



Kazimierz CZAPCZYK

BADANIA ZMĘCZENIOWE MATERIAŁÓW PRZY ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻEŃ W ASPEKCIE PROBLEMÓW W DIAGNOSTYCE I WYKRYWANIU WAD MATERIAŁOWYCH OSI KÓŁ NAPĘDOWYCH LOKOMOTYW

Streszczenie

Artykuł przedstawia wstępne wyniki badań zmęczeniowych wybranych materiałów konstrukcyjnych, które zostały poddane jednoczesnemu działaniu obciążenia gnącego i skręcającego przy różnym udziale tych obciążeń. Ten rodzaj obciążenia powszechnie dotyczy wielu odpowiedzialnych konstrukcji, zwłaszcza maszyn wykorzystywanych w transporcie. Przykładowo transport kolejowy jest jednym z najpopularniejszych środków, w którym stosuje się lokomotywy różnych typów. Jednak bez względu na typ pojazdu kolejowego, w każdym występuje obciążenie wieloosiowe osi napędowych zespołów kołowych. Podczas kontroli technicznej tych elementów stosuje się m.in. defektoskopy ultradźwiękowe mające na celu wykryć uszkodzenia materiału, które powstały podczas eksploatacji, ale nie są widoczne podczas oględzin zewnętrznych. Z tego powodu powstaje szereg problemów podczas procesu diagnostycznego z wykorzystaniem defektoskopów ultradźwiękowych, gdyż nie zawsze można precyzyjnie wykryć ewentualną powstałą lub powstającą wadę w materiale osi, tym bardziej przy zabudowanych osiach niektórych lokomotyw, które można badać jedynie od czoła (po obu stronach mocowania łożysk). Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo oraz problemy natury technicznej w transporcie kolejowym, istotne jest przeprowadzenie badań zmęczeniowych nisko- i wysokocyklowych na próbkach poddanych działaniu wieloosiowego stanu naprężeń. Początkowo wzięto pod uwagę próbki ze stopu aluminium PA2N, które zostały wielokrotnie obciążone wieloosiowo przy różnym procentowym udziale zginania i skręcania. Wyniki zostaną odniesione do występowania samego zginania oraz skręcania, a także do wyników badań uzyskanych przy jednoczesnym oddziaływaniu warunków korozyjnych, ze względu na próbę możliwie najlepszego odwzorowania panujących warunków, w których różne elementy konstrukcyjne muszą w rzeczywistości pracować. Wartości obciążenia przy badaniach zmęczeniowych nisko- i wysokocyklowych zostały dobrane po dokonaniu badań korozyjno – naprężeniowych na tym samym stopie aluminium.[8]

WSTĘP

Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo kolejowych środków transportu należy uwzględnić ewentualne zagrożenia od strony technicznej wybranych pojazdów szynowych, wykorzystywanych w przewozach pasażerskich. Najbardziej charakterystycznymi elementami są osie zestawów kołowych zarówno w lokomotywach jak i wagonach. Pomimo faktu, że wypadki zdarzają się raczej rzadko, to istnieje wiele przykładów opisujących m.in. pękanie

osi po pewnym czasie eksploatacji w trakcie jazdy. Tego typu problemy powodują spore zagrożenie dla bezpieczeństwa pracujących i korzystających z kolejowych środków transportu. Jednymi z najbardziej obciążonych osi są napędowe osie lokomotyw, które poddawane są jednoczesnemu zginaniu i skręcaniu (podczas jazdy – zwłaszcza przy przyspieszaniu i hamowaniu) oraz samemu zginaniu (podczas postoju). Tego typu obciążenia mają wpływ na wytrzymałość zmęczeniową materiału, z którego została wykonana oś.

W zespołach kołowych znajduje się wiele elementów, które podlegają obciążeniom i zużyciu, jednak niewątpliwie najbardziej odpowiedzialna jest oś, na której zamocowane są przede wszystkim koła bosc, łożyska, a także ewentualne koła zębate (część przekładni). Można mieć również do czynienia z tzw. monoblokami. Kolejnym elementem konstrukcyjnym są możliwe zabudowy, dzięki którym nie ma bezpośredniego dostępu do osi. Z tego powodu kontrola diagnostyczna jest znacznie utrudniona, gdyż ewentualne uszkodzenia materiału można próbować wykryć defektoskopem ultradźwiękowym jedynie od strony czoła osi. [8]



Rys. 1. Zdemontowane osie z uzbrojeniem ze spalinowej lokomotywy manewrowej SM42

Źródło: wykonanie własne

Naturalnie istnieje możliwość czasowego usunięcia zabudowy osłaniającej oś i przystąpienia do szczegółowego procesu weryfikacji elementu. Z drugiej strony wiele zakładów nie dysponuje możliwościami pozwalającymi na całkowity demontaż, a niektóre przepisy dodatkowo zezwalają na badanie osi tylko od strony czoła. W ten sposób powstaje

wiele problemów, gdyż podczas tej metody defektoskop może nie zawsze ukazać na ekranie, np. mikropęknięcie, które później się rozwinie i spowoduje całkowite zniszczenie osi w trakcie eksploatacji. W celu wyeliminowania lub zminimalizowania błędów w takim odczycie stosuje się, tzw. osie wzorcowe, wobec których diagnosta odnosi swoje wyniki kontroli osi eksploatowanych. Wszelkie anomalie w odczycie są wówczas rejestrowane i przeprowadza się ponowne zbadanie materiału, aby móc określić czy dana oś nadaje się do szczegółowej kontroli w innym specjalistycznym zakładzie naprawczym, czy być może nastąpiło wykrycie rysy na powierzchni materiału. [8]

1. ZMĘCZENIE MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH PODLEGAJĄCYCH OBCIĄŻENIOM WIELOOSIOWYM

Poza okresowymi badaniami kontrolnymi, a także odbiorczych należy przeprowadzać również naukowe badania mające na celu lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących w materiałach na odpowiedzialne konstrukcje przemysłowe. Jednymi z najistotniejszych badań są badania zmęczeniowe. Przeprowadza się także zmęczeniowe próby wytrzymałości konstrukcji, które mają charakter badań trwałościowych. Próby te prowadzi się do zniszczenia badanych obiektów względnie do osiągnięcia ustalonej liczby cykli obciążeń, np. 10 mln cykli. Badania zmęczeniowe umożliwiają określenie granicy wytrzymałości całej konstrukcji i trwałości poszczególnych jej elementów w zależności od wartości obciążeń. Na podstawie wyników badań ocenia się zapas lub niedostateczną wytrzymałość części lub węzła. Badaniom tym poddaje się przede wszystkim ramy wózków wagonowych i poszczególne węzły pudeł wagonów oraz osie zestawów kołowych. Ocena wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji polega zwykle na porównaniu charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej, określających odporność konstrukcji na zmienne obciążenia, z charakterystykami obciążenia, pod którego działaniem w ocenianej konstrukcji zachodzi kumulacja uszkodzeń zmęczeniowych. Natomiast badania zmęczeniowe przeprowadza się na stanowiskach badawczych, wyposażonych w pulsatory i siłowniki hydrauliczne do wywierania obciążeń oraz odpowiednie systemy sterowania. Długotrwała praca pulsatora ze zmiennym obciążeniem jest możliwa dzięki układowi hydraulicznemu, zawierającemu urządzenia stabilizujące. Zakres częstotliwości zmian obciążeń wynosi 200 – 800 na minutę. Strzałki ugięcia badanych konstrukcji spowodowane naciskiem siłowników hydraulicznych nie przekraczają na ogół wartości 10 mm. Nowoczesne stanowiska do badań zmęczeniowych posiadają sterowanie obciążeniem wg programu zapisanego na odpowiednim nośniku informacji, odwzorowujące widmo rzeczywistych obciążeń lub ugięć występujących w warunkach eksploatacji. [5, 6]

Biorąc pod uwagę charakter obciążenia, tzn. jednoczesne zginanie i skręcanie osi przeprowadzono badania zmęczeniowe niskocyklowe konstrukcyjnych materiałów izotropowych przy różnym procentowym udziale zginania i skręcania próbek. Wstępne wyniki badań zanalizowano oraz przedstawiono w tabeli nr 1. Początkowo wybrano izotropowy materiał wykonany ze stopu aluminium $AlMg2Mn0,47Fe0,5$ (5251). Ten materiał nie jest stosowany na odpowiedzialne konstrukcje lub wysoko obciążone osie, jednak na tej podstawie można stworzyć analogię wobec materiałów wykorzystywanych w przemyśle do produkcji, np. osi lokomotyw lub wybranych typów wagonów. Ponadto z czasem będzie można przejść do badań materiałów o coraz większych własnościach wytrzymałościowych o różnym przeznaczeniu w różnych warunkach eksploatacji, np. stali. Badania zostaną uzupełnione o wpływ środowiska korozyjnego na wytrzymałość zmęczeniową badanych próbek przy wykorzystaniu 3,5% NaCl. Dla porównania, a także uzyskania pełnego kompletu wyników zostaną przeprowadzone również wysokocyklowe badania zmęczeniowe, zwłaszcza że większość materiałów, np. o przeznaczeniu konstrukcyjnym w transporcie szynowym musi przetrwać co najmniej kilka milionów cykli. Dzięki tej zasadzie uzyskuje się w sposób

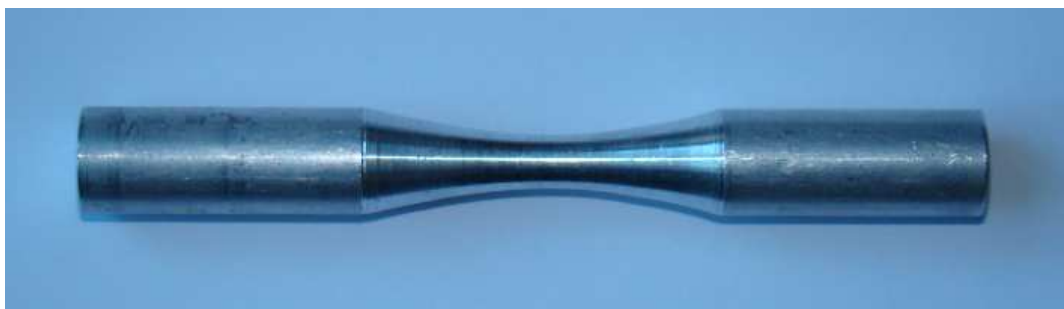
sztuczny wieloletnie warunki eksploatacji wybranych materiałów. [8] Laboracyjne stanowisko badawcze zostało przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do badań zmęczeniowych materiałów

Źródło: wykonanie własne

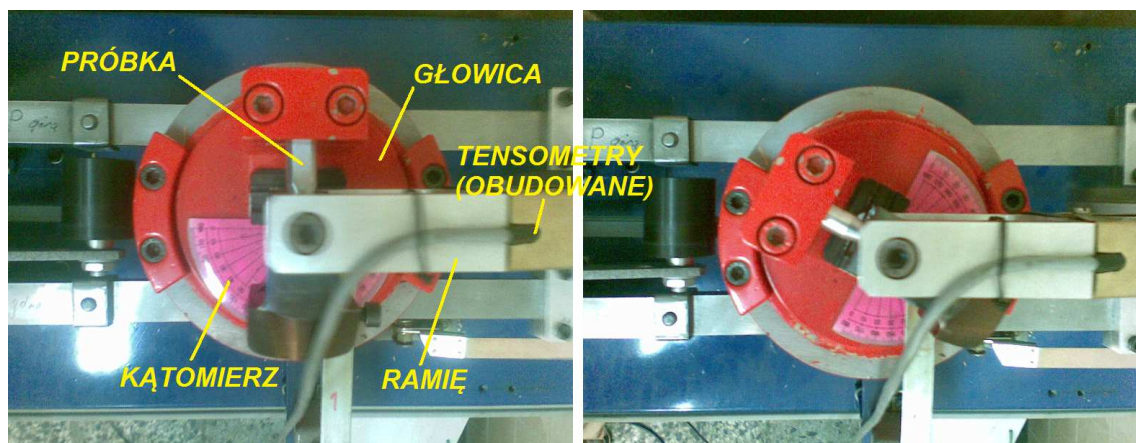
Przedstawione stanowisko na rysunku nr 2 umożliwia przeprowadzenie badań zmęczeniowych na zginanie, skręcanie oraz jednoczesne zginanie i skręcanie przy różnym udziale tych obciążeń. Przejście między zginaniem i skręcaniem jest możliwe dzięki obrotowej stabilnej głowicy, w której zamocowana jest badana próbka. Przy ustawieniu 0 stopni przykładane jest jedynie obciążenie gnące, a przy 90 stopniach – skręcające. Ustawienia pośrednie, tzn. przykładowo 30, 45, 60 stopni umożliwia zastosowanie jednoczesnego zginania i skręcania z dominacją jednego z tych obciążeń lub ich takiego samego udziału wobec próbek. [8]



Rys. 3. Przykładowa próbka o przeznaczeniu do badań zmęczeniowych

Źródło: wykonanie własne

Ilości uzyskanych cykli są rejestrowane na komputerze przy wykorzystaniu specjalnie opracowanego oprogramowania, a także przy użyciu tensometrów elektrycznych, z których impulsy elektryczne są kierowane do elektronicznego modułu będącego pośrednikiem pomiędzy obciążaną próbką, a komputerem. Koło zamachowe z zamontowanymi odważnikami nabiera odpowiedniej prędkości obrotowej, dzięki czemu uzyskuje się wymagane obciążenie. Do koła zamachowego domontowane jest ramie, które jest uginane z określoną częstotliwością, a z drugiej strony ramienia zainstalowana jest próbka, na którą bezpośrednio oddziałuje obciążenie.



Rys. 4. Przykładowe zamocowania próbki – z lewej skręcanie, z prawe zginanie ze skręcaniem.

Źródło: wykonanie własne

Na rysunku nr 4 przedstawiono możliwości obciążania próbek w próbach nisko- i wysokocyklowych. Z lewej strony rysunku głowica znajduje się w położeniu 90° , tzn. ustawiono wyłącznie obciążenie skręcające, natomiast z prawej strony obciążenie złożone (zginanie ze skręcaniem). Jednak jest to położenie ustawione na 30° , dlatego próbka jest poddawana jednoczesnemu zginaniu ze skręcaniem z niewielkim udziałem zginania.

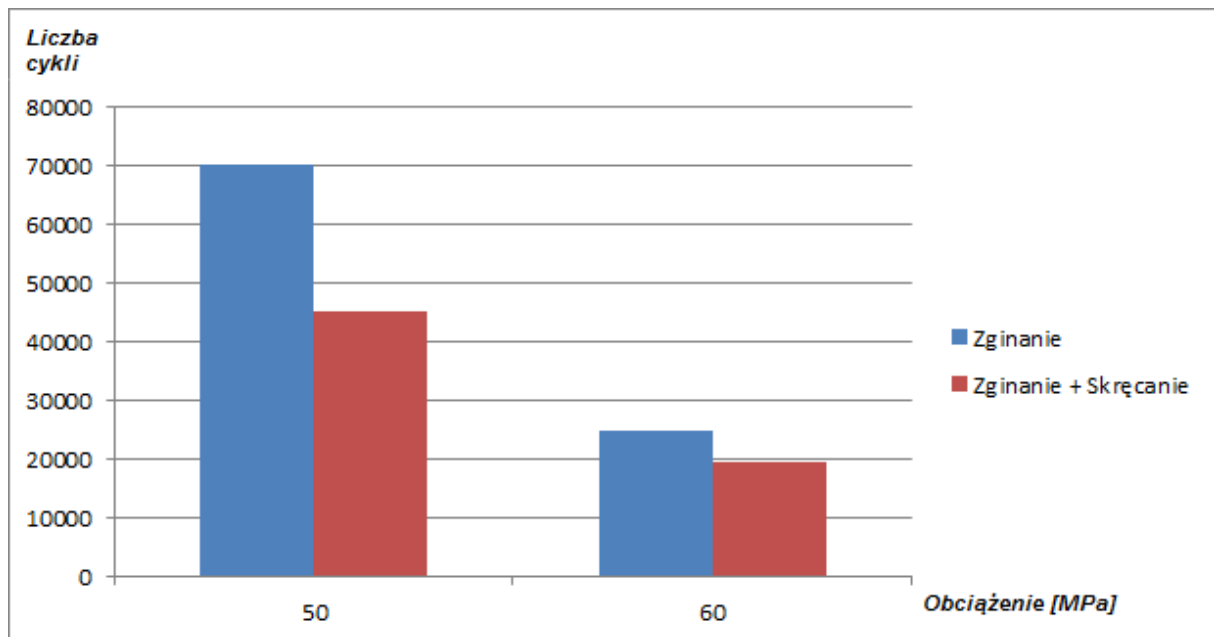
W trakcie badań bezpośrednio uzyskuje się wykres zależności dobranego sygnału od czasu wykonywanej próby. Sygnał wyrażony jest w jednostce mV i dobierany z instrukcji technicznej urządzenia. Przebieg odbieranego sygnału można na bieżąco śledzić i kontrolować na ekranie monitora, dzięki czemu przy każdej kolejnej próbie można sprawdzić powtarzalność zachowania się danego materiału. Po wykonanej próbie dokonuje się wyliczenia liczby cykli na podstawie dobranej częstotliwości oraz uzyskanego czasu. [8]

Tego rodzaju badania są bardzo istotne z punktu widzenia przemysłu, gdyż w praktyce przeważnie spotyka się złożone stany naprężenia, a nie wyłącznie zginanie lub skręcanie, tym bardziej jeżeli chodzi o różne środki transportu, gdzie wytrzymałość zmęczeniowa ważnych elementów mechanicznych ma duży wpływ na bezpieczeństwo podczas eksploatacji.

Tab. 1. Wstępne wyniki badań zmęczeniowych [8]

Kąt ustawienia głowicy	Rodzaj obciążenia	Wartość obciążenia [MPa]	Środek korozyjny	Czas [s]	Liczba cykli
0°	Zginanie	40	-	-	-
0°	Zginanie	50	-	6698	70329
0°	Zginanie	60	-	2215	24808
30° / 45° / 60°	Zginanie + Skręcanie	40	-	-	-
30° / 45° / 60°	Zginanie + Skręcanie	50	-	3747	45135
30° / 45° / 60°	Zginanie + Skręcanie	60	-	1610	19642
90°	Skręcanie	40	-	-	-
90°	Skręcanie	50	-	-	-
90°	Skręcanie	60	-	-	-

Źródło: wykonanie własne



Rys. 5. Wykres zależności liczby cykli od obciążeń dla badanego materiału.

Źródło: wykonanie własne

Na podstawie otrzymanych wstępnych wyników badań zmęczeniowych można zauważyć dużą rozbieżność w liczbach cykli między wartościami obciążeń: 50 i 60 MPa zarówno dla samego zginania jak i zginania ze skręcaniem. Jednak istotniejsza jest analiza pod kątem rodzajów zastosowanych obciążeń oraz ich porównanie, które pozwoli przewidzieć zachowanie się materiału przy kolejnym obciążeniu w postaci, np. samego skręcania lub zwiększeniu/zmniejszeniu udziału zginania przy jednoczesnym oddziaływaniu skręcania (przy tych samych wartościach). Liczba cykli, po których próbka ulegnie zniszczeniu wyraźnie zmniejsza się przy równym udziale zginania i skręcania wobec samego zginania, tzn. 36% dla 50 MPa i 21% dla 60 MPa.

Dla dokonania pełnej analizy, a także uzyskania odpowiedzi, w jaki optymalny sposób obciążyć dany materiał, aby mógł on przenieść jak największą liczbę cykli, należy otrzymać wyniki tych samych badań przy samym skręcaniu, gdyż nie można na obecnym etapie dokładnie przewidzieć zachowanie się próbki przy kolejnych rodzajach obciążeń. Oczywiście można w pewien sposób oszacować prawdopodobne wyniki, biorąc pod uwagę różnego rodzaju hipotezy lub skomplikowane algorytmy, jednak wyniki uzyskane eksperymentalnie najlepiej przedstawiają rzeczywisty obraz zachowania materiału w różnych warunkach eksploatacyjnych, zwłaszcza że próby zostaną powtórzone w środowisku korozyjnym i przy tym będzie można ocenić jego realny wpływ na trwałość zmęczeniową wybranych izotropowych materiałów konstrukcyjnych.

Należy również zauważyć, że w każdym przypadku powstają momenty gnące i skręcające w zależności od dobranego obciążenia. [8]

W przypadku jednoczesnego zginania i skręcania posłużono się Hipotezą Hubera, dzięki czemu można wyznaczyć, tzw. moment zastępczy. Poszczególne powstałe momenty można odczytać z tabeli nr 2.

Tab. 2. Momenty gnące, skręcające i zastępcze [8]

Rodzaj obciążenia	Kąt ustawienia głowicy	Wartość obciążenia [MPa]	Moment gnący Mg [Nm]	Moment skręcający Ms [Nm]	Moment zastępczy Mz [Nm]
Zginanie	0°	50	1,0517	-	-
		60	1,2941	-	-
Zginanie + Skręcanie	45°	50	-	-	1,0809
		60	-	-	1,2752
Skręcanie	90°	50	-	2,1249	-
		60	-	2,5403	-

Źródło: wykonanie własne

2. ANALIZA WAD MATERIAŁOWYCH I WSPÓŁCZESNYCH NAJWAŻNIEJSZYCH METOD DIAGNOSTYCZNYCH W WYKRYWANIU USZKODZEŃ NA PRZYKŁADZIE LOKOMOTYWY SPALINOWEJ SM42

Osie są obciążone całą masą pojazdu. Kolejowy zestaw kołowy składa się z osi i osadzonych na niej nieprzesuwnie dwóch kół. Oś zestawu kołowego obciążona siłami pionowymi od masy wagonu i siłami poziomymi od toru poprzez obrzeże i tarcze koła, podczas jazdy obraca się i jest jednym z najbardziej obciążonych elementów wagonu. Przenosi wszystkie obciążenia od masy wagonu, sił prowadzących wagon po torze, wykonując przy tym ruch obrotowy. Wymiary osi są ustalane na podstawie wytrzymałości zmęczeniowej. Dlatego osie wykonuje się z materiału bardzo wysokiej jakości. Powierzchnia osi musi być bardzo gładka, bez rys i ostrych krawędzi, które zmniejszają wytrzymałość zmęczeniową i mogą być przyczyną pęknięcia osi. Niekiedy w celu poprawienia wytrzymałości zmęczeniowej osi są stosowane specjalne zabiegi technologiczne, np. utwardzanie powierzchniowe niektórych fragmentów osi przez rolowanie, które wywołuje w danym obszarze naprężenia o przeciwnym znaku niż naprężenia powstające w czasie jazdy. [3, 7]

Wady i uszkodzenia materiałowe osi dzieli się na dwie podstawowe grupy: hutnicze i powstałe podczas eksploatacji. Do wad hutniczych zalicza się:

- a) pozostałość jamy skurczowej w środkowej części przekroju poprzecznego,
- b) pęknięcie wewnętrzne w przedpiałcu i podpiałcu w środkowej części przekroju poprzecznego osi,
- c) drobne nieciągłości,

Natomiast do wad powstałych wlicza się:

- a) poprzeczne pęknięcia powierzchniowe w czopie,
- b) pęknięcia podpiałca osi,
- c) pęknięcia osi rozpoczynające się od miejsca położonego przy krawędzi rowka na wpust,
- d) pęknięcie osi w miejscu zmiany przekroju,
- e) inne miejsca (od rys, wżerów korozyjnych i innych uszkodzeń powierzchni).

Nieniszczące badania defektoskopowe od bardzo wielu lat stosuje się w kolejnictwie jako metodę pozwalającą wykryć w odpowiednim czasie niebezpiecznych wad i uszkodzeń materiału, które powstają podczas eksploatacji, a dalszy ich rozwój ma istotny wpływ na bezpieczeństwo. [1] Przykładową kontrolę przy pomocy defektoskopu przedstawiono na rysunku nr 6.



Rys. 6. Defektoskopowa kontrola materiałowa od strony czoła osi lokomotywy manewrowej SM42

Źródło: wykonanie własne

Jednak nie zawsze szybko można określić szkodliwość wykrytej wady, gdyż należałoby wówczas skupić się na wielu porównawczych badaniach wytrzymałościowych. Z drugiej strony są one pracochłonne i kosztowne, dlatego zostały opracowane odpowiednie wymagania oraz zalecenia wobec postępowania z wadliwym elementem (przy wykorzystywaniu badań nieniszczących). Przeważnie dokonuje się usunięcia wadliwej części z dalszej eksploatacji ze względu na bezpieczeństwo – nawet jeśli dana wada nie została całkowicie przebadana i nie ustalono precyzyjnie jej szkodliwości. Obecnie już w początkowych etapach wytwarzania ważne i odpowiedzialne części taboru są badane metodami defektoskopowymi, dzięki czemu można nie tylko zminimalizować ryzyko dopuszczenia do eksploatacji wadliwego elementu oraz niepotrzebnego jego usuwania, ale także znacznie oszczędza się w ten sposób na kosztach obróbki.

Kolejnym ważnym aspektem są pojawiające się z czasem pęknięcia zmęczeniowe, które się rozwijają w polu zmiennych naprężeń wokół koncentracji spowodowanych nie tylko wadami materiałowymi, ale również występującymi podczas eksploatacji, tzn. przeciążeniami, skaleczeniami, naprężeniami własnymi, itd. Z tego powodu okresowe kontrole defektoskopowe pozwalają zarówno stwierdzić występowanie pęknięć, jak i ich szybkość propagacji. Doświadczenia i wyniki badań defektoskopowych oraz przyczyny powstawania tych uszkodzeń są podstawą opracowywania wymagań odbiorczych i kryteriów, na podstawie których zaleca się wymianę uszkodzonych elementów. [1]

PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę powagę problemu, który dotyczy pęknięć zmęczeniowych elementów obciążonych wieloosiowo poprzez jednoczesne zginanie i skręcanie, laboratoryjne badania zmęczeniowe pozwolą ocenić wpływ danych obciążeń na wytrzymałość analizowanych materiałów, a także zależność trwałości zmęczeniowej badanych próbek od środowiska korozyjnego oraz w jakim stopniu środowisko korozyjne wywiera wpływ na trwałość

zmęczeniową. Badania eksperymentalne zostały możliwie najlepiej dostosowane do rzeczywistych warunków zewnętrznych wobec odpowiedzialnych wybranych elementów mechanicznych podlegających złożonym stanom naprężeń, np. podczas eksploatacji osi lokomotywy spalinowej. Pomimo rozwoju metod diagnostycznych, w dalszym ciągu zdarzają się problemy związane z pęknięciami zmęczeniowymi, które mają poważny wpływ na bezpieczeństwo osób korzystających z różnych środków transportu. [8]

A FATIGUE TESTING IN COMPLEX STRESS STATE IN THE CONTEXT OF PROBLEMS IN THE DIAGNOSIS AND DETECTING DEFECTS IN MATERIALS OF WHEELS IN LOCOMOTIVES

Abstract

This paper presents preliminary results of fatigue tests of selected construction materials, which have been exposed to the simultaneous operation of the bending and torsional loads at different mix of these loads. This kind of load generally applies to many responsible construction, especially of machinery for transport. For example, rail transport is one of the most popular measures, which uses different types of locomotives. But it is no matter what sort of the type of railway vehicle it is, because in each there we can notice a multi-axis load driving axle wheel assemblies. During the technical inspection of these items, an ultrasonic flaw detectors are used to detect damage in the material, that arose during the exploitation, but are not visible during the external inspection. For this reason, there are many problems, that arise during the diagnostic process using ultrasonic flaw detectors, because it is not always possible to accurately detect the resulting or arising defect in the material axes, especially in some of the built-axes, which can be studied only from the front (on both sides of the mounting of bearings). Taking into account the safety and technical problems in rail transport, it is important to carry out fatigue tests of low- and high cycles on samples subjected to multiaxial stress state. Initially, there were taken into account the lightweight aluminum (AlMg2Mn0,47Fe0,5) that have been repeatedly multiaxial charged at different percentage of bending and twisting. The results will be referenced to the occurrence of the bending and twisting, as well as to the results obtained with the simultaneous influence of corrosive conditions due to the attempt to make the best possible mapping of the prevailing conditions in which different structural elements must actually work. The load on the low cycle fatigue and high cycle fatigue were chosen after corrosion - stress testing on the same aluminum alloy.[8]

BIBLIOGRAFIA

1. Bawolski R., Chmiel E., Skibka C., Świdorski Z., *Defektoskopowe badanie elementów pojazdów szynowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
2. Dobrzański, L., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo: materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
3. Janiak M., Kalinkowski A., *Konstrukcja i eksploatacja wagonów kolejowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
4. Gąsowski W., *Wagony kolejowe – Konstrukcje i badania*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988.
5. Praca zbiorowa pod red. Sokołowa S.I., *Badanie dynamiki i wytrzymałości wagonów pasażerskich*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.

6. Gąsowski W., Nowak R., *Badania wagonów kolejowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1989.
7. Kalinkowski A., Orlik A., *Wagony kolejowe i hamulce*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.
8. Czapczyk K., *A fatigue testing in complex stress state in the context of problems in the diagnosis and detecting defects in materials of wheels in locomotives*. Journal of KONES, Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 4, pp. 149-154, 2012.
9. Praca zbiorowa Autorów Czechosłowackich, Niemieckich, Polskich, Węgierskich, *Aluminium Poradnik*. PWN, Warszawa 1967.