

## Damage causes of the railway axles – case study

Łukasz Antolik \* , Robert Bińkowski 

The Railway Research Institute

**Abstract:** The article presents a study of analyzed cases of operational damages of the railway axles, which caused the derailment of the rolling stock. A case of twisting the axle journal and cracking the axle journal in freight wagons will be presented as an example. Both considered cases concern samples that have been in operation for decades and are made of unalloyed steel commonly used at this time. The scope of the tests included verification of the material properties, inspection of fractures, MES simulations, and description of the cause-effect sequence leading to the incidents. The presented material can be used to raise awareness and improve the competence of operational staff employed in the entities in charge of maintenance (ECM).

**Keywords:** railway axle defects, axle damage, derailment

### 1. Wstęp



Tabor kolejowy jest jednym z głównych środków transportu na bliskie i dalekie odległości. Z danych [26] podanych przez Urząd Transportu Kolejowego wynika, że w 2021 roku krajowi zarządcy taboru byli w posiadaniu około 86 tysięcy wagonów towarowych. Z kolei w raporcie [22] za rok 2021 przedstawionym przez Państwową Komisję Badania Wypadków Kolejowych można znaleźć informację, że w analizowanym okresie doszło do 273 zdarzeń związanych z uszkodzeniem lub złym stanem technicznym pojazdu kolejowego. Także Europejska Agencja kolejowa alarmuje o zbliżonej na przestrzeni ostatnich lat liczbie zarejestrowanych wykolejeń. Z drugiej strony nieustający rozwój technologiczny powoduje, że producenci mogą stosować coraz nowsze rozwiązania inżynierskie we wszystkich aspektach budowy taboru szynowego. Także normalizacja parametrów taboru odgrywa bardzo ważną rolę z perspektywy eksploatacji i interoperacyjności taboru szynowego. Pomimo utrzymywania najwyższych standardów jakościowych przez producentów taboru, deklaracji zarządców taboru oraz posiadanych certyfikatów przed podmioty odpowiedzialne za utrzymanie, będą zdarzać się incydenty skutkujące wykolejeniem w wyniku utraty integralności przez zestaw kołowy. Nawet biorąc pod uwagę konieczność doboru właściwego reżimu utrzymaniowego taboru kolejowego, tego typu zdarzenia mogą wynikać z sytuacji losowych lub w wyniku podjęcia niewłaściwych decyzji na etapie prac utrzymaniowych.

#### Article citation information:

Antolik, Ł., Bińkowski, R. (2023). Damage causes of the railway axles – case study, WUT Journal of Transportation Engineering, 137, 55-72, ISSN: 1230-9265, DOI: [10.5604/01.3001.0054.0856](https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.0856)

\*Corresponding author

E-mail address: [lantolik@ikolej.pl](mailto:lantolik@ikolej.pl) (Ł. Antolik)

ORCID iD:  [0000-0002-1876-3319](https://orcid.org/0000-0002-1876-3319) (Ł. Antolik),  [0000-0002-5224-9989](https://orcid.org/0000-0002-5224-9989) (R. Bińkowski)

Received 12 July 2023, Revised 7 September 2023, Accepted 29 September 2023, Available online 3 November 2023

Zużycie osi kolejowej jest zazwyczaj procesem długotrwałym, którego czas trwania kalkuluje się w perspektywie wieloletniej. Ze zużyciem eksploatacyjnym tego elementu mamy głównie do czynienia w momencie, kiedy w następstwie właściwej eksploatacji i stosowania należytych czynności utrzymaniowych wyrób zaczyna charakteryzować się niezgodnościami eliminującymi go z dalszej eksploatacji. Wyeksponowane powierzchnie wyrobu tj. część środkowa osi, obszary przejść geometrycznych i przedpiaścia są wystawione na oddziaływanie warunków atmosferycznych czy substancji niebezpiecznych oraz są narażone na kolizje z elementami podwozia czy infrastruktury. Implikuje to poruszany szeroko w literaturze wątek uszkodzeń eksploatacyjnych osi kolejowych. Autorzy prac [11,14,15] wskazują, że głównymi uszkodzeniami eksploatacyjnymi powierzchni osi są uszkodzenia mechaniczne punktowe, wzdłużne i obwodowe (w tym pęknięcia), wytarcia a także wżery i wtrącenia oraz uszkodzenia powierzchni podpiaść pojawiające się w trakcie montażu i demontażu kół. Poza nimi rozróżniane są również błędy kształtu osi skutkujące niebezpiecznymi zmianami rozstawu kół na ich obwodzie a także niezgodności wymiarowe.

Odrębną i nie mniej istotną kwestią są trudne w odpowiednio szybkim wykryciu uszkodzenia współpracujących części osi. Również ta problematyka poruszana jest szeroko przez literaturę techniczną. Autorzy pracy [11,13,15] zwracają uwagę, że głównym rodzajem zużycia osi, w obszarach współpracujących tj. podpiaścia osi kolejowej jest nie poznane w pełni zjawisko frettingu, które szerzej omówiono w kolejnym rozdziale. Natomiast autorzy prac [9, 21] szacują, że ten rodzaj zużycia odpowiada za skrócenie czasu eksploatacji osi kolejowych o 60-75%. Z kolei do uszkodzeń czopów osi zalicza się wszelkie niezgodności powierzchni, a także ślady po procesach punktowej naprawy powierzchni, np. napawania i skrawania a także ślady przegrzania, czy również zużycia frettingowego.

Właśnie z uwagi na możliwość wykrycia groźnych uszkodzeń powierzchniowych osi kolejowej za pomocą prostych w wykonaniu oględzin wizualnych, podmioty odpowiedzialne za utrzymanie taboru kolejowego wykonują takie sprawdzenie w ramach działań rutynowych. Odniesienie dla oceny wizualnej stanowią specyfikacje znormalizowane na poziomie europejskim, w których przygotowaniu czynny udział biorą również narodowi przewoźnicy. Zunifikowane dokumenty to norma europejska [19] i Katalog EVIC [8], których zawartość standaryzuje uszkodzenia osi kolejowych oraz określa metody ich wykrywania. Wyniki tych kontroli raportowane są do jednolitej bazy Europejskiej i wymagane są dla każdego pojazdu szynowego poruszającego się po odcinkach infrastruktury dopuszczonych do ruchu w standardzie interoperacyjnym. Nie mniej jednak po tak przeprowadzonej kontroli ograniczonego obszaru osi pozostają fragmenty zabudowane, których szczegółowa kontrola odbywa się po zdecydowanie większych rewersach.

W dalszej części artykułu przedstawiono dwa niezależne przypadki uszkodzenia eksploatacyjnego czopa osi zestawu kołowego tocznego o potencjalnie tej samej przyczynie lecz o odmiennych skutkach.

## 2. Materiał badawczy

Osie kolejowe podlegają bardzo restrykcyjnemu reżimowi produkcyjnemu jako elementy mające krytyczny wpływ na bezpieczeństwo ruchu. Stanowią element wiążący koła i razem z nimi tworzą zestaw kołowy. Koła z kolei są jednym ze składników interoperacyjności dla

podsystemu tabor Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności [23]. Przekłada się to na konieczność spełniania przez wyrób gotowy wymagań unormowanych określonych w normie międzynarodowej PN-EN 13261 [17]. Pozycja ta określa precyzyjnie gatunki dopuszczalnych do stosowania materiałów i ich własności mechaniczne. Z kolei osie kolejowe wyprodukowane wiele dekad temu w polskich zakładach produkcyjnych również podlegały pod odpowiednie normy hutnicze [20] w zakresie dopuszczalnych do stosowania gatunków materiałów. W tabeli 1 przedstawiono porównanie wymagań dla parametrów materiałowych dla stali P35 i stali EA1N w zakresie wymaganych własności mechanicznych materiału.

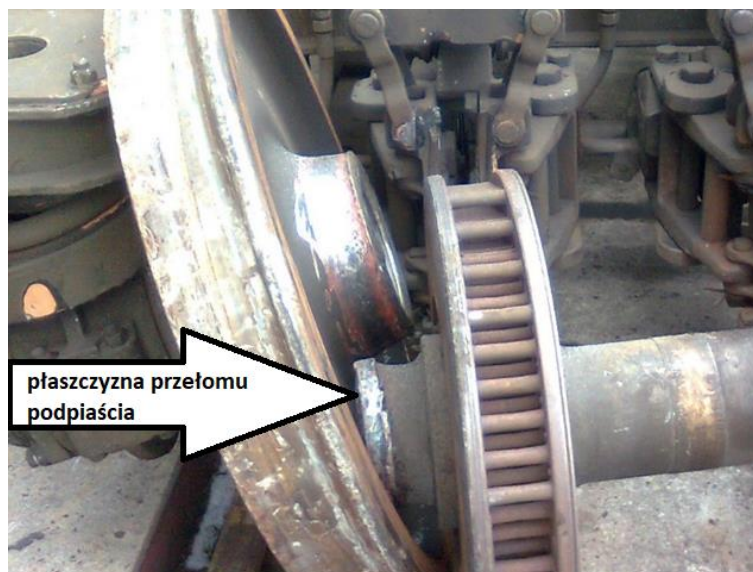
Tabela 1. Porównanie własności materiałowych wymaganych przez [17] i [20]

Gatunek materiału	Norma odniesienia	Re [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	KU [J/cm <sup>2</sup> ]	
					próbka wzdłużna	próbka poprzeczna
P35	PN-84/H-84027/03	≥280	500-650	≥21	≥50	≥20
P35GN	PN-91/H-84027/03	≥320	550-650	≥22	≥50	≥20
EA1N	PN-EN 13261:2021-02	≥320	550-650	≥22	≥21	≥14

Z przedstawionych danych tabelarycznych wynika, że obecne wymagania dla parametrów wytrzymałościowych stali w stanie znormalizowanym są bardzo zbliżone względem Polskiej normy hutniczej z lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Różnic można się doszukać w wymaganiach dla udarności materiału, które w przypadku próbek wzdłużnych i poprzecznych były wyraźnie większe w Polskich normach hutniczych. Z kolei w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku, tj. w czasach, z których najprawdopodobniej pochodzi większość eksploatowanych obecnie przez krajowych zarządców taboru osi kolejowych wagonowych, stosowano najczęściej stal konstrukcyjną niestopową z gatunku P35. Parametry tej stali były około 10% niższe niż stali P35G w stanie znormalizowanym, co w przypadku właściwie zaprojektowanych wyrobów nie było przeszkodą do bezawaryjnej pracy wysokocyklowej. Z kolei odnosząc się do raportu ORE/ERRI B12/Rp.14/D [20], są to często wyroby eksploatowane przez kilka dekad a oszacowany wiek układów biegowych wynosi około 40 lat. Zatem intencją autorów raportu było wskazanie, że odpowiedzialne elementy układów biegowych pojazdów szynowych powinny wykazywać minimalną żywotność na takim właśnie poziomie [24].

W codziennej eksploatacji może jednak dochodzić do obciążeń wyjątkowych elementów układu biegowego, które mogą mieć swoje źródło w nieodpowiednim stanie taboru lub infrastruktury. Mogą na to się składać także problemy systemowe lub wynikające z błędów ludzkich. Oś kolejowa jest elementem szczególnie wrażliwym na takie obciążenia. Jest to także wyrób, który w stanie spoczynkowym poddawany jest dodatkowym naprężeniom wynikającym z wcisku elementów współpracujących. Z treści pracy [10] wynika, że naprężenia zredukowane pochodzące od wcisku koła na oś (dla wartości wcisku 0,3 mm) mogą wynosić w miejscach koncentracji nawet -149 MPa. Z kolei w obszarach przejścia podpiaścia w część środkową i przedpiaścia w wyniku wcisku występuje obszar naprężeń rozciągających. Z kolei w pracy [5] przedmiotem analizy była typowa oś wagonowa zaprojektowana do nacisku 22,5t/oś. Określone za pomocą metody elementów skończonych naprężenia zredukowane pochodzące od nacisku statycznego wagonu ładownego wyniosły około 165 MPa w miejscu przejścia podpiaścia w część środkową osi.

Także wyniki obliczeń statycznych wytrzymałości osi kolejowej napędowej przedstawione w pracy [3] wskazują na profil przejścia pomiędzy podpiaściami jako miejsce o najniższym wskaźniku bezpieczeństwa, które posiada charakter karbu koncentrującego naprężenia. Wiele zdarzeń potwierdza ustalenia opisane w pracach [5,7,10], które wskazują obszar wewnętrznej krawędzi podpiaścia oraz obszar przejścia w część środkową osi jako obszar obarczony największym ryzykiem powstania pęknięć w wariancie braku obciążeń wyjątkowych. Przykład pęknięcia w analizowanym obszarze przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zdjęcie pęknięcia wewnętrznej części podpiaścia osi wagonu osobowego (źródło: materiały własne)

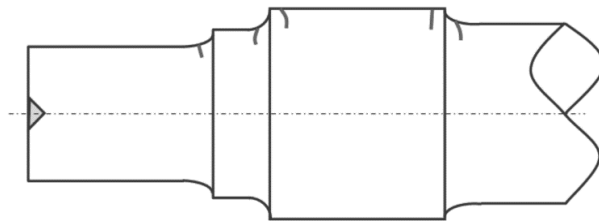
W rozważanych przypadkach pęknięć osi zdarzenie dotyczyło wyrobu wykonanego ze stali gatunku P35G a badania materiałowe uszkodzonych osi potwierdziły właściwe parametry wytrzymałościowe w zakresie  $R_{p0,2}$ ;  $R_m$ ; i  $A_5$  oraz udarnośći próbek wzdluznych i poprzecznych. Dodatkowo wykonano w obu przypadkach analizę składu chemicznego oraz badania mikroskopowe materiału pod kątem określenia struktury i oznaczenia ilości wtrąceń niemetalicznych. Szczegółowa analiza wyników badań materiałowych dla poszczególnych przypadków będzie przedmiotem odrębnej analizy natomiast w kolejnych rozdziałach omówiono stwierdzone przypadki uszkodzeń osi w obszarze czopa, wynikające ze zdarzeń o charakterze incydentalnym.

Przy charakteryzowaniu warunków współpracy wysokocyklowej połączeń wciskowych i określaniu przyczyn uszkodzeń nie można pominąć mechanizmu rozwoju zużycia frettingowego, tj. złożonego procesu tribologicznego polegającego na powolnej degradacji warstw powierzchniowych współpracujących elementów pod wpływem przyłożonej siły normalnej i stycznego ruchu oscylacyjnego o małej amplitudzie [15, 16]. W konsekwencji tego procesu może dojść do zmniejszenia nacisków technologicznych w przypadku połączenia wciskowego [11].

W pracy [13] podsumowano szereg opracowań wnioskiem, że wartości oscylacji drgań sprzyjających powstawaniu zużycia frettingowego wynoszą około 25  $\mu\text{m}$  natomiast w [11] określono zakres amplitud oscylacji w granicach od 0,02 do 150  $\mu\text{m}$ . Z kolei w pracach

[3,11,12,15] zdefiniowano czynniki wpływające na intensywność i charakter zużycia frettingowego, do których zaliczają się obciążenie i amplituda drgań, czas trwania, geometria powierzchni styku, właściwości materiałowe stykających się elementów (właściwości adhezyjne, odporność na korozję, twardość, wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności, wytrzymałość zmęczeniowa), jak również warunki środowiskowe czy produkty pochodzące z procesu zużycia powierzchni współpracujących. Czynnikiem wpływającym na ten proces jest tak wiele, że wyeliminowanie ich jest w praktyce niemożliwe a samo zjawisko zużycia można zazwyczaj spowolnić poprzez np. dobór odpowiednich par materiałów współpracujących lub poprzez dobór odpowiednich wartości wcisku w zależności m.in. od wybranej technologii montażu elementów i wartości obciążeń eksploatacyjnych [11]. Autorzy [11] zauważyli, że oddziaływanie tych czynników jest współzależne, a za przykład podają wpływ wartości wcisku. W przypadku połączenia skurczowego (np. czop-pierścień łożyskowy) wzrost wartości wcisku zmniejsza intensywność zużycia powierzchni współpracujących, a w połączeniu włączanym (np. podpiaście – piasta koła) zwiększa tę prędkość.

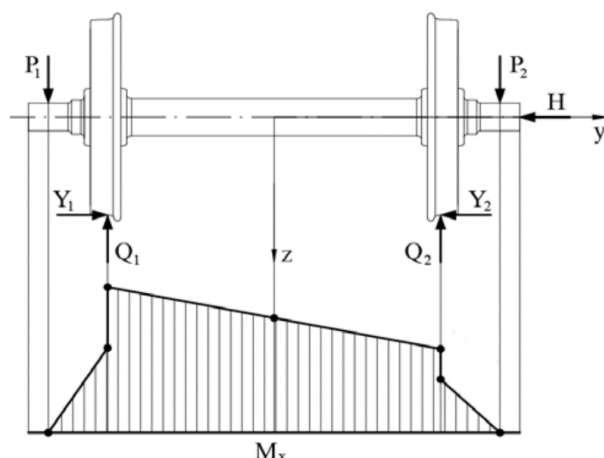
Kiedy dochodzą inne czynniki mogące mieć wpływ na warunki pracy osi kolejowej i elementów z nią powiązanych, pęknięcie może wystąpić niemal w każdej strefie. Poza omówionym wyżej obszarem, najczęściej można spotkać się z pęknięciami w obszarach oznaczonych na rys. 2 (od lewej) czopa, przedpiaścia, podpiaścia i części środkowej osi.



Rys. 2. Miejsca występowania pęknięć eksploatacyjnych osi kolejowej (źródło: [2])

Czop osi kolejowej jest miejscem osadzenia pierścieni wewnętrznych łożyska tocznego. Pierścienie osadza się w ten sposób, że podgrzanie indukcyjne zwiększa ich średnicę, co przekłada się na luźne pasowanie względem czopa. Po schłodzeniu następuje ich zacisk na czopie. Zdjęcie pierścieni następuje w ten sam sposób.

Węzeł łożyskowy jest miejscem, w którym w warunkach statycznych oś przejmuje obciążenia pionowe  $P_1$  i  $P_2$  pochodzące od masy pojazdu szynowego, przenosząc je dalej na koła, czym w miejscu podparcia na szynie wywołuje reakcję  $Q_1$  i  $Q_2$ . W warunkach dynamicznych uwzględnia się siłę boczną  $H$ , która w zależności od kierunku działania powoduje reakcję  $Y_1$  lub  $Y_2$  wskutek nabiegania obrzeża na powierzchnię boczną główki szyny. Obciążenia powodują sumarycznie powstanie momentu zginającego w płaszczyźnie  $YZ$ , którego uproszczony schemat jak i same siły oraz towarzyszące im reakcje przedstawiono na rys. 3. W efekcie największy gradient momentu gnącego przypada na obszar pomiędzy częścią środkową czopa a częścią środkową podpiaścia. Jest to obszar szczególnie wrażliwy na niewłaściwą pracę elementów współpracujących i dlatego wymagania dla jakości powierzchni samego czopa i elementów łożyskowych są opisane w dokumentacji techniczno-ruchowej dla każdego typu wagonu i powinny być bezwzględnie przestrzegane.



Rys. 3. Schemat rozkładu momentu zginającego w płaszczyźnie YZ (opracowanie własne)

W praktyce warunki eksploatacyjne zestawu kołowego mogą się różnić od przedstawianych w literaturze modeli teoretycznych. Podczas swobodnego toczenia zestaw kołowy podlega obciążeniom statycznym zbliżonym do warunków teoretycznych, tj. obciążeniem wywołanym ciężarem pojazdu i obciążeniami od sił poprzecznych wywołanych przez wpisywanie się w tor jazdy a także sił odśrodkowych wywołujących moment gnący oś na ramieniu równym co do wartości połowie średnicy tocznej koła. Z kolei proces hamowania (przyspieszenia) może powodować generowanie momentu skręcającego na odcinku pomiędzy podpięciami tarcz hamulcowych (koła zębatego przekładni) i kół a także dodatkowego momentu gnącego w płaszczyźnie XY na odcinku od czopów do podpięć osi. Kolejnymi źródłami dodatkowych sił działających na zestaw kołowy wg [6] są zaburzenia ruchu pojazdu, do których zalicza się:

- po stronie infrastruktury: nierówności poprzeczne i wzdłużne toków szynowych, przejazd po złączach toru stykowego, uszkodzenia powierzchni tocznej szyny, itp.
- po stronie pojazdu szynowego: obciążenia spowodowane nieregularnościami geometrii i niewyważeniem zestawu kołowego, wężykowanie zestawu kołowego, płaskie miejsca na powierzchni tocznej kół, stan łożysk, obciążenia wyjątkowe związane z wykolejeniem a także stan techniczny ramy wózka i usprężynowania.

Nie można zapominać o roli zestawu kołowego w obwodzie przepływu energii elektrycznej pomiędzy siecią trakcyjną a szyną kolejową a także jak opisano w [4] z uwagi na istotną rolę w bocznikowaniu obwodów torowych służących do stwierdzania stanu zajętości odcinków torów.

### 3. Studium przypadku

#### 3.1. Oś złamana

Rozważany przypadek stanowiła oś kolejowa toczna wagonowa, która uległa dezintegracji poprzez złamanie jednego z czopów. Wewnętrzna część obudowy łożyska po stronie urwanego czopa charakteryzowała się wytarciem, które stanowi skutek obcierania obracającej się osi o obudowę łożyska bezpośrednio po pęknięciu osi. W efekcie uzyskano efekt wytarcia powierzchni kolizyjnych. Na rys. 4 przedstawiono rozwalcowanie trącej

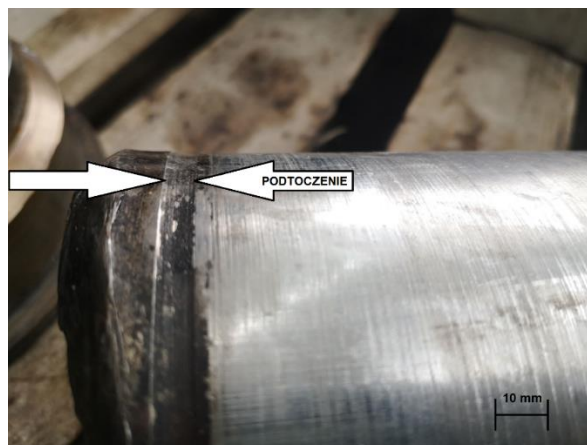
powierzchni wału. Z kolei stan przełomu widocznego na rys. 5 potwierdzał zmęczeniowy charakter pęknięcia z ogniskiem na powierzchni tworzącej elementu o bardzo wyraźnej i ostrej krawędzi widocznej na rys. 6. Wskutek obracania się osi następowało naprzemienne ściskanie i rozciąganiu materiału w tym przekroju. W efekcie cyklicznego pęknięcia materiału pojawiły się pasma zmęczeniowe na ok. 40% powierzchni przekroju poprzecznego, które propagując od przełomu w kierunku środka osi są coraz bardziej wyraźne na skutek zwiększania wyężenia materiału. Pozostałą część przełomu stanowi pęknięcie doraźne, w około 50% zatłuczone przez kolizję fragmentów osi po końcowym przełamaniu czopa.



Rys. 4. Skutki kolizji złamanej osi z obudową maźnicy (źródło: [1])



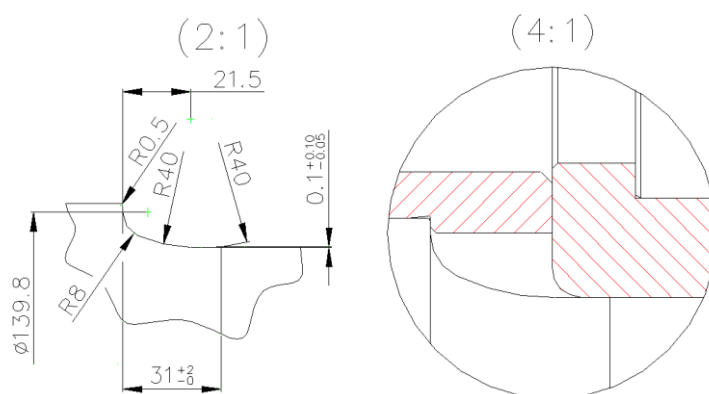
Rys. 5. Widok płaszczyzny przełomu czopa po demontażu łożyskowania (źródło: [1])



Rys. 6. Podtoczenie powierzchni złamanego czopa (źródło: opracowanie własne)

Po demontażu pierścieni wewnętrznych stwierdzono szereg niezgodności kształtu czopa z wymaganiami, do których zaliczono niewłaściwą średnicę, znacznie wykraczającą poza pole tolerancji dla tolerowanego pasowania p6, która w połączeniu z nieodpowiednią chropowatością, dochodzącą do  $Ra=8,7\ \mu\text{m}$  była skutkiem niewłaściwej obróbki mechanicznej materiału i braku obróbki wykańczającej. Oględziny obu czopów pękniętej osi ujawniły także podtoczenie, przy czym zabieg technologiczny wykonany po pękniętej stronie (rys. 6) miał charakter karbu powodującego lokalne spiętrzenie naprężeń w materiale.

W przypadku istotnych zmian średnicy czopa lub jakiegokolwiek innej średnicy osi kolejowej na naprawczą, niezwykle ważne jest przetoczenie całej osi w celu zachowania właściwych proporcji średnic współpracujących. Po operacji toczenia każdej z powierzchni należy przywrócić zalecaną chropowatość a także przywrócić odpowiednie promienie przejść geometrycznych. W przypadku powierzchni czopa i przejścia czopa w przedpiaście, w omawianym przypadku wymagane było przywrócenie chropowatości  $Ra=0,8\ \mu\text{m}$  oraz wykonanie właściwego przejścia czopa w przedpiaście przy jednoczesnym zachowaniu bezkrawędziowego i polerowanego przejścia geometrycznego, które w formie wykonawczym przedstawiono na rys. 7.



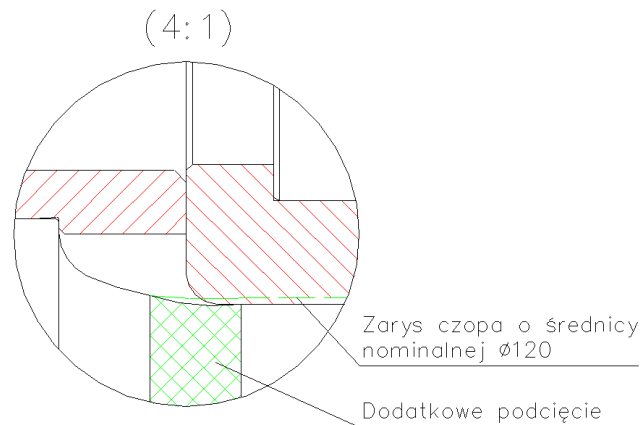
Rys. 7. Schemat wykonania prawidłowej obróbki przejścia geometrycznego i jego współpracy z pierścieniami osadzonymi na czopie i przedpiaście (źródło: [1])

Realizacja czynności warsztatowych mogła mieć jednak inny przebieg. Przetoczone do średnicy naprawczej  $\varnothing 118\ \text{mm}$  czopy zyskały w kolejnym kroku podcięcia. Z przeciwległej strony zachowano bardziej płynny kształt podcięcia czopa umożliwiając montaż pierścieni łożyskowych (rys. 8). Wykonano także obróbkę wykańczającą powierzchni, co w wyniku pomiarów pozwoliło potwierdzić chropowatość w zakresie  $Ra=(0,6-0,8)\ \mu\text{m}$ . Analiza wadliwej geometrii przejścia czopa w przedpiaście dla tego czopa wskazała na brak możliwości wtłoczenia pierścieni bez wcześniejszego wykonania podcięcia, redukującego promień o  $0,1\ \text{mm}$ .

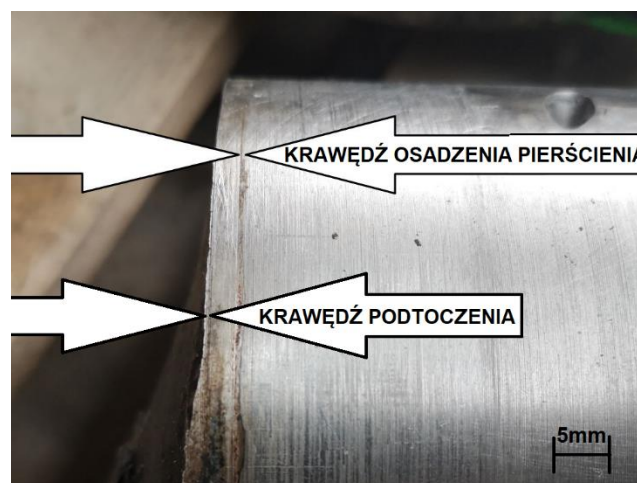
W przypadku złamanego czopa, przetoczenie na wymiar naprawczy  $\varnothing 118\ \text{mm}$  wykonano na dłuższym odcinku. W związku z tym podtoczenie wykonano na szerokości jedynie  $5,4\ \text{mm}$  co wpłynęło negatywnie na lokalny rozkład naprężeń w materiale osi. Rys. 9 przedstawia krawędź niewłaściwego podtoczenia, która spowodowała wystąpienie ogniska pęknięcia zmęczeniowego właśnie w tym miejscu. W praktyce jednak możliwe okazało się wtłoczenie pierścieni bez wykonania omawianego podtoczenia. Krawędź ogniska pęknięcia



była odsunięta o około 3 mm poza krawędź styku z powierzchnią czopa z krawędzią pierścienia łożyskowego. Brak podtoczenia zgodnego z technologią wykonania, skutkowało również tym, że krawędź osadzenia pierścienia oznaczona na rys. 9 była też miejscem, gdzie stwierdzono kolejne ognisko pęknięcia powierzchniowego. Na rys. 10 przedstawiono rezultat badania wskazanego obszaru metodą magnetyczno-proszkową w świetle UV-A, na którym widoczna jest nieciągłość materiałowa, w której zgromadziły się cząsteczki z luminoforem.



Rys. 8. Schemat osadzenia łożysk osiowych na czopie obrabionym  $\varnothing 118$  mm z nieprawidłowym wykonaniem podcięcia (źródło: [1])

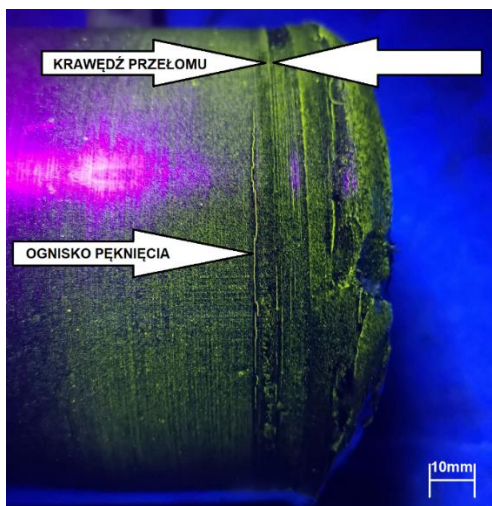


Rys. 9. Widok krawędzi podtoczenia i krawędzi styku powierzchni czopa z pierścieniem wewnętrznym (źródło: opracowanie własne)

### 3.2. Oś ukręcona

Analiza dotyczyła osi kolejowej, która uległa uszkodzeniu w trakcie wykonywania pracy przewozowej. Badania ukręconej części osi musiały zostać poprzedzone demontażem uszkodzonego łożyska, którego oględziny wykazały całkowite wypalenie smaru łożyskowego i wytarcie oraz odkształcenie pierścieni wewnętrznych a także stopienie fragmentu mosiężnego pierścienia będącego elementem koszyka łożyskowego, znajdującego się nad miejscem pęknięcia osi (rys. 11). Dokładne obserwacje stanu pierścieni

ujawniły ślady odkształcenia plastycznego pierścieni wewnętrznych w kierunku przeciwnym do działania oporowego momentu skręcającego (rys. 12)



Rys. 10. Widok krawędzi podtoczenia i krawędzi styku powierzchni czopa z pierścieniem wewnętrznym w świetle UV-A (źródło: opracowanie własne)



Rys. 11. Odkształcenie łożyska i stopienie pierścienia (źródło: [1])



Rys. 12. Odkształcenie plastyczne pierścienia (źródło: [1])

Sam przełom widoczny na rys. 13 w miejscu ukręcenia wykazywał symetryczność obwodowego pęknięcia oraz osiowe położenie centralnego fragmentu odpowiedzialnego za ostateczną dezintegrację przekroju. Pozwala to na postawienie hipotezy mówiącej, że naprężenia zredukowane charakteryzowały się względnie równomiernym rozkładem na przekroju poprzecznym czopa. Wytarcie części tworzącej czopa, wynikało z tarcia o elementy łożyska i skutkowało znaczącym zmniejszeniem średnicy w płaszczyźnie przełomu. Nie zaobserwowano w tym przypadku śladów linii charakterystycznych dla zmęczeniowego charakteru pęknięcia w wyniku zginania a stwierdzono ślady ciągnięcia materiału w wyniku działania momentu skręcającego.



Rys. 13. Przełom ukręconego czopa osi (źródło: [1])

Część środkowa przełomu czopa charakteryzowała się jednolicie czarną barwą i posiadała charakter wyraźnego ukręcenia włókien materiału. Zmiana barwy nastąpiła najprawdopodobniej w efekcie przegrzania materiału i gwałtownego ukręcenia, co spowodowało zatrzymanie przepływu nagromadzonego ciepła, oderwanie maźnicy i powolne studzenie czopa w tej części. Z kolei biały nalot na powierzchni przełomu powstał najprawdopodobniej w ostatniej fazie pęknięcia i nie został naruszony co potwierdza brak wystąpienia kolizji pękniętych fragmentów czopa. Warstwę tę stanowił prawdopodobnie materiał rodzimy, rozgrzany do bardzo wysokiej temperatury bez możliwości jej efektywnego odprowadzenia i narażony na oddziaływanie pierwiastków atmosferycznych jak również upłynnionego smaru łożyskowego.

W wyniku stwierdzenia śladów wskazujących na uszkodzenie łożyska jako na przyczynę zdarzenia, wykonano szereg obliczeń symulacyjnych obejmujących obszar czopa i podpięcia osi zestawu kołowego o dopuszczalnym obciążeniu statycznym 20 ton/oś. Oś obciążono siłami działającymi równomiernie oraz zwiększonymi o 20% wywołanymi dynamiką jazdy wagonu po torach według schematu przedstawionego na rys. 14.

Dane materiałowe przyjęto z wyników testów materiałowych uzyskanych dla materiału osi a także przyjęto do obliczeń wskaźniki: moduł Young'a –  $E=2.1e+05$  MPa; moduł Kirchhoffa –  $G=8.1e+04$  MPa (wsp. Poissona =0.3); gęstość –  $\rho=7.9e-09$  kg/mm<sup>3</sup>. Tok postępowania oraz obliczenia naprężeń w osi przedstawiono poniżej, a wyniki symulacji przedstawiono na rys. 16-22.

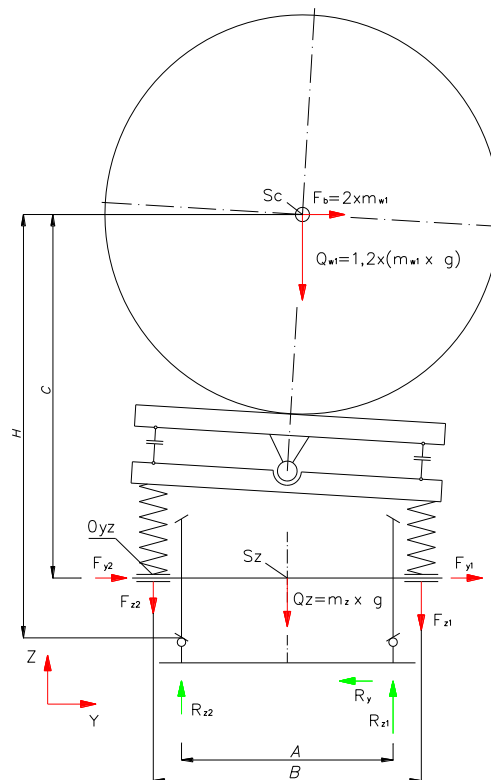
Parametry modelu obliczeniowego zilustrowanego na rys. 15:

- elementy typu CHEXA – 109167 szt.,
- elementy typu CPENTA – 240 szt.,

- elementy typu CBEAM – 3 szt.,
- elementy typu RBE – 4 szt.,
- liczba stopni swobody – 391509,
- rozmiar siatki w obrębie połączeń wciskowych – 7 mm.

Wciski:

- koło – oś: 0,3 mm.,
- koło – obręcz: 1,3 mm.,
- pierścienie wewnętrzne łożysk osiowych – oś: 0,06 mm.

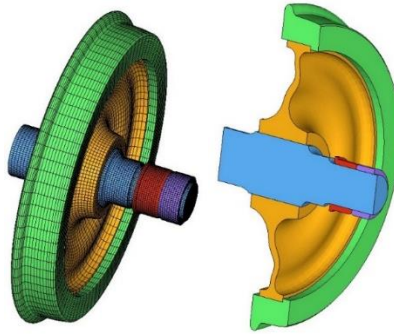


Rys. 14. Schemat obciążeń zestawu kołowego dla przypadku L2 (opracowanie własne) gdzie: A – rozstaw okręgów toczących = 1500 mm, B – rozstaw maźnic = 2000 mm, C – wysokość srodka ciężkości części usprężynowanej wagonu nad osią = 1340 mm, H – wysokość srodka ciężkości części usprężynowanej wagonu nad główką szyny = 1800 mm,  $m_{w1}$  – masa usprężynowana wagonu przypadająca na jeden zestaw = 18500 kg,  $m_z$  – masa omaźnicowanego zestawu kołowego = 1500 kg.

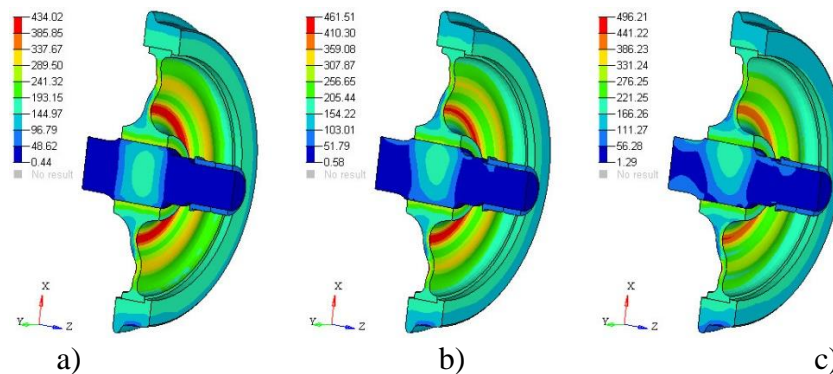
Obciążenia:

- L0 – obciążenie od samych wcisków,
- L1 – obciążenie od wcisków oraz sił pionowych na czopach łożyskowych  $F_{z1}=F_{z2}= 90,7$  kN (wagon załadowany stojący na torze),
- L2 - obciążenie od wcisków, sił pionowych na czopach łożyskowych  $F_{z1}=133,7$  kN,  $F_{z2}= 84,1$  kN oraz sił poprzecznych  $F_{y1}=F_{y2}=18,5$  kN,

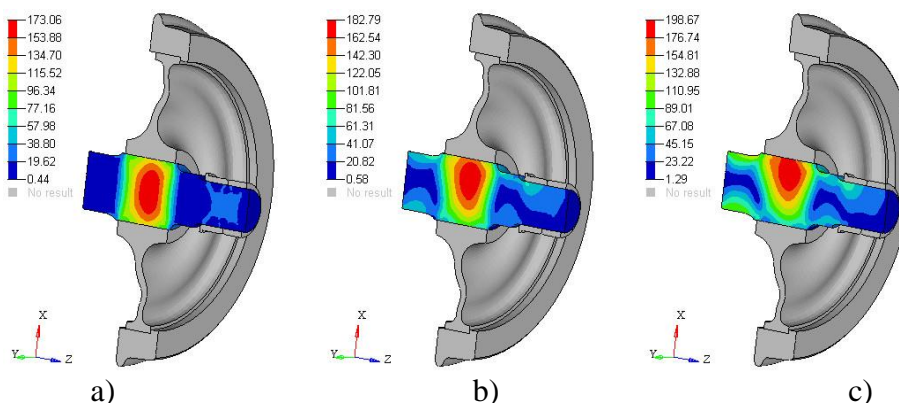
- jazda wagonu w rozjeździe z przyspieszeniem odśrodkowym w rozjazdach  $2 \text{ m/s}^2 = 0,2 \text{ g}$  (wartość przyspieszenia przyjęta na podstawie na podstawie PN-EN 13979-1:2011 p.7.2 [18] z nadwyżką dynamiczną pionową na usprężynowaniu 1 st. o wartości 20%.



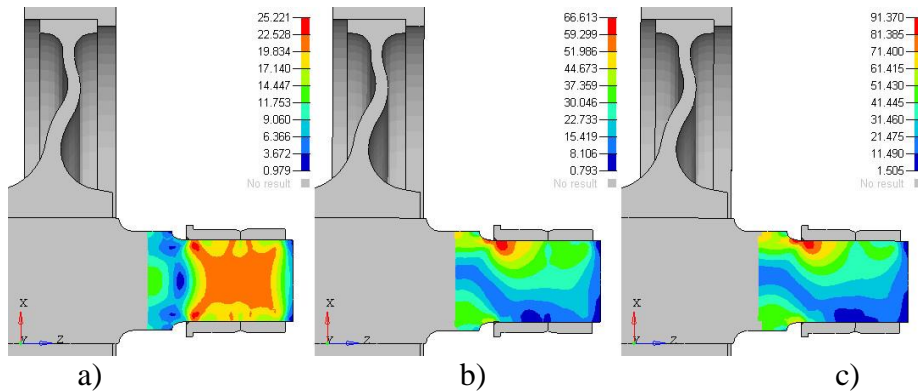
Rys. 15. Model obliczeniowy zestawu kołowego X 093200-1-00 (źródło: opracowanie własne)



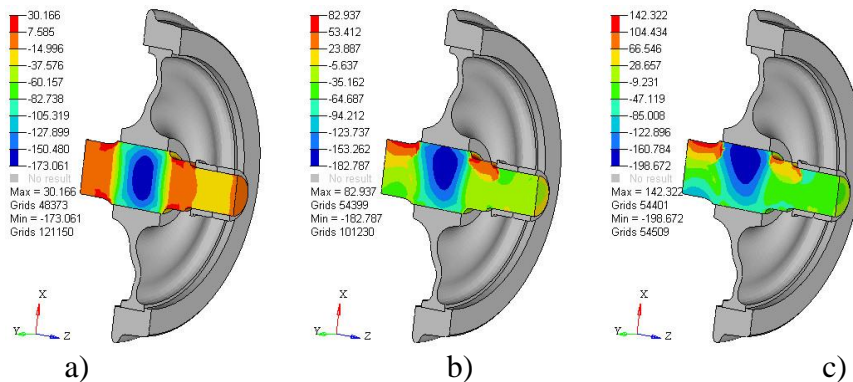
Rys. 16. Naprężenia zredukowane w zestawie kołowym- widok ogólny, a) obciążenie L0, b) obciążenie L1, c) obciążenie L2 (największe naprężenia w tarczy koła bosego od 434 do 496 MPa) (źródło: opracowanie własne)



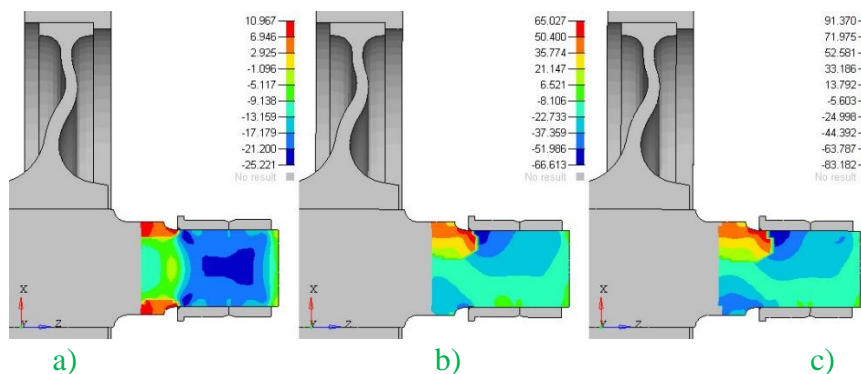
Rys. 17. Naprężenia zredukowane w osi zestawu kołowego, a) obciążenie L0, b) obciążenie L1, c) obciążenie L2 (największe naprężenia w obrębie podpięcia koła od 173 do 198 MPa) (źródło: opracowanie własne)



Rys. 18. Naprężenia zredukowane w czopie osi zestawu kołowego, a) obciążenie L0, b) obciążenie L1, c) obciążenie L2 (źródło: opracowanie własne)



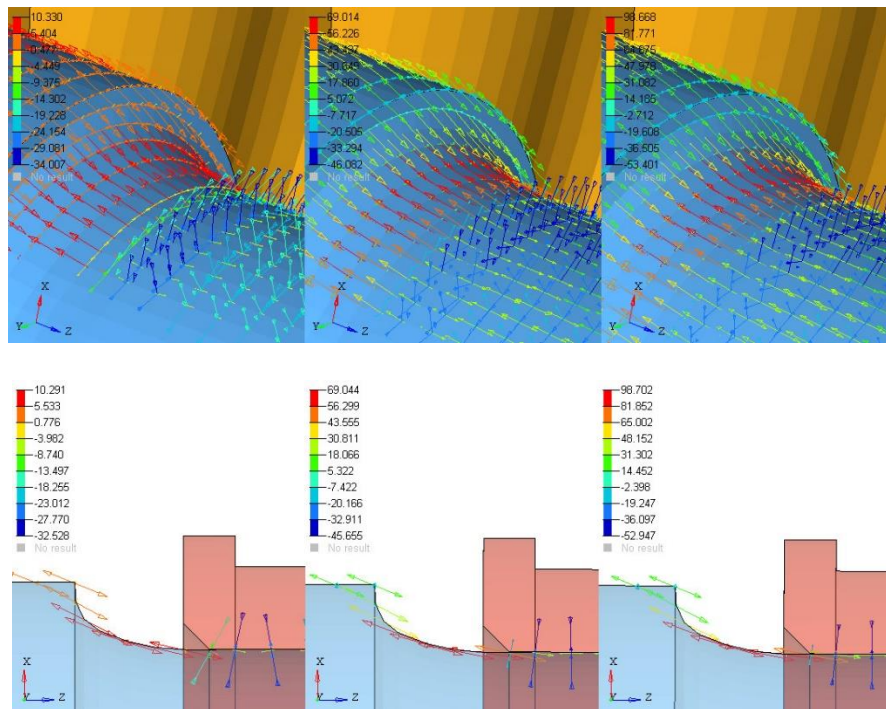
Rys. 19. Naprężenia zredukowane w osi zestawu kołowego z uwzględnieniem obszarów rozciąganych i ściskanych, a) obciążenie L0, b) obciążenie L1, c) obciążenie L2 (źródło: opracowanie własne)



Rys. 20. Naprężenia zredukowane w czopie osi zestawu kołowego z uwzględnieniem obszarów rozciąganych i ściskanych, a) obciążenie L0, b) obciążenie L1, c) obciążenie L2 (źródło: opracowanie własne)

Obliczenia MES wskazały największe naprężenia ściskające dla przypadku L2 w strefie podpięcia, wynoszące 198 MPa, natomiast skok naprężeń z uwzględnieniem obszarów rozciąganych i ściskanych w tym obszarze wynosił od  $(30 \div 142)$  MPa do  $(-173 \div -199)$  MPa. Rozpatrując naprężenia w strefie czopa, wynikające z wykonanych symulacji, stwierdzono

występowanie znacznego gradientu naprężeń w strefie przejścia czopa w przedpiaście, wynoszące w tym obszarze od około  $(10 \div 91)$  MPa do zakresu  $(-25 \div -83)$  MPa w obszarze ściskanym. Powodowało to zauważalną granicę pomiędzy nieprężeniami ściskającymi i rozciągającymi o znacznym gradientcie w obrębie miejsca osadzenia pierścienia wewnętrznego łożyska. W przypadku jakiegokolwiek niesprawności łożyska osiowego, może być to obszar najbardziej podatny na uszkodzenie.



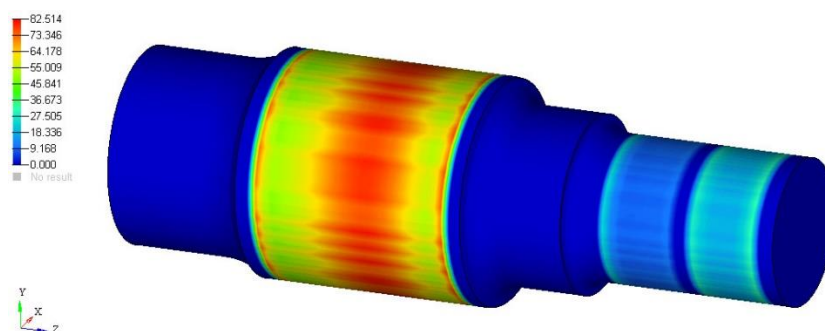
Rys. 21. Naprężenia główne i ich kierunki w obszarze przejściowym czopa i w miejscu osadzenia wewnętrznego pierścienia łożyska (źródło: opracowanie własne)

Wyniki symulacji przedstawione na rys. 22 wskazywały na relatywnie mniejsze naprężenia kontaktowe połączenia tarcowego pierścieni-czop w stosunku do połączenia włączanego piasty koła na podpiaście osi. Rozważając różnice powierzchni styku obu połączeń przyjęto także hipotezę, że miejsce połączenia pierścienia wewnętrznego łożyska osiowego z czopem osi powinno być obszarem, w którym poślizg wału względem elementu osadzonego wystąpi wcześniej niż w miejscu połączenia osi z piastą koła.

Szczególnie dobrze widoczne na odciskach cechowania ślady ścinania obwodowego pierścieni wewnętrznych (rys. 12) potwierdziły znaczący opór w pracy łożyska osiowego. Ślady te powstały najprawdopodobniej w ostatnim etapie pracy tuż przed zatarciem lub tuż po nim. Nie mogły one wystąpić w późniejszej fazie. Korelacja w płaszczyźnie YZ położenia śladów ścinania pierścienia względem schematu zginania osi wykluczyła inny przebieg.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że wielokrotne nagrzewanie i powolne studzenie materiału może powodować odpuszczenie materiału wcześniej zahartowanego. Kiedy twardość materiału bieżni zewnętrznej, wewnętrznej i rolek łożyska ulega zmniejszeniu do stopnia zwiększającego wewnętrzny współczynnik oporu tocznego łożyska, jego temperatura w trakcie pracy może wzrosnąć do tego stopnia, że opory wewnętrzne nie mogą zostać pokonane przez moment obrotowy przenoszony przez oś. Wskutek tego pierścienie

wewnętrzne mogą ulec rozszerzeniu termicznemu i utracić pasowania zaciskowe obniżając dodatkowo współczynnik tarcia na tej granicy i w konsekwencji doprowadzić do obrotu czopa względem pierścieni. W przedstawionym, skrajnym przypadku stwierdzono wzrost temperatury do wartości wynoszącej około 1000°C, uplastycznienia czopa osi i konwekcji energii cieplnej, która spowodowała topnienie mosiężnego koszyka i przejście stopu do fazy ciekłej. Dalsze konsekwencje mogą zależeć od szybkości reakcji personelu operacyjnego na informacje wysyłane z systemów diagnostyki przytorowej DSAT. Do takich urządzeń zalicza się coraz częściej stosowane w krajowej sieci kolejowej urządzenia wykrywania stanów awaryjnych taboru, które bazują na środkach technicznych skutecznych w detekcji zagrzanych łożysk osi pojazdów szynowych, zagrzanych i zablokowanych hamulców, deformacji powierzchni tocznych kół pojazdów szynowych oraz skutecznych w pomiarach i ocenie nacisku wywieranego przez osie pojazdów szynowych.



Rys. 22. Rozkład ciśnienia kontaktowego w osi (źródło: opracowanie własne)

Obliczenia wykonano dla poniższych wariantów:

- L0 – obciążenia od samych wcisków kół i łożysk
- L1 – obciążenia od wcisków kół i łożysk oraz od sił pionowych
- L2 – obciążenia od wcisków kół i łożysk, sił pionowych i poprzecznych z uwzględnieniem zwiększenia siły pionowej pochodzącej od dynamiki jazdy podczas eksploatacji.

## 4. Podsumowanie

Osie kolejowe są bardzo odpowiedzialnymi wyrobami, przez co cały ich cykl *życia*, od momentu wykonania, przez eksploatację i nadzór nad wyrobami wycofanymi z eksploatacji jest uregulowany przepisami międzynarodowymi. Materiały stosowane na osie kolejowe wyprodukowane wiele dekad temu nie odbiegają znacząco właściwościami od materiałów stosowanych obecnie. Wieloletnia, wysokocyklowa eksploatacja jest dobrym potwierdzeniem odpowiedniej wytrzymałości materiału i właściwie wykonanego projektu. Mimo tego, osie po tak długim okresie eksploatacji, niezależnie od pokonywanych dystansów powinny być szczególnie dokładnie weryfikowane. Wpływa na to fakt, że elementy współpracujące mogły być wielokrotnie demontowane w całym cyklu *życia* osi i może istnieć realne ryzyko, że nie wszystkie podzespoły będą po ponownym montażu właściwie współpracować. Istnieje także praktyka wykorzystywania kwalifikowanych materiałów starożytecznych, o których więcej napisano w [25].



W pierwszym omówionym przypadku montaż łożysk osiowych na niewłaściwie przygotowane powierzchnie skutkowało wadą technologiczną o różnym stopniu intensywności po każdej stronie osi już na etapie zakończenia procesu utrzymaniowego. W drugim przypadku uszkodzenie mogło wystąpić w trakcie eksploatacji i z biegiem czasu zwiększać swoją intensywność, natomiast szczegółowa kontrola zestawu kołowego także i w tym przypadku wskazywała na możliwość niestarannej obsługi węzłów łożyskowych. Elementy układu biegowego cechuje duża wrażliwość na jakość czynności utrzymaniowych i na intensywność obciążeń wyjątkowych. Podczas eksploatacji, na co operator nie ma wpływu, największe ryzyka dla utrzymania niepogorszonych walorów eksploatacyjnych osi kolejowych niosą ze sobą zdarzenia o charakterze incydentalnym. Są to elementy możliwe jednak do przewidzenia na etapie szacowania ryzyka operacyjnego.

Oba czynniki mogą występować wspólnie tworząc zbieg okoliczności prowadzący do zdarzenia. Mogą też występować osobno tworząc bezpośrednią przyczynę wypadku. Na oba czynniki decydujący wpływ ma jednak czynnik ludzki i jego świadomość na temat zagrożeń i możliwych konsekwencji. W konsekwencji obsługa zestawów kołowych powinna być wykonywana z najwyższą starannością, zgodnie z procedurami operacyjnymi, zarówno na etapie utrzymania jak i na etapie eksploatacji. W efekcie wycofywanych z eksploatacji jest wiele osi kolejowych, również stosunkowo nowych. Będą jednak zdarzać się przypadki uszkodzeń w trakcie wykonywania pracy przewozowej i każdy taki incydent będzie generował znaczące straty materialne i ekonomiczne, co powinno dodatkowo skłaniać operatorów i podmioty odpowiedzialne za utrzymanie taboru do ciągłego podwyższania poziomu bezpieczeństwa eksploatowanego taboru kolejowego.

## Literatura

1. Antolik, Ł., Bińkowski, R., Ostromęcka, M. Prace badawczo-eksperymentalne Instytutu Kolejnictwa z lat 2020-2021.
2. Antolik, Ł. (2014). Metodyka wykrywania pęknięć zmęczeniowych w osiach kolejowych a wymagania norm europejskich, *Problemy Kolejnictwa*, 165, 7-19.
3. Attia, H. (2009). On the thermal origin of the antagonistic and synergistic effects of fretting and crevice corrosion processes in multi-phase flow environment, *Tribology International*, 42, 1263-1268.
4. Białoń, A. (2018). Impedancja osi zestawu kołowego pojazdu szynowego i jej wpływ na pracę urządzeń srk, *TTS Technika Transportu Szynowego*, 12, 34-37.
5. Biżić, M., Petrović, D. (2021). Analytical calculation of strength of freight wagon axle in accordance with european standards, *Mechanics Transport Communications*, Vol. 19, Iss. 3, article № 2113.
6. Dębiński, M., Brezáni, M. (2018) Fretting wear as an example of destruction of railway vehicles wheelsets, *New Trends in Production Engineering* Vol. 1, Iss. 1, 371-376.
7. Dikmen, F., Bayraktar, M., Guclu, R. (2012) Railway axle analyses: fatigue damage and life analysis of rail vehicle axle, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 58, Iss. 9, 545-552.
8. Europejski katalog inspekcji wizualnej (EVIC) dla osi wagonów towarowych, wersja 01.01.2020.
9. Foletti, S., Beretta, S., Gurer, G. (2016). Defect acceptability under full-scale fretting fatigue tests for railway axles, *International Journal of Fatigue*, 86, 34-43.
10. Kowalczyk, D., Bińkowski, R. (2017). Analiza przyczyn uszkodzeń zestawów kołowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, *Problemy Kolejnictwa*, 175, 47-52.
11. Kowalski, S., Lachowski, P. (2018). Wybrane uszkodzenia i zużycia zestawów kołowych pojazdów szynowych, *Autobusy*, 12/2018, 480-485.
12. Kulesza, E., Dąbrowski, J., Sidun, J., Neyman, A., Mizera, J. (2012). Fretting wear of materials – methodological aspects of research, *Acta Mechanica et Automatica*, 6, 58-61.
13. Michnej, M. (2012). Proces zużycia w połączeniu obrotowym na przykładzie modelu zestawu kołowego z samoczynną zmianą rozstawu kół, *Czasopismo techniczne Politechniki Krakowskiej/Technical*

- Transaction, 14, 7-M. Mikłaszewicz, I. (2008). Charakterystyczne uszkodzenia zestawu kołowego powodujące zdarzenia wypadkowe, *Problemy Kolejnictwa*, 146, 81-94.
14. Mutoh Y. (1995). Mechanism of fretting fatigue, *JSME International Journal, Series A*, Vol. 38, No. 4, 404-415.
  15. Nesládek, M., Španiel, M., Jurenka, J., Růžička, J., Kuželka, J. (2012). Fretting fatigue – Experimental and numerical approaches, *International Journal of Fatigue*, 44, 61-73.
  16. PN-EN 13261:2021-02 Kolejnictwo -- Zestawy kołowe i wózki -- Osie -- Wymagania dotyczące wyrobu.
  17. PN-EN 13979-1:2011 p.7.2 Kolejnictwo -- Zestawy kołowe i wózki -- Koła monoblokowe -- Procedura dopuszczenia -- Część 1: Koła kute i walcowane.
  18. PN-EN 15313:2016-05 Kolejnictwo -- Wymagania eksploatacyjne dotyczące obsługi zestawów kołowych -- Utrzymanie zestawów kołowych pojazdów w eksploatacji i wyłączonych z eksploatacji.
  19. PN-91/H-84027/03 Stal dla kolejnictwa -- Osie zestawów kołowych do pojazdów szynowych – Gatunki.
  20. Raport ORE/ERRI B12/Rp.14/D: Frage B12 (1967) Vereinheitlichung der Güterwagen. Standard-Drehgestell. Bericht 14.
  21. Raport roczny za rok 2021 z działalności Państwowej Komisji Badań Wypadków Kolejowych [online], dostęp: 28 czerwca 2023], dostępny na <https://www.gov.pl/attachment/e5ee5990-057a-4691-a246-3dfaa6625446>
  22. Rozporządzenie 1302/2014 w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor - lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej, Dz.U.UE.L.2014.356.228
  23. Sobaś, M. (2012). Warunki wprowadzenia do eksploatacji używanych pojazdów szynowych trakcyjnych oraz tocznych, *Pojazdy Szynowe*, 1, 26-34.
  24. Sobaś, M. (2016). Wpływ omażnicowanych zestawów kołowych na bezpieczeństwo eksploatacyjne wagonów towarowych, *Pojazdy Szynowe*, 4, 13–23.
  25. Tabor kolejowy przewoźników towarowych [online], [dostęp: 28 czerwca 2023], dostępny na <https://dane.utk.gov.pl/sts/tabor/tabor-towarowy/19008,Tabor-kolejowy-przewoźników-towarowych.html>

## Przyczyny uszkodzeń osi kolejowych – studium przypadku

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia studium przeanalizowanych przypadków uszkodzeń eksploatacyjnych osi kolejowych, które były przyczyną wykolejenia taboru. Jako przykład posłużą przypadki ukłęcia czopa osi oraz pęknięcia czopa osi w wagonach towarowych. Oba analizowane przypadki dotyczą wyrobów wykonanych ze stali konstrukcyjnej i eksploatowanych przez dziesięciolecia w wagonach towarowych. Zakres badań obejmował sprawdzenie własności materiałowych, oględziny przełomów i symulacje naprężeń w materiale oraz ciągu przyczynowo-skutkowego doprowadzającego do wystąpienia incydentów. Przedstawiony materiał może być wykorzystywany w celu zwiększania świadomości i podnoszenia kompetencji personelu operacyjnego zatrudnionego w podmiotach odpowiedzialnych za utrzymanie (ECM).

**Słowa kluczowe:** wady osi kolejowych, uszkodzenie osi, wykolejenie

