

# Analiza przyczyn uszkodzeń zestawów kołowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych

Dariusz KOWALCZYK<sup>1</sup>, Robert BIŃKOWSKI<sup>2</sup>

## Streszczenie

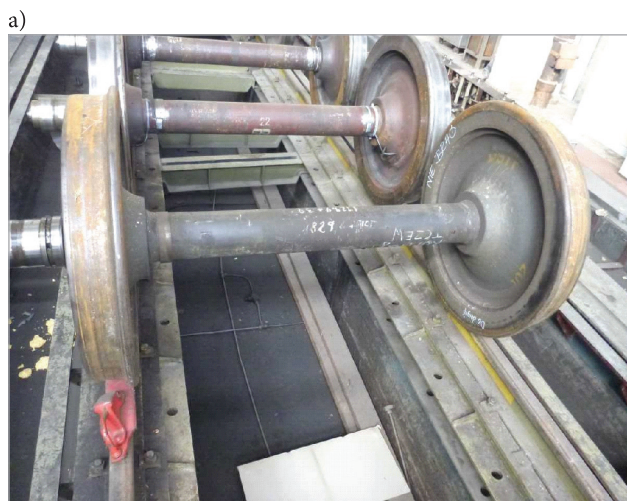
W artykule opisano nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne zestawów kołowych stosowanych w pojazdach szynowych. Przedstawiono również przykłady zniszczeń i uszkodzeń zestawów kołowych oraz prawdopodobne przyczyny ich uszkodzeń. Wsparciem w wykonanych ekspertyzach było oprogramowanie MES/FEM (metoda elementów skończonych, ang. *finite element method*). Za pomocą obliczeń MES wykazano, że dla danego typu osi zestawu kołowego wykonanego w prawidłowej technologii produkcji, wyjątkowo występujące naprężenia eksploatacyjne wynoszą maksymalnie około 200 MPa i są znacząco mniejsze od granicy plastyczności. Uszkodzenie osi zestawu kołowego wynikało z nieprawidłowo wykonanych procesów technologicznych w trakcie produkcji. Drugi przypadek uszkodzenia osi (zestawu kołowego) – pęknięcie w obszarze podpiaścia koła – również poddano obliczeniom MES / FEM. Analizy MES wykazały, że w obszarze podpiaścia podczas eksploatacji występuje duża amplituda naprężeń ściskających i rozciągających. Dodatkowo, wpływ na opisane zjawiska ma stan naprężeń związany z procesem wciskania kół na oś oraz stan powierzchni osi.

**Słowa kluczowe:** pęknięcia i uszkodzenia zestawów kołowych, bezpieczeństwo w transporcie, MES

## 1. Wprowadzenie

Zestawy kołowe są jednym z najważniejszych i najbardziej odpowiedzialnych podzespołów pojazdu szynowego. Mianem zestawu kołowego określa się zespół elementów, w którego skład wchodzi oś i koła

obrzęzowane lub monoblokowe oraz elementy układu hamulcowego lub napędowego [1]. Zestaw kołowy jest odpowiedzialny za prowadzenie pojazdu szynowego w torze i bezpośrednio odpowiedzialny za bezpieczeństwo pojazdu szynowego. W artykule przedstawiono różne typy zestawów kołowych. Najczęściej



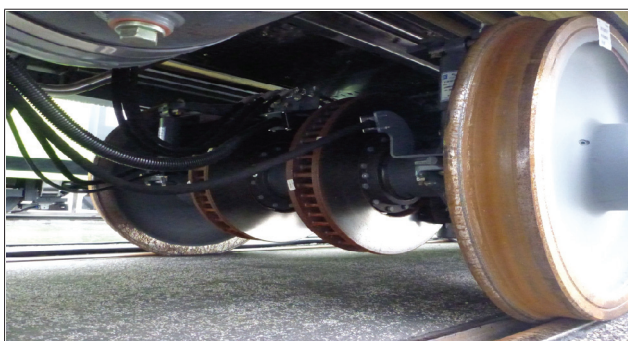
Rys. 1. Zestaw kołowy (a) i zestaw kołowy zamontowany w ramie wózka 1XTa w wagonie towarowym (b) [fot. D. Kowalczyk]

<sup>1</sup> Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: dkowalczyk@ikolej.pl.

<sup>2</sup> Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: rbinkowski@ikolej.pl.

spotykany, klasyczny zestaw kołowy (rys. 1) składa się z osi, na którą wtłoczono koła (na rysunku są to koła obręczowane). Takie rozwiązania często są spotykane w wagonach towarowych.

W nowoprojektowanych pojazdach pasażerskich w większości są stosowane zestawy kołowe z tarczami hamulcowymi zamontowanymi na osiach (rys. 2) lub na tarczach kół oraz układem napędowym (np. Elektryczny Zespół Trakcyjny).



Rys. 2. Zestaw kołowy z zamontowanymi na osi tarczami hamulcowymi [fot. D. Kowalczyk]

W nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych dąży się do bardziej zwartej budowy zestawu kołowego w celu zmniejszenia gabarytów ramy wózka. Na rysunku 3 przedstawiono wózki prezentowane w Berlinie na Międzynarodowych Targach Innotrans 2014. Cechą charakterystyczną układu jest zastosowanie maźnic wewnątrz zestawów kołowych (w klasycznych rozwiązaniach maźnice znajdują się na zewnątrz). Takie rozwiązania powoduje zmniejszenie masy zestawu kołowego i masy uzbrojonego wózka.

Prezentowane zestawy kołowe są odpowiedzialne za prawidłowe prowadzenie pojazdu w torze i są jedną z najważniejszych części układu biegowego pojazdu szynowego. Fotografie pośrednio pokazują, jak różnym, złożonym oddziaływaniom są poddawane

zestawy kołowe, w których podczas prowadzenia pojazdu w torze dynamicznie zmieniają się siły pochodzące od napędu i od hamowania,

Mimo ciągłego doskonalenia technologii wytwarzania, stosowania coraz bardziej zaawansowanych procesów produkcyjnych oraz wdrażania nowych metod diagnostycznych w systemach kontroli, nadal dochodzi do wypadków kolejowych, spowodowanych przez zestawy kołowe. Wykorzystując metodę elementów skończonych (MES/FEM), autorzy przedstawili przyczyny wypadków kolejowych dotyczących uszkodzenia osi / zestawu kołowego. Obliczenia wykonano w programie HyperWorks v. 12. firmy Altair. Przedstawiając w artykule kilka przypadków uszkodzonych zestawów kołowych, autorzy nie tylko wyjaśniają przyczyny, ale również sugerują rozwiązania, które mogą zapobiec uszkodzeniom i tym samym podwyższyć poziom bezpieczeństwa w transporcie szynowym.

## 2. Problem badawczy i metoda badawcza

Jedną z ekspertyz wykonanych w ostatnich latach przez Instytut Kolejnictwa, dotyczyła odkształcenia nowego zestawu kołowego o niewielkim przebiegu. Deformacji uległa oś zestawu kołowego. Wykonano oględziny obiektu oraz pomiary, przeprowadzono badania ultradźwiękowe osi, badania materiałowe oraz badania składu chemicznego, pomiary twardości materiału, udurości, a także obliczenia MES/FEM.

Na podstawie oględzin zestawu kołowego nie stwierdzono jakichkolwiek śladów uszkodzeń mechanicznych, które potencjalnie mogłyby wskazywać na przyczynę deformacji zestawu kołowego. Analizę składu chemicznego wykonano na spektroskopie emisyjnym GDS 500A LECO i stwierdzono, że materiał stosowany na oś był zgodny z wymaganiami (tablica 1). Próby rozciągania próbek wykonanych z materiału osi, wykazały duże różnice dla parametru  $R_e$ : od 305 MPa do 345 MPa (tablica 2).



Rys. 3. Wózki z łożyskowaniem wewnętrznym prezentowane na Targach Innotrans 2014 [fot. D. Kowalczyk]



Tablica 1

**Skład chemiczny stali A1, maksymalny procentowy udział pierwiastków**

Gatunek stali A1	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	V	Ni
<b>Wymagania</b>	≤0,37	≤0,46	≤1,12	≤0,04	≤0,04	≤0,3	≤0,3	≤0,05	≤0,05	≤0,3
<b>Próbka 1</b>	0,366	0,19	0,74	0,017	0,004	0,11	0,12	0,04	0	0,08
<b>Próbka 2</b>	0,37	0,19	0,75	0,017	0,003	0,12	0,13	0,04	0	0,09

Opracowanie własne według [8].

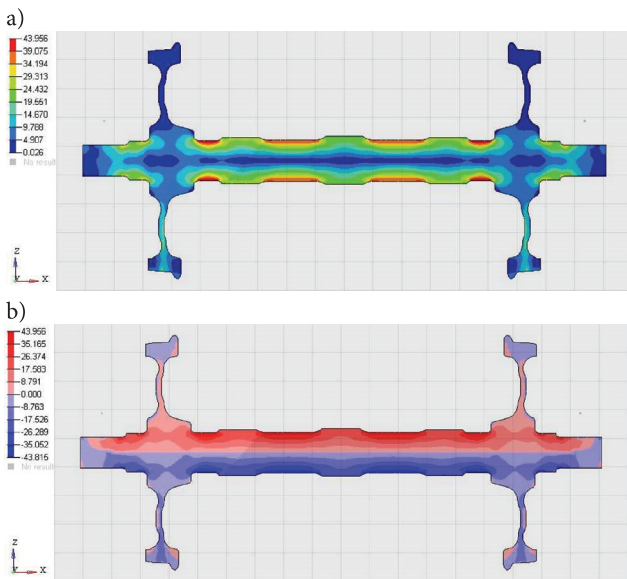
Tablica 2

**Wyniki statycznej próby rozciągania metali**

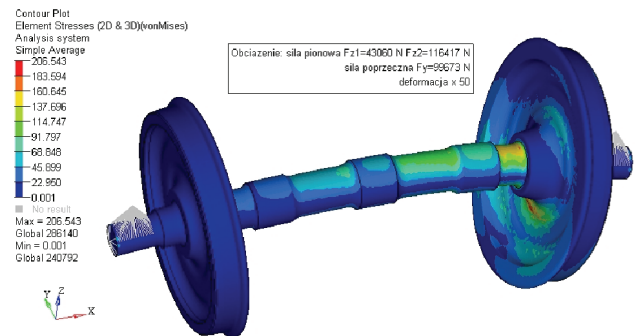
Nr próbki	Wytrzymałość na rozciąganie	Granica plastyczności	Napężenie rozrywające	Wydłużenie	Przewężenie
	$R_m$ [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_u$ [MPa]	$A_5$ [%]	Z [%]
<b>Próbka 1</b>	610,1	324,8	985,4	26,7	51,8
<b>Próbka 2</b>	596,9	305,7	900,8	26,4	56,9
<b>Próbka 3</b>	602,4	312,1	969,4	27,0	52,6
<b>Próbka 4</b>	594,1	343,9	955,5	26,1	52,1

Opracowanie własne według [7].

Celem obliczeń MES / FEM było określenie, jak duże musiałyby być obciążenie zestawu kołowego, aby oś mogła ulec odkształceniu. W programie HyperWorks stworzono model zestawu kołowego, następnie określono warunki brzegowe układu i dokonano obliczeń dla normalnych warunków eksploatacji. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 4–7.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych według von Misesa (a) oraz rozkład naprężeń zredukowanych z uwzględnieniem rozciągania i ściskania dla przypadku obciążenia osi dla wagonu pasażerskiego w pełni załadowanego na torze prostym bez sił bocznych i pionowych nadwyżek dynamicznych, bez uwzględnienia wcisku koła na oś (b) [opracowanie własne]

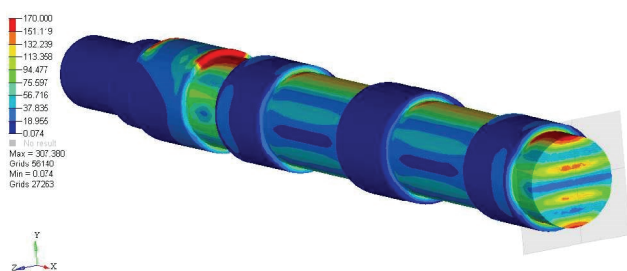


Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych według von Misesa dla przypadku obciążenia osi wagonu w pełni załadowanego z maksymalną siłą boczną na granicy wykołowania zestawu (bez uwzględnienia wcisku koła na oś) [opracowanie własne]

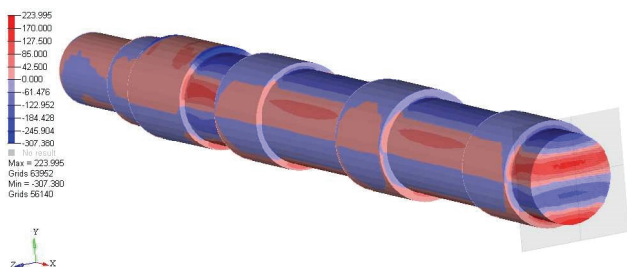
Przedstawione obliczenia MES/FEM przy obciążeniach występujących wyjątkowo w eksploatacji nie mogły być powodem odkształceń plastycznych, gdyż największe naprężenia w osi wynosiły około 206 MPa (w obliczeniach MES nie uwzględniano naprężeń resztkowych w materiale osi).

Z materiału osi wykonano próbki zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6892-1 metodą B i przeprowadzono statyczną próbę rozciągania. Uzyskano duży rozrzut wyników (przy tej samej technologii przygotowywania i wykonywania próbek). Różnice parametru  $R_e$  (granica plastyczności materiału) wynosiły około 50 MPa. Uzyskane wyniki wskazywały na niejednorodny rozkład pola naprężeń w materiale osi. Wykonano więc kolejne obliczenia MES dla oduwek osi, które poddano prostowaniu.

Wadliwy proces obróbki cieplnej lub inne problemy związane z technologią produkcji osi były przyczyną niejednorodnych pól naprężeń w materiale. Wykonano symulację odkształcania osi w celu określenia pola naprężeń. Naprężenia własne w osi po prostowaniu przedstawiono na rysunkach 6 i 7, jako naprężenia von Misesa z dodatkowym uwzględnieniem obszarów ściskających i rozciągających. Celem obliczeń było znalezienie takiego ugięcia elementu, które spowoduje pozostawienie w materiale trwałych odkształceń.



Rys. 6. Naprężenia von Misesa w przekroju osi w stanie swobodnym po prostowaniu (maksymalne naprężenia 307,4 MPa) [opracowanie własne]



Rys. 7. Naprężenia signed von Misesa w przekroju osi w stanie swobodnym po prostowaniu, ukazujące obszary ściskania i rozciągania, które po nałożeniu z naprężeniami eksploatacyjnymi mogą powodować przekroczenie naprężeń i odkształcenie osi [opracowanie własne]

Osie z dużymi naprężeniami resztkowymi poddano obróbce mechanicznej, a następnie w zestawach kołowych zamontowano w nowych wózkach. W wyniku normalnych warunków eksploatacyjnych, w materiale osi mogły wystąpić naprężenia około 100 MPa, które nałożyły się z naprężeniami resztkowymi pozostającymi w materiale osi, doprowadzając do odkształcenia plastycznego.

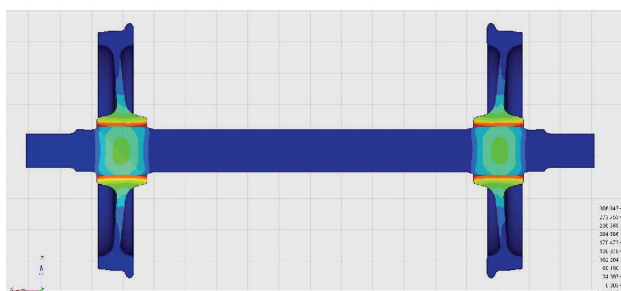
Bardzo częstym przypadkiem są pęknięcia osi przy podpiąściu. Pęknięcia te pojawiają się w szczególności w wagonach towarowych po długiej eksploatacji. Zniszczenia te mają na ogół charakter zmęczeniowy (rys. 8). Jedną z możliwych przyczyn występowania tego zjawiska przedstawiono w obliczeniach MES.



Rys. 8. Uszkodzona oś zestawu kołowego [fot D. Kowalczyk]

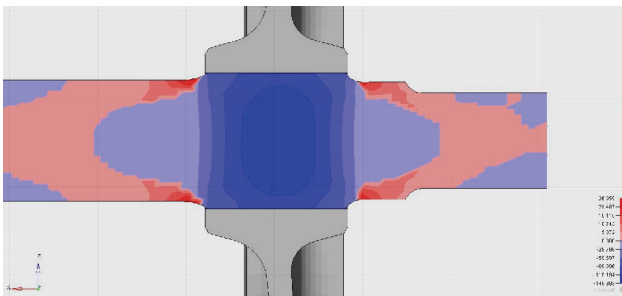
### 3. Założenia do obliczeń MES

Wykorzystany materiałowy model osi powstał na podstawie rzeczywistych wykresów rozciągania próbki ze stali A1N (tablica 2) i posłużył do modelowania identycznej próbki w programie MES. Dopasowanie krzywej obliczeniowej do rzeczywistej przeprowadzono w drodze iteracji (kolejnych prób rozciągania modelu) [1, 2]. Dokonano obliczeń modelu koła wciskanego na oś, wielkość wcisku wynosiła 0,3 mm. Wymagany skład chemiczny stali A1N stosowanej w zestawach kołowych podano w tablicy 1. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 9–11.

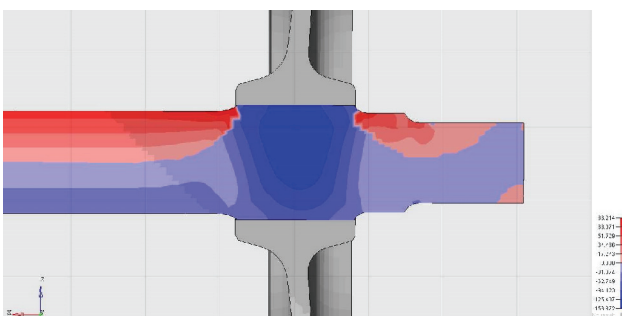
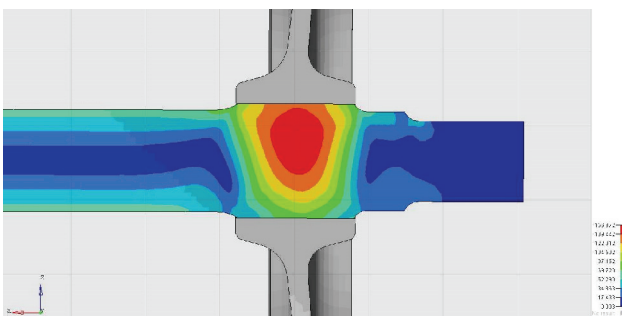
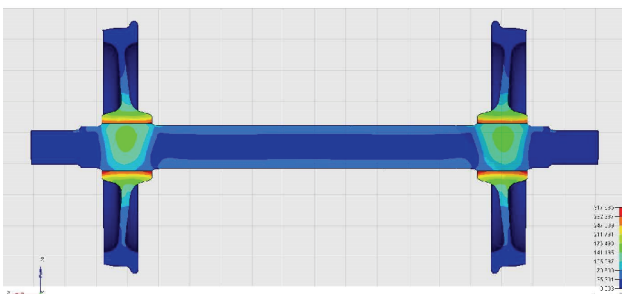


Rys. 9. Naprężenia zredukowane według von Misesa dla całego zestawu kołowego (uwzględniono oś i koło); widoczna koncentracja naprężeń ściskających (naprężenia maksymalne 306 MPa) [opracowanie własne]

Analizując obszar przejścia podpiąścia w środkową część osi (miejsca, w którym często występują pęknięcia osi) można zaobserwować, że na podpiąściu osi pod wpływem wcisku koła na oś powstają wstępne naprężenia rozciągające (rys. 10), które po przyłożeniu obciążenia głównego, wpływają na asymetrię naprężeń w części rozciąganej i ściskanej przejścia podpiąścia osi podczas obrotu zestawu kołowego (rys. 11).



Rys. 10. Naprężenia zredukowane od wcisku koła na oś (wartość wcisku 0,3 mm); widoczna koncentracja naprężeń ściskających w środkowej części podpięcia osi (maks. 149 MPa); w miejscach przejścia podpięcia koła na promieniach w wyniku wcisku występuje obszar naprężeń rozciągających [opracowanie własne]



Rys. 11. Naprężenia zredukowane od obciążenia pionowego na zestaw kołowy z uwzględnieniem wcisku koła na oś o wartości 0,3 mm [opracowanie własne]

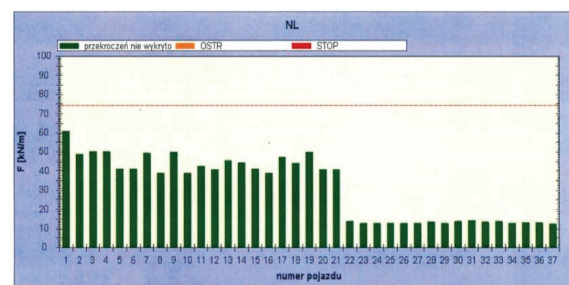
W obliczeniach zestawu kołowego dla przykładowego obciążenia (wyłącznie siły pionowe, obciążenie 22,5 t na oś) wartość naprężeń głównych w obrębie przejścia podpięcia koła w promieniu wynosi odpowiednio  $\sigma_{max} = 85 \text{ MPa}$  i  $\sigma_{min} = -40 \text{ MPa}$  dla tego samego węzła w trakcie obrotu zestawu o  $180^\circ$  (dla tego przypadku kierunki  $\sigma_{max}$  i  $\sigma_{min}$  pokrywają się i są równo-

ległe do osi obrotu zestawu). Fakt ten nie jest uwzględniany w tradycyjnych analitycznych obliczeniach osi, gdzie zakłada się symetryczny przebieg naprężeń w trakcie obciążeń zmęczeniowych wynikających z obrotu osi. Ta asymetria naprężeń pochodząca od wcisku ma znaczący wpływ na wytrzymałość zmęczeniową osi w tym obszarze. Przedstawione obliczenia MES są matematyczną formą wyidealizowanych fizycznych zjawisk mechanicznych ze względu na fakt, iż tak idealne struktury i procesy technologiczne w warunkach produkcyjnych nie istnieją. Z tego względu te obliczenia należy traktować jako teoretyczne. Uwzględnienie niedoskonałości produkcyjnych oraz dużej liczby czynników związanych z technologią wykonania zestawów kołowych powoduje, że obliczenia MES stają się bardzo skomplikowane i długotrwałe. W artykule, analizy oparto na wyidealizowanych obiektach badań.

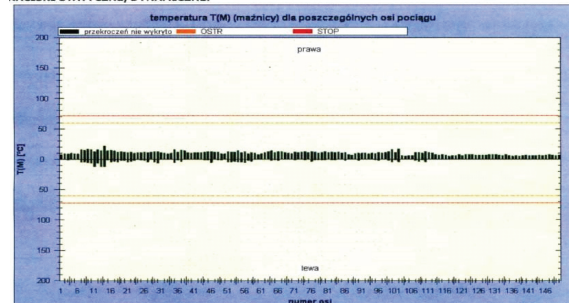
#### 4. Wnioski i podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują na potrzebę bardziej wnikliwych kontroli produkcji i podjęcia dodatkowych badań w tym zakresie, dotyczących:

1. Analizy warunków produkcji w celu zoptymalizowania siły wcisku kół na oś, jako potencjalnej przyczyny propagowania pęknięć w osi.
2. Prowadzenia badań nieniszczących, w celu określenia poziomu naprężeń w materiale osi.
3. Prowadzenia badań zmęczeniowych z zastosowaniem nowych technik badawczych np.: MPM.
4. Rozbudowy już istniejących systemów monitoringu na trasach kolejowych (rys. 12) w celu dynamicznej oceny stanu zestawów kołowych (np.: pomiar parametru Az).



NACISKI STATYCZNE/DYNAMICZNE:



Rys. 12. Nowoczesne systemy monitoringu w torach [opracowanie własne]



Wdrożenie wymienionych wniosków, w znaczący sposób podniesie poziom bezpieczeństwa w transporcie szynowym, w szczególności zmniejszy liczbę uszkodzeń zestawów kołowych.

## Literatura

1. Altair Engineering, Inc., RADIOSS THEORY MANUAL 11.0 version – Jan 2011 „Large Displacement Finite Element Analysis”.
2. Decyzja Komisji 2011/291/UE, w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski w transeuropejskim systemie kolei konwencjonalnych.
3. EN 13260:2011: Kolejnictwo – Zestawy kołowe i wózki – Zestawy kołowe – Wymagania dotyczące wyrobu.
4. Kowalczyk D., Bińkowski R., Mikłaszewicz I., Antolik Ł.: *Ekspertyzy powypadkowe zestawów kołowych 2010–2014, Prace Instytutu Kolejnictwa LKB.*
5. Mikłaszewicz I.: *Charakterystyczne uszkodzenia zestawu kołowego powodujące zdarzenia wypadkowe, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt nr 146, s. 81–94, 2008.*
6. PN EN 13261:2007: Kolejnictwo – Zestaw Kołowy – Osie – Wymagania.
7. PN-EN ISO 6892-1:2010: Metoda B – Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
8. UIC 811-1: Technical specification for the supply of axles for tractive and trailing stock, 1987.

## Analysis of the Causes of Wheel Set Damage Using Finite Element Method

### Summary

The article discusses and demonstrates modern construction solutions applied in wheel sets. The authors also present examples of wheel sets damage and their probable causes. The Finite Element Method (FEM) was used to develop the expertise. FEM calculations have shown that, for a given type of axle, a wheel set produced in an appropriate technology, the operating and exceptional stresses are maximum to 200 MPa and are significantly below the yield point. Damage to the wheel set axle resulted from improper manufacturing technology. The second case of axle (wheel set) damage, crack in the wheel abutment was also subject to FEM calculations. FEM analyses have shown that there is a high amplitude of compressive and tensile stresses in the abutment area. Moreover, the stresses connected with wheel-to-axle loading and axle surface (no damage, no defect) also affect the process.

**Keywords:** cracks and damage to wheel sets, safety in transport, FEM

## Анализ причин повреждений колесных пар при использовании Метода Конечных Элементов

### Резюме

В статье разработаны и показаны современные конструктивные решения для колесных пар используемых в единицах подвижного состава. Авторы представляют также примеры разрушений и повреждений колесных пар и вероятные причины их повреждений. Помощью при проведении экспертиз явилось программное обеспечение МКЭ/ФЕМ (метод конечных элементов (анг. finite element method)). Вычисления МКЭ показали, что для данного типа оси, колесной пары сделанной правильно технологически, эксплуатационные напряжения и исключительно выступающие составляют максимально ок. 200 Мпа и являются значительно ниже предела пластичности. Повреждение оси колесной пары вытекало из неправильно сделанных процессов технологии производства. Второй случай повреждения оси (колесной пары), излом в подступичной части оси, тоже был поддан вычислениям МКЭ/ФЕМ. Анализы МКЭ показали, что во время эксплуатации в области подступичной части выступает большая амплитуда сжимающих напряжений и натяжений троса. Дополнительно на настоящий вопрос влияет состояние напряжений связанное с процессом осевой нагрузки и состояние поверхности оси.

**Ключевые слова:** изломы и повреждения колесных пар, безопасность в транспорте, МКЭ