residual stresses in rails is related to their direct impact on rail behaviour. This is due to the total interaction of residual stresses with thermal and dynamic stresses from the use. Therefore, the average level of operating stresses directly depends on the value of residual stresses in the rail inherited from the production process. The reduction of residual stresses results in a reduction of operational stresses, which as a result slows down the development of cracks initiated by surface or subsurface discontinuities or structural changes occurring in the rail head or foot.

The parameter expressing resistance to cracking of materials is the stress intensity coefficient, which depends, among others, on the applied stress and the length of the crack. It has a direct impact on the service life of the rails in the track, also in the aspect of developing rolling contact fatigue (RCF) defects in the subsurface layer of the rail head. These defects are formed by stresses resulting from the impact of the wheels of passing trains and significantly affect the safety of rail transport. They cause the development of surface cracks, which then propagate deep into the rail material, which can lead to rail rupture, and thus cause a discontinuity in the rail track. In particular, head checking defects (Fig. 1), squats and wheel burns (Fig. 2) should be mentioned here. Head checking is observed as small cracks occurring at a distance of 2 to 20 mm from each other on the running edge of the outer rail in arches, on switch rails in switches and occasionally on straight sections of the track. The reason for this type of defect is contact stress causing fatigue of the rolling contact surface and strong plastic deformation, resulting in exceeding the material coherence forces and the formation of cracks, initially developing almost parallel to the rolling surface, at the final stage propagating at an angle of 90° deep into the rail head material. Squats are defects occurring mainly in straight sections of the track and are dependent on the waviness of the rolling surface or weld, as well as small periodic defects on the rolling surface. The formation and propagation of squat defects is associated with the plastic flow of material on the rolling surface of



Rys. 1. Wada typu head checking, fot. Sylwester Żak
Fig. 1. Head checking defect, photo Sylwester Żak



Rys. 2. Wybuksowanie, fot. Sylwester Żak
Fig. 2. Wheel burn, photo Sylwester Żak

do powierzchni tocznej, w końcowym etapie propagujących pod kątem 90° w głąb materiału główki szyny. Squat to wady występujące głównie w prostych odcinkach toru i uwarunkowane są pofalowaniem powierzchni jezdnej albo spoiny, a także niewielkimi okresowymi ubytkami na powierzchni tocznej. Powstawanie i propagacja wad typu squat związana jest z plastycznym płynięciem materiału na powierzchni tocznej główki szyny. Płynięcie to jest skutkiem chwilowych przeciążeń dynamicznych pochodzących od zwiększonej prędkości jazdy pociągów. W pierwszej fazie pojawiają się podpowierzchniowe pęknięcia, które następnie powodują odrywanie się cienkich łusek materiału szyny od powierzchni tocznej. Wybuxowania powodowane są przypaleniami od kół w wyniku ogrzewania tarcowego wytwarzanego przez poślizg zestawu kołowego. Prowadzi to do gwałtownego wzrostu temperatury, a następnie intensywnego ochładzania, co prowadzi do przemiany struktury górnej warstwy główki szyny z perlitu na martenzyt. Martenzyt jako bardzo krucha faza łatwo ulega wykruszeniu powodując inicjację mikropęknięć na powierzchni główki. Wady typu squat i wybuxowania mają podobny obraz w torze i prowadzą do wykruszania się powierzchni główki. Różnica jest jednak taka, że wybuxowania występują parami, w tym samym miejscu na obu szynach toru, natomiast dla squatów nie jest obserwowana taka zależność.

Wielkość i rozkład naprężeń własnych w szynie w sposób bezpośredni przekłada się na właściwości eksploatacyjne szyn, a tym samym na bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Wiodący producenci szyn prowadzą zatem badania nad zmniejszeniem poziomu naprężeń własnych i optymalizacją ich rozkładu w szynach po końcowym etapie produkcji, jakim jest prostowanie szyn w zespole prostownic. W ArcelorMittal Poland S.A. realizowane są szeroko zakrojone prace nad wpływem kalibrowania walców i rolek prostownic na stan naprężeń własnych w szynach kolejowych w ramach projektu POIR.01.02.00-00-0167/16 dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pod tytułem „Innowacyjne i bezpieczne szyny z niskim poziomem naprężeń własnych w stopce szyny”. W artykule [10] przedstawiono wyniki pierwszego etapu prac nad wpływem kształtu rolek prostownic pionowej na poziom naprężeń. Niniejszy artykuł stanowi podsumowanie badań wykonanych w ramach etapu drugiego projektu poszerzonego o zastosowanie rolek kształtowych na prostownicy poziomej i wariantowego użycia rolek kształtowych na prostownicy pionowej.

2. ZAKRES BADAŃ

Proces walcowania szyn odbywa się powyżej temperatury rekrytalizacji dlatego należy przyjąć, że nie wprowadza naprężeń własnych do wyrobu. Jednak podczas chłodzenia szyn, w związku z nierównomiernym podziałem masy na poszczególne części szyny tj.: główkę, szyjkę i stopkę, a tym samym nierównomiernym rozkładem temperatury w tych elementach szyny i przesuniętymi w czasie początkami przemian fazowych wprowadzane są już naprężenia. Dodatkowym czynnikiem mającym istotny wpływ na poziom naprężeń w gotowym wyrobie jest krzywizna szyny po procesie chłodzenia. Obserwowana jest następująca prawidłowość: im mniejsza krzywizna przed podaniem do prostownicy tym mniejsze siły potrzebne są do wyprostowania szyny, co skutkuje wprowadzaniem mniejszej energii do wyrobu. W wyniku przeprowadzonych badań [11] określono, że przeciętne wartości i odchylenia standardowe wzdłużnych naprężeń własnych po chłodzeniu są na następującym poziomie:

the rail head. This flow is the result of temporary dynamic overloads due to the increased speed of trains. In the first phase, subsurface cracks appear, which then cause the thin scales of the rail material to detach from the running surface. Wheel burns are caused by burns from the wheels as a result of frictional heating produced by the wheelset slip. This causes a sharp increase in temperature, followed by intensive cooling, which leads to a transformation of the structure of the upper layer of the rail head from pearlite to martensite. Martensite, as a very fragile phase, easily crumbles causing the initiation of micro-cracks on the surface of the head. Squat defects and wheel burns have a similar image in the track and lead to chipping of the head surface. The difference, however, is that wheel burns occur in pairs, in the same place on both track rails, while for squats no such relationship is observed.

The value and distribution of residual stresses in the rail directly translates into the operational properties of the rail, and thus the safety of rail traffic. Leading rail manufacturers are therefore conducting research to reduce the level of residual stresses and optimise their distribution in the rails after the final stage of production, which is straightening the rails in a straightener assembly. ArcelorMittal Poland S.A. is carrying out extensive work on the impact of calibrating straightener rollers on the state of residual stresses in rails under project POIR.01.02.00-00-0167/16 co-financed by the National Centre for Research and Development under the title “Innovative and safe rails with a low level of residual stresses in the rail foot”. Article [10] presents the results of the first stage of work on the impact of the shape of vertical straightener rollers on the stress level. This article is a summary of the research carried out as part of the second stage of the project extended to the use of profile rollers on a horizontal straightener and the optional use of profile rollers on a vertical straightener.

2. SCOPE OF STUDY

The rail rolling process takes place above the recrystallisation temperature, therefore it should be assumed that it does not introduce residual stresses into the product. However, during rail cooling, due to the uneven weight distribution into individual parts of the rail, i.e. head, web and foot, and thus the uneven temperature distribution in these rail components, and the time-shifted beginnings of phase transitions, stresses are already being introduced. An additional factor having a significant impact on the level of stress in the finished product is the curvature of the rail after the cooling process. The following regularity is observed: the smaller the curvature before feeding to the straightener, the lesser forces are needed to straighten the rail, which results in the introduction of less energy into the product. As a result of the tests [11], it was determined that the average values and standard deviations of longitudinal residual stresses after cooling are at the following level:

- stopka 107 ± 7 MPa,
- szyjka -34 ± 11 MPa,
- główka -10 ± 12 MPa.

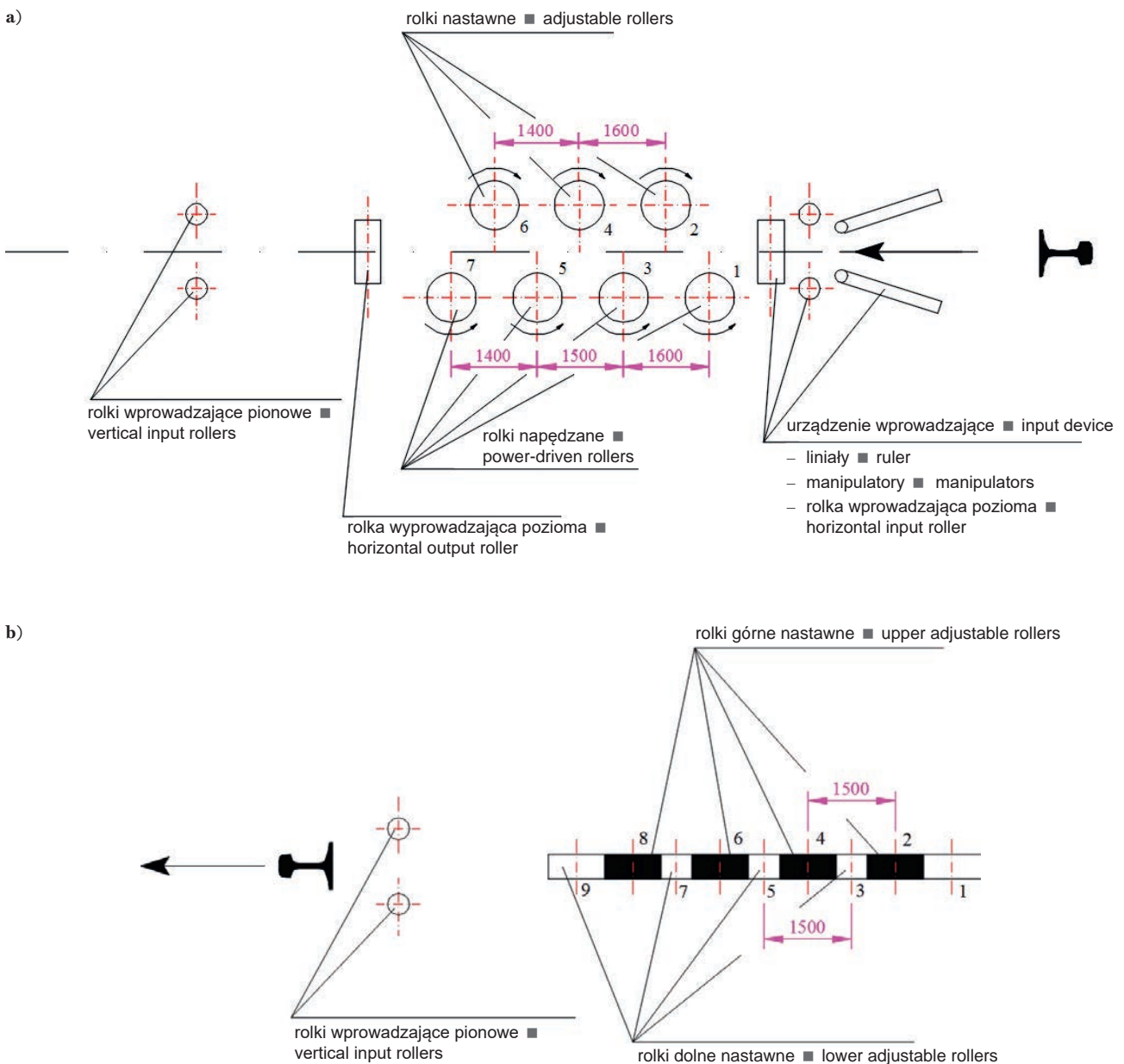
W znacznej części pokrywają się one z dostępnymi danymi literaturowymi mówiącymi, że szyna po chłodzeniu, a przed prostowaniem ma stosunkowo niewielkie naprężenia własne zmieniające się na jej wysokości w przedziale od około -50 MPa w szyjce do około +50 MPa w główce i stopce szyny [12].

Prostowanie szyn w zespole prostownic składającym się z prostownicy pionowej i poziomej jest tym etapem procesu wykańczania szyn, który wprowadza największe naprężenia własne. Efekt prostowania wynika z tego, że szyna podczas przejścia przez rolki prostownic doznaje naprzemiennych przegięć sprężysto-plastycznych. Podczas prostowania szyny wokół osi symetrii Y-Y wykonywane jest około 85% całkowitej potrzebnej dla procesu prostowania pracy odkształcenia [13].

- foot 107 ± 7 MPa
- web -34 ± 11 MPa
- head -10 ± 12 MPa.

They largely coincide with the available literature data saying that after cooling and before straightening, the rail has relatively low residual stress varying in its height from about -50 MPa in the web to about +50 MPa in the head and foot of the rail [12].

Straightening of rails in a set of straighteners consisting of a vertical and horizontal straightener is the stage of the rail finishing process that introduces the highest residual stresses. The straightening effect results from the fact that the rail experiences alternating elastic-plastic bends when passing through the straightener rollers. When straightening the rail around the Y-Y symmetry axis, approximately 85% of the total deformation work needed for the straightening process is performed [13].



Rys. 3. Schemat prostowania szyn w układzie prostownic a) pionowej, b) poziomej

Fig.3. Schematic diagram of straightening rails in the set of straightening machines a) vertical b) horizontal one

Z danych literaturowych wynika, iż naprężenia własne rozciągające mogą w stopce szyny miejscowo osiągać wartości powyżej 300 MPa. Producenci szyn stosując odpowiednie technologie prostowania potrafią utrzymywać naprężenia własne w stopce szyny znacznie poniżej 223 MPa [12].

Wykonane badania zarówno symulacji komputerowych jak i prostowania w istniejącej linii technologicznej przeprowadzone były dla zespołu prostownic obejmującego 7-rolkową prostownicę pionową, realizującą proces prostowania w osi Y-Y oraz prostownicę poziomą, gdzie prostowanie odbywa się w osi obojętnej szyny X-X – graficzna ilustracja została przedstawiona na rys. 3. Badania obejmowały następujący zakres:

- symulacje numeryczne procesu prostowania szyn z zastosowaniem nowego kalibrowania rolek prostownicy pionowej i poziomej,
- wyznaczenie map rozkładu naprężeń w szynie po kolejnych rolkach poszczególnych prostownic i po zakończeniu całego procesu prostowania,
- pomiary naprężeń własnych metodą tensometryczną w szynach po operacji prostowania w warunkach przemysłowych.

2.1. KALIBROWANIE ROLEK PROSTOWNICY

Założenia odnośnie kalibrowania rolek prostownic zmierzające do obniżenia końcowego poziomu naprężeń własnych w stopce szyny po prostowaniu zostały szczegółowo przedstawione w artykule [10], w ramach 2 etapu projektu zakres badań rozszerzono o nowe kalibrowanie rolek prostownicy poziomej. Celem tych badań było zmniejszenie lub wyeliminowanie wymiarów kołnierza środkowego rolek prostujących, co skutkuje zmniejszeniem ich oddziaływania na boczne powierzchnie główki szyny.

Założenia odnośnie kalibrowania rolek prostownic są pochodną ograniczonych możliwości zmiany kształtu rolek główkowych prostownicy pionowej z uwagi na ich dostosowanie do kształtu i wielkości główki szyny. W wyniku analizy wyników prac i rozważań teoretycznych zaprojektowano nowe kalibrowanie rolek stopkowych prostownicy pionowej w dwóch wariantach, tj. z rolki z mniejszą i większą wklęsłością oraz rolek główkowych prostownicy poziomej również w dwóch wariantach tj. z małym kołnierzem środkowym oraz bez kołnierza.

2.2. SYMULACJE KOMPUTEROWE PROCESU PROSTOWANIA SZYN

W celu uwzględnienia w symulacji prostowania wpływu naprężeń własnych wytworzonych podczas chłodzenia szyny, wykonano symulację chłodzenia szyny z temperatury 900°C do temperatury otoczenia (20°C). W wyniku nierównomiernego chłodzenia szyny (grubsze części szyny chłodzą się wolniej) następuje jej wyginanie najpierw w kierunku stopki, a następnie w kierunku główki. W efekcie w stopie szyny powstają naprężenia rozciągające.

Symulacje komputerowe obejmują analizę wpływu układu rolek prostownic na stan naprężeń własnych w szynie po prostowaniu w kolejnych rolkach prostownicy pionowej i poziomej oraz po zakończeniu procesu prostowania po wyjściu szyny z prostownicy poziomej. Dla przeprowadzenia symulacji numerycznej wymagane są oprócz krzywej płynięcia następujące dane materiałowe:

- moduł Younga
- współczynnik Poissona
- gęstość

Literature data show that tensile residual stresses may locally reach values above 300 MPa in the rail foot. Using appropriate straightening technologies, rail manufacturers are able to maintain their residual stresses in the rail foot well below 223 MPa [12].

The tests of both computer simulations and straightening in the existing technological line were carried out for a set of straighteners including a 7-roller vertical straightener, carrying out the straightening process in the Y-Y axis and a horizontal straightener, where straightening is carried out in the X-X neutral axis of the rail – the graphic illustration is shown in Fig. 3. The tests included the following scope:

- numerical simulations of the rail straightening process using a new roll pass design of vertical and horizontal straightener rollers,
- determination of stress distribution maps in the rail after successive rollers of individual straighteners and after the entire straightening process,
- measurement of residual stresses using the strain gauge method in rails after straightening operations in industrial conditions.

2.1. ROLL PASS DESIGN OF STRAIGHTENING ROLLERS

The assumptions regarding the roll pass design of straightener rollers aiming at lowering the final level of residual stresses in the rail foot after straightening have been presented in detail in article [10]; as part of the 2nd stage of the project the scope of the studies was extended to include new roll pass design of horizontal straightener rollers. The purpose of these studies was to reduce or eliminate the dimensions of the central flange of the straightening rollers, which results in a reduction of their impact on the lateral surfaces of the rail head.

The assumptions regarding the roll pass design of straightener rollers are a derivative of the limited possibilities of changing the shape of vertical straightener head rollers due to their adaptation to the shape and size of the rail head. As a result of the analysis of the results of studies and theoretical considerations, a new roll pass design of the vertical straightener foot rollers was designed in two variants, i.e. from a roller with smaller and larger concavity, and the horizontal straightener head rollers also in two variants, i.e. with a small central flange and without a flange.

2.2. COMPUTER SIMULATIONS OF THE RAIL STRAIGHTENING PROCESS

In order to take into account the effect of residual stresses generated during rail cooling in the straightening simulation, a rail cooling simulation was carried out from 900°C to ambient temperature (20°C). As a result of uneven cooling of the rail (thicker parts of the rail cool down more slowly), it bends first towards the foot and then towards the head. As a result, tensile stresses arise in the rail foot.

Computer simulations include the analysis of the influence of the straightener rollers system on the state of residual stresses in the rail after straightening in subsequent rollers of the vertical and horizontal straightener and after the straightening process is completed after the rail exits the horizontal straightener. To perform the numerical simulation, the following material data are required in addition to the flow curve:

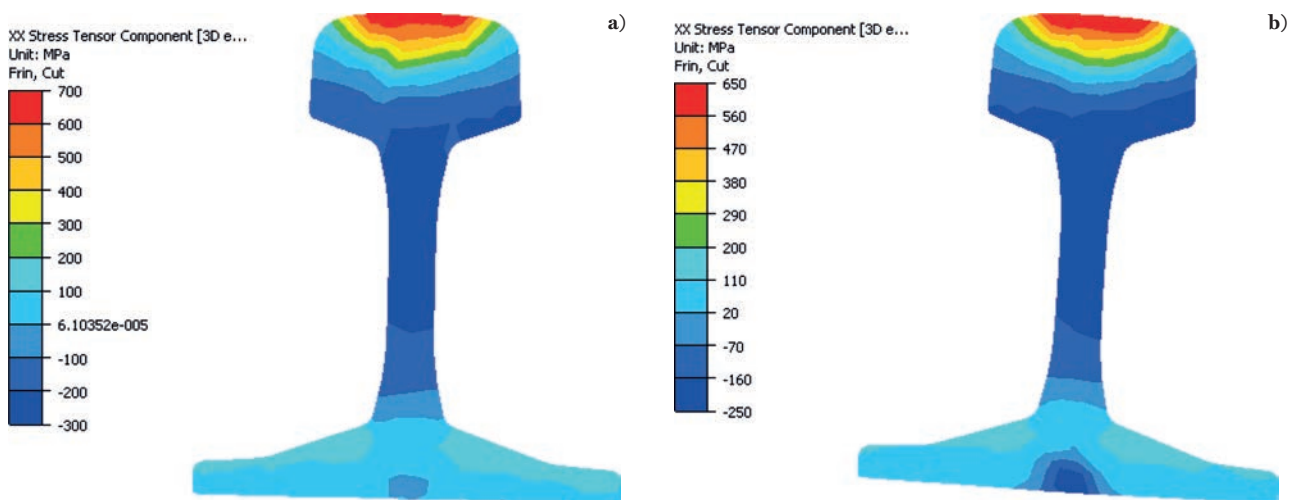
- Young's modulus
- Poisson's ratio
- density

- ciepło właściwe
- przewodność cieplna
- współczynnik rozszerzalności liniowej
- współczynnik emisyjności.

Zostały one wyznaczone w badaniach plastometrycznych lub na drodze obliczeń w programie JMatPro. Symulacje procesu prostowania przeprowadzono z wykorzystaniem programu FORGE. Obejmowały one obliczenie naprężeń własnych w poszczególnych etapach prostowania w prostownicy pionowej i poziomej dla obecnie stosowanego i nowego kalibrowania rolek dla wariantu 2, który obejmował dwie rolki kształtowe zabudowane na wałach R3 i R5 prostownicy pionowej oraz nowe rolki z małym kołnierzem i bez kołnierza na prostownicy poziomej. Na rys. 4 przedstawiono mapy rozkładów naprężeń własnych w szynie, natomiast w tabeli 1 zaprezentowano wartości naprężeń w kierunku wzdłużnym na przekroju poprzecznym po wyjściu szyny z prostownicy pionowej dla wariantu podstawowego, czyli dla dotychczas stosowanych rolek oraz wariantu nr 2 dla przyjętych punktów pomiarowych [14]. Na rys. 5 pokazano mapy rozkładu naprężeń własnych po wyjściu szyny z prostownicy poziomej, a w tabeli 2 podano wartości naprężeń własnych w kierunku wzdłużnym na przekroju poprzecznym po wyjściu szyny z prostownicy poziomej [15]. Analiza uzyskanego kształtu szyny po wyjściu z prostownicy pionowej wykazuje lekkie skrzywienie, najprawdopodobniej jej ono efektem przyjętej dyskretyzacji na elementy skończone, zarówno rolek, jak i samej szyny. W fizycznym procesie prostowania również obserwowane są pewne odstępstwa od prostości po prostownicy pionowej.

- specific heat
- thermal conductivity
- linear expansion coefficient
- emissivity coefficient.

They were determined in plastometric tests or using calculations in the JMatPro program. The simulations of the straightening process were carried out using the FORGE program. They included calculation of the residual stresses at individual straightening stages in the vertical and horizontal straightener for the current and new roll pass design of rollers for variant 2, which included two profile rollers mounted on shafts R3 and R5 of the vertical straightener and new rollers with a small flange and without a flange on the horizontal straightener. Figure 4 presents maps of residual stress distribution in the rail, while Table 1 presents the values of longitudinal stresses in the cross-section after the rail exits the vertical straightener for the basic variant, i.e. for rollers used so far, and variant 2 for the adopted measurement points [14]. Figure 5 shows maps of residual stress distribution after the rail exits the horizontal straightener, and Table 2 shows the values of longitudinal residual stresses on the cross-section after the rail exits the horizontal straightener [15]. The analysis of the obtained shape of the rail after exiting the vertical straightener shows a slight torsion; most likely it is the effect of accepted discretisation for finite elements of both the rollers and the rail itself. In the physical straightening process, there are also some deviations from the straightness after the vertical straightener.



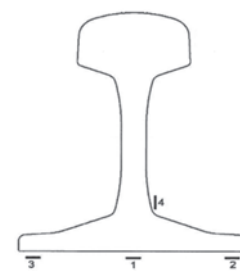
Rys. 4. Rozkład naprężeń własnych w kierunku wzdłużnym po wyjściu z prostownicy pionowej dla wariantu (a) podstawowego i wariantu nr 2 (b)

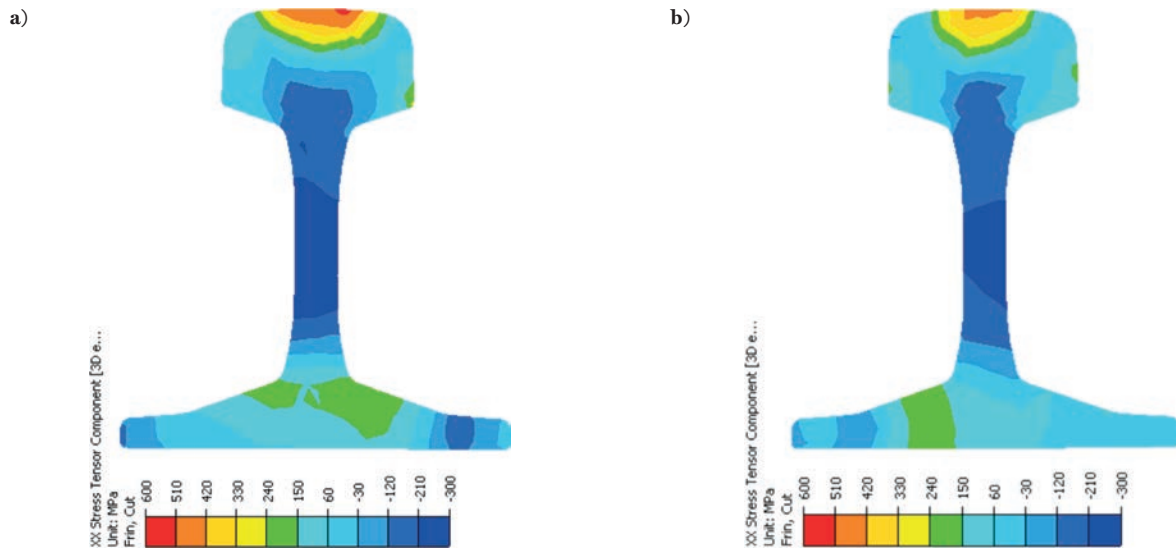
Fig. 4. The distribution of residual stresses in the longitudinal direction after leaving the vertical straightener for the variant (a) basic and variant No. 2 (b)

Tabela 1. Wartości naprężeń własnych w kierunku wzdłużnym po wyjściu szyny z prostownicy pionowej [MPa] oraz wyznaczone punkty pomiarowe

Table 1. The value of residual stresses in the longitudinal direction after the rail left the vertical straightener [MPa] and the determined measuring points

Punkt na szynie ■ Point on the rail	Symulacja ■ Simulation	
	Podstawowa ■ Basic, [MPa]	Wariant 2 ■ Variant 2 [MPa]
1	-100	-176
2	82	81
3	52	55
4	-85	-59





Rys. 5. Rozkład naprężeń własnych w kierunku wzdłużnym po wyjściu z prostownicy poziomej dla wariantu (a) podstawowego i wariantu nr 2 (b)

Fig. 5. The distribution of residual stresses in the longitudinal direction after leaving the horizontal straightener for the variant (a) basic and variant No. 2 (b)

Tabela 2. Wartości naprężeń własnych w kierunku wzdłużnym po wyjściu szyny z prostownicy poziomej [MPa] oraz wyznaczone punkty pomiarowe

Table 2. The value of residual stresses in the longitudinal direction after the rail left the horizontal straightener [MPa] and the determined measuring points

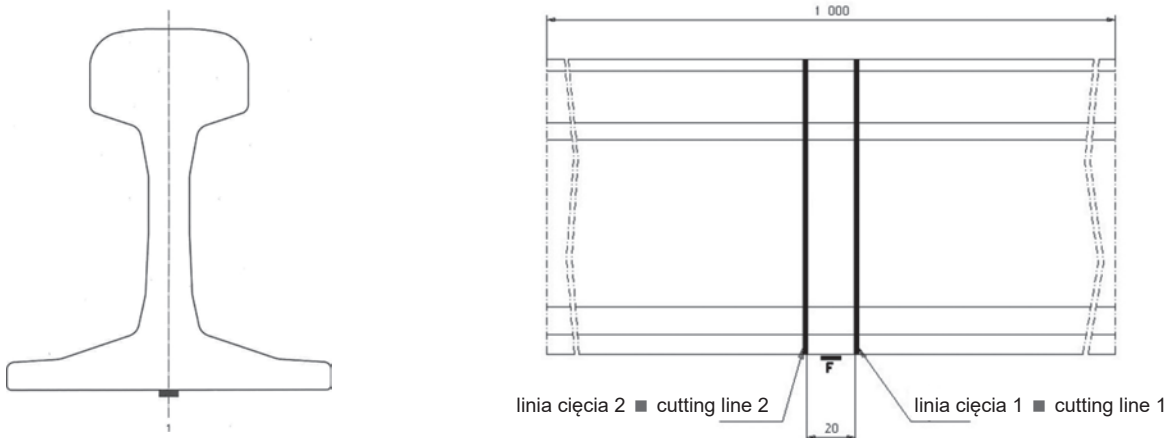
Punkt na szynie ■ Point on the rail	Symulacja ■ Simulation	
	Podstawowa ■ Basic, [MPa]	Wariant 2 ■ Variant 2 [MPa]
1	96	113
2	-85	-17
3	-50	-24
4	-37	-97

2.3. POMIAR NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W SZYNACH PO PROSTOWANIU

Metodyka pomiaru naprężeń własnych opisana jest normie EN 13674-1 [9] w punkcie 8 – jako badania kwalifikacyjne i załączniku C. Naprężenia własne w szynach mierzone są w środku dolnej powierzchni stopki metodą rozcinania (Rys. 6). Polega ona na naklejeniu czujnika ten-

2.3. OF RESIDUAL STRESSES IN RAILS AFTER STRAIGHTENING

The methodology for measuring residual stresses is described in standard EN 13674-1 [9] in item 8 – as qualifying tests – and Annex C. Residual stresses in the rails are measured in the centre of the bottom surface of the foot by cutting (Fig. 6). It involves gluing a strain gauge to the surface of the



Rys. 6. Sposób wycięcia plastra oraz lokalizacja tensometru do pomiaru naprężeń własnych w szynach

Fig. 6. The method of cutting the slice and the location of the strain gauge to measure the residual stresses in the rails

sometrycznego na powierzchnię badanej próbki i rozcięciu jej w pobliżu naklejonego tensometru. Stosowane powinny być elektryczne tensometry typu hermetycznego o długości 3 mm i dokładności większej niż $\pm 1\%$. Grubość wyciętego plastra szyny wynosi 20 mm. W wyniku rozcięcia dochodzi do odkształceń w kierunku wzdłużnym i poprzecznym, związanych z naprężeniami własnymi. Naprężenia własne oblicza się na podstawie różnic między pierwszym i drugim zbiorem pomiarów uwolnionych odkształceń przez pomnożenie przez stałą modułu Younga $2,07 \cdot 10^5$ MPa.

2.4. BADANIA W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

Ekspertyzy prostowania szyn w warunkach przemysłowych przeprowadzono w walcowni dużej AlcelorMittal Poland S.A. w zespole prostownic pionowej i poziomej. Zastosowano rolki kształtowe z mniejszą i większą wklęsłością wariantowane zabudową na wałę R3 i R5 prostownicy pionowej oraz nowe rolki kształtowe na prostownicy poziomej. Badaniom poddano szyny kolejowe typu 60E1 o masie 60,21 kg/m w gatunku stali R260 pochodzące z wytopu numer 930081. Poziom właściwości mechanicznych szyn został przedstawiony w tabeli 3.

W ramach pierwszego etapu projektu wyprostowano szynę o numerze A507 z zastosowaniem aktualnie używanych rolek, a zmierzone naprężenia własne przyjęto jako wartości odniesienia. W zakresie omawianego drugiego etapu przeprowadzono pierwszy wariant eksperymentu polegający na zabudowie rolki o mniejszej wklęsłości na wałę nastawny numer R3 oraz rolki kształtowej o większej wklęsłości na wałę numer R5 prostownicy pionowej. Następnie w drugim wariantcie zamieniono rolki kształtowe z wałę R3 na R5 i z wałę R5 na R3. Prostownica pozioma w obu wersjach eksperymentu zabudowana była nowymi rolekami kształto-

sample and cutting it near the glued strain gauge. Electric hermetic strain gauges with a length of 3 mm and an accuracy greater than $\pm 1\%$ should be used. The thickness of the cut out rail patch is 20 mm. As a result of cutting, deformations occur in the longitudinal and transverse directions, related to residual stresses. Residual stresses are calculated on the basis of differences between the first and second set of measurement of released deformations by multiplying by a Young's modulus constant $2.07 \cdot 10^5$ MPa.

2.4. TESTS IN INDUSTRIAL CONDITIONS

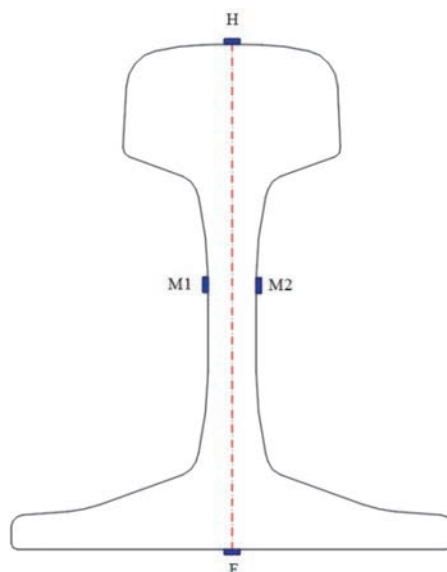
Rail straightening experiments in industrial conditions were carried out at the heavy section mill in AlcelorMittal Poland S.A. in a set of vertical and horizontal straighteners. Profile rollers with a smaller and greater concavity in variants mounted on shaft R3 and R5 of the vertical straightener and new profile rollers on the horizontal straightener were used. R260 grade 60E1 rails with a mass of 60.21 kg/m from heat number 930081 were tested. The level of the rails' mechanical properties is shown in Table 3.

As part of the first stage of the project, rail number A507 was straightened using the rollers currently in use, and the measured residual stresses were taken as reference values. Within the scope of the second stage, the first variant of the experiment was carried out consisting in installing a roller with a smaller concavity on the adjustable shaft number R3 and a roller with a greater concavity on shaft number R5 of the vertical straightener. Then, in the second variant, the profile rollers were replaced from shaft R3 to R5 and from shaft R5 to R3. The horizontal straightener in both versions of the experiment was fitted with new profile rollers with a small flange and without a flange. In each variant of the

Tabela 3. Podstawowe właściwości mechaniczne badanych szyn

Table 3. The basic mechanical properties of the tested rails

Gatunek stali ■ Steel grade	Właściwości mechaniczne				
	Wytrzymałość na rozciąganie ■ Tensile strength R_m [MPa]	Granica plastyczności ■ Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	Wydłużenie ■ Elongation A_5 [%]	Twardość ■ Hardness [HB]	Przewężenie ■ Reduction [%]
R260	964	585	12,8	śr. 280	21



Rys. 7. Oznaczenie miejsc pomiarowych

Fig. 7. The location of measuring points

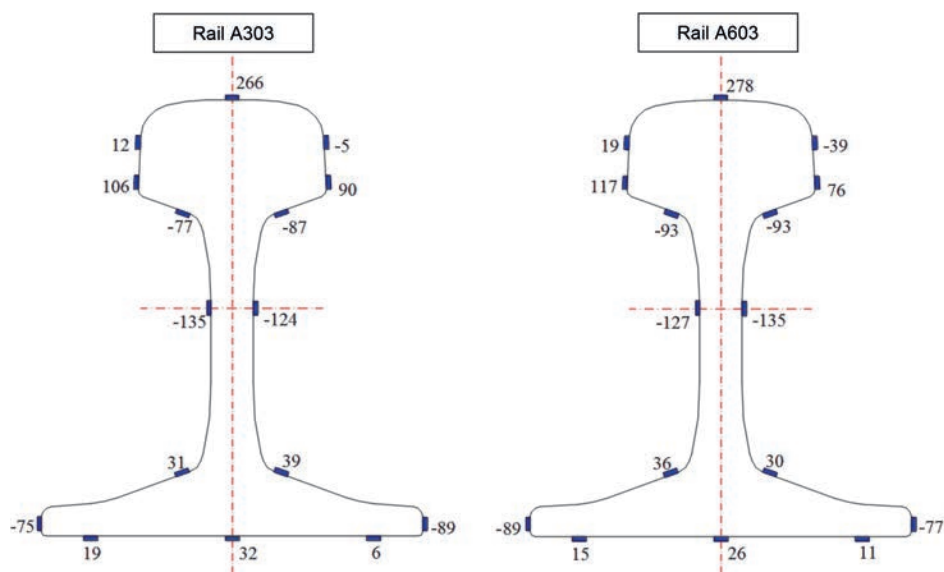
wymi z małym kołnierzem i bez kołnierza. W każdym wariancie zabudowy prostownicy pionowej wyprostowano po dwie 120-metrowe szyny, przy niezmiennych nastawach prostownicy pionowej i poziomej oraz standardowej prędkości prostowania. Do badań naprężeń własnych wyznaczono trzy odcinki o długości 1 metra z każdej szyny w stałych miejscach: 4 metry od początku szyny, ze środka szyny oraz z odległości 4 metrów od końca szyny. Obliczone wartości średnie uwolnionych odkształceń z każdego pomiaru i wyznaczone wartości naprężeń własnych dla badanych szyn, w miejscach pomiarowych oznaczonych na rysunku 7, zostały podane w tabeli 4. W zestawieniu ujęto także wyniki przyjętej do porównania szyny referencyjnej. Rysunek 8 przedstawia rozkład wartości naprężeń własnych wyznaczonych w szesnastu miejscach na obwodzie szyny oznaczonej numerem A303 i wyprostowanej według pierwszego wariantu oraz szyny o numerze A603 poddanej prostowaniu rolkami kształtowymi w wariancie drugim. Lokalizacja punktów pomiarowych odpowiada wymaganiom zawartym w Warunkach Technicznych Kolei Niemieckich DBS 918 254-1 [16].

vertical straightener installation, two 120-meter rails were straightened, with the settings of the vertical and horizontal straightener and the standard straightening rate unchanged. Three sections with a length of 1 meter from each rail in fixed places – 4 meters from the beginning of the rail, from the centre of the rail and 4 meters from the end of the rail – were designated for the residual stress tests. The calculated average values of the deformations released from each measurement and the determined values of the residual stresses for the tested rails, in the measurement locations indicated in Figure 7, are given in Table 4. The compilation also presents the results for the reference rail adopted for comparison. Figure 8 shows the distribution of the residual stress values determined in sixteen locations on the perimeter of rail A303 and straightened according to the first variant, and rail A603 subjected to straightening with profile rollers in the second variant. The location of the measuring points corresponds to the requirements contained in the Technical Conditions of German Railway DBS 918 254-1 [16].

Tabela 4. Średnie wartości uwolnionych odkształceń i obliczonych naprężeń własnych dla badanych szyn

Table 4. The average values of released deformations and calculated residual stresses for the tested rails

Numer szyny ■ Rail number	Miejsce pomiaru ■ Measurement location	Uwolnione odkształcenia ■ Released deformations ϵ , [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Naprężenia własne ■ Residual stresses σ , [MPa]	Odchylenie standardowe ■ Standard deviation [MPa]
Szyna referencyjna ■ Reference rail	F	-647	134	18
	M1	618	-128	15
	M2	567	-117	11
	H	-1176	243	12
Wariant 1 Szyny 930081 A403 i 930081 A303 ■ Variant 1 Rails 930081 A403 and 930081 A303	F	-154	32	11
	M1	667	-138	10
	M2	654	-135	11
Wariant 2 Szyny 930081 A103 i 930081 A603 ■ Variant 2 Rails 930081 A103 and 930081 A603	F	-263	54	21
	M1	668	-138	8
	M2	654	-135	5
	H	-1275	264	15



Rys. 8. Rozkład naprężeń własnych na obwodzie szyny A303 i szyny A603 wyprostowanych przy użyciu rolek kształtowych

Fig. 8. The distribution of residual stresses on the perimeter of the rail A303 and the rail A603 straightened with the use of shaped rollers

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki uzyskanych poziomów naprężeń własnych dowodzą, że zastosowanie rolek kształtowych silnie wpływa na poziom naprężeń własnych w szynach po operacji prostowania. Naprężenia rozciągające mierzone na środku stopki, w jej osi symetrii zmniejszyły się ponad czterokrotnie w wariancie numer 1 i prawie dwuipółkrotnie po zamianie rolki kształtowej z większą wklęsłością na wał R3 prostownicy pionowej (wariant 2) w odniesieniu do wielkości osiągniętych przy użyciu standardowych rolek obu prostownic. Tak niski poziom naprężeń własnych w stopce szyny nie był osiągnięty przy zastosowaniu konwencjonalnych rolek, nawet po optymalizacji nastaw prostownic. W szyjce szyny zanotowano naprężenia ściskające, których wielkość wzrosła w porównaniu do wartości uzyskanych na szynie referencyjnej odpowiednio o 8% dla punktu pomiarowego M1 i 15% dla punktu M2. Dla obu wariantów prostowania w etapie drugim projektu zanotowano niewielki wzrost naprężeń rozciągających w główce szyny o około 9%. Wszystkie szyny z obu wariantów zostały poddane badaniu parametrów przekroju poprzecznego na laserowym bloku kontrolno-pomiarowym pod kątem spełnienia dopuszczalnych wartości tolerancji dla wysokości szyny, szerokości i kształtu główki, szerokości stopki, asymetrii ujemnej i dodatniej, komory łukowej oraz wartości falistości pionowej i poziomej określonej w normie EN 13674-1:2011+A1:2017. Szyny kontrolowane były także za pomocą sprawdzianów odbiorczych skonstruowanych zgodnie z wymaganiami wymienionej normy. Dla wszystkich mierzonych parametrów nie zanotowano odchyłek od dopuszczalnego zakresu tolerancji, zaobserwowano jednak niewielkie wklęsłości dolnej powierzchni stopki szyny do maksymalnej wartości 0,2 mm, będące prawdopodobnie wynikiem zastosowania podwójnych rolek kształtowych w układzie posobnym w prostownicy pionowej. Dalszy program badań przewiduje przeprowadzenie eksperymentów z inną konfiguracją rolek kształtowych na prostownicy pionowej oraz zastosowanie odmiennej wartości ich wklęsłości. Planowana jest także modyfikacja kalibrowania wałców w celu nadania takiego kształtu stopce szyny, aby przeciwdziałał wprowadzaniu wysokich naprężeń własnych w obszarze stopki szyny po operacji prostowania.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje numeryczne prostowania szyn w prostownicy pionowej i poziomej oraz wykonane eksperymenty prostowania z zastosowaniem innowacyjnych rolek w warunkach rzeczywistych w walcowni dużej ArcelorMittal Poland S.A. potwierdziły silne oddziaływanie rolek kształtowych na poziom naprężeń własnych w stopce szyny, skutkujące ich obniżeniem o ponad czterokrotną wartość w stosunku do przyjętego poziomu odniesienia. Nie są dostępne dane literaturowe mówiące o osiągnięciu tak niskiego poziomu naprężeń przy zastosowaniu konwencjonalnych rolek prostownic. Obserwowane różnice między wartościami naprężeń własnych w stopce szyny uzyskanych w symulacji numerycznej a średnimi wartościami otrzymanymi w badaniach fizycznych metodą tensometryczną są spowodowane zastosowaniem siatki elementów deskretyzujących o mniejszym zagęszczeniu ze względu na redukcję czasu symulacji. Badania wykazały, że nowe rolki prostownicy poziomej o zmienionym polu oddziaływania na boczne powierzchnie główki spowodowały znaczące obniżenie naprężeń rozciągających w główce szyny o średnio 27 MPa w stosunku do

3. SUMMARY OF RESULTS

The results of the obtained levels of residual stresses prove that the use of profile rollers strongly affects the level of residual stresses in rails after straightening operation. The tensile stress measured in the centre of the foot, in its axis of symmetry, decreased more than four times in variant 1 and almost two and a half times after substituting the profile roller with greater concavity with shaft R3 of the vertical straightener (variant 2) in relation to the values achieved using standard rollers of both straighteners. Such a low level of residual stresses in the foot of the rail was not achieved using conventional rollers, even after optimisation of the straightener settings. In the web of the rail compressive stresses were noted, the amount of which increased compared to the values obtained on the reference rail by 8% for measuring point M1 and 15% for point M2. For both straightening variants, a slight increase in tensile stress by approximately 9% was noted in the rail head in the second stage of the project. All rails from both variants were examined for cross-sectional parameters on a laser control and measuring unit in terms of compliance with the allowable tolerance values for rail height, head width and shape, foot width, negative and positive asymmetry, fishing height, and vertical and horizontal waviness values specified in standard EN 13674-1:2011+A1:2017. The rails were also inspected using acceptance tests constructed in accordance with the requirements of the said standard. For all measured parameters, there were no deviations from the allowable tolerance range, however, small concavities of the lower surface of the rail foot were observed up to a maximum value of 0.2 mm, probably resulting from the use of double profile rollers in a similar arrangement in the vertical straightener. Further research programme envisages conducting experiments with a different configuration of profile rollers on a vertical straightener and using a different value of their concavity. It is also planned to modify the roll pass design of the rollers in order to shape the rail foot so that it counteracts the introduction of high residual stresses in the rail foot area after straightening operation.

4. SUMMARY

Numerical simulations of rail straightening in vertical and horizontal straighteners as well as straightening experiments using innovative rollers in real conditions at the heavy section mill of ArcelorMittal Poland S.A. confirmed the strong influence of the profile rollers on the level of residual stresses in the rail foot, resulting in their reduction by more than four times the value in relation to the adopted reference level. Literature data on achieving such a low stress level using conventional straightener rollers are not available. The observed differences between the values of the residual stresses in the rail foot obtained in the numerical simulation and the average values obtained in physical tests by the strain gauge method are caused by the use of a network of discretising components with lower density due to the reduction of the simulation time. The studies have shown that the new horizontal straightener rollers with a changed field of impact on the lateral surfaces of the head caused a significant reduction in tensile stress in the rail head by an average of 27 MPa compared to the results obtained in the first stage of testing, where standard rollers were used [10].

wyników uzyskanych w pierwszym etapie badań, gdzie użyto standardowych rolek [10].

LITERATURA ■ REFERENCES

- [1] J. Kasprowicz, S. Żak, J. Sarna. Szyny kolejowe produkcji Huty Katowice S.A. *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 2000, 67, (2), s. 71-77.
- [2] S. Żak, J. Sarna, J. Merta. Ocena jakości szyn produkcji Huty Katowice”. W: *XII Konferencja Naukowo-Techniczna Drogi Kolejowe*. 2003, s. 409-426.
- [3] S. Żak, J. Bartyzel, J. Kasprowicz. Szyny kolejowe do torów o dużych obciążeniach produkowane w Hucie Katowice S.A. *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 2001, 68 (11), s. 404-408.
- [4] J. Kasprowicz, S. Żak, R. Oleksiak. Możliwości zwiększenia trwałości eksploatacyjnej szyn na tle stawianych im wymagań i stosowanej technologii produkcji. W: *XI Konferencja Naukowo-Techniczna Drogi Kolejowe*. Red. M. Krużyński, 2001.
- [5] T. Zygmunt, J. Kasprowicz, S. Żak. Stal szynowa w gatunku B1000 produkowana przez ArcelorMittal Poland S.A. *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 2013, 80 (10), s. 686-691.
- [6] D. Woźniak, J. Kasprowicz, S. Żak. Badanie naprężeń własnych w szynach kolejowych”. *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 2017, 84, (10), s. 436-438.
- [7] S. Żak, T. Zygmunt, J. Kasprowicz, K. Kozera. Nowy gatunek stali na szyny tramwajowe. *Technika Transportu Szynowego*, 2018, 25 (3), s. 41-44.
- [8] S. Żak, T. Zygmunt, J. Kasprowicz, K. Kozera. Szyny tramwajowe gatunku B1000 o podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych. *Biuletyn Komunikacji Miejskiej*, 2018 (148).
- [9] Norma Europejska EN 13674-1:2011+A1:2017 *Kolejnictwo - Tor - Szyna. Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i więcej*. 2017.
- [10] S. Żak, D. Woźniak, V. Pidvysots'kyy, M. Radosz. Wpływ kształtu powierzchni roboczej rolek prostujących prostownicy pionowej na poziom naprężeń własnych w szynie kolejowej. *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 2019, 86 (10), s. 319-323.
- [11] D. Woźniak, J. Gawor, R. Palus. *Optymalizacja nastaw prostownicy pionowej w Walcowni Dużej*. Sprawozdanie IMŻ nr B0-1311, 2012. [nieopublikowane].
- [12] E. Jericho, M. Weiße. Beitrag der Eigenspannungen zum Gebrauchsverhalten von Schienen. W: *Internationales Symposium „Schienenfehler“*. Brandenburg an der Havel, 16-17 listopada 2000, s. 10-1÷10-9.
- [13] W. Guericke, W. Heller, J. Kasprowicz, M. Weiße. Verbesserte Bruchsicherheit von Schienen durch optimiertes Rollenrichten. *ETR Eisenbahntechnische Rundschau*, 2001, 50 (9), s. 541-551.
- [14] D. Woźniak, V. Pidvysots'kyy, M. Adamczyk, B. Walnik. *Badania wpływu zmian kształtu powierzchni roboczej rolek prostownic pionowej i poziomej na stan naprężeń własnych w stopie szyny. Część I*. Sprawozdanie IMŻ nr B0-1563-01 cz. I. [nieopublikowane].
- [15] D. Woźniak, V. Pidvysots'kyy, M. Adamczyk, B. Walnik. *Badania wpływu zmian kształtu powierzchni roboczej rolek prostownic pionowej i poziomej na stan naprężeń własnych w stopie szyny. Część II*. Sprawozdanie IMŻ nr B0-1563-02 cz. II [nieopublikowane].
- [16] Warunki Techniczne Kolei Niemieckich DBS 918 254-1.