



Diagnostyka elementów konstrukcji stalowych

Krzysztof Kubicki¹

STRESZCZENIE:

W artykule przedstawiono wybrane badania diagnostyczne elementów konstrukcji stalowych. Przeprowadza się je zarówno na etapie kontroli jakości podczas procesu wytwarzania konstrukcji, jak i przy diagnozowaniu uszkodzeń elementów w trakcie eksploatacji. Aby uniknąć uszkodzeń, w czasie badania zazwyczaj stosuje się metody nieniszczące. W artykule omówiono badania powszechnie wykonywane, takie jak np. badania penetracyjne, magnetyczno-proszkowe czy ultradźwiękowe, ale także takie, które dopiero od niedawna są stosowane, np. badanie prądami wirowymi czy emisją akustyczną. Pokazane zostały również uszkodzenia elementów konstrukcji występujące w budownictwie incydentalnie oraz badania rzadko wykonywane.

SŁOWA KLUCZOWE:

badania nieniszczące; diagnostyka; konstrukcje stalowe

1. Wprowadzenie

Zazwyczaj diagnostykę konstrukcji przeprowadza się w przypadku planowanej modernizacji lub w stanie awaryjnym konstrukcji [1–3]. Częstą przyczyną zlecenia badań diagnostycznych są zauważone uszkodzenia elementów konstrukcji bądź niepokojąco zwiększające się deformacje ustrojów nośnych. Wówczas diagnostyka powinna prowadzić do określenia przyczyn powstania niekorzystnych zjawisk i być podstawą do zaproponowania sposobu naprawy czy wzmocnienia konstrukcji. W czasie eksploatacji obiektów budowlanych następuje stopniowa degradacja elementów konstrukcji. Oddziaływanie czynników środowiskowych może przyczynić się do powstawania uszkodzeń lub znacznie ten proces przyspieszyć. Właściwie utrzymywana budowla może służyć przez długie lata, a jej stan techniczny umożliwiać bezawaryjną eksploatację. Jednak mimo starań często nie mamy wpływu na pogarszanie się tego stanu, powstawanie uszkodzeń konstrukcji czy nawet katastrof.

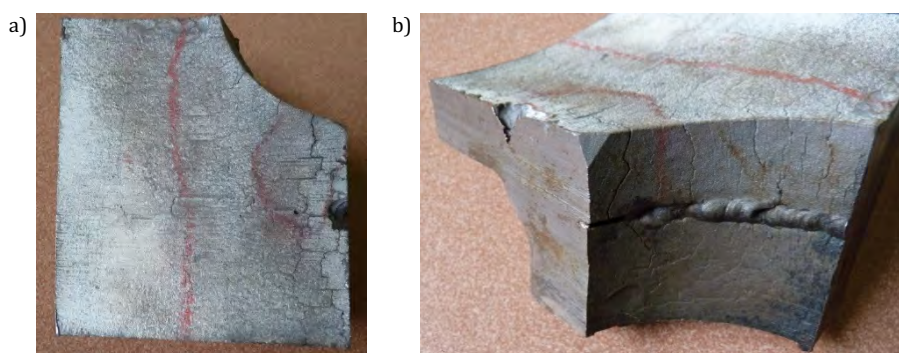
2. Przyczyny uszkodzeń konstrukcji

Najczęstszymi przyczynami awarii czy katastrof budowlanych są zdarzenia losowe. Należą do nich silne wiatry, pożary, wybuchy (zazwyczaj gazu), intensywne opady (śnieg, deszcz) czy uderzenia. Trudno jest też przeciwdziałać wpływowi obciążeń dynamicznych czy wielokrotnie zmiennych. Oddziaływania dynamiczne mają zazwyczaj dużą intensywność i w stosunku do oddziaływań statycznych znacznie trudniej określić ich wartości. Natomiast obciążenia wielokrotnie zmiennie, szczególnie te powodujące zmiany znaków sił wewnętrznych, prowadzą do tzw. zmęczenia materiału. Obciążenia wielokrotnie zmiennie mają częstokroć charakter dynamiczny. Zdarza się to w przypadku konstrukcji obciążonych pojazdami (mosty, wiadukty) czy urządzeniami dźwigowymi (sawnice, wciągniki). Innymi przyczynami powstawania uszkodzeń

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: kubicki@bud.pcz.pl, orcid id: 0000-0002-1804-3389

konstrukcji są błędy projektowe (przyjęcie niewłaściwych rozwiązań, niepoprawne obliczenia konstrukcyjne), błędy wykonawcze (odstępstwa od projektu, stosowanie gorszych materiałów, niedokładności wykonania elementów konstrukcji i montażu, nadmierne tempo prac, niewłaściwe zabezpieczenie konstrukcji), pominięcie badań geologicznych lub lekceważenie zagrożeń przyrodniczych (np. budowa na terenach zalewowych, nieuwzględnienie specyfiki sejsmicznej terenu).

Poza typowymi przyczynami uszkodzeń mogą wystąpić takie, które w budownictwie pojawiają się rzadko, ale mogą powodować fatalne skutki. Przykładowo cykliczne zmiany temperatury o znacznej amplitudzie mogą doprowadzić do tzw. zmęczenia cieplnego. Występuje ono często w konstrukcjach stosowanych w energetyce, takich jak rurociągi, turbiny parowe czy walczaki kotłów. W tych konstrukcjach dodatkowo destrukcyjnie działają zmiany ciśnienia. Struktura wewnętrzna materiału ulega do tego stopnia degradacji, że powstają pęknięcia widoczne gołym okiem zarówno na powierzchni elementu, jak i w przekroju. Przykład takiego zniszczenia pokazano na rysunku 1.

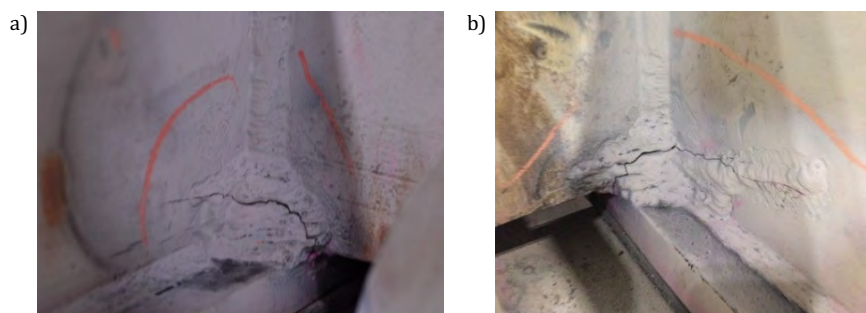


Rys. 1. Element konstrukcji zniszczony na skutek zmęczenia cieplnego: a) widok powierzchni; b) przekrój

Niekorzystny wpływ dużych zmian temperatury może również wystąpić w procesie spawania. Na skutek nieprawidłowego wykonywania spoiny może dojść do jej pęknięcia lub materiału rodzimego (w strefie wpływu ciepła).

Elementy konstrukcji często ulegają uszkodzeniom w miejscach ułożenia spoin. Ponieważ złącza spawane są narażone na defekty, powinny być kontrolowane po wykonaniu. W pobliżu spoin zostaje zaburzona struktura materiału rodzimego, co w połączeniu z błędami projektowymi czy wykonawczymi może prowadzić do koncentracji naprężeń i powstawania pęknięć.

Częstymi przyczynami pęknięć spoin jest niewłaściwe ich ukształtowanie, np. krzyżowanie się (rys. 2a), przy czym ich naprawa jest bardzo trudna, a czasami wręcz niemożliwa. Próba naprawy przeprowadzona w sposób niewłaściwy może jeszcze pogłębić problem. Zdarza się, że propagacja pęknięcia przechodzi na materiał rodzimy (rys. 2b).



Rys. 2. Pęknięcie spoin krzyżujących się

3. Rodzaje badań diagnostycznych

W przypadku badania elementów konstrukcji stalowych wyróżnia się dwie grupy badań – niszczące i nieniszczące. Badania niszczące pozwalają określić z dużą dokładnością parametry wytrzymałościowe stali, np. przeprowadzając próbę na rozciąganie, na zginanie czy też próbę udarności lub łamania, jednak wymagają wycięcia z konstrukcji próbek, co nie zawsze jest możliwe. Do tej grupy należą badania metalograficzne, a także badania składu chemicznego spektrometrem iskrowym.

Niekiedy konieczne jest wykonanie mniej typowych prób, np. rozciąganie blach grubych określające ich odporność na rozwarstwienie. Wymagane jest specjalne przygotowanie próbki. Wycięty fragment blachy zostaje spawany pomiędzy dwa odcinki prętów o przekroju kwadratowym w układzie pozwalającym na rozerwanie jej w kierunku grubości, a następnie odpowiednio obrobiony mechanicznie. Dospawane pręty pozwalają zamocować próbkę w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Charakterystyczny widok przekroju takiej próbki po rozwarstwieniu przedstawiono na rysunku 3a. W odróżnieniu od typowego badania stali na rozciąganiu próbki takie nie wykazują przewężenia w miejscu rozerwania.



Rys. 3. Widok próbki po badaniu na rozwarstwienie: a) przekrój zerwanej próbki; b) próbka niewłaściwie przygotowana

Niewłaściwe przygotowanie próbki do badania na rozwarstwienie, polegające np. na pomyleniu kierunku spawanej blachy, prowadzi do niemiernodajnych wyników. W skrajnym przypadku może dojść do przewężenia i zerwania poza badaną blachą. Przypadek taki przedstawiono na rysunku 3b. Próbka została zerwana w pobliżu zamocowania w szczękach, a w strefie spawania badanej blachy zainicjowane zostało pęknięcie laminarne. Pęknięcie takie wywołane jest niedostateczną wytrzymałością międzywarstwową stali i występują np. w spawanych połączeniach belek lub wsporników belki podsuwnicowej ze słupami dwuteowymi (rozwarstwienie pasa) czy w spawanych blachach czołowych (przeponach). W takich połączeniach materiał musi spełniać wymóg ciągliwości międzywarstwowej wg PN-EN 1993-1-1:2006 [4]. Wytuczne doboru parametrów ciągliwości i obliczeń podano w PN-EN 1993-1-10:2007 [5].

Do oceny uszkodzeń konstrukcji stosuje się najczęściej badania nieniszczące. Za ich pomocą można wykryć niebezpieczne nieciągłości w materiale, z którego zostały wykonane elementy konstrukcji, i w złączach spawanych. Aby zapewnić bezpieczną eksploatację konstrukcji metodami tymi przeprowadza się kontrolę jakości. Wykrycie nieciągłości pozwala na usunięcie wad przed oddaniem konstrukcji do eksploatacji, a w stanach awaryjnych na ocenę zagrożenia bezpieczeństwa i określenie metod likwidacji zagrożeń.

Do metod nieniszczących należą: badania wizualne, penetracyjne, magnetyczno-proszkowe, ultradźwiękowe, radiograficzne, badanie prądami wirowymi, emisją akustyczną i szczelności.

Badania wizualne mogą być przeprowadzane bezpośrednio, z rejestracją fotograficzną lub filmową, albo pośrednio w miejscach niedostępnych, np. za pomocą wideoendoskopu, endoskopu technicznego, fiberoskopu czy boroskopu. Zasady badań wizualnych określono w PN-EN 13018:2016-04 [6], a dla złączy spawanych w PN-EN ISO 17637:2017-02 [7].

Badania penetracyjne materiałów i spoin wykonuje się w celu określenia nieciągłości powierzchniowych. Przykład nieciągłości ujawnionej za pomocą badania penetracyjnego przedstawiono na rysunku 4. Przy badaniach penetracyjnych wymagane jest staranne oczyszczenie

badanej powierzchni z powłok malarskich, rdzy i wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń, np. tłuszczów. Naniesiony na powierzchnię badaną penetrant wnika w otwarte szczeliny dzięki zjawisku kapilarnemu. Po usunięciu jego nadmiaru aplikuje się wywoływacz, który zabarwia penetrant w miejscach nieciągłości. Ogólne zasady tych badań podano w PN-EN ISO 3452-1:2013-08 [9].



Rys. 4. Nieciągłości w spoinie pachwinowej ujawnione metodą penetracyjną

Badania magnetyczno-proszkowe wykonuje się dla materiałów ferromagnetycznych przy użyciu defektoskopów jarzmowych lub krzyżowych albo defektoskopów prądowych dużej mocy. Wykorzystuje się w nich zjawisko skupiania się proszku ferromagnetycznego w miejscach rozproszonego pola magnetycznego spowodowanych nieciągłościami powierzchniowymi. Nie wymagają one tak dokładnego przygotowania powierzchni jak dla badań penetracyjnych. W normie PN-EN ISO 9934-1:2017-02 [8] podano zasady badania materiałów ferromagnetycznych, pozwalające wykrywać nieciągłości naruszające spójność powierzchni lub leżące tuż pod powierzchnią – szczególnie pęknięcia. Natomiast norma PN-EN ISO 17638:2017-01 [10] określa techniki wykrywania powierzchniowych nieciągłości w spoinach z materiałów ferromagnetycznych. Metoda magnetyczno-proszkowa pozwala wykryć najbardziej niebezpieczne nieciągłości powierzchniowe i podpowierzchniowe w postaci pęknięć zmęczeniowych, hartowniczych czy kuźniczych, pęknięć spawalniczych, przyklejenia lub zawalcowania. Na oczyszczonej powierzchni, po naniesieniu tzw. zawiesiny magnetycznej i podłączeniu defektoskopu, obserwuje się miejsca występowania defektogramów proszkowych, tj. skupisk proszku magnetycznego obrazujących nieciągłości. Przykłady wykrytych nieciągłości spoiny pachwinowej na końcach blach czołowych styków belek torowiska wciągarok przedstawiono na rysunkach 5.



Rys. 5. Miejsca badań magnetyczno-proszkowych styków belek torowiska z uwidocznionymi pęknięciami

Ogólne zasady badań ultradźwiękowych wyrobów przemysłowych podaje norma PN-EN ISO 16810:2014-06 [11]. Dokładniejsze zasady określają normy szczegółowe. Przykładowo techniki badania złączy spawanych metali o grubości ≥ 8 mm opisuje PN-EN ISO 17640:2018-01 [12]. Powyższa norma odnosi się do badań ręcznych. Niektóre badania mają określone normowo poziomy akceptacji, np. dla badań ultradźwiękowych złączy spawanych ze spoinami czołowymi z pełnym przetopem w stalach ferrytycznych podaje je norma PN-EN ISO 11666:2018-04 [13]. Do automatycznego lub półautomatycznego badania złączy spawanych materiałów metalowych o grubości ≥ 6 mm stosuje się technikę dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD), której zastosowanie określono normą PN-EN ISO 10863:2011 [14]. Badanie ultradźwiękowe spoin stali nierdzewnych, austenitycznych, duplex, metali różnych czy stopów na bazie niklu określa PN-EN ISO 22825:2017-12 [15]. Bardziej zaawansowaną techniką badań ultradźwiękowych jest metoda Phased Array wykorzystująca głowice wieloprzetwornikowe. Charakteryzuje się ona dużą wydajnością i pewnością badań, umożliwia kontrolę jakości wykonanych badań, a także precyzyjną wizualizację niezgodności i zapis wyników. Badania tą metodą określa norma PN-EN ISO 13588:2013-04 [16].

Badania radiograficzne wykonywane są aparatami rentgenowskimi lub rzadziej gamma-graficznymi. Wymagany jest dostęp z obu stron prześwietlanego elementu. Ze względu na szkodliwe działanie promieniowania jonizującego konieczne jest opuszczenie terenu badań przez inne osoby. Podstawowe zasady radiografii przemysłowej przy wykorzystaniu technik błonowych, stosowanych do kontroli metalowych produktów i materiałów, omawia norma PN-EN ISO 5579:2014-02 [17]. Wymagania dotyczące badania radiograficznego spoin z wykorzystaniem techniki błonowej zawarte są w normie PN-EN ISO 17636-1:2013-06 [18], a dla przemysłowej radiografii cyfrowej w normie PN-EN ISO 17636-2:2013-06 [19].

Badanie prądami wirowymi przeprowadza się w materiałach przewodzących prąd elektryczny i pozwala wykrywać niezgodności. Zaletami tego badania jest możliwość jego wykonania przez powłokę malarską, wysoka czułość i niezawodność wykrywania defektów oraz możliwość prowadzenia prac w miejscach trudno dostępnych. Jednak powłoki przewodzące prąd (np. ocynkowanie) uniemożliwiają badanie prądami wirowymi. Ogólne zasady wykonywania tych badań podaje norma PN-EN ISO 15549:2011 [20]. Metodą prądów wirowych można również badać złącza spawane [21], ale są one przeważnie trudne do kontroli z uwagi na nierówności lica spoiny. Jedynie spoiny o gładkim licu, które zazwyczaj powstają w procesach automatycznych, np. w rurach ze szwem, badanie tą metodą jest uzasadnione. Badanie spoin prądami wirowymi opisuje norma PN-EN ISO 17643:2015-11 [22].

Badanie emisją akustyczną stosuje się do monitoringu zbiorników ciśnieniowych, rurociągów i mostów stalowych. Polega ono na rejestracji drgań harmonicznycych za pomocą czujników piezoelektrycznych, które zamieniają odkształcenie wywołane falą sprężystą na sygnał elektryczny. Sygnał ten charakteryzuje się bardzo niskim napięciem, dlatego musi być wzmocniony, poddany filtracji usuwającej tło akustyczne i po zamianie na postać cyfrową obrabiany za pomocą komputera. Terminologię tych badań określa norma PN-EN 1330-9:2017-09 [23], ogólne zasady przeprowadzania – norma PN-EN 13554:2011 [24], charakterystykę urządzeń – PN-EN 13477-1:2002 [25], a weryfikację ich działania – PN-EN 13477-2:2010 [26]. Metodą tą można określić stopień korozji lub zlokalizować wycieki bez kosztownego i czasochłonnego opróżniania zbiorników. Podejmowane są także próby badania tą metodą spoin [27].

Badanie szczelności (coraz częściej nazywane badaniem nieszczelności) zwykle wykonywane jest metodą pęcherzykową, polegającą na pokryciu złącza pianotwórczym roztworem i wytworzeniu różnicy ciśnień po dwóch stronach badanej spoiny. W ten sposób w miejscach nieszczelności pojawiają się pęcherze pozwalające zlokalizować nieciągłość materiału. Zazwyczaj takim próbom poddaje się rurociągi, zbiorniki i inne konstrukcje, których dopuszczenie do eksploatacji wymaga szczelności złączy spawanych. Terminologię badań nieszczelności podaje norma PN-EN ISO 20484:2017-06 [28].

4. Wnioski

Rozwój nieniszczących metod diagnostyki pozwala coraz dokładniej identyfikować nieciągłości w elementach konstrukcji bez konieczności ich niszczenia czy wyłączenia z eksploatacji obiektów, w których zostały wbudowane. Niektóre metody, np. badanie emisją akustyczną, pozwalają na badanie całych obiektów, umożliwiając obniżenie kosztów diagnostyki.

Literatura

- [1] Gremza G., Analiza efektywności wzmocnienia ściskanego pręta z kątownikadrugim kątownikiem, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2017, seria Budownictwo 23, 86–102.
- [2] Kowolik B., Zamorowski J., Nośność stalowych elementów ściskanych i zginanych, pojedynczych i złożonych, z uwzględnieniem imperfekcji według norm PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1090-2, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2017, seria Budownictwo 23, 157–171.
- [3] Mikolašek D., Krejsa M., Brožovsky J., Pařenica P., Lehner P., Numerical and experimental analysis of welds in steel structural element, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2017, seria Budownictwo 23, 219–230.
- [4] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [5] PN-EN 1993-1-10:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.
- [6] PN-EN 13018:2016-04 Badania nieniszczące – Badania wizualne – Zasady ogólne.
- [7] PN-EN ISO 17637:2017-02 Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania wizualne złączy spawanych.
- [8] PN-EN ISO 9934-1:2017-02 Badania nieniszczące – Badania magnetyczne proszkowe – Część 1: Zasady ogólne.
- [9] PN-EN ISO 3452-1:2013-08 Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne.
- [10] PN-EN ISO 17638:2017-01 Badanie nieniszczące spoin – Badanie magnetyczno-proszkowe.
- [11] PN-EN ISO 16810:2014-06 Badania nieniszczące – Badania ultradźwiękowe – Zasady ogólne.
- [12] PN-EN ISO 17640:2018-01 Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe – Techniki, poziomy badania i ocena.
- [13] PN-EN ISO 11666:2018-04 Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe – Poziomy akceptacji.
- [14] PN-EN ISO 10863:2011 Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe – Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD).
- [15] PN-EN ISO 22825:2017-12 Badanie nieniszczące spoin – Badanie ultradźwiękowe – Badanie spoin w stalach austenitycznych i stopach na bazie niklu.
- [16] PN-EN ISO 13588:2013-04 Badania nieniszczące spoin – Badanie ultradźwiękowe – Stosowanie technologii zautomatyzowanej głowicy mozaikowej.
- [17] PN-EN ISO 5579:2014-02 Badania nieniszczące – Badania radiograficzne materiałów metalowych z zastosowaniem błon i promieniowania X lub gamma – Zasady podstawowe.
- [18] PN-EN ISO 17636-1:2013-06 Badania nieniszczące spoin – Badanie radiograficzne – Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną.
- [19] PN-EN ISO 17636-2:2013-06 Badania nieniszczące spoin – Badanie radiograficzne – Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi.
- [20] PN-EN ISO 15549:2011 Badania nieniszczące – Badania metodą prądów wirowych – Zasady ogólne.
- [21] Sozański L., Sokołowski P., Normalizacja wykrywania i oceny powierzchniowych niezgodności spawalniczych, Przegląd Spawalnictwa 2013, 6, 33–36.
- [22] PN-EN ISO 17643:2015-11 Badanie nieniszczące spoin – Badanie prądami wirowymi spoin przez analizę płaszczyzny zespolonej.
- [23] PN-EN 1330-9:2017-09 Badania nieniszczące – Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną.
- [24] PN-EN 13554:2011 Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne.
- [25] PN-EN 13477-1:2002 Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 1: Opis aparatury.
- [26] PN-EN 13477-2:2010 Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 2: Weryfikacja działania.
- [27] Droubi M.G., Faisal N.H., Orr F., Steel J.A., El-Shaib M., Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints, Journal of Constructional Steel Research 2017, 134, 28–37.
- [28] PN-EN ISO 20484:2017-06 Badania nieniszczące – Badanie nieszczelności – Terminologia.

Diagnostics of steel construction elements

ABSTRACT:

The paper presents selected diagnostic tests of steel construction elements. These tests are carried out both at the stage of quality control during the construction process and damage diagnosis of components during exploitation. To avoid damage during the test, non-destructive methods are usually used. The paper discusses commonly performed tests such as penetrant, magnetic-particle or ultrasonic tests, but also those that have only recently been used, for example, eddy currents or acoustic emission method. Also damage to structural elements occurring in construction incidentally are shown and rarely performed tests are described.

KEYWORDS:

non-destructive testing; diagnostics; steel structures