

Rozkład naprężeń własnych w kształtownikach szynowych i iglicowych po procesie prostowania

Jacek Kukulski

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów naprężeń własnych metodą ultradźwiękową, a także przykładowe wyniki symulacji komputerowej po procesie prostowania kształtowników szynowych i iglicowych. Obliczenia symulacyjne mają na celu optymalizację rozkładu naprężeń własnych podczas obróbki walcowania i prostowania.

Praca naukowa współfinansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy Nr N N509 403136"



Jacek Kukulski
Politechnika Warszawska,
Wydział Transportu

Proces produkcji szyn i kształtowników rozjazdowych jest powodem powstawania w tych elementach naprężeń własnych. Kształtowanie na zimno szyn i części rozjazdowych (prostowanie, gięcie) powoduje powstawanie naprężeń własnych stanowiących ślad jaki pozostawia w materiale technologia ich produkcji. Szyny i kształtowniki iglicowe po etapie walcowania i chłodzenia nie spełniają wymogów dotyczących ich prostości i proces prostowania jest zatem konieczny. Zachowanie wymaganej prostości szyn ma szczególnie istotne znaczenie w przypadku dużych prędkości jazdy. Operacja ta wprowadza znaczne wzdłużne naprężenia własne. W szynach prostowanych na prostownicach rolkowych, wskutek zróżnicowania odkształceń powierzchni współpracujących i nie współpracujących z rolkami, rejestruje się naprężenia własne rozciągające na powierzchni toczonej główki i na poziomie spodu stopki szyny o wartościach 150÷300 MPa, oraz ściskające w szyjce o wartościach od -100 do -200 MPa [2].

Prostowanie szyn wykonywane z zastosowaniem rolkowych prostownic wprowadza sprężysto – plastyczne odkształcenia szyny w paśmie współpracującym z rolkami. Na efekt prostowania wpływa liczba rolek i ich średnice oraz rozstaw. Optymalizacja prostowania szyn ze względu na powstawanie naprężeń własnych wymaga oddziaływania na szynę możliwie małymi siłami, dostosowania średnicy rolek do krzywizny powierzchni toczonej szyny, jak również doboru rozstawu rolek [2], [4].

Pomiary naprężeń własnych wykonywane przez producentów szyn po prostowaniu szyn na prostownicach rolkowych wykazały, że celowa jest optymalizacja procesu prostowania [4], [5], umożliwiająca zmniejszenie rozciągających naprężeń własnych w główce i stopce szyny nawet o ponad 50%.

Naprężenia własne, które mogą osiągnąć na dolnej powierzchni stopki szyny połowę granicy wytrzymałości na rozciąganie mają istotne znaczenie dla własności eksploatacyjnych, a zwłaszcza odporności szyn na pękanie. Mogą one doprowadzić do uszkodzeń szyn zanim przekroczona będzie ich wytrzymałość zmęczeniowa.

Badania doświadczalne

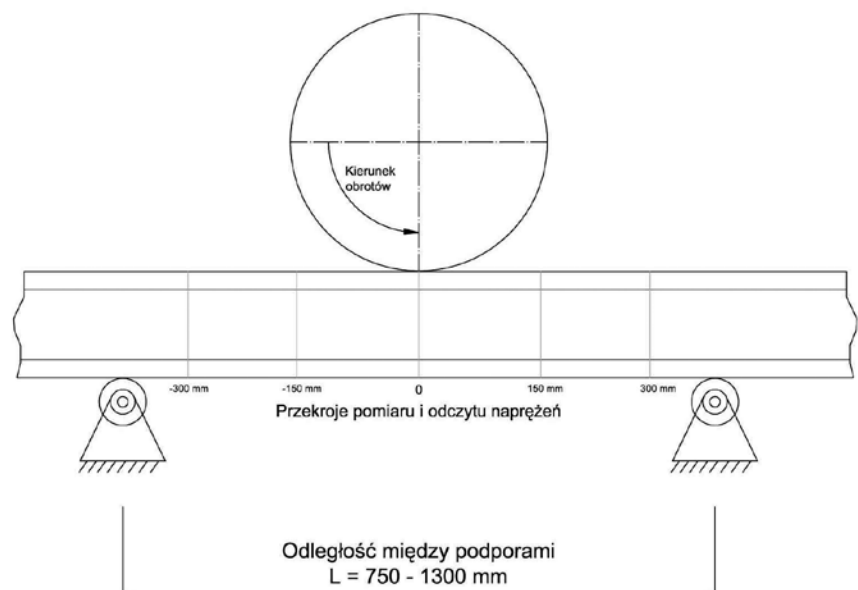
Badania naprężeń własnych w szynach i kształtownikach iglicowych wykonane zostały przez autora artykułu w firmie KolTram.

Wykorzystany został tutaj ultradźwięko-

wy miernik naprężeń DEBRO z głowicą wieloprzetwornikową na podpowierzchniowej fali podłużnej. Technika DEBRO wykorzystuje zjawisko elastoakustyczne tzn. zależność naprężenia od prędkości rozchodzenia lub czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez określony odcinek drogi.

W pomiarze naprężeń własnych stosowane są specjalne układy głowic rejestrujących fale podpowierzchniowe podłużne i poprzeczne. Układy te uwzględniają wpływ zmian temperatury na prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej. Głowica posiada czujnik umożliwiający odczyt temperatury mierzonego kształtownika i automatycznie kompensuje zmiany prędkości rozchodzenia się fali przy zmianach temperatury.

Badania metodą ultradźwiękową wykonano na próbkach w postaci odcinków szyn UIC 60 i kształtowników iglicowych I60 o długościach 1,2 – 2,0 m. Szyny i iglice, z których wykonano próbki były w stanie surowym tj.



1. Schemat procesu prostowania z zaznaczonymi przekrojami pomiarowymi

nie były eksploatowane (w stanie dostawy z huty). Na rysunku 1 przedstawiono schemat procesu walcowania z zaznaczonymi przekrojami pomiarowymi. Rozkłady podłużnych naprężeń własnych mierzono w odległościach 0 ± 150 mm oraz 300 mm środka odległości między podporami. Na powierzchni tocznej główki mierzono naprężenie w środku i w punktach odległych, o 5, 10 i 20 mm w lewo i prawo od środka kształtownika (rys.2).

Wybrane wyniki pomiarów naprężeń własnych metodą ultradźwiękową przedstawiono na rys.3 i 4.

Na podstawie przedstawionych wykresów wynika, że średnie wartości naprężeń własnych na powierzchni tocznej nie przekraczają w przypadku szyny UIC 60 (60E1) 250 MPa, a w przypadku kształtownika iglicowego I60 nie przekroczyły 170 MPa. Jednakże należy zaznaczyć, że wśród pojedynczych pomiarów (nie uśrednionych z kilku pomiarów) występowały wartości naprężeń własnych rozciągających przekraczających 250-300 MPa.

Obliczenia symulacyjne metodą MES

Obliczenia numeryczne wykonano w programie ABAQUS, który jest programem o szerokich możliwościach analizy nieliniowej zagadnień fizycznych, obejmujących m.in. mechanikę odkształcalnych ciał stałych. W pierwszej kolejności definiuje się model w postaci siatki węzłów, a następnie wybiera się rodzaj i typ elementów. Istotnym elementem jest wybór modelu materiałowego i definicja warunków brzegowych.

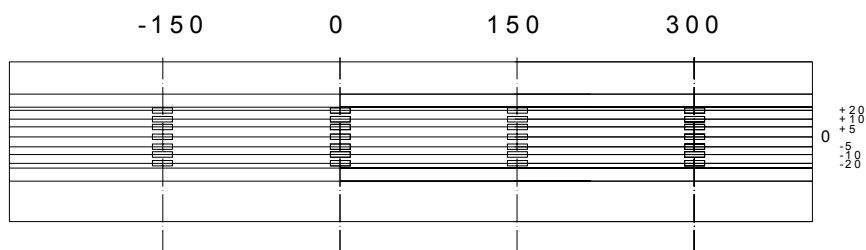
Geometria modelu – siatka elementów skończonych

Geometria modelu numerycznego zdefiniowana została w postaci siatki węzłów określających położenie i wielkość elementów skończonych. Wybierane są elementy trójwymiarowe, bryłowe. Ze względu na skomplikowany kształt modelowanych obiektów oprócz elementów prostokątnych wprowadzone zostały dodatkowo elementy trójwymiarowe, bryłowe o podstawie trójkątnej (zawierające pięć ścian).

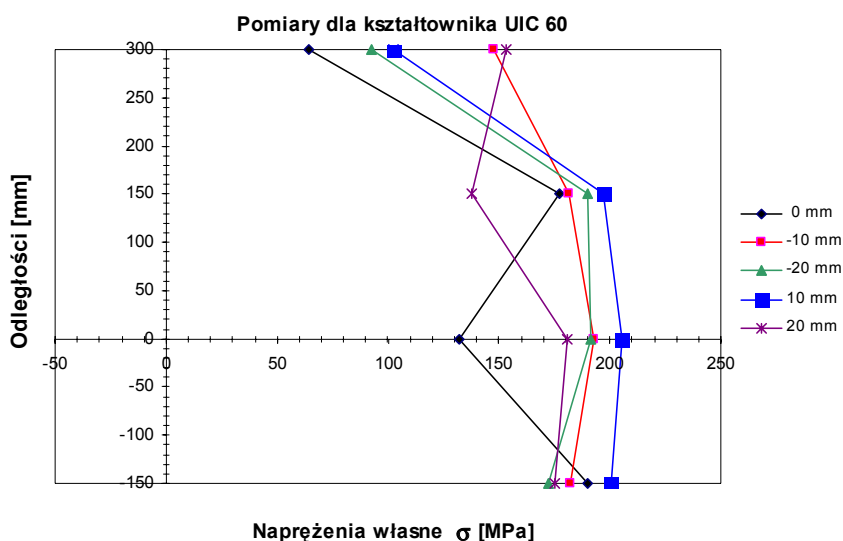
W celu uproszczenia symulacji podczas dalszej analizy wyników nie rozpatrujemy naprężeń jakim podlega materiał walca, dlatego też jako typ modelu wybierano analizę sztywną „Analytical Rigid”. Na rys.5 przedstawiony został model MES kształtownika szynowego z walcem.

Dla potrzeb obliczeń symulacyjnych określono miejsca kontaktu pomiędzy walcem, a kształtownikiem szynowym i iglicowym.

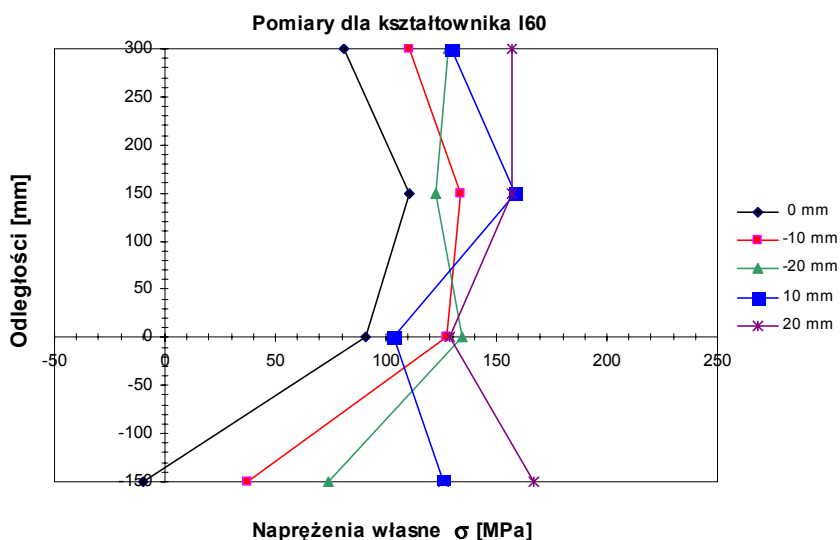
W przypadku bardziej złożonych mode-



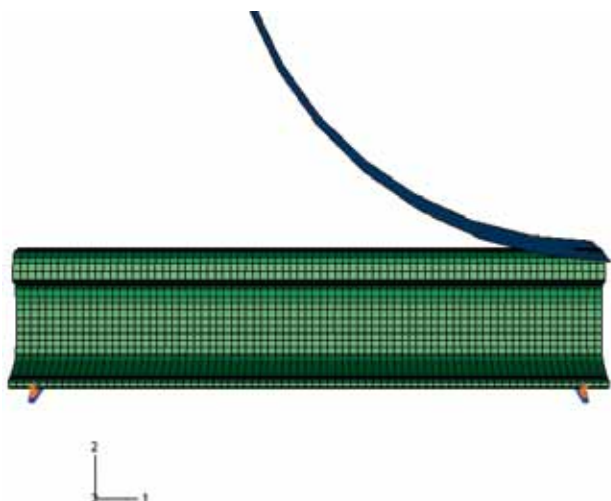
2. Przekroje i miejsca pomiarowe na główce szyny 60E1 i I60



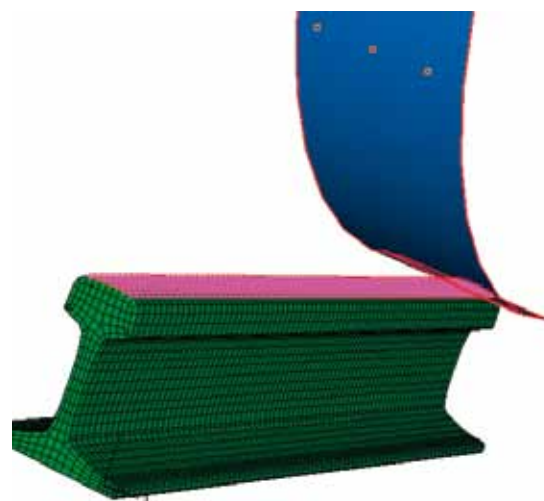
3. Pomiary naprężeń własnych na główce szyny UIC 60 po procesie walcowania i prostowania



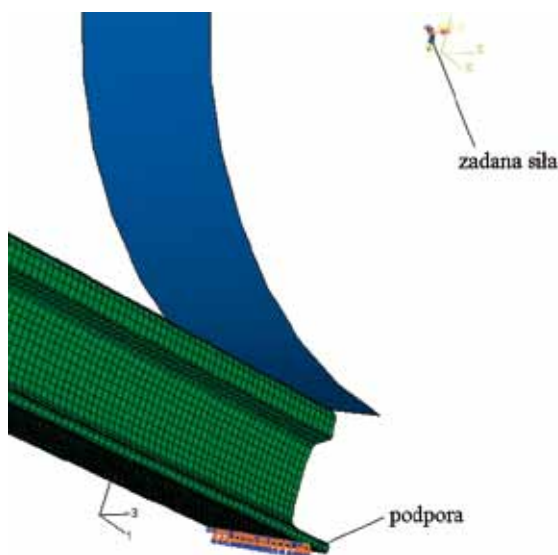
4. Pomiary naprężeń własnych na główce kształtownika iglicowego I60 po procesie walcowania i prostowania



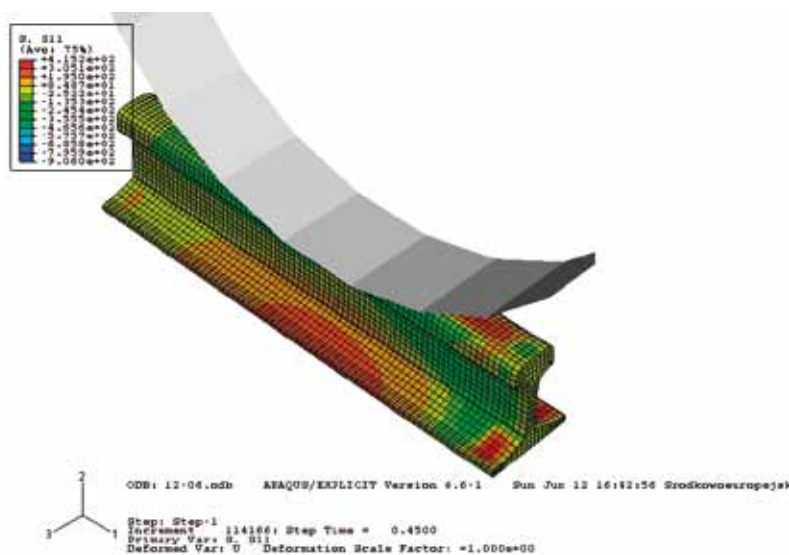
5. Model kształtownika szynowego z walcem



6. Interfejs pomiędzy walcem a kształtownikiem (więzy jednostronne)



7. Warunki brzegowe i obciążenie modelu



8. Kontury naprężenia σ_{11} (naprężenia własne) po prostowaniu dla modelu szyny 60E1 - widok ogólny

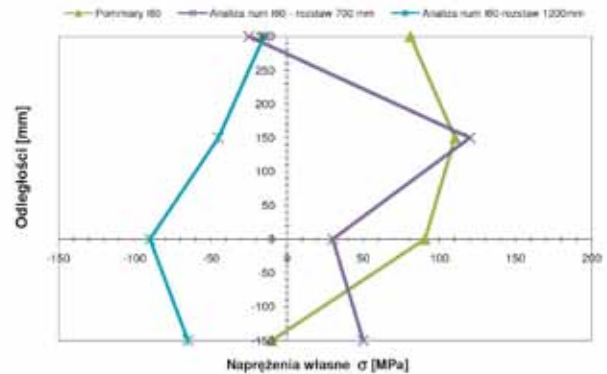
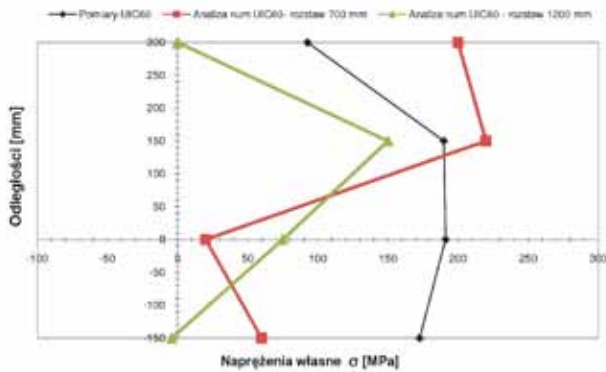
li zbudowanie siatki całego modelu z tym samym stopniem szczegółowości nie jest możliwe do wykonania, dlatego też siatki w poszczególnych elementach mogą się różnić wielkością. Należy wówczas zastosować geometryczne interfejsy pomiędzy sąsiednimi elementami. W niniejszym artykule wykorzystano elementy kontaktowe. Z geometrycznego punktu widzenia, interfejs (kontakt) jest powierzchnią, która łączy dwa sąsiednie segmenty siatek z odmiennymi gęstościami siatki w celu utrzymania ciągłości modelu. Umożliwia to właściwie rozprowadzenie nacisków na obie siatki żeby utrzymać homogeniczność modelu 3D (rys.6).

Model materiału

Dla potrzeb obliczeń numerycznych określone zostały przybliżone krzywe zależności naprężenia σ od odkształcenia ϵ dla szyny. Do obliczeń przyjęto moduł Younga $E=210\ 000\ \text{MPa}$ oraz współczynnik Poissona $\nu=0,3$. Na podstawie badań doświadczalnych w tabeli 1 przedstawiono plastyczność materiału (zależności $\sigma - \epsilon$ dla osiowego rozciągania stali). Wartości przedstawione w tabeli 1 definiowane są w programie.

Tab.1.

Naprężenia σ [MPa]	Odształcenie plastyczne ϵ [%]
0.0	0.0
629.7	0.4
900.0	2.6
1066.0	6.0
1069.0	15.0



9. Porównanie rozkładu naprężeń własnych po procesie prostowania metodą ultradźwiękową i numeryczną dla szyny UIC 60 i kształtownika I60

Obciążenie i warunki podparcia modelu

Sposób podparcia w trakcie eksperymentu, został w modelu numerycznym zastąpiony przez wyidealizowane warunki brzegowe. Zadana jest siła nacisku walca na szynę jak i prędkość obrotowa walca. Obciążenie przykładane jest stopniowo (przyrostowo) i na każdym kroku następuje rozwiązanie układu równań w celu wyznaczenia przyrostu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń. Warunki podparcia są w modelu określone przez odebranie odpowiednich stopni swobody uniemożliwiających modelowi przemieszczanie w określonym kierunku. Miejsce podpór przyjęto jako dwie sąsiednie rolki o określonym rozstawie.

Wyniki obliczeń symulacyjnych

Przeprowadzono kilka wariantów obliczeń symulujących różne przypadki prostowania dla kształtownika szynowego UIC 60 (60E1) i iglicowego I60 dla różnych rozstawów rolek. Przykładowe rozkłady naprężeń własnych przedstawiono na rys.8. Z kolei na rys.9 autor zestawiał porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów ultradźwiękowych dla porównywalnych warunków i miejsc pomiarowych.

Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń numerycznych wskazuje na ich zgodność jakościową (rys.8 i 9). Rozbieżność ilościowa pomiędzy pomiarami, a obliczeniami symulacyjnymi może wynikać ze zbyt wyidealizowanych i uproszczonych warunków brzegowych w modelu numerycznym. Drugą przyczyną może być informacja o dokładnym procesie walcowania i prostowania kształtowników wykorzystywanych w badaniach.

Analizując wyniki badań symulacyjnych można zauważyć, że maksymalne naprężenia rozciągające dla kształtownika szynowego nie przekraczają 250 MPa, a ściskają-

ce -300 MPa dla analizowanych przekrojów pomiarowych. W przypadku kształtownika iglicowego poziom naprężeń własnych wynosi ± 100 MPa. Warto zauważyć istotne spostrzeżenie, że wartość naprężeń zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości pomiędzy podporami (rolkami).

Wnioski

Badania procesów uszkodzeń i rozwoju wad w szynach kolejowych i elementach rozjazdów wskazują na potrzebę znajomości rzeczywistego stanu naprężeń, zarówno od obciążeń zewnętrznych, jak również naprężeń własnych.

Przedstawione w artykule wybrane wyniki badań ultradźwiękowych i symulacji komputerowej stanowią wstęp do kolejnych analiz i symulacji.

Artykuł nie wyczerpuje całości problemu optymalizacji procesu walcowania i prostowania celowe jest kontynuowanie badań i symulacji o większym stopniu trudności. Kolejnym zadaniem do rozwiązania przez autora może być optymalizacja procesu walcowania i prostowania z zastosowaniem większej liczby rolek o różnych ich rozstawie i siłach docisku. Pewne rozbieżności wyników przedstawione w artykule mogą wynikać ze zbyt uproszczonych warunków brzegowych jakie przyjął autor w pracy.

Brak kontroli naprężeń własnych w kształtownikach szynowych i iglicowych już na etapie produkcji może powodować przyspieszony rozwój wad jak też osłabienie własności wytrzymałościowych w późniejszej eksploatacji i skrócenie jego żywotności.

Istotnym znaczeniem na rozkład naprężeń własnych może mieć również materiał powierzchni rolek jak i dokładna regulacja docisku rolek prostownicy. Elementy te nie były uwzględniane w pracy, będzie on przedmiotem innych rozważań i badań. ◀

Materiały źródłowe:

- [1] ABAQUS – Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Version 6.6
- [2] C. Betegón Biempica, J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto, I. Peñuelas Sánchez. Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by FEM. Applied Mathematical Modelling 2007.
- [3] Esveld C. Modern Railway Track. Delft, 2001. 653 s. ISBN 90-800324-3-3.
- [4] Guericke W., Weiser J., Schmedders H., Dannenberg R. „Ursachen von Schienen-Eigenspannungen infolge Rallrichtungen und Beitrag zur Verringerung. ETR 10/1997.
- [5] Guericke W., Heller W., Kasprovicz J., Weisse M.: Verbesserte Bruchsicherheit von Schienen durch optimiertes Rollenrichten. Eisenbahntechnische Rundschau nr 9, 2001.