

Problemy uszkodzeń zmęczeniowych osi pojazdów szynowych

Problems of fatigue damage of axis rail vehicles

Streszczenie

Pomimo projektowania osi pojazdów szynowych w zakresie tzw. nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, wobec podwyższania prędkości pojazdów oraz występowania złożonych zjawisk eksploatacyjnych i materiałowych, rejestrowane są kolejne przypadki występowania uszkodzeń takich osi. W artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących 120 szt. osi pojazdów szynowych, dla których po ok. 4 latach eksploatacji, dla 8 szt. osi stwierdzono występowanie pęknięć zmęczeniowych. Badania defektoskopowe wykonane metodami ultradźwiękową i magnetyczno-proszkową pozwoliły wytypować element, z którego pobrano próbki do wykonania badań składu chemicznego materiału, pomiarów twardości, badań mikroskopowych i fraktograficznych. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że przyczyną wykrytych pęknięć zmęczeniowych osi było powstanie pęknięć hartowniczych w obszarze karbu geometrycznego.

Abstract

Despite axis design of rail vehicles for so-called unlimited fatigue strength, towards increase of the speed of vehicles and occurrence of a number of operational and materials complex phenomena, more cases of damages to such axis are recorded. This article presents the results of non-destructive testing of 120 pcs of axis of rail vehicles, for which after about four years of operation, for eight pieces of axis fatigue cracks were found. Completed non-destructive examination, using ultrasonic and magnetic-particle methods, helped predict the element from which were taken samples for testing the material chemical composition, hardness measurements, microscopic and fractographic examination. Analysis of the tests results showed that the cause of detected fatigue cracks of axis were quenching cracks arisen in the notch geometry.

Wstęp

Najstarszym, pochodzącym z połowy XIX stulecia wykresem zmęczeniowym, jest wykres Wöhlera [1], którego konstrukcja została oparta na obserwacjach dotyczących pęknięcia osi wagonowych. Pomimo projektowania takich osi w zakresie tzw. nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, wobec podwyższania prędkości pojazdów szynowych oraz występowania coraz liczniejszych złożonych zjawisk eksploatacyjnych i materiałowych, rejestrowane są kolejne przypadki występowania uszkodzeń takich osi, kończące się niekiedy tragicznie, jak w czerwcu 2009 r. w Viareggio, gdzie w wyniku pęknięcia zmęczeniowego osi w wagonie cysterny przewożącej gaz skroplony zginęły 32 osoby, a rannych zostało 27 osób. W przypadku takich katastrof taboru szynowego

często trudne jest ustalenie ich przyczyn, pomimo wcześniejszego prowadzenia odpowiednio dokumentowanych badań eksploatacyjnych, w tym badań nieniszczących.

Badania nieniszczące osi

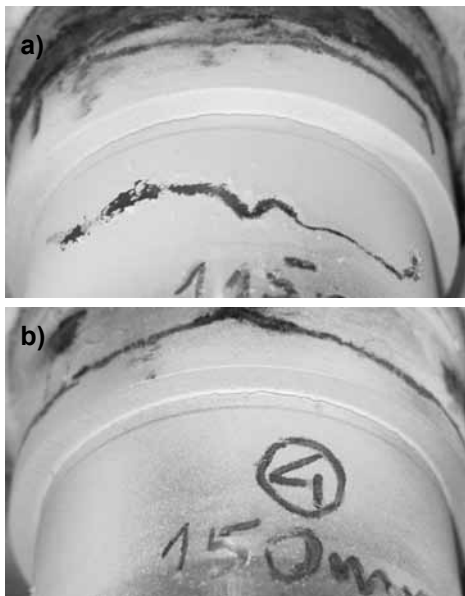
W związku ze stwierdzonymi po okresie eksploatacji wynoszącym ok. 4 lata, 3 przypadkami pęknięcia zmęczeniowego na wskroś, w obszarze karbu osi $\varnothing 100$ pojazdów szynowych (rys. 1) przeprowadzono odpowiednie badania i analizy [2], celem znalezienia przyczyn występowania takich uszkodzeń. Badania nieniszczące z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej głowic fal podłużnych z powierzchni czołowej dla ok. 120 szt. zamontowanych osi, w 8 przypadkach ujawniły występowanie pęknięć w obszarze karbu geometrycznego. Po demontażu osi z wykrytymi pęknięciami, wykonano

badania defektoskopowe metodą magnetyczno-proszkową, które potwierdziły wyniki badań metodą ultradźwiękową i pozwoliły uściślić długości pęknięć, które wynosiły: 38, 115, 90, 150, 150 i 18; pełny obwód – 200 oraz 67 mm. Przykładowe pęknięcia wykryte metodą magnetyczno-proszkową pokazano na rysunku 2. Analiza porównawcza długości pęknięć na obwodzie określonych obrotami ww. metodami wykazała znaczące różnice w rozmiarach pęknięć. Długość pęknięć określona metodą ultradźwiękową była zwykle mniejsza o kilka do kilkunastu procent, niż określona metodą magnetyczną. Do dalszych badań z osi, dla której metodą magnetyczną wykryto pęknięcie na całym jej obwodzie, wycięto próbkę pokazaną na rysunku 3.

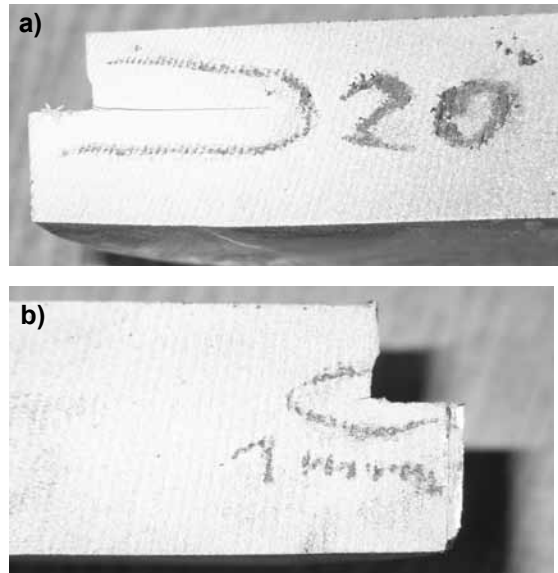
Analiza kierunku rozwoju pęknięcia osi z rysunku 3 wskazuje na występowanie dwóch faz rozwoju pęknięcia. W początkowej fazie pęknięcie rozwija się do głębokości ok. 1÷2 mm pod kątem ok. 19° do normalnej do powierzchni walcowej, przy czym na tym etapie można niekiedy zaobserwować występowanie równoległych pęknięć wielokrotnych (rys. 3a). W drugim



Rys. 1. Przełom zmęczeniowy osi pojazdu szynowego
Fig. 1. Fatigue fracture of the rail vehicle axl



Rys. 2. Pęknięcia osi pojazdu szynowego wykryte metodą magnetyczno-proszkową: a) o dł. 115 mm, b) o dł. 150 mm
Fig. 2. Cracks of the rail vehicle axle detected by magnetic-particle testing: a) with a length of 115 mm, b) with a length of 150 m



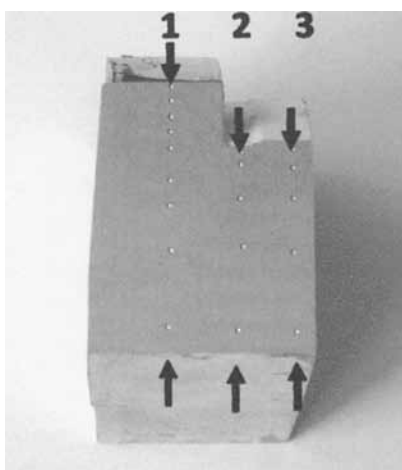
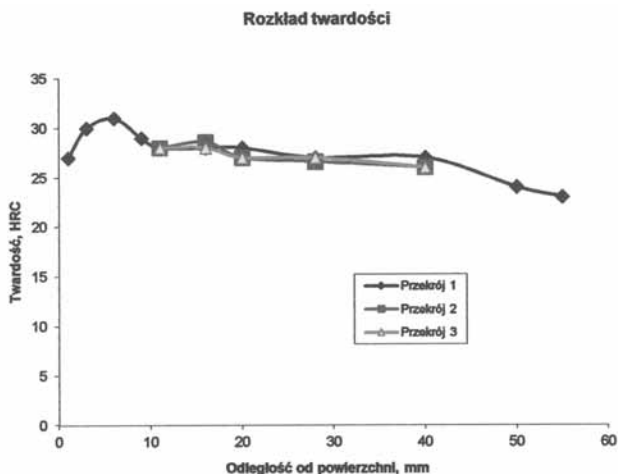
Rys. 3. Próbkę wyciętą z osi z pęknięciem na całym jej obwodzie: a) widoczna maksymalna głębokość pęknięcia wynosząca 20 mm b) pęknięcie 1 mm nie wykryte metodą ultradźwiękową
Fig. 3. A sample cut from the axis with the crack around the entire circumference: a) visible maximum depth of cracks of 20 mm, b) 1 mm crack not detected by ultrasound

etapie następuje zmiana kierunku pęknięcia, które propaguje dalej w kierunku prostopadłym do osi elementu. Pęknięcie na rysunku 3b nie zostało wykryte metodą ultradźwiękową przy badaniu falami podłużnymi od czoła osi, co uzasadnić można wynikami badań zamieszczonych w pracach [3, 4], które wskazują na bardzo niskie prawdopodobieństwo wykrycia wady o głębokości mniejszej niż 2 mm metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem fal podłużnych wprowadzanych od czoła. Taka metoda badania nie daje również gwarancji wykrycia pęknięć o większych wymiarach, w przypadku występowania naprężeń ściskających, jak również występowania smaru w obszarze pęknięcia, w związku z efektem znacznego osłabienia amplitudy echa wady [4, 5].

Przy szybkim tempie rozwoju pęknięć zmęczeniowych rozważanych osi prowadzenie badań eksploatacyjnych metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem fal podłużnych wprowadzanych od czoła mogło być przyczyną pęknięć osi na wskroś, a wskutek tego wykojenia pojazdów szynowych, pomimo prawidłowego nastawienia czułości oraz odpowiedniej staranności prowadzenia badań.

Badania metalograficzne

Badania metalograficzne wykonano dla obu próbek pobranych z osi, dla której pęknięcie stwierdzono na całym obwodzie (rys. 3). Wykonana analiza składu chemicznego materiału wykazała, że os wykonano ze stali 36CrNiMo4 (36HNM), przy czym stwierdzono mniejszą o 0,02% zawartość węgla od wymaganej zgodnie z PN-EN 10083.

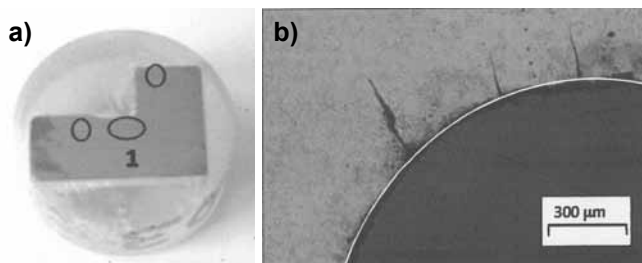


Rys. 4. Wyniki pomiarów twardości w obszarze karbu
Fig. 4. Results of measurement of hardness in the area of the notch

Pomiary twardości metodą Rockwella, wykonane w trzech przekrojach (1, 2 i 3) w obszarze karbu zestawione na rysunku 4 wykazały, że bezpośrednio przy powierzchni twardość jest nieco niższa niż w odległości 3÷5 mm i ulega dalszemu obniżeniu idąc w kierunku środka przekroju.

Badania mikroskopowe

Dla drugiej odciętej części próbki z rysunku 3b wykonano próbkę do badań metalograficznych (rys. 5a), których wyniki dla obszaru 1 pokazano na rysunku 5b. Na rysunku 5b widoczne są trzy mikropęknięcia, a stal



Rys. 5. Badania metalograficzne: a) próbka do przeprowadzenia badań, b) wyniki badań dla obszaru 1 – widoczna mikrostruktura sorbityczna

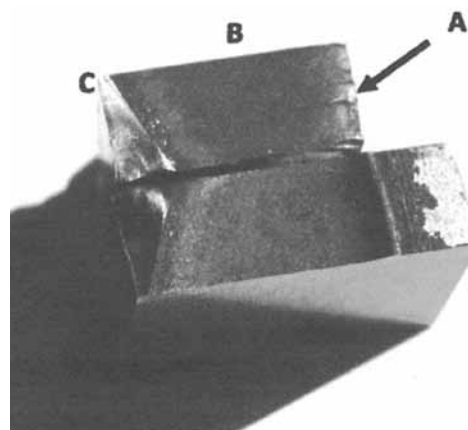
Fig. 5. Metallographic examination: a) sample for testing, b) test results for the area 1 - visible sorbitic microstructure

ma mikrostrukturę sorbitu charakterystyczną dla stali po ulepszeniu cieplnym i wysokim odpuszczaniu. Na rysunku tym wrysowano okrąg o promieniu 0,9 mm, przy czym projektowa wartość promienia karbu wynosi 1,0 mm.

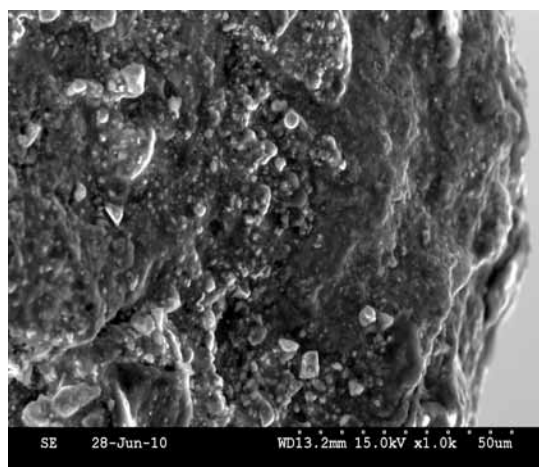
Badania fraktograficzne

Badania fraktograficzne skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM) wykonano dla próbki pobranej w obszarze występowania głębokiego pęknięcia pokazanym na rysunku 6. Na tej próbce zaznaczono obszary, dla których wykonano badania SEM: A – miejsce inicjacji pęknięcia, B – przełom zmęczeniowy oraz C – przełom ciągły w miejscu dołamania próbki. Wyniki badań fraktograficznych dla obszarów A, B i C zilustrowano na rysunkach 7-9.

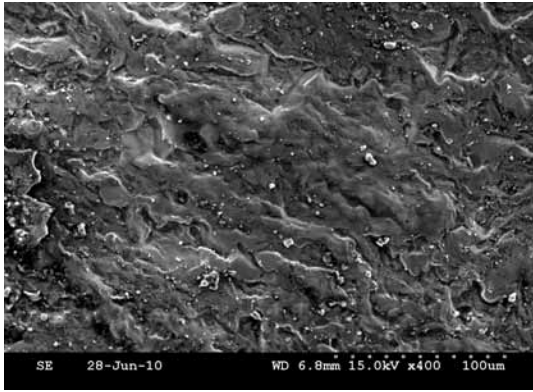
Badania fraktograficzne wykazały, że w obszarze karbu geometrycznego A (rys. 6) zainicjowane zostało kruche międzykrystaliczne mikropęknięcie, od którego rozwinęło się pęknięcie o charakterze zmęczeniowym – obszar B (rys. 8). Badania makroskopowe osi wykonane w obszarze karbu ujawniły występowanie pęknięć o zróżnicowanej głębokości na obwodzie elementu – rysunki 1, 3 i 6, co sugeruje, że są to mikropęknięcia hartownicze.



Rys. 6. Próbkę do badań fraktograficznych
Fig. 6. Sample for fractographical testing

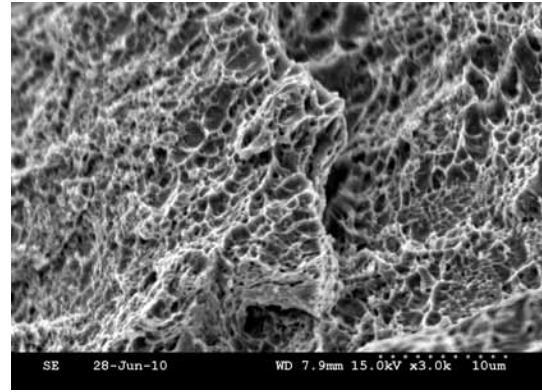


Rys. 7. Przełom kruchy w obszarze A – karbu
Fig. 7. Brittle fracture in the A area notch



Rys. 8. Przełom zmęczeniowy w obszarze B z widocznymi liniami zatrzymania pęknięcia

Fig. 8. Fatigue fracture in the B area with visible lines of the cracks stop



Rys. 9. Przełom ciągliwy w obszarze dołamania C

Fig. 9. Ductile fracture in the area of fracture C

Podsumowanie

Badania defektoskopowe wytypowanej do analizy osi metodą ultradźwiękową i magnetyczno-proszkową ujawniły mechanizm rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w obszarze karbu rozważanego elementu. W początkowej fazie pęknięcie rozwija się do głębokości ok. 1±2 mm pod kątem ok. 19° do normalnej do powierzchni walcowej, przyjmując niekiedy charakter równoległych pęknięć wielokrotnych. W drugim etapie następuje zmiana kierunku pęknięcia, które w sposób zmęczeniowy rozwija się dalej w kierunku prostopadłym do osi elementu.

Podczas prowadzenia badań metodą ultradźwiękową falami podłużnymi od czoła osi stwierdzono problemy z wykrywaniem pęknięć w początkowej fazie ich rozwoju, co można wyjaśnić na podstawie wyników badań zamieszczonych w pracach [3, 4], które wskazują na bardzo małe prawdopodobieństwo wykrycia wad o głębokości 2 mm, a nawet większej, zastosowaną metodą.

Pomiary promienia przejścia w obszarze karbu wykazały, że uzyskana wartość promienia jest mniejsza niż wymagana zgodnie z dokumentacją techniczną (1 mm) i wynosi ok. 0,9 mm.

Pomiary twardości metodą Rockwella wykazały występowanie lokalnego ekstremum twardości na głębokości 3±5 mm o wartości 31 HRC, przy czym

w kierunku środka osi twardość maleje monotonicznie do 23 HRC.

Badania metalograficzne wykazały, że zastosowana stal 36CrNiMo4 została poddana ulepszeniu cieplnemu, tj. hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu i ma mikrostrukturę sorbityczną.

Badania fraktograficzne dostarczyły informacji o obszarze inicjacji pęknięcia oraz jego późniejszej propagacji. Można przypuszczać, że w miejscu karbu (promień ok. 1,0 mm) powstało kruche międzykrystaliczne mikropęknięcie lub wielokrotne mikropęknięcia, których dalszy rozwój następowałby mechanizmem zmęczeniowym.

Charakter kruchych wielokrotnych pęknięć i ich zróżnicowana głębokość na obwodzie w obszarze karbu geometrycznego (rys. 1, 3, 5b i 6) wskazuje, że są to pęknięcia hartownicze, od których nastąpił dalszy rozwój pęknięć zmęczeniowych w głąb materiału. Niezbyt duża wartość promienia przejścia w obszarze karbu geometrycznego, przyjęta w dokumentacji technicznej na podstawie wykonanej analizy wytrzymałościowej osi, w połączeniu z pojawieniem się „ostrych” kruchych pęknięć hartowniczych, wpłynęła prawdopodobnie na przyspieszenie tempa rozwoju pęknięć zmęczeniowych osi.

Literatura

- [1] Kocańda S., J. Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1997.
- [2] Ładecki B., Skowronek T.: Analiza przyczyn występowania uszkodzeń zmęczeniowych osi pojazdów szynowych. Praca badawczo-rozwojowa nr 5.5.130.916. AGH w Krakowie, czerwiec 2010.
- [3] Zerbst U., Madler K., Hintze H.: Fracture mechanics in railway applications – an overview. Engineering Fracture Mechanics 2005, Vol. 72, s. 163-194.

- [4] Szelażek J., Grzywna P., Gutkiewicz P., Mackiewicz S.: Zjawiska wpływające na wykrywalność pęknięć zmęczeniowych w eksploatacyjnych badaniach ultradźwiękowych osi kolejowych. Mat. XVIII Seminarium – Nieniszczące Badania Materiałów. Zakopane, marzec 2012, s. 37-49.
- [5] Starzyński G., Szelażek J., Mackiewicz S.: Badania współczynnika odbicia i sztywności kontaktowej powierzchni chropowatych przy pomocy fal ultradźwiękowych. Mat. XVI Seminarium – Nieniszczące Badania Materiałów. Zakopane, marzec 2010, s. 53-66.