P O L I T E C H N I K A P O Z N A Ń S K A
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

Samuel Szulc

OPRACOWANIE I WDROŻENIE METODYKI BADAWCZEJ ORAZ KONCEPCJI NOWEGO LABORATORIUM DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH WYBRANYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH POJAZDÓW SZYNOWYCH

PRACA DOKTORSKA

Promotor:
prof. dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski

Poznań 2026

Spis skrótów i oznaczeń

AE	emisja akustyczna (Acoustic Emission)
ART	metoda rezonansu akustycznego (Acoustic Resonance Testing)
CT	tomografia komputerowa (Computed Tomography)
GUM	Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)
MES	metoda elementów skończonych
MT	badania magnetyczno-proszkowe (Magnetic particle Testing)
NDT	badania nieniszczące (Non-Destructive Testing)
NoBo	jednostka notyfikowana (Notified Body)
PAUT	ultradźwiękowe badania metodą phased-array (Phased Array Ultrasonic Testing)
PT	badania penetracyjne (Penetrant Testing)
TSI	techniczna specyfikacja interoperacyjności
UIC	Międzynarodowy Związek Kolei (Union Internationale des Chemins de fer)
UT	badania ultradźwiękowe (Ultrasonic Testing)
UTK	Urząd Transportu Kolejowego
VT	badania wizualne (Visual Testing)
ΔF	amplituda siły [kN]
F	siła [kN lub MN]
HB	twardość metodą Brinella
Rm	wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
u(F)	niepewność standardowa pomiaru siły

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP 5
1.1. Sformułowanie problemu badawczego 5
1.2. Cel i zakres pracy 7
1.3. Hipotezy badawcze 8
1.4. Struktura rozprawy 9

2. ANALIZA STANU WIEDZY: PRZEGLĄD LITERATURY I NORM 13
2.1. Konstrukcja i funkcje kluczowych elementów wagonów towarowych 13
2.2. Sprzęg śrubowy w wagonach towarowych: budowa, eksploatacja i uszkodzenia . 13
2.3. Badania wytrzymałościowe pojazdów szynowych: rodzaje, metody i zakres ich stosowania 16
2.3.1. Klasyfikacja badań wytrzymałościowych pojazdów szynowych 17
2.3.2. Zakres stosowania badań głównych podsystemów wagonu towarowego ... 18
2.3.3. Próby statyczne elementów i kompletnego sprzęgu śrubowego 20
2.3.4. Badania zmęczeniowe 21
2.3.5. Analiza numeryczna metodą elementów skończonych (MES) 22
2.3.6. Podstawa normatywno-regulacyjna badań w UE i w Polsce 24
2.3.7. Pozycja sprzęgu śrubowego w systemie badań wytrzymałościowych 25
2.4. Nowoczesne metody diagnostyki nieniszczącej (NDT) w kolejnictwie 25
2.4.1. Klasyczne metody NDT 26
2.4.2. Emisja akustyczna (AE) 29
2.4.3. Metoda rezonansu akustycznego (ART) 30
2.4.4. Tomografia komputerowa (CT) i inne zaawansowane techniki 32

3. OPIS OBIEKTU BADAŃ 34
3.1. Budowa i parametry techniczne systemu sprzęgu śrubowego 34
3.2. Wymagania normatywne wg PN-EN 15566 dla sprzęgu śrubowego 37
3.2.1. Wymagania wytrzymałościowe 37
3.2.2. Wymagania materiałowe i kontrolne 37
3.3. Właściwości materiałowe elementów sprzęgu 38
3.3.1. Wyniki prób rozciągania i udarności 39
3.3.2. Wyniki badań twardości metodą Brinella 39
3.4. Typowe uszkodzenia i mechanizmy degradacji sprzęgu śrubowego 40

4. PROJEKT SPECJALISTYCZNEGO LABORATORIUM BADAWCZEGO 43
4.1. Wymagania projektowe i koncepcja laboratorium 43
4.2. Infrastruktura i układ przestrzenny laboratorium 44
4.3. Stanowisko statyczne i zmęczeniowe 45
4.4. Aparatura pomiarowa i wyposażenie laboratorium 47
4.5. Systemy bezpieczeństwa i zarządzania ryzykiem 52
4.6. Kierunki rozwoju laboratorium i potencjał rozszerzenia zakresu badawczego 53

5. ZAPEWNIENIE JAKOŚCI I CERTYFIKACJA LABORATORIUM 57
5.1. Status regulacyjny laboratorium i procedury oceny zgodności 57
5.1.1. Istota i cel akredytacji laboratoriów badawczych 58
5.1.2. Dwoista rola laboratorium: działalność naukowo-badawcza i kontrolna 61
5.1.3. Współpraca z akredytowanym laboratorium zewnętrznym 62

5.1.4. Perspektywa rozwoju i planowana akredytacja PCA ... 63
5.2. System zarządzania jakością w laboratorium ... 64
5.3. Kwalifikacje personelu i bezpieczeństwo pracy ... 66
5.4. Strukturyzacja i walidacja procedur badawczych ... 67
5.5. Możliwości wdrożeniowe i współpraca z przemysłem ... 68

6. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH ... 70
6.1. Plan badań i scenariusze obciążeń ... 70
6.2. Badanie statyczne wytrzymałości sprzęgu ... 71
6.3. Badanie zmęczeniowe sprzęgu ... 73
6.4. Ocena stanu po cyklach obciążeń: badania nieniszczące ... 75
6.5. Badanie metodą rezonansu akustycznego (ART) ... 76
6.6. Kryteria akceptacji i oceny wyników ... 79
6.7. Dokumentacja przebiegu badań ... 81

7. WALIDACJA METODYKI BADAWCZEJ ... 82
7.1. Kalibracja i sprawdzenie aparatury ... 82
7.2. Analiza niepewności pomiarów ... 83
7.3. Weryfikacja wyników badań statycznych i zmęczeniowych ... 85
7.4. Walidacja skuteczności metod NDT (ART vs tradycyjne) ... 87
7.5. Doskonalenie procedur na podstawie wyników walidacji ... 89

8. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA DANYCH ... 90
8.1. Wyniki badań statycznych ... 90
8.2. Wyniki badań zmęczeniowych ... 92
8.3. Wyniki badań nieniszczących po programie zmęczeniowym ... 94
8.4. Wyniki badania rezonansu akustycznego ... 95
8.5. Dyskusja wyników badań statycznych, zmęczeniowych i nieniszczących ... 96
8.6. Analiza niepewności wyników badań ... 97

9. DYSKUSJA WYNIKÓW ... 99
9.1. Ocena zgodności wyników z wymaganiami norm ... 99
9.2. Porównanie i efektywność zastosowanych metod badawczych ... 100
9.3. Analiza niepewności i powtarzalności wyników ... 101
9.4. Implikacje dla badań innych komponentów taboru ... 102
9.5. Ograniczenia badań ... 102

10. WNIOSKI KOŃCOWE ... 104
10.1. Podsumowanie realizacji celu pracy ... 104
10.2. Weryfikacja hipotez badawczych ... 105
10.3. Wnioski dla praktyki inżynierskiej ... 106
10.4. Propozycje dalszych badań ... 107

LITERATURA ... 109

1. WSTĘP

1.1. Sformułowanie problemu badawczego

Kolejowy transport towarowy w Europie rozwija się dynamicznie, rośnie zarówno tonaż przewożonych ładunków, jak i intensywność wykorzystania taboru. To z kolei przekłada się na rosnące wymagania w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów szynowych. Elementy konstrukcyjne wagonów towarowych, takie jak sprzęgi, haki cięgłowe, zderzaki, ramy wózków czy zestawy kołowe, przenoszą podczas eksploatacji znaczne, a przy tym zmienne obciążenia: zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Ich uszkodzenia mogą prowadzić do poważnych konsekwencji, w skrajnych przypadkach nawet do rozerwania składu w trakcie jazdy. Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej tych elementów pozostaje więc problemem istotnym zarówno z perspektywy inżynierskiej, jak i eksploatacyjnej.

Sprzęgi śrubowe stosowane w wagonach towarowych muszą przenosić siły rzędu setek kiloniutonów, dla sprzęgu standardowego minimalna wytrzymałość wynosi 850 kN. Norma PN-EN 15566:2023-01 definiuje klasy wytrzymałościowe sprzęgów śrubowych według minimalnego obciążenia zrywającego (Minimum Breaking Load, MBL): 850 kN dla sprzęgu standardowego (klasa A), 1000 kN dla sprzęgu o podwyższonej wytrzymałości (klasa B, oznaczana jako sprzęg „1 MN"), 1200 kN oraz 1500 kN dla zastosowań specjalnych. Niniejsza rozprawa skupia się na sprzęgu kategorii 1 MN, dla którego minimalna wytrzymałość na rozerwanie wynosi 1000 kN, a kontrolowane obciążenie próby statycznej zgodnie z załącznikiem A normy PN-EN 15566 wynosi 950 kN (95% MBL) przez 180 sekund[1, 2]. W czasach, gdy masa brutto składów towarowych przekracza nierzadko 4000 ton, zbliżanie się naprężeń eksploatacyjnych do tych granic przestaje być scenariuszem teoretycznym. Staje się realnym zagrożeniem dla integralności pociągu.

Niepokojące są również wyniki badań kontrolnych elementów sprzęgów śrubowych dostępnych na rynku europejskim. Okazuje się bowiem, że nawet produkty oficjalnie dopuszczone do eksploatacji mogą wykazywać istotne wady materiałowe. W badaniach przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy w jednym przypadku na pięć zbadanych kompletnych sprzęgów, czyli w 20% próby wykryto wady dyskwalifikujące element lub podważające jego trwałość [3].

Skalę problemu w warunkach krajowych dobrze ilustrują dane przytaczane w prasie branżowej za Urzędem Transportu Kolejowego. Według tych informacji w okresie od stycznia 2017 r. do sierpnia 2018 r. odnotowano na polskiej sieci kolejowej blisko 600 przypadków rozerwania składów pociągów, 371 zdarzeń w samym 2017 r. i kolejne 212 w ciągu pierwszych ośmiu miesięcy roku następnego. Dominującą przyczyną techniczną okazało się zmęczenie materiału sprzęgów, odpowiedzialne za niemal połowę przypadków (46%). Wśród czynników sprzyjających uszkodzeniom komisje kolejowe wskazywały na wysoką masę brutto pociągów, nieprawidłowe rozmieszczenie ładunku oraz błędy przy skręcaniu sprzęgu podczas formowania składu. Kontekst eksploatacyjny dodatkowo komplikuje wiek wagonów towarowych użytkowanych na krajowej sieci sięga nierzadko 40 lat, co samo w sobie stanowi czynnik ryzyka trudny do pominięcia w analizie przyczyn uszkodzeń sprzęgów. Konsekwencje rozerwań wykraczają daleko poza kwestie bezpieczeństwa. W 2017 r. zdarzenia te spowodowały łącznie blisko 142 tys. minut opóźnień w ruchu towarowym, co odpowiada średnio około 15 godzinom dziennie w skali całego kraju [4].

Obowiązujące regulacje europejskie w tym Dyrektywa 2016/797/UE o interoperacyjności systemu kolei [5] oraz Rozporządzenie Komisji (UE) nr 321/2013 w sprawie TSI dla wagonów towarowych [6] nakładają obowiązek certyfikowanych badań wytrzymałościowych kluczowych komponentów pojazdów szynowych. Wymagania dla poszczególnych podzespołów określają dedykowane normy techniczne: PN-EN 15566, PN-EN 13749 i PN-EN 12663-2 [2, 7]. Każda z nich opisuje odrębną metodykę dla konkretnego komponentu, realizowaną na oddzielnych stanowiskach badawczych, na tym polega zasadnicze ograniczenie obecnego stanu normalizacji.

Przegląd literatury naukowej potwierdza, że dotychczasowe prace przebiegały w podobnym kierunku: koncentrowały się na testowaniu pojedynczych komponentów [3, 8, 9], nie podejmując próby opracowania metodyki zunifikowanej, obejmującej różne klasy elementów pojazdów szynowych w ramach jednego systemu pomiarowego. Tymczasem intensywny rozwój metod diagnostyki nieniszczącej, zwłaszcza metody rezonansu akustycznego (ART), otwiera nowe możliwości monitorowania stanu technicznego komponentów podczas badań wytrzymałościowych [10, 11]. Integracja tych technik z procedurami badań taboru pozostaje jednak obszarem słabo rozpoznanym w literaturze. Niniejsza rozprawa wypełnia tę lukę badawczą.

Problem badawczy koncentruje się na dwóch wzajemnie powiązanych zagadnieniach: opracowaniu uniwersalnej metodyki badań wytrzymałościowych oraz zaprojektowaniu wyspecjalizowanego laboratorium, które umożliwi prowadzenie kompleksowych, certyfikowanych testów kluczowych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych. Badania mają być realizowane w warunkach możliwie zbliżonych do rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych, z jednoczesną integracją nowoczesnych metod diagnostyki nieniszczącej.

Rozwiązanie tak sformułowanego problemu ma wymiar podwójny. W sensie praktycznym chodzi o podniesienie bezpieczeństwa i niezawodności taboru kolejowego oraz spełnienie wymogów regulacyjnych UE. W sensie naukowym o rozwój zintegrowanych metod badawczych w inżynierii kolejowej, których dotychczasowy stan pozostaje, jak wykazano, jest niewystarczający.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem głównym pracy jest opracowanie i wdrożenie kompleksowej metodyki badań wytrzymałościowych wybranych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych oraz koncepcji projektowej laboratorium zdolnego do realizacji tych badań w warunkach spełniających wymagania akredytacji ISO/IEC 17025.

Metodyka ma umożliwiać odwzorowanie rzeczywistych warunków obciążeń eksploatacyjnych, statycznych, zmęczeniowych i udarowych: w kontrolowanym środowisku laboratoryjnym, przy jednoczesnym monitorowaniu stanu technicznego badanych elementów metodami NDT (NDT, ang. Non-Destructive Testing).

Zakres pracy obejmuje następujące zadania badawcze:

- **Analiza stanu wiedzy**: przegląd literatury naukowej (Rozdział 2) w tym norm technicznych i regulacji prawnych dotyczących badań wytrzymałościowych elementów taboru kolejowego, ze szczególnym uwzględnieniem metod diagnostyki nieniszczącej stosowanych w kolejnictwie.
- **Opis obiektu badań**: szczegółowa charakterystyka sprzęgu śrubowego 1 MN jako obiektu studium przypadku (Rozdział 3): budowa, parametry techniczne, wymagania normatywne i typowe mechanizmy uszkodzeń.
- **Projekt laboratorium badawczego**: koncepcja nowego, wyspecjalizowanego laboratorium z aparaturą pomiarową i systemami bezpieczeństwa (Rozdział 4).

- **Zapewnienie jakości i akredytacja**: opracowanie systemu zarządzania jakością zgodnego z ISO/IEC 17025, procedur walidacyjnych i dokumentacji badań (Rozdział 5).
- **Metodyka badań eksperymentalnych**: szczegółowy opis procedur prób statycznych, zmęczeniowych, badań NDT, zweryfikowany na przykładzie sprzęgu śrubowego (Rozdział 6).
- **Walidacja metodyki**: ocena poprawności i powtarzalności opracowanych procedur, analiza niepewności pomiarowych (Rozdział 7).
- **Wyniki badań i analiza danych**: prezentacja i omówienie wyników wszystkich przeprowadzonych badań (Rozdział 8).
- **Dyskusja i wnioski**: interpretacja wyników, ocena zgodności z normami, porównanie skuteczności zastosowanych metod oraz wnioski końcowe (Rozdziały 9–10).

Choć studium przypadku dotyczy sprzęgu śrubowego wagonu towarowego, opracowana metodyka oraz koncepcja laboratorium mają charakter ogólny. Ich zastosowanie nie ogranicza się do jednego typu komponentu; mogą one zostać zaadaptowane do badań innych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych, takich jak zderzaki, ramy wózków czy zestawy kołowe.

1.3. Hipotezy badawcze

W pracy przyjęto trzy hipotezy badawcze, sformułowane tak, aby były weryfikowalne na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych:

H1: Autor stawia tezę, że możliwe jest opracowanie i walidacja zunifikowanej metodyki badań wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych obejmującej próby statyczne, zmęczeniowe oraz diagnostykę nieniszczącą, której wyniki pozostają zgodne z wymaganiami właściwych norm technicznych, w tym PN-EN 15566.

H2: Możliwe jest zaprojektowanie i wdrożenie wyspecjalizowanego laboratorium badawczego spełniającego wymagania akredytacji UDT. Laboratorium takie, odpowiednio wyposażone i skonfigurowane powinno być zdolne do wiernego odwzorowania rzeczywistych warunków obciążeń eksploatacyjnych dla kluczowych

komponentów taboru kolejowego, a tym samym umożliwić uzyskanie certyfikowalnych wyników badań wytrzymałościowych.

H3: Włączenie do proponowanej metodyki nowoczesnych technik diagnostyki nieniszczącej, a w szczególności metody rezonansu akustycznego (ART), pozwoli na wczesne wykrywanie inicjacji pęknięć zmęczeniowych w trakcie trwania badań, zwiększając tym samym czułość i wartość informacyjną testów w porównaniu z klasycznymi metodami MT i UT, stosowanymi dotychczas wyłącznie po zakończeniu cykli obciążeń. Hipotezę tę wspierają wstępne wyniki badań własnych autora dotyczących zastosowania ART do kontroli jakości sworzni sprzęgów śrubowych [10, 11, 12].

1.4. Struktura rozprawy

Rozprawa składa się z jedenastu rozdziałów: ułożonych zgodnie z logiką postępowania badawczego, od sformułowania problemu, przez analizę stanu wiedzy, projekt rozwiązania i jego eksperymentalną weryfikację, aż po dyskusję wyników i wnioski końcowe. Poniżej przedstawiono zawartość każdego z rozdziałów wraz ze wskazaniem kluczowych zagadnień omawianych w jego ramach.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do problematyki rozprawy. W jego pierwszej części sformułowano problem badawczy w oparciu o dane Urzędu Transportu Kolejowego oraz przegląd literatury naukowej, wskazujący na lukę w zakresie kompleksowych metodyk badań wytrzymałościowych elementów taboru. Następnie określono cel główny i cele szczegółowe pracy, jej zakres przedmiotowy oraz hipotezy badawcze, których weryfikacja stanowi przedmiot dalszych rozdziałów. Rozdział zamyka opis struktury rozprawy.

Rozdział 2 stanowi analizę stanu wiedzy i przegląd literatury przedmiotu. Omówiono w nim konstrukcję i funkcje kluczowych elementów wagonów towarowych, ze szczególnym uwzględnieniem sprzęgu śrubowego jako głównego obiektu badań. Przedstawiono rodzaje, metody i zakres stosowania badań wytrzymałościowych w pojazdach szynowych, w tym próby statyczne, zmęczeniowe i analizę numeryczną MES. Osobne podrozdziały poświęcono nowoczesnym metodom diagnostyki nieniszczącej, w szczególności emisji akustycznej (AE), metodzie rezonansu akustycznego (ART) oraz tomografii komputerowej (CT). Rozdział

kończy się przeglądem norm i regulacji europejskich oraz polskich, w tym dyrektywy 2016/797/UE, rozporządzenia (UE) nr 321/2013 oraz norm serii PN-EN 12663, PN-EN 13749, PN-EN 15227 i PN-EN 15566.

Rozdział 3 zawiera szczegółowy opis obiektu badań, którym jest system sprzęgu śrubowego 1 MN przeznaczony do łączenia wagonów towarowych. Opisano budowę systemu obejmującą 14 komponentów oraz ich parametry techniczne, w tym geometrię, materiały konstrukcyjne i obróbkę cieplną. Przedstawiono wymagania normatywne wynikające z PN-EN 15566:2023-01 wraz z poziomami obciążeń, kryteriami akceptacji oraz wymaganym programem badań. Omówiono właściwości materiałowe poszczególnych elementów sprzęgu (stali konstrukcyjnych i sprężynowych), a także typowe mechanizmy uszkodzeń eksploatacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem pęknięć zmęczeniowych w strefach koncentracji naprężeń i zużycia tribologicznego powierzchni współpracujących.

Rozdział 4 przedstawia autorską koncepcję projektową wyspecjalizowanego laboratorium badawczego, dostosowanego do realizacji pełnego programu badań wytrzymałościowych elementów wagonów towarowych. Określono wymagania projektowe oraz przyjęte założenia funkcjonalne. Opisano infrastrukturę laboratorium i jego układ przestrzenny, a także rozmieszczenie kluczowych stanowisk badawczych. Szczegółowo scharakteryzowano stanowisko statyczne i zmęczeniowe oparte na układzie serwohydraulicznym, wraz z opisem maszyny wytrzymałościowej, układu mocowania próbek oraz systemu pomiarowo-sterującego. Omówiono aparaturę pomiarową stanowiącą wyposażenie laboratorium, w tym przetworniki tensometryczne, ekstensometry, czujniki LVDT oraz aparaturę do badań nieniszczących. Wyodrębniono podrozdziały poświęcone systemom bezpieczeństwa i zarządzania ryzykiem oraz kierunkom rozwoju laboratorium, w tym potencjałowi rozszerzenia zakresu badawczego na inne komponenty taboru.

Rozdział 5 omawia zagadnienia zapewnienia jakości i certyfikacji laboratorium. Opisano w nim status regulacyjny laboratorium badawczego oraz procedury oceny zgodności obowiązujące w przemyśle kolejowym Unii Europejskiej. Przedstawiono system zarządzania jakością zgodny z normą ISO/IEC 17025, obejmujący wymagania dotyczące dokumentacji, nadzoru nad procedurami i danymi pomiarowymi oraz mechanizmów ciągłego doskonalenia. Osobne podrozdziały poświęcono kwalifikacjom personelu oraz wymaganiom bezpieczeństwa pracy, a także procesowi strukturyzacji i walidacji procedur badawczych. Rozdział kończy się

omówieniem możliwości wdrożeniowych projektowanego laboratorium oraz perspektyw współpracy z przemysłem kolejowym.

Rozdział 6 przedstawia szczegółową metodykę badań eksperymentalnych przeprowadzonych na sprzęgu śrubowym jako studium przypadku. Opisano plan badań oraz scenariusze obciążeń odzwierciedlające zarówno wymagania normatywne, jak i warunki eksploatacyjne. W kolejnych podrozdziałach zawarto opisy procedur: badania statycznego wytrzymałości sprzęgu obejmującego trzy poziomy obciążenia (500 kN, 850 kN i 1000 kN), badania zmęczeniowego realizowanego zgodnie z programem 698+1 cykli powtarzanym 2150 razy, oceny stanu sprzęgu po obciążeniach z wykorzystaniem klasycznych metod nieniszczących (MT, PT, UT) oraz badania metodą rezonansu akustycznego (ART) zastosowanej do kontroli sworzni. Wskazano kryteria akceptacji i sposób oceny wyników oraz przedstawiono zasady prowadzenia dokumentacji przebiegu badań.

Rozdział 7 poświęcono walidacji opracowanej metodyki badawczej. Przedstawiono procedury kalibracji i sprawdzenia aparatury pomiarowej zgodnie z normami serii ISO 7500 oraz wytycznymi ILAC-G24. Przeprowadzono kompleksową analizę niepewności pomiarów obejmującą składowe typu A i typu B, z uwzględnieniem niepewności rozszerzonej zgodnie z wytycznymi JCGM 100:2008 (GUM). Zweryfikowano powtarzalność wyników badań statycznych i zmęczeniowych. Osobny podrozdział poświęcono walidacji skuteczności metod NDT, w której porównano ART z klasycznymi technikami pod względem czułości, swoistości i czasu badania. Rozdział kończy się propozycjami doskonalenia procedur na podstawie wyników walidacji.

Rozdział 8 prezentuje wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Zawarto w nim wyniki prób statycznych obejmujące charakterystyki siły w funkcji przemieszczenia oraz wyznaczone parametry mechaniczne sprzęgu, wyniki prób zmęczeniowych z zarejestrowanym przebiegiem cykli i obserwacjami stanu próbki, a także wyniki badań rezonansowych z analizą skuteczności klasyfikatora opartego na algorytmie Random Forest. Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników oraz analizę niepewności końcowej, uwzględniającą wszystkie zidentyfikowane składowe.

Rozdział 9 zawiera szczegółową dyskusję uzyskanych wyników. Oceniono zgodność wyników z wymaganiami norm PN-EN 15566:2023-01 oraz pokrewnych standardów branżowych. Porównano efektywność zastosowanych metod badawczych pod względem wykrywalności wad, czasu badania i kosztów. Przeanalizowano niepewności pomiarów oraz

powtarzalność wyników w kontekście wymagań akredytacyjnych. Wyciągnięto wnioski dotyczące implikacji opracowanej metodyki dla badań innych komponentów taboru kolejowego, takich jak ramy wózków, osie zestawów kołowych oraz elementy ustrojów spawanych. Wskazano także ograniczenia przeprowadzonych badań i kierunki ich potencjalnego rozszerzenia.

Rozdział 10 formułuje wnioski końcowe rozprawy. Podsumowano realizację celu głównego i celów szczegółowych, przeprowadzono weryfikację postawionych hipotez badawczych w świetle uzyskanych wyników eksperymentalnych. Sformułowano wnioski o znaczeniu praktycznym dla inżynierii kolejowej, w tym rekomendacje dotyczące włączenia ART do procedur kontroli jakości elementów sprzęgów śrubowych. Wskazano propozycje dalszych badań, obejmujące rozszerzenie zakresu metodyki na inne komponenty pojazdów szynowych oraz pogłębioną analizę algorytmów uczenia maszynowego w diagnostyce wytrzymałościowej.

Rozprawę uzupełniają: spis literatury (**Rozdział 11**) obejmujący 71 pozycji (normy, monografie, artykuły naukowe i raporty techniczne), spis rysunków, spis tabel oraz wykaz wykorzystanych skrótów i oznaczeń. W załącznikach zamieszczono wybrane dokumenty pomocnicze, w tym karty kalibracyjne aparatury pomiarowej oraz raporty z badań eksperymentalnych.

2. ANALIZA STANU WIEDZY: PRZEGLĄD LITERATURY I NORM

2.1. Konstrukcja i funkcje kluczowych elementów wagonów towarowych

Wagon towarowy jest pojazdem kolejowym przeznaczonym do przewozu ładunków. Składa się z dwóch głównych części: podwozia, zwanego ostoją, oraz nadwozia, określanego jako pudło. Ostoja stanowi spawaną konstrukcję ramową z podłużnic i poprzecznic. Przenosi obciążenia od masy ładunku, reakcje od zestawów kołowych przekazywane przez układ zawieszenia (zwłaszcza na nierównościach toru) oraz siły podłużne powstające podczas ruszania i hamowania składu pociągu. Do ostoi instalowane są układ biegowy, układ hamulcowy oraz urządzenia cięgłowo-zderzne oraz elementy krytyczne dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego.

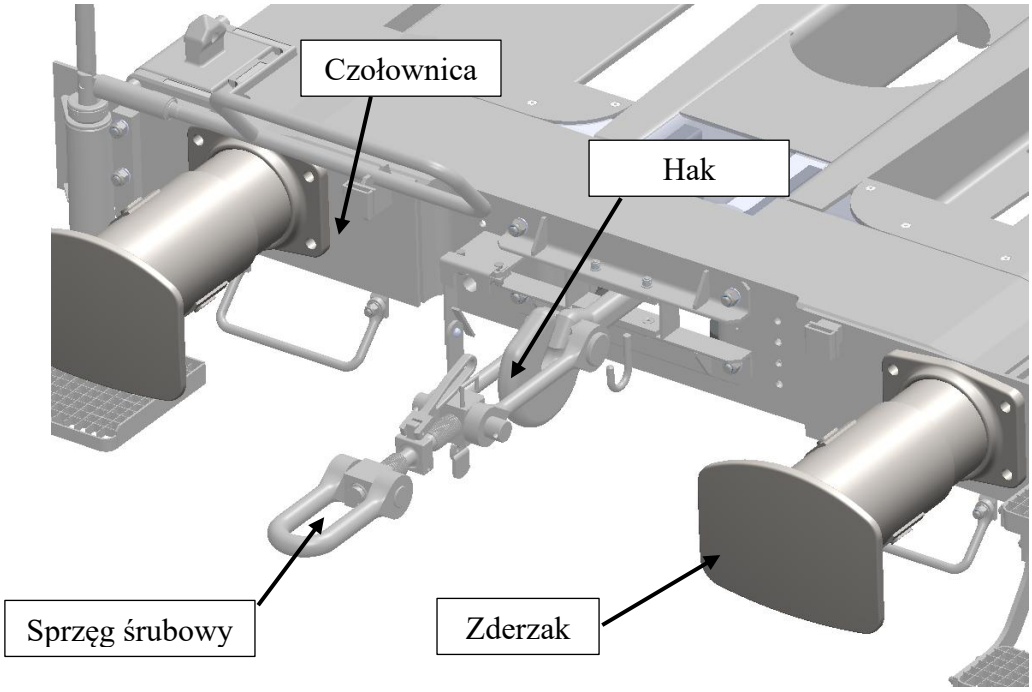
Układ biegowy typowego wagonu towarowego oparty jest na wózkach dwuosiowych lub w prostszych konstrukcjach na zestawach kołowych osadzonych bezpośrednio w ostoi. Każdy wózek składa się z ramy, zestawów kołowych (oś z parą kół), układu zawieszenia oraz łożysk. Ramy wózków przenoszą obciążenia kombinowane: pionowe, wynikające z masy ładunku, oraz poprzeczne, generowane przez siły odśrodkowe w łukach toru. To właśnie ta złożoność stanu naprężeń czyni je obiektami intensywnych badań wytrzymałościowych, prowadzonych zgodnie z normą PN-EN 13749 [7, 13].

Urządzenia cięgłowo-zderzne (rys. 2.1) pełnią kluczową rolę w przenoszeniu sił między wagonami. W skład tego zespołu wchodzi hak cięgłowy, urządzenie cięgłowe, obejmujące cięgło widłowe z podporą i elementem amortyzującym, oraz sprzęg śrubowy [14]. System jest znormalizowany przez normę PN-EN 15566 oraz kartę UIC 520, które wyróżniają trzy kategorie klasyfikacji: 1 MN, 1,2 MN i 1,5 MN. W najszerzej stosowanej kategorii 1 MN sprzęg śrubowy musi przenosić obciążenie do 850 kN, natomiast kompletny system wytrzymać 1000 kN [1, 14].

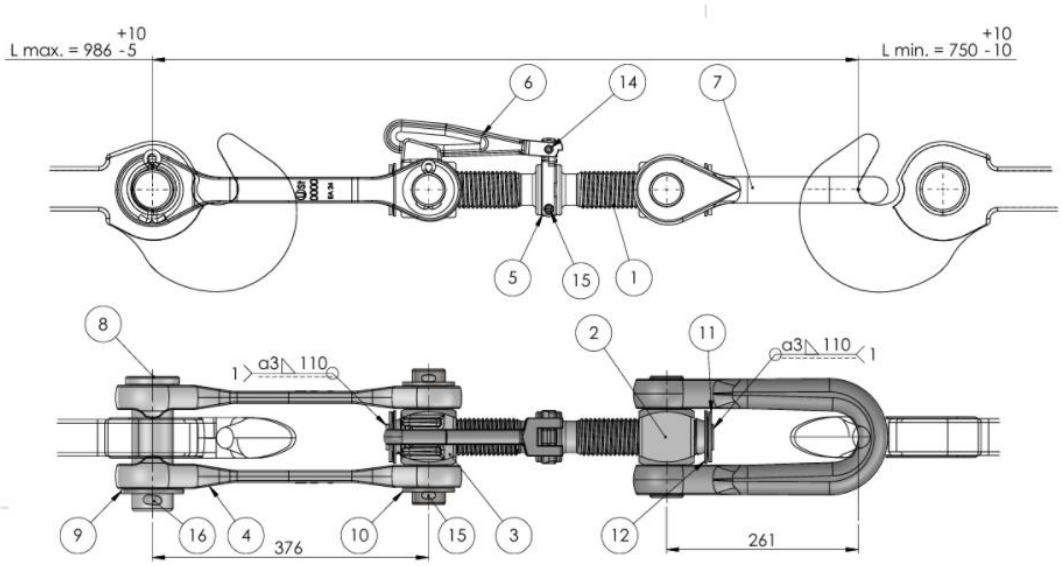
2.2. Sprzęg śrubowy w wagonach towarowych: budowa, eksploatacja i uszkodzenia

Sprzęg śrubowy (rys. 2.2) składa się z 14 elementów: śruby dwustronnej, nasady, czopów obrotowych z gwintem lewym i prawym, łubek, pałąka, sworznia, rękojeści przegubowej, sprężyn talerzowych i podkładek [1]. Elementem przenoszącym siły rozciągające jest pałąk, wykonany ze stali hartowanej i odpuszczanej o twardości 340–360 HB. Hak cięgłowy i cięgło

widłowe charakteryzują się natomiast niższą twardością (170–190 HB) i strukturą ferrytyczno-perlityczną, która zapewnia ciągliwość przy obciążeniach udarowych. Podane wartości twardości zostały potwierdzone badaniami metodą Brinella przeprowadzonymi w ramach prac B+R przedsiębiorstwa [3]. W tabeli 2.1 wymieniono elementy na które składa się budowa sprzęgu śrubowego.



Rys. 2.1. Urządzenia pociągowo-zderzne wagonu towarowego (platformy) [opracowanie własne]



Rys. 2.2. Budowa sprzęgu śrubowego [opracowanie własne]

Tabela 2.1.

Komponenty sprzęgu śrubowego [opracowanie własne]

Nr elementu	Numer części	Nazwa	Ilość
1	EA.SS10-SD01	Śruba dwustronna	1
2	EA.SS10-COL01	Nakrętka czopowa z gwintem lewym	1
3	EA.SS10-COP01	Nakrętka czopowa z gwintem prawym	1
4	EA.SS10-LU01	Łubka	2
5	EA.SS10-NA01	Nasada	1
6	EA.SS10-RP01	Rękojeść	1
7	EA.SS10-PA01	Pałąk	1
8	EA.SS10-SW01	Sworzeń	1
9	EA.SS10-P36	Podkładka 36	2
10	EA.SS10-P46	Podkładka 46	2
11	EA.SS10-P56	Podkładka 56	1
12	EA.SS10-ST01	Podkładka sprężysta	2
13	10x50 PN-EN ISO 8752	Kołek sprężysty 10x50	1
14	10x70 PN-EN ISO 8752	Kołek sprężysty 10x70	1
15	PN-EN ISO 1234 10x71	Zawleczka S10x71	2
16	PN-EN ISO 1234 13x90	Zawleczka S13x90	1

System sprzęgu śrubowego projektowany jest z założeniem 30-letniego okresu eksploatacji [1]. W tym czasie elementy narażone są na ponad 1,5 miliona cykli obciążeń zmiennych, odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy: formowaniu pociągów, jeździe po łukach, hamowaniu i ruszaniu. Typowe spektrum obciążeń zmęczeniowych dla kategorii 1 MN obejmuje cykle niskiej amplitudy, rzędu 10–180 kN, przeplatane cyklami wysokiej amplitudy, sięgającymi 575 kN [8, 9].

Badania kontrolne elementów sprzęgów śrubowych zakupionych na rynku europejskim wykazały, że produkty oficjalnie dopuszczone do eksploatacji mogą zawierać istotne wady materiałowe. W badaniach przeprowadzonych w ramach prac B+R stanowiących podstawę niniejszej rozprawy stwierdzono obecność odwęglonej warstwy powierzchniowej na haku cięgłowym, efektu wadliwej obróbki cieplnej, która stanowi uprzywilejowane miejsce inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Co więcej, w jednym z pięciu zbadanych zestawów, czyli w 20% próby, wykryto wady dyskwalifikujące element z dopuszczenia do eksploatacji [3]. Obserwacje te uzasadniają potrzebę opracowania systematycznej i zwalidowanej metodyki kontroli jakości elementów sprzęgów śrubowych, obejmującej zarówno weryfikację właściwości

materiałowych dostarczanych komponentów, jak i ocenę ich stanu po obciążeniach eksploatacyjnych [3].

Do typowych mechanizmów uszkodzeń elementów sprzęgu należą: pęknięcia zmęczeniowe inicjujące się w strefach koncentracji naprężeń, takich jak korzeń gwintu czy promień krzywizny pałąka; zużycie tribologiczne powierzchni współpracujących, korozja szczelinowa w strefach styku łubek oraz odkształcenia trwałe powstające po przeciążeniach. Przykłady takich uszkodzeń zaobserwowanych w rzeczywistej eksploatacji przedstawiono na rys. 3.2. Vukšić i Popović potwierdzają, że pęknięcia inicjują się konsekwentnie w miejscach najwyższych naprężeń wyznaczonych metodą MES [15, 16].

2.3. Badania wytrzymałościowe pojazdów szynowych: rodzaje, metody i zakres ich stosowania

Badania wytrzymałościowe są podstawowym narzędziem oceny zdolności konstrukcji do bezpiecznego przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych w całym zakładanym okresie użytkowania pojazdu szynowego. Ich znaczenie w kolejnictwie wynika z dwóch okoliczności. Po pierwsze, siły wzdłużne w urządzeniach cięgłowo-zderznych sięgają w warunkach eksploatacyjnych setek kiloniutonów, a w warunkach niszczących nawet kilku meganiutonów [1, 14]. Po drugie, cykl eksploatacji wagonu liczy z reguły 25–30 lat, a w tym czasie elementy nośne narażone są na ponad miliard cykli obciążeń zmiennych o zróżnicowanej amplitudzie [8, 17, 18]. Z tych przesłanek wynika, że w pojazdach szynowych nie wystarcza wykonanie pojedynczych prób kontrolnych. Konieczne są zintegrowane programy badań, obejmujące próby statyczne, dynamiczne i zmęczeniowe, uzupełnione o ocenę stanu materiałów metodami nieniszczącymi i o analizę numeryczną MES [19, 20, 21].

W kolejnych podpunktach uporządkowano rodzaje stosowanych badań, opisano metody wykorzystywane w odniesieniu do kluczowych podsystemów wagonu towarowego oraz wskazano normatywną podstawę ich realizacji. Trzy podpunkty poświęcono szczegółowemu omówieniu metod próby statycznej, badań zmęczeniowych i analizy MES wraz z ich praktycznym zastosowaniem do sprzęgu śrubowego stanowiącego główny obiekt badań niniejszej rozprawy.

2.3.1. Klasyfikacja badań wytrzymałościowych pojazdów szynowych

We współczesnej praktyce inżynierskiej w kolejnictwie wyróżnia się kilka klas badań wytrzymałościowych. O zakresie ich stosowania decyduje charakter obciążeń występujących w eksploatacji oraz konstrukcja badanego elementu. Klasyfikację tę można sprowadzić do pięciu grup:

- **Badania statyczne:** realizuje się je na maszynach wytrzymałościowych przy pojedynczym cyklu obciążenia narastającego liniowo do wartości projektowej, niszczącej lub odpowiadającej granicy plastyczności. Pozwalają wyznaczyć charakterystykę siły w funkcji przemieszczenia, odkształcenie trwałe oraz siłę niszczącą. W odniesieniu do wagonów towarowych stosuje się je zarówno do oceny kompletnych podsystemów (sprzęg śrubowy, urządzenie cięgłowo-zderzne), jak i pojedynczych elementów, takich jak pałąk, hak cięgłowy czy sworzeń [1, 19, 22].
- **Badania dynamiczne (udarowe):** odzwierciedlają warunki krótkotrwałych przeciążeń występujących podczas formowania pociągów, najechania na zderzaki czy nagłego hamowania. W kolejnictwie ich szczególnym przypadkiem są próby zderzeniowe (crashworthiness), regulowane normą PN-EN 15227 [23]. W zakresie badań materiałowych odpowiednikiem jest próba udarności sposobem Charpy'ego, wykonywana zgodnie z PN-EN ISO 148-1 [24].
- **Badania zmęczeniowe:** stanowią najbardziej kosztowną i czasochłonną klasę badań, lecz są nieodzowne dla oceny trwałości eksploatacyjnej. Wykonuje się je na stanowiskach serwohydraulicznych zgodnie z protokołami amplitudowo-cyklowymi opisanymi w normach branżowych: PN-EN 15566 dla sprzęgów śrubowych [1], PN-EN 13749 dla ram wózków [7], PN-EN 12663-2 dla nadwozi wagonów towarowych [2] oraz ASTM E466 dla pojedynczych próbek materiałowych [25]. W kolejnictwie stosuje się zarówno próby o stałej amplitudzie, jak i programy wielopoziomowe odwzorowujące rzeczywiste widmo obciążeń [18, 26, 27].
- **Badania zmęczeniowo-trwałościowe rozszerzone:** łączą długotrwały program cykli zmiennych z ciągłym monitorowaniem stanu elementu metodami nieniszczącymi (emisja akustyczna, ART, cyfrowa korelacja obrazu DIC). Dzięki temu można zarejestrować nie tylko fakt zniszczenia, ale także moment i mechanizm inicjacji pęknięcia [10, 11, 28, 29, 30].

- **Analiza numeryczna metodą elementów skończonych (MES):** traktowana jest jako uzupełnienie i etap przygotowawczy badań eksperymentalnych. Pozwala wytypować rejony koncentracji naprężeń, zaprojektować punkty pomiarowe i zoptymalizować geometrię stanowiska. W praktyce wagonów towarowych analiza MES jest obligatoryjnym etapem dokumentacji konstrukcyjnej elementów spawanych zgodnie z PN-EN 15085-3 oraz PN-EN 12663-1 [21, 31, 32].

Klasy te nie są rozłączne. W większości programów badań pełnoskalowych próby statyczne, zmęczeniowe i nieniszczące łączy się w jednej ujętej procedurą sekwencji. Taki zintegrowany model badań przyjęto również w niniejszej rozprawie i opisano go szczegółowo w rozdziale 6.

2.3.2. Zakres stosowania badań głównych podsystemów wagonu towarowego

Konstrukcja wagonu towarowego, mimo pozornej prostoty, jest układem złożonym z kilkudziesięciu elementów krytycznych dla bezpieczeństwa ruchu. Z perspektywy badań wytrzymałościowych można wyróżnić w niej cztery główne podsystemy. Dla każdego z nich stosowane są odmienne procedury i kryteria akceptacji.

Podsystem cięgłowo-zderzny. Obejmuje sprzęg śrubowy, hak cięgłowy, cięgło widłowe, sworznie i zderzaki. Jest to podsystem bezpośrednio przenoszący siły wzdłużne między pojazdami w składzie, a tym samym najbardziej narażony na obciążenia udarowo-zmęczeniowe. Program badań obejmuje próbę statyczną kompletnego sprzęgu do siły co najmniej 1000 kN (kategoria 1 MN), próbę zmęczeniową w postaci blokowego programu (698 cykli niskiej amplitudy i 1 cyklu wysokiej amplitudy, powtarzanych 2150 razy) oraz próbę zerwania, w której siła niszcząca nie może być mniejsza niż 1000 kN [1, 8, 9, 14]. Badania kontrolne pojedynczych elementów, takich jak pałąki, sworznie czy łubki, realizuje się zgodnie z PN-EN ISO 6892-1 (próba rozciągania) [22] oraz PN-EN ISO 148-1 (próba udarności Charpy'ego) [24]. Pęknięcia zmęczeniowe w tym podsystemie były przedmiotem licznych prac badawczych. Wagner i współpracownicy dokonali przeglądu metodologii projektowania nowoczesnych sprzęgów [8], He i współpracownicy przeanalizowali mechanizmy uszkodzeń kutych jarzm sprzęgów [33], a Tanasković i współpracownicy potwierdzili eksperymentalnie i numerycznie miejsca inicjacji pęknięć [16]. Vukšić Popović i współpracownicy wykazali natomiast, że stan techniczny ogniw sprzęgów eksploatowanych istotnie odbiega od stanu fabrycznego, co stanowi argument za wprowadzeniem systematycznej kontroli okresowej [15].

Podsystem biegowy (wózki i zestawy kołowe). Rama wózka jest konstrukcją spawaną przenoszącą obciążenia statyczne, dynamiczne i zmęczeniowe z nadwozia na zestawy kołowe. Wymagania konstrukcyjne i metodyka badań zmęczeniowych są określone normą PN-EN 13749 [7], a w odniesieniu do spoin obowiązuje dodatkowo PN-EN 15085-3. Seo i współpracownicy zrealizowali pełnoskalowe badania ramy wózka o czasie trwania programu przekraczającym 10^7 cykli, wykazując zgodność wyników eksperymentu z prognozami MES [17]. Hakizimana i współpracownicy przeanalizowali wpływ niekołowości kół na trwałość ramy [31], a Utomo i współpracownicy zbadali konsekwencje statycznych obciążeń niesymetrycznych [34]. Osie zestawów kołowych są najbardziej narażone na pęknięcia zmęczeniowe inicjowane mechanizmem fretting, dlatego bada się je w połączeniu z metodami nieniszczącymi: ultradźwiękami fazowanymi (PAUT) [35] oraz emisją akustyczną wspomaganą uczeniem maszynowym [10].

Nadwozie (pudło i ostoja). Jest to konstrukcja spawana o zróżnicowanej geometrii, od otwartych nadwozi węglarek po cysterny i wagony specjalizowane. Wymagania wytrzymałościowe reguluje norma PN-EN 12663-2 [2]. Metodologię badań zmęczeniowych z wykorzystaniem zarejestrowanych widm obciążeń eksploatacyjnych zaproponowali między innymi Fu i współpracownicy [18] oraz Zhao i współpracownicy [26]. Walidacja konstrukcji spawanych ostoi i pudła wymaga przeprowadzenia kompleksowej analizy MES uzupełnionej o pomiary tensometryczne in situ [21, 32].

Elementy bezpieczeństwa biernego. W warunkach kolizji kluczową rolę odgrywają elementy zaprojektowane jako pochłaniacze energii, czyli zderzaki i strefy zgniotu. Ich charakterystyka siły w funkcji przemieszczenia jest weryfikowana w próbach dynamicznych zgodnie z PN-EN 15227 [23], obejmujących scenariusze zderzeniowe o energii sięgającej 1 MJ. W przypadku wagonów towarowych wymagania crashworthiness są mniej restrykcyjne niż dla pojazdów pasażerskich, wciąż jednak obejmują badanie elementów cięgłowo-zderznych przy obciążeniach przekraczających granicę plastyczności [6].

Do elementów bezpieczeństwa biernego wagonów towarowych zalicza się przede wszystkim zderzaki i strefy zgniotu, ale również cały system cięgłowo-zderzny wraz ze sprzęgiem śrubowym stanowiącym przedmiot niniejszej rozprawy, elementy antywspinaczkowe (anti-climbers) chroniące przed nakładaniem się pojazdów podczas zderzeń oraz odpowiednio zaprojektowaną konstrukcję ostoi zdolną do kontrolowanej absorpcji energii kolizyjnej zgodnie z PN-EN 15227. W wagonach towarowych, w odróżnieniu od taboru

pasażerskiego, historycznie występowało niewiele elementów bezpieczeństwa czynnego, ograniczonych do układów hamulcowych sterowanych pneumatycznie. Wraz z wdrażaniem Cyfrowego Sprzęgu Automatycznego (DAC) oraz modernizacją floty pojawiają się jednak nowe rozwiązania: elektroniczne systemy monitoringu stanu technicznego pojazdu, czujniki temperatury łożysk osiowych, wykrywanie wykolejeń oraz zintegrowane systemy sterowania hamowaniem, które sukcesywnie rozszerzają zakres bezpieczeństwa czynnego również w segmencie towarowym.

Choć każdy z podsystemów ma własną, specyficzną procedurę badawczą, wszystkie korzystają z tej samej grupy metod podstawowych: prób statycznych, programów zmęczeniowych, analizy MES i badań nieniszczących. Wspólnota metodologiczna jest jednym z argumentów, które uzasadniają koncepcję laboratorium wielofunkcyjnego, zdolnego do realizacji badań kilku klas komponentów w ramach jednej infrastruktury. Koncepcję tę przedstawiono szczegółowo w rozdziale 4.

2.3.3. Próby statyczne elementów i kompletnego sprzęgu śrubowego

Próba statyczna rozciągania jest podstawowym badaniem wytrzymałościowym pojedynczych elementów konstrukcyjnych oraz kompletnych podsystemów wagonów towarowych. Metodyka jej realizacji w odniesieniu do materiałów metalowych została skodyfikowana w normie PN-EN ISO 6892-1 [22]. Procedura polega na poddaniu próbki obciążeniu narastającemu liniowo, z określoną prędkością odkształcenia, aż do osiągnięcia stanu granicznego, granicy plastyczności, wytrzymałości maksymalnej lub zerwania. W trakcie próby rejestruje się charakterystykę siły w funkcji przemieszczenia, na podstawie której wyznacza się parametry materiałowe: granicę plastyczności Re (lub umowną R0,2), wytrzymałość na rozciąganie Rm, wydłużenie całkowite A i przewężenie Z. W laboratoriach kolejowych próby tego typu wykonuje się na maszynach wytrzymałościowych z napędem serwohydraulicznym lub elektromechanicznym o zakresie sił od kilkudziesięciu kN (próbki materiałowe) do ponad 1500 kN (próby pełnoskalowe sprzęgów i urządzeń cięgłowych) [36, 37]. Klasa dokładności pomiaru siły powinna być nie gorsza niż klasa 1 wg ISO 7500-1, co odpowiada dopuszczalnej niepewności względnej wskazania siły wynoszącej ±1% w zakresie nominalnym; norma definiuje pięć klas dokładności (0,5; 1; 2; 3) w kolejności od najdokładniejszej do najmniej precyzyjnej [38].

Próba statyczna kompletnego sprzęgu śrubowego prowadzona jest zgodnie z PN-EN 15566 oraz PN-EN ISO 6892-1 [1, 22]. Norma branżowa definiuje trzy poziomy obciążeń, którym poddawany jest kompletny sprzęg: połowę minimalnego obciążenia zrywającego (czyli 500 kN dla kategorii 1 MN), obciążenie minimalne wynoszące 850 kN dla haka cięgłowego oraz obciążenie maksymalne równe 1000 kN. Każdy z tych poziomów utrzymywany jest przez czas określony procedurą, a kryterium zaliczenia próby jest brak pęknięcia po każdym z poziomów oraz brak odkształceń trwałych przekraczających dopuszczalne wartości. Badanie realizuje się na stanowiskach serwohydraulicznych klasy 1 MN o pełnoskalowym zakresie pomiarowym (typowo do 1500–1600 kN), wyposażonych w czujniki tensometryczne siły oraz przetworniki LVDT lub ekstensometry do pomiaru przemieszczeń. Szczegółowy opis stanowiska SB-1600-P-PC, na którym przeprowadzono badania własne stanowiące podstawę niniejszej rozprawy, znajduje się w rozdziałach 4 i 6 (rys. 4.3 i 4.4). W ramach prac badawczych autora rozprawy przeprowadzono na tym stanowisku próbę statyczną kompletnego sprzęgu śrubowego, której wyniki potwierdziły pełną zgodność z wymaganiami normatywnymi [3].

2.3.4. Badania zmęczeniowe

Badania zmęczeniowe stanowią najbardziej wymagającą czasowo i technicznie klasę prób wytrzymałościowych. Ich celem jest ocena trwałości elementu w warunkach cyklicznego obciążenia o zmiennej amplitudzie, odpowiadającego rzeczywistemu spektrum obciążeń eksploatacyjnych. W ujęciu klasycznym badania zmęczeniowe dzieli się na próby wysokocyklowe (HCF, powyżej 10^5 cykli) i niskocyklowe (LCF, poniżej 10^5 cykli), różniące się poziomem amplitudy oraz dominującym mechanizmem zniszczenia [20, 39]. Programy zmęczeniowe realizowane są na stanowiskach serwohydraulicznych umożliwiających pracę cykliczną z częstotliwością do kilku Hz przy pełnoskalowych poziomach siły. W przypadku elementów taboru kolejowego coraz częściej stosuje się programy wielopoziomowe odzwierciedlające zarejestrowane in situ widma obciążeń, co pozwala uzyskać bardziej realistyczną ocenę trwałości niż w próbie o stałej amplitudzie. Fu i współpracownicy opracowali metodykę projektowania takich programów dla nadwozi wagonów [18], a Zhao i współpracownicy. zaproponowali rekonstrukcję widma obciążeń zmęczeniowych z pomiarów eksploatacyjnych [26]. Seo i współpracownicy zrealizowali pełnoskalowe badania

zmęczeniowe ramy wózka z zastosowaniem stanowiska serwohydraulicznego, wykazując zgodność wyników z prognozami MES [17].

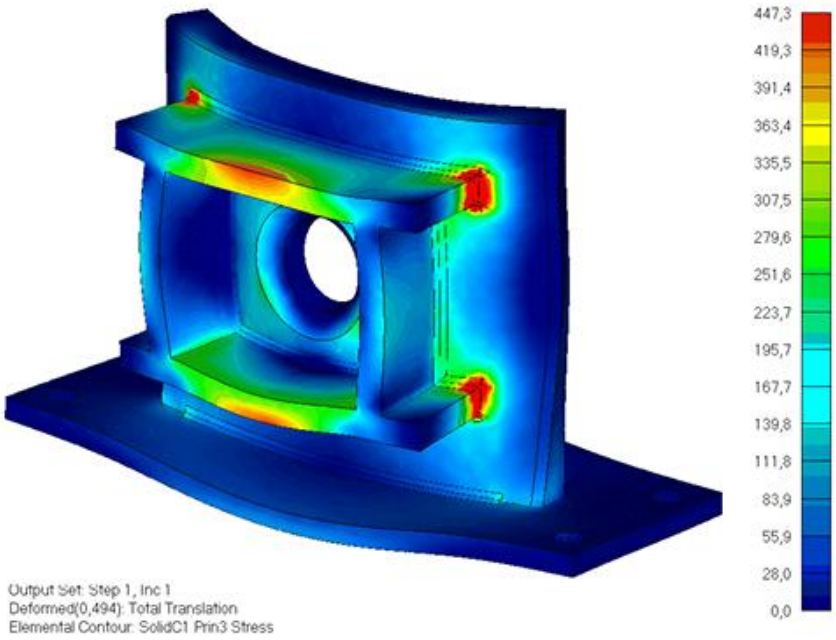
Norma PN-EN 15566 precyzyjnie definiuje program zmęczeniowy dla sprzęgów śrubowych kategorii 1 MN [1]. Blok obciążeń składa się z 698 cykli niskiej amplitudy w zakresie 10–180 kN ($\Delta F_1 \approx 170$ kN) i jednego cyklu wysokiej amplitudy z wartością szczytową 575 kN ($\Delta F_2 \approx 575$ kN), a pełny program wymaga 2150 takich bloków, łącznie ponad 1,5 miliona cykli, symulujących 30-letni okres eksploatacji [1, 8]. Próbę przeprowadza się na stanowisku serwohydraulicznym o zakresie sił co najmniej 1200 kN, z układem regulacji pozwalającym na utrzymanie częstotliwości typowo 1–3 Hz dla pełnoskalowych elementów. W trakcie programu monitorowane są: aktualna wartość siły i przemieszczenie, liczba zrealizowanych cykli oraz parametry maszyny (ciśnienia w siłownikach, temperatura oleju hydraulicznego). Kryterium pomyślnego zaliczenia próby zmęczeniowej jest brak pęknięć po wykonaniu pełnego programu obciążeń, weryfikowany metodami nieniszczącymi (najczęściej MT lub PT) po zakończeniu programu cyklicznego. W przypadku wykrycia pęknięcia rejestruje się liczbę cykli, po których ono wystąpiło, co pozwala porównać uzyskaną trwałość z wartością minimalną wymaganą przez normę. Szczegółowy opis stanowiska zmęczeniowego oraz wyniki badań własnych autora rozprawy znajdują się odpowiednio w rozdziałach 4 i 6.

2.3.5. Analiza numeryczna metodą elementów skończonych (MES)

Analiza numeryczna metodą elementów skończonych jest dziś podstawowym narzędziem projektowania elementów wytrzymałościowych pojazdów szynowych. Pozwala wyznaczyć rozkład naprężeń i odkształceń w geometrycznie skomplikowanych konstrukcjach jeszcze przed wykonaniem prototypu, a tym samym wytypować obszary koncentracji naprężeń, zoptymalizować geometrię i zaplanować eksperymentalne punkty pomiarowe. W odniesieniu do wagonów towarowych analiza MES jest obligatoryjnym etapem dokumentacji konstrukcyjnej elementów spawanych, prowadzonym zgodnie z PN-EN 12663-1 oraz PN-EN 15085-3. Współczesna praktyka w tym zakresie obejmuje analizy w zakresie sprężystym i sprężysto-plastycznym, analizy kontaktowe, modele propagacji pęknięć, a także sprzężone analizy mechaniczno-termiczne dla elementów spawanych [21, 31, 32]. Walidacja modelu numerycznego polega na porównaniu wyników obliczeń z pomiarami tensometrycznymi wykonanymi na prototypie w warunkach badań eksperymentalnych. Zgodność na poziomie 5–10% jest uznawana za potwierdzającą poprawność modelu i pozwala wykorzystać go do

prognozowania zachowania konstrukcji w warunkach skrajnych, niedostępnych dla badań fizycznych ze względów bezpieczeństwa lub kosztów.

W ramach prac przygotowawczych do niniejszej rozprawy producent zlecił wykonanie analizy MES podpory spawanej (rys. 2.3) urządzenia cięgłowego 1 MN zewnętrznemu biuru obliczeniowemu. Analizę przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 12663-1 oraz PN-EN 15085-3, dla obciążeń statycznych nadzwyczajnych oraz zmęczeniowych eksploatacyjnych. Pełny raport z analizy stanowi część dokumentacji technicznej projektu i został udostępniony autorowi rozprawy jako materiał referencyjny dla planowania programu badań eksperymentalnych [40]. Wyniki tej analizy stanowią praktyczny przykład zastosowania MES w projektowaniu elementów taboru i zostały szczegółowo omówione poniżej.



Rys. 2.3. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa podpory spawanej [opracowanie własne]

Model numeryczny zbudowano z elementów bryłowych: 276 264 węzłów, 184 507 elementów, przy średnim rozmiarze siatki 5 mm. Materiał konstrukcyjny przyjęty w analizie to stal S355 (Rm= 520 MPa, Re= 355 MPa). Schemat obciążeń obejmował trzy przypadki:

1. Obciążenie nadzwyczajne wzdłużne Fx= 850 kN, odpowiadające minimalnemu obciążeniu zrywającemu kompletnego sprzęgu wg PN-EN 15566:2023-01.
2. Obciążenia inercyjne wynikające z przyspieszeń bocznych 0,3 g zgodnie z PN-EN 12663-1 dla kategorii pojazdu F-I/F-II (wagony towarowe).

3. Obciążenia zmęczeniowe eksploatacyjne, ocenione z wykorzystaniem hipotezy granicy zmęczenia wg ERRI B12 Rp. 17 dla stali S355.

Kryteria oceny zgodności przyjęto następujące. Dla obciążeń nadzwyczajnych dopuszczono lokalne przekroczenie granicy plastyczności pod warunkiem $\sigma_{dop} \leq 2 \cdot Re$, zgodnie z załącznikiem A normy PN-EN 12663-1. Dla obciążeń zmęczeniowych zastosowano ocenę wg wykresu Goodmana, z uwzględnieniem klasy wykonania spoin CP C2 oraz klasy badań CT 3 wg PN-EN 15085-3.

Wyniki analizy przedstawione na rys. 2.3 wykazały, że pod obciążeniem wzdłużnym Fx= 850 kN w narożach płyt prowadzenia poziomego występują lokalne obszary o naprężeniach przekraczających granicę plastyczności materiału. Obszary te są jednak dostatecznie małe, aby kryterium dla obciążeń jednostronnych zgodnie z PN-EN 12663-1 było spełnione. Dla obciążeń zmęczeniowych stan naprężeń w analizowanych spoinach zaklasyfikowano jako średni w skali klasyfikacji stanów naprężeń zmęczeniowych (współczynnik naprężenia $0{,}75 \leq S < 0{,}9$), z lokalnymi punktami w stanie wysokim w rejonie naroża płyty prowadzenia poziomego nieprzyspawanej do płyty pionowej. Klasa wykonania spoin CP C2 oraz klasa badań CT 3 zostały ocenione jako prawidłowo dobrane do uzyskanych stanów naprężeń.

Rezultaty powyższej analizy stanowią istotną wskazówkę dla projektowania programu badań eksperymentalnych opisanego w rozdziale 6, w szczególności dla wyboru parametrów obciążeń próby statycznej kompletnego sprzęgu (rozdział 6.2). Należy podkreślić, że analiza numeryczna obejmuje wyłącznie podporę spawaną jako element urządzenia cięgłowego. Pozostałe elementy konstrukcji, takie jak hak cięgłowy, sworzeń, cięgło widłowe oraz sprzęg śrubowy z jego komponentami, nie były przedmiotem analizy MES w ramach prac przygotowawczych. Ich ocena prowadzona była na podstawie wymagań normatywnych PN-EN 15566:2023-01 oraz wyników badań eksperymentalnych opisanych w dalszej części rozprawy.

2.3.6. Podstawa normatywno-regulacyjna badań w UE i w Polsce

System normatywny regulujący badania wytrzymałościowe pojazdów szynowych w Unii Europejskiej ma strukturę hierarchiczną. Na poziomie najwyższym znajduje się Dyrektywa 2016/797/UE w sprawie interoperacyjności systemu kolei [5]. Nakłada ona obowiązek certyfikacji komponentów przez jednostki notyfikowane (NoBo). Poziom wykonawczy stanowią techniczne specyfikacje interoperacyjności (TSI), spośród których dla wagonów

towarowych kluczowe jest Rozporządzenie Komisji (UE) nr 321/2013 [6]. Konkretne procedury badawcze i kryteria akceptacji zawarte są w normach europejskich serii PN-EN: 12663 dla wytrzymałości nadwozi [2], 13749 dla ram wózków [7], 15227 dla crashworthiness [23] oraz 15566 dla sprzęgów śrubowych [1]. Uzupełnieniem tej hierarchii są karty UIC, między innymi UIC 520 [14, 41] i UIC 571-4 [42]. Choć nie stanowią one aktów prawnych, w praktyce branżowej traktowane są jako powszechnie stosowane dokumenty referencyjne.

W zakresie kompetencji laboratoriów badawczych właściwą normą horyzontalną jest ISO/IEC 17025 [43]. Wzorcowanie urządzeń pomiarowych regulują z kolei seria ISO 7500 [38] dla maszyn wytrzymałościowych oraz wytyczne ILAC-G24 [44] dla okresowych kalibracji. W Polsce nadzór nad zgodnością taboru z wymaganiami sprawuje Urząd Transportu Kolejowego (UTK) [45], a kompetencje laboratoriów w zakresie dopuszczenia komponentów do eksploatacji weryfikuje Urząd Dozoru Technicznego (UDT). Spójność tego systemu jest możliwa dzięki ciągłemu powiązaniu metodyki badawczej z wymaganiami formalnymi. Żaden komponent kategorii bezpieczeństwa nie może zostać dopuszczony do eksploatacji bez wykonania pełnego programu badań w laboratorium posiadającym odpowiednią akredytację.

2.3.7. Pozycja sprzęgu śrubowego w systemie badań wytrzymałościowych

Spośród elementów wagonu towarowego sprzęg śrubowy zajmuje pozycję szczególną. Po pierwsze, jest elementem cyklicznie obciążanym w każdym dniu eksploatacji składu pociągu, w przeciwieństwie do nadwozia, którego stan naprężeń zmienia się głównie w trakcie załadunku i rozładunku. Po drugie, jego konstrukcja, choć opanowana technologicznie od ponad stu lat, wciąż nie została w pełni zastąpiona automatyką sprzęgową. Oznacza to, że problematyka jego trwałości pozostaje nadal aktualna [8, 13]. Po trzecie, jest to element, w przypadku którego awaria, czyli rozerwanie składu, niesie bezpośrednie konsekwencje dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Potwierdzeniem tej oceny są dane Urzędu Transportu Kolejowego przytoczone w rozdziale 1 [4]. Z tych względów sprzęg śrubowy stanowi reprezentatywny obiekt do opracowania i weryfikacji metodyki badań wytrzymałościowych przedstawionej w dalszej części rozprawy.

2.4. Nowoczesne metody diagnostyki nieniszczącej (NDT) w kolejnictwie

Badania nieniszczące stanowią nieodzowny element programów oceny stanu technicznego elementów taboru kolejowego. Ich rola polega na wykrywaniu wad materiałowych

i niezgodności konstrukcyjnych bez naruszania integralności badanego obiektu, co umożliwia kontrolę elementów zarówno na etapie produkcji, jak i po określonych cyklach eksploatacji. We współczesnej praktyce kolejowej stosuje się równolegle dwie grupy metod: techniki klasyczne, w pełni opisane w normach branżowych (VT, MT, UT, PT), oraz techniki zaawansowane, takie jak emisja akustyczna (AE), metoda rezonansu akustycznego (ART) czy tomografia komputerowa (CT), których stosowanie poszerza się wraz z rozwojem aparatury pomiarowej i metod analizy danych. W kolejnych podpunktach omówiono podstawy fizyczne, zakres stosowania oraz ograniczenia każdej z tych metod, ze szczególnym uwzględnieniem ich przydatności do badań elementów sprzęgu śrubowego i pozostałych komponentów wagonów towarowych.

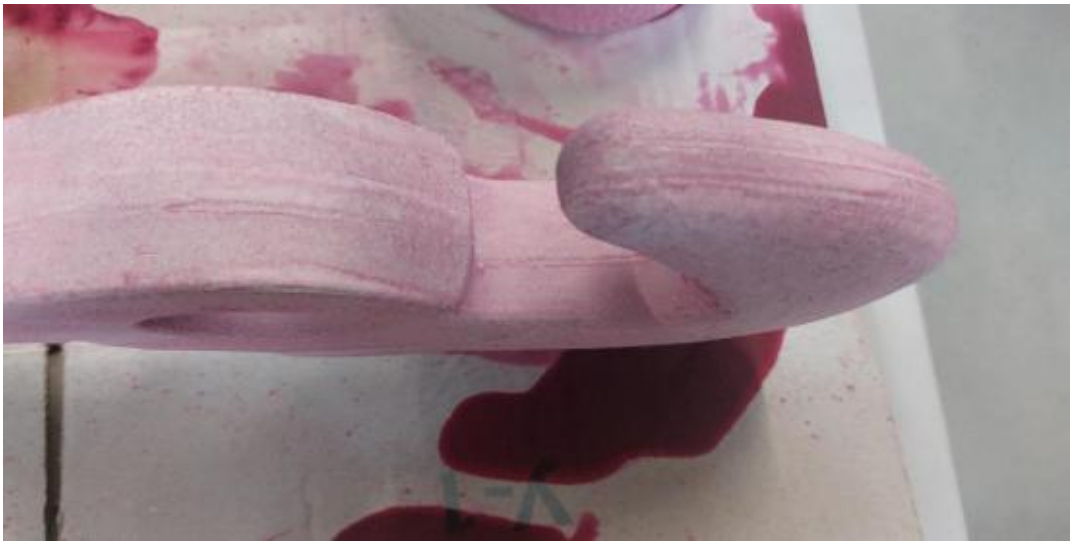
2.4.1. Klasyczne metody NDT

W diagnostyce elementów taboru kolejowego stosuje się cztery podstawowe metody nieniszczące: badania wizualne (VT), penetracyjne (PT), magnetyczno-proszkowe (MT) oraz ultradźwiękowe (UT) [46, 47]. Każda z nich opiera się na innym zjawisku fizycznym i charakteryzuje się odmienną czułością, zakresem stosowania oraz ograniczeniami, dlatego w praktyce kolejowej najczęściej stosuje się je równolegle, jako wzajemnie uzupełniające elementy programu kontroli.

Badania wizualne (VT) stanowią najstarszą i najbardziej rozpowszechnioną metodę NDT. W kolejnictwie wykonuje się je zarówno bezpośrednio nieuzbrojonym okiem, jak i pośrednio, z użyciem endoskopów, lup oraz kamer cyfrowych. Metoda ta jest obligatoryjnym pierwszym etapem każdego programu kontroli, ponieważ pozwala wykryć niezgodności powierzchniowe, takie jak pęknięcia otwarte, korozja, deformacje plastyczne czy ślady zużycia tribologicznego. Choć z pozoru prosta, wymaga od personelu odpowiednich kwalifikacji potwierdzonych certyfikatem zgodnie z PN-EN ISO 9712 [48] oraz przestrzegania warunków oświetlenia i kontrastu określonych w ISO 3059 [49]. Skuteczność VT jest jednak ograniczona do wad otwartych na powierzchni o szerokości większej niż około 10 µm. Wad zamkniętych lub objętościowych metoda ta nie wykrywa.

Badania penetracyjne (PT) rozszerzają możliwości VT na wady o szerokości dochodzącej do 1 µm. Procedura polega na nałożeniu na oczyszczoną powierzchnię penetranta o niskim napięciu powierzchniowym (najczęściej barwnika czerwonego lub środka fluorescencyjnego), jego wnikaniu w nieciągłości w wyniku działania sił kapilarnych, a następnie usunięciu

nadmiaru i naniesieniu wywoływacza, który wyciąga penetrant z wady i ujawnia jej obraz na powierzchni. W zastosowaniach kolejowych PT regulowane są przez PN-EN 10228-2 [50] dla odkuwek stalowych oraz przez wytyczne ISO 3059 [49] w zakresie warunków obserwacji. Metoda nadaje się do badania elementów o dowolnym kształcie i z dowolnego materiału nieporowatego, ale jest ograniczona do wad powierzchniowych. Stosowana jest rutynowo do kontroli pałąków, łubek i sworzni po obróbce mechanicznej, a także jako badanie pokontrolne po próbach zmęczeniowych w celu wykrycia mikropęknięć inicjacyjnych. Przykład badania penetracyjnego haka cięgłowego po próbie dynamicznej przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Przykład badania penetracyjnego po badaniu dynamicznym haka [opracowanie własne]

Badania magnetyczno-proszkowe (MT) wykorzystują zjawisko rozpraszania strumienia magnetycznego na nieciągłościach materiału ferromagnetycznego. Po namagnesowaniu elementu, najczęściej za pomocą jarzma elektromagnetycznego lub przepływu prądu, oraz naniesieniu zawiesiny drobinek ferromagnetycznych, pole rozproszone w okolicy wady przyciąga drobinki, tworząc widoczne wskazanie, czyli widoczną reakcję środka badawczego (proszku ferromagnetycznego lub barwnika penetrującego) na obecność nieciągłości materiału, klasyfikowane zgodnie z PN-EN ISO 9934-1 i PN-EN ISO 23277 jako liniowe (długość co najmniej trzykrotnie większa od szerokości) lub okrągłe. MT charakteryzuje się znacznie wyższą czułością niż PT dla wad powierzchniowych i podpowierzchniowych w stalach, gdyż wykrywa pęknięcia ukryte na głębokości do około 2 mm pod powierzchnią. Metoda wymaga jednak, by materiał badanego elementu wykazywał właściwości ferromagnetyczne. W kolejnictwie jest podstawowym narzędziem kontroli odkuwek elementów sprzęgów śrubowych, ram wózków i osi zestawów kołowych. Procedura jest regulowana normami PN-

EN ISO 9934-1 oraz PN-EN ISO 9934-2 [51, 52], określającymi zasady ogólne i wymagania dla środków penetrujących, a w zastosowaniu do odkuwek stalowych również PN-EN 10228-1 [47] oraz wytycznymi ASTM E1444 [53].

Badania ultradźwiękowe (UT) są podstawową metodą wykrywania wad objętościowych i podpowierzchniowych. Wykorzystują zjawisko odbicia fali ultradźwiękowej o częstotliwości od 0,5 do 20 MHz na granicach ośrodków o różnej impedancji akustycznej. Wprowadzona przez głowicę piezoelektryczną fala podłużna lub poprzeczna propaguje się przez materiał i ulega odbiciu na każdej nieciągłości (pęknięciu, porze, wtrąceniu niemetalicznym), a echo rejestrowane jest jako sygnał A-scan na ekranie defektoskopu. Pozycja czasowa echa odpowiada głębokości wady, a jego amplituda zależy od wielkości i orientacji nieciągłości. Czułość metody pozwala wykryć wady płaskie o wymiarach charakterystycznych już od kilkudziesięciu mikrometrów. UT jest niezastąpione przy badaniach grubościennych odkuwek, pełnych przekrojów osi kolejowych oraz spoin elementów spawanych ostoi. W kolejnictwie obowiązują w tym zakresie normy PN-EN 10228-3 [54] dla odkuwek oraz PN-EN ISO 11666 [46] dla spoin.

Uzupełnieniem klasycznego UT punktowego są techniki fazowane PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing), które umożliwiają szybsze i dokładniejsze skanowanie dużych przekrojów materiału [35]. Głowica PAUT zawiera od kilkunastu do kilkudziesięciu niezależnie sterowanych elementów piezoelektrycznych, których faza pobudzenia może być modyfikowana elektronicznie. Pozwala to na elektroniczne sterowanie kątem i ogniskowaniem wiązki ultradźwiękowej bez fizycznego przemieszczania głowicy, a uzyskany obraz S-scan lub C-scan dostarcza pełnej informacji o lokalizacji i geometrii wykrytej wady. W kolejnictwie technika PAUT znajduje zastosowanie głównie w okresowej kontroli osi zestawów kołowych oraz spawanych elementów ram wózków, gdzie klasyczne UT byłoby zbyt czasochłonne lub niewystarczająco czułe.

Z perspektywy badań wytrzymałościowych sprzęgów śrubowych klasyczne metody NDT pełnią dwie komplementarne funkcje. Pierwsza to kontrola wejściowa odkuwek przed wykonaniem prób mechanicznych, mająca na celu wykluczenie elementów z wadami fabrycznymi. Druga to weryfikacja pokontrolna po programie zmęczeniowym, mająca na celu wykrycie mikropęknięć powstałych w trakcie badań. Łączenie obu kontroli z wynikami prób mechanicznych pozwala uzyskać pełny obraz stanu technicznego elementu oraz określić mechanizmy degradacji.

2.4.2. Emisja akustyczna (AE)

Emisja akustyczna jest zjawiskiem polegającym na uwalnianiu w postaci fal sprężystych energii zgromadzonej w materiale w trakcie jego deformacji, pękania lub przemiany fazowej. Źródłem tych fal są lokalne, nieodwracalne procesy zachodzące w mikrostrukturze: ruch dyslokacji, propagacja pęknięcia, dekohezja inkluzji, tarcie powierzchni styku w obrębie istniejącej szczeliny. Fale propagują się przez materiał i osiągają jego powierzchnię, gdzie są rejestrowane czujnikami piezoelektrycznymi, rzadziej pojemnościowymi lub światłowodowymi. Częstotliwości emitowanych sygnałów obejmują pasmo od kilkudziesięciu kHz do kilku MHz. Dla zastosowań w kolejnictwie wykorzystuje się głównie zakres 100–400 kHz, optymalny pod względem stosunku sygnału do szumu w warunkach stanowiska zmęczeniowego [29].

Praktyczna implementacja metody obejmuje wzmacniacze sygnału, układ akwizycji o częstotliwości próbkowania od kilku do kilkudziesięciu MHz oraz oprogramowanie do analizy parametrów akustycznych. Rejestrowanymi wielkościami są: amplituda zdarzenia (w dB), czas narastania, czas trwania, liczba przekroczeń progu detekcji oraz energia sygnału. Na ich podstawie wyznacza się parametry zagregowane, takie jak skumulowana liczba zdarzeń lub skumulowana energia, których przebieg w funkcji liczby cykli lub siły obciążającej koreluje z procesem rozwoju uszkodzeń [55, 56].

Kluczową zaletą emisji akustycznej w porównaniu z klasycznymi metodami NDT jest możliwość ciągłego monitorowania próbki w trakcie obciążenia, bez konieczności przerywania testu. Metody MT, PT czy UT wymagają zatrzymania stanowiska i fizycznego dostępu do powierzchni, co przy programach zmęczeniowych liczących ponad milion cykli oznacza znaczne wydłużenie czasu badania. Emisja akustyczna pozwala natomiast rejestrować zdarzenia w czasie rzeczywistym, identyfikując moment inicjacji pęknięcia i jego dalszy wzrost. Ta cecha sprawia, że AE jest szczególnie cenna w badaniach trwałości zmęczeniowej elementów krytycznych, gdzie zarejestrowanie momentu pojawienia się pierwszego pęknięcia ma znaczenie zarówno diagnostyczne, jak i poznawcze [30, 57, 58].

Ograniczenia metody wynikają z jej dużej czułości na zakłócenia. Sygnały AE łatwo mylą się z szumami pochodzącymi od tarcia w mocowaniach próbki, od pracy układu hydraulicznego oraz od elektromagnetycznych zakłóceń stanowiska. Wymaga to starannego przygotowania pomiaru: filtracji częstotliwościowej, ustawienia odpowiednich progów detekcji oraz ekranowania toru pomiarowego. Drugim ograniczeniem jest trudność

jednoznacznej interpretacji sygnałów. Pojedyncze zdarzenie akustyczne nie pozwala bezpośrednio określić ani lokalizacji wady (bez sieci czujników z analizą czasów propagacji), ani jej rozmiaru. Dlatego współczesna praktyka stosowania AE coraz częściej łączy klasyczną analizę parametryczną z technikami uczenia maszynowego, które pozwalają klasyfikować sygnały według typu źródła i odróżniać zdarzenia diagnostycznie istotne od szumu [59].

W literaturze przedmiotu udokumentowano kilka kierunków zastosowań tej techniki w kolejnictwie. Carboni i Zamorano wykazali skuteczność AE wspomaganej algorytmami uczenia maszynowego bez nadzoru w monitorowaniu pęknięć zmęczeniowych typu fretting w osiach kolejowych [10]. Karpenko i współpracownicy połączyli AE z cyfrową korelacją obrazu (DIC), wskazując na synergię obu metod we wczesnym wykrywaniu pęknięć [11]. Yao i współpracownicy scharakteryzowali sygnatury akustyczne wzrostu pęknięcia zmęczeniowego w stopach aluminium 2024-T3, demonstrując możliwość rozróżnienia faz inicjacji i propagacji [60]. Panasiuk i Hajduk potwierdzili skuteczność AE w monitorowaniu wzrostu pęknięć zmęczeniowych w stali Hadfielda stosowanej w kolejnictwie [28]. Bartsch i Feldmann zaproponowali natomiast wykorzystanie AE do predykcji mikropęknięć w konstrukcjach stalowych poddanych obciążeniom zmęczeniowym, wskazując na potencjał metody we wczesnym ostrzeganiu o degradacji elementów spawanych [61]. Rezultaty tych prac wyznaczają kierunek, w którym AE jest stopniowo włączana do programów badawczych obok klasycznych metod NDT, a w niektórych zastosowaniach zaczyna pełnić funkcję podstawowego narzędzia diagnostycznego.

2.4.3. Metoda rezonansu akustycznego (ART)

Metoda rezonansu akustycznego, znana w literaturze pod nazwą Acoustic Resonance Testing (ART) lub Process Compensated Resonance Testing (PCRT), wykorzystuje fakt, że każdy element konstrukcyjny posiada zbiór charakterystycznych częstotliwości drgań własnych, zależnych od jego geometrii, parametrów materiałowych (modułu Younga, gęstości, tłumienia) oraz stanu wewnętrznej struktury. Wzbudzenie elementu krótkim impulsem mechanicznym, najczęściej za pomocą młotka modalnego lub piezoelektrycznego wzbudnika, powoduje pojawienie się drgań swobodnych, których widmo częstotliwościowe rejestruje się mikrofonem lub akcelerometrem. Po przekształceniu sygnału do dziedziny częstotliwości (transformata Fouriera, ewentualnie analiza falkowa) uzyskuje się tzw. sygnaturę akustyczną

elementu, zawierającą zestaw pików rezonansowych charakterystycznych dla danego egzemplarza [12, 62].

Wszelkie zmiany struktury materiału, takie jak pęknięcia, wtrącenia, niejednorodności krystaliczne czy odchylenia geometryczne, manifestują się w sygnaturze akustycznej w sposób mierzalny. Najczęściej obserwowane zjawiska to: przesunięcie częstotliwości rezonansowej w kierunku niższych wartości (efekt obniżenia sztywności efektywnej), zmiana amplitudy pików (efekt zmiany tłumienia wewnętrznego), pojawienie się nowych modów drgań lub rozdzielenie istniejących pików (efekt utraty symetrii geometrycznej). Wielkość tych zmian zależy od stopnia degradacji elementu, a metoda jest na tyle czuła, że pozwala wykryć pęknięcia o długości od kilku milimetrów w elementach o masie do kilkudziesięciu kilogramów [62].

Charakterystyczną cechą ART jest globalny charakter pomiaru. W odróżnieniu od UT czy MT, które wymagają skanowania powierzchni punkt po punkcie, metoda rezonansowa ocenia stan całego elementu w jednym pomiarze, ponieważ drgania własne propagują się przez całą jego objętość. Konsekwencją jest jednak utrata informacji

o lokalizacji wady. ART odpowiada więc na pytanie czy element jest bez wad, ale nie wskazuje, gdzie konkretnie znajduje się ewentualna nieciągłość. Z tego powodu metoda nadaje się szczególnie do przesiewowej kontroli elementów seryjnych, w której kluczowe znaczenie ma binarna ocena dobry/wadliwy w jak najkrótszym czasie. Pojedyncze badanie trwa kilka sekund i sprowadza się do porównania zarejestrowanej sygnatury akustycznej badanego elementu z wzorcem referencyjnym wyznaczonym dla elementów dobrych [63].

Praktyczna implementacja ART wymaga zdefiniowania wzorca referencyjnego oraz kryteriów akceptacji. Wzorzec wyznacza się statystycznie na podstawie badań populacji elementów o znanym, potwierdzonym innymi metodami statusie (dobry/wadliwy). Kryterium akceptacji może mieć postać prostego okna częstotliwościowego dla wybranych pików, ale współczesna praktyka coraz częściej wykorzystuje algorytmy klasyfikacji uczenia maszynowego, takie jak Random Forest, Support Vector Machines czy sieci neuronowe, które są w stanie wykryć subtelne wzorce różniące elementy wadliwe od dobrych. Skuteczność klasyfikatora wyraża się standardowo wskaźnikami recall, precision i accuracy, przy czym dla zastosowań kontrolnych w przemyśle krytycznym pierwszorzędne znaczenie ma recall dla klasy NOK (czyli wykrywalność elementów wadliwych), gdyż pominięcie wady wiąże się z konsekwencjami bezpieczeństwa.

W kolejnictwie ART znajduje zastosowanie głównie w kontroli jakości produkcji elementów masowych: sworzni, podkładek, łubek, śrub i innych elementów, dla których czas badania na poziomie kilku sekund jest decydującą przewagą nad MT czy UT. Metoda jest również badana jako narzędzie do wczesnego wykrywania pęknięć zmęczeniowych w warunkach laboratoryjnych, w której pełni rolę uzupełniającą wobec emisji akustycznej. Wstępne badania własne autora rozprawy, przedstawione szczegółowo w rozdziale 6.5, potwierdziły skuteczność ART w kontroli jakości sworzni sprzęgów śrubowych w warunkach produkcji seryjnej, osiągając recall NOK na poziomie 100% dla modelu Random Forest. Pełne wyniki walidacji, wraz z analizą porównawczą wobec klasycznych metod NDT zawarto w rozdziale 7.4.

2.4.4. Tomografia komputerowa (CT) i inne zaawansowane techniki

Tomografia komputerowa rentgenowska (CT) jest najbardziej zaawansowaną techniką nieniszczącej oceny stanu wewnętrznego elementów konstrukcyjnych. Wykorzystuje zjawisko różnej absorpcji promieniowania rentgenowskiego przez materiały o różnej gęstości lub składzie chemicznym. Badany element obraca się w wiązce promieniowania, a detektor rejestruje serię projekcji obrazów rentgenowskich uzyskanych pod różnymi kątami. Algorytmy rekonstrukcji tomograficznej (najczęściej algorytm filtrowanej projekcji wstecznej lub iteracyjne metody algebraiczne) pozwalają na podstawie tych projekcji odtworzyć trójwymiarowy rozkład gęstości materiału w objętości elementu. Rozdzielczość przestrzenna nowoczesnych systemów CT dla metali wynosi typowo od 5 do 50 µm, a w specjalistycznych aparatach laboratoryjnych (mikro-CT i nano-CT) sięga nawet pojedynczych mikrometrów [64].

Z perspektywy badań wytrzymałościowych elementów taboru kolejowego CT pozwala precyzyjnie zlokalizować i zmierzyć wady objętościowe, takie jak: mikropęknięcia zmęczeniowe wewnątrz materiału, porowatości pochodzące z procesu odlewania lub kucia, wtrącenia niemetaliczne, niejednorodności struktury krystalicznej. Li i współpracownicy zastosowali tomografię CT do modelowania pęknięć typu rolling contact fatigue w szynach, demonstrując możliwość ilościowej oceny geometrii pęknięcia bez konieczności destrukcyjnego cięcia próbki [65]. Withers wykazał z kolei, że nano-tomografia rentgenowska umożliwia obserwację procesów inicjacji pęknięcia na poziomie ziarna krystalicznego, co otwiera nowe perspektywy dla badań mechanizmów uszkodzeń materiałowych [64].

Zasadnicze ograniczenia CT wynikają z trzech czynników:

- pierwszy to wysoki koszt badania, w typowym laboratorium przemysłowym kilkukrotnie wyższy niż dla klasycznych metod NDT,
- drugi to ograniczenia gabarytowe próbki, gdyż w komercyjnych systemach CT średnica badanego elementu nie przekracza zwykle 300–500 mm, a maksymalna gęstość materiału jest limitowana mocą lampy rentgenowskiej,
- trzeci to czas pojedynczego badania, wynoszący od kilkudziesięciu minut do kilku godzin w zależności od wymaganej rozdzielczości.

Z tych powodów CT stosuje się selektywnie, przede wszystkim jako narzędzie weryfikacyjne po zakończeniu testów zmęczeniowych dla wybranych egzemplarzy, lub w pracach badawczych skupionych na wyjaśnieniu mechanizmów degradacji.

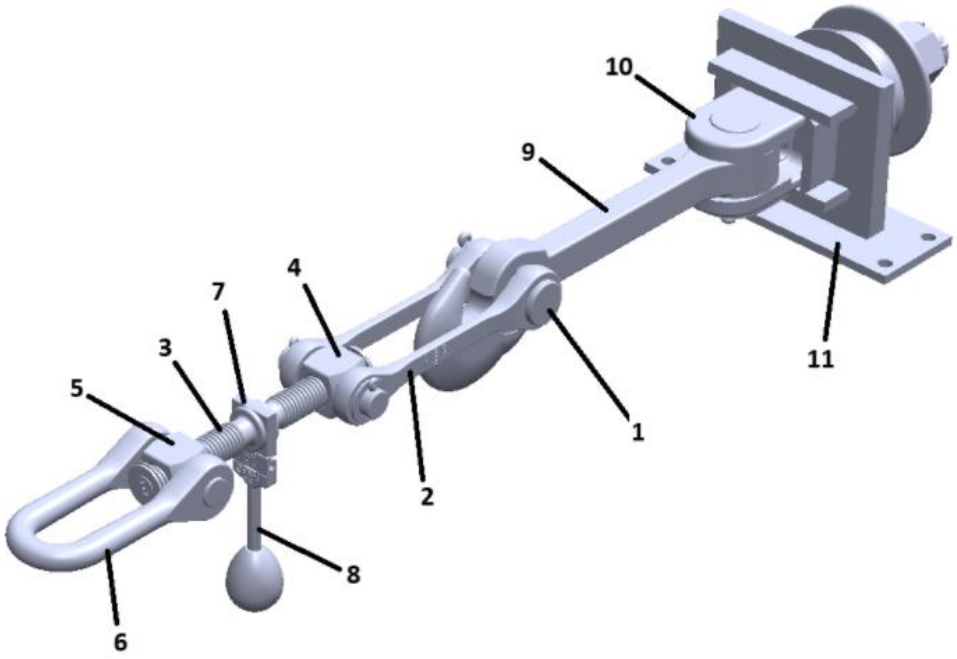
Obok CT wśród zaawansowanych technik diagnostycznych stosowanych w kolejnictwie coraz większą rolę odgrywa termografia w podczerwieni (IRT). Metoda ta wykorzystuje pomiar rozkładu temperatury powierzchniowej elementu, rejestrowany kamerą termowizyjną pracującą w paśmie 3–14 μm. W zastosowaniach diagnostycznych IRT pozwala wykrywać obszary wzmożonego tarcia w węzłach kinematycznych, identyfikować wady w spoinach na podstawie różnic odprowadzania ciepła oraz monitorować proces zmęczenia w czasie rzeczywistym, gdyż dyssypacja energii w strefie aktywnego pęknięcia powoduje lokalny wzrost temperatury [66]. W kolejnictwie IRT znajduje zastosowanie przede wszystkim w kontroli łożysk osi zestawów kołowych, hamulców tarczowych oraz węzłów cierno-szczotkowych przetworników trakcyjnych.

Inną, dynamicznie rozwijającą się techniką jest barkhausenowska analiza szumu magnetycznego (MBN), polegająca na pomiarze indukowanego sygnału elektromagnetycznego towarzyszącego zmianom domen magnetycznych w materiale ferromagnetycznym poddanym zmiennemu polu magnetycznemu. MBN dostarcza informacji o naprężeniach resztkowych, twardości oraz mikrostrukturze materiału, a w kontekście kolejowym jest badana jako narzędzie wczesnego wykrywania degradacji szyn i osi zestawów kołowych [66]. Dla nowoczesnych laboratoriów badawczych charakterystyczne staje się więc tworzenie zintegrowanych zestawów aparaturowych, łączących klasyczne NDT z metodami zaawansowanymi (AE, ART, CT, IRT, MBN), tak aby uzyskać jak najpełniejszy obraz stanu technicznego badanego elementu. Koncepcja takiego zintegrowanego laboratorium, dostosowanego do potrzeb badań wytrzymałościowych elementów wagonów towarowych, została przedstawiona w rozdziale 4.

3. OPIS OBIEKTU BADAŃ

3.1. Budowa i parametry techniczne systemu sprzęgu śrubowego

Przedmiotem badań jest system sprzęgu śrubowego (rys. 3.1) stosowany do łączenia wagonów towarowych, spełniający wymagania normy PN-EN 15566:2023-01 dla kategorii 1 MN. Sprzęg śrubowy tej kategorii stosowany jest również w niektórych wagonach pasażerskich starszej generacji, jednak zakres niniejszej rozprawy ograniczono do zastosowań w taborze towarowym zgodnie z deklarowanym w rozdziale 1.2 obszarem badań. Jest to znormalizowany zespół mechaniczny stosowany powszechnie we wszystkich wagonach towarowych kolei europejskich zrzeszonych w UIC [1, 14].



Rys. 3.1. Rzut izometryczny głównych elementów systemu sprzęgu śrubowego [opracowanie własne]

Kompletny system sprzęgu śrubowego składa się z trzech głównych podzespołów: sprzęgu śrubowego właściwego, mechanizmu łączącego o regulowanej długości, haka cięgłowego, przenoszącego siłę między urządzeniem cięgłowym a sprzęgiem, oraz urządzenia cięgłowego, czyli układu mechanicznego z elementem amortyzującym, mocowanego do ostoi wagonu [9].

Sprzęg śrubowy jako podsystem składowy systemy sprzęgu śrubowego zawiera następujące elementy (numeracja zgodna z rys. 3.1):

1. **Sworzeń haka cięgłowego** (rys. 3.1), łączy hak cięgłowy z cięgłem widłowym, przenosząc obciążenia rozciągające w osi pojazdu poprzez ścinanie podwójne; stal 42CrMo4 TQ+T lub 41Cr4 TQ+T; masa ok. 3,5 kg. Typowymi mechanizmami uszkodzeń są ścinanie przy przeciążeniu udarowym oraz pęknięcia zmęczeniowe inicjowane na powierzchni walcowej w strefie maksymalnego momentu gnącego [15, 16].
2. **Łubki sprzęgu** (rys. 3.1), para elementów przenoszących siłę z pałąka na cięgło widłowe i jednocześnie centrujących układ w osi sprzęgu; stal 41Cr4 TQ+T lub 42CrMo4 TQ+T; masa ok. 4,5 kg/szt. Najczęściej obserwowanym uszkodzeniem jest pęknięcie zmęczeniowe inicjowane przy otworze sworznia, powstające wskutek koncentracji naprężeń.
3. **Śruba sprzęgu** (rys. 3.1), element nastawny o gwincie obustronnym (lewym i prawym), umożliwiający regulację długości sprzęgu i napięcie połączenia między wagonami; stal 41Cr4 TQ+T lub 42CrMo4 TQ+T; masa ok. 6,4 kg. Dominującym mechanizmem uszkodzeń jest zmęczenie gwintu w pierwszych zwojach współpracujących z nakrętką oraz korozja cierna powierzchni gwintu.
4. **Nakrętka z gwintem prawym (czop obrotowy)** (rys. 3.1), przenosi siłę osiową ze śruby na pałąk i jednocześnie umożliwia obrót układu śruby względem pałąka; stal 41Cr4 TQ+T lub 42CrMo4 TQ+T; masa ok. 3,55 kg. Typowe uszkodzenia to zużycie ścierne powierzchni współpracy z pałąkiem oraz pęknięcia w strefie gwintu pierwszych zwojów obciążonych.
5. **Nakrętka z gwintem lewym (czop obrotowy)** (rys. 3.1), analogiczna do nakrętki z gwintem prawym, lecz z gwintem o przeciwnym skręcie, co umożliwia jednoczesne dokręcanie obu nakrętek przy obracaniu rękojeści; stal 41Cr4 TQ+T lub 42CrMo4 TQ+T; masa ok. 3,3 kg. Mechanizmy uszkodzeń analogiczne jak dla nakrętki prawej.
6. **Pałąk** (rys. 3.1), kluczowy element przenoszący siły rozciągające od nakrętek do haka cięgłowego; pracuje w warunkach rozciągania osiowego o najwyższych wartościach

   w całym podsystemie; stal 50MnSi4, P55 lub P55G; masa ok. 3,3 kg. Najpoważniejszym mechanizmem uszkodzeń są pęknięcia zmęczeniowe inicjowane

w narożach przejścia między częścią rozwidloną a trzonem, gdzie występuje koncentracja naprężeń.

7. **Głowica rękojeści** (rys. 3.1), element łączący rękojeść ze śrubą sprzęgu, przenoszący moment obrotowy przy regulacji długości sprzęgu; stal 1Cr35; masa ok. 0,85 kg. Typowe uszkodzenia to zużycie powierzchni gniazda osadczego oraz pęknięcia w przejściu między głowicą a trzonem rękojeści.
8. **Rękojeść** (rys. 3.1), element manipulacyjny umożliwiający operatorowi ręczne dokręcanie sprzęgu; stal 1Cr35; masa ok. 3,6 kg. Najczęściej spotykanym uszkodzeniem jest odkształcenie plastyczne (wygięcie) przy nadmiernym momencie dokręcania oraz korozja powierzchniowa wynikająca z ekspozycji na warunki atmosferyczne.
9. **Hak cięgłowy** (rys. 3.1), element kotwiący sprzęg w ostoi wagonu, przenoszący całkowite obciążenie z pałąka na konstrukcję pojazdu; stal P55, P55G lub 50MnSi4; masa ok. 29,5 kg. Krytycznymi mechanizmami uszkodzeń są pęknięcia zmęczeniowe inicjowane w gardzieli haka oraz odkształcenia trwałe powstające po incydentach przeciążeniowych [15].
10. **Cięgło widłowe** (rys. 3.1), element pośredniczący między hakiem cięgłowym a sworzniem, przenoszący obciążenia osiowe i kompensujący niewspółosiowości montażowe; stal 41Cr4 TQ+T lub C45; masa ok. 22 kg. Najczęstsze uszkodzenia to pęknięcia zmęczeniowe w okolicy otworów sworzniowych oraz zużycie ścierne powierzchni współpracy.
11. **Podpora urządzenia cięgłowego** (rys. 3.1), rama mocująca cały układ cięgłowo-zderzny do ostoi wagonu; stal S235JR; masa ok. 42 kg. Najczęściej obserwowanymi uszkodzeniami są pęknięcia zmęczeniowe w spoinach łączących elementy ramy oraz odkształcenia trwałe po incydentach kolizyjnych.

Kategoria 1 MN oznacza, że minimalne obciążenie zrywające urządzenia cięgłowego i sprzęgu wynosi 1000 kN. Łubka jest celowo zaprojektowana jako najsłabszy element systemu wytrzymuje obciążenie do 850 kN, powyżej którego ulega kontrolowanemu zniszczeniu, chroniąc w ten sposób ostoje wagonów przed uszkodzeniem. System projektowany jest z założeniem 30-letniego okresu eksploatacji, co odpowiada ponad 1,5 miliona cykli obciążeń zmęczeniowych [1].

3.2. Wymagania normatywne wg PN-EN 15566 dla sprzęgu śrubowego

Norma PN-EN 15566 definiuje kompleksowe wymagania materiałowe, wymiarowe i wytrzymałościowe dla wszystkich elementów systemu sprzęgu śrubowego. Poniżej zestawiono kluczowe wymagania dla kategorii 1 MN istotne z punktu widzenia opracowanej metodyki badawczej. [1]

3.2.1. Wymagania wytrzymałościowe

Dla kompletnego systemu sprzęgu norma wymaga:

Przeprowadzenie próby statycznej kompletnego sprzęgu śrubowego na stanowisku SB-1600-P-PC zapewniającym:

1. Obciążenie próbne równe połowie minimalnego obciążenia zrywającego (475 kN) przez 60 sekund, bez trwałych odkształceń przekraczających dopuszczalne wartości,
2. Obciążenie przy 95% minimalnego obciążenia zrywającego (807,5 kN) przez 3 minuty, bez zerwania i bez pęknięć, minimalne obciążenie zrywające kompletnego sprzęgu wynosi 1000 kN, przy czym złom następuje w łubce lub śrubie dwustronnej jako celowo najsłabszym elemencie systemu.
3. Próba zmęczeniowa (trwałość: 30 lat): program 2150 bloków, każdy blok zawiera 698 cykli przy $\Delta F = 170$ kN oraz 1 cykl przy $\Delta F = 575$ kN; łącznie ponad 1,5 miliona cykli symulujących 30-letni okres eksploatacji; kryterium zaliczenia: brak pęknięć zmęczeniowych wykrywalnych metodą penetracyjną PT zgodnie z PN-EN ISO 3452-1 oraz brak trwałych odkształceń plastycznych elementów sprzęgu.

3.2.2. Wymagania materiałowe i kontrolne

Norma PN-EN 15566 definiuje minimalny program badań kontrolnych dla partii produkcyjnej, której liczność, wynikającą z ilości elementów wyprodukowanych z jednego wytopu materiału i w jednym cyklu technologicznym, określa producent w dokumentacji technicznej wyrobu, typowo w zakresie od 50 do 200 sztuk dla urządzeń cięgłowych, Dla śruby sprzęgu, pałąków, łubek, sworzni i haka wymagane jest przeprowadzenie następujących badań:

- oględziny i ocena stanu powierzchni: 100% elementów;
- pomiar wymiarów: 10% partii;
- analiza chemiczna: jedna próbka na odlew;
- badania makro i mikrostrukturalne: jedna próbka na odlew;

- próba rozciągania: jedna na partię;
- próba udarności z karbem V (dwie próbki): jedna na partię;
- pomiar twardości metodą Brinella: 100% elementów.

Dla czopów obrotowych (nakrętek z gwintem prawym i lewym) program badań uzupełniony jest o dodatkowe pomiary twardości powierzchni i rdzenia. Minimalna energia udarności w próbie Charpy'ego nie może być niższa niż 35 J, wyznaczana na próbce 10×10×55 mm z karbem V.

3.3. Właściwości materiałowe elementów sprzęgu

W ramach prac badawczo-rozwojowych przedsiębiorstwa, w których autor niniejszej rozprawy uczestniczył jako główny wykonawca, przeprowadzono kompleksowe badania właściwości mechanicznych i strukturalnych elementów systemu sprzęgu śrubowego pobranych z rynku europejskiego. Badania obejmowały:

- statyczną próbę rozciągania zgodnie z PN-EN ISO 6892-1;
- próbę udarności metodą Charpy'ego zgodnie z PN-EN ISO 148-1;
- pomiar twardości metodą Brinella zgodnie z PN-EN ISO 6506-1 [3, 22].

Wyniki tych prac stanowią materiał odniesienia dla badań własnych autora przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy (rozdziały 7–8) na stanowisku laboratoryjnym zaprojektowanym według koncepcji omówionej w rozdziale 4.

3.3.1. Wyniki prób rozciągania i udarności

Uśrednione wyniki badań wytrzymałościowych wszystkich elementów systemu sprzęgu śrubowego zestawiono w tabeli 3.1. Obliczenia przeprowadzono przy poziomie istotności statystycznej $\alpha = 0{,}05$ [3].

Tabela 3.1.

Zestawienie wyników prób rozciągania i udarności elementów systemu sprzęgu śrubowego

Element	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	KV/KU [J]
Hak cięgłowy	422 ± 18	784 ± 8	17,2 ± 1,5	21,8 ± 0,8 (KU)
Cięgło widłowe	370 ± 46	656 ± 17	22,9 ± 3,0	31,0 ± 2,7 (KV)
Śruba sprzęgu	637 ± 6	837 ± 9	17,5 ± 1,9	65,4 ± 2,9 (KV)
Pałąk	1020 ± 5	1111 ± 3	14,4 ± 2,0	88,4 ± 1,8 (KV)
Łubka sprzęgu	—	—	—	107,6 ± 7,1 (KV)
Nakrętka gwintu prawego	—	—	—	55,0 ± 3,4 (KV)
Nakrętka gwintu lewego	—	—	—	89,4 ± 2,3 (KV)
Sworzeń haka	358 ± 18	672 ± 3	20,8 ± 0,3	11,2 ± 1,3 (KV)

Przedstawione w tabeli 3.1 wyniki wykazują wyraźną hierarchię właściwości mechanicznych, odzwierciedlającą funkcję każdego z elementów. Pałąk, jako element przenoszący największe siły wykazuje najwyższą granicę plastyczności ($R_{eH} \approx 1020$ MPa) i wytrzymałość na rozciąganie ($R_m \approx 1111$ MPa), co jest charakterystyczne dla stali hartowanej i odpuszczanej. Hak cięgłowy i cięgło widłowe osiągają niższe parametry wytrzymałościowe ($R_m \approx 650$–784 MPa) przy wysokiej ciągliwości ($A > 17\%$), która zapewnia im odporność na obciążenia udarowe. Szczególną uwagę zwraca wynik sworznia haka: udarność KV = 11,2 J jest krytycznie niska, znacznie poniżej wymagania normy PN-EN 15566 wynoszącego 35, co wskazuje na wadę procesu obróbki cieplnej [1, 3].

3.3.2. Wyniki badań twardości metodą Brinella

Pomiary twardości metodą Brinella (HBW 10/3000) wykonane na wszystkich elementach systemu pozostają w zgodności z wynikami prób rozciągania. Zestawienie wyników pomiarów twardości przedstawiono w tabeli 3.2.

Elementy wysokoobciążone (pałąk, nakrętki czopowe): Wykazują najniższą podatność na odkształcenia i najwyższą twardość (334–359 HB), co wynika ze stanu ulepszonego cieplnie (hartowanie i odpuszczanie), niezbędnego do przenoszenia głównych osiowych sił rozciągających.

Tabela 3.2.

Wyniki pomiarów twardości HB elementów systemu sprzęgu śrubowego

Element	Średnia twardość [HB]	Wymaganie normatywne
Hak cięgłowy	173	wg PN-EN 15566
Cięgło widłowe	176	wg PN-EN 15566
Nakrętka gwintu prawego	334	305–350 HBW
Nakrętka gwintu lewego	345	305–350 HBW
Pałąk	359	305–370 HBW
Sworzeń haka	190	wg PN-EN 15566
Śruba sprzęgu	287	wg PN-EN 15566

3.4. Typowe uszkodzenia i mechanizmy degradacji sprzęgu śrubowego

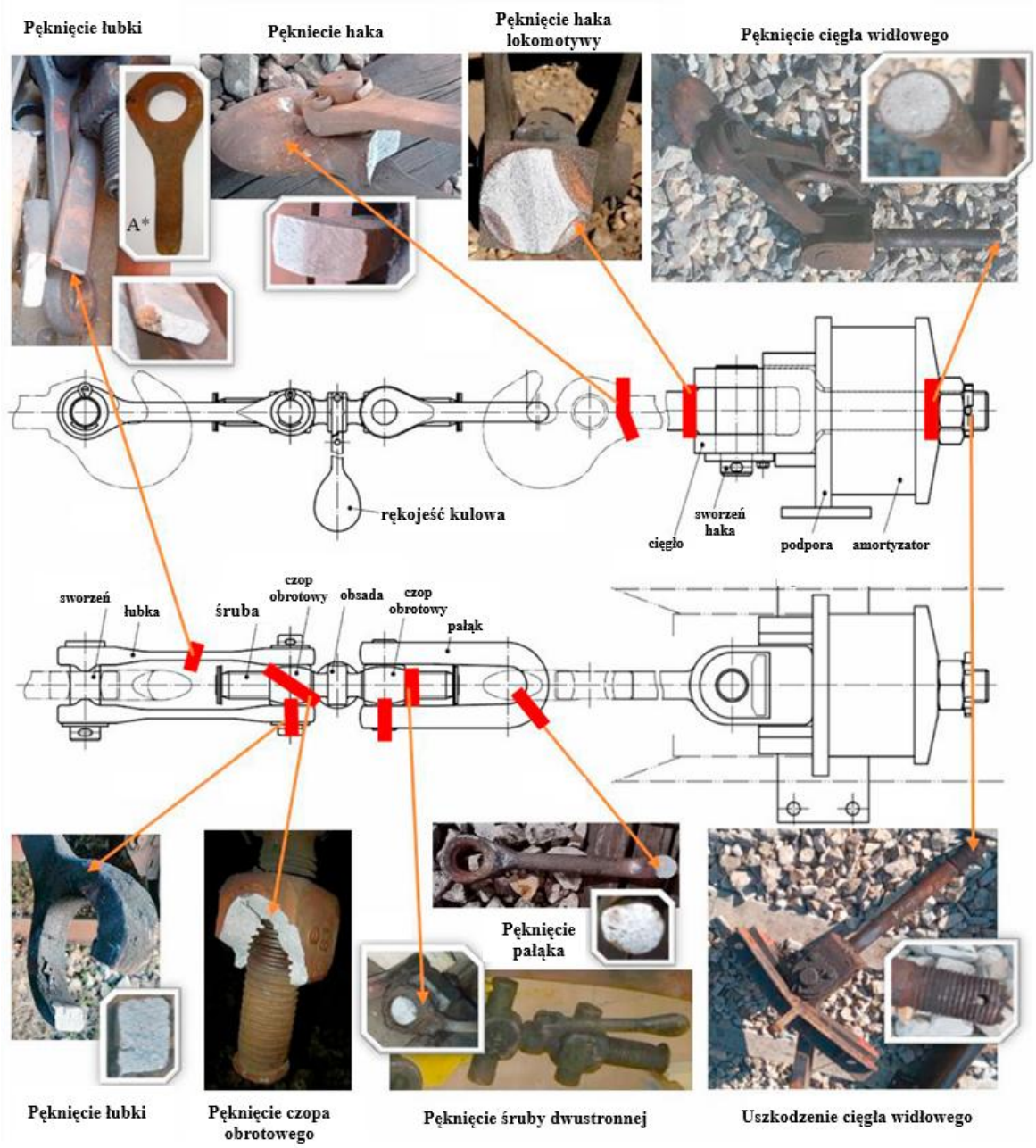
Na podstawie przeglądu literatury, przeprowadzonych badań kontrolnych oraz obserwacji eksploatacyjnych zidentyfikowano cztery główne mechanizmy degradacji elementów systemu sprzęgu śrubowego, część z nich przedstawiono na rys. 3.2 [3, 16, 42]

Pęknięcia zmęczeniowe inicjują się najczęściej w strefach koncentracji naprężeń: u korzenia gwintu śruby i nakrętek, w promieniu krzywizny pałąka oraz w rowkach klinowych sworznia. Propagują prostopadle do kierunku głównych naprężeń rozciągających, co potwierdzają wyniki analiz numerycznych publikowane w literaturze [16, 42]. W skrajnych przypadkach pęknięcia zmęczeniowe prowadzą do zerwania łubki.

Spośród wad materiałowych powstających w procesie wytwarzania szczególnie niebezpieczna jest odwęglona warstwa powierzchniowa, wykryta podczas badań kontrolnych na haku cięgłowym [3]. Warstwa ta, o grubości powyżej 0,3 mm powstaje wskutek nieprawidłowo kontrolowanego procesu obróbki cieplnej i stanowi uprzywilejowane miejsce inicjacji pęknięć zmęczeniowych ze względu na obniżoną twardość i wytrzymałość zmęczeniową. Na przekroju metalograficznym ujawnia się jako jaśniejsze pasmo materiału.

Zużycie tribologiczne dotyczy przede wszystkim sworzni, oczek pałąka i łubek. Praca w warunkach zmiennych obciążeń i drgań prowadzi do lokalnych plastycznych odkształceń powierzchni współpracujących, a te z kolei skutkują stopniowym luzowaniem połączeń i narastaniem obciążeń dynamicznych całego systemu.

Korozja wżerowa występuje intensywnie w strefach styku łubek z hakiem, gdzie kapilarne szczeliny sprzyjają zatrzymywaniu wilgoci. Dotyczy w szczególności elementów eksploatowanych bez zabezpieczenia antykorozyjnego lub z uszkodzoną powłoką ochronną. Powstające ubytki przekroju prowadzą do obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej elementu.



Rys. 3.2. Typowe mechanizmy uszkodzeń systemu sprzęgu śrubowego, udokumentowane przypadki uszkodzeń zaobserwowane na sieciach kolejowych Serbii, Bośni, Macedonii i Chorwacji w latach 2011–2021. Opracowanie własne na podstawie Vukšić Popović, Tanasković, Milković (2024), Fig. 2 [15].

Identyfikacja powyższych mechanizmów degradacji miała bezpośredni wpływ na dobór metod diagnostyki nieniszczącej w opracowanej metodyce badawczej. Do wykrywania pęknięć powierzchniowych zastosowano badania penetracyjne (PT), do wykrywania wad podpowierzchniowych badania ultradźwiękowe (UT), natomiast do przesiewowej oceny integralności strukturalnej metodę rezonansu akustycznego (ART), opisaną szczegółowo w rozdziale 6.

Badanie penetracyjne PT haka cięgłowego (rys. 3.3.) (nr 4-13-09-24-EA.UC10-HC01-O), przeprowadzone w laboratorium przedsiębiorstwa zgodnie z PN-EN 10228-2 przy użyciu systemu penetrantów II C d (fluorescencyjny barwnikowy), potwierdziło integralność powierzchniową elementu przed badaniem dynamicznym.



Rys. 3.3. Widok badania penetracyjnego PT haka cięgłowego, na suwmiarce widać wskazanie liniowe L_2=9mm.

Po przeprowadzeniu badania zmęczeniowego ujawniono wskazanie liniowe o długości L_1= 18 mm i szerokości L_2 = 9 mm (L_c = 27 mm), które zgodnie z normą PN-EN 10228-2 kwalifikuje się do klasy jakości 1. Wynik ten stanowi praktyczną weryfikację zdolności metody PT do wykrywania pęknięć zmęczeniowych w ramach opracowanej metodyki kontrolnej [50, 67].

W niniejszym rozdziale zaprezentowano szczegółowo badania metodą PT jako reprezentatywny przykład zastosowania NDT do wykrywania pęknięć powierzchniowych, zilustrowany wynikiem uzyskanym na haku cięgłowym rzeczywistego sprzęgu (rys. 3.3). Metoda UT stanowi uzupełnienie diagnostyki w zakresie wad podpowierzchniowych i jest realizowana zgodnie z PN-EN ISO 16810 na wyspecjalizowanym stanowisku ultradźwiękowym, natomiast metoda rezonansu akustycznego ART, jako autorskie rozwiązanie wprowadzane w ramach niniejszej rozprawy, została szczegółowo omówiona w rozdziale 6.5 wraz z wynikami walidacji na partii 18 sworzni haka cięgłowego.

4. PROJEKT SPECJALISTYCZNEGO LABORATORIUM BADAWCZEGO

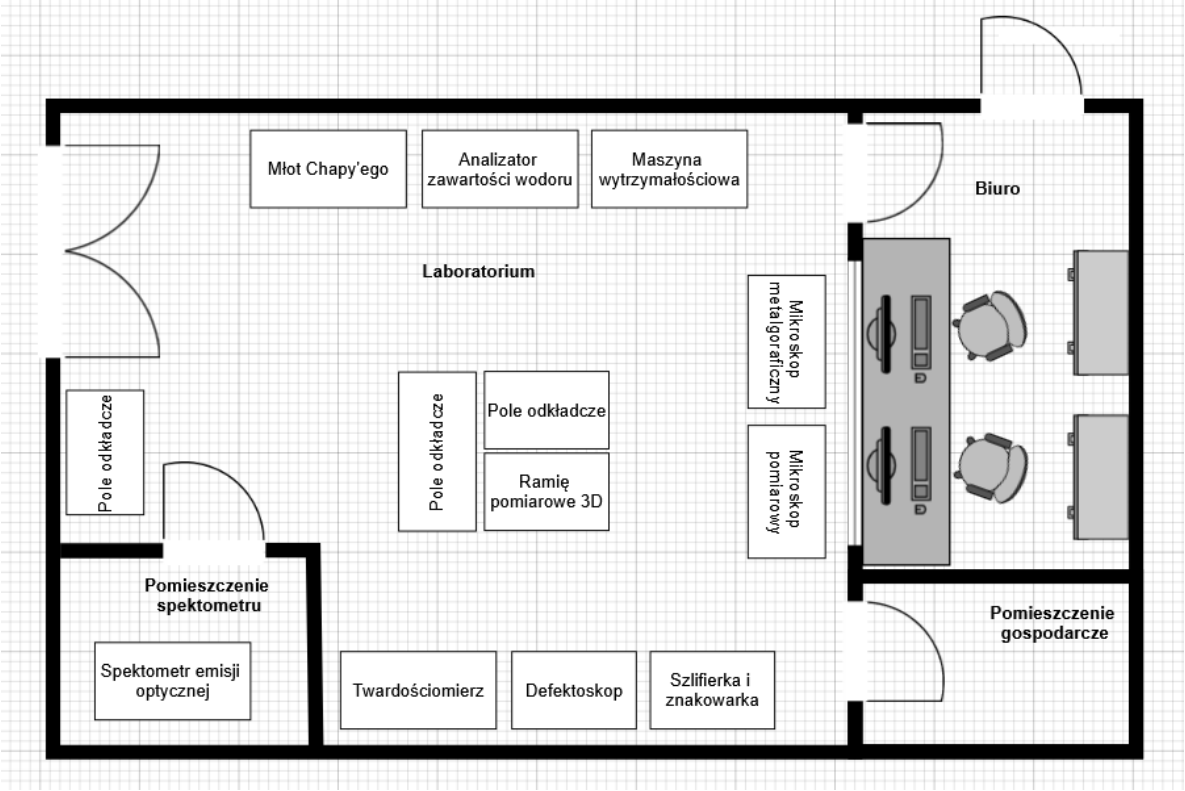
4.1. Wymagania projektowe i koncepcja laboratorium

Koncepcja specjalistycznego laboratorium do badań wytrzymałościowych elementów strukturalnych pojazdów szynowych, ze szczególnym uwzględnieniem prób statycznych i zmęczeniowych sprzęgu śrubowego jako studium przypadku, opracowana w ramach niniejszej rozprawy, wynika bezpośrednio z analizy wymagań normatywnych, zidentyfikowanych luk w infrastrukturze badawczej oraz doświadczeń zgromadzonych podczas projektowania i eksploatacji rzeczywistego laboratorium przemysłowego. Punktem wyjścia były wymagania normy PN-EN 15566:2023-01 dla badań sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN, wymagania akredytacyjne ISO/IEC 17025:2017 oraz wymagania TSI dla wagonów towarowych [1, 6, 43]. Podstawowe założenia projektowe laboratorium sformułowano następująco:

1. Wielofunkcyjność stanowiska: jedno stanowisko serwohydrauliczne powinno umożliwiać realizację zarówno prób statycznych (do 1000 kN), jak i zmęczeniowych (ponad 1,5 mln cykli) na kompletnych systemach sprzęgu lub ich elementach.
2. Integracja metod NDT: stanowisko powinno umożliwiać równoległe stosowanie metod diagnostyki nieniszczącej: emisji akustycznej (AE) i rezonansu akustycznego (ART) podczas trwania badań, bez konieczności przerywania programu obciążeń.
3. Spełnienie wymagań akredytacyjnych: warunki środowiskowe (temperatura 20±2°C, wilgotność 50±10%), izolacja wibroakustyczna i pyłowa, niezależna wentylacja i klimatyzacja, udokumentowany system zarządzania jakością.
4. Bezpieczeństwo operatorów: osłony balistyczne stanowiska w przypadku zerwania próbki, system hydraulicznego zatrzymania awaryjnego (e-stop), strefowanie dostępu podczas prób.
5. Elastyczność konfiguracji: modularna budowa uchwytów i oprzyrządowania umożliwiająca montaż elementów o różnych wymiarach i geometrii bez konieczności wymiany całego stanowiska.
6. Możliwość rozbudowy laboratorium o nowe obszary w zakresie metod badawczych oraz badania innych komponentów wagonów.

4.2. Infrastruktura i układ przestrzenny laboratorium

Laboratorium badawcze stanowi wydzielone pomieszczenie o powierzchni ok. 255 m², zlokalizowane wewnątrz hali produkcyjno-badawczej o łącznej powierzchni 1499,5 m². Pozycja laboratorium pomiędzy magazynem półwyrobów a obszarem produkcyjnym zapewnia optymalny przepływ materiałów: przyjęte próbki trafiają bezpośrednio do laboratorium, gdzie po zbadaniu są przekazywane do produkcji lub do magazynu tymczasowego. Na rys. 4.1 przedstawiono Layout laboratorium

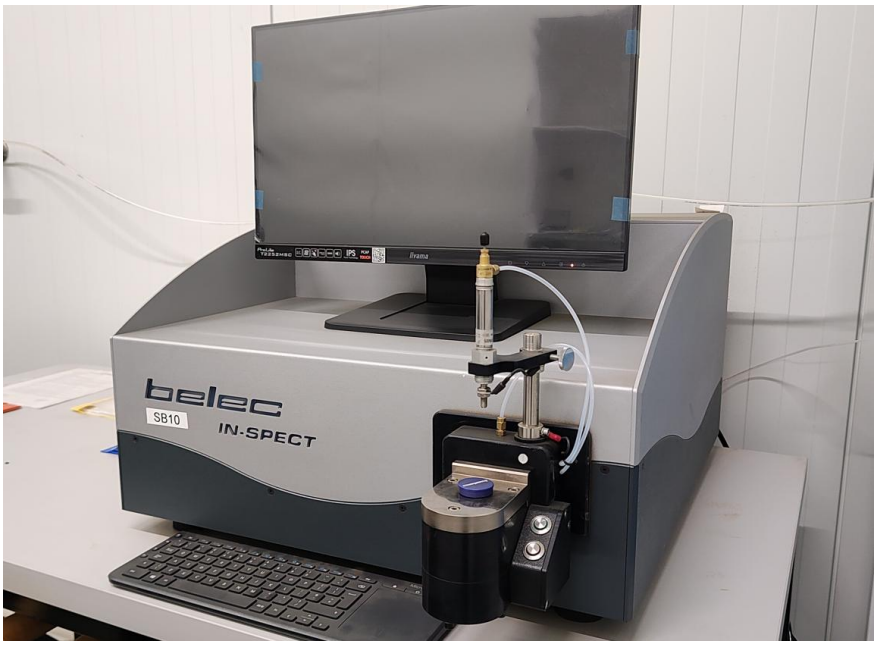


Rys. 4.1. Layout laboratorium badawczego przedsiębiorstwa [opracowanie własne]

Pomieszczenie laboratoryjne jest odizolowane pod względem wibroakustycznym i pyłowym od pozostałej części hali produkcyjnej, co eliminuje zakłócenia pomiarowe generowane przez maszyny produkcyjne (prasa, szlifierki, spawarki). Laboratorium wyposażone jest w niezależny system wentylacji i klimatyzacji, umożliwiający utrzymanie wymaganych warunków środowiskowych: temperatury 20±2°C i wilgotności względnej 50±10% RH, monitorowanych termohigrometrem z rejestracją ciągłą.

Spektrometr emisji optycznej (rys.4.2), ze względu na wysoką czułość pomiarową i wrażliwość na warunki otoczenia, umieszczony jest w osobnym, klimatyzowanym pomieszczeniu z niezależną kontrolą temperatury. Suwnica o udźwigu 5 ton zapewnia

bezpieczny transport elementów o dużej masie (hak cięgłowy ~30 kg, cięgło widłowe ~22 kg, kompletne stanowisko próby zmęczeniowej z zamocowanym sprzęgiem).



Rys. 4.2. Spektrometr emisji optycznej Belec IN-SPECT (oznaczenie ewidencyjne SB10) zainstalowany w wydzielonym, klimatyzowanym pomieszczeniu laboratorium, stanowisko do analizy składu chemicznego stali zgodnie z PN-EN ISO 14284. [Opracowanie własne]

Stanowiska badawcze są rozmieszczone niezależnie, co umożliwia równoległe prowadzenie różnych badań bez wzajemnych zakłóceń. Każde stanowisko posiada własne oświetlenie robocze spełniające wymagania normatywne (min. 500 lux w strefie oceny wskazań NDT, min. 350 lux w strefie oczyszczania przy badaniach PT) [50].

4.3. Stanowisko statyczne i zmęczeniowe

Kluczowym elementem laboratorium jest stanowisko badań wytrzymałościowych (rys. 4.3.), modułowy układ serwohydrauliczny umożliwiający realizację zarówno prób statycznych, jak i programów zmęczeniowych na kompletnych sprzęgach śrubowych kategorii 1 MN. Wymagania parametryczne stanowiska wynikają wprost z normy PN-EN 15566:2023-01 [1], podstawowe parametry stanowiska:

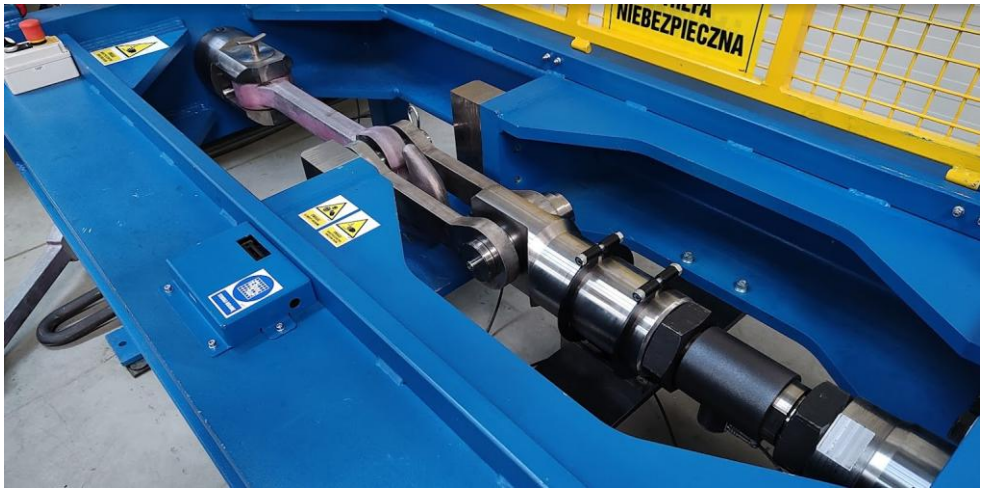
1. Maksymalna siła statyczna: ≥ 1000 kN (z rezerwą do 1100 kN dla uwzględnienia układów bezpieczeństwa).
2. Zakres sił zmęczeniowych: od 10 kN do 575 kN (pełne spektrum programu zmęczeniowego EN 15566).

3. Dokładność zadawania siły: klasa 0,5% zgodnie z GUM i ISO/IEC 17025, weryfikowana kalibracją co 12 miesięcy.
4. Częstotliwość cyklowania: 0,5–5 Hz (dobierana w zależności od bloku programu zmęczeniowego)
5. Skok tłoka siłownika: ≥ 250 mm (dla uwzględnienia wydłużenia sprzęgu przy pełnym obciążeniu)
6. System akwizycji danych: min. 16-kanałowy, częstotliwość próbkowania ≥ 1 kHz dla pomiaru siły i odkształcenia



Rys. 4.3. Stanowisko serwohydrauliczne SB-1600-P-PC (nr ewidencyjny ŚT/0025)- widok ogólny zewnętrzny. Widoczne: rama nośna z osłoną ochronną (siatka), agregat hydrauliczny z akumulatorami ciśnieniowymi azotu, pulpit sterowniczy oraz szafa sterowania. [opracowanie własne]

W laboratorium przemysłowym stanowiącym bazę praktyczną niniejszej rozprawy zainstalowane jest stanowisko SB-1600-P-PC do badań urządzeń cięgłowych (rys. 4.4) z komputerowym systemem informatycznym, umożliwiające próbę rozciągania kompletnego sprzęgu. Stanowisko to posłużyło do przeprowadzenia badań walidacyjnych opisanych w Rozdziałach 6 i 7. Projektowane docelowe stanowisko serwohydrauliczne rozszerza możliwości tego urządzenia o pełen program zmęczeniowy wymagany przez normę PN-EN 15566 [1].



Rys. 4.4. Stanowisko SB-1600-P-PC z hakiem cięgłowym zamontowanym w uchwycie mocującym, przygotowanym do próby statycznej. Widoczne: siłownik hydrauliczny, układ mocowania próbki, wyłącznik awaryjny oraz osłona strefy niebezpiecznej zgodnie z PN-EN ISO 13850. [Opracowanie własne]

4.4. Aparatura pomiarowa i wyposażenie laboratorium

Kompleksowe wyposażenie laboratorium zapewnia realizację pełnego programu badań wymaganego przez normę PN-EN 15566 bez konieczności zlecania jakichkolwiek badań na zewnątrz. Zestawienie aparatury badawczo-pomiarowej przedstawia tabela 4.1.

Laboratorium dysponuje kompletnym zestawem aparatury pomiarowej i przygotowawczej, umożliwiającym realizację pełnego programu badań materiałowych i wytrzymałościowych zgodnie z wymaganiami PN-EN 15566:2023-01. Zestawienie podstawowych urządzeń badawczych obejmuje stanowiska do pomiaru twardości (rys. 4.5), prób rozciągania (rys. 4.6), badań udarności (rys. 4.7), przygotowania powierzchni próbek metalograficznych (rys. 4.8 i rys. 4.10), pomiarów wymiarowych (rys. 4.9) oraz analizy mikrostrukturalnej (rys. 4.11 i rys. 4.12). Wszystkie wymienione urządzenia objęte są harmonogramem wzorcowań i konserwacji zgodnym z wymaganiami systemu zarządzania jakością opisanego w rozdziale 5.

Tabela 4.1.

Zestawienie aparatury badawczo-pomiarowej laboratorium

Urządzenie	**Model / typ**	**Zastosowanie w programie badań**	**Norma badania**
Mikroskop metalograficzny	Olympus BX53M TRF BD	Badania makro i mikrostrukturalne, wtrącenia niemetaliczne	ISO 4967
Mikroskop pomiarowy	TM-505	Pomiary wymiarowe elementów	PN-EN 15566
Długościomierz uniwersalny	JD25C	Pomiary liniowe odkuwek i wyrobów gotowych	PN-EN 15566
Młot Charpy'ego	HIT 450P (450 J)	Próba udarności z karbem V i U	PN-EN ISO 148-1
Maszyna wytrzymałościowa	HT-2402 (250 kN)	Statyczna próba rozciągania próbek wg EN ISO 6892-1	PN-EN ISO 6892-1
Twardościomierz	DuraVision 30 G5 / ZHB 3000	Pomiar twardości HBW 10/3000 (100% partii)	PN-EN ISO 6506-1
Spektrometr emisji optycznej	Nr ser. 220401	Analiza składu chemicznego metodą OES (1 na odlew)	PBE-04 / EN 15566
Defektoskop UT	Przenośny, z głowicą impulsową	Badania ultradźwiękowe -wady podpowierzchniowe haka i cięgła	PN-EN ISO 10228-3
Analizator zawartości wodoru	—	Kontrola zawartości wodoru w odkuwkach (ryzyko pęknięć wodorowych)	EN ISO 3690
Ramię pomiarowe 3D	Kreon Ace 7-25	Skanowanie laserowe 3D -wymiary odkuwek i wyrobów gotowych	PN-EN 15566
Stanowisko SB-1600-P-PC	Z komputerowym systemem informatycznym	Badania wytrzymałościowe kompletnych urządzeń cięgłowych i sprzęgów	PN-EN 15566



Rys. 4.5. Twardościomierz DuraVision 30 G5, stanowisko do pomiaru twardości metodą Brinella HBW 10/3000 zgodnie z PN-EN ISO 6506-1. [Opracowanie własne]



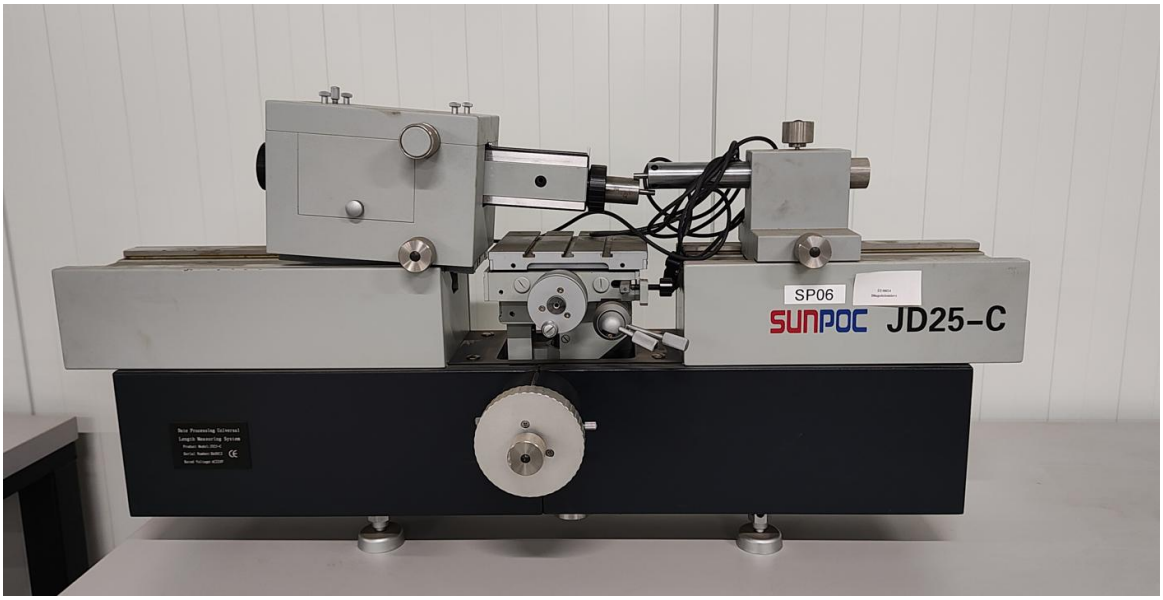
Rys. 4.6. Maszyna wytrzymałościowa Zwick/Roell HIT 450: stanowisko do statycznej próby rozciągania zgodnie z PN-EN ISO 6892-1. [Opracowanie własne]



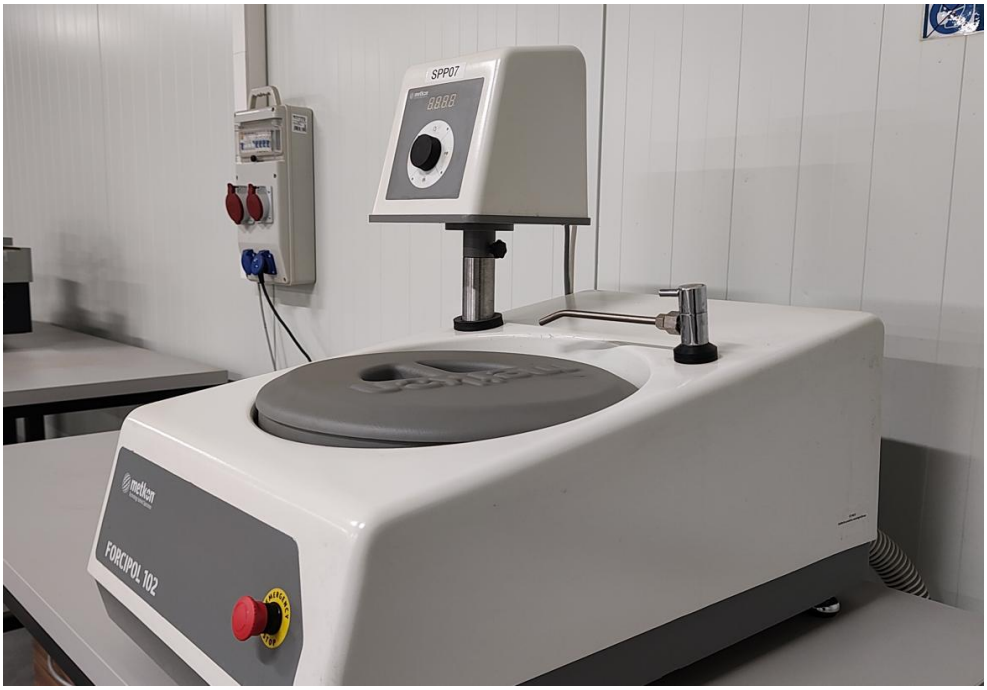
Rys. 4.7. Młot udarnościowy HT2402: stanowisko do próby udarności metodą Charpy'ego zgodnie z PN-EN ISO 148-1. [Opracowanie własne]



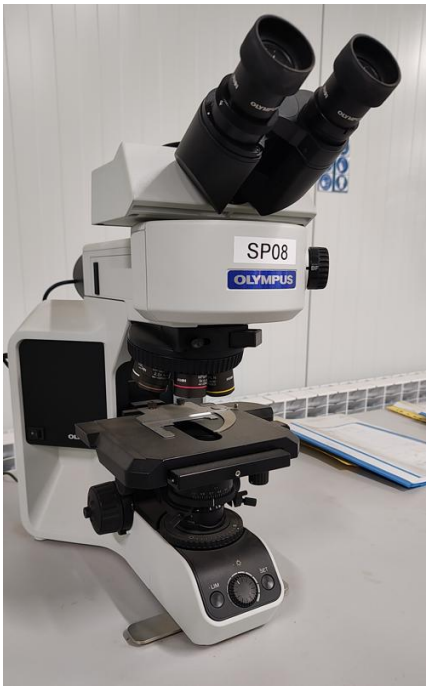
Rys. 4.8. Szlifierka stołowa Metkon Spectral 250, zaprojektowana do przygotowywania próbek metalu do analizy spektroskopowej. [Opracowanie własne]



Rys. 4.9. Długościomierz uniwersalny: stanowisko do precyzyjnych pomiarów wymiarowych elementów sprzęgu zgodnie z PN-EN ISO 14253-1. [Opracowanie własne]



Rys. 4.10. Szlifierka do przygotowywania próbek metalograficznych: stanowisko do obróbki powierzchni próbek przed badaniami strukturalnymi i pomiarami twardości. [Opracowanie własne]



Rys. 4.11. Mikroskop badawczy model Olympus BX53 [Opracowanie własne]



Rys. 4.12. Mikroskop pomiarowy marki Sunpoc TM-505 [Opracowanie własne]

4.5. Systemy bezpieczeństwa i zarządzania ryzykiem

Bezpieczeństwo operatorów podczas prób wytrzymałościowych, zwłaszcza przy obciążeniach zbliżonych do 1000 kN wymaga wielopoziomowych zabezpieczeń. W projekcie laboratorium przewidziano następujące systemy:

1. Osłony balistyczne stanowiska: obudowa stanowiska serwohydraulicznego wykonana z blachy stalowej o grubości 10 mm, z wstawkami ze szkła bezpiecznego umożliwiającymi obserwację próbki. Obudowę zaprojektowano na energię fragmentów powstających przy nagłym zerwaniu próbki o przekroju 200 mm² i naprężeniu 1200 MPa.
2. Hydrauliczny wyłącznik awaryjny (e-stop): przycisk zatrzymania awaryjnego zwalnia ciśnienie w układzie w czasie poniżej 0,5 s i jest dostępny zarówno przy stanowisku, jak i na zdalnym panelu operatora. Operator prowadzi obserwację i sterowanie z odległości co najmniej 3 m od osi próbki.
3. Monitoring obciążenia w czasie rzeczywistym: system akwizycji danych rejestruje siłę z częstotliwością 1 kHz i automatycznie zatrzymuje próbę po przekroczeniu zaprogramowanego limitu siły lub odkształcenia. Zdarzenia alarmowe są archiwizowane w bazie danych systemu zarządzania jakością.

4. Procedura dopuszczenia do stanowiska: każdy operator dysponuje aktualną autoryzacją stanowiskową, odnawianą corocznie. Przy próbach powyżej 500 kN wymagana jest obecność dwóch operatorów. Dokumentacja ryzyka, zawarta w systemie zarządzania jakością, opisuje scenariusze zdarzeń niebezpiecznych wraz ze środkami zapobiegawczymi.

Całość rozwiązań w zakresie bezpieczeństwa stanowiska została zaprojektowana na podstawie analizy ryzyka przeprowadzonej zgodnie z normą PN-EN ISO 12100 (Bezpieczeństwo maszyn, ogólne zasady projektowania, ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka). W analizie zidentyfikowano kluczowe zagrożenia związane z eksploatacją stanowiska serwohydraulicznego o obciążeniach sięgających 1500 kN: gwałtowne uwolnienie energii sprężystej w przypadku zerwania elementu badanego, wyrzut fragmentów uszkodzonego elementu poza obszar roboczy, przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia w układzie hydraulicznym oraz dostęp operatora do strefy roboczej podczas próby. Dla każdego zagrożenia oszacowano poziom ryzyka oraz zastosowano środki redukujące zgodnie z hierarchią ochrony: rozwiązania konstrukcyjne, środki techniczne oraz środki organizacyjne. Wdrożone osłony balistyczne, system zatrzymania awaryjnego, monitoring obciążenia w czasie rzeczywistym oraz procedury dopuszczenia operatorów stanowią odpowiedź na zidentyfikowane ryzyka, sprowadzając je do poziomu akceptowalnego zgodnie z wymaganiami dyrektywy maszynowej 2006/42/WE.

4.6. Kierunki rozwoju laboratorium i potencjał rozszerzenia zakresu badawczego

Laboratorium opisane w niniejszej rozprawie wdrożone zostało w ramach konkretnej procedury oceny zgodności: modułu SH1 dla systemu sprzęgu śrubowego 1 MN. Centralnym elementem infrastruktury laboratoryjnej jest stanowisko serwohydrauliczne SB-1600-P-PC, zaprojektowane i wdrożone z myślą o badaniach urządzeń cięgłowo-zderznych klasy 1 MN zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 15566:2023-01. Decyzja o tak ukierunkowanym profilu wdrożenia była podyktowana zarówno specyfiką postępowania notyfikacyjnego prowadzonego przez Transportowy Dozór Techniczny, jak i przewidywalną skalą zapotrzebowania na badania kompletnych sprzęgów śrubowych 1 MN w ramach planowanej produkcji. Stanowisko spełnia obecnie wymagania metodyczne tej grupy wyrobów,

zarówno w zakresie sił obciążenia (do 1600 kN), jak i schematu kinematycznego mocowania kompletnych zespołów cięgłowo-zderznych zgodnie z załącznikiem A normy.

Naturalnym kierunkiem dalszego rozwoju laboratorium jest jednak rozszerzenie jego zakresu badawczego o inne grupy komponentów taboru kolejowego. Niniejszy rozdział przedstawia propozycje takiego rozszerzenia, wynikające z analizy: (1) charakterystyki technicznej istniejącej infrastruktury i kierunków jej rozbudowy, (2) wymagań normatywnych dla wybranych grup wyrobów objętych TSI WAG oraz TSI LOC&PAS, (3) zapotrzebowania rynkowego i regulacyjnego na badania certyfikacyjne taboru kolejowego w Polsce. Plan rozwoju laboratorium stanowi istotny element strategii wdrożeniowej niniejszej rozprawy doktorskiej, ponieważ pokazuje, że metodyka opracowana dla sprzęgu śrubowego 1 MN ma walor uogólnienia i może stanowić punkt wyjścia do unifikacji procedur badawczych dla szerszego spektrum elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych.

Należy podkreślić, że obecna konstrukcja stanowiska SB-1600-P-PC została zoptymalizowana pod kątem konkretnego zakresu badań. Rama nośna, układ mocowania próbek, system pomiarowy oraz oprogramowanie sterujące zostały dobrane do wymagań programu zmęczeniowego sprzęgów śrubowych 1 MN (1 500 000 cykli małych w zakresie 10–180 kN oraz 2 150 cykli dużych w zakresie 10–575 kN, zgodnie z PN-EN 15566:2023-01 Załącznik A). Rozszerzenie zakresu badawczego o inne grupy komponentów nie jest zatem prostą zmianą programu sterowania, lecz wymaga zaprojektowania i wykonania dedykowanych adapterów, mocowań oraz w niektórych przypadkach, modyfikacji układu pomiarowego. Wymaga również opracowania nowej dokumentacji metodycznej i procedur jakościowych, oraz w przypadku badań na potrzeby procedur dopuszczeniowych, czyli uzyskania kolejnych pośrednich potwierdzeń weryfikacji od jednostki notyfikowanej dla każdej nowej grupy wyrobów.

Mimo tych ograniczeń, posiadana infrastruktura stwarza realne podstawy do rozszerzenia działalności w trzech kierunkach:

- na inne komponenty układu cięgłowo-zderznego (zderzaki, urządzenia cięgłowe innych klas, sprzęgi automatyczne),
- na komponenty zawieszenia i ostoi wagonów towarowych w zakresie testów statycznych,
- na badania prototypowe nowych konstrukcji w ramach prac rozwojowych.

Transferowalność opracowanej metodyki na inne grupy komponentów taboru kolejowego stanowi jeden z kluczowych rezultatów niniejszej rozprawy i bezpośrednio potwierdza hipotezę H2. Zaprojektowane laboratorium, choć zwalidowane na obiekcie sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN, nie jest rozwiązaniem dedykowanym wyłącznie jednemu wyrobowi, lecz stanowi uniwersalną platformę badawczą o znacznym potencjale rozszerzenia. Poniżej przedstawiono trzy konkretne, technicznie i regulacyjnie uzasadnione kierunki rozwoju, uszeregowane według horyzontu czasowego oraz stopnia wykorzystania istniejącej infrastruktury. Dla każdego kierunku wskazano wymagania metodyczne, zakres niezbędnych adaptacji stanowiska oraz konsekwencje regulacyjne w ramach procedur oceny zgodności.

Kierunek pierwszy: pozostałe komponenty układu cięgłowo-zderznego. Najbardziej naturalnym rozszerzeniem zakresu jest objęcie badaniami zderzaków zgodnie z PN-EN 15551, urządzeń cięgłowych innych klas siłowych (np. 1,2 MN, 1,5 MN zgodnie z wariantami PN-EN 15566) oraz elementów współpracujących, takich jak adaptery, prowadnice i elementy mocujące. Wymagania metodyczne tych badań są zbliżone do badań sprzęgu śrubowego 1 MN obejmują próby statyczne, zmęczeniowe oraz badania nieniszczące, różnice dotyczą głównie zakresów sił (zderzaki: typowo 200–1500 kN siły ściskającej, zależnie od typu) oraz geometrii mocowania. Wykorzystanie istniejącego stanowiska SB-1600-P-PC w tym kierunku wymagałoby zaprojektowania dedykowanych adapterów mocujących oraz, w przypadku zderzaków, rozszerzenia oprogramowania sterującego o programy obciążeń ściskających. Z perspektywy oceny zgodności, każda nowa grupa wyrobów wymagałaby osobnego pośredniego potwierdzenia weryfikacji projektu i podsystemu w ramach procedury SH1, jednak istniejące zatwierdzenie systemu zarządzania jakością stanowiłoby istotny atut redukujący zakres i czas postępowania notyfikacyjnego.

Kierunek drugi: komponenty zawieszenia i ostoi wagonów towarowych. Drugim kierunkiem rozwoju są badania komponentów zawieszenia drugiego stopnia oraz wybranych elementów ostoi wagonów, w zakresie prób statycznych i wytrzymałości doraźnej. Należą tu między innymi: sprężyny pierścieniowe i pakiety sprężynowe wózków towarowych (badania charakterystyki sztywności i wytrzymałości), elementy gumowo-metalowe (testy statyczne wg ISO 21940), łączniki amortyzacji urządzeń cięgłowych. Tego typu badania wymagają sił rzędu 50–500 kN i mieszczą się w zakresie roboczym stanowiska SB-1600-P-PC, jednak wymagają dedykowanego oprzyrządowania- w szczególności adapterów do mocowania elementów o znacząco różnej geometrii niż sprzęgi śrubowe. Z perspektywy regulacyjnej część tych badań

nie wymaga procedur notyfikacji (np. badania prototypowe dla potrzeb własnych producenta wagonów), co czyni je atrakcyjnym kierunkiem rozwoju usług dla podmiotów zewnętrznych po uzyskaniu akredytacji PN-EN ISO/IEC 17025.

Kierunek trzeci: badania rozwojowe sprzęgów automatycznych (DAC). Trzeci kierunek rozwoju ma charakter perspektywiczny i wiąże się z toczącą się obecnie w Europie transformacją układu cięgłowo-zderznego taboru towarowego w kierunku Digital Automatic Coupling (DAC) w ramach programu European DAC Delivery Programme (EDDP). Wdrożenie DAC w skali europejskiej, planowane na lata 2030–2035, generuje zapotrzebowanie na badania kwalifikacyjne nowych konstrukcji sprzęgów oraz na badania kompatybilnościowe układów hybrydowych. Choć obecne stanowisko SB-1600-P-PC zostało zaprojektowane pod sprzęg śrubowy i nie jest bezpośrednio przystosowane do badań DAC, znajomość metodyki badawczej, zatwierdzony system zarządzania jakością oraz doświadczenie zespołu badawczego stanowią solidną podstawę do rozszerzenia działalności o ten kierunek w okresie 5–10 lat. Wymagałoby to inwestycji w nowe stanowisko badawcze dedykowane sprzęgom DAC, jednak know-how proceduralne i regulacyjne nabyte w ramach wdrożenia opisanego w niniejszej rozprawie byłoby bezpośrednio transferowalne.

Strategia rozwoju laboratorium oparta na powyższych trzech kierunkach prowadzi do stopniowej transformacji jednostki od laboratorium dedykowanego konkretnemu wyrobowi własnemu producenta, w kierunku wielofunkcyjnej jednostki badawczej świadczącej usługi dla podmiotów zewnętrznych w sektorze taboru kolejowego. Punktami zwrotnymi tej transformacji są:

- uzyskanie akredytacji PN-EN ISO/IEC 17025:2018, otwierającej możliwość świadczenia usług badawczych dla zewnętrznych klientów,
- rozszerzenie zakresu notyfikowanych badań o kolejne grupy wyrobów objętych TSI WAG,
- inwestycje w infrastrukturę dedykowaną nowym kierunkom badawczym, zwłaszcza w obszarze sprzęgów automatycznych.

Metodyka opracowana w niniejszej rozprawie, choć zwalidowana na obiekcie sprzęgu śrubowego 1 MN, stanowi z założenia zunifikowane ramy postępowania badawczego możliwe do zastosowania, po odpowiednich adaptacjach metodycznych i regulacyjnych, w każdym z opisanych powyżej kierunków rozwoju.

5. ZAPEWNIENIE JAKOŚCI I CERTYFIKACJA LABORATORIUM

Realizacja certyfikowalnych badań wytrzymałościowych elementów taboru kolejowego wymaga nie tylko odpowiedniej infrastruktury i metodyki, lecz przede wszystkim sprawnie funkcjonującego systemu zapewnienia jakości, gwarantującego powtarzalność, wiarygodność i identyfikowalność wyników. Niniejszy rozdział opisuje strukturę tego systemu w laboratorium badawczym stanowiącym podstawową bazę badawczą rozprawy. Omówiono w nim akredytację przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT), system zarządzania jakością zgodny z ISO/IEC 17025:2017, kwalifikacje personelu, walidację procedur badawczych oraz perspektywy wdrożeniowe i współpracę z przemysłem.

5.1. Status regulacyjny laboratorium i procedury oceny zgodności

Status regulacyjny laboratorium badawczego w sektorze kolejowym osadzony jest w trzystopniowej strukturze prawnej Unii Europejskiej opartej na zasadach interoperacyjności technicznej.

Pierwszy stopień stanowi Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej, definiująca obowiązek certyfikowanych badań wytrzymałościowych kluczowych komponentów taboru.

Drugi stopień to Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności (TSI), w tym TSI WAG (Rozporządzenie Komisji (UE) nr 321/2013 dotyczące podsystemu „Tabor” w zakresie wagonów towarowych), precyzujące wymagania techniczne dla poszczególnych grup wyrobów.

Trzeci stopień stanowią normy zharmonizowane: dla urządzeń cięgłowych jest to PN-EN 15566:2023-01 „Kolejnictwo, Pojazdy kolejowe, Urządzenia cięgłowe i sprzęg śrubowy".

W ramach tej struktury rozróżnić należy trzy odrębne kategorie statusu regulacyjnego, które są często mylone, lecz mają fundamentalnie odmienne znaczenie prawne: (1) akredytację laboratorium badawczego wg PN-EN ISO/IEC 17025:2018, (2) notyfikację jednostki oceniającej zgodność wg dyrektywy 2016/797/UE oraz (3) zatwierdzenie systemu zarządzania jakością producenta w ramach modułów oceny zgodności zdefiniowanych w decyzji Komisji 2010/713/UE. Trzy kategorie dotyczą trzech różnych podmiotów (laboratorium, jednostki

notyfikowanej, producenta) i odnoszą się do różnych przedmiotów certyfikacji (kompetencji badawczych, niezależnej oceny zgodności, jakości wyrobu). Ze względu na praktyczne znaczenie tego rozróżnienia dla dalszej części niniejszej rozprawy poświęcono mu osobne omówienie w punkcie 5.1.1.

W odniesieniu do laboratorium opisanego w niniejszej rozprawie status regulacyjny przedstawia się następująco. W kategorii pierwszej (akredytacja PN-EN ISO/IEC 17025:2018) laboratorium funkcjonuje jako podmiot przygotowujący się do procedury akredytacyjnej PCA, której uruchomienie planowane jest w kolejnym etapie rozwoju jednostki. W kategorii drugiej (notyfikacja) laboratorium nie pełni funkcji jednostki notyfikowanej, lecz współpracuje z taką jednostką (Transportowy Dozór Techniczny, NoBo 1468) w ramach realizowanej procedury oceny zgodności. W kategorii trzeciej (zatwierdzenie SZJ producenta) laboratorium jest integralnym elementem zatwierdzonego przez TDT systemu zarządzania jakością producenta sprzęgów śrubowych 1 MN, w module SH1 zgodnie z decyzją Komisji 2010/713/UE.5.1.1. Istota i cel akredytacji laboratoriów badawczych

Akredytacja laboratorium badawczego jest formalnym, niezależnym potwierdzeniem kompetencji technicznych jednostki do wykonywania badań w określonym zakresie. Definicję akredytacji wprowadza norma PN-EN ISO/IEC 17000, zgodnie z którą stanowi ona „atest, w drodze trzeciej strony, dotyczący jednostki oceniającej zgodność, służący jako oficjalne wykazanie jej kompetencji do wykonywania określonych zadań w zakresie oceny zgodności". W praktyce oznacza to, że laboratorium akredytowane zostało poddane szczegółowej ocenie przez niezależną jednostkę nadrzędną (krajową jednostkę akredytacyjną), która zweryfikowała jego wyposażenie, kompetencje personelu, procedury badawcze, system zarządzania jakością oraz identyfikowalność metrologiczną wykonywanych pomiarów.

Cel akredytacji można sprowadzić do trzech komplementarnych funkcji. Funkcja techniczna polega na zapewnieniu, że wyniki badań prowadzonych w laboratorium akredytowanym są wiarygodne, powtarzalne i porównywalne z wynikami uzyskanymi w innych laboratoriach akredytowanych w skali międzynarodowej. Funkcja prawna polega na zapewnieniu uznawania wyników badań przez organy administracyjne, jednostki notyfikowane i podmioty regulujące rynek, co umożliwia wykorzystywanie tych wyników w procedurach dopuszczeniowych wyrobów. Funkcja gospodarcza polega na ograniczeniu konieczności powtarzania badań tego samego wyrobu w różnych jurysdykcjach, dzięki międzynarodowemu systemowi wzajemnego uznawania (ILAC MRA, IAF MLA), w którego ramach akredytacja

udzielona przez jedną krajową jednostkę akredytacyjną honorowana jest przez pozostałych sygnatariuszy porozumień.

Podstawowym aktem normatywnym określającym wymagania, jakie musi spełnić akredytowane laboratorium badawcze, jest norma PN-EN ISO/IEC 17025:2018 „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących". Norma ta obejmuje wymagania dotyczące struktury organizacyjnej laboratorium, zarządzania zasobami (personelem, infrastrukturą, wyposażeniem pomiarowym, środowiskiem pracy), procesami badawczymi (wyborem i walidacją metod, pobieraniem próbek, postępowaniem z obiektami badań, rejestracją i raportowaniem wyników) oraz systemem zarządzania (kontrolą dokumentów i zapisów, działaniami korygującymi, audytami wewnętrznymi, przeglądami zarządzania). Norma ta jest zharmonizowana z normą PN-EN ISO 9001:2015 w zakresie wymagań systemowych, lecz uzupełnia ją o specyficzne wymagania techniczne odnoszące się do procesu badawczego.

W Polsce krajową jednostką akredytacyjną wskazaną przepisami prawa jest Polskie Centrum Akredytacji (PCA), działające na podstawie ustawy z dnia 13 kwietnia 2016 r. o systemach oceny zgodności i nadzoru rynku. PCA jest sygnatariuszem porozumień wielostronnych ILAC MRA i EA MLA, co oznacza, że akredytacje wydane przez PCA są uznawane w skali międzynarodowej. Działalność PCA regulowana jest normą PN-EN ISO/IEC 17011:2018, określającą wymagania dla jednostek akredytujących laboratoria i inne jednostki oceniające zgodność.

Proces akredytacji laboratorium badawczego przez PCA przebiega w kilku etapach.

- **Etap przygotowawczy**. Laboratorium wdraża system zarządzania jakością zgodny z PN-EN ISO/IEC 17025:2018, opracowuje dokumentację (księgę jakości, procedury, instrukcje, formularze), prowadzi szkolenia personelu, przeprowadza audyty wewnętrzne i pierwsze przeglądy zarządzania. Niezbędnym warunkiem jest również wykazanie traceability metrologicznej wszystkich kluczowych pomiarów oraz przeprowadzenie walidacji metod badawczych, które laboratorium zgłasza do akredytacji.
- **Złożenie wniosku**. Laboratorium składa do PCA wniosek o akredytację wraz z określeniem zakresu akredytacji (lista metod i obiektów badań), kompletną dokumentacją SZJ oraz dowodami spełnienia wymagań technicznych (świadectwa

wzorcowania, walidacje metod, kwalifikacje personelu). PCA dokonuje wstępnej oceny formalnej i kompletności dokumentacji.

- **Ocena na miejscu**. Zespół auditorów PCA (audytor wiodący oraz eksperci techniczni właściwi dla zgłaszanego zakresu) przeprowadza w laboratorium ocenę na miejscu, obejmującą weryfikację dokumentacji, obserwację wykonywanych badań, rozmowy z personelem oraz analizę wybranych zapisów badawczych. Wyniki oceny dokumentowane są raportem zawierającym ewentualne niezgodności (klasyfikowane jako duże lub małe).
- **Działania korygujące**. Laboratorium opracowuje i wdraża plan działań korygujących odnoszących się do stwierdzonych niezgodności, a następnie przedstawia PCA dowody ich realizacji. PCA może w razie potrzeby przeprowadzić dodatkową ocenę uzupełniającą.
- **Decyzja o akredytacji**. Po pozytywnej ocenie raportu i działań korygujących PCA wydaje certyfikat akredytacji wraz z załącznikiem określającym zakres akredytacji. Certyfikat ważny jest standardowo przez cztery lata, z zastrzeżeniem corocznych ocen nadzoru.
- **Nadzór i ponowna ocena**. W trakcie cyklu akredytacyjnego PCA przeprowadza coroczne oceny nadzoru weryfikujące utrzymanie kompetencji laboratorium oraz pełną ponowną ocenę przed upływem czteroletniego okresu ważności certyfikatu. Każda zmiana zakresu akredytacji wymaga osobnej oceny technicznej.

Pełna procedura akredytacyjna od podjęcia decyzji o jej uruchomieniu do wydania certyfikatu trwa zwykle od dwunastu do dwudziestu czterech miesięcy w zależności od dojrzałości systemu zarządzania jakością w laboratorium oraz złożoności zgłoszonego zakresu. Koszt procedury obejmuje opłaty PCA (zależne od zakresu i liczby auditorów), nakłady na przygotowanie SZJ, walidację metod oraz, w razie potrzeby, uzupełnienie wyposażenia laboratorium do wymagań akredytacyjnych.

Z perspektywy laboratorium badawczego stanowiącego bazę niniejszej rozprawy akredytacja PN-EN ISO/IEC 17025:2018 stanowi naturalny dalszy krok rozwoju, planowany na podstawie procedur już wdrożonych w ramach modułu SH1. Wymagania modułu SH1 i normy ISO/IEC 17025 mają znaczący obszar wspólny w zakresie zarządzania kompetencjami personelu, nadzoru nad wyposażeniem pomiarowym, prowadzenia zapisów badawczych oraz

dokumentowania metodyki, co oznacza, że uzyskanie akredytacji PCA wymaga uzupełnienia, a nie budowy od podstaw, istniejącej dokumentacji systemowej.

5.1.2. Dwoista rola laboratorium: działalność naukowo-badawcza i kontrolna

Laboratorium opisane w niniejszej rozprawie pełni w przedsiębiorstwie dwie komplementarne, lecz funkcjonalnie odrębne role. Wyraźne ich rozdzielenie ma istotne znaczenie zarówno z punktu widzenia organizacji pracy laboratorium, jak i z punktu widzenia wymagań regulacyjnych odnoszących się do różnych typów działalności badawczej.

Pierwsza rola: jednostka naukowo-badawcza. Laboratorium prowadzi prace rozwojowe i wdrożeniowe ukierunkowane na opracowywanie nowych metod diagnostycznych, optymalizację konstrukcji elementów taboru oraz doskonalenie procedur kontroli jakości. W ramach tej działalności realizowane są prace B+R finansowane w części ze środków własnych przedsiębiorstwa, w części z grantów krajowych i europejskich. Praktycznym przykładem prac B+R prowadzonych w laboratorium są badania własne autora niniejszej rozprawy nad zastosowaniem metody rezonansu akustycznego (ART) do kontroli jakości sworzni sprzęgów śrubowych, opisane szczegółowo w rozdziałach 6.5, 7.4 oraz 8.4. Działalność naukowo-badawcza laboratorium obejmuje również realizację doktoratu wdrożeniowego w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego we współpracy z Politechniką Poznańską. W zakresie tej roli laboratorium funkcjonuje zgodnie ze standardami właściwymi dla laboratoriów naukowo-badawczych: stosuje udokumentowane procedury badawcze, prowadzi rejestrację pomiarów, wykorzystuje wzorcowaną aparaturę pomiarową, a wyniki badań poddaje analizie statystycznej z uwzględnieniem niepewności pomiarowych zgodnie z wytycznymi JCGM 100:2008 (GUM).

Druga rola: jednostka kontroli wyrobu. Laboratorium wykonuje również badania na potrzeby procedur oceny zgodności wyrobu, w szczególności testy kontrolne kompletnych sprzęgów śrubowych 1 MN. Badania te realizowane są w ramach zatwierdzonego przez TDT systemu zarządzania jakością producenta zgodnie z modułem SH1 decyzji Komisji 2010/713/UE. Procedura SH1, czyli „Zgodność z typem na podstawie pełnego systemu zarządzania jakością wraz z badaniem projektu", stanowi najbardziej kompleksową ścieżkę oceny zgodności wyrobu w systemie unijnym. Obejmuje ona zarówno weryfikację dokumentacji konstrukcyjnej, jak i zatwierdzenie systemu zarządzania jakością producenta w pełnym zakresie: projektowania, produkcji, kontroli końcowej i badania wyrobu. W wyniku

procedury SH1 prowadzonej przez TDT (NoBo 1468) wydane zostały trzy dokumenty stanowiące formalne potwierdzenia kompetencji laboratorium w zakresie badań kontrolnych:

- Pośrednie potwierdzenie weryfikacji badania projektu nr 1468/8.2/SH1/2024/RST/PL/297/V01, potwierdzające zgodność dokumentacji konstrukcyjnej systemu sprzęgu śrubowego 1 MN z wymaganiami TSI WAG oraz normy PN-EN 15566:2023-01. Dokument ważny od kwietnia 2024 r. do kwietnia 2034 r.
- Pośrednie potwierdzenie weryfikacji zatwierdzenia systemu zarządzania jakością nr 1468/8.4/SH1/2024/RST/PL/298/V01, potwierdzające zgodność systemu zarządzania jakością producenta z wymaganiami modułu SH1 dla projektowania, produkcji, kontroli końcowej i badania wyrobu. Dokument ważny od kwietnia 2024 r. do kwietnia 2026 r.
- Pośrednie potwierdzenie weryfikacji podsystemu nr 1468/8.6/SH1/2024/RST/PL/299/V01, łączące oba powyższe potwierdzenia w kompletną dokumentację wdrożenia podsystemu. Dokument ważny od kwietnia 2024 r. do kwietnia 2026 r.

Skany powyższych dokumentów zamieszczono w załączniku nr 1 do niniejszej rozprawy. Stanowią one formalny dowód wdrożenia systemu zapewnienia jakości w laboratorium oraz dokumentację dopuszczenia systemu sprzęgu śrubowego 1 MN do obrotu na rynku Unii Europejskiej w trybie oceny zgodności wg dyrektywy 2016/797/UE. Należy podkreślić, że dokumenty te potwierdzają zatwierdzenie systemu zarządzania jakością producenta i zdolność laboratorium do prowadzenia badań kontrolnych w ramach tego systemu, lecz nie stanowią akredytacji laboratorium w rozumieniu PN-EN ISO/IEC 17025, o której traktuje punkt 5.1.1 niniejszego rozdziału. Rozróżnienie to ma istotne znaczenie praktyczne: akredytacja PCA umożliwiłaby laboratorium świadczenie usług badawczych również dla podmiotów zewnętrznych, podczas gdy zatwierdzenie w module SH1 jest ściśle związane z systemem zarządzania jakością konkretnego producenta i konkretnym wyrobem (system sprzęgu śrubowego 1 MN).

5.1.3. Współpraca z akredytowanym laboratorium zewnętrznym

Integralną częścią procedury SH1 jest udokumentowanie zdolności producenta do prowadzenia kontrolnych badań wyrobu zgodnie z wymaganiami normy zharmonizowanej. Ze

względu na to, że laboratorium własne nie posiada jeszcze akredytacji PCA, dla wzmocnienia wiarygodności wyników badań kluczowych dla procedury dopuszczeniowej nawiązano współpracę z laboratorium zewnętrznym posiadającym akredytację PN-EN ISO/IEC 17025:2018 wydaną przez krajową jednostkę akredytacyjną państwa członkowskiego UE (dane laboratorium objęte klauzulą poufności w niniejszej rozprawie). Laboratorium to przeprowadziło niezależną weryfikację programu badań zmęczeniowych kompletnych sprzęgów śrubowych 1 MN zgodnie z wymaganiami załącznika A normy PN-EN 15566:2023-01. Wyniki badań zewnętrznych, udokumentowane sprawozdaniami POZ 030/2024/1 oraz POZ 037/2024/1, zostały włączone do dokumentacji procedury SH1 prowadzonej przez TDT i są wymienione w załącznikach do pośredniego potwierdzenia weryfikacji badania projektu (POZ 297) oraz pośredniego potwierdzenia weryfikacji podsystemu (POZ 299).

Niezależnie od współpracy z akredytowanym laboratorium zewnętrznym, laboratorium własne realizuje pełen zakres badań w ramach zatwierdzonego systemu zarządzania jakością producenta. Obejmuje on: próby statyczne sprzęgu kompletnego i jego komponentów (hak cięgłowy, cięgło widłowe, śruba dwustronna), próby udarności, statyczne próby rozciągania, analizę składu chemicznego, badania makro- i mikrograficzne, pomiary twardości oraz badania nieniszczące metodami PT, MT i UT. Pełną listę sprawozdań z badań własnych załącza się do dokumentacji procedury SH1; w niniejszej rozprawie szczegółowo opisano metodykę tych badań (rozdział 6), wyniki walidacji (rozdział 7) oraz wyniki na obiekcie badań (rozdział 8).

5.1.4. Perspektywa rozwoju i planowana akredytacja PCA

Obecny status regulacyjny laboratorium, funkcjonującego w ramach zatwierdzonego systemu zarządzania jakością producenta zgodnie z modułem SH1, pozwala na realizację badań kontrolnych wyrobu na potrzeby procedur dopuszczeniowych dla systemu sprzęgu śrubowego 1 MN. Planowanym dalszym krokiem rozwoju laboratorium jest uzyskanie akredytacji PN-EN ISO/IEC 17025:2018 udzielanej przez Polskie Centrum Akredytacji.

Uzyskanie akredytacji PCA pozwoliłoby na istotne rozszerzenie zakresu działalności laboratorium o świadczenie usług badawczych dla podmiotów zewnętrznych, w tym dla innych producentów taboru kolejowego oraz dla potrzeb postępowań notyfikacyjnych innych wyrobów. Procedury i dokumentacja systemu zarządzania jakością przygotowane w ramach modułu SH1 stanowią solidną podstawę do tego rozszerzenia, ponieważ wymagania modułu SH1 i normy ISO/IEC 17025 mają znaczący obszar wspólny w zakresie zarządzania

kompetencjami personelu, nadzoru nad sprzętem pomiarowym, prowadzenia zapisów badawczych i metodyki. Pełny zakres planowanej akredytacji obejmuje próby statyczne i zmęczeniowe sprzęgów śrubowych zgodnie z PN-EN 15566:2023-01, próby rozciągania i udarności elementów cięgłowo-zderznych zgodnie z PN-EN ISO 6892-1 oraz PN-EN ISO 148-1, badania twardości oraz badania nieniszczące PT, MT i UT zgodnie z odpowiednimi normami zharmonizowanymi. W docelowej konfiguracji laboratorium pełnić ma rolę jednocześnie naukowo-badawczą (z udokumentowanymi pracami B+R i doktoratami wdrożeniowymi) oraz akredytowanej jednostki badawczej (z akredytacją PCA dla badań kontrolnych komponentów taboru kolejowego). Taka dwoista funkcja jest dziś rzadkością w krajowych laboratoriach przemysłu kolejowego i stanowi jeden z elementów wyróżniających koncepcję rozwoju przedstawioną w niniejszej rozprawie.

5.2. System zarządzania jakością w laboratorium

Laboratorium przemysłowe wdrożyło zintegrowany system zarządzania jakością (SZJ) obejmujący projektowanie, produkcję, badania laboratoryjne oraz sprzedaż materiałów i wyrobów metalowych, pojazdów szynowych i ich części. Dokumentację systemu tworzą dwa komplementarne dokumenty nadrzędne: Księga SZJ i ZKP- zgodna z ISO 9001:2015 i EN 15085-2, oraz Księga Jakości Laboratorium, zgodna z ISO/IEC 17025:2017. Oba dokumenty są wzajemnie spójne i łącznie obejmują pełny zakres działalności badawczej.

Dokumentacja SZJ jest zorganizowana hierarchicznie na czterech poziomach:

Poziom I: Księga Jakości: dokument nadrzędny opisujący politykę jakości, zakres systemu, strukturę organizacyjną i odpowiedzialności.

Poziom II: Procedury systemowe: szczegółowe opisy procesów zarządczych (PS-1 Nadzór nad udokumentowaną informacją, PS-2 Przegląd zarządzania, PS-3 Audity wewnętrzne, PS-4 Nadzór nad niezgodnymi wyjściami, PS-5 Działania korygujące).

Poziom III: Instrukcje badawcze i kalibracyjne: szczegółowe instrukcje stanowiskowe opisujące metodykę badań statycznych, zmęczeniowych i NDT, procedury kalibracji aparatury oraz obsługi stanowisk.

Poziom IV: Zapisy jakości: protokoły badań, sprawozdania z kalibracji, raporty z audytów, karty ewidencyjne przyrządów pomiarowych, rejestry niezgodności.

Program audytów wewnętrznych realizowany jest zgodnie z procedurą PS-3, z częstotliwością co najmniej raz w roku. Zakres audytów obejmuje kompetencje personelu, spójność pomiarową, postępowanie z próbkami, rzetelność sprawozdań oraz identyfikowalność wyników. Wyniki audytów stanowią dane wejściowe do rocznego przeglądu zarządzania. W przypadku stwierdzenia niezgodności w procesie badawczym uruchamiana jest procedura PS-4, obejmująca wstrzymanie badania, powiadomienie klienta, identyfikację przyczyn oraz wdrożenie działań korygujących zgodnie z procedurą PS-5.

Spójność pomiarowa aparatury z wzorcami odniesienia powiązanymi z Międzynarodowym Układem Jednostek Miar (SI) jest zapewniona przez udokumentowany program kalibracji, zgodny z ISO 7500-1:2018 oraz ILAC-G24:2022 [38, 44]. Aparaturę objętą programem kalibracji zestawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1.

Zestawienie aparatury objętej programem kalibracji laboratorium.

Urządzenie / przyrząd	**Parametr kalibrowany**	**Interwał kalibracji**
Stanowisko SB-1600-P-PC	Siła (klasa 0,5% wg ISO 7500-1)	12 miesięcy
Maszyna wytrzymałościowa HT-2402 (250 kN)	Siła (klasa 1% wg ISO 7500-1)	12 miesięcy
Twardościomierz DuraVision / ZHB 3000	Twardość HBW (PN-EN ISO 6506-1)	12 miesięcy
Młot Charpy'ego HIT 450P	Energia uderzenia (PN-EN ISO 148-1)	12 miesięcy
Termohigrometr (T, RH)	Temperatura ±0,5°C, wilgotność ±3% RH	12 miesięcy
Ramię pomiarowe 3D Kreon Ace 7-25	Długość (ISO 10360-2)	12 miesięcy
Spektrometr OES	Skład chemiczny (wzorce certyfikowane CRM)	Przed każdą serią

Każdy przyrząd pomiarowy dysponuje kartą ewidencyjną zawierającą historię kalibracji, aktualny status metrologiczny oraz termin następnej kalibracji. Przyrządy, którym upłynął termin kalibracji, są wycofywane z użycia i oznaczane etykietą „NIEZATWIERDZONE DO UŻYCIA" do czasu ponownego wzorcowania.

5.3. Kwalifikacje personelu i bezpieczeństwo pracy

Kompetencje personelu są kluczowym wymaganiem ISO/IEC 17025:2017. W laboratorium stosuje się udokumentowaną procedurę nadzoru nad kompetencjami (PR-7), obejmującą:

- definiowanie wymagań stanowiskowych,
- ocenę kompetencji przy zatrudnieniu,
- planowanie szkoleń,
- autoryzację stanowiskową,
- weryfikację skuteczności szkoleń.

Zestawienie wymagań kwalifikacyjnych dla kluczowych stanowisk laboratorium przedstawia tabela 5.2.

Tabela 5.2.

Wymagania kwalifikacyjne dla kluczowych stanowisk laboratorium.

Stanowisko	Wymagane kwalifikacje	Zakres autoryzacji
Kierownik Laboratorium	Wyższe techniczne (mechanika / inżynieria materiałowa), min. 3 lata doświadczenia w badaniach wytrzymałościowych	Zatwierdzanie wyników, podpisywanie sprawozdań, nadzór nad SZJ
Operator badań wytrzymałościowych	Techniczne (co najmniej średnie), szkolenie stanowiskowe, autoryzacja UDT na stanowisku SB-1600-P-PC	Prowadzenie prób statycznych i zmęczeniowych, obsługa systemu akwizycji danych
Specjalista NDT	Certyfikat personalny PN-EN ISO 9712 poziom II w zakresie MT, PT i UT; szkolenie z metody ART	Wykonywanie badań MT, PT, UT, ART; interpretacja wskazań; wystawianie protokołów NDT
Metrolog / Kalibrator	Szkolenie z metrologii i spójności pomiarowej, znajomość GUM / JCGM 100:2008	Kalibracja aparatury, obliczanie niepewności pomiarów, prowadzenie rejestrów kalibracji

Personel NDT musi dysponować ważnym certyfikatem wydanym przez jednostkę certyfikującą akredytowaną zgodnie z ISO/IEC 17024, w zakresie odpowiadającym stosowanym metodom. Certyfikaty podlegają odnowieniu zgodnie z PN-EN ISO 9712:2022 [48].

Bezpieczeństwo pracy podczas prób wytrzymałościowych przy obciążeniach do 1000 kN zapewnia wielopoziomowy system zabezpieczeń opisany w rozdziale 4. W zakresie systemu jakości każdy operator dysponuje aktualną autoryzacją stanowiskową odnawianą corocznie, a przy próbach powyżej 500 kN wymagana jest obecność dwóch operatorów. Dokumentacja

ryzyka zawarta w SZJ opisuje scenariusze zdarzeń niebezpiecznych wraz ze środkami zapobiegawczymi, z przywołaniem właściwych wymagań BHP.

ISO/IEC 17025:2017 wymaga, aby laboratorium działało bezstronnie i chroniło poufność informacji klienta. Warunek ten jest spełniony przez organizacyjne oddzielenie personelu wykonującego badania od działów produkcji i sprzedaży. Wszyscy pracownicy laboratorium podpisują deklarację bezstronności i poufności, aktualizowaną corocznie. Wyniki badań udostępniane są wyłącznie zleceniodawcy oraz organom akredytacyjnym.

5.4. Strukturyzacja i walidacja procedur badawczych

Procedury badawcze laboratorium mają ustrukturyzowaną formę zgodną z wymaganiami ISO/IEC 17025:2017 pkt. 7.2. Każda instrukcja badawcza zawiera: zakres stosowania, powołania normatywne, wykaz aparatury z wymaganą klasą dokładności, opis przygotowania próbki, krok po kroku opis wykonania badania, kryteria akceptacji wyników, sposób obliczania niepewności pomiarów oraz wymagania dotyczące sprawozdania. Instrukcje są zatwierdzone przez Kierownika Laboratorium i poddawane przeglądowi przy każdej zmianie normy odniesienia lub aparatury.

Walidacja metod badawczych, wymagana przez ISO/IEC 17025:2017 przed wdrożeniem nowej metody lub przy istotnych zmianach warunków stosowania metody znormalizowanej obejmuje następujące działania przeprowadzone w laboratorium:

1. Weryfikacja metody statycznej (PN-EN ISO 6892-1 / PN-EN 15566): wyniki próby rozciągania porównano z wynikami zewnętrznego laboratorium referencyjnego akredytowanego przez PCA, na tej samej partii próbek; stwierdzono zgodność w granicach wyznaczonej niepewności pomiarów.
2. Weryfikacja metody badań udarności (PN-EN ISO 148-1): młot Charpy'ego sprawdzono przy użyciu certyfikowanych wzorców materiałowych (CRM); uzyskane wyniki mieściły się w przedziałach deklarowanych przez dostawcę wzorców.
3. Walidacja metody penetracyjnej PT (PN-EN 10228-2): potwierdzono zdolność wykrywania wskazań liniowych na rzeczywistej próbce sprzęgu po badaniu zmęczeniowym, wskazanie $L_1 = 18$ mm, $L_2 = 9$ mm, $Lc = 27$ mm, kwalifikujące się do klasy jakości 1 zgodnie z normą [50].

4. Walidacja metody ART: wstępne badania własne autora przeprowadzone na sworzniach sprzęgów śrubowych wykazały zdolność różnicowania elementów z wadami materiałowymi od elementów bez wad; szczegółowe wyniki walidacji omówiono w rozdziale 7 [62, 63].

Analiza niepewności pomiarów stanowi integralną część każdej procedury badawczej. Łączna niepewność standardowa u(F) pomiaru siły na stanowisku SB-1600-P-PC jest wyznaczana zgodnie z GUM (JCGM 100:2008) z uwzględnieniem następujących składowych: niepewności wzorcowania przetwornika siły, powtarzalności wskazań, rozdzielczości układu akwizycji danych oraz dryfu między kalibracjami [68]. Rozszerzona niepewność pomiarowa U(F) przy współczynniku k = 2 (poziom ufności ok. 95%) wynosi nie więcej niż 0,5% wartości mierzonej w zakresie 500–1000 kN, co odpowiada klasie dokładności wymaganej przez ISO 7500-1:2018. Szczegółową procedurę wyznaczania niepewności pomiarów omówiono w rozdziale 7.

Wyniki walidacji są dokumentowane w raportach walidacyjnych i przechowywane przez co najmniej 10 lat jako zapisy jakości, zgodnie z wymaganiami ISO/IEC 17025:2017 pkt. 7.2.

5.5. Możliwości wdrożeniowe i współpraca z przemysłem

Laboratorium powstało w odpowiedzi na konkretne potrzeby przemysłu kolejowego: weryfikację jakości sprzęgów śrubowych zakupionych na rynku europejskim oraz przygotowanie do certyfikacji elementów taboru w ramach wymagań TSI. Badania kontrolne przeprowadzone na zlecenie przedsiębiorstwa przemysłowego, opisane w rozdziałach 3 i 8 wykazały, że w jednym przypadku na pięć zbadanych kompletnych sprzęgów (20%) wykryto wady dyskwalifikujące element. Wynik ten jednoznacznie potwierdza, że systematyczna, akredytowana kontrola wytrzymałościowa ma wymierną wartość zarówno ekonomiczną, jak i dla bezpieczeństwa, nie jest zatem jedynie wymogiem formalnym [3].

Model wdrożeniowy laboratorium zakłada trzy ścieżki współpracy z przemysłem:

- Badania zlecone (usługowe): laboratorium wykonuje certyfikowane badania wytrzymałościowe i NDT dla producentów taboru, zakładów naprawczych oraz jednostek notyfikowanych, wydając akredytowane sprawozdania badań.
- Kontrola odbiorcza dostawców: systematyczne badania partii elementów sprzęgów śrubowych i innych komponentów przyjmowanych przez przedsiębiorstwa eksploatacyjne, jako element nadzoru nad łańcuchem dostaw.

- Badania i rozwój (B+R): laboratorium współpracuje z producentami taboru oraz instytutami badawczymi w zakresie opracowywania nowych metodyk badań, walidacji innowacyjnych metod diagnostycznych, w tym metody ART, oraz wsparcia procesu certyfikacji nowych typów pojazdów.

W perspektywie laboratorium może ubiegać się o rozszerzenie zakresu akredytacji UDT o badania ram wózków (zgodnie z PN-EN 13749) oraz zderzaków, co pozwoliłoby na obsługę pełnego zakresu certyfikacji komponentów wagonu towarowego w jednym miejscu. Taki kierunek rozwoju odpowiada zidentyfikowanej w rozdziale 2 luce badawczej, brakowi zunifikowanego systemu badawczego zdolnego do kompleksowej certyfikacji różnych klas elementów taboru.

Warto w tym kontekście odnieść projekt opisanego laboratorium do krajowego zaplecza badawczego sektora kolejowego. W Polsce funkcjonują wyspecjalizowane jednostki badawcze taboru, przede wszystkim Laboratorium Badań Taboru oraz Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji Instytutu Kolejnictwa, dysponujące akredytacją PCA według normy PN-EN ISO/IEC 17025 oraz statusem jednostki notyfikowanej, a także Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego UDT, realizujące badania własności wytrzymałościowych materiałów metalowych. Jednostki te koncentrują się jednak na badaniach materiałowych, certyfikacji wyrobów oraz badaniach na potrzeby dopuszczeń do eksploatacji, działając jako podmioty zewnętrzne względem producentów. Brakuje natomiast laboratoriów dedykowanych badaniom wytrzymałościowym kompletnych systemów sprzęgów śrubowych kategorii 1 MN, zlokalizowanych bezpośrednio w strukturze przedsiębiorstwa produkcyjnego i zintegrowanych z procesem wytwórczym. Tę właśnie lukę wypełnia koncepcja laboratorium przedstawiona w niniejszej rozprawie, łącząca kompetencje badawcze z bezpośrednią kontrolą jakości produkcji oraz z procedurami oceny zgodności prowadzonymi we współpracy z jednostką notyfikowaną.

6. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Niniejszy rozdział opisuje metodykę badań eksperymentalnych przeprowadzonych na systemie sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN jako studium przypadku weryfikującym koncepcję laboratorium i opracowane procedury badawcze. Badania opisane w niniejszym rozdziale pełniły zatem podwójną funkcję: dostarczały danych o właściwościach wytrzymałościowych badanego sprzęgu śrubowego oraz stanowiły praktyczną weryfikację poprawności metodycznej i funkcjonalnej zaprojektowanego laboratorium. Zakres badań obejmuje: badania materiałowe elementów systemu, próbę statyczną kompletnego sprzęgu, program badań dynamicznych (zmęczeniowych), badania nieniszczące metodą penetracyjną (PT) oraz badania metodą rezonansu akustycznego (ART). Szczegółowy plan badań wynikał bezpośrednio z wymagań normy PN-EN 15566:2023-01 oraz z programów badań opracowanych w przedsiębiorstwie:

1. Programu badań statycznych nr EA-PB-S-SSS-042024,
2. Programu badań dynamicznych nr EA-PB-D-SSS-02/2024 [1, 3].

6.1. Plan badań i scenariusze obciążeń

Plan badań eksperymentalnych obejmował trzy uzupełniające się ścieżki badawcze, realizowane równolegle na tym samym systemie sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN wyprodukowanym przez przedsiębiorstwo przemysłowe:

- **Ścieżka A**: Badania materiałowe elementów: kontrola właściwości mechanicznych i strukturalnych wszystkich elementów systemu sprzęgu: haka cięgłowego, czopów obrotowych prawego i lewego, cięgła widłowego, łubek, śruby dwustronnej, pałąka, nasady i rękojeści: na podstawie próbek materiałowych pobranych zgodnie z PN-EN 15566:2023-01.
- **Ścieżka B**: Badania wytrzymałościowe kompletnego systemu: próba statyczna kompletnego sprzęgu śrubowego przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN 15566:2023-01, obejmująca próbę rozciągania przy połowie minimalnego obciążenia niszczącego, próbę przy 95% obciążenia zrywającego oraz próbę zrywania.

- **Ścieżka C**: Badania nieniszczące (NDT): badanie penetracyjne PT haka cięgłowego przeprowadzone przed badaniem dynamicznym i po nim zgodnie z PN-EN 10228-2, oraz badania metodą rezonansu akustycznego (ART) na sworzniach haka cięgłowego jako element walidacji metody przesiewowej.

Badania realizowano na stanowiskach w laboratorium w siedzibie przedsiębiorstwa. Próbę statyczną przeprowadzono na stanowisku SB-1600-P-PC (nr ewidencyjny ŚT/0025, maksymalna siła statyczna 1600 kN), badania materiałowe na aparaturze opisanej w rozdziale 4 i tabeli 4.1. Wszystkie badania realizowano w warunkach środowiskowych spełniających wymagania akredytacji UDT: temperatura 20 ± 5°C, wilgotność kontrolowana. Zestawienie wszystkich badań eksperymentalnych wraz z normami odniesienia, wykorzystaną aparaturą i badanymi elementami przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1.

Zestawienie badań eksperymentalnych przeprowadzonych w ramach studium przypadku.

Badanie	Norma odniesienia	Stanowisko / aparatura	Próbka / element
Próba udarności Charpy (KV)	PN-EN ISO 148-1:2017	Młot HIT 450P (450 J)	Wszystkie elementy systemu
Pomiar twardości Brinella (HBW 10/3000)	PN-EN ISO 6506-1:2014	Twardościomierz DuraVision 30 G5	Wszystkie elementy systemu
Analiza składu chemicznego (OES)	PBE-04 / PN-EN 15566	Spektrometr emisji optycznej nr 220401	Wszystkie elementy systemu
Badanie makrostruktury (odcisk Baumana)	ISO 4968:2022	Mikroskop metalograficzny, polerka FORCIPOL	Wszystkie elementy systemu
Badanie mikrostruktury (wtrącenia niemetaliczne)	ISO 4967:2013 Metoda A	Mikroskop Olympus BX53M TRF BD	Wszystkie elementy systemu
Statyczna próba rozciągania elementów	PN-EN ISO 6892-1:2020	Maszyna wytrzymałościowa HT-2402 (250 kN)	Hak, cięgło, śruba, pałąk
Statyczna próba kompletnego sprzęgu	PN-EN 15566:2023-01	Stanowisko SB-1600-P-PC (1600 kN)	Kompletny sprzęg 1-18-04-24-EA.SS10A
Badanie penetracyjne PT	PN-EN 10228-2	System H.Klumpf II C d	Hak cięgłowy 4-13-09-24-EA.UC10-HC01-O
Badanie ART (rezonans akustyczny)	Procedura własna	Młotek modalny + mikrofon wysokoczułościowy	Sworznie haka cięgłowego (n=18)

6.2. Badanie statyczne wytrzymałości sprzęgu

Badanie statyczne kompletnego systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN przeprowadzono 18 kwietnia 2024 r. w hali laboratoryjnej, na stanowisku SB-1600-P-PC (Asco Rail, nr ewidencyjny ŚT/0025), zgodnie z programem badań statycznych nr EA-PB-S-SSS-

042024. Badany obiekt oznaczono: Sprzęg śrubowy 1 MN „A" nr 1-18-04-24-EA.SS10A. Badanie przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 15566:2023-01, opartą na ERRIB-51/RP 27:1995 [1].

Procedura badania obejmowała trzy etapy realizowane sekwencyjnie na tej samej próbce:

- **Krok 1**: Próba rozciągania (połowa minimalnego obciążenia niszczącego): sprzęg poddano obciążeniu 475 kN utrzymywanemu przez 60 sekund, co odpowiada 50% minimalnego obciążenia zrywającego wynoszącego 0,95 MN. Po zredukowaniu obciążenia wykonano pomiary odkształceń trwałych w 11 punktach pomiarowych zgodnie z rys. F.1 i F.2 normy PN-EN 15566:2023-01.
- **Krok 2**: Próba przy 95% obciążenia zrywającego: sprzęg poddano obciążeniu 807,5 kN (95% × 850 kN) utrzymywanemu przez 3 minuty. Kryterium akceptacji stanowi brak zerwania i brak pęknięć.
- **Krok 3**: Próba zrywania (badanie dla typu): obciążenie zwiększano liniowo aż do zerwania sprzęgu, wyznaczając w ten sposób rzeczywistą siłę niszczącą. Badanie zakończyło się zerwaniem łubki, zgodnie z wymaganiami normy (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Widok sprzęgu śrubowego po próbie zerwania [Opracowanie własne]

Warunki środowiskowe podczas badania spełniały wymagania akredytacyjne: temperatura powietrza wynosiła 20 ± 5°C. Stanowisko SB-1600-P-PC mierzyło siłę i skok bezpośrednio za

pomocą wbudowanych czujników, z akwizycją danych do komputera pomiarowo-sterującego i archiwizacją wyników.

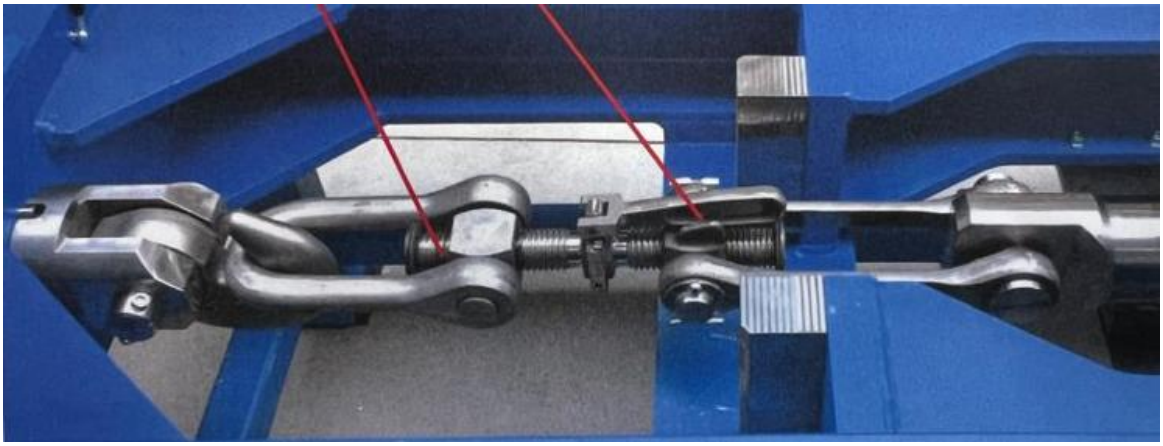
Kryteria akceptacji zgodności z PN-EN 15566:2023-01 dla próby rozciągania są następujące: zmiana wymiarów a, b, c, d, g nie może przekraczać 0,2% długości początkowej, zmiana szerokości e pałąka -0,5 mm, odgięcie sworzni -0,5 mm, a element nie może wykazywać oznak uszkodzenia. Kryterium próby zrywania: siła zrywająca musi wynosić co najmniej 1000 kN, a złom powinien nastąpić w elemencie zaprojektowanym jako najsłabszy, łubce lub śrubie [1].

6.3. Badanie zmęczeniowe sprzęgu

Program badań dynamicznych (zmęczeniowych) systemu sprzęgu śrubowego 1 MN opracowano zgodnie z wymaganiami Załącznika A normy PN-EN 15566:2023-01, na podstawie dokumentu ERRIB-51/RP 27:1995. Program badań nr EA-PB-D-SSS-02/2024 zatwierdził wymagania proceduralne i parametry stanowiska. Badania zmęczeniowe przeprowadzane są na dedykowanej maszynie do badań zmęczeniowych systemów sprzęgu śrubowego (nr fabryczny 2.1740, nr ewidencyjny ŚT/0025), wzorcowanej przez Okręgowy Urząd Miar we Wrocławiu (świadectwo wzorcowania nr L1.401.62.1.2024). [1]

Program zmęczeniowy realizowano w trzech etapach:

- **Etap 1**: Kondycjonowanie: próbkę obciążono co najmniej jednokrotnie do wartości odpowiadającej 75% minimalnego obciążenia niszczącego, dla sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN wynosi ono 640 kN, w celu wyeliminowania naprężeń własnych i wstępnego ułożenia elementów systemu.
- **Etap 2**: Badanie dynamiczne: realizacja programu zmęczeniowego zgodnie z sekwencją bloków obciążeń. Każdy blok zawiera 698 cykli kroku 1 (ΔF_1 = 170 kN, Fd = 10–50 kN, częstotliwość 4 Hz) oraz 1 cykl kroku 2 (ΔF_2 = 575 kN, częstotliwość 4 Hz). Pełny program wymaga realizacji 2150 bloków, łącznie 1 500 000 cykli kroku 1 i 2150 cykli kroku 2, co odpowiada 30-letniemu cyklowi eksploatacyjnemu.
- **Etap 3**: Wyznaczanie wytrzymałości szczątkowej: po zakończeniu programu zmęczeniowego sprzęg poddawany jest obciążeniu 808 kN (95% × 850 kN) utrzymywanemu przez 3 minuty na stanowisku SB-1600-P-PC (rys. 6.2). Kryterium akceptacji stanowi brak pęknięć.



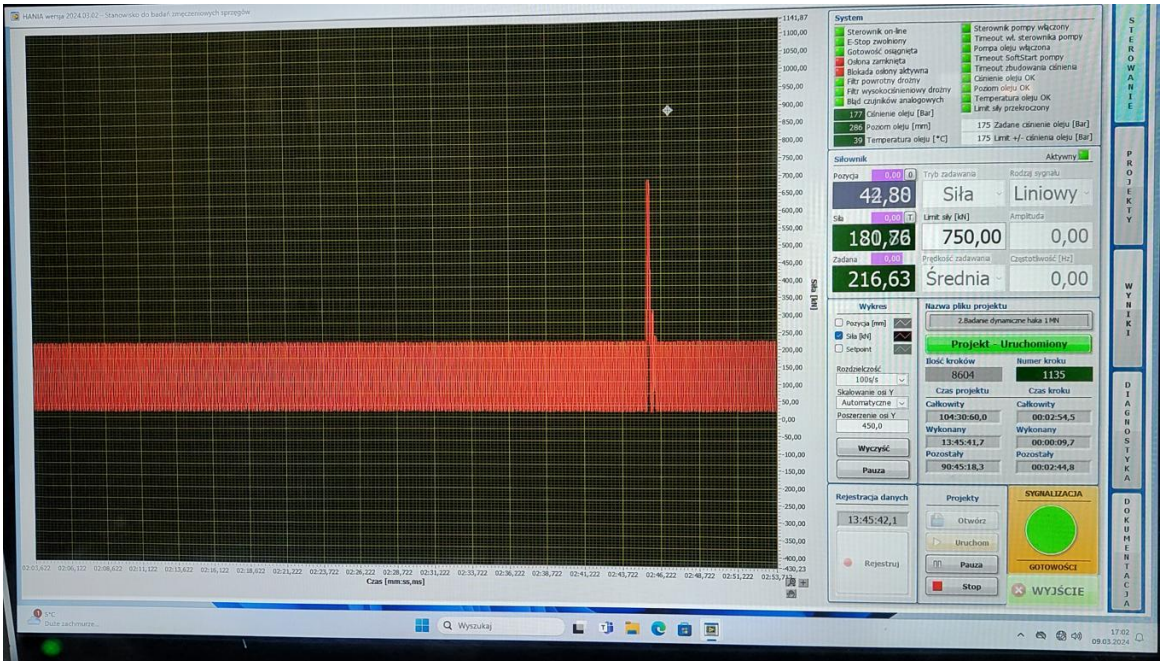
Rys. 6.2. Sprzęg śrubowy kategorii 1 MN zainstalowany na stanowisku serwohydraulicznym SB-1600-P-PC podczas badania zmęczeniowego. Widoczne elementy systemu: hak cięgłowy (poz. 9 wg rys. 3.1), śruba sprzęgu (poz. 3), łubki (poz. 2), pałąk (poz. 6). [Opracowanie własne]

Po każdym etapie programu zmęczeniowego wszystkie badane elementy poddawano badaniu nieniszczącemu metodą PT lub MT zgodnie z PN-EN 10228-2 (klasa 1) lub PN-EN 10228-1 (klasa 1). Wszelkie wskazania klasyfikowane są zgodnie z przywołanymi normami i dokumentowane w raporcie. Badania makrograficzne i mikrograficzne przeprowadzane są po zakończeniu pełnego programu, zgodnie z załącznikami E i F normy PN-EN 15566:2023-01 [1]. Parametry programu zmęczeniowego zestawiono w tabeli 6.2. Przykładowy przebieg pomiarowy jest natomiast przedstawiony na rys. 6.3.

Tabela 6.2.

Parametry programu zmęczeniowego dla systemu sprzęgu śrubowego 1 MN wg PN-EN 15566:2023-01.

Parametr	**Sprzęg śrubowy**	**Hak cięgłowy / urządzenie cięgłowe**
Obciążenie wstępne (kondycjonowanie)	640 kN (75% F min)	750 kN (75% F min)
Amplituda Kroku 1 (ΔF_1)	170 kN	200 kN
Amplituda Kroku 2 (ΔF_2)	575 kN	675 kN
Obciążenie dolne (Fd)	10–50 kN	10–50 kN
Częstotliwość zadawania	4 Hz	4 Hz
Liczba cykli Kroku 1	1 500 000	1 500 000
Liczba cykli Kroku 2	2 150	2 150
Liczba bloków	2 150	2 150
Wytrzymałość szczątkowa (95%)	808 kN / 3 min	950 kN / 3 min



Rys. 6.3. Przykładowy przebieg pomiarowy z systemu akwizycji danych stanowiska SB-1600-P-PC podczas badania zmęczeniowego. [Opracowanie własne]

6.4. Ocena stanu po cyklach obciążeń: badania nieniszczące

Badania nieniszczące (NDT) stanowią integralny element metodyki badań wytrzymałościowych sprzęgu śrubowego, realizowano je zarówno przed badaniem dynamicznym, jak i po jego zakończeniu. W opracowanej metodyce zastosowano metodę penetracyjną (PT) jako podstawową technikę wykrywania nieciągłości powierzchniowych odkuwek stalowych poddanych obciążeniu zmęczeniowemu [50, 67].

Badanie PT przeprowadzono na haku cięgłowym o oznaczeniu 4-13-09-24-EA.UC10-HC01-O zgodnie z normą PN-EN 10228-2, przy użyciu systemu penetrantów II C d (penetrant fluorescencyjno-barwnikowy, producent H. Klumpf). Procedura badania obejmowała dziewięć kroków: sprawdzenie czułości preparatów na próbce odniesienia nr 2, pomiar temperatury i oświetlenia, oczyszczenie powierzchni, nałożenie penetrantu z czasem penetracji 15 min, usunięcie nadmiaru penetrantu, nałożenie wywoływacza z czasem wywoływania 15 min, ocenę wskazań, ich opisanie oraz oczyszczenie powierzchni. Warunki badania: temperatura otoczenia 21,6–21,7°C, natężenie oświetlenia 560–589 lux przy wymaganym minimum 500 lux dla oceny wskazań [3, 50].

Badanie penetracyjne przeprowadzono dwukrotnie na tym samym haku:

- po kondycjonowaniu (krok 1, badanie wstępne, 13.09.2024): wynik brak nieciągłości powierzchniowych. Integralność haka potwierdzona przed badaniem dynamicznym,
- po badaniu dynamicznym (krok 2, 18.09.2024): ujawniono wskazanie liniowe zlokalizowane na powierzchni czołowej haka. Wymiary wskazania: L_1= 18 mm, L_2 =9 mm, Lc=27 mm. Zgodnie z normą PN-EN 10228-2 wskazanie to kwalifikuje się do klasy jakości 1 w odniesieniu do parametrów L_1 i L_2 (wskazanie wydłużone). Liczba wskazań: n=2.

Wynik badania PT, po badaniu dynamicznym, potwierdza zdolność metody penetracyjnej do wykrywania pęknięć zmęczeniowych inicjujących się podczas badania wytrzymałościowego haka cięgłowego. Lokalizacja wskazania na powierzchni czołowej haka jest zgodna ze strefą koncentracji naprężeń w miejscu przejścia przekrojów, opisywaną w literaturze przedmiotu dla tej grupy elementów. Obserwacja ta stanowi praktyczną weryfikację procedury NDT jako elementu opracowanej metodyki badawczej [3, 16, 42].

6.5. Badanie metodą rezonansu akustycznego (ART)

Metoda rezonansu akustycznego (ART) została włączona do opracowanej metodyki jako narzędzie przesiewowej kontroli jakości elementów sprzęgu śrubowego, uzupełniające klasyczne metody NDT. W przeciwieństwie do PT i MT wymagających przygotowania powierzchni i stosowanych wyłącznie po zakończeniu cykli obciążeń, metoda ART umożliwia szybką ocenę integralności strukturalnej elementów seryjnych już na etapie kontroli wejściowej, w czasie kilku sekund i bez ingerencji w powierzchnię próbki [62, 63].

Badania ART przeprowadzono na losowej próbie 18 sworzniach haka cięgłowego wykonanych ze stali 42CrMo4, pochodzących z tej samej partii produkcyjnej (oznaczenie producenta EA0623). Sworznie zostały uprzednio sklasyfikowane metodami nieniszczącymi zgodnie z PN-EN 15566:2023-01 jako zgodne (OK) lub niezgodne (NOK). Sworzniowi nr 18 wykonano celowe nacięcie o głębokości 5 mm w celu symulacji wady krytycznej jako punktu odniesienia dla klasyfikatora.

Stanowisko ART składało się z młotka modalnego generującego impuls mechaniczny oraz mikrofonu wysokoczułościowego rejestrującego odpowiedź akustyczną próbki. Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej (FRF) wyznaczana była przy użyciu estymatora H_1 zgodnie z teorią drgań, a analiza sygnałów prowadzona była w dziedzinie częstotliwości metodą FFT.

Do klasyfikacji wyników zastosowano dwa podejścia: klasyfikator regułowy oparty na analizie przesunięć częstotliwości drgań własnych oraz model Random Forest oparty na uczeniu maszynowym.

Metoda Akustycznego Testowania Rezonansowego (ART) polega na uderzaniu młotkiem modalnym w sworzeń haka cięgłowego w celu wygenerowania impulsu f(t), podczas gdy mikrofon o wysokiej czułości rejestruje odpowiedź x(t). Dynamiczne zachowanie układu opisane jest przez splot zgodnie z równaniem 1

$$x(t) = (h * f)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) f(t-\tau) d\tau \tag{1}$$

gdzie:

$*$: oznacza splot.

x(t): sygnał odpowiedzi akustycznej rejestrowany przez mikrofon w chwili t [Pa],

f(t): sygnał impulsu mechanicznego generowanego przez młotek modalny w chwili t [N],

h(t): funkcja odpowiedzi impulsowej badanego układu, charakteryzująca właściwości drganiowe sworznia, τ: zmienna całkowania splotu [s],

W warunkach idealnych (czyli przy minimalnym tłumieniu zewnętrznym i pomijalnym szumie tła) zmierzony sygnał x(t) ujawnia naturalne postacie drgań własnych badanego sworznia. Każdy sworzeń był wzbudzany w pięciu punktach (p1–p5) w celu uchwycenia zmienności strukturalnej (rys. 6.4), przy czym rozmieszczenie mikrofonu przedstawiono na rys. 6.5.

Zachowanie rezonansowe analizowane jest przy użyciu estymatora H_1 dla Funkcji Odpowiedzi Częstotliwościowej (FRF) opisanej w równaniu 2. Przykładowe funkcje odpowiedzi częstotliwościowej, zarejestrowane dla badanych sworzni w punktach wzbudzenia od p1 do p4, przedstawiono na rys. 6.6.

$$H_1 = \frac{G_{xx}(\omega)}{G_{xy}(\omega)} \tag{2}$$

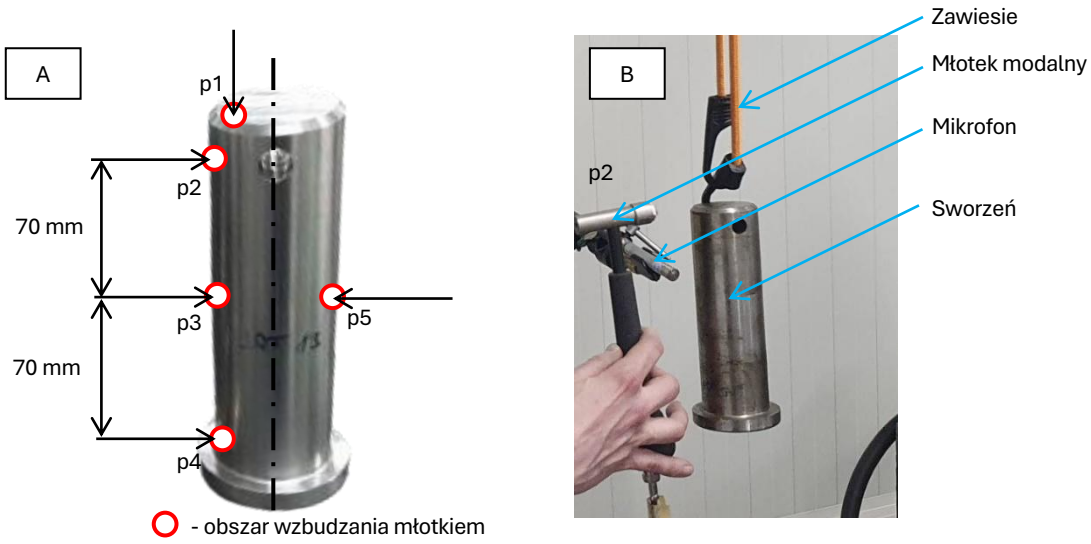
gdzie:

H_1: estymator funkcji odpowiedzi częstotliwościowej dla częstotliwości f, minimalizujący wpływ zakłóceń na sygnale wyjściowym,

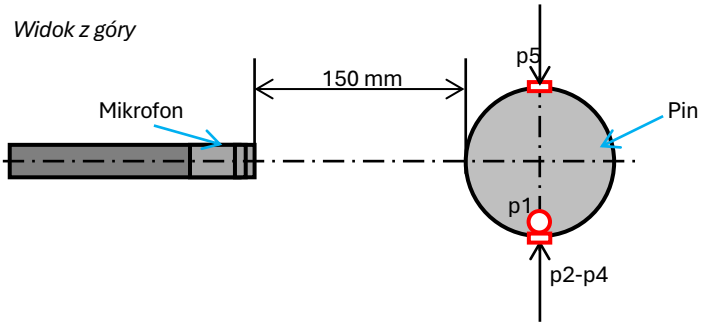
$G_{xx}(\omega)$: funkcja gęstości widmowej krzyżowej sygnału odpowiedzi x(t) i sygnału wymuszenia f(t) [Pa·N/Hz],

$G_{xy}(\omega)$: funkcja gęstości widmowej mocy (autospektrum) sygnału wymuszenia f(t) [N²/Hz],

:

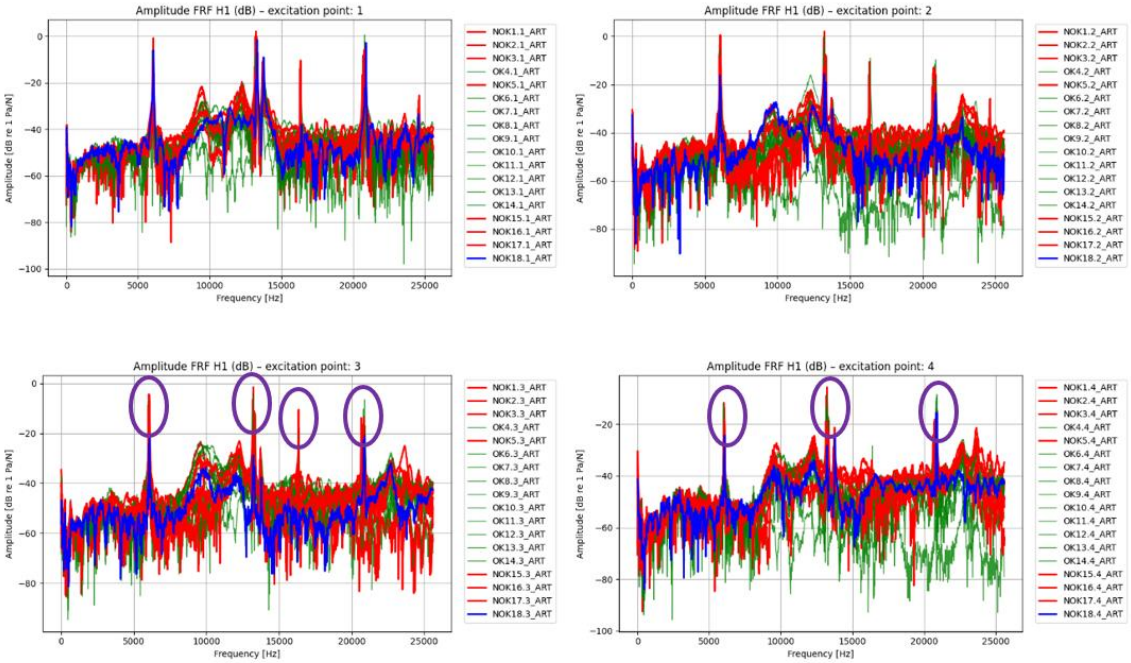


Rys. 6.4. Widok punktów wymuszenia sworznia (p1–p5) oraz kierunków (A) i widok zawieszonego sworznia podczas wzbudzania w punkcie p2



Rys. 6.5. Schemat rozmieszczenia mikrofonu względem sworznia

Elementy niezgodne (NOK) charakteryzowały się obniżoną twardością średnio 292 HBW wobec wymaganego zakresu 305–350 HBW, oraz niską udarnością na poziomie 28,33–31,44 J, poniżej progu 35 J wymaganego przez normę PN-EN 15566. Odchylenia te wynikały z wadliwego procesu obróbki cieplnej i stanowiły podstawę do odrzucenia elementów w klasyfikacji metodami nieniszczącymi.



Rys. 6.6. Funkcje odpowiedzi częstotliwościowej (FRF) sworzni dla punktów wzbudzenia p1, p2, p3 i p4. Próbka nr 18 (z celowo wykonanym karbem 5 mm) wyróżniona kolorem niebieskim. Dla punktów p1, p2 i p3 widocznych jest pięć dominujących pasm częstotliwości z pikami przekraczającymi próg 20 dB, natomiast dla punktu p4 obserwuje się jedynie trzy takie piki. [Opracowanie własne]

Analiza funkcji odpowiedzi częstotliwościowej przedstawionych na rys. 6.6 wykazała, że dla punktów wzbudzenia p1, p2 i p3 zarejestrowano po pięć wyraźnych pasm rezonansowych o amplitudach przekraczających próg 20 dB, natomiast dla punktu p4, zlokalizowanego w odmiennym obszarze geometrycznym sworznia, obserwowano jedynie trzy dominujące pasma. Próbka nr 18 klasy NOK, z celowo wykonanym karbem o głębokości 5 mm, wyróżniona kolorem niebieskim, wykazała w zakresie wysokich częstotliwości w okolicy 22,5 kHz wyraźne przesunięcia częstotliwości rezonansowych oraz zmiany amplitudy w stosunku do sworzni klasy OK, stanowiąc fizyczną podstawę dyskryminacji elementów wadliwych. Znaczne rozproszenie odpowiedzi w niskich częstotliwościach uzasadnia zastosowanie klasyfikatora Random Forest wykorzystującego pełne widmo, a nie wyłącznie wybrane piki rezonansowe.

6.6. Kryteria akceptacji i oceny wyników

Kryteria akceptacji wyników badań wynikają bezpośrednio z wymagań normy PN-EN 15566:2023-01 dla kategorii 1 MN oraz z norm przywołanych w procedurach badawczych.

Zestawienie kryteriów dla wszystkich badań eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 6.3 [1].

Tabela 6.3.

Kryteria akceptacji wyników badań eksperymentalnych dla systemu sprzęgu śrubowego 1 MN.

Badanie	Kryterium akceptacji	Norma / podstawa
Skład chemiczny	Zgodność z wymaganiami dla 42CrMo4, 41Cr4, C45, S355 wg OES	PN-EN 15566 / PBE-04
Twardość HBW	Pałąk: 305–370 HBW; Czopy: 305–350 HBW; Hak/Cięgło: wg PN-EN 15566	PN-EN ISO 6506-1 / PN-EN 15566
Udarność KV	Min. 35 J (czopy, pałąk, śruba); min. 25 J (cięgło widłowe)	PN-EN ISO 148-1 / PN-EN 15566
Segregacja siarki (Bauman)	Segregacja < 10%; prawidłowy rozkład (malejący ku krawędzi)	ISO 4968:2022
Wtrącenia niemetaliczne	Wskaźnik czystości K < 35 (dla wszystkich typów wtrąceń)	ISO 4967:2013 Metoda A
Próba statyczna: odkształcenia (475 kN)	$\Delta a,b,c,d,g \leq 0{,}2\%$ dł. pocz.; $\Delta e \leq 0{,}5$ mm; ugięcie sworzni ≤ 0,5 mm	PN-EN 15566:2023-01 pkt. F.2
Próba przy 95% obciążenia (807,5 kN)	Brak zerwania; brak jakichkolwiek pęknięć	PN-EN 15566:2023-01
Siła zrywająca	F_zryw ≥ 1000 kN; złom w łubce lub śrubie dwustronnej	PN-EN 15566:2023-01 pkt. F.3
Badanie PT po badaniu dynamicznym	Brak wskazań przekraczających klasę 1 wg PN-EN 10228-2	PN-EN 10228-2:2016
ART: klasyfikacja sworzni	Recall (czułość wykrywania NOK) = 100%; F_1-score ≥ 0,80	Procedura własna

Kryteria akceptacji zestawione w tabeli 6.3 tworzą spójny system oceny wyników badań, oparty na wymaganiach normatywnych oraz na dobrych praktykach metrologicznych. Dla badań statycznych kluczowe znaczenie ma osiągnięcie kolejnych progów obciążenia bez trwałych odkształceń przekraczających 0,2% wymiaru początkowego, a przy próbie zrywającej minimalna siła niszcząca wynosi 1000 kN. Dla badań zmęczeniowych przyjęto trzyskładnikowy zestaw kryteriów: brak pęknięć zmęczeniowych wykrywalnych metodą PT po zakończeniu programu, brak trwałych odkształceń plastycznych oraz zachowanie wytrzymałości szczątkowej na poziomie co najmniej 95% wartości nominalnej. Dla badań materiałowych zachowano bezpośrednie odniesienie do wymagań normatywnych zakresu twardości oraz minimalnej energii udarności, natomiast dla badań ART opartych na klasyfikatorze Random Forest kryterium akceptacji stanowi recall NOK, mierzący skuteczność wykrywania elementów wadliwych. Taki układ kryteriów zapewnia jednoznaczność klasyfikacji wyników oraz porównywalność między kolejnymi seriami badań, co jest kluczowe dla wiarygodności ocen w systemie zarządzania jakością laboratorium.

6.7. Dokumentacja przebiegu badań

Dokumentacja badań eksperymentalnych prowadzona jest zgodnie z wymaganiami systemu zarządzania jakością laboratorium (ISO/IEC 17025:2017) opisanymi w rozdziale 5. Każde badanie generuje zestaw zapisów jakości obejmujący: protokół stanowiskowy z przyrządu pomiarowego, wydruk z systemu komputerowego SB-1600-P-PC lub eksport TDMS ze stanowiska zmęczeniowego do formatu XLSX, karty pomiarowe z wymiarami przed obciążeniem i po nim, sprawozdania z badań laboratoryjnych (format F-LE-B-01.3) oraz raporty z badań NDT ze zdjęciami wskazań.

Identyfikowalność próbek zapewniona jest przez unikalny system znakowania elementów flamastrem niezmywalnym, obejmujący numer badania, datę oraz oznaczenie elementu w postaci numeru rysunku konstrukcyjnego. Dla haka cięgłowego zastosowano dodatkowo oznaczenie zgodne z rys. A.2 normy PN-EN 15566:2023-01, wskazujące miejsce zamocowania w otworze sworznia. Kompletny sprzęg oznaczono: 1-18-04-24-EA.SS10A.

Wyniki badań archiwizowane są w wewnętrznym systemie informatycznym przedsiębiorstwa oraz w wersji papierowej w archiwum laboratorium. Czas przechowywania zapisów jakości wynosi co najmniej 10 lat, zgodnie z wymaganiami ISO/IEC 17025:2017. Sprawozdania z badań opatrzone są podpisami osoby sporządzającej i autoryzującej, Kierownika Laboratorium, zgodnie z procedurą akredytacyjną UDT. Bez pisemnej zgody laboratorium sprawozdania nie mogą być powielane inaczej niż w całości; klauzula ta figuruje w każdym dokumencie, potwierdzając zgodność z wymaganiami poufności normy ISO/IEC 17025:2017.

7. WALIDACJA METODYKI BADAWCZEJ

Walidacja metodyki badawczej ma na celu potwierdzenie, że opracowane procedury są poprawne, powtarzalne i dają wyniki zgodne z wymaganiami norm technicznych, a zarazem miarodajnie charakteryzują badany obiekt. Niniejszy rozdział przedstawia wyniki walidacji w czterech obszarach: kalibracji i sprawdzenia aparatury pomiarowej, analizy niepewności pomiarów, weryfikacji wyników badań statycznych i materiałowych oraz walidacji skuteczności metody ART w porównaniu z klasycznymi metodami NDT [43, 68, 69].

7.1. Kalibracja i sprawdzenie aparatury

Aparatura laboratoryjna objęta jest udokumentowanym programem kalibracji opisanym w rozdziale 5. Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych przeprowadzono weryfikację stanu metrologicznego wszystkich przyrządów pomiarowych uczestniczących w programie badań. Sprawdzenie obejmowało kontrolę aktualności świadectw wzorcowania, ocenę statusu etykiet kalibracyjnych na urządzeniach oraz wykonanie pomiarów sprawdzających na wzorcach odniesienia [38, 44].

Kluczowe wyniki sprawdzenia aparatury przed badaniami:

- Stanowisko SB-1600-P-PC (Asco Rail, nr ew. ŚT/0025): ważne świadectwo wzorcowania, klasa dokładności pomiaru siły 0,5% zgodnie z ISO 7500-1. Sprawdzenie wstępne przy obciążeniu 35 kN wykazało poprawne wskazanie, zgodne z nastawem referencyjnym czujnika siły wynoszącym 35,0 ± 0,2 kN (odchyłka poniżej 0,5%, w granicach klasy dokładności stanowiska). Stanowisko dysponowało aktualnym certyfikatem wzorcowania wydanym przez Okręgowy Urząd Miar.
- Stanowisko zmęczeniowe (nr fabryczny 2.1740): świadectwo wzorcowania nr L1.401.62.1.2024 wydane przez Dyrektora Okręgowego Urzędu Miar we Wrocławiu z dnia 2 lutego 2024 r. Parametry techniczne: maksymalna siła 1600 kN, częstotliwość do 4 Hz, skok tłoka 160 mm.
- Młot Charpy HIT 450P (nr seryjny 739494): aktualne świadectwo wzorcowania. Sprawdzenie na certyfikowanych wzorcach materiałowych (CRM) wykazało

zgodność wyników z wartościami deklarowanymi przez dostawcę wzorców w granicach niepewności rozszerzonej.

- Twardościomierz DuraVision 30 G5 (nr seryjny DV250811): wzorcowanie na wzorcu 144 HBW 10/3000 (nr seryjny A15194). Wynik pomiaru na wzorcu wyniósł 144 HBW, zgodnie z wartością certyfikowaną.
- Spektrometr emisji optycznej (nr seryjny 220401): kalibracja przeprowadzana przed każdą serią badań na certyfikowanych wzorcach materiałowych (CRM) zgodnie z procedurą PBE-04. Wyniki kalibracji archiwizowane są w rejestrze spektrometru.
- Termohigrometry (nr seryjne 0222, 1121): kalibracja roczna. Odczyty temperatury podczas badań mieściły się w zakresie 21,3–22,8°C, a więc w granicach dopuszczalnych (20 ± 5°C zgodnie z programem badań). Odczyty wilgotności względnej wynosiły 45–55% RH.

Wszystkie urządzenia dysponowały aktualnymi statusami metrologicznymi na dzień przeprowadzenia badań. Żaden z przyrządów nie wymagał wycofania z procedury badawczej ani ponownego wzorcowania w trakcie realizacji programu badań.

7.2. Analiza niepewności pomiarów

Analizę niepewności pomiarów przeprowadzono zgodnie z międzynarodowym przewodnikiem GUM (JCGM 100:2008), wydanym wspólnie przez BIPM, ISO, IEC oraz ILAC, a także zgodnie z dokumentem wytycznym ILAC-G17 (Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing), dla kluczowych wielkości mierzonych w programie badań statycznych i materiałowych [68, 70].

Niepewność pomiaru siły na stanowisku SB-1600-P-PC wyznaczono z uwzględnieniem czterech składowych:

- u_1 (niepewność wzorcowania): u_1= 0,25% (k= 2 ze świadectwa wzorcowania, przeliczone na niepewność standardową u_1= 0,125%).
- u_2 (powtarzalność wskazań): wyznaczona eksperymentalnie z 5 pomiarów sprawdzających przy obciążeniu 475 kN; odchylenie standardowe wyniosło s = 1,8 kN, co daje u_2= s/√5 = 0,81 kN = 0,17%.
- u_3 (rozdzielczość układu akwizycji danych): rozdzielczość wyświetlacza 0,1 kN; u_3= 0,1/(2√3)= 0,029 kN (zaniedbywalnie mała).

- u_4 (dryft między kalibracjami): oszacowany na podstawie historii kalibracji jako 0,1% wartości mierzonej; u_4= 0,475 kN przy obciążeniu 475 kN.

Łączona obliczona niepewność standardowa wynosi około 1,09 kN przy obciążeniu 475 kN. Rozszerzona niepewność pomiarowa przy współczynniku rozszerzenia k= 2 wynosi U(F) = 2,18 kN ≈ 0,46% wartości mierzonej. Wynik ten potwierdza, że stanowisko spełnia wymagania klasy 0,5% zgodnie z ISO 7500-1:2018 [38].

Dla pomiaru twardości HBW 10/3000 głównymi składowymi niepewności są: niepewność wzorcowania twardościomierza (u ≈ 1,5 HBW na poziomie 144 HBW) oraz powtarzalność pomiarów, wyznaczona jako średnia z 3 pomiarów na każdym elemencie. Rozszerzona niepewność pomiaru twardości wynosi U(HBW) ≈ 3–4 HBW przy k = 2, co jest wartością mniejszą niż połowa dopuszczalnych zakresów normatywnych, przykładowo dla czopów obrotowych zakres wynosi 305–350 HBW, co odpowiada tolerancji ±22,5 HBW. Wartości składowych niepewności wyznaczono zgodnie z PN-EN ISO 6506-1 na podstawie świadectwa wzorcowania twardościomierza oraz analizy powtarzalności serii pomiarów, a łączną niepewność obliczono metodą propagacji zgodnie z GUM (JCGM 100:2008) [68, 71].

Niepewność pomiaru energii udarności młotem Charpy (HIT 450P) wyznaczono na podstawie wyników badań na wzorcach CRM. Średnia bezwzględna różnica między wynikiem a wartością certyfikowaną wyniosła 1,2 J przy energii ≈ 80 J, co odpowiada 1,5%. Rozszerzona niepewność wynosi U(KV) ≈ 2,5 J przy k = 2. Wynik ten ma istotne znaczenie przy ocenie granicznych wartości udarności, przykładowo dla czopów obrotowych obowiązuje minimum 35 J, a margines między uzyskanym wynikiem a progiem normatywnym jest wystarczający do jednoznacznej klasyfikacji. Zestawienie rozszerzonych niepewności przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1.

Zestawienie rozszerzonych niepewności pomiarowych dla kluczowych wielkość mierzonych

Wielkość mierzona	**Wartość mierzona / zakres**	**Niepewność rozszerzona U (k=2)**	**Wymaganie normatywne**
Siła (stanowisko SB-1600-P-PC)	475 kN (50% F_min)	U = 2,18 kN (0,46%)	Klasa 0,5% wg ISO 7500-1
Siła (stanowisko SB 1600-P-PC)	807,5 kN (95% F_min)	U = 3,71 kN (0,46%)	Klasa 0,5% wg ISO 7500-1
Twardość HBW 10/3000	144-359 HBW (zakres badan)	U ~ 3-4 HBW	Wg PN-EN 15566 (np. 305-350 HBW)
Energia udarności KV	11-107 J (zakres badan)	U ~ 2,5 J	Min. 25-35 J wg PN-EN 15566
Długość / wymiar liniowy (suwmiarka)	288-932 mm (karta pomiarowa)	U ~ 0,05 mm	Delta <= 0,2% długości początkowej

Wyniki zestawione w tabeli 7.1 potwierdzają, że wszystkie stanowiska pomiarowe laboratorium spełniają wymagania normatywne stawiane badaniom sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN. Dla pomiarów siły na stanowisku SB-1600-P-PC względna niepewność standardowa wynosząca 0,46% mieści się w klasie dokładności 0,5% zgodnie z ISO 7500-1, zapewniając wystarczającą precyzję zarówno przy 50% F_{min} (475 kN, U = 2,18 kN), jak i przy 95% F_{min} (807,5 kN, U = 3,71 kN). Dla pomiarów twardości HBW 10/3000 niepewność na poziomie 3–4 HBW jest znacznie mniejsza od szerokości pasma normatywnego 305–350 HBW, co pozwala na jednoznaczną klasyfikację elementów zgodnie z wymaganiem PN-EN 15566. Dla energii udarności KV niepewność 2,5 J stanowi mniej niż 10% wymaganego minimum wynoszącego 25–35 J, natomiast niepewność pomiaru wymiarów liniowych na poziomie 0,05 mm zapewnia wielokrotny zapas względem kryterium akceptacji odkształceń nieprzekraczających 0,2% wymiaru początkowego. Uzyskane parametry metrologiczne potwierdzają zdolność laboratorium do realizacji pełnego programu badań przewidzianego normą PN-EN 15566:2023-01 z zachowaniem wymaganej wiarygodności pomiarowej.

7.3. Weryfikacja wyników badań statycznych i zmęczeniowych

Weryfikację poprawności wyników badań statycznych przeprowadzono przez ocenę ich zgodności z kryteriami normy PN-EN 15566:2023-01 oraz przez porównanie ze wskazaniami modeli numerycznych i danymi literaturowymi dotyczącymi sprzęgów kategorii 1 MN [1, 8, 9].

Wyniki próby statycznej kompletnego sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN (próbka nr 1-18-04-24-EA.SS10A, wytworzona 18.04.2024):

Próba rozciągania przy 475 kN (60 s): wszystkie mierzone wymiary mieszczą się w dopuszczalnych granicach odkształceń. Maksymalna zmiana wymiaru g (długość całkowita): 932,38 mm → 932,70 mm, Δ = 0,32 mm = 0,034% długości początkowej, przy kryterium ≤ 0,2%. Zmiana szerokości e pałąka: 116,24 → 116,25 mm, Δ = 0,01 mm, przy kryterium ≤ 0,5 mm. Zmiana pozostałych wymiarów a, b, c, d poniżej progu detekcji. Wynik próby: zgodność z wymaganiami załącznika F normy PN-EN 15566:2023-01 dotyczącymi maksymalnych dopuszczalnych odkształceń po obciążeniu 50% siły zrywającej [1]:

- próba przy 95% obciążenia zrywającego (807,5 kN, 3 min): sprzęg nie uległ zerwaniu i nie stwierdzono pęknięć. Wynik: zgodny z PN-EN 15566:2023-01 [1, 3],
- próba zrywania: wartość siły niszczącej wyniosła 1051 kN. Złom nastąpił w łubce sprzęgu śrubowego, zgodnie z przewidzianym przez normę mechanizmem zerwania jako najsłabszym elemencie systemu. Kryterium normatywne: $F_{zryw} \geq 1000$ kN. Uzyskana wartość przekracza wymaganie o 5,1%. Wynik: zgodny z PN-EN 15566:2023-01 [1, 3].

Wartość siły zrywającej 1051 kN pozostaje w zgodności z wynikami opublikowanymi w literaturze dla analogicznych sprzęgów kategorii 1 MN. Aniszewicz i Kowalczyk [9] uzyskali wartości Fzryw w zakresie 1050–1120 kN dla sprzęgów tej samej kategorii [9]. Vukšić Popović i współpracownicy potwierdzili, że złom następuje konsekwentnie w łubkach jako celowo najsłabszym elemencie systemu [15]. Zbieżność wyników własnych z danymi literaturowymi stanowi dodatkowe potwierdzenie poprawności metodyki badawczej i prawidłowego działania stanowiska [3].

Wyniki badań materiałowych potwierdzają zgodność z wymaganiami normy PN-EN 15566:2023-01 dla wszystkich przebadanych elementów, z jednym wyjątkiem wymagającym szczegółowej analizy:

1. Hak cięgłowy (42CrMo4, nr wytopu 3200500): skład chemiczny zgodny, segregacja siarki poniżej 10%, wskaźnik czystości K = 24 < 35. Twardość: 173 HBW, w dolnej granicy zakresu dopuszczalnego zgodnie z normą.
2. Czop obrotowy prawy (42CrMo4): KV = 90,34 J i 99,01 J przy wymaganym minimum 35 J, kryterium spełnione ze znaczną nadwyżką. Twardość HBW = 335, przy zakresie normatywnym 305–350 HBW; wynik mieści się w zakresie, jednak przy górnej jego granicy. Skład chemiczny 42CrMo4 potwierdzony. Stosunkowo wysoka twardość, choć zgodna z normą, wskazuje na intensywne parametry obróbki

cieplnej (hartowanie i odpuszczanie); nie wpływa to negatywnie na udarność: wartość KV pozostaje wysoka. Element spełnia wszystkie wymagania normatywne, a uzyskane wyniki potwierdzają stabilność procesu produkcji dostawcy.

3. Czop obrotowy lewy (42CrMo4): KV = 77,64 J i 78,09 J przy wymaganym minimum 25 J, kryterium spełnione. Twardość HBW = 330 i 335, przy zakresie normatywnym 305–350 HBW, wynik w zakresie. Skład chemiczny zgodny.
4. Cięgło widłowe (C45): skład chemiczny potwierdzony (C = 0,173%), segregacja siarki poniżej 10%, K = 15,8 < 35.
5. Łubka (41Cr4): KV powyżej wymagania (szczegółowe wyniki w protokole SZB-LU-TDT-04-24), K = 31 < 35.
6. Śruba dwustronna (42CrMo4): KV powyżej wymagania, K = 26 < 35, skład chemiczny zgodny.

7.4. Walidacja skuteczności metod NDT (ART vs tradycyjne)

Walidację skuteczności metody ART przeprowadzono w ramach badań własnych autora na zbiorze 18 sworzniach haka cięgłowego, uprzednio sklasyfikowanych metodami nieniszczącymi zgodnie z PN-EN 15566:2023-01. Porównanie skuteczności trzech podejść klasyfikacyjnych zastosowanych w badaniach ART przedstawiono w tabeli 7.2:

Tabela 7.2.

Wyniki klasyfikacji sworzni haka cięgłowego metoda ART., porównanie podejść klasyfikacyjnych.

Metoda klasyfikacji	Dokładność (Accuracy)	Recall NOK	Precision NOK	F1-Score
Klasyfikator regułowy (5 częstotliwości, próg 25 dB)	83,3%	75%	100%	0,86
Random Forest (cechy z 5 punktów wzbudzenia)	83,3%	100%	67%	0,80
Polaczenie obu podejść (Hybrid)	~90% (est.)	100%	>75%	>0,85

Kluczowym wynikiem z perspektywy bezpieczeństwa kolejowego jest wartość recall dla klasy NOK modelu Random Forest wynosząca 100%: wszystkie wadliwe sworznie zostały wykryte, żadna wada nie przeszła przez filtr ART nierozpoznana. Jest to warunek konieczny dla metody pretendującej do roli kontroli przesiewowej w aplikacjach krytycznych dla bezpieczeństwa. Klasyfikator regułowy osiągnął recall NOK = 75%, ponieważ 2 z 8 wadliwych

sworzni nie zostały wykryte. Wynik ten wskazuje na ograniczenia sztywnych progów decyzyjnych przy zróżnicowanym zbiorze wad materiałowych i uzasadnia stosowanie klasyfikatora uczącego się (Random Forest) jako podstawowego narzędzia klasyfikacji w opracowanej metodyce ART, przy jednoczesnym utrzymaniu klasyfikatora regułowego jako pomocniczego mechanizmu wstępnej selekcji.

Porównanie ART z klasycznymi metodami NDT stosowanymi do kontroli sworzni:

- Badanie twardości (HBW 10/3000): wykrywa wady obróbki cieplnej przez pomiar twardości, lecz jest badaniem punktowym, nie charakteryzuje całej objętości elementu. Czas badania: około 2 min/szt. ART charakteryzuje cały element w jednym przebiegu w czasie poniżej 30 s/szt.
- Badanie udarności Charpy: jedyna metoda niszcząca w programie dostarcza istotnych danych o kruchości materiału, lecz nieodwracalnie niszczy próbkę. ART umożliwia wstępne przesiewanie przed selekcją elementu do badań niszczących, potencjalnie redukując liczbę zbędnych zniszczeń.
- Badanie penetracyjne PT: wykrywa nieciągłości powierzchniowe, lecz wymaga przygotowania powierzchni i jest czasochłonne, około 45 min/szt. z uwzględnieniem czasów penetracji i wywoływania. ART jest metodą bezdotykową i nie wymaga przygotowania powierzchni.
- Badanie ultradźwiękowe UT: wykrywa wady objętościowe i podpowierzchniowe, lecz wymaga sprzężenia akustycznego i wyższych kwalifikacji operatora (certyfikat II stopnia zgodnie z ISO 9712). ART nie wymaga sprzężenia akustycznego i może być zautomatyzowane.

Analiza kosztów i czasu czterech strategii kontroli jakości: Standard, ART, Hybrid oraz ART Full Skip wykazała, że strategia Hybrid, łącząca ART jako preselekcję z potwierdzającymi badaniami niszczącymi dla odrzuconych elementów, stanowi optymalne rozwiązanie kompromisowe między bezpieczeństwem a efektywnością ekonomiczną. Strategia ART Full Skip zredukowała koszty inspekcji o ponad 90% i czas badania o ponad 50%, jednak jej pełne wdrożenie w aplikacjach kolejowych wymaga zgromadzenia większego zbioru danych walidacyjnych oraz formalnej walidacji jako metody uzupełniającej zgodnie z ISO/IEC 17025.

7.5. Doskonalenie procedur na podstawie wyników walidacji

Na podstawie wyników walidacji wprowadzono następujące usprawnienia do opracowanej metodyki badawczej:

1. Rozszerzenie procedury pomiaru twardości dla czopów obrotowych: wynik HBW = 335 dla czopa prawego, mieszczący się w górnej części zakresu normatywnego 305–350 HBW, potwierdził zasadność stosowania pomiarów w kilku punktach przekroju dla pełnej charakterystyki elementu. Do procedury badania wejściowego dodano wymóg trzykrotnego pomiaru twardości w różnych punktach przekroju, a nie tylko w jednym.
2. Rozszerzenie procedury PT o inspekcję po kondycjonowaniu: wyniki potwierdziły, że badanie penetracyjne przeprowadzone po kondycjonowaniu, czyli po pierwszym etapie programu zmęczeniowego dostarcza informacji o stanie wyjściowym próbki przed pełnym programem obciążeń. Procedura została uzupełniona o ten krok jako obligatoryjny.
3. Wzbogacenie analizy ART o punkt wzbudzenia p4: analizy wykazały, że punkt wzbudzenia p4 generuje mniej wyraźne piki w odpowiedzi elementów niezgodnych (NOK), co może wskazywać na lokalną wrażliwość geometryczną. Procedura ART została uzupełniona o notę dotyczącą interpretacji wyników z p4 jako drugorzędnych.

Dokumentacja harmonogramu kalibracji: w wyniku przeglądu stanu metrologicznego aparatury wprowadzono ujednolicony harmonogram kalibracji rocznych, archiwizowany w systemie SZJ jako osobny rejestr z automatycznym przypomnieniem 30 dni przed upływem ważności świadectwa.

8. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA DANYCH

W rozdziale tym przedstawione i omówione są wyniki wszystkich badań eksperymentalnych przeprowadzonych w ramach studium przypadku systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN. Zakres analizy uzyskanych wyników obejmuje: próbę statyczną kompletnego sprzęgu, badania właściwości materiałowych i strukturalnych elementów systemu, wyniki badań nieniszczących oraz wyniki badań metodą rezonansu akustycznego (ART). Dane przedstawione w niniejszym rozdziale stanowią empiryczną podstawę weryfikacji hipotez badawczych sformułowanych w rozdziale 1.

8.1. Wyniki badań statycznych

Próbę statyczną kompletnego systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN przeprowadzono na stanowisku SB-1600-P-PC zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 6. Wyniki trzech etapów próby przedstawiono poniżej.

Etap 1: Próba rozciągania przy połowie minimalnego obciążenia niszczącego (475 kN, 60 s). Zmierzone odkształcenia trwałe po odciążeniu zestawiono w tabeli 8.1.

Wszystkie zmierzone odkształcenia mieszczą się w granicach dopuszczalnych określonych przez normę PN-EN 15566:2023-01. Maksymalne zaobserwowane odkształcenie liniowe wyniosło 0,034% długości początkowej dla wymiaru d, całkowitej długości sprzęgu, co stanowi około 17% dopuszczalnego limitu. Brak trwałych odkształceń przekraczających kryterium potwierdza, że system sprzęgu zachowywał się sprężyście w całym zakresie obciążenia próbnego [1]. Wyniki przedstawiono w tabeli 8.2.

Tabela 8.1.

Wyniki pomiarów odkształceń sprzęgu śrubowego przy połowie minimalnego obciążenia niszczącego (475 kN).

Wymiar (wg rys. F.1 normy)	**Wartość przy napr. wstępnym 35 kN [mm]**	**Wartość przy F = 475 kN [mm]**	**Zmiana delta [mm]**	**Zmiana delta [%]**	**Kryterium [%]**	**Wynik**
a	288,19	288,25	0,06	0,021	<=0,2	OK
b	409,71	409,82	0,11	0,027	<=0,2	OK
c	238,10	238,16	0,06	0,025	<=0,2	OK
d	932,38	932,70	0,32	0,034	<=0,2	OK
e (szerokość pałąka)	116,24	116,25	0,01	--	<=0,5 mm	OK
f	413,89	413,96	0,07	0,017	<=0,2	OK
g	415,29	415,35	0,06	0,014	<=0,2	OK
d1	44,9	44,9	0,00	0,000	<=0,2	OK
d1/2	21,7	21,8	0,10	--	ugięć <=0,5 mm	OK
d2	54,92	54,92	0,00	0,000	<=0,2	OK
d2/4	13,03	13,30	0,27	--	ugięć <=0,5 mm	OK

Tabela 8.2.

Podsumowanie wyników próby statycznej kompletnego sprzęgu śrubowego 1 MN.

Etap próby	**Obciążenie [kN]**	**Czas [s]**	**Wynik**	**Kryterium wg normy**
Próba rozciągania (polowa F_{min})	475	60	Brak odkształceń ponad limitem	Delta <= 0,2%; ugięć <= 0,5 mm
Próba przy 95% F_{min}	807,5	180	Brak zerwania, brak pęknięć	Brak zerwania i pęknięć
Próba zrywania	1051 (siła niszcząca)	--	Złom lubki (element docelowy)	F_{zryw} >= 1000 kN; złom w łubce/śrubie

Etap 2: Próba przy 95% obciążenia zrywającego (807,5 kN, 3 min). Po utrzymaniu obciążenia przez 3 minuty sprzęg nie uległ zerwaniu i nie ujawnił żadnych pęknięć. Wynik: zgodny z PN-EN 15566:2023-01 [1].

Etap 3: Próba zrywania. Przy liniowym wzroście siły do wartości 1051 kN nastąpił złom łubki sprzęgu śrubowego, elementu zaprojektowanego jako najsłabszy w systemie, którego kontrolowane zniszczenie chroni ostoję wagonu przed uszkodzeniem. Siła zrywająca 1051 kN przekracza minimalne wymaganie normy (1000 kN) o 5,1%. Wynik: zgodny z PN-EN 15566:2023-01 [1].

8.2. Wyniki badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN przeprowadzono zgodnie z programem EA-PB-D-SSS-02/2024, opisanym szczegółowo w rozdziałach 6 i 7. Pełny program obejmujący 2150 bloków obciążeń (łącznie 1 500 000 cykli) został zrealizowany, symulując 30-letni okres eksploatacji sprzęgu. Program składał się z trzech etapów: kondycjonowania (obciążenie 640 kN), badania dynamicznego (2150 bloków po 698 cykli ΔF_1 = 170 kN i 1 cykl ΔF_2 = 575 kN) oraz wyznaczania wytrzymałości szczątkowej (808 kN przez 3 minuty). Wszystkie etapy zostały zakończone zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 15566:2023-01. Wyniki badań zmęczeniowych wraz z analizą stanu elementów sprzęgu po zakończeniu programu przedstawiono w kolejnych podrozdziałach 8.2 oraz 8.3.

W ramach etapu kondycjonowania sprzęg został obciążony jednorazowo do wartości 640 kN, co odpowiada 75% minimalnego obciążenia niszczącego, zgodnie z Tabelą A.1 normy PN-EN 15566:2023-01. Kondycjonowanie przebiegło bez zdarzeń niepożądanych, nie stwierdzono pęknięć ani odkształceń trwałych powyżej wartości dopuszczalnych. Bezpośrednio po kondycjonowaniu przeprowadzono próbę penetracyjną PT haka cięgłowego, której wyniki opisano w podrozdziale 8.3.

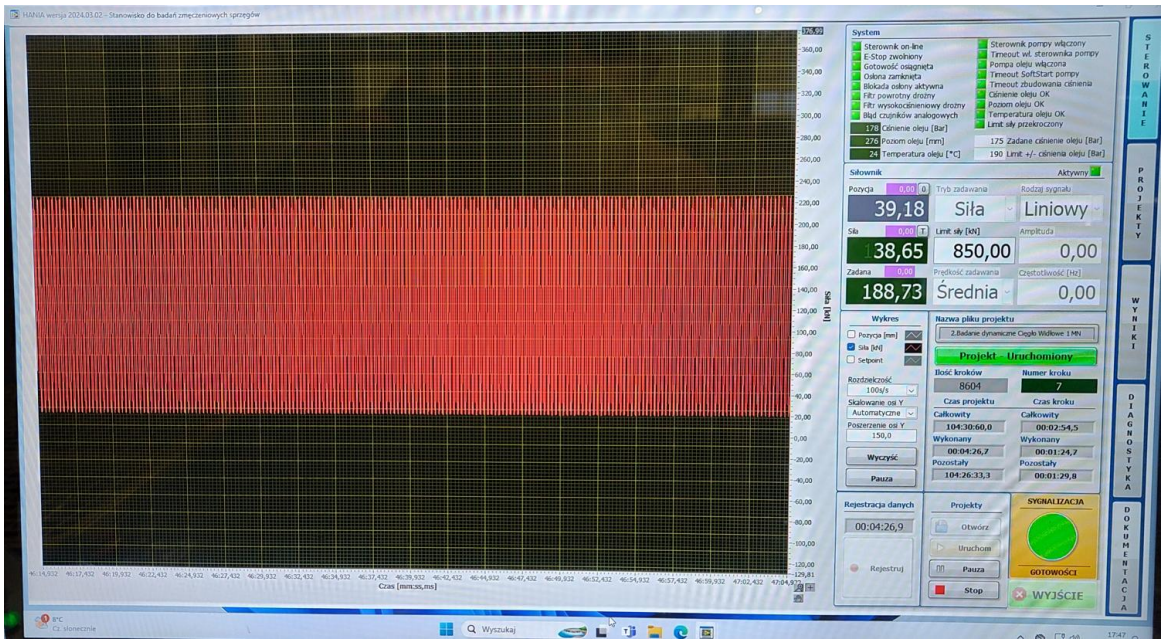
Parametry programu zmęczeniowego dla systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN zestawiono w tabeli 6.2 (rozdział 6). Całkowity czas realizacji pełnego programu, przy częstotliwości 4 Hz i strukturze bloków obejmującej 698 cykli K1 oraz 1 cykl K2, wyniósł około 105 godzin ciągłej pracy stanowiska dla samych cykli zmęczeniowych, z uwzględnieniem przerw technologicznych.

Dodatkowo wykonano również badania zmęczeniowe dla wybranych elementów, m.in. Łubki oraz sworznia haka cięgłowego, które widoczne są na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Widok pękniętego sworznia haka cięgłowego oraz pałąka po zakończeniu programu badania zmęczeniowego (1 500 000 cykli zgodnie z PN-EN 15566:2023-01). [Opracowanie własne]

Przebieg realizacji programu zmęczeniowego był na bieżąco rejestrowany przez system sterująco-pomiarowy stanowiska. Przykładowy zrzut ekranu systemu podczas realizacji badania dynamicznego, obrazujący przebieg siły w funkcji czasu oraz parametry sterowania, przedstawiono na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Zrzut ekranu systemu sterująco-pomiarowego HANIA podczas realizacji badania zmęczeniowego sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN (projekt „Badanie dynamiczne Cięgło Widłowe 1 MN"). Widoczny przebieg siły w funkcji czasu, oscylujący w zakresie cykli niskiej amplitudy ΔF_1 oraz cykli wysokiej amplitudy ΔF_2 = 575 kN, przy limicie siły 850 kN. [Opracowanie własne]

8.3. Wyniki badań nieniszczących po programie zmęczeniowym

Badanie penetracyjne PT haka cięgłowego przeprowadzono dwukrotnie: po etapie kondycjonowania jako badanie wstępne oraz po zakończeniu etapu badania dynamicznego. Szczegóły metodyki opisano w podrozdziale 6.4. Wyniki badania PT haka cięgłowego nr 4-13-09-24-EA.UC10-HC01-O przedstawiono w tabeli 8.3.

Tabela 8.3.

Wyniki badań penetracyjnych PT haka cięgłowego przed i po badaniu dynamicznym.

Etap badania	Data	Temp. [°C]	Oświetlenie [lux]	Czas penetracji [min]	Czas wywolywania [min]	Wynik
Po kondycjonowaniu (krok 1)	13.09 .2024	21,7	589	15	15	Brak nieciągłości
Po badaniu dynamicznym (krok 2)	18.09 .2024	21,6	560	15	15	Wskazanie liniowe (opis poniżej)

Po badaniu dynamicznym ujawniono wskazanie liniowe zlokalizowane na powierzchni czołowej haka. Szczegółowe parametry wskazania:

- L_1 (długość wskazania): 18 mm
- L_2 (szerokość wskazania): 9 mm
- L_c (długość całkowita wskazania): 27 mm
- Liczba wskazań n: 2

Klasyfikacja wg PN-EN 10228-2: klasa jakości 1 dla parametrów L1 i L2; wskazanie mieści się w klasie dopuszczalnej. Wskazanie liniowe L_1 = 18 mm zlokalizowano na powierzchni czołowej haka (rys. 8.3), w strefie koncentracji naprężeń identyfikowanej w literaturze przedmiotu jako obszar najwyższych naprężeń rozciągających w hakach cięgłowych tej klasy. Inicjacja pęknięcia w tym miejscu jest zgodna z mechanizmami degradacji opisanymi w podrozdziale 3.4 oraz z wynikami opublikowanymi przez Vukšić Popović i współpracownicy [15]. Wykrycie wskazania po badaniu dynamicznym potwierdza przydatność metody PT jako narzędzia monitorowania stanu technicznego elementów sprzęgu po cyklach obciążenia zmęczeniowego [16, 50].



Rys. 8.3. Wskazanie liniowe L1 = 18 mm na powierzchni czołowej haka [Opracowanie własne]

8.4. Wyniki badania rezonansu akustycznego

Badania ART przeprowadzono na próbie 18 sworzniach haka cięgłowego ze stali 42CrMo4 (oznaczenie EA0623), uprzednio sklasyfikowanych metodami nieniszczącymi jako zgodne OK (n = 10), lub niezgodne, NOK (n = 8). Na sworzniu nr 18 wykonano celowe nacięcie o głębokości 5 mm jako kontrolę dodatnią, stanowiącą wzorzec wady krytycznej.

- elementy klasy NOK charakteryzowały się obniżonymi parametrami mechanicznymi w stosunku do wymagań PN-EN 15566,
- średnia twardość elementów NOK: 292 HBW, przy wymaganym zakresie 305–350 HBW poniżej dolnej granicy,
- średnia udarność elementów NOK: 28,33–31,44 J, przy wymaganym minimum 35 J poniżej progu.

Elementy OK: twardość i udarność w granicach normatywnych

Analiza sygnałów ART wykazała wyraźne różnice w funkcjach odpowiedzi częstotliwościowej (FRF) między elementami zgodnymi i niezgodnymi. Zidentyfikowano łącznie 131 unikalnych częstotliwości w elementach NOK i 119 w elementach OK, bez części wspólnych na poziomie częstotliwości całkowitych, co wskazuje na wyraźną separację

spektralną między klasami. Różnice amplitudowe dla wspólnych pików osiągały wartości do 32 dB. Wyniki klasyfikacji zestawiono w tabeli 8.4.

Tabela 8.4.

Wyniki klasyfikacji sworzni haka cięgłowego metoda ART.

Metoda	Dokładność (Accuracy)	Recall OK	Recall NOK	Precision NOK	F1-Score NOK	(TP/FP/FN/TN)
Klasyfikator regułowy (5 częstotliwości, głosowanie)	83,3%	100%	75%	100%	0,86	TP=6, FP=0, FN=2, TN=10
Random Forest (cechy z 5 pkt. wzbudzenia)	83,3%	83%	100%	67%	0,80	TP=8, FP=4, FN=0, TN=6 (zb. test)

Wynik recall NOK= 100% dla modelu Random Forest oznacza, że wszystkie 8 wadliwych sworzni zostało poprawnie zidentyfikowanych, żadna wada nie została przeoczona przez system ART. Jest to najistotniejszy parametr z perspektywy bezpieczeństwa: wynik fałszywie negatywny, czyli wadliwy element zaklasyfikowany jako zgodny, stanowiłby bezpośrednie zagrożenie dla integralności sprzęgu w eksploatacji.

Analiza kosztów czterech strategii kontroli jakości wykazała, że strategia Hybrid-łącząca ART jako preselekcję z potwierdzającymi badaniami niszczącymi dla odrzuconych elementów redukuje skumulowane koszty inspekcji o około 52% względem strategii „Standard" w perspektywie pięcioletniej, przy zachowaniu pełnej wykrywalności wad. Strategia ART Full Skip redukuje koszty o ponad 90%, lecz jej wdrożenie w aplikacjach kolejowych wymaga zgromadzenia większego zbioru walidacyjnego.

8.5. Dyskusja wyników badań statycznych, zmęczeniowych i nieniszczących

Wyniki badań statycznych systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN potwierdzają, że sprzęg spełnia wymagania normy PN-EN 15566:2023-01 we wszystkich sprawdzanych obszarach. Siła zrywająca 1051 Kn, o 5,1% powyżej limitu normatywnego oraz lokalizacja złomowania w łubce jako elemencie docelowym wskazują na prawidłowe proporcje wytrzymałościowe między elementami systemu i skuteczność przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego. Wyniki są zbliżone do wartości raportowanych w literaturze dla analogicznych sprzęgów: Aniszewicz i Kowalczyk uzyskali Fzryw w zakresie 1050–1120 kN [9], natomiast Vukšić Popović i współpracownicy potwierdzili konsekwentny złom łubek [15].

Wyniki badań materiałowych potwierdziły zgodność wszystkich elementów z wymaganiami normatywnymi. Twardości obu czopów obrotowych (czop lewy HBW = 330 i 335, czop prawy HBW = 335) mieszczą się w zakresie normatywnym 305–350 HBW, przy zachowaniu wysokiej udarności elementów (KV w zakresie 77–99 J, przy wymaganym minimum 25–35 J w zależności od elementu). Wyniki czopa prawego przy górnej granicy zakresu, choć zgodne z normą, stanowiły przesłankę do rozszerzenia procedury pomiaru twardości o trzykrotny pomiar w różnych punktach przekroju, umożliwiający pełną charakterystykę rozkładu twardości w objętości elementu. Zastosowanie tej procedury w laboratorium ilustruje praktyczną wartość systematycznej kontroli wejściowej materiałów przewidzianej w opracowanej metodyce badawczej [1].

Wyniki badań PT ujawniły pęknięcie zmęczeniowe haka po zakończeniu pełnego programu zmęczeniowego (1 500 000 cykli), którego nie obserwowano przed badaniem dynamicznym (po etapie kondycjonowania). Wskazanie liniowe L_1 = 18 mm, L_2 = 9 mm, L_c = 27 mm, sklasyfikowane jako klasa 1 zgodnie z PN-EN 10228-2, zlokalizowane jest w strefie koncentracji naprężeń przy powierzchni czołowej haka. Wykrycie tego pęknięcia metodą PT po pełnym programie zmęczeniowym potwierdza zdolność metody do identyfikacji inicjacji pęknięć zmęczeniowych na stosunkowo wczesnym etapie ich propagacji [3, 50].

Wyniki ART potwierdzają hipotezę H3, sformułowaną w rozdziale 1, w części dotyczącej przesiewowego wykrywania wad materiałowych: model Random Forest osiągnął recall NOK= 100% przy dokładności ogólnej 83,3%, co jest wynikiem obiecującym dla metody o tak niskim koszcie i czasie wykonania. Istotne jest jednak zaznaczenie ograniczeń: zbiór walidacyjny liczył zaledwie 18 elementów, co nie pozwala na wyciąganie mocnych wniosków statystycznych. Rozszerzenie zbioru danych do co najmniej 100 elementów, z uwzględnieniem różnych typów wad i partii produkcyjnych, jest warunkiem koniecznym przed formalnym wdrożeniem ART jako metody certyfikowanej zgodnie z ISO/IEC 17025 [3, 43].

8.6. Analiza niepewności wyników badań

Szczegółowa analiza niepewności pomiarów opisana jest w rozdziale 7.2. W kontekście prezentowanych wyników najistotniejsze obserwacje i spostrzeżenia są następujące:

1. Siła zrywająca 1051 kN: przy rozszerzonej niepewności U(F) ≈ 0,46% wartość ta mieści się w przedziale [1046, 1056] kN z prawdopodobieństwem 95%. Nawet

dolna granica przedziału (1046 kN) przekracza kryterium normatywne (1000 kN) ze znaczną nadwyżką, co potwierdza jednoznaczną zgodność wyniku [38, 68].

2. Odkształcenia trwałe (tabela 8.1): maksymalna wartość $\Delta = 0{,}32$ mm dla wymiaru d, przy niepewności pomiaru suwmiarki $U \approx 0{,}05$ mm. Wynik jednoznacznie wskazuje na brak przekroczenia kryterium, limit wynosi $\Delta \leq 0{,}2\% \times 932$ mm = 1,86 mm. Margines bezpieczeństwa przekracza 1,5 mm.
3. Twardość HBW czopa prawego (335 HBW): przy U(HBW) ≈ 3–4 HBW wartość ta mieści się w zakresie normatywnym 305–350 HBW nawet z uwzględnieniem niepewności; przedział [331, 339] HBW pozostaje w całości poniżej górnej granicy zakresu wynoszącej 350 HBW. Wynik plasuje się w górnej części dopuszczalnego przedziału, co uzasadnia stosowanie rozszerzonej procedury pomiaru twardości w kilku punktach przekroju.
4. Wyniki ART: ze względu na małe n = 18 przedział ufności dla recall = 100% na poziomie 95% obejmuje wartości od około 63% do 100% zgodnie z metodą Wilsona. Wynik jest obiecujący, lecz wymaga większego zbioru danych dla mocniejszych wniosków statystycznych.

9. DYSKUSJA WYNIKÓW

Niniejszy rozdział podsumowuje i interpretuje wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w rozdziale 8 w szerszym kontekście: zgodności z wymaganiami norm technicznych, porównania skuteczności zastosowanych metod badawczych, analizy ograniczeń badań oraz implikacji dla badania innych komponentów taboru szynowego.

9.1. Ocena zgodności wyników z wymaganiami norm

Ocenę zgodności wyników badań statycznych, materiałowych i NDT z wymaganiami normatywnymi systemu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN przeprowadzono z uwzględnieniem normy PN-EN 15566:2023-01 jako podstawowego dokumentu odniesienia oraz norm harmonizowanych [1].

Badania statyczne kompletnego sprzęgu śrubowego wykazały pełną zgodność we wszystkich trzech etapach próby. Siła zrywająca 1051 kN, przy kryterium wynoszącym co najmniej 1000 kN, wraz z lokalizacją złomowania w łubce, elemencie celowo zaprojektowanym jako najsłabszy, potwierdza prawidłową hierarchię wytrzymałościową systemu i zgodność z wymaganiami określonymi w załączniku F normy PN-EN 15566:2023-01, który dla kompletnych zestawów sprzęgowych kategorii 1 MN wymaga osiągnięcia minimalnej siły zrywającej wynoszącej 1000 kN oraz lokalizacji zerwania w łubce jako celowo zaprojektowanym najsłabszym elemencie systemu. Wynik ten jest zbieżny z danymi literaturowymi dla sprzęgów kategorii 1 MN: Aniszewicz i Kowalczyk uzyskali wartości w zakresie 1050–1120 kN, co wskazuje na konsekwentność wyników w tej klasie elementów [9].

Badania materiałowe elementów systemu wykazały pełną zgodność wszystkich grup elementów z wymaganiami normatywnymi. Twardości obu czopów obrotowych (czop lewy HBW = 330 i 335, czop prawy HBW = 335) mieszczą się w zakresie normatywnym 305–350 HBW, przy znaczącej nadwyżce udarności (KV w zakresie 77–99 J wobec wymaganego minimum 25–35 J). Wynik czopa prawego przy górnej granicy zakresu, choć zgodny z normą, ujawnił praktyczną wartość rozszerzenia procedury pomiaru twardości o wielopunktową charakterystykę przekroju elementu, udoskonalenie metodyczne włączone do opracowanej procedury badawczej zgodnie z wymaganiami systemu zarządzania jakością ISO/IEC 17025.

Systematyczne stosowanie tej procedury w laboratoryjnej kontroli wejściowej stanowi praktyczny argument za wartością opracowanej metodyki [1, 3, 43].

Szczególnie istotnym wynikiem jest wykrycie wskazania liniowego na haku cięgłowym po badaniu dynamicznym. Wskazanie PT (L_1 = 18 mm, klasa 1 zgodnie z PN-EN 10228-2), zlokalizowane w strefie koncentracji naprężeń, potwierdziło, że pęknięcia zmęczeniowe inicjują się w miejscach opisywanych w literaturze dla haków cięgłowych tej klasy. Wynik ten ma dwojakie znaczenie: po pierwsze, weryfikuje poprawność procedury PT jako narzędzia monitorowania postępowania uszkodzenia podczas badań zmęczeniowych; po drugie, potwierdza, że badana próbka przeszła przez fazę inicjacji pęknięcia, a nie tylko przez fazę odkształceń sprężystych [16, 42, 50].

9.2. Porównanie i efektywność zastosowanych metod badawczych

W opracowanej metodyce zastosowano cztery komplementarne podejścia diagnostyczne: metody materiałowe niszczące (rozciąganie, udarność, twardość, makro i mikrografia), próbę statyczną kompletnego systemu, badania nieniszczące PT oraz metodę rezonansu akustycznego ART. Każda z tych metod dostarcza odmiennego rodzaju informacji o stanie technicznym systemu, a ich łączone stosowanie tworzy znacznie pełniejszy obraz niż każda z metod osobno.

1. Metody materiałowe niszczące są niezbędne do oceny zgodności z wymaganiami normatywnymi: składu chemicznego, twardości oraz udarności i stanowią podstawę klasyfikacji elementów jako zgodnych lub niezgodnych. Ich ograniczeniem jest niszczący i punktowy charakter: twardość mierzy się w jednym miejscu, udarność na wycinanej próbce. Nie są zatem w stanie zastąpić badań wytrzymałościowych kompletnego systemu [1, 22].
2. Próba statyczna kompletnego systemu dostarcza unikalnej informacji o zachowaniu się całego układu pod obciążeniem: efektach współpracy elementów, redystrybucji sił i lokalizacji najsłabszego ogniwa. Jest to badanie niezbędne z perspektywy certyfikacji i nie może być zastąpione samą weryfikacją materiałową. Wykrycie złomowania przy 1051 kN z lokalizacją w łubce jest informacją, której nie dostarcza żaden inny element metodyki [1, 3].
3. Metoda PT wykazała zdolność do wykrywania pęknięć zmęczeniowych inicjujących się podczas badania dynamicznego: w omawianym przypadku wskazanie o długości 18 mm ujawniono po badaniu. Jej ograniczeniem jest

reaktywność: PT wykrywa pęknięcia dopiero po ich inicjacji, nie przed. Ponadto wymaga zatrzymania badania i przygotowania powierzchni, co zajmuje około 45 min na element. W kontekście badań zmęczeniowych jest to metoda post-factum, a nie predykcyjna [50].

4. Metoda ART wyróżnia się spośród pozostałych metod NDT możliwością przesiewowej oceny elementów seryjnych przed ich wbudowaniem w system: na etapie kontroli wejściowej. Czas badania poniżej 30 s na element i bezkontaktowy charakter czynią ją idealnym uzupełnieniem metod klasycznych. Model Random Forest osiągnął recall NOK = 100% na zbiorze 18 sworzni, co jest wynikiem obiecującym. Ograniczeniem pozostaje jednak mała liczebność zbioru walidacyjnego oraz brak formalnej walidacji metody jako akredytowanej procedury badawczej. Niniejsze wyniki należą do pierwszych w literaturze dotyczących zastosowania ART do kontroli sworzni sprzęgów kolejowych, co stanowi oryginalny wkład rozprawy w stan wiedzy [3, 62, 63].

9.3. Analiza niepewności i powtarzalności wyników

Analiza niepewności pomiarów przeprowadzona w rozdziale 7.2 wykazała, że wszystkie kluczowe wielkości mierzone dysponują niepewnościami rozszerzonymi U (k = 2) wystarczająco małymi, by nie wpływać na jednoznaczność klasyfikacji wyników względem kryteriów normatywnych. Margines między najwęższym wynikiem a odpowiadającym mu kryterium normatywnym jest wszędzie co najmniej kilkakrotnie większy niż U.

Powtarzalność wyników badań materiałowych zapewniana jest przez standaryzację poboru próbek: lokalizację próbek do badań udarności i rozciągania zgodnie z rys. 3.1.1 programu B+R: certyfikowane wzorce kalibracyjne dla wszystkich metod pomiarowych oraz pełną identyfikowalność próbek. Powtarzalność wewnątrzlaboratoryjna potwierdzona jest wynikami badań dwóch serii czasowych (COL i COP: luty 2024 i luty 2025, protokoły SZB-COL-01-02-24 i SZB-COL-01-02-25): te same elementy badane w odstępie roku wykazały zbliżone wyniki, co potwierdza stabilność metodyki [3, 68].

9.4. Implikacje dla badań innych komponentów taboru

Opracowana metodyka badawcza, zweryfikowana na przykładzie sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN, ma charakter ogólny i może być adaptowana do innych istotnych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych. Następujące elementy metodyki są transferowalne:

- Sekwencja badań materiałowych, obejmująca skład chemiczny, twardość, udarność oraz badania makro i mikrograficzne, stosowana jest do wszystkich odkuwek stalowych elementów taboru niezależnie od ich funkcji. Wymagania normatywne określają różne normy PN-EN 13749 dla ram wózków i PN-EN 12663-2 dla nadwozi, jednak metodyka ich weryfikacji pozostaje identyczna [2, 7, 13].
- Procedura próby statycznej jest bezpośrednio transferowalna do badań ram wózków zgodnie z PN-EN 13749, gdzie norma również wymaga badań statycznych i zmęczeniowych na certyfikowanym stanowisku. Stanowisko serwohydrauliczne laboratorium, wyposażone w modularne uchwyty, umożliwia zamocowanie geometrycznie odmiennych elementów bez konieczności wymiany głównego układu hydraulicznego [7, 13].
- Metodyka NDT obejmująca metody PT, MT i UT jest bezpośrednio przenoszalna do badań innych odkuwek stalowych elementów taboru. Normy PN-EN 10228-1 i PN-EN 10228-2 mają charakter ogólny i nie są dedykowane wyłącznie sprzęgom [47, 50].
- Metoda ART wymaga kalibracji wzorców referencyjnych (OK/NOK) dla każdego nowego typu elementu. Jest to ograniczenie transferowalności: każdy nowy typ geometryczny wymaga zbudowania nowej bazy danych wzorcowych i ponownej walidacji klasyfikatora. Procedura zbierania danych i analizy FRF pozostaje jednak identyczna niezależnie od geometrii [62, 63].

9.5. Ograniczenia badań

Obiektywna ocena rezultatów badań wymaga wskazania ograniczeń przeprowadzonych badań:

1. Pełny program zmęczeniowy obejmujący 1 500 000 cykli, zrealizowany zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 15566:2023-01, przeprowadzono na jednym egzemplarzu sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN. Ze względu na statystyczny

charakter zjawisk zmęczeniowych, jednoznaczne wnioskowanie o trwałości eksploatacyjnej całej populacji wyrobów wymagałoby przebadania większej liczby egzemplarzy pochodzących od różnych dostawców. Uzyskane wyniki potwierdzają zatem poprawność opracowanej metodyki oraz zgodność badanego sprzęgu z wymaganiami normatywnymi, natomiast pełna walidacja trwałości eksploatacyjnej dla całej klasy wyrobów wymaga rozszerzenia badań w kolejnych pracach.

2. Zbiór walidacyjny ART liczył 18 elementów, co jest liczbą wystarczającą do wstępnej oceny metody, lecz niewystarczającą do mocnych wniosków statystycznych. Przedział ufności dla recall = 100% przy n = 8 elementów NOK jest szeroki, wynosi [63%, 100%] na poziomie ufności 95%.
3. Badania ART przeprowadzono na jednym typie elementu, sworzniach haka cięgłowego. Transferowalność wyników na inne elementy systemu, takie jak pałąk czy łubki, wymaga odrębnej walidacji.
4. Badania materiałowe przeprowadzono na jednej partii produkcyjnej (EA0623, nr wytopu 2V10603/3200500). Reprezentatywność wyników dla innych partii i dostawców nie jest potwierdzona, co jest celowe, gdyż celem było zademonstrowanie metodyki, a nie charakteryzacja populacji produktów.

10. WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszym rozdziale przedstawiono podsumowanie realizacji celów pracy, weryfikację hipotez badawczych sformułowanych w rozdziale 1. Sformułowano wnioski dla praktyki inżynierskiej oraz wskazano kierunki dalszych badań.

10.1. Podsumowanie realizacji celu pracy

Głównym celem pracy było opracowanie kompleksowej metodyki badań wytrzymałościowych wybranych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych oraz opracowanie koncepcji projektowej laboratorium badawczego zdolnego do realizacji tych badań w warunkach spełniających wymagania akredytacji ISO/IEC 17025.

Cel ten został zrealizowany w następującym zakresie:

- Koncepcja laboratorium badawczego (rozdział 4): opracowano i wdrożono projekt wyspecjalizowanego laboratorium badawczego z modularnym stanowiskiem serwohydraulicznym SB-1600-P-PC o zakresie do 1600 kN, aparaturą pomiarową dla pełnego programu badań zgodnie z PN-EN 15566:2023-01, systemami bezpieczeństwa oraz modularnym oprzyrządowaniem umożliwiającym badanie różnych klas elementów taboru.
- System zarządzania jakością (rozdział 5): wdrożono zintegrowany SZJ oparty na ISO 9001:2015 oraz ISO/IEC 17025:2017, potwierdzony akredytacją UDT. Opracowano kompletną dokumentację proceduralną obejmującą programy badań, instrukcje stanowiskowe, procedury NDT oraz system kalibracji aparatury.
- Metodyka badań eksperymentalnych (rozdział 6): opracowano i zweryfikowano kompleksową metodykę obejmującą próbę statyczną, program zmęczeniowy, badania materiałowe, badanie PT oraz metodę ART, którą zweryfikowano na przykładzie sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN jako studium przypadku.
- Walidacja metodyki (rozdział 7): potwierdzono poprawność i powtarzalność opracowanych procedur przez kalibrację aparatury, analizę niepewności pomiarów oraz porównanie wyników z literaturą. Wykazano, że niepewności pomiarów nie wpływają na jednoznaczność klasyfikacji wyników względem kryteriów normatywnych.

10.2. Weryfikacja hipotez badawczych

Hipoteza H1: Możliwe jest opracowanie i walidacja zunifikowanej metodyki badań wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych, której wyniki będą zgodne z wymaganiami właściwych norm technicznych, w tym PN-EN 15566.

Hipoteza H1 została pozytywnie zweryfikowana w pełnym zakresie. W zakresie badań statycznych, przeprowadzona próba statyczna kompletnego sprzęgu śrubowego kategorii 1 MN wykazała pełną zgodność z wymaganiami PN-EN 15566:2023-01 we wszystkich etapach (475 kN, 807,5 kN, zrywanie 1051 kN). Badania materiałowe potwierdziły zgodność wszystkich grup elementów z wymaganiami normatywnymi. W zakresie badań zmęczeniowych pełny program obejmujący 2150 bloków obciążeń (łącznie 1 500 000 cykli, symulujących 30-letni okres eksploatacji) został zakończony zgodnie z wymaganiami normy. Badania nieniszczące metodą PT przeprowadzone po programie dynamicznym ujawniły wskazania zgodne z klasą akceptacji zdefiniowaną w PN-EN 10228-2 [1, 3].

Hipoteza H2: Możliwe jest zaprojektowanie i wdrożenie wyspecjalizowanego laboratorium badawczego, które spełniając wymagania akredytacji UDT, będzie zdolne do wiernego odwzorowania rzeczywistych warunków obciążeń eksploatacyjnych i umożliwi uzyskanie certyfikowalnych wyników badań wytrzymałościowych.

Hipoteza H2 została pozytywnie zweryfikowana: laboratorium uzyskało akredytację UDT w zakresie badań wytrzymałościowych elementów sprzęgów śrubowych, co stanowi formalne potwierdzenie spełnienia wymagań ISO/IEC 17025:2017. Badania statyczne przeprowadzone na certyfikowanym stanowisku SB-1600-P-PC, ze spójną dokumentacją i wynikami zgodnymi z normą PN-EN 15566:2023-01, demonstrują zdolność laboratorium do generowania certyfikowalnych wyników [3, 5, 43].

Hipoteza H3: Włączenie do metodyki nowoczesnych technik diagnostyki nieniszczącej, w szczególności metody rezonansu akustycznego (ART), pozwoli na wczesne wykrywanie wad materiałowych i inicjacji pęknięć zmęczeniowych, zwiększając czułość i wartość informacyjną testów w porównaniu z klasycznymi metodami NDT stosowanymi wyłącznie po zakończeniu cykli obciążeń.

Hipoteza H3 została pozytywnie zweryfikowana: wyniki badań ART na próbie 18 sworzniach haka cięgłowego wykazały recall NOK = 100% dla modelu Random Forest i dokładność ogólną 83,3%, co potwierdza zdolność metody do przesiewowego wykrywania wad materiałowych. Badanie PT przeprowadzone po pełnym programie zmęczeniowym (1 500

000 cykli) ujawniło inicjację pęknięcia zmęczeniowego (L_1 = 18 mm, klasa 1) nieobserwowaną przed badaniem, potwierdzając skuteczność klasycznych metod NDT w wykrywaniu wad powstałych w wyniku obciążeń eksploatacyjnych. Ograniczeniem przeprowadzonej weryfikacji jest umiarkowana liczebność zbioru walidacyjnego ART (n = 18); rozszerzenie zbioru walidacyjnego oraz porównawcze testy ART względem MT/UT w warunkach laboratoryjnych stanowią naturalny kierunek dalszych badań [3, 50, 62, 63].

10.3. Wnioski dla praktyki inżynierskiej

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań i walidacji metodyki sformułowano następujące wnioski dla praktyki inżynierskiej:

- Systematyczna kontrola wejściowa materiałów jest niezbędna: wyniki badań kontrolnych wykazały, że szczegółowa charakterystyka materiałowa elementów sprzęgów śrubowych: wykraczająca poza pojedynczy pomiar twardości i obejmująca wielopunktowe pomiary w przekroju, badania udarności oraz pełną analizę składu chemicznego: pozwala na precyzyjną ocenę stanu materiału i identyfikację wartości granicznych. W badanej partii kompletnych zestawów stwierdzono pełną zgodność z wymaganiami normatywnymi, przy czym wynik twardości czopa obrotowego prawego (HBW = 335, w górnej części zakresu 305–350 HBW) wskazał na zasadność stosowania rozszerzonej procedury pomiarowej. Stosowanie opracowanej metodyki kontroli wejściowej pozwala na uzyskanie pełnego obrazu jakości elementów przed ich wbudowaniem w tabor [3].
- Integracja metod niszczących i nieniszczących daje efekt synergiczny: sama weryfikacja materiałowa nie zastępuje próby statycznej systemu, a sama próba statyczna nie wykrywa wad materiałowych. Pełna metodyka łącząca badania materiałowe, próbę statyczną, badania zmęczeniowe i NDT dostarcza kompletnego obrazu stanu technicznego systemu [1, 12].
- ART jako ekonomicznie efektywna metoda preselekcji: strategia Hybrid łącząca ART jako preselekcję z potwierdzającymi badaniami niszczącymi redukuje skumulowane koszty kontroli o około 52% względem strategii Standard przy zachowaniu pełnej wykrywalności wad. W warunkach produkcji seryjnej, przy partiach liczących ponad 200 elementów, efekt ekonomiczny jest wymierny [3].

- Akredytacja laboratorium jako wartość dodana: akredytacja UDT nie jest jedynie wymogiem formalnym, stanowi zewnętrzną weryfikację kompetencji, która nadaje wynikom badań formalny walor dowodowy wobec organów nadzoru (UTK) i jednostek notyfikowanych (NoBo). Dla producentów taboru oznacza to możliwość bezpośredniego wykorzystania wyników w procedurach certyfikacji [5, 43].
- Modularność stanowiska umożliwia rozszerzenie zakresu badań: opracowane i wdrożone stanowisko serwohydrauliczne, wyposażone w wymienne uchwyty i obejmujące zakres sił od 10 do 1600 kN, może być zaadaptowane do badań ram wózków zgodnie z PN-EN 13749, zderzaków i innych elementów taboru bez wymiany głównego układu hydraulicznego. Opracowana metodyka stanowi wzorzec proceduralny dla rozszerzenia zakresu badań laboratorium na kolejne kategorie elementów strukturalnych taboru kolejowego [7, 13].

10.4. Propozycje dalszych badań

Na podstawie wyników niniejszej pracy i zidentyfikowanych ograniczeń proponuje się następujące kierunki dalszych badań:

- Rozszerzenie zakresu badań zmęczeniowych: przeprowadzenie badań na kolejnych egzemplarzach sprzęgów śrubowych kategorii 1 MN pochodzących od różnych dostawców, w celu uzyskania statystycznie reprezentatywnej oceny trwałości eksploatacyjnej tej klasy elementów. Wyniki pełnego programu zmęczeniowego (2150 bloków, 1 500 000 cykli) zrealizowanego w ramach niniejszej rozprawy stanowią punkt odniesienia dla porównań międzylaboratoryjnych zgodnie z wymaganiami ISO/IEC 17025.
- Rozszerzenie zbioru walidacyjnego ART: zebranie danych ART dla co najmniej 100 sworzni z różnych partii produkcyjnych i dostawców, w tym elementów z różnym typem i stopniem wady. Cel: walidacja metody zgodnie z ISO/IEC 17025 jako formalnie akredytowanej procedury badawczej.
- Walidacja ART dla innych elementów systemu sprzęgu: przeprowadzenie badań ART na pałąkach, łubkach i czopach obrotowych w celu sprawdzenia transferowalności modelu klasyfikacyjnego na inne geometrie i gatunki stali.
- Integracja ART z monitorowaniem in situ podczas badań zmęczeniowych: opracowanie procedury ciągłego monitorowania sygnału akustycznego podczas

trwania programu zmęczeniowego, umożliwiającego wczesne wykrywanie inicjacji pęknięć bez przerywania testu, w analogii do metody emisji akustycznej (AE), lecz przy użyciu prostszej aparatury ART [10, 11].

LITERATURA

[1] PN-EN 15566:2023-01 - Railway applications – Railway Rolling stock – Draw gear and screw coupling. Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN), Bruksela 2023.

[2] PN-EN 12663-2+A1:2024-03– Railway applications – Structural requirements of railway vehicle bodies – Part 2: Freight wagons. CEN, Bruksela 2024.

[3] Dokumentacja techniczna i raporty, 2020–2024. Poufne -dostępne do wglądu dla komisji.

[4] Rynek Kolejowy (2018). UTK: 600 przypadków rozerwania składów przez 20 miesięcy. Rynek-kolejowy.pl, 14.09.2018. Dostępny: https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/utk-600-przypadkow-rozerwania-skladow-przez-20-miesiecy-89324.html [dostęp: 16.04.2026]

[5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej. Dz.U. UE, L 138.

[6] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 321/2013 z dnia 13 marca 2013 r. dotyczące technicznej specyfikacji interoperacyjności (TSI) – wagony towarowe. Dz.U. UE, L 104/1.

[7] PN-EN 13749+A1:2024-04 – Railway applications – Wheelsets and bogies – Method of specifying the structural requirements of bogie frames. CEN, Bruksela 2024.

[8] Wagner, S., Cole, C., Spiryagin, M. (2021). A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system. Railway Engineering Science, 29(2), 127–151. DOI: 10.1007/s40534-021-00237-y

[9] Aniszewicz, A., Kowalczyk, D. (2022). Experimental and Simulation Tests of the 1 MN Screw Coupling. Problemy Kolejnictwa, 194, 27–38.

[10] Carboni, M., Zamorano, M. (2024). On monitoring fretting fatigue damage in solid railway axles by acoustic emission with unsupervised machine learning. Proc. IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 238(3), 412–425. DOI: 10.1177/09544097231193186

[11] Karpenko, M., Skackauskas, J., Prentkovskis, O. (2022). Combined Acoustic Emission and Digital Image Correlation for Early Detection of Fatigue Cracks. Applied Sciences, 12(24), 12640. DOI: 10.3390/app122412640

[12] Parida, N., Tarafder, S., Ranganath, V.R. et al. (2021). Current Trends in Integration of NDT Methods for Engineered Materials Testing. Applied Sciences, 11(18), 8501. DOI: 10.3390/app11188501

[13] Tomaszewski, F., Sobaś, M., Motyl, M., Antkowiak, T. (2025). Ultralight drive systems structures of freight wagons – Possibilities and limitations resulting from regulations. Advances in Science and Technology Research Journal, 19(2), 209–222. DOI: 10.12913/22998624/195619

[14] UIC 520:2003 – Wagons, coaches and vans – Draw gear. Międzynarodowy Związek Kolei (UIC), Paryż 2003.

[15] Vukšić Popović, M., Tanasković, J., Milković, D. (2024). Testing of the condition and performance of coupling links from screw couplings of train. Engineering Failure Analysis, 159, 108073. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108073

[16] Tanasković, J., Milković, D., Simić, G. (2021). Experimental and numerical research on the failure of railway vehicles coupling links. Engineering Failure Analysis, 125, 105410. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105410

[17] Seo, J.W., Kwon, S.J., Jun, H.K., Lee, D.H. (2017). Fatigue Design Evaluation of Railway Bogie with Full-Scale Fatigue Test. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 5656497. DOI: 10.1155/2017/5656497

[18] Fu, D., Liang, C., Pan, D. (2023). Fatigue test loading method for wagon body based on measured load. Railway Engineering Science, 31(3), 280–292. DOI: 10.1108/rs-01-2023-0001

[19] Niezgodziński, M.E., Niezgodziński, T. (2004). Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa. ISBN 978-83-01-14176-0.

[20] Blacha, Ł., Karolczuk, A. (2016). Analiza zmęczenia elementów maszyn z uwzględnieniem wieloosiowości stanu naprężeń. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole. ISBN 978-83-65235-41-7.

[21] San Román, J.L., Álvarez-Caldas, C., Quesada, A. (2005). Structural Validation of Railway Bogies and Wagons Using Finite Elements Tools. Proc. IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 219(3), 165–174.

[22] PN-EN ISO 6892-1:2020 – Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. PKN, Warszawa 2020.

[23] PN-EN 15227:2020 – Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. CEN, Bruksela 2020.

[24] PN-EN ISO 148-1:2017-02, Metale -Próba udarności sposobem Charpy'ego - Część 1: Metoda badania, PKN, Warszawa.

[25] ASTM E466-21 – Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. ASTM International, 2021.

[26] Zhao, X., Li, Z., Chen, R. et al. (2024). Fatigue damage assessment of high-speed train bogie frame load spectra based on phase reconstruction. Engineering Failure Analysis, 158, 108018. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108018

[27] Niesony, A., Böhm, M. (2012). Mean stress effect correction using constant life diagrams in fatigue life assessment. International Journal of Fatigue, 52, 49–56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.12.013

[28] Panasiuk, K., Hajduk, K. (2023). Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Growth in Hadfield Steel. Sensors, 23(14), 6561. DOI: 10.3390/s23146561

[29] Grosse, C.U., Ohtsu, M. (eds.) (2008). Acoustic Emission Testing. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-69895-1.

[30] Huang, M., Jiang, L., Liaw, P.K. et al. (1998). Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. JOM, 50(11), 1–14.

[31] Hakizimana, J., Momhur, A., Habte, H.S. (2024). Fatigue Life Prediction of a Railway Bogie Frame Due to Wheel Out-of-Roundness Using Numerical Simulation. SSRN Preprint. DOI: 10.2139/ssrn.4946050

[32] Cil, G., Mirza, F., Oranci, Y. et al. (2024). Investigation of fatigue strength evaluation of welded structure on spirally welded tank wagon via finite element analysis. Modern Concepts in Material Science, 5(5). DOI: 10.33552/MCMS.2024.05.000623

[33] He, Z., Li, Z., Chen, Y. et al. (2024). Failure analysis and residual life assessment of forged coupler yokes. Engineering Failure Analysis, 162, 108400. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108400

[34] Utomo, I.S., Damayanti, A.T., Muhammad, B.F. (2024). Fatigue Failure Analysis of Bogie Frame Due To Static Load. Journal of Railway Transportation and Technology, 3(1), 40–46. DOI: 10.37367/jrtt.v3i1.38

[35] Wüstenberg, H., Erhard, A., Hintze, H., Schüßler, M. (2001). Recent advances in ultrasonic inspection of railway axles and wheels. Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 43(3), 180–182.

[36] MTS Systems Corporation (2023). Landmark® Servohydraulic Test Systems – product specification. Eden Prairie, MN, USA. Dostępny: https://www.mts.com

[37] ZwickRoell GmbH & Co. KG (2024). Servohydraulic testing machines for static and dynamic tests. Ulm, Niemcy. Dostępny: https://www.zwickroell.com

[38] ISO 7500-1:2018, Metallic materials - Calibration and verification of static uniaxial testing machines -Part 1, ISO, Geneva, 2018.

[39] Kocańda, S., Szala, J. (1997). Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa. ISBN 978-83-01-12367-4.

[40] Raport z analizy MES konstrukcji nośnej podpory spawanej urządzenia cięgłowego 1 MN, dokument wewnętrzny producenta, 2022. Wykonawca: zewnętrzne biuro obliczeniowe (dane wykonawcy w dokumentacji projektu, udostępnione do wglądu komisji doktorskiej).

[41] UIC 520, Wagons, coaches and vans - Draw gear -Standardisation, wyd. 7, UIC, Paris, 2003-12-01.

[42] UIC 571-4:2012 – Wagons – Programme of tests to be carried out on wagons (ERRI B 12/RP 17). UIC, Paryż 2012.

[43] ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization, Genewa 2017.

[44] ILAC-G24:2022, Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments, ILAC, 2022.

[45] Urząd Transportu Kolejowego (2020). Poradnik dla inspektorów – Tom III: Pojazdy kolejowe. UTK, Warszawa. Dostępny: https://utk.gov.pl/download/1/98029/UTKTOMIIIPojazdykolejowe.pdf

[46] PN-EN ISO 11666:2018 – Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Acceptance levels. ISO/CEN, 2018.

[47] PN-EN 10228-1:2016 – Non-destructive testing of steel forgings – Part 1: Magnetic particle inspection. PKN, Warszawa 2016.

[48] PN-EN ISO 9712:2022 – Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel. ISO/CEN, 2022.

[49] ISO 3059:2012, Non-destructive testing -Penetrant testing and magnetic particle testing -Viewing conditions, ISO, Geneva, 2012.

[50] PN-EN 10228-2:2016 – Non-destructive testing of steel forgings – Part 2: Penetrant testing. PKN, Warszawa 2016.

[51] PN-EN ISO 9934-1:2016 – Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Part 1: General principles. ISO/CEN, 2016.

[52] PN-EN ISO 9934-2:2015 – Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Part 2: Detection media. ISO/CEN, 2015.

[53] ASTM E1444/E1444M-16 – Standard Practice for Magnetic Particle Testing. ASTM International, 2016.

[54] EN 10228-3:2016, Non-destructive testing of steel forgings -Part 3: Ultrasonic testing, CEN, 2016.

[55] Aggelis, D.G., Kordatos, E.Z., Matikas, T.E. (2011). Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates. Mechanics Research Communications, 38(2), 106–110. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2011.01.011

[56] Grosse, C.U., Finck, F., Reinhardt, H.W. (2004). Improvements of AE technique using wavelet algorithms. NDT & E International, 37(1), 9–20. DOI: 10.1016/S0963-8695(03)00060-0

[57] Roberts, T.M., Talebzadeh, M. (2003). Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. Journal of Constructional Steel Research, 59(6), 695–712. DOI: 10.1016/S0143-974X(02)00064-0

[58] Berkovits, A., Fang, D. (1993). Characteristics of acoustic emission signals from several damage mechanisms in fatigue. Engineering Fracture Mechanics, 45(5), 665–675.

[59] Berkovits, A., Fang, D. (1995). Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission. Engineering Fracture Mechanics, 51(3), 401–416. DOI: 10.1016/0013-7944(94)00296-Q

[60] Yao, X., Vien, B.S., Davies, C., Chiu, W.K. (2022). Acoustic Emission Source Characterisation during Fatigue Crack Growth in Al 2024-T3 Specimens. Sensors, 22(22), 8796. DOI: 10.3390/s22228796

[61] Bartsch, H., Feldmann, M. (2025). Prediction of Micro-Cracks in Steel Structures Subjected to Fatigue by Means of Acoustic Emission. Journal of Nondestructive Evaluation, 44(3), 78. DOI: 10.1007/s10921-025-01255-0

[62] Huang, C., Wu, Y., Chen, J. (2022). Acoustic resonance testing of metallic parts: fundamentals and industrial application. NDT & E International, 128, 102618. DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102618

[63] Liénard, C., Morel, H., Cherfaoui, M. (2014). Industrial acoustic resonance testing (ART) for crack detection in metallic components. NDT Review, 56(3), 112–121.

[64] Withers, P.J. (2007). X-ray nanotomography. Materials Today, 10(12), 26–34. DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70305-X

[65] Li, B., Liu, Y., Ye, Z. et al. (2017). Modeling of rail head checks by X-ray computed tomography scan technology. International Journal of Fatigue, 103, 144–156. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.05.028

[66] Huang, C., Li, Y., Ma, H. et al. (2023). Study on non-destructive testing of rail rolling contact fatigue crack based on magnetic Barkhausen noise. Wear, 526–527, 204946. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204946

[67] Zhang, Y., Wang, H., Liu, X. et al. (2025). Nondestructive testing methods for rail defect detection. Engineering Failure Analysis, 170, 109200. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109200

[68] JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). BIPM/ISO, Paryż 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E

[69] ILAC-G17:07/2021 – Introducing the Concept of Measurement Uncertainty in Testing in Association with the Application of ISO/IEC 17025. International Laboratory Accreditation Cooperation, 2021.

[70] JCGM GUM-1:2023 – Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 1: Introduction. BIPM/ISO, Genewa 2023. DOI: 10.59161/JCGMGUM-1-2023

[71] PN-EN ISO 6506-1:2014-12, Metale - Pomiar twardości sposobem Brinella - Część 1: Metoda badania, PKN, Warszawa.