

Badania doświadczalne i symulacyjne sprzęgu śrubowego 1 MN

Dariusz KOWALCZYK¹, Andrzej ANISZEWICZ²

Streszczenie

W artykule opisano wymagania, dotyczące sprzęgów śrubowych, obowiązujące przed wprowadzeniem ich do eksploatacji. Przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych symulujących 30-letni okres użytkowania sprzęgu śrubowego, wyniki badań metodą tomografii komputerowej i NDT (ang. *Nondestructive Testing*), nieniszcząca metodą magnetyczno-proszkową, następnie porównano wyniki badań z wynikami obliczonymi metodą elementów skończonych MES (ang. *Finite Element Method* – FEM).

Słowa kluczowe: analiza MES, sprzęg śrubowy, pęknięcie

1. Wprowadzenie

Sprzęgi śrubowe są uniwersalnymi mechanicznymi połączeniami pojazdów kolejowych stosowanymi w różnych typach wagonów pasażerskich, towarowych, jak i pojazdów trakcyjnych. Od tych urządzeń zależy bezpieczeństwo oraz integralność składu pociągu podczas jego eksploatacji. Urządzenia te są poddawane nie tylko bardzo dużym obciążeniom, ale również muszą być odporne na zmienne, wieloletnie oddziaływanie czynników atmosferycznych. Dopuszczenie sprzęgów śrubowych, urządzeń ciągowych, w tym haków, do eksploatacji wymaga przeprowadzenia badań

zakończonych pozytywnym wynikiem, według szczegółowych wytycznych, opisanych w normie [1] oraz według Rozporządzenia Komisji (UE) nr 321/2013 [2] i Rozporządzenia Komisji (UE) nr 1302/2014 [3].

Norma EN 15566:2016 [1] definiuje przedstawiony w tablicy 1 i tablicy 2 podział sprzęgów śrubowych pod względem siły, jakim mogą być poddawane podczas eksploatacji – czyli 1 MN; 1,2 MN; 1,5 MN oraz dodatkowo pod względem czasu ich eksploatacji, tj. 20 lub 30 lat. Każdy typ sprzęgu stosowany w eksploatacji powinien być oznaczony w trwały sposób, który określa jego kategorię stosowania i maksymalne obciążenie, jakim może być poddawany w eksploatacji

Tablica 1

Warunki dynamicznych badań sprzęgu śrubowego – zakres stosowanych sił i dopuszczalnych obciążeń w eksploatacji w zależności od przeznaczenia

Zakres stosowanych sił badań sprzęgu śrubowego		
Kategoria klasyfikacji / Przeznaczenie	Krok 1	Krok 2
1 MN	$\Delta F1 = 170 \text{ kN}$	$\Delta F2 = 575 \text{ kN}$
1,2 MN	$\Delta F1 = 205 \text{ kN}$	$\Delta F2 = 690 \text{ kN}$
1,5 MN	$\Delta F1 = 270 \text{ kN}$	$\Delta F2 = 910 \text{ kN}$
Zakres stosowanych sił badań haka lub urządzenia ciągowego		
Kategoria klasyfikacji / Przeznaczenie	Krok 1	Krok 2
1 MN	$\Delta F1 = 200 \text{ kN}$	$\Delta F2 = 675 \text{ kN}$
1,2 MN	$\Delta F1 = 240 \text{ kN}$	$\Delta F2 = 810 \text{ kN}$
1,5 MN	$\Delta F1 = 300 \text{ kN}$	$\Delta F2 = 1015 \text{ kN}$

Opracowanie własne na podstawie [1].

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

² Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Metrologii; e-mail: aaniszewicz@ikolej.pl.

Tablica 2

Warunki dynamicznych badań sprzęgu śrubowego – liczba cykli w zależności od wymaganego czasu eksploatacji i przeznaczenia

Wymagany czas działania Cykl zatosowania w latach	Zakres stosowanych sił badań sprzęgu śrubowego		
	Kategoria klasyfikacji / Przeznaczenie	Krok 1 N_1 w cyklach	Krok 2 N_2 w cyklach
20	1 MN 1,2 MN 1,5 MN	10^6	$1,45 \times 10^3$
30	1 MN 1,2 MN 1,5 MN	$1,5 \times 10^6$	$2,15 \times 10^3$

Opracowanie własne na podstawie [1]

(1 MN, 1,2 MN, 1,5 MN). Newralgicznym miejscem ze względu na zużycie sprzęgu śrubowego jest obszar współpracy pałaka z hakiem. Następuje tu tarcie powierzchniowe w wyniku kontaktu elementów oraz przenoszenie znacznych sił na niewielkim obszarze powierzchni, co sprawia, że w tym miejscu występuje duża koncentracja naprężeń. W wyniku wzajemnej współpracy ciernej stykających się z sobą powierzchni, z upływem czasu obserwuje się znaczne ich zużycie, co przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Widok zużytej (w warunkach rzeczywistej eksploatacji) powierzchni pałaka sprzęgu spowodowany ścieraniem o hak ciągowy [fot. A. Aniszewicz]

Po badaniach zmęczeniowych dokonywana jest ocena stanu elementów sprzęgu (w tym powstałych wad i pęknięć), która może być uzupełniona analizami i symulacjami z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES), które niejednokrotnie umożliwiają zrozumieć przyczyny powstawania uszkodzeń [4, 5, 6, 7].

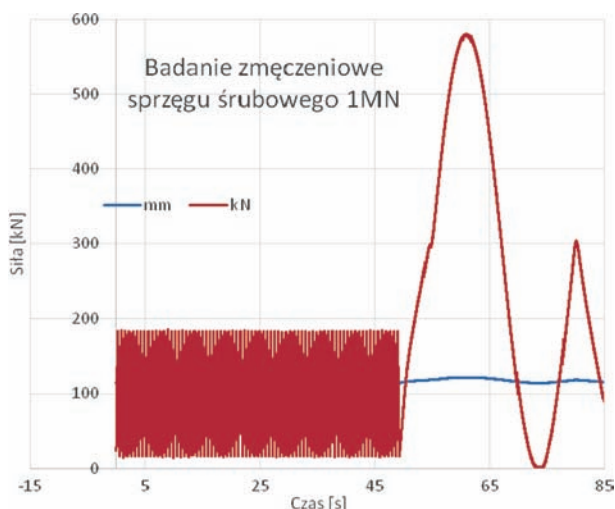
2. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne mają charakter zmęczeniowy i są jednymi z ważniejszych badań sprzęgu śrubowego. Wymagania dotyczące przebiegu badania są opisane w normie EN 15566. Badania statyczne i zmęczeniowe, obciążanie opisane w normie EN, obejmują

zarówno poszczególne elementy sprzęgu śrubowego, łubka, pałaka, śruby, jak też całego skompletowanego sprzęgu. Badania sprzęgu śrubowego typu 1 MN wykonano na maszynie wytrzymałościowej LFV, przedstawionej na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wykres przebiegu zastosowanych obciążeń zmęczeniowych. Wykres pokazuje 698 cykli obciążeń o niskiej amplitudzie $\Delta F1$ i jeden cykl $\Delta F2$ amplituda wysoka o wartościach przyjętych zgodnie z tabelicą 2. Każdy z bloków składa się z dynamicznych obciążeń w zakresie sił od 10 kN do 180 kN, a następnie wykonywany jest cykl obciążenia siłą 575 kN. Schemat przyjmowanych obciążeń dla danego typu sprzęgów wynika z wymagań opisanych w normie EN 15566 [1] oraz tablicy 2. Opisany blok obciążeń zmęczeniowych był wykonany 2150 razy, co odpowiada symulowanej eksploatacji sprzęgu przez 30 lat.



Rys. 2. Sprzęg śrubowy 1 MN podczas badań zmęczeniowych wykonanych maszyną wytrzymałościową LFV [fot. D. Kowalczyk]



Rys. 3. Blok obciążeń zmęczeniowych sprzęgu śrubowego 1 MN [opracowanie D. Kowalczyk]

3. Badania nieniszczące metodą magnetyczno-proszkową

Po zakończonych badaniach zmęczeniowych, sprzęg śrubowy poddano nieniszczącym badaniom defektoskopowym przeprowadzonym metodą magnetyczno-proszkową [8, 9]. Ocenie poddano stan powierzchni pałaka w obszarze jego kontaktu powierzchniowego z hakiem i na rysunku 4, zaznaczono kolorem zielonym obszar przedstawiający wyniki tych badań. W badanym sprzęgu ujawniono powierzchniowe pęknięcia, których wielkość nie przekracza dopuszczalnych wartości. Zgodnie z wymaganiami i kryteriami oceny stanu powierzchni po badaniach zmęczeniowych, dopuszczalne są nieciągłości – pęknięcia o długości, głębokości do 20 mm zgodnie z wymaganiami normy [1].



Rys. 4. Pęknięcia pałaka śrubowego 1 MN po badaniach zmęczeniowych metodą magnetyczno-proszkową [fot. D. Kowalczyk]

Na rysunkach 5a i 5b pokazano widok zużytej powierzchni pałaka sprzęgu w czasie badań zmęczeniowych powierzchni pałaka sprzęgu, spowodowany ścieraniem o hak ciągnący. Badania zmęczeniowe wykonane maszyną wytrzymałościową wskazują, iż rozkład naprężeń w obszarze kontaktu haka i pałaka może być różny i niejednorodny, objawiający się znacznym miejscowym zużyciem ściernym.

4. Badania sprzęgu śrubowego metodą tomografii komputerowej (TK)

Dodatkowym badaniem nie wymaganym przez normę [9] było badanie metodą tomografii komputerowej. Jak wykazały nieniszczące badania metodą magnetyczno-proszkową, w pałaku sprzęgu śrubowego występują wskazania powierzchniowe (pęknięcia), które nie pozwalają precyzyjnie określić ich



Rys. 5. Widok zużytej powierzchni pałaka sprzęgu spowodowany tarcieniem o hak ciągnący: a) widok z lewej strony, b) widok z prawej strony [fot. D. Kowalczyk]

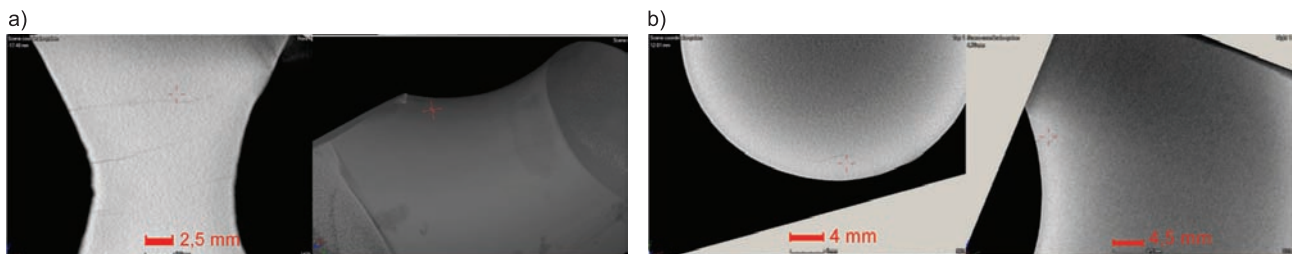
głębokości oraz kształtu. Dlatego pałąk poddano badaniom metodą tomografii komputerowej CT, których celem było w nieniszczący sposób (nie ingerujący w zidentyfikowane wady powierzchniowe) określenie głębokości występowania pęknięcia / pęknięć oraz ich rozmieszczenia.

Do badania pałąka sprzęgu śrubowego metodą tomografii komputerowej wykorzystano urządzenia GE-Phoenix v/tome/x m wraz z detektorem 300 kV X-ray. Prześwietlenia elementów sprzęgu potwierdziły nieciągłości i pęknięcia ujawnione nieniszczącym badaniem defektoskopowym metodą magnetyczno-proszkową.

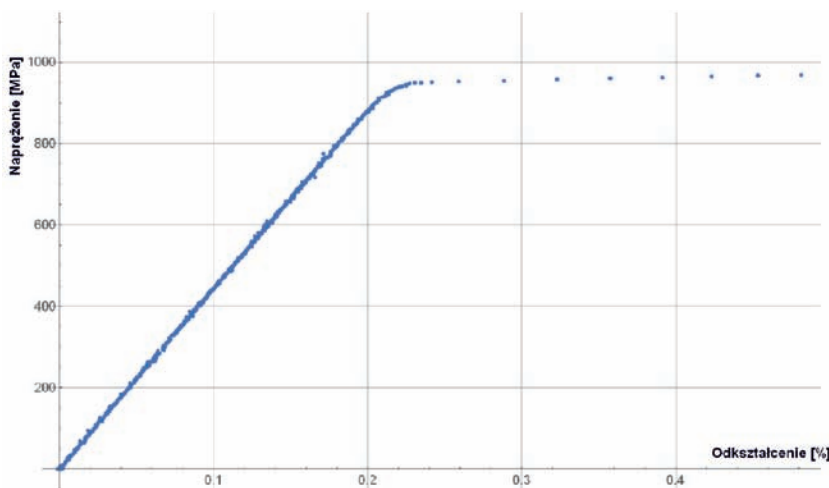
Zdjęcia uzyskane techniką tomografii komputerowej TK umożliwiają obserwację w przestrzeni trójwymiarowej 3D przebiegu pęknięć w badanej próbce oraz określenie ich rzeczywistej długości i głębokości występowania. Należy zauważyć, że wymagania aktualnych norm określają tylko długość powierzchniową wad [1]. W rzeczywistości, na podstawie obserwacji próbek poddanych badaniom zmęczeniowym stwierdzono, że pęknięcia mogą propagować nawet na głębokość do 5 mm pod powierzchnią materiału. Pęknięcia wewnątrz materiału pałąka sprzęgu śrubowego 1 MN po badaniach zmęczeniowych w przekroju poprzecznym i podłużnym przedstawiono na rysunkach 6a i 6b.

5. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne wykonano metodą elementów skończonych (MES), która znalazła szerokie zastosowanie w badaniach obiektów kolejowych [5, 6, 7]. W niniejszym przypadku wykonano obliczenia MES na potrzeby porównawcze i do określenia naprężeń występujących w obszarze kontaktu haka z pałąkiem sprzęgu śrubowego. W tym celu w programie SolidWorks stworzono model 3D haka i pałąka sprzęgu śrubowego 1 MN. Obliczenia wykonano w programie Ansys Mechanical R2020 na solverze static structural z nieliniowym modelem materiału stali 40CrMn4 w zakresie odkształceń plastycznych. Na modelu bryłowym haka i pałąka szczególnej analizie poddano fragment pałąka sprzęgu śrubowego w obszarze, w którym najczęściej dochodzi do pęknięć (rys. 4, 5 i 6). Model obliczeniowy przygotowano dla obciążenia zmęczeniowego 200 kN i 575 kN. W założeniach opisu siatki przyjęto elementy typu TETRA czterowęzłowe dla pałąka i hexagonalne sześciowęzłowe dla haka i zmienny obszar siatki, 214 tysięcy węzłów i 125 tysięcy elementów. W oprogramowaniu wybrano następujące parametry siatki: siatka bryłowa oparta na krzywiźnie, punkty Jakobianu



Rys. 6. Obserwacje zakresu pęknięć wewnątrz materiału pałąka sprzęgu śrubowego 1 MN po badaniach zmęczeniowych wykonanych tomografem komputerowym: a) widok w przekroju poprzecznym, b) widok w przekroju podłużnym [oprac. D. Kowalczyk]

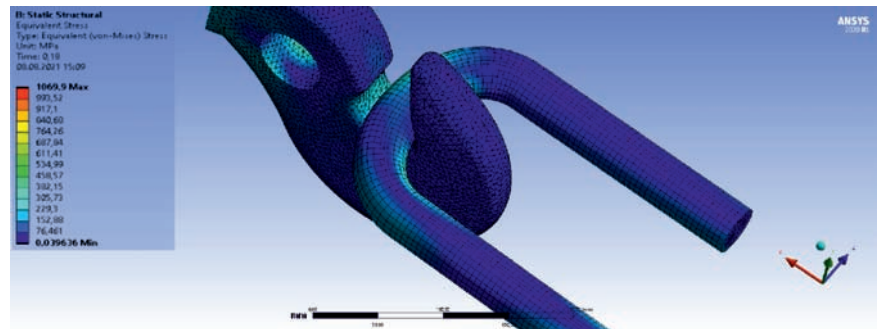


Rys. 7. Próba rozciągania (naprężenia w funkcji odkształcenia) dla próbki wykonanej ze stali 40CrMn4 [oprac. D. Kowalczyk]

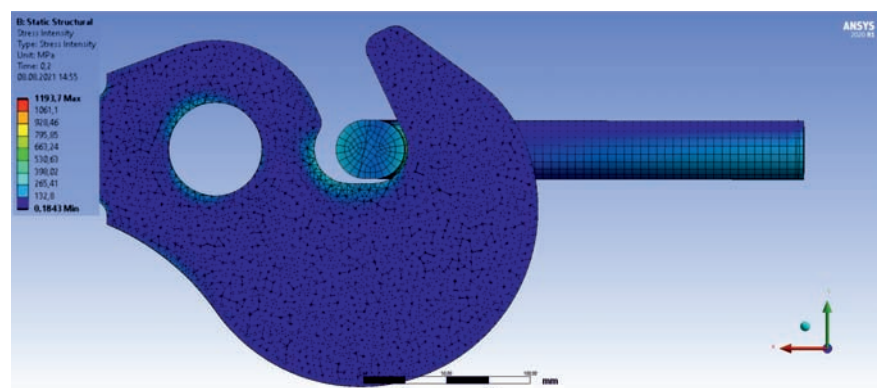
4, jakość siatki „wysoka”. Jako warunki początkowe wybrano osiowy sposób obciążania. Zastosowano dostępne dane dla stali 40CrMn04 [10], z której są wykonane elementy sprzęgu śrubowego oraz wartości wyników doświadczalnych z przeprowadzonej próby rozciągania próbki materiałowej wykonanej z części sprzęgu śrubowego. Dane przedstawione na

rysunku 7 z próby zrywania próbki wykonanej z materiału stosowanego w produkcji sprzęgu 40CrMn04, umożliwiły lepiej zdefiniować model materiałowy w zakresie rzeczywistych odkształceń plastycznych. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych metodą MES obciążenia pałąka sprzęgu śrubowego 1 MN przedstawiono na rysunkach 8, 9, 10 i 11.

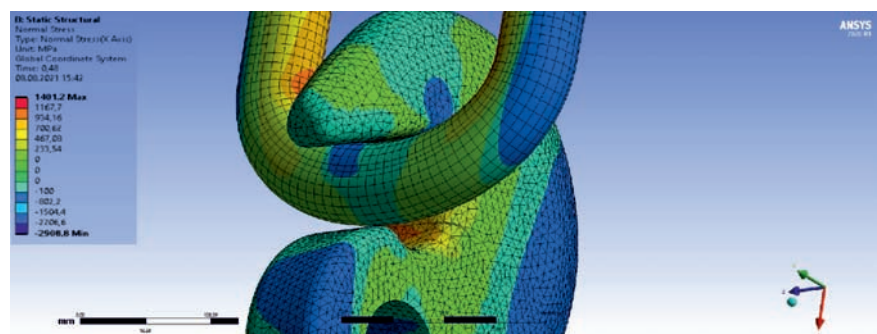
Rys. 8. Naprężenia według Von Misesa dla obciążenia 200 kN [oprac. D. Kowalczyk]



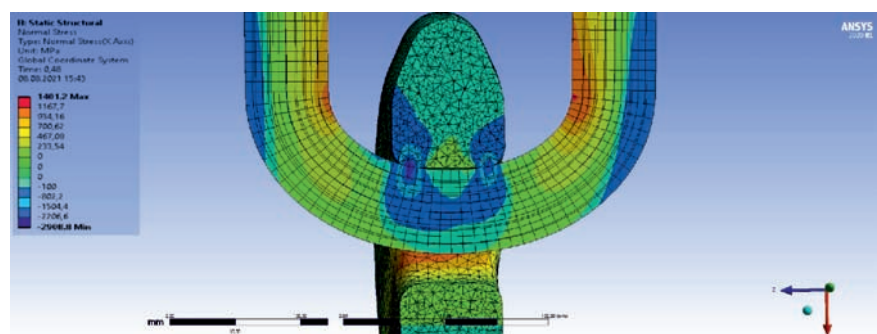
Rys. 9. Naprężenia plastyczne dla obciążenia 200 kN [oprac. D. Kowalczyk]



Rys. 10. Graficzne przedstawienie rozkładu naprężeń w obszarze kontaktu haka i pałąka sprzęgu śrubowego (naprężenia normalne) przy obciążeniu 575 kN [oprac. D. Kowalczyk]



Rys. 11. Graficzne przedstawienie rozkładu naprężeń w obszarze kontaktu haka i pałąka sprzęgu śrubowego (naprężenia normalne) przy obciążeniu 575 kN [oprac. D. Kowalczyk]



6. Wyniki obliczeń MES

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych na zbudowanych modelach MES w zdefiniowanym zakresie obciążeń zmęczeniowych według normy EN 15566:2016 [1] wskazują, iż podczas obciążenia siłą 575 kN w obszarze kontaktu haka i pałąka sprzęgu śrubowego powstaje strefa dużej koncentracji naprężeń zarówno ściskających, jak i rozciągających materiał pałąka sprzęgu śrubowego. Uzyskane wyniki symulacji ujawniają naprężenia rozciągające lokalnie mogące przekraczać 1000 MPa, a ściskające mogące wynosić nawet 1500 MPa (rys. 10 i 11). Z analizy rysunku 11 wynika, że istotną dla rozkładu naprężeń w tym obszarze jest geometria powierzchni kontaktu współpracy pałąka i haka. Im jest ona lepiej dopasowana, tym naprężenia są równomierniej rozkładane na całą powierzchnię kontaktu i tym samym ich średnia wartość może być niższa.

Wyniki badań zaprezentowane na rysunkach 8, 9, 10 i 11 jednoznacznie potwierdzają przyczyny powstawania pęknięć w obszarze kontaktu haka i pałąka. Są one spowodowane występującymi dużymi skrajnymi wartościami naprężeń i bliskimi strefami naprężeń ściskających i rozciągających w pałąku oraz przez duże naciski na powierzchni kontaktu pałąka z hakiem.

7. Wnioski

Po zakończeniu badań zmęczeniowych sprzęgu śrubowego 1 MN wykonano nieniszczące badania stosując metodę NDT magnetyczno-proszkową. Na powierzchni pałąka zaobserwowano uszkodzenia w postaci nieciągłości i pęknięć, których wielkość nie przekracza dopuszczalnych wartości.

Nieniszczące badania defektoskopowe wykonane metodą magnetyczno-proszkową NDT i metodą tomografii komputerowej TK potwierdzają, że powierzchnia kontaktu pałąka i haka jest obszarem szczególnie narażonym na występowanie pęknięć i ich propagację. Badania TK wykazały, że w analizowanym przypadku pęknięcie propagowało nawet na 5 mm w głąb materiału pałąka (w obszarze styku z powierzchnią haka). Przeprowadzone badania symulacyjne i analizy MES potwierdziły występowanie dużej koncentracji naprężeń w tym obszarze i duże różnice naprężeń w obszarze ściskania i rozciągania (kontakt haka i pałąka sprzęgu śrubowego). Symulacje wskazują na istotne znaczenie geometrii kształtu i dopasowania powierzchni pałąka i haka, które znacząco wpływają na rozkład naprężeń we współpracujących elementach. Badania wykonane tomografem komputerowym umożliwiły ocenę głębokości pęknięć, ustalenie czy są to wady powierzchniowe,

czy pęknięcia propagujące w materiał, a także obserwację w formacie 3D ich rzeczywistego przebiegu w materiale pałąka.

Literatura

1. PN-EN 15566: 2016: Kolejnictwo – Pojazdy kolejowe – Urządzenie ciągłowe i sprzęg śrubowy [Railway applications. Railway rolling stock. Draw gear and screw coupling].
2. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 321/2013 z dnia 13 marca 2013 r. dotyczące technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – wagony towarowe” systemu kolei w Unii Europejskiej i uchylające decyzję 2006/861/WE, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02013R0321-20200311> [dostęp: 10 luty 2022].
3. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor — lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02014R1302-20200311&qid=1644527529978> [dostęp: 9 lipca 2020].
4. Radioss Theory Manual 11.0 version – Jan 2011, Large Displacement Finite Element Analysis, Altair Engineering, Inc. World Headquarters.
5. Aniszewicz A.: *Analiza numeryczna MES wpływu kształtu przekroju kabłąka na sztywność przyrządu do pomiaru kół zestawów kołowych* [FEM numerical analysis of the shape bow cross-section for the rigidity of the wheelset measuring device], Problemy Kolejnictwa, 2019, z. 182, s. 107–113.
6. Bińkowski R., Kowalczyk D.: *Analiza przyczyn uszkodzeń zestawów kołowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych* [Analysis of the Causes of Wheel Set Damage Using Finite Element Method], Problemy Kolejnictwa, 2017, z. 175, s. s. 47–52 47.
7. Bińkowski R., Mikłaszewicz I.: *Przypadki pęknięcia szyn w świetle obliczeń MES* [Cases of Rail Cracks in the Light of FEM Calculation], Problemy Kolejnictwa, 2016, z. 172, s. 35–45.
8. EN 10228-1: Non-destructive testing of steel forgings – Part 1: Magnetic particle inspection [PN-EN 10228-1:2016-07 Badania nieniszczące odkuwek stalowych – Część 1: Badanie magnetyczno-proszkowe].
9. EN 10228-2: Non-destructive testing of steel forgings – Part 2: Penetrant testing [PN-EN 10228-2:2016-07: Badania nieniszczące odkuwek stalowych – Część 2: Badanie penetracyjne].
10. Materials-Mechanical properties of steel 42CrMo4 (1.7225).