

Analiza przyczyn rozerwania pociągów towarowych spowodowanych zerwaniem drąga haka cięgłowego

Daniel Krzyżak, Tadeusz Łagoda

W pracy przedstawiono analizę wytrzymałości elementów kolejowego urządzenia i sprzęgu cięgłowego oraz analizowano przyczyny zerwania haków i łubek. Obliczenia naprężeń i odkształceń w badanych elementach wykonano za pomocą Metody Elementów Skończonych MES, uwzględniając sprężysto-plastyczne właściwości materiału oraz kontakt. W obliczeniach uwzględniono możliwość działania składowej pionowej siły powodującej zginanie haków. Przeprowadzona analiza umożliwiła porównanie wartości naprężeń i odkształceń ułatwiając wnioskowanie o przyczynach występowania rozerwania pociągów. Zaproponowano metodologię dalszych badań zmęczeniowych i pomiaru obciążeń.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 19.09.2013

data akceptacji do druku: 27.12.2013



mgr inż.
Daniel Krzyżak
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Opolska
d.krzyzak@doktorant.po.opole.pl



Prof. dr hab. inż.
Tadeusz Łagoda
Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
t.lagoda@po.opole.pl

Wstęp

Sprawne i ekonomiczne prowadzenie przewozów transportem kolejowym nie było by możliwe bez zastosowania wielu pojazdów, które muszą być ze sobą połączone. Im większa liczba pojazdów w składzie pociągu oraz masa przewożonego ładunku, tym działające siły są większe. Połączenie pojazdów między sobą nie jest realizowane w sposób sztywny.

Występowanie luzów pomiędzy zderzakami, nierównomierność zadziałania hamulców powiązana z intensywnością hamowania oraz jazdą po nierównościach toru, powoduje działanie sił dynamicznych. Pewna, ograniczona wartość powstałej energii jest tłumiona przez pracę amortyzatorów. Duże znaczenie mają obciążenia powodujące zginanie drąga haka, które nie podlegają tłumieniu przez amortyzatory. Zgodnie z normą [6], wytrzymałość haka powinna być większa od wytrzymałości sprzęgu cię-

głowego, tymczasem zerwaniu częściej ulegają drągi haków. Zerwanie następuje najczęściej w przekroju dolnego zaokrąglenia, w przejściu drąga w łeb haka, w miejscu występowania spiętrzenia naprężeń.

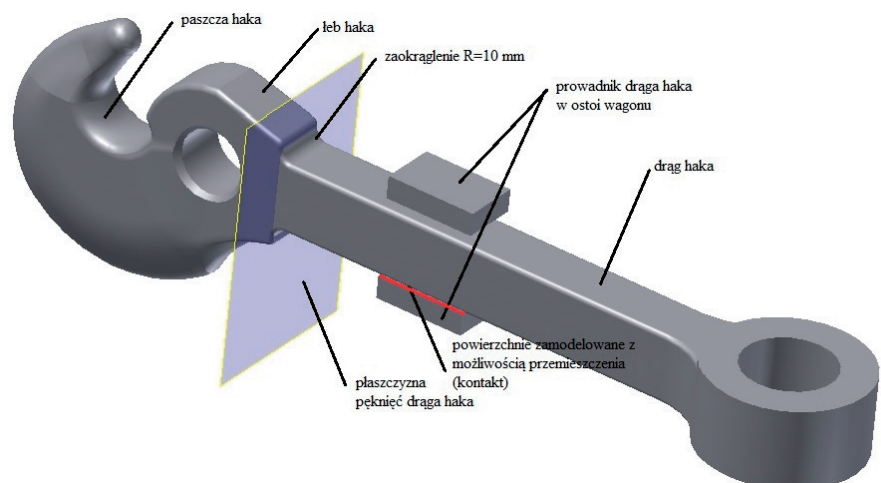
Zgodnie z normą [7,8], hak cięgłowy został zaprojektowany do przeniesienia siły o wartości co najmniej 1000 kN, natomiast wytrzymałość łubek, elementów najsłabszych w sprzęgu, nie powinna być większa od wartości odpowiadającej działaniu siły 850 kN.

Siła pociągowa na haku pojazdu trakcyjnego, oprócz momentu ruszania z miejsca nie powinna przekraczać 300 kN [5]. Wartość 300 kN jest określana mianem siły uciągu i jest to siła po przekroczeniu której w sprzęgu cięgłowym mogą pojawić się odkształcenia plastyczne. Podczas rozruchu i jazdy ciężkich pociągów towarowych wartość siły uciągu jest często przekraczana. Zgodnie z normami [6,7], próbę rozciągania haka wykonuje się poddając go stopniowemu obciążeniu siłą rozciągającą do wartości 1000 kN, oraz utrzymuje się te obciążenie w czasie od 2 do 3 minut. Najnowsza nor-

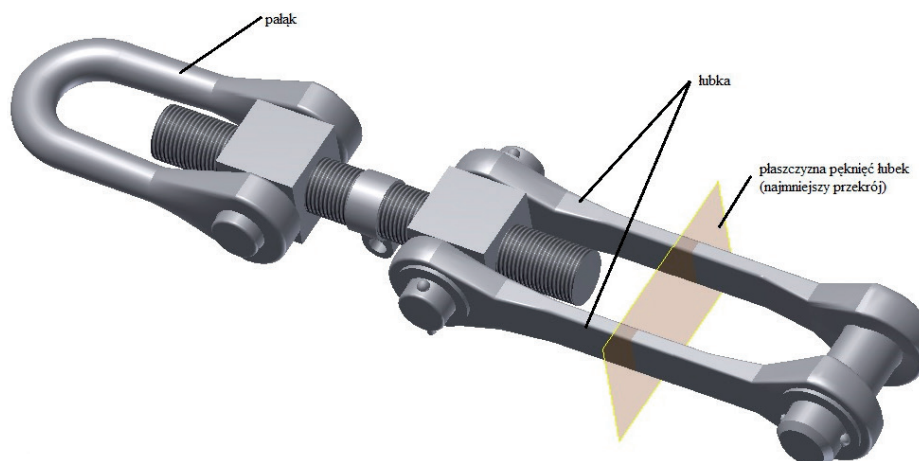
ma [8] narzuca także badania zmęczeniowe haków cięgłowych. Dla haków o wytrzymałości na siłę 1 MN i założonej trwałości 30 lat, powinien on wytrzymać bez śladów pęknięć test obciążenia siłą 200 kN przez $1,5 \cdot 10^6$ cykli oraz siłą 675 kN przez $2,15 \cdot 10^3$ cykli. Żadne próby wymienione w opracowaniach [5÷8] nie uwzględniają występowania składowej pionowej siły, która powoduje dodatkowe zginanie drągów haków.

Na rysunkach 1 i 2 zaznaczono płaszczyznę najczęściej występujących przełomów materiału drąga haka i łubki.

Badania haków i sprzęgów cięgłowych podczas eksploatacji sprowadzają się głównie do pomiaru wymiarów średnic otworów współpracujących ze sworzniami. W tych miejscach występują duże odkształcenia plastyczne, choć zerwania zdarzają się bardzo rzadko. O ile sprzęgi cięgłowe podlegają częstym wymianom ze względu na zwiększenie średnicy otworów w pałaku i łubkach (kształt elipsy), o tyle haki cięgłowe są wymieniane sporadycznie. Regeneracja haków z przekroczonymi wymiarami polega na dogięciu paszczy haka odkształconej podczas



1. Hak cięgłowy



2. Sprzęg cięglowy



3. Przełom drąga haka - widok na ostoję wagonu

kontaktu z pałąkiem i napawania w miejscu wytarcia powierzchni.

Przykładowe przełomy materiału w przekroju drąga haka przedstawiono na rysunkach 3, 4.

Obciążenia

Siła pociągowa w zależności od typu lokomotywy może osiągać wartości do 550 kN. Wynika z tego, że wartość siły rozciągającej działającej na urządzenie cięglowe, przy założeniu braku sił dynamicznych nie może nigdy przekroczyć siły dopuszczalnej dla sprzęgu równej 850 kN. Działanie sił o większych wartościach może wystąpić gdy:

- nastąpi szarpnięcie spowodowane przez nieprawidłowe sprzęgnięcie wagonów lub wydłużenie materiału elementów urządzenia i sprzęgu cięglowego. Zbyt duże luzy między zderzakami umożliwiają powstanie sił dynamicznych z powodu różnic energii kinetycznej poszczególnych wagonów;

- wyeksploatowane amortyzatory tłumiące nie są w stanie pochłonąć energii kinetycznej podczas szarpnięć;
- nastąpi nierównomierne zadziałanie hamulców podczas wdrożenia hamowania powodując szarpnięcia, wagony w tylnej części pociągu zaczynają hamować szybciej niż w części przedniej;
- nastąpi nagłe wyłączenie napędu, a w pewnych przypadkach także wdrożenie hamowania w lokomotywie popychającej przy włączonym napędzie lokomotywy pociągowej, wdrożenie hamowania samoczynnego hamulca pneumatycznego w końcowej części składu pociągu powoduje szarpnięcia spowodowane bezwładnością masy wagonów;
- występuje różnica wysokości działania siły (nieosiowość) powodująca powstanie siły pionowej, która spowoduje zginanie drąga haka bez możliwości tłumienia sił uderowych;
- podczas jazdy po nierównościach toru wystąpią pionowe ruchy drąga haka w ostoi pomiędzy jego prowadnikiem dolnym i górnym, co może powodować uderzanie drąga o prowadnik;
- wystąpi kombinacja dwóch lub kilku przyczyn wymienionych wyżej.

Wartości siły działającej na połączenie sprzęgowe mają charakter dynamiczny. Z zasady siły te powinny powodować jedynie rozciąganie obciążonych elementów. Jednak w przypadku haka cięglowego, może wystąpić różnica wysokości osi drągów sąsiednich wagonów, co może być spowodowane różnicą średnic kół, wartością ugięcia odsprężynowania, a także jazdą wagonów po nierównościach toru. Według decyzji [1] wysokość osi haka cięglowego powinna wynosić między 920 mm, a 1045 mm nad poziomem szyny we wszystkich warunkach obciążenia. Wskazuje to na maksymalną dopuszczalną różnicę wysokości osi drągów haków o wartości 125 mm. Uwzględniając całkowitą długość sprzęgu skróconego 750 mm, z obliczeń składowej pionowej siły F_y oraz składowej poziomej F_x , wynika, że zmieniają się one liniowo zgodnie z zależnościami,

$$F_y = F \cdot \frac{x}{750} [N], (1)$$

$$F_x = F \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{750}\right)^2} [N], (2)$$

gdzie:

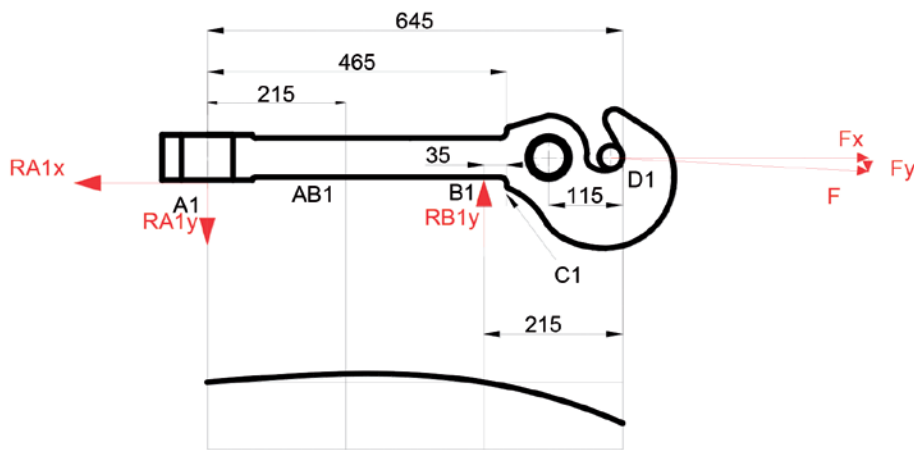
F – siła wypadkowa [N];

x – różnica wysokości osi haków cięglowych sąsiednich wagonów [mm].

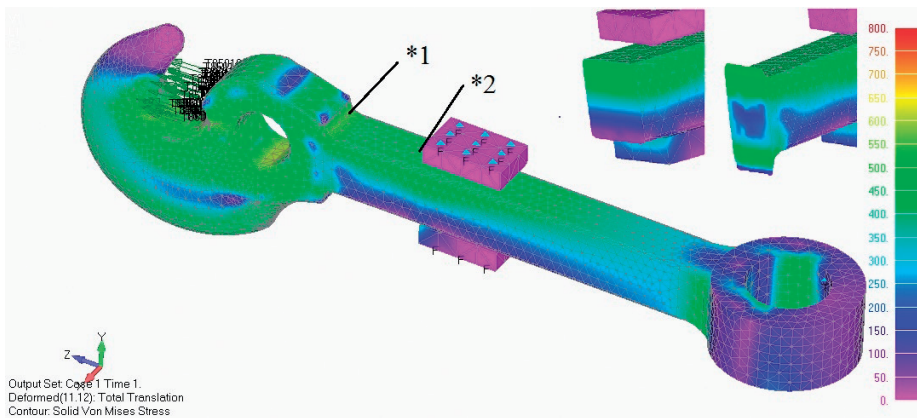
W czasie jazdy pociągu po nierównościach toru, mogą występować uderowe zderzenia drąga haka z prowadnikiem dol-



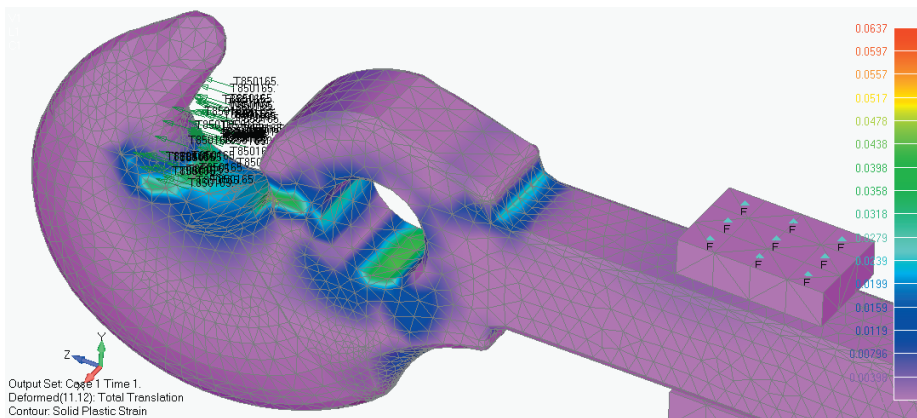
4. Przełom drąga haka - widok na zerwany łeb haka



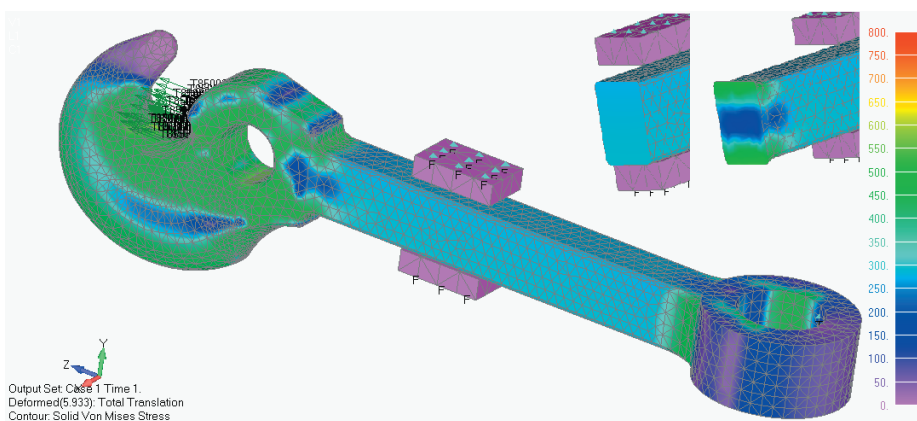
5. Pierwszy przypadek obciążenia haka ciągłowego



6. Naprężenia w haku zginanym obliczone według hipotezy Hubera-Misesa



7. Odkształcenia plastyczne w haku zginanym



8. Naprężenia w haku rozciągany obliczone według hipotezy Hubera-Misesa

nym lub górnym, co jest bardziej niebezpieczne, jeśli drąg haka unosi się z dolnego do górnego prowadnika po każdym obciążeniu siłą pionową. Wartość konstrukcyjna pionowego luzu prowadnika haka ciągliwego powinna wynosić $2 \div 4$ mm, a wartość naprawcza dochodzi do 7 mm [4]. Wartość energii, która zostaje rozproszona w materiale podczas udarowego zderzenia, zależy od wartości siły pionowej działającej na długości luzu prowadnika. Ta sytuacja może tłumaczyć fakt obserwowanych pęknięć z inicjacją w dolnym zaokrągleniu drąga haka. Punkt przyłożenia siły w haku można rozpatrywać w dwóch przypadkach obciążenia. Pierwszy przypadek dotyczy sytuacji, kiedy hak obciążony jest w paszczy, współpracując z pałąkiem sprzęgu sąsiedniego wagonu (rys. 5). Na rysunku 5 zaznaczono składowe siły F , reakcje w miejscach podparcia R , istotne wymiary oraz sposób ugięcia drąga haka pod wpływem działania siły pionowej. Drugi przypadek dotyczy sytuacji gdzie obciążenie jest przenoszone przez otwór w łbie haka. W pierwszym przypadku, z uwagi na większe ramie działania siły pionowej, naprężenia w drągu haka mają większą wartość niż w drugim przypadku.

Naprężenia i odkształcenia plastyczne

Obliczenia naprężeń i odkształceń przeprowadzono za pomocą programu FEMAP [2]. W pracy przedstawiono analizy haka obciążonego rozciąganiem ze zginaniem (rys. **6, 7**), rozciąganiem (rys. **8, 9**) oraz rozciąganej łuki (rys. **10, 11**). Analiza nieliniowa MES dla haka dotyczy pierwszego przypadku obciążenia, w którym odległość działania siły pionowej od podparcia przyjęto 215 mm oraz uwzględniono dodatkowe wysunięcie amortyzatora o maksymalnej wartości 65 mm. Całkowita siła wypadkowa wynosi 850 kN, składowa pozioma 849 kN, a jej składowa pionowa - 44,5 kN, co odpowiada różnicy wysokości osi drągów haka równej 40 mm. Obciążenie zostało przyłożone do wewnętrznej powierzchni paszczy haka, symetrycznie względem osi drąga haka, na powierzchni współpracy z pałąkiem. Materiał haka oraz łuki to stal P 55 G, której właściwości wytrzymałościowe przedstawiono w tabeli 1. W obliczeniach wykorzystano model bilinearnego kinematycznego umocnienia oraz kryterium plastyczności według Hubera-Misesa. Rozmiar siatki elementów skończonych dobrano optymalnie do możliwości obliczeniowych. W analizie modelu haka zastosowano możliwość przemieszczania haka względem dolnego prowadnika ustanawiając kontakt dwóch powierzchni.

Tabela 1. Właściwości wytrzymałościowe stali P 55 G

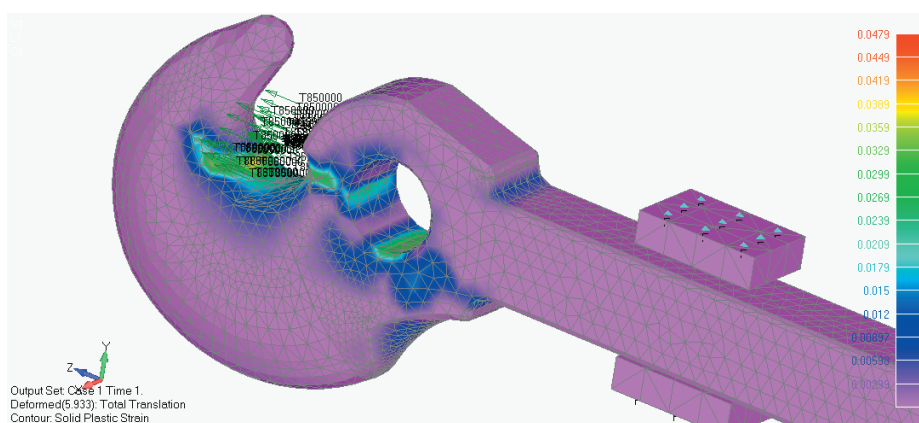
Moduł Younga E, GPa	Współczynnik Poissona ν, -	Granica plastyczności R _e , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Wydłużenie względne, A _g , %	Styczny moduł plastyczności, ET, MPa
210	0,3	430	750	12	2711

Tabela 2. Wyniki analizy MES

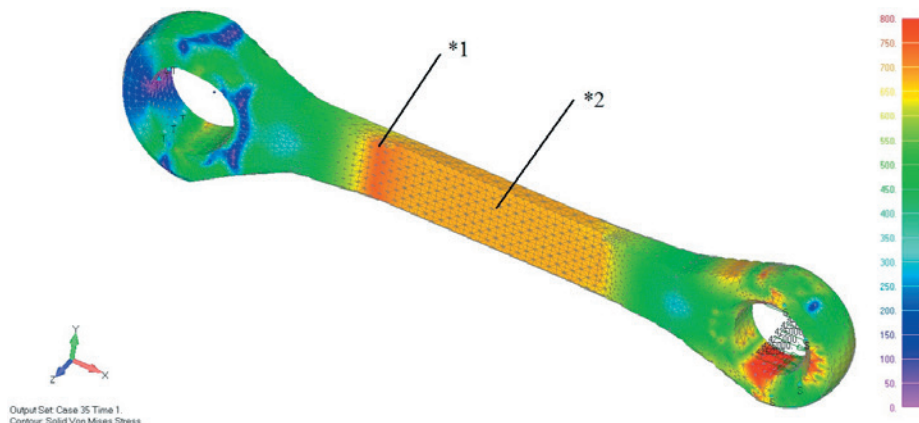
Rodzaj analizy	Napężenie, MPa		Odształcenie plastyczne, %	
	*1	*2	*1	*2
Hak rozciągany i zginany	450 ÷ 500	400 ÷ 450	2	0,1
Hak rozciągany	450 ÷ 500	250 ÷ 300	1,5	0
Łubka rozciągana	700 ÷ 750	650 ÷ 700	11	9

*1 – w miejscu spiętrzenia naprężeń, w zaokrągleniu w przejściu drąga w łeb haka i zmiany przekroju środkowej części łubki;

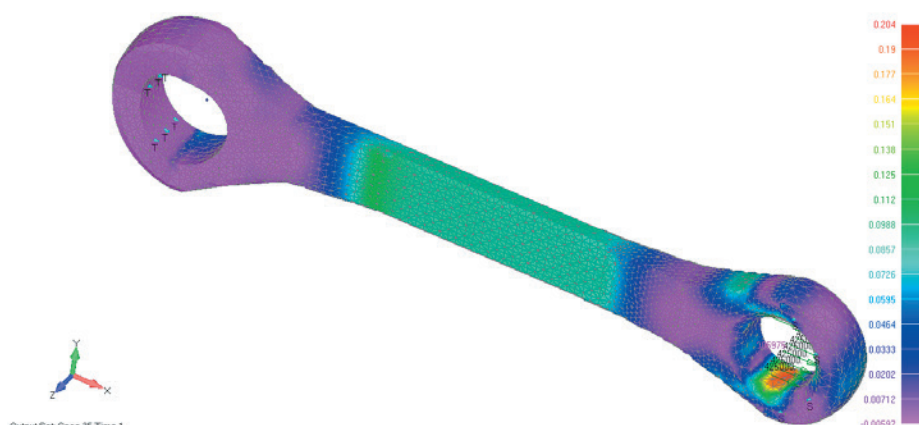
*2 – w przekroju drąga haka w podparciu w prowadniku i w środkowym przekroju łubki. Miejsca oznaczone przez *1 oraz *2 zaznaczono na (rys. 6, 10)



9. Odształcenia plastyczne w haku rozciągany



10. Napężenia w łubce obliczone według hipotezy Hubera-Misesa



11. Odształcenia plastyczne w łubce

W tabeli 2 zamieszczono wartości naprężeń i odształceń plastycznych dla analizowanych przekrojów, tj. największej wartości naprężenia i odształcenia, dla miejsca spiętrzenia naprężeń w zaokrągleniu w przejściu drąga w łeb haka i zmiany przekroju środkowej części łubki oraz w miejscu podparcia drąga haka i najmniejszego przekroju łubki.

W pracy [3] przedstawiono podobny problem dotyczący pęknięć połączenia sprzęgowego w pociągach towarowych transportujących węgiel w Portugalii. Pęknięcia pojawiały się pomiędzy lokomotywą a pierwszym wagonem we wczesnym czasie eksploatacji. Przeprowadzone badania dotyczyły jedynie rozwoju defektu o wymiarach 0,8 mm, znajdującego się w zaokrągleniu pomiędzy główną częścią a drągiem połączenia sprzęgowego lokomotywy. Przedstawiony rozwój szczeliny zmęczeniowej wskazuje, że wzrost defektu został zaobserwowany już po około 100 cyklach obciążenia. W oparciu o pracę [3], oraz często obserwowane skorodowane pęknięcia w przekroju drąga haka, które powstałe, np. na skutek przeciążenia, mogą mieć duży wpływ na dalszy rozwój szczeliny i w konsekwencji na zerwanie drąga haka.

Wnioski i zalecenia do dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wnioskować że:

- naprężenia w łubkach są większe od naprężeń w drągu haka ciągłowego pomimo uwzględnienia działania składowej pionowej obciążenia;
- obciążenia wartością siły odpowiadającej wytrzymałości na rozciąganie (850 kN) powinno spowodować zerwanie łubek bez uszkodzenia drąga haka;
- największe naprężenia i odształcenia plastyczne w haku występują w miejscach kontaktu oraz w karbie;
- w określonych warunkach działania siły pionowej, wartość naprężenia w miejscu przejścia drąga w łeb i miejscu podparcia zbliża się do naprężeń w łubkach;

- wszelkie zmiany wymiarów oraz nierówności na powierzchni elementów mają istotny wpływ na koncentrację i wartość naprężeń;
- przy odpowiednio dużym obciążeniu zginającym, górne warstwy drąga haka pracują w strefie odkształceń plastycznych, a dolne warstwy w miejscu podparcia poddane są ścisnaniu;
- naprężenia powyżej wartości odpowiadającej obciążeniu 300 kN, mogą powodować odkształcenia plastyczne tylko w sprzęgu ciągłym.
- powstałe pęknięcie powoduje spiętrzenie naprężeń i ma duży wpływ na dalszy rozwój szczeliny i na zerwanie drąga haka;
- aby zmniejszyć ilość rozerwań pociągów należy sprzęgać wagony w sposób eliminujący luzy pomiędzy zderzakami oraz rzetelnie kontrolować wymiary elementów, wymieniając je w przypadku przekroczenia wartości naprawczych;
- producenci wyrabiający haki i sprzęgi powinni wykonywać elementy zgodnie z wymiarami wskazanymi w normach, szczególnie w miejscach spiętrzenia naprężeń.

W oparciu o prezentowane w pracy spostrzeżenia dotyczące sposobu obciążenia i warunków eksploatacji haków i sprzęgów ciągłych można wnioskować że:

- obciążenia uderowe spowodowane działaniem składowej pionowej obciążenia mogą wystąpić tylko w haku, gdyż elementy sprzęgu ciągłego nie podlegają zginaniu z powodu zastosowanych sworzni łączących;
- całkowite wydłużenie haka i sprzęgu ciągłego spowodowane odkształceniami plastycznymi może powodować występowanie luzów pomiędzy zderzakami;
- zbyt duże luzy pomiędzy zderzakami prowadzą do powstania chwilowych różnic prędkości sąsiednich pojazdów powodując obciążenia dynamiczne haka i sprzęgu;
- określenie ekwiwalentnego przebiegu obciążenia eksploatacyjnego;
- przeprowadzenie badań określających statyczne właściwości materiałowe dla próbek pobranych z materiału drąga haka;
- przeprowadzenie badań określających właściwości zmęczeniowe dla obciążenia rozciągającego i zginającego odzerowo tętniącego dodatniego;
- przeprowadzenie badań określających właściwości zmęczeniowe dla obciążenia rozciągającego i zginającego odzerowo tętniącego z karbem i przeciążeniem. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Commission Decision 2006/861/EC of 28 July 2006 concerning the technical specification of interoperability relating to the subsystem rolling stock – freight wagons of the trans-European conventional rail, Official Journal L 344 of 8.12.2006
- [2] FEMAP v10.1.0 Help
- [3] Morgado T., Branco C.M., Infante V. Comparison of fatigue life extension results in railway couplings of cast steel ASTM 148 90-60 used in freight trains. 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto/Portugal, 20-24 July 2009
- [4] PKP CARGO S.A. Biuro Wsparcia Technicznego: Dokumentacja systemu utrzymania Lokomotywa elektryczna typu E280, 4E, 303E serii EU06, EU07 i EP07. Warszawa 2010
- [5] Podemski J., Marczewski R. Urządzenia ciągłowe i zderzakowe. WKŁ, Warszawa 1979
- [6] PN-K-88160:1999, Sprzęg śrubowy
- [7] PN-71/K-88164, Haki ciągłowe
- [8] PN-EN-15566+A1:2011, Kolejnictwo – Urządzenie ciągłowe i sprzęg śrubowy

Uwaga!

Numer 4 Przeglądu Komunikacyjnego dotyczyć będzie zagadnień związanych z opracowywaniem „Planów zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego” zgodnie z zakresem definiowanym w „Ustawie o publicznym transporcie zbiorowym”.

Ukażą się artykuły dotyczące prowadzonych prac oraz opisów wdrożonych lub planowanych rozwiązań.

