

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sylwestra Dariusza Żaka nt.: „**Sterowanie stanem naprężeń własnych w szynach kolejowych poprzez modyfikację kalibrowania walców i rolek prostujących prostownic**”

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Woźniak, prof. IMŻ

Podstawa opracowania: pismo RDMLa-21/2019/2020 z dnia 19.12. 2019 r. Przewodniczącej Rady Dyscypliny, prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej

### 1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera 174 strony, a w tym: 2 str. spisu treści, 2 str. wykazu ważniejszych oznaczeń, 6 str. spisu literatury (82 pozycje), 2 str. streszczenia w j. polskim i 2 str. streszczenia w j. angielskim w wykazu rysunków. Rozprawa składa się z 4 rozdziałów.

Uwaga: wg mnie temat pracy (*propozycja dyskusyjna, nie negująca zawartości pracy*) można było sformułować: „*Kształtowanie stanu naprężeń własnych w szynach kolejowych poprzez modyfikację zarysu walców i rolek prostujących prostownic*”.

Uzasadnienie: *sterowanie jest rozumiane jako proces, w którym w czasie rzeczywistym (on-line) można aktywnie oddziaływać na stan obiektu podlegający temu sterowaniu. W przypadku działania rolek na szynę występuje aktywne oddziaływanie rolek, ale bez możliwości zmiany ich kształtu w czasie realizacji procesu prostowania.*

**We wprowadzeniu** Autor przedstawia obszernie genezę pracy podkreślając rolę i znaczenie jakości torowisk, w których najważniejszym elementem jest szyna spełniająca w torze rolę podpory oraz prowadnicy. O jakości szyny w znacznej mierze decyduje stan naprężeń powstałych w materiale w wyniku procesu wytwarzania oraz jej eksploatacji.

Słusznie jest więc stwierdzenie Doktoranta, że: „*poziom naprężeń własnych przekłada się na trwałość i niezawodność eksploatacyjną szyn, które stanowią najdroższy składnik szlaków kolejowych, a co za tym idzie wpływa na efekty ekonomiczne towarzystw kolejowych, ale przede wszystkim w sposób bezpośredni oddziałuje na bezpieczeństwo ruchu kolejowego*”.

Autor rozprawy podjął próbę określenia wpływu kształtowania stopki szyny w procesach walcowania i prostowania na stan naprężeń w szynie. Założył, że wyjaśnienie tego wpływu pozwoli na opracowanie nowego sposobu kalibrowania walców i rolek prostownicy, który wpłynie na obniżenie poziomu naprężeń własnych w stopce szyny w porównaniu stanu aktualnego.

W wyniku przeprowadzonej analizy stanu wiedzy na temat procesu kształtowania szyn założył, że osiągnięcie obniżenia wartości naprężeń własnych w gotowej szynie wymaga:

- modyfikacji kształtu stopki szyny po procesie walcowania przez nadanie jej niewielkiej wklęsłości,
- zmniejszenia powierzchni kontaktu rolki z prostowanym pasmem w celu obniżenia naprężeń stykowych w strefie rolka – pasmo.

**W świetle analizy stanu wiedzy opracowanej przez mgr. inż. S.D Żaka, podjęcie badań z tego zakresu w ramach rozprawy doktorskiej uważam za trafne i w pełni uzasadnione.**

Doktorant jednoznacznie określił **cel i zakres pracy**, tj.:

- **celem pracy** jest „*opracowanie nowego sposobu kalibrowania walców i rolek prostujących prostownic, zapewniających zmniejszenie naprężeń własnych w środku stopki szyny do wartości 145 MPa*”;
- do osiągnięcia tego celu konieczne są „*badania nad płynięciem i odkształceniem materiału w procesie walcowania i prostowania szyn kolejowych oraz określeniem wpływu tych zjawisk na poziom naprężeń*”.

W wyniku tych badań będzie możliwe opracowanie technologii prostowania szyn kolejowych, obejmującej: modyfikację kształtu powierzchni roboczej rolek, wartości nastaw poszczególnych wałów prostownicy i prędkości prostowania.

Następnie Doktorant scharakteryzował stan naprężeń na powierzchni szyny, którego składowe są zdefiniowane w kierunku normalnym i stycznym (wzory 2.5 i 2.6). W tych zależnościach występują podstawowe wielkości charakteryzujące materiał, tj. moduł Younga i liczba Poissona oraz odkształcenie wzdłużne (w kierunku długości szyny - oś „z”) i odkształcenie obwodowe (w kierunku prostopadłym do osi „z”). W trakcie eksploatacji szyn na stan naprężeń własnych, będących wynikiem procesu technologicznego nakładają naprężenia w wyniku obciążeń mechanicznych i termicznych, co w konsekwencji prowadzi do przekroczenia wartości naprężeń granicznych i rozwoju pęknięć (siatki pęknięć).

W wyniku tych oddziaływań pojawiają się określone wady kontaktowo-zmęczeniowe, które scharakteryzował Doktorant (s.23 – s.29), a wyniku propagacji tych uszkodzeń może wystąpić zużycie katastroficzne szyny.

Opracowane normy światowe dotyczące naprężeń własnych w szynach wprowadzają zalecenia dotyczące dopuszczalnych wartości naprężeń własnych w ściśle określonych miejscach na obwodzie szyny oraz sposobie ich pomiaru.

Uwaga: str. 31 – „...naciski osiowe dochodzą nawet do 35 Mg...” -w jakich jednostkach są one wyrażone ?

Analizując problem naprężeń w szynach Doktorant szczegółowo przedstawia metody pomiaru naprężeń i metody odnosząc się do normy EN 13674-1, a także do normatywnych uregulowań w innych krajach (s.32 – s.50).

**Należy podkreślić, że jest to profesjonalnie opracowany materiał, świadczący o dużej wiedzy i rzetelności w przygotowaniu do podjęcia własnych badań przez mgr. inż. S.D. Żaka.**

Odpowiedni poziom wiedzy Doktorant potwierdził także analizując wpływ technologii wytwarzania szyn kolejowych na rozkład naprężeń własnych (s.51 – s.69). Szczególnie godne uwagi są schematy i wykresy opracowane przez Autora rozprawy (rys.6.5 – rys.6.10 oraz rys.6.13 – rys.6.15).

Podsumowując analizę literatury i technologii wytwarzania szyn mgr inż. S.D Żak stwierdził, że istnieje możliwość obniżenia naprężeń własnych poprzez wprowadzenie pewnych modyfikacji procesu produkcji w obszarach:

- *konstrukcji i budowy prostownic przez zastosowanie prostownic 9 rolkowych oraz zwiększenie odstępów rolek prostujących, co przekłada się na zastosowanie większej ilości trójkątów przeginających oraz mniejszych przegięć pasma szynowego.*
- *technologii prostowania przez takie zoptymalizowanie nastaw, które zapewnia wymaganą prostotę szyny generując jednocześnie najmniejsze naprężenia własne,*
- *kalibrowania rolek prostujących prowadzącego do zmiany sposobu oddziaływania powierzchni rolek na szynę.*

**Te zagadnienia stanowią istotę sformułowanej tezy pracy i podjęcia badań własnych.**

Zakres zaproponowanych badań obejmuje:

- opracowanie nowego sposobu kalibrowania rolek prostownic pionowej i poziomej.;
- symulacje numeryczne procesu prostowania dla poszczególnych wariantów układu rolek prostujących;
- przeprowadzenie badań w warunkach przemysłowych w prostownicy pionowej i prostownicy poziomej walcowni dużej ArcelorMittal Poland S.A. dla założonych wariantów zabudowy rolek prostujących;
- pomiary naprężeń własnych w szynach po prostowaniu, przeprowadzenie badań mechanicznych oraz oceny parametrów geometrycznych, kształtu i prostości szyny.

Mg inż. S.D. Żak konsekwentnie zrealizował ten zakres badań uzupełniając go analizę skutków wprowadzanych zmian. Należy zwrócić uwagę na, ważne wg mnie, aspekty metodyki badań, a mianowicie:

- do badań różnych wariantów układu rolek w prostownicach zostały wykorzystane również rolki dotychczas stosowane do prostowania szyn (rys. 8.5 – rys.8.8);
- dla opracowanego sposobu kalibrowania rolek prostownic pionowej i poziomej przyjęto program symulacji komputerowych procesu prostowania szyn kolejowych w prostownicach pionowej i poziomej dla trzech wariantów układu rolek (tabl. 8.1-tabl.8.3);
- dla poszczególnych wariantów konfiguracje zestawów rolek prostujących są złożone z różnej liczby rolek o nowym kształcie i z rolek obecnie stosowanych;
- po wykonaniu symulacji komputerowych przyjęty program badań został zweryfikowany w warunkach przemysłowych w walcowni dużej Arcelor Mittal Poland S.A.

Wyniki badań i ich analiza zostały obszernie udokumentowane (s.81 – s.160) w rozprawie.

Uwaga: na str. 87 (również w wykazie ważniejszych oznaczeń) jest wymieniona wielkość „g” – stała kary. W którym wzorze jest ona ujęta?

Przedstawiając wyniki symulacji (s.127) Doktorant między innymi podaje że: „...wypełnienie wykrojów, rozkłady odkształcenia, prędkości odkształcenia, naprężenia i temperatury obliczone dla przepustu 17 w klatce D2 są warunkami początkowymi dla symulacji chłodzenia szyny i stanu naprężeń własnych w szynie po chłodzeniu. Wytworzony po chłodzeniu stan naprężeń własnych jest stanem wejściowym do procesu prostowania...”.

Uwaga: czy można jednoznacznie stwierdzić, że są dotrzymane warunki sumowania naprężeń (warunek addytywności), czy też można przyjąć, że nie ma on znaczenia ?

Uwaga: w podpisie pod rys.8.35 c) jest sformułowanie „prędkość odkształcenia”; pytanie, czy prędkość odkształcenia jest wielkością wektorową ?, a jeśli jest to wielkość skalarna, to powinno być „szybkość odkształcenia”.

Rozprawę zamyka rozdział 10 - **podsumowanie i wnioski**. Należy podkreślić, że wnioski ujęte w 10 punktach są wynikiem przeprowadzonych badań. Można w nich wyróżnić wnioski o charakterze poznawczym, użytecznym i kierunki kolejnych prac.

**Do wniosków poznawczych zaliczam stwierdzenia, że:**

- uzyskane wyniki pracy pozwalają na przewidywanie wprowadzanych naprężeń własnych w poszczególnych obszarach szyny na przekroju poprzecznym w zależności od parametrów technologicznych, w szczególności takich jak: kalibrowanie rolek prostownic i kalibrowanie wykrojów walców;
- zaproponowany sposób obliczenia naprężenia uśrednionego należy przyjąć jako wskaźnik skuteczności obniżenia naprężeń własnych w szynach;
- badania rozkładu naprężeń własnych w stopce szyn metodą wiercenia otworów w pierwszej i trzeciej próbie prostowania ujawniają, iż w niewielkim obszarze w pobliżu osi

szyny występują ściskające  $\sigma_x = -47$  MPa lub niewielkie rozciągające naprężenia własne  $\sigma_x = 3$  MPa w kierunku równoległym do osi szyny, poziom tych naprężeń jest znacznie niższy od uwolnionych naprężeń zmierzonych z całej objętości stopki w próbie wycinania plastra szyny wg normy EN13674-1. Dowodzi to, że użycie rolek kształtowych zmienia stan naprężeń własnych w obszarze styku rolki z szyną.

- zastosowanie innowacyjnych rolek kształtowych prostownicy pionowej powoduje mniejsze oddziaływanie rolki w miejscu pomiaru naprężeń własnych w stopce szyny; jednocześnie zwiększenie ich powierzchni roboczej w stosunku do tradycyjnych rolek skutkuje rozłożeniem działających podczas prostowania sił na większą powierzchnię i tym samym zmniejszeniem naprężenia jednostkowego;
- wyniki przeprowadzonych prób dowodzą, iż zmiana kształtu rolek oraz kształtu szyny polegająca na nadaniu stopce szyny wklęsłości ma wpływ na poziom i rodzaj naprężeń własnych oraz ich rozkład w warstwie podpowierzchniowej po procesie prostowania. Taka modyfikacja stanu naprężeń w stopce szyny prowadzi w rezultacie do obniżenia wzdłużnych naprężeń rozciągających w całej objętości stopki;
- uzyskane wyniki pracy pozwalają na przewidywanie wprowadzanych naprężeń własnych w poszczególnych obszarach szyny na przekroju poprzecznym w zależności od parametrów technologicznych, w szczególności takich jak: kalibrowanie rolek prostownic i kalibrowanie wykrojów walców;
- zaproponowany sposób obliczenia naprężenia uśrednionego należy przyjąć jako wskaźnik skuteczności obniżenia naprężeń własnych w szynach.

#### **Wnioski o charakterze użytkowym, to informacje w świetle których:**

- zastosowanie dwóch rolek kształtowych tj. rolki o wklęsłości 0,3 mm na wale R3 i rolki o wklęsłości 0,5 mm na wale R5 prostownicy pionowej powoduje obniżenie rozciągających naprężeń własnych w stopce szyny do poziomu średnio 70 MPa przy jednoczesnym ich zwiększeniu w główce do maksymalnie 323 MPa;
- zastosowanie dwóch rolek kształtowych w prostownicy pionowej oraz rolek z małym kołnierzem i bez kołnierza w prostownicy poziomej w drugiej próbie prostowania powoduje największe obniżenie naprężeń własnych w stopce szyny maksymalnie do poziomu 16 MPa, jednocześnie prowadząc do pojawienia się wypukłości na stopce szyny osiągającej maksymalną wartość 0,2 mm;
- użycie rolek z małym kołnierzem i bez kołnierza w prostownicy poziomej oraz jednej rolki kształtowej o wklęsłości 0,3 mm na wale R5 prostownicy pionowej spowodowało uzyskanie niskiego poziomu naprężeń własnych w stopce szyny wynoszącego średnio 112 MPa, co stanowi obniżenie o prawie 76 MPa w stosunku do pomiarów odniesienia, przy jednoczesnym obniżeniu naprężeń w główce szyny o średnio 14 MPa. Wariant ten charakteryzował się równocześnie najniższym obliczonym naprężeniem uśrednionym ze wszystkich prób prostowania i jest rekomendowany do wdrożenia przemysłowego;
- zastosowanie płaskich rolek stopkowych na prostownicy pionowej dla szyn z wklęsłością stopki 0,2÷0,3 mm nadaną z procesu walcowania nie dało oczekiwanego obniżenia poziomu naprężeń własnych w stopce szyny poniżej przyjętej wartości 145 MPa z powodu uzyskania mniejszej niż zakładano wklęsłości stopki, obniżyło jednak poziom naprężeń o prawie 20% w stosunku do pomiarów odniesienia.

#### **Osiągnięte wyniki wskazują także na kierunki dalszych badań, bowiem.:**

- istnieje potencjał do dalszego obniżenia naprężeń w stopce szyny oraz ich optymalizacji w główce szyny w wyniku następnych modyfikacji kalibrowania w klatce przedgotowej i pośredniej w celu uzyskania odpowiedniej wklęsłości stopki po procesie walcowania oraz

zastosowania płaskich rolek stopkowych na prostownicy pionowej, co uprościłoby proces technologiczny prostowania szyn;

**Podsumowując całość badań i uzyskanych wyników stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Szczególną zaletą jest weryfikacja wyników badań symulacyjnych na przemysłowych urządzeniach w walcowni dużej Arcelor Mittal Poland S.A, dzięki czemu szansa na ich wdrożenie staje się realna.**

## **2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej**

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam w pełni pozytywnie**, albowiem zawiera ona spójną merytorycznie analizę stanu techniki i technologii produkcji i kształtowania właściwości szyn kolejowych, zastosowanie logicznych procedur do rozwiązania zaproponowanych zadań badawczych, opracowanie uzyskanych wyników ze wskazaniem możliwości ich wykorzystania w praktyce przemysłowej.

## **3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego, związanego z rozwojem struktury technicznej kolei oraz podwyższeniem jej niezawodności i bezpieczeństwa pasażerów.

Opracowanie edytorskie rozprawy jest bardzo staranne.

**Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie „inżynieria materiałowa” (a w pewnym zakresie także „inżynieria mechaniczna”) posiada oryginalne cechy nowości oraz znaczące walory użyteczne. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr. inż. . Sylwestra Dariusza Żaka zasługuje na wyróżnienie.**

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Sylwestra Dariusza Żaka nt.: „Sterowanie stanem naprężeń własnych w szynach kolejowych poprzez modyfikację kalibrowania walców i rolek prostujących prostownic” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

*Kraków, dnia 6 lutego 2020 r.*



Biuro Rady Dyscypliny  
Inżynieria Materiałowa

wpłynęło dnia ..... 12. 02. 2020 .....

nr ..... 19 ..... zat. ....