

## **BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH W ELEMENTACH WYBRANYCH KONSTRUKCJI**

Zbigniew L. KOWALEWSKI\*, Tadeusz SZYMCZAK\*\*

\*Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

\*\*Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa

*zkowalew@ippt.pan.pl*

### **1. Wstęp**

Spajanie elementów konstrukcyjnych może odbywać się z wykorzystaniem różnych technik, spośród których można wymienić: klejenie, lutowanie, zgrzewanie, spawanie, względnie metod typowo mechanicznych, jak nitowanie, kołkowanie, połączenia gwintowane i inne. Mimo że metodyka badań wymienionych sposobów spajania jest zróżnicowana, to jednak ma jeden wspólny mianownik w postaci konieczności ich oceny pod względem wytrzymałości. W poniższym opracowaniu przedstawione zostaną wybrane badania wytrzymałościowe połączeń spawanych ze szczególnym naciskiem położonym na spoiny występujące w zbiornikach ciśnieniowych oraz obwodowe połączenia spawanych rurociągów.

Podstawową sprawą w ocenie jakości połączeń spawanych elementów konstrukcyjnych jest określenie rozmiarów wad krytycznych, które mogą doprowadzić do zniszczenia pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Wykrycie wad materiałowych i spawalniczych metodami ultradźwiękowymi czy radiograficznymi nie daje jeszcze wystarczających podstaw do oceny, w jakim stopniu wykryte wady wpłyną na obniżenie właściwości wytrzymałościowych konstrukcji. Podstawą takiej oceny może być mechanika pękania i badania doświadczalne typu niszczącego.

### **2. Badania wytrzymałościowe połączeń spawanych zbiorników ciśnieniowych**

Zbiorniki ciśnieniowe należą do elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do gromadzenia lub przechowywania różnego typu substancji. Rozważania zawarte w poniższym punkcie pracy zostaną ograniczone tylko do zbiorników służących do przechowywania paliw (LPG), które należą do najcięższych elementów instalacji gazowych. Ich konstrukcja musi być na tyle bezpieczna, aby wartości naprężenia wywoływane w ich ściankach przez ciśnienie przechowywanego wewnątrz paliwa i siły bezwładności powstające w czasie ruchu samochodu, nie stanowiły zagrożenia, szczególnie podczas kolizji.

Zbiorniki LPG podlegają obowiązkowi dozoru technicznego, a ich zastosowanie w samochodach powoduje, że są projektowane w oparciu o szczegółowe wymagania zawarte w Regulaminie Homologacyjnym nr 67 EKG ONZ (Europejska Komisja Gospodarcza Organizacji Narodów Zjednoczonych) [1]. Dzięki temu nadzór nad tego rodzaju zbiornikami jest prowadzony już od etapu ich projektowania, zapewniając ich pełne bezpieczeństwo.

W zależności od temperatury otoczenia ciśnienie w zbiorniku LPG może sięgać nawet 2 MPa, a w procesie konstruowania przyjmuje się jeszcze wyższe ciśnienie obliczeniowe o wartości 3 MPa.

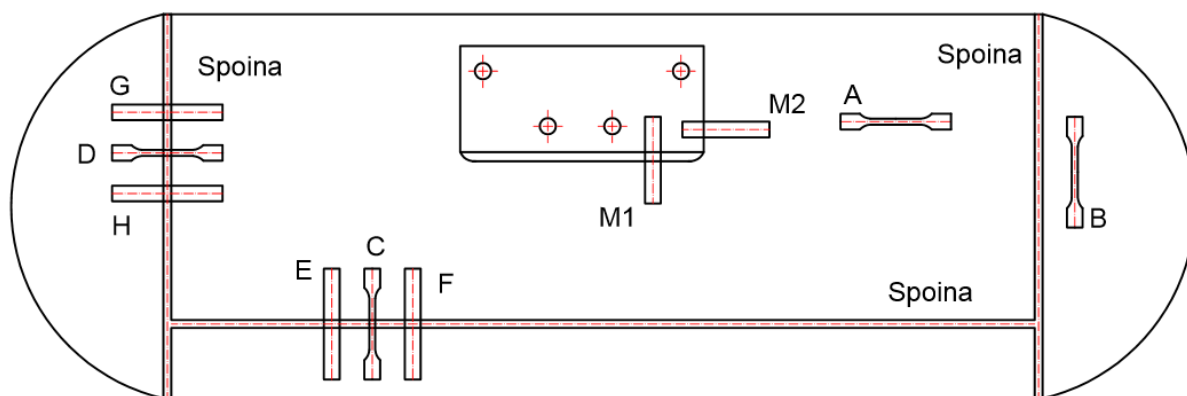
Zgodnie z wymaganiami Regulaminu nr 67 [1] zbiorniki LPG w samochodach należy konstruować ze stali dobrze spawalnych o właściwościach zgodnych z normą EN 10120 [2]. Określa ona wymagania dla stali na urządzenia ciśnieniowe. Są to stale niestopowe o niskiej zawartości węgla (do 0,2%).

Najczęściej spotykane zbiorniki LPG mają kształt toroidalny, względnie walcowy lub też inny, dostosowany do miejsca montażu w samochodzie. W zależności od wielkości zbiornika LPG grubość jego płaszcza może wynosić od około 2,5 do 4 mm. Oprócz grubości płaszcza i dennic, Regulamin nr 67 określa także sposób łączenia poszczególnych elementów zbiorników oraz rodzaj spoin, jakie należy stosować w tych połączeniach. Spoiny zbiorników LPG poddaje się kontroli radiograficznej. Dużą uwagę przywiązuje się również do kontroli połączeń spawanych pod względem wytrzymałościowym. W tym zakresie materiał rodzimy zbiornika wraz ze spoinami określonej liczby zbiorników z serii produkcyjnej jest poddawany badaniom wytrzymałościowym na rozciąganie i zginanie. Próbkę materiałów są pobierane ze ściśle miejsc określonych w Regulaminie [1]. Polega to na wycięciu niewielkich próbek materiału zbiornika oraz spoin i poddaniu ich badaniom pod kątem wytrzymałości na rozciąganie i zginanie na specjalnych stanowiskach laboratoryjnych.

## 2.1. Wytyczne do prowadzenia badań rozciągania wycinków zbiorników zawierających spoiny

### 2.1.1. Pobieranie próbek ze zbiorników

Próbki do badań wytrzymałościowych należy wycinać ze stref zbiornika, które zaleca Regulamin nr 67 [1], rys. 2.1.



Rys. 2.1. Rozmieszczenie próbek do badań mechanicznych i strukturalnych w zbiorniku zawierającym spoiny wzdłużne i obwodowe

Na rys. 2.1. przyjęto następujące oznaczenia dla pobieranych próbek: A-próbka do testu rozciągania materiału rodzimego walca; B-próbka do testu rozciągania materiału rodzimego dna; C-próbka poprzeczna do spoiny wzdłużnej do testu rozciągania; D-próbka poprzeczna do spoiny obwodowej; E-próbka poprzeczna do spoiny wzdłużnej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie wewnętrznej płaszcza zbiornika; F-próbka poprzeczna do spoiny

wzdłużnej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie zewnętrznej płaszcza zbiornika; G-próbka poprzeczna do spoiny obwodowej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie wewnętrznej płaszcza zbiornika; H-próbka poprzeczna do spoiny obwodowej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie zewnętrznej płaszcza zbiornika; M1 i M2-próbki do badań mikroskopowych ze spoiny łączącej płytę armaturową ze zbiornikiem, odpowiednio w kierunkach: poprzecznym i wzdłużnym do głównej osi zbiornika

Przy pobieraniu próbek ze zbiornika należy przestrzegać następujących zaleceń:

- (a) Reprezentatywne strefy materiałowe powinny być uprzednio ponumerowane trwale, tak aby można było odtworzyć ich orientację w płaszczu zbiornika.
- (b) Powierzchnia strefy materiałowej powinna być na tyle duża by zapewnić wycięcie minimum jednej próbki. W przypadku występowania krzywoliniowości strefy reprezentatywnej należy poddać ją prostowaniu stosując obróbkę plastyczną na zimno. W trakcie próby oraz po jej zakończeniu należy zwrócić uwagę, czy nie powstały pęknięcia, rozwarstwienia, bądź inne uszkodzenia, które mogłyby zdyskwalifikować materiał jako półprodukt do wytworzenia próbek.
- (c) Próbki należy wycinać techniką uniemożliwiającą zmiany właściwości mechanicznych materiału/spoiny zbiornika. Zaleca się cięcie wodą. Rozpoczęcie cięcia i jego zakończenie nie powinno znajdować się w strefie pomiarowej próbki.
- (d) Wymiary próbki powinny być zgodne z wytycznymi Regulaminu nr 67 [1].
- (e) Każdą z próbek również należy ponumerować w taki sposób, aby można było odtworzyć ich ułożenie w płaszczu zbiornika oraz wskazanie, która z powierzchni próbki reprezentuje zewnętrzną, a która wewnętrzną stronę płaszcza. Numer próbki powinien znajdować się również na zbiorniku.
- (f) Proponowane oznaczenie próbki w przypadku:
  - próbki ze spoiną obwodową „DSO–kod zbiornika–numer kolejny próbki”; gdzie: D – dolna powierzchnia płaszcza, S – wskazuje na próbkę ze spoiną, O – określa spoinę obwodową, z kolei W – będzie oznaczało spoinę wzdłużną. W miejsce litery D można wprowadzić literę G – oznaczającą zewnętrzną powierzchnię płaszcza zbiornika;
  - próbki ze spoiną wzdłużną „DSW–kod zbiornika–numer kolejny próbki”, gdzie: W – określa spoinę wzdłużną;
  - próbki z materiału rodzimego „M–kod zbiornika–kod ułożenia próbki w płaszczu zbiornika”, gdzie: M–oznacza materiał rodzimy, W–wzdłużne usytuowanie próbki; P– usytuowanie poprzeczne próbki.

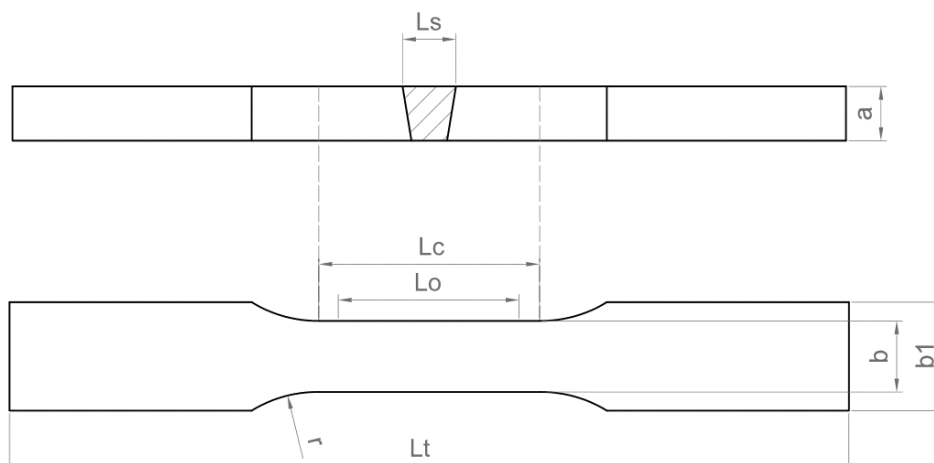
### **2.1.2. Wymiary próbek i wytyczne ich obróbki**

W badaniach wytrzymałościowych zbiorników konieczne jest przestrzeganie reguł przedstawionych w Regulaminie nr 67 [1] oraz normie PN-EN 895:1997 [3]. Spośród najważniejszych zaleceń można wymienić:

- zalecana szerokość próbki w strefie pomiarowej wynosi 25 mm;
- usytuowanie spoiny powinno znajdować się w środku strefy pomiarowej próbki;
- długość strefy pomiarowej - 15 mm, mierzona od krawędzi spoiny w obu kierunkach; szerokość próbki powinna się zwiększać progresywnie;
- nadwyżkę spoiny należy usunąć obróbką mechaniczną;
- grubość próbki powinna być stała na całej długości  $L_c$ ;

- przygotowanie powierzchni próbki powinno odbywać się za pomocą obróbki skrawaniem lub szlifowaniem i w taki sposób, aby nie doprowadzać do nadmiernego nagrzewania bądź zgniotu powierzchniowego;
- cały obszar próbki na długości  $L_c$  powinien być pozbawiony rys i kraterów usytuowanych poprzecznie do głównej osi próbki, z wyjątkiem podtopień, których nie powinno się usuwać, jeżeli we właściwej normie nie ma takiego wymagania [3].

Szkic kształtu próbek ze spoiną według [3] przedstawiono na rys.2.2, natomiast wymiary na nim oznaczone zamieszczono w tab.2.1.

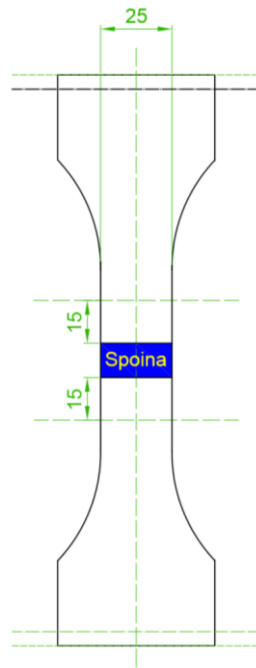


Rys. 2.2. Próbkę ze spoiną do badania właściwości blach według [3] „Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych”, gdzie  $a$  – grubość próbki;  $b$  – szerokość próbki w strefie pomiarowej,  $b_1$  – szerokość części chwytowej

Tab. 2.1. Wymiary próbek z blach i rur (wg PN-EN 895:1997 [3])

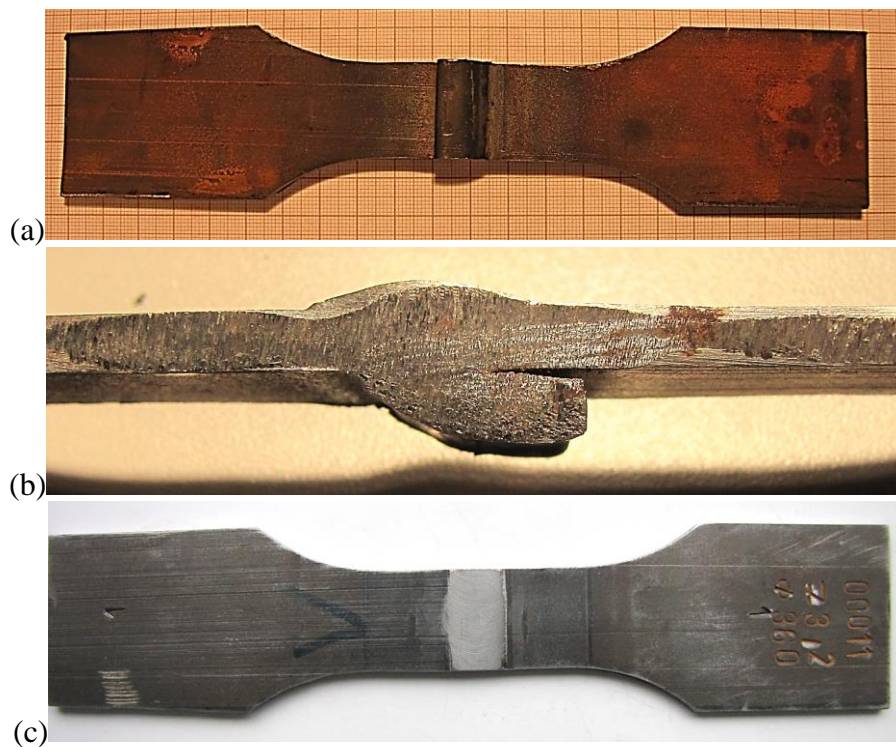
Określenie		Symbol	Wymiary [mm]
Długość całkowita		$L_t$	
Szerokość główki		$b_1$	
Szerokość pomiarowej równoległej części roboczej	blach	$b$	12 dla $\leq 2$ 25 dla $a > 2$
	rur	$b$	6 dla $D \leq 50$ 12 dla $50 < D \leq 168,3$ 25 dla $D > 168,3$
Długość równoległej części główki		$L_c$	$\geq L_s + 60$
Promień główki		$r$	25

Z kolei na rys. 2.3 pokazano próbkę zalecaną w Regulaminie nr 67 [1].



*Rys. 2.3. Próbkę ze spoiną do badania właściwości mechanicznych blach w próbie rozciągania według Regulaminu nr 67[1]*

Na zdjęciach, rys.2.4, przedstawiono próbki zawierające spawy, które ilustrują częstą konieczność usuwania nadmiaru materiału spoiny przed wykonaniem testów.



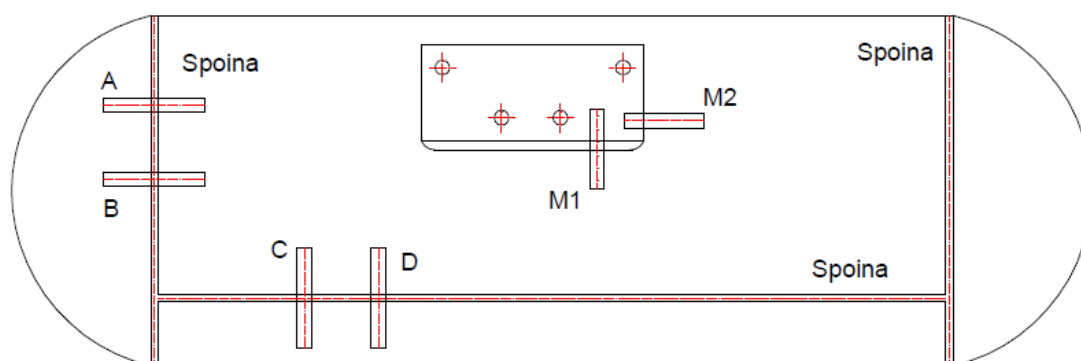
*Rys. 2.4. Widok próbek ze spawem: (a) i (b) wymagających zebrania nadmiaru materiału spoiny; (c) próbka po zdjęciu nadmiaru materiału ze strefy spawu*

Prawidłowo wykonana spoina w zbiorniku nie może pęknąć podczas rozciągania w strefie spawu ani w strefie wpływu ciepła. Gdy zaistnieje taka sytuacja, technologia spawania powinna zostać zakwestionowana. Pozostałe warunki próby rozciągania reguluje norma [4].

## 2.2. Wytyczne do prowadzenia badań zginania wycinków zbiorników zawierających spoiny

### 2.2.1. Pobieranie próbek ze zbiorników

Próbki do badań wytrzymałościowych należy wycinać ze stref zbiornika, które zaleca Regulamin nr 67, rys. 2.5.



Rys. 2.5. Rozmieszczenie próbek do badań mechanicznych i strukturalnych w zbiorniku zawierającym spoiny wzdłużne i obwodowe

Na rys. 2.5 przyjęto następujące oznaczenia dla pobieranych próbek: A-próbka poprzeczna do spoiny obwodowej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie wewnętrznej płaszczu zbiornika; B-próbka poprzeczna do spoiny obwodowej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie zewnętrznej płaszczu zbiornika; C-próbka poprzeczna do spoiny wzdłużnej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie wewnętrznej płaszczu zbiornika; D-próbka poprzeczna względem spoiny wzdłużnej do testu zginania realizowanego w taki sposób, aby naprężenie normalne powodujące rozciąganie występowało po stronie zewnętrznej płaszczu zbiornika; M1 i M2-próbki do badań mikroskopowych ze spoiny łączącej płytę armaturową ze zbiornikiem, odpowiednio w kierunkach: poprzecznym i wzdłużnym do głównej osi zbiornika. Zalecenia odnośnie sposobu pobierania wycinków do badań wytrzymałości na zginanie są analogiczne, jak dla badań wytrzymałości na rozciąganie (punkt 2.1.1).

### 2.2.2. Wymiary próbek, wytyczne ich obróbki, przebieg próby

Badania zginania wycinków pobranych ze zbiorników należy prowadzić według reguł przedstawionych w Regulaminie nr 67 [1] oraz normie PN-EN ISO 5173 [5]. Do najważniejszych zaleceń można zaliczyć:

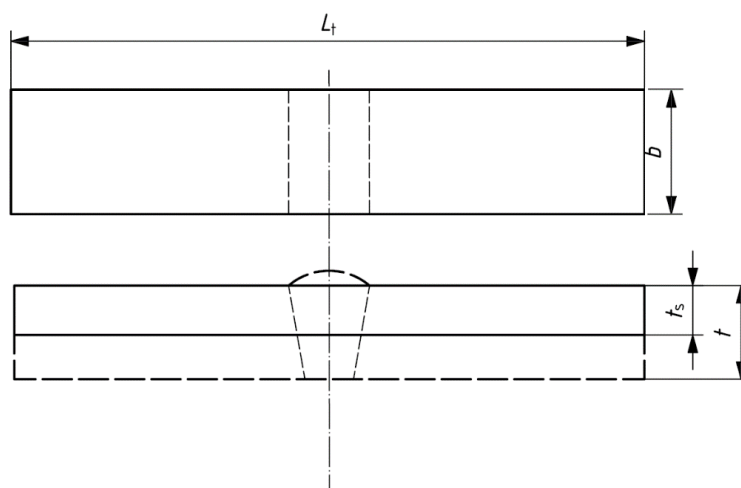
- usytuowanie spoiny w środku próbki;
- grubość „ $t_s$ ” materiału powinna być taka, jak grubość materiału rodzimego, lecz nie większa niż 30 mm;

- nadwyżkę spoiny należy usunąć obróbką mechaniczną;
- grubość próbki powinna być stała na całej długości próbki  $L_t$ ;
- przygotowanie powierzchni próbki powinno odbywać się za pomocą obróbki skrawaniem lub szlifowaniem, i w taki sposób, aby nie doprowadzać do nadmiernego nagrzewania, bądź zgniotu powierzchniowego;
- obszar na długości  $L_t$  powinien być pozbawiony rys i kraterów usytuowanych poprzecznie do głównej osi próbki, z wyjątkiem podtopień, których nie powinno się usuwać, jeżeli we właściwej normie nie ma takiego wymagania.

Kształt próbek ze spoiną według PN-EN ISO 5173:2010 [5] przedstawiono na rys. 2.6, natomiast wymiary na nim oznaczone zamieszczono w tab. 2.2.

Tab. 2.2. Wymiary próbek z blach i rur (wg PN-EN ISO 5173:2010 [5])

Określenie		Symbol	Wymiary [mm]
Długość całkowita		$L_t$	
Grubość próbki		$t_s$	$10 \pm 0,5$ mm
Grubość materiału		$t$	$t < 30$
Szerokość	blach	$b$	$4t_s \leq b$
	rur	$b$	$b = t + 0,1D$ dla $D \leq 50$ min 8 $b = t + 0,5D$ dla $D > 50$
Promień krawędzi od strony rozciąganej		$r$	$0,2t_s < r < 3$ mm

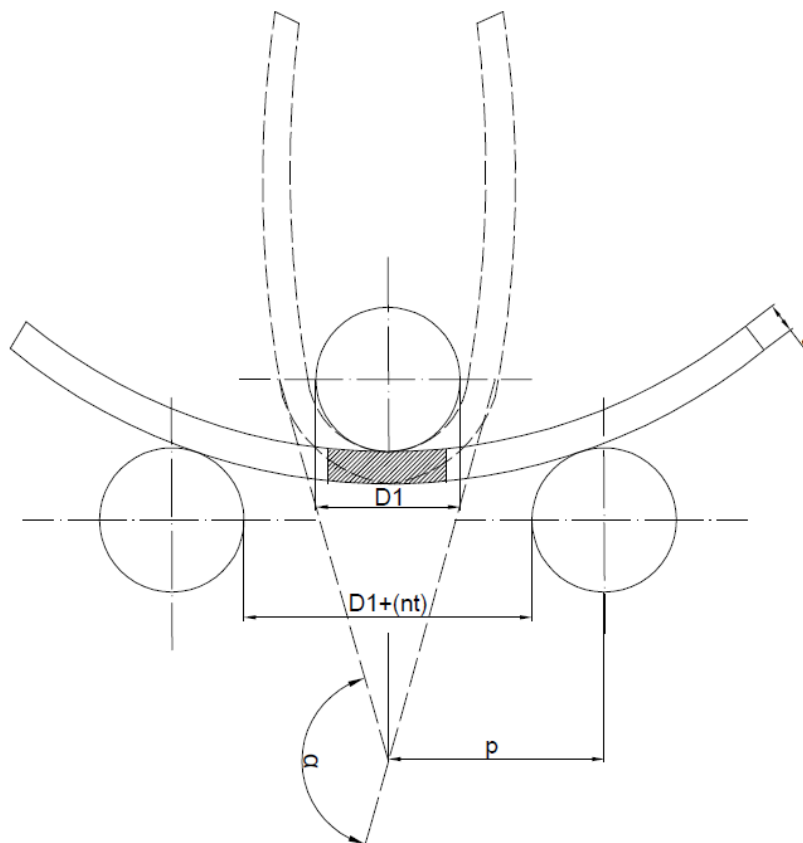


Rys. 2.6. Próbkę ze spoiną do badania właściwości blach w teście zginania według EN ISO 5173:2010 [5]

Próbie zginania należy przeprowadzać według obowiązujących norm (PN-EN ISO 7438:2006 [6], Regulamin nr 67 [1]). Poniżej sformułowano główne zalecenia wymienione w tych dokumentach, a mianowicie:

- próba zginania powinna być prowadzona w temperaturze otoczenia, o wartości z zakresu od 10 do 35 °C; w przypadku badań kontrolnych, temperatura musi być równa  $23 \pm 5$  °C;

- próbę należy realizować metodą trójpunktowego zginania, wymienioną w normie PN-EN ISO 7438:2006 [6];
- stosunek ( $n$ ) średnicy trzpienia  $D1$  (rys. 2.7) do grubości próbki  $t$  nie może przekraczać wartości:
  - 2 - przy  $R_m < 440$ ,
  - 3 - przy  $440 < R_m < 520$ ,
  - 4 - przy  $R_m > 520$ ,
- próbę należy realizować do osiągnięcia maksymalnego przesunięcia trzpienia w podanych warunkach (rys.2.7)



Rys. 2.7. Schemat ustawienia próbki podczas próby zginania

Po wykonaniu próby zginania należy:

- przeprowadzić jej ocenę zgodnie z wymaganiami wyrobu;
- obliczyć kąt zgięcia z pomiaru przesunięcia trzpienia  $f$  korzystając z zależności:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{p \times c + W \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2}, \quad \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{W \times p + c \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2}, \quad (2.1)$$

gdzie:  $W = \sqrt{p^2 + (f - c)^2} - c$ ,

$$c = 25 + t + \frac{D_1}{2},$$

$f$  – przesunięcie trzpienia.



Brak pęknięć widocznych bez użycia przyrządów powiększających przyjmuje się za dowód pozytywnego wyniku próby. Kąt zginania, określony w normach wyrobu, należy zawsze przyjmować jako minimalny. Jeżeli określono wewnętrzny promień zginania, to należy go traktować jako maksymalny.

### **3. Badania wytrzymałościowe obwodowych połączeń spawanych rurociągów**

Ocena jakości obwodowych połączeń spawanych rurociągów z uwzględnieniem mechaniki zniszczenia była już dość dawno przedstawiona w opracowaniu pt. „Welding of Pipelines and Related Facilities” przygotowanym pod auspicjami American National Standards Institute i American Petroleum Institute, wydanym jako ANSI/API STANDARD 1104 [7]. Przyjęta tam procedura kwalifikacji obwodowych połączeń spawanych rurociągów stanowi podstawę wielu późniejszych badań. Podstawą tej kwalifikacji są badania odporności na pęknięcie polegające na wyznaczeniu przemieszczenia rozwarcia wierzchołka pęknięcia zmęczeniowego, określanego w skrócie jako CTOD (Crack Tip Opening Displacement) standardowej próbki wyciętej ze strefy połączenia spawanego. Wartość CTOD może być wyznaczana na przykład zgodnie z normą brytyjską (BS 7448 z 1991 roku [8]) lub też innymi nowszymi normami.

Próby CTOD (Crack Tip Opening Displacement) przeprowadza się najczęściej bazując na:

1. Wytycznych zawartych w normie przedmiotowej ASTM E 1290 - 99 [9];
2. Wskazówkach znajdujących się w normie ASTM E-399 – 12e3 [10];
3. Wymaganiach zamieszczonych w PN-EN ISO 15653:2010 [11];
4. Wymaganiach opisanych w BS 7910: 2013+A1:2015 [12].

Wymieniona jako pierwsza, norma badania połączeń spawanych w rurociągach, stanowi alternatywną ocenę wytrzymałościowej ich jakości i jest nieco mniej restrykcyjna niż pozostałe wymienione. Jednak przy ocenie połączeń w starszych rurociągach wciąż może być wykorzystywana, ponieważ istotnie lepiej odpowiada stosowanym w przeszłości technologiom spawania.

Zgodnie z normą API 1104 [7] program badań powinien obejmować:

1. Wykonanie dwóch kompletów próbek, po trzy próbki ze szczeliną usytuowaną w środku spawu i w strefie wpływu ciepła wycięte z pozycji godzinowej odpowiadającej godzinie 12, 3 i 6 o grubości nominalnej równej grubości rury pomniejszonej o minimalną warstwę materiału niezbędną do uzyskania prostopadłościenną próbkę normową, jaką można uzyskać z przekroju rury. Próbki powinny być wycięte z kwalifikowanego złącza spawanego, w którym nie stwierdzono wad metodami nieniszczącymi (ultradźwiękowymi, radiograficznymi).
2. Wytrawienie wzdłużnego przekroju wyciętych próbek w celu uwidocznienia kształtu i położenia spawu. Wstępne nacięcie i powstałe następnie pęknięcie zmęczeniowe dla badań spawu powinno być zlokalizowane w środku spawu.
3. Wykonanie pomiarów mikrotwardości w celu określenia strefy o najwyższej mikrotwardości, przez którą powinno przebiegać wstępne nacięcie i powstałe następnie pęknięcie zmęczeniowe dla badań strefy wpływu ciepła.
4. Wykonanie wstępnych pęknięć zmęczeniowych zgodnie z normą BS 7448 [8].
5. Wykonanie prób rozwarcia pęknięcia zmęczeniowego w temperaturze obniżonej o 15°C w stosunku do najniższej przewidywanej średniej temperatury pracy rurociągu.
6. Po wykonaniu badań CTOD należy sprawdzić spełnienie warunków ważności badań dotyczących geometrii czoła pęknięcia zmęczeniowego zgodnie z normą BS 7448 [8].

7. Próbkę nieprawidłowo obrobioną, niespełniającą warunków dopuszczalnego kształtu czoła pęknięcia zmęczeniowego lub wykazującą w przekroju poprzecznym po rozerwaniu obecność wad spawalniczych przyległych do pęknięcia zmęczeniowego uznawane są za nieważne.

### **3.1. Uwagi dotyczące badanego materiału, prowadzenia badań oraz warunków ważności badań**

#### **3.1.1. Zalecenia**

Przed przystąpieniem do badań konieczne jest przeprowadzenie szeregu czynności porządkowych zapewniających szybką identyfikację uzyskiwanych wyników badań szczegółowych. Należą do nich: przyjęcie czytelnego systemu oznaczania dostarczonych próbek; opis procedur spawania w dostarczonych elementach; dokumentacja dotycząca wymiarów spawanych elementów oraz identyfikująca rodzaj i właściwości materiału, dane o zastosowanej technologii spawania (technologiczna instrukcja spawania).

#### **3.1.2. Wytyczne do prowadzenia badań odporności na pękanie złączy obwodowych**

Badania prowadzone są na podstawie wymienionych wcześniej norm, na przykład normy API 1104 [7], która podaje alternatywne kryterium oceny dopuszczalności wad wykorzystujące mechanikę pęknięcia materiału oraz zasadę dopasowywania wyników do ogólnych danych doświadczalnych w celu określenia dopuszczalnych wymiarów wad spawania.

Kryterium alternatywne stosuje się dla złączy rur o jednakowej grubości ścianek, pod warunkiem że poddane zostały badaniom nieniszczącym. Nie stosuje się dla złączy naprawianych oraz tych, które uległy odkształceniu plastycznemu.

W celu ustalenia kryterium dopuszczalności wad w oparciu o mechanikę pęknięcia materiału należy określić odporność na pękanie złączy spawanych bez wad za pomocą próby CTOD, którą należy wykonać według zaleceń normy BS 7448 [8] przy jednoczesnym spełnieniu uzupełniających wymagań normy API 1104 [7], a zwłaszcza w odniesieniu do temperatury badań. Badania wykonywane są w temperaturze o 15°C niższej od najmniejszej spodziewanej średniej temperatury pracy rurociągu. Dopuszczalne wymiary wad określa się dla danego poziomu największych wartości naprężenia osiowego, jakim może być poddany obiekt dla jednego z dwóch poziomów minimalnej odporności na pękanie: CTOD=0.127 mm, oraz CTOD=0.254 mm.

Próbki do badań odporności na pękanie pobiera się ze złącza obwodowego w ten sposób, aby szerokość próbki CTOD była równoległa do osi rury, natomiast linia wierzchołka karbu powinna być usytuowana wzdłuż grubości ścianki rury. Grubość próbki powinna być równa lub nieznacznie mniejsza od grubości rury. Zmniejszenie grubości ma miejsce w przypadku zastosowania obróbki skrawaniem jej zewnętrznych powierzchni w celu otrzymania prostokątnego przekroju poprzecznego. W każdym przypadku nadlewy lica i grani spoiny muszą być usunięte.

W ten sposób przygotowane próbki poddaje się trawieniu dla uwidocznienia kształtu spoiny i strefy wpływu ciepła oraz w celu zapewnienia wykonania karbu w żądanym miejscu.

Dla próbek CTOD z karbem w strefie wpływu ciepła wymagane jest przeprowadzenie pomiarów twardości na wytrawionej próbce. Celem tych pomiarów jest zlokalizowanie obszaru o największej twardości, ponieważ wierzchołek karbu powinien być umiejscowiony właśnie w tym obszarze. Zazwyczaj obszar ten znajduje się w strefie wpływu ciepła w pobliżu linii wtopienia ostatniego ściegu.

Po wykonaniu próby CTOD sprawdza się zgodnie z normą BS 7448 [8] warunki ważności próby. Warunki te związane są z geometrią frontu pęknięcia zmęczeniowego.

### 3.1.3. Warunki ważności badań odporności złączy spawanych na pęknięcie

Warunki uznania badań odporności złączy spawanych ze względu na pęknięcie formułowane są w odpowiednich normach. Na przykład według normy brytyjskiej BS 7448 [8] sprowadzają się do:

- 1) Sprawdzenia wymiarów i tolerancji próbek przed wykonaniem pęknięcia zmęczeniowego;
- 2) Kontroli przed wykonaniem próby zniszczenia, czy:
  - minimalna długość pęknięcia (a) na powierzchni próbki wynosi co najmniej  $0.45W$ , gdzie  $W$  jest efektywną szerokością próbki (patrz rys. 3.1);
  - oba końce pęknięcia zmęczeniowego mają długość co najmniej 1.3 mm lub  $2.5\%W$  (przyjmujemy wartość większą), mierzoną od dna karbu;
  - różnica pomiędzy zmierzonymi długościami pęknięcia zmęczeniowego na obu powierzchniach nie przekracza 15% średniej wartości z obu pomiarów;
  - pęknięcie zmęczeniowe na obu powierzchniach próbki mieści się w obrysie wskazywanym w normach;
  - płaszczyzna pęknięcia zmęczeniowego nie odchyła się więcej niż  $10^\circ$  od płaszczyzny karbu wstępnego;
- 3) Sprawdzenia po próbie zniszczenia, czy
  - nie występuje wielopłaszczyznowe pęknięcie zmęczeniowe;
  - średnia długość szczeliny w stosunku do szerokości  $W$  zawiera się w granicach 0.45 - 0.55;
  - żadne dwa pomiary z wykonanych dziewięciu pomiarów szczeliny nie różnią się więcej niż o 10%;
  - czoło pęknięcia zmęczeniowego w żadnym miejscu nie jest bliżej położone dna karbu niż 1.3 mm lub  $2.5\% W$  (przyjmujemy wartość większą);
  - płaszczyzna pęknięcia zmęczeniowego nie odchyła się więcej niż 10% od płaszczyzny szczeliny wstępnej;
- 4) Sprawdzenia innych wymagań związanych z
  - wartością współczynnika intensywności naprężenia, która w trakcie wykonywania pęknięcia zmęczeniowego powinna mieścić się w granicach określonych w normie BS 7448 [8];
  - wartością współczynnika asymetrii cyklu zmęczeniowego  $R$ , która nie powinna być większa od 0.1.

Protokół z badań powinien zawierać wszystkie elementy wymagane przez normę BS 7448 [8]. Szczególną uwagę należy zwrócić na zapis położenia próbki w złączu spawanym oraz na wskazanie parametru reprezentującego wartość CTOD. Do protokołu należy załączyć czytelną kopię przebiegu obciążenia i przemieszczenia oraz opis wyglądu powierzchni zniszczonej.

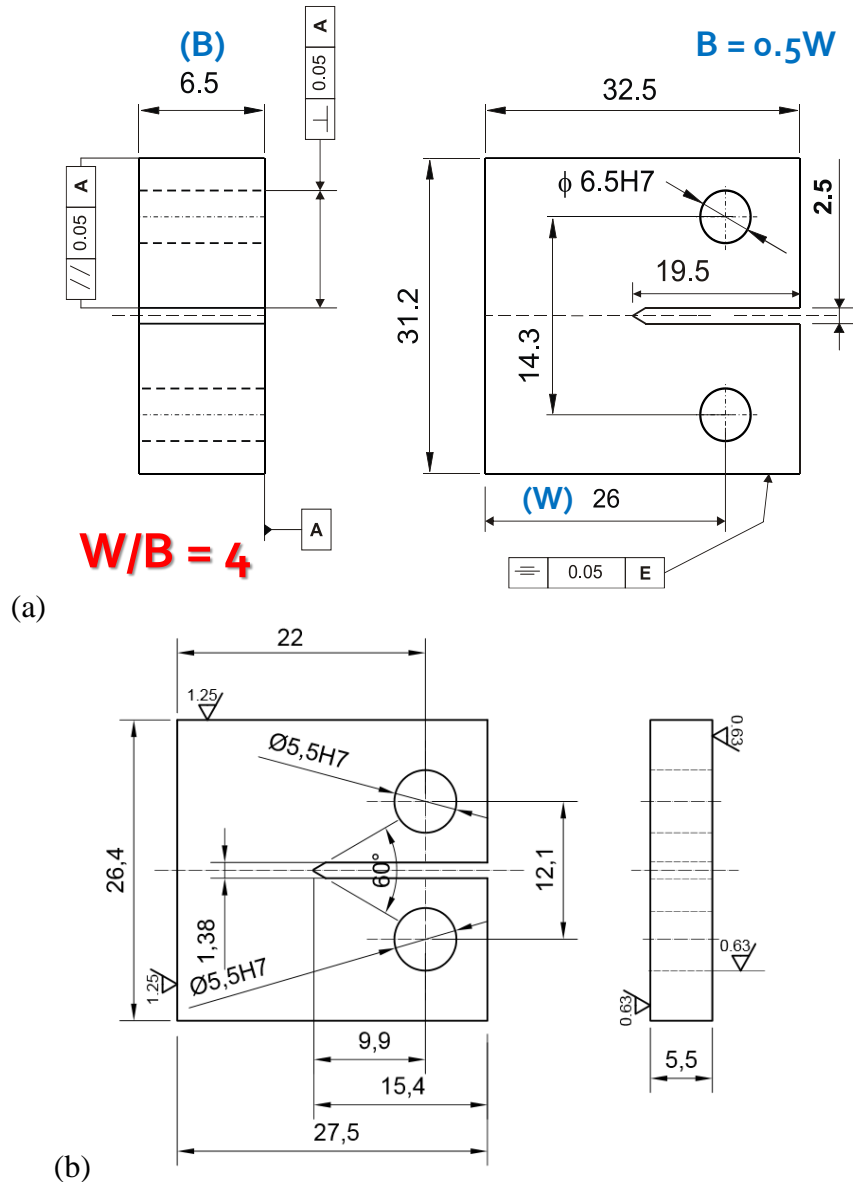
W celu uznania technologii spawania muszą być przeprowadzone kwalifikacyjne próby CTOD materiału spoiwa i strefy wpływu ciepła. Każde badanie powinno zawierać co najmniej trzy udane próby przeprowadzone w temperaturze o 15 stopni niższej niż najniższa przewidywana temperatura eksploatacji rurociągu. Z materiału obwodowego złącza spawanego pobierane są po 3 próbki w miejscach odpowiadających pozycji dla godziny 12; 3 oraz 6. Gdy jedna z trzech próbek pobranych z wyżej wymienionych miejsc da wynik niezadowolający (tj. wynik niespełniający wymagań kruchego pęknięcia), wówczas badaniu poddaje się dodatkową serię trzech próbek. Wyniki pięciu z sześciu zbadanych próbek muszą spełniać wymaganą odporność na kruche pęknięcie. Próbki, które nie spełniają zalecanych tolerancji wymiarów, nie spełniają kryterium dotyczącego krzywizny frontu pęknięcia

zmęczeniowego oraz podczas próby rozrywania wykazują dużych rozmiarów wady w strefie spawu w części przylegającej do frontu pęknięcia należy odrzucić i zastąpić je próbkami nowymi pochodzącymi z miejsc podobnie usytuowanych w testowanym wycinku rury.

### 3.1.4. Prace przygotowawcze do realizacji programu badań

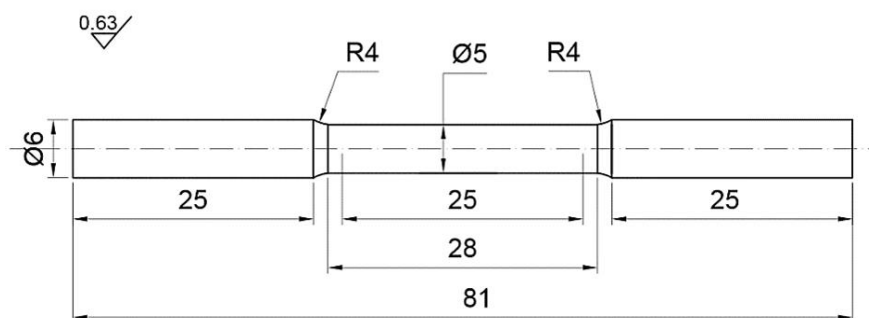
W ramach przygotowania typowych badań połączeń spawanych w rurociągach można wyróżnić następujące przedsięwzięcia:

- określenie wymiarów płaskiej próbki kompaktowej do badań odporności materiału na pękanie, rys. 3.1, możliwej do wykonania dla wszystkich dostarczonych wycinków gazociągu;



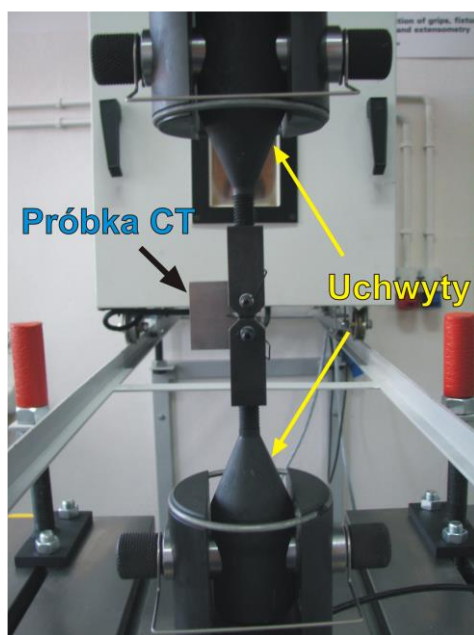
Rys. 3.1. Próbką kompaktowa: (a) z wymiarami zalecanymi przez normę; (b) przykład projektu próbki kompaktowej do badań odporności materiału na pękanie z dostosowaniem do grubości dostarczonego fragmentu rurociągu

- określenie wymiarów próbki do badań charakterystyki materiałowej w statycznej próbie rozciągania doczołowych złączy spawanych, rys. 3.2;

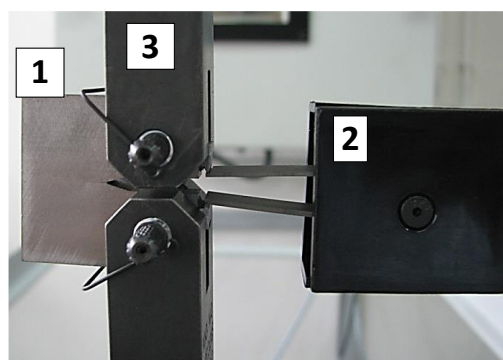


Rys. 3.2. Przykład projektu próbki do testu rozciągania uwzględniającego możliwość jego realizacji z dostarczonego fragmentu rurociągu

- zastosowanie uchwytów standardowych oferowanych przez firmy dystrybuujące maszyny wytrzymałościowe i ich wyposażenie, względnie projekt oraz wykonanie uchwytów do mocowania próbek w maszynie wytrzymałościowej, przedstawionych na zdjęciach (rys. 3.3) odpowiednio dla prób pęknięcia i do próby statycznego rozciągania;



(a)



(b)

Rys. 3.3. Próbką kompaktową CT: (a) zamocowana w przestrzeni roboczej maszyny; (b) wraz z ekstensometrem: 1-próbka, 2- ekstensometr, 3-cięgna

- przygotowanie stanowiska badawczego, zestawienie i kalibracja urządzeń pomiarowych oraz opracowanie oprogramowania komputerowego sterującego pracą maszyny wytrzymałościowej;
- przygotowanie oprogramowania komputerowego do opracowania wyników doświadczeń i ich graficznej prezentacji.

### 3.2. Przykłady wyników z przeprowadzonych badań

Komplet wyników z wykonanych badań odporności na pękanie doczołowych złączy spawanych powinien zawierać:

- dokumentację fotograficzną ilustrującą materiał dostarczony do badań;
- dokumentację ilustrującą położenie próbek w dostarczonym materiale badawczym;
- dokumentację z trawienia wzdłużnych przekrojów wyciętych z rury pasków w celu uwidocznienia pozycji i kształtu spoin oraz zasięgu strefy wpływu ciepła;
- dokumentację z pomiarów mikrotwardości dla ustalenia obszaru o jej największej wartości;
- dane dotyczące wykonania próbek;
- protokoły z pomiarów próbek;
- dokumentację wykonania wstępnego pęknięcia zmęczeniowego dla wszystkich próbek w temperaturze pokojowej;
- dokumentację z prób CTOD w temperaturze obniżonej o 15°C w stosunku do najniższej średniej temperatury pracy rurociągu dla wszystkich próbek;
- dokumentację fotograficzną przełomów badanych próbek;
- sprawozdanie z dyskusją otrzymanych wyników i wnioski końcowe z podaniem zaleceń dla użytkownika testowanej instalacji.

#### 3.2.1. Dokumentacja fotograficzna ilustrująca materiał dostarczony do badań

Materiał pochodzący z rurociągów dostarczany jest najczęściej w postaci wyciętych pełnych odcinków rur lub jej fragmentów, które zawierają obszary spoin, rys. 3.4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Rys. 3.4. Przykładowe zdjęcia elementów z eksploatowanej instalacji

Materiał dostarczony w takiej postaci podlega makroskopowym oględzinom wizualnym. Dla przypadku pokazanego na zdjęciach 3.4a i 3.4b zaobserwowano stosunkowo duże przesunięcia łączonych elementów rur względem osi gazociągu oraz zakrzywienia wynikające z niewspółosiowości łączonych elementów. Z kolei dla wycinków przedstawionych na rys. 3.4c i 3.4d wstępne oględziny wykazały występowanie nieciągłości spoiny od strony grani, przejawiające się kraterami o stosunkowo dużej średnicy (5 mm).

### 3.2.2. Dokumentacja ilustrująca położenie próbek w dostarczonym materiale badawczym

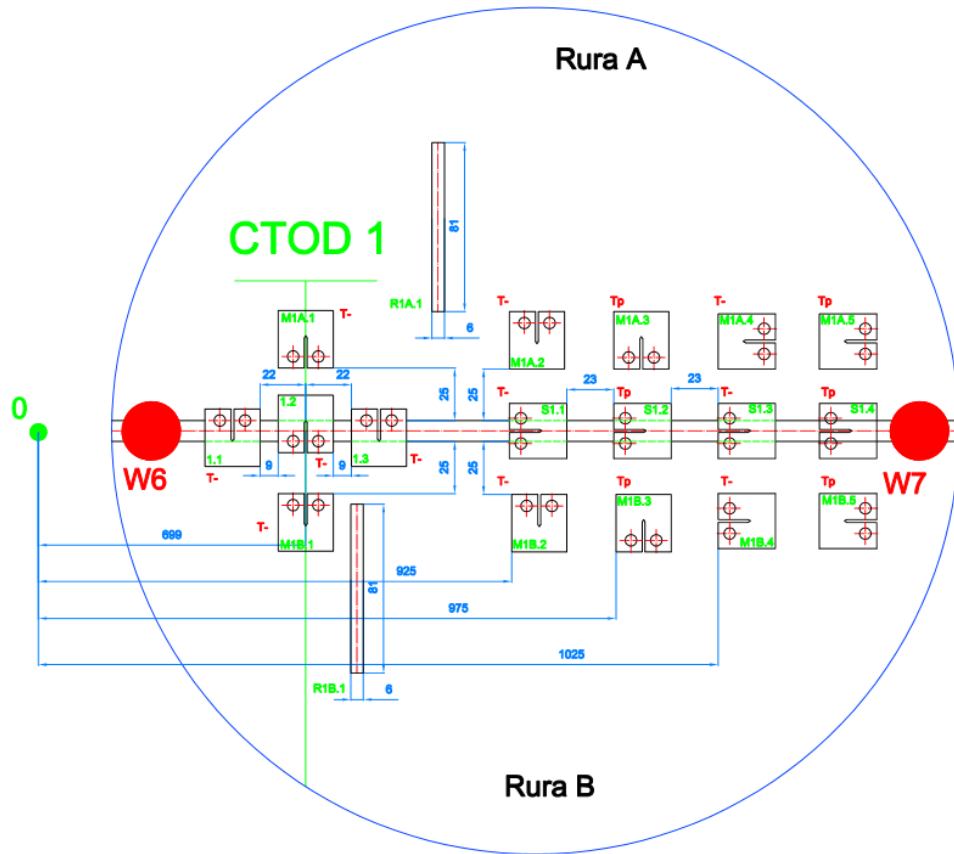
Dostarczony materiał badawczy w postaci pełnej rury należy pociąć na wzdłużne paski o osi zgodnej z osią rury, które później przeznaczone są bezpośrednio do pobierania próbek do rozciągania oraz badań pękania. Przyjęte przykładowe schematy cięcia przedstawiono na rys. 3.5 i rys. 3.6 dla fragmentów pobranych z godziny 12. Analogicznie należy postępować dla fragmentów wycinanych z lokalizacji określonej godziną „3” oraz „6”.

Z paska wycinano jedną próbkę do zasadniczych badań, w której szczelinę wprowadzano w osi spawu lub w strefie wpływu ciepła po stronie o największej twardości. Dodatkowo z końców pasków wycinano dwie próbki z materiału rury (poza strefą spawu) oznaczane literką L (z lewej strony spawu) lub P (z prawej strony spawu), które wykorzystywano w pracach wstępnych przy ustalaniu liczbowych parametrów układu sterowania, przy sprawdzaniu działania oprogramowania oraz jako dane odniesienia dla prób w strefie spawu.



GL i DL - próbki do testu CTOD - materiał rodzimy (str. lewa)  
 GP i DP - próbki do testu CTOD - materiał rodzimy (str. prawa)  
 GW1 i GW2 - próbki CTOD ze spoiny (możliwość ukrytych wad na podstawie ultradźwięków)  
 CTOD-2, CTOD-4 - próbki do testu CTOD bez wad  
 CTOD-1 - odrzucono z uwagi na wykryte wady

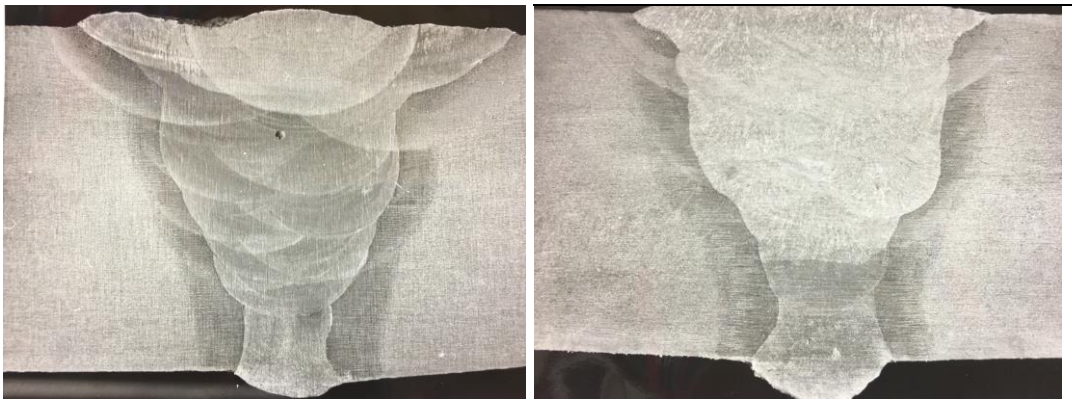
Rys. 3.5. Przykładowy schemat miejsc pobierania próbek



Rys. 3.6. Wizualizacja wyboru orientacji próbek do badań CTOD z uwzględnieniem kierunku karbu w obszarze spoiny, strefy wpływu ciepła oraz materiale rodzimym

### 3.2.3. Trawienie wzdłużnych przekrojów pasków wyciętych z rury w celu uwidocznienia pozycji i kształtu spoin oraz zasięgu strefy wpływu ciepła

W celu uwidocznienia spawu jedną z powierzchni przygotowanych pasków materiału rury (stal) należy wytrawić stosując odczynnik Fry'a o następującym składzie chemicznym ([13-15]): 45 g  $\text{CuCl}_2$ , 180 ml stęż.  $\text{HCl}$ , 100 ml  $\text{H}_2\text{O}$ .



Rys. 3.7. Wytrawione powierzchnie pasków z uwidocznionym spawem i SWC



Odczynnik Fry'a służy do powierzchniowego, subtelnego trawienia. Zawiera kwas solny o małym stężeniu oraz chlorek miedziowy. Podczas trawienia żelazo wypiera z roztworu wodnego miedź, która osadza się w odpowiednich miejscach na powierzchni próbki i chroni ją od dalszego trawienia. Odczynnik ten znajduje zastosowanie do badania spoin i ujawniania odkształceń plastycznych w stalach. Próbki najkorzystniej trawić w temperaturze pokojowej przez zanurzenie w roztworze trawiącym na okres 6 minut. Następnie przeprowadza się dwukrotne płukanie próbek w etanolu lub metanolu i suszenie w strumieniu ciepłego powietrza.

Powierzchnie wzdłużnych przekrojów dwóch wybranych pasków na próbki po trawieniu ilustruje rys. 3.7.

### 3.2.4. Pomiary twardości dla ustalenia obszaru o jej największej wartości

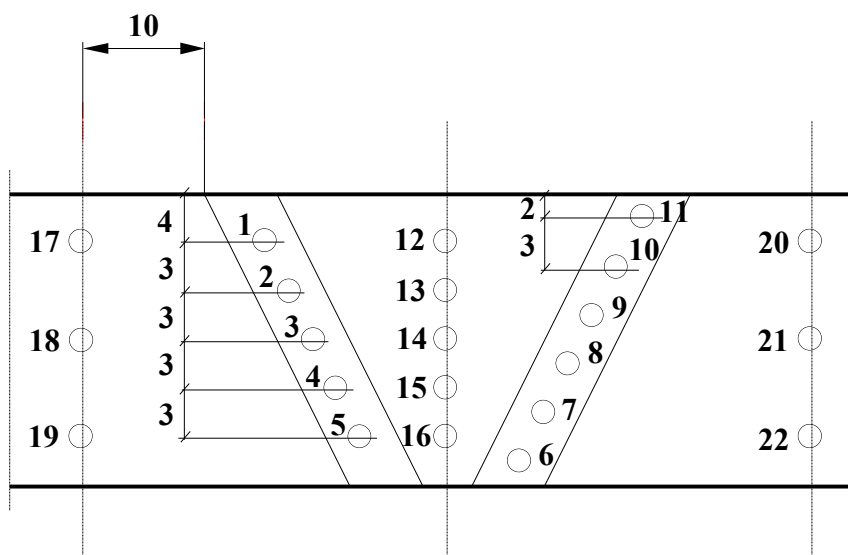
Pomiary twardości wykonywane są z wykorzystaniem standardowych twardościomierzy lub mikro-twardościomierzy. Bardzo wygodne jest użycie mikro-twardościomierza Vickersa. Ze względu na mały obszar pomiarowy w strefie wpływu ciepła pomiary najlepiej prowadzić przy małym obciążeniu, na przykład 98 N przy czasie działania obciążenia rzędu 15 sekund.

Twardość HV określa się na podstawie uzyskanej średniej wartości przekątnych odcisków  $a$  powstałych w wyniku wciskania w materiał regularnego ostrosłupa diamentowego o kącie dwuściennym  $136^\circ$  z siłą  $P$ . Korzysta się z następującego wzoru:

$$HV = 1,8544 P / a^2 \quad [\text{kG/mm}^2]. \quad (3.1)$$

Przed pomiarami powierzchnia próbek powinna zostać wyszlifowana mechanicznie i wytrawiona w celu ujawnienia obszaru spoin, a następnie szlifowana ręcznie papierem ściernym o odpowiedniej ziarnistości (np. nr 400).

Pomiary twardości standardowo wykonuje się w środkowym obszarze spoiny, w strefie wpływu ciepła oraz dla materiału rodzimego w miejscach oznaczonych na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Schemat rozkładu punktów pomiaru twardości

### 3.2.5. Wytyczne dotyczące wykonania próbek

Próbki do badań odporności złączy spawanych na pękanie wykonywane są według projektu uwzględniającego wymiary dostarczonego wycinka instalacji. Na rys. 3.1 przedstawiono

kształt, proporcje i tolerancje wymiarowe próbek. Zgodnie z normami wartość ilorazu B/W, gdzie W jest szerokością, natomiast B - grubością próbki, powinna wynosić 0.5.

Obróbka mechaniczna próbek polega zwykle na frezowaniu i szlifowaniu powierzchni wyciętych pasków w celu uzyskania gabarytów zewnętrznych próbek oraz na wierceniu i rozwiercaniu otworów pod kołki służące do zamocowania próbek w uchwytach. Ostatnią operację stanowi nacięcie szczeliny przy pomocy freza tarczowego, tak aby promień dna szczeliny był mniejszy niż 0.1 mm.

### 3.2.6. Protokół z pomiarów próbek

Wszystkie wymiary próbek do badań odporności złączy spawanych na pęknięcie podlegają kontroli w celu wyselekcjonowania takich, które nie mieszczą się w granicach założonych tolerancji, rys. 3.1. Pomiary należy prowadzić za pomocą suwmiarki cyfrowej lub śruby mikrometrycznej z dokładnością do 0.01 mm, oraz na mikroskopie warsztatowym o dokładności 0.001mm. Wszystkie pomiary przeprowadza się w sposób określony przez normę BS 7448 [8]. Protokoły z kontroli wymiarów próbek stanowią załącznik do raportu z badań. Przykład pokazano w tabeli 3.1.

Tab. 3.1. Przykładowy protokół z wynikami pomiarów próbek kompaktowych do badania odporności na pęknięcie (MR – materiał rodzimy; SWC – strefa wpływu ciepła; S – spoina)

Lp.	Wymiar [mm]	Odchyłki graniczne [mm]	MR	SWC	S
1.	26,4	$\pm 0,1$ <sup>1/</sup>	26,39	26,40	26,40
2.	22	$\pm 0,1$ <sup>1/</sup>	22,01	22,03	22,06
3.	27,5	$\pm 0,1$ <sup>1/</sup>	27,50	27,51	27,43
4.	15,4	$\pm 0,1$ <sup>1/</sup>	15,213	15,198	15,218
5.	9,9	$\pm 0,1$ <sup>1/</sup>	9,682	9,702	9,831
6.	12,1	$\pm 0,1$ <sup>1/</sup>	12,12	12,16	12,10
7.	1,38	$\pm 0,05$ <sup>1/</sup>	1,36	1,39	1,35
8.	$\Phi_{\text{otw. } 5,5H7}$	$\begin{matrix} +0,012 \\ 0 \end{matrix}$	5,53	5,50	5,50
			5,52	5,51	5,50
9.	grubość 5,5	$\pm 0,05$ <sup>1/</sup>	5,50	5,51	5,50
10.	kąt karbu 60°	$\pm 1^\circ$ <sup>1/</sup>	59°50'	59°12'	60°13'
11.	⊥ karbu	-	zgodny	zgodny	zgodny
12.	promień dna karbu R	-	0,135	0,132	0,115
13.	Ra ≤ 0,63 μm	-	0,36	0,50	0,18

<sup>1/</sup> - przyjęto według PN-EN 22768-1:1999 [16] dla klasy tolerancji f – dokładna.

### 3.2.7. Wykonanie wstępnego pęknięcia zmęczeniowego próbek testowanych w temperaturze pokojowej

W praktyce wytworzenie pęknięcia zmęczeniowego wymaga dostępu do odpowiedniej maszyny wytrzymałościowej i oprogramowania, które muszą spełniać następujące warunki:

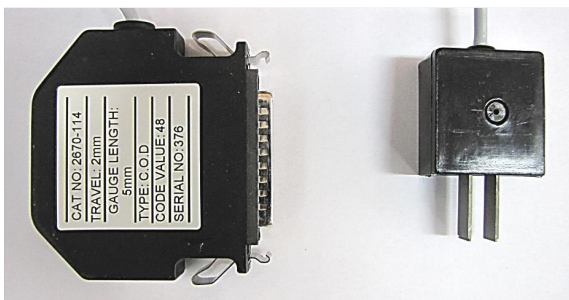
- maszyna wytrzymałościowa powinna pracować w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego;
- próbki należy mocować przy pomocy przegubowych uchwytów, rys. 3.3;

- c) maszyna wytrzymałościowa oraz oprogramowanie powinny umożliwiać realizację obciążenia cyklicznego odzerowo-tętniącego;
- d) oprogramowanie powinno umożliwiać śledzenie zmian sztywności próbki w trakcie próby oraz automatyczne zatrzymanie maszyny wytrzymałościowej przy zadanej długości pęknięcia zmęczeniowego, rys. 3.9;

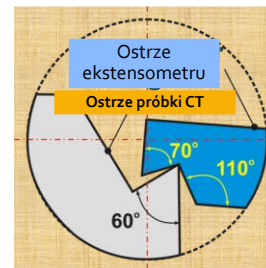


*Rys. 3.9. Próbka kompaktowa z wypropagowaną szczeliną zmęczeniową o konkretnie zadanej długości*

- e) pomiar rozwarcia karbu należy prowadzić przy użyciu odpowiedniego ekstensometru (rys. 3.10) mocowanego z wykorzystaniem specjalnych ostrzy przykręcanych wkrętami do badanej próbki po obydwu stronach naciętego karbu, rys. 3.11.



*Rys. 3.10. Ekstensometr CTOD do pomiarów rozwarcia karbu, baza pomiarowa 5mm*



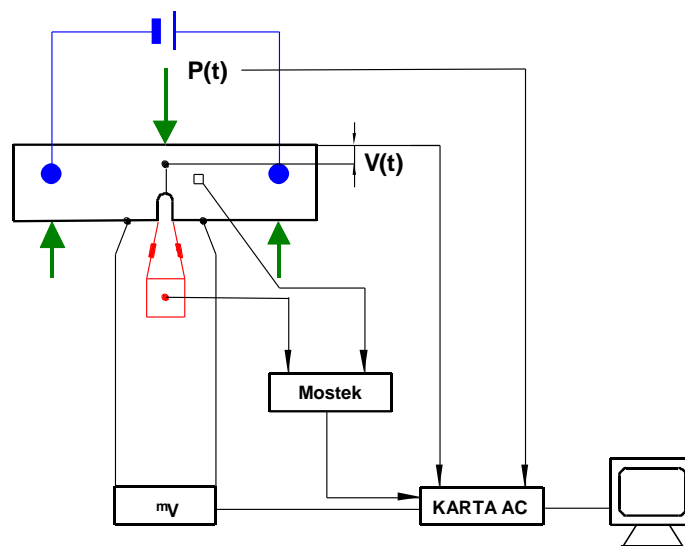
*Rys. 3.11. Istotne wymiary łożyska nożowego stosowanego do mocowania ekstensometru*

W praktyce laboratoryjnej stosuje się różnego rodzaju próbki [17], przy czym najczęściej wykorzystywana jest próbka kompaktowa, rys. 3.1a. Charakteryzuje się ona naciętym karbem o promieniu wynoszącym 0.1 mm oraz dwoma otworami, które wykorzystywane są do przenoszenia obciążenia.

Pomiar przyrostu szczeliny w trakcie próby można prowadzić kilkoma sposobami. Najbardziej rozpowszechnione techniki to:

- metoda spadku potencjału,
- metoda zmiany podatności próbki.

Pierwsza metoda polega na zasileniu próbki prądem o dużej gęstości oraz pomiarze spadku potencjału, który towarzyszy zmianom przekroju czynnego próbki wskutek przyrostu długości szczeliny. Przyrost szczeliny zmniejsza przekrój czynny próbki. Zwiększa się opór elektryczny i przy stałym prądzie rośnie spadek potencjału między elektrodami. Typowy układ pomiarowy ilustruje rys. 3.12.



Rys.3.12. Schemat stanowiska pomiarowego do rejestracji przyrostu szczeliny zmęczeniowej metodą spadku potencjału

W metodzie spadku potencjału zakłada się liniową zależność między spadkiem potencjału a przyrostem długości szczeliny:

$$\Delta a_i = \frac{\Delta a_K \Delta \varphi_i}{\Delta \varphi_K}, \quad (3.2)$$

gdzie:

$\Delta a_K$  - całkowity przyrost długości szczeliny,  
 $\Delta \varphi_K$  - całkowita zmiana potencjału.

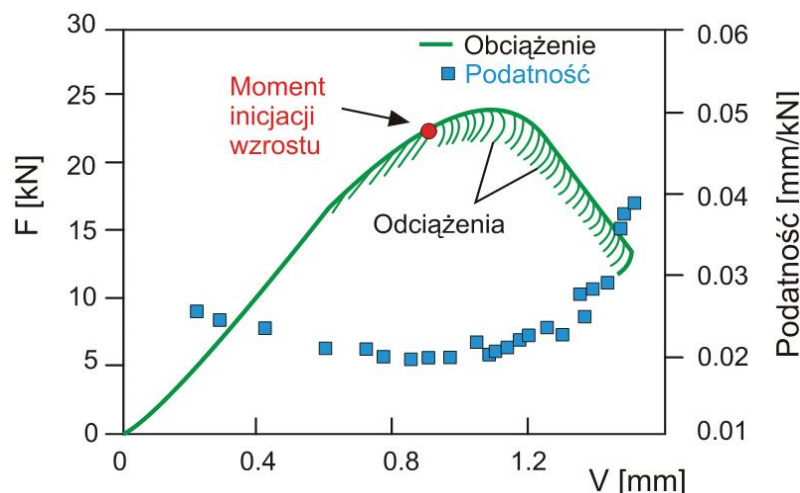
Druga z wymienionych metod możliwa jest do stosowania, gdy dysponujemy nowoczesną maszyną wytrzymałościową sterowaną za pomocą komputera. Wzory do obliczania długości szczeliny w zależności od zmiany podatności próbki podaje na przykład norma ASTM E 813-88 [18]. Wzór z normy polskiej [19] ma następującą postać

$$\Delta a_i = \frac{b(C_i - C_o)}{C_o}, \quad (3.3)$$

gdzie:

$C_i$  – podatność w i-tym kroku pomiarowym,  $C_o$  - podatność początkowa (minimalna wartość podatności określona z prostoliniowego odcinka zależności  $P - V$ , co można utożsamiać z momentem inicjacji wzrostu szczeliny).

Na rys. 3.13 przedstawiono przykład uzyskanych wyników z wykorzystaniem tej metody.



Rys. 3.13. Zmiany podatności próbki ze szczeliną w trakcie jej kolejnych obciążeń i odciążeń

Maksymalna siła podczas tworzenia pęknięcia zmęczeniowego uzyskiwana w chwili, gdy pęknięcie osiągnie 1.3 mm lub 50% długości szczeliny początkowej (przyjmujemy mniejszą wartość) powinna być mniejsza niż wartość obliczona ze związku

$$F_f = \frac{0.2B(W - a)^2 (\sigma_{ysp} + \sigma_{tsp})}{(2W + a)}, \quad (3.4)$$

przy czym siła ta zapewnia zachodzenie następującej równości:

$$\frac{\Delta K}{E} = 3.2 \times 10^{-4} m^{0.5}, \quad (3.5)$$

gdzie  $\Delta K$  jest zakresem zmian współczynnika intensywności naprężenia w cyklu zmęczeniowym,  $E$  - moduł Younga,  $a$  - nominalna długość szczeliny,  $\sigma_{ysp}$  - wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze wykonywania pęknięcia zmęczeniowego,  $\sigma_{tsp}$  - umowna granica plastyczności w temperaturze wykonywania pęknięcia zmęczeniowego.

Pęknięcie zmęczeniowe o określonym kształcie i wymiarach powinno się rozwijać od wierzchołka szczeliny naciętej przy obróbce mechanicznej próbki przy spełnieniu warunków wymienionych w punkcie 3.1.3, które należy skontrolować po wytworzeniu pęknięcia zmęczeniowego, ale przed przeprowadzeniem próby rozrywania.

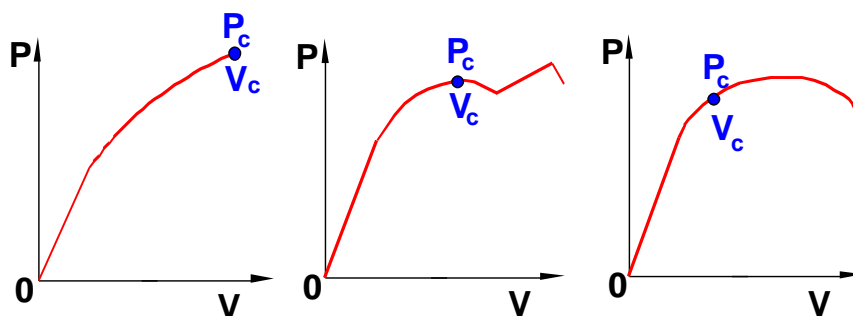
W trakcie wykonywania pęknięcia zmęczeniowego maszyna wytrzymałościowa powinna być sterowana siłą. Częstotliwość zmiany ustala się w zależności od możliwości maszyny wytrzymałościowej, najlepiej przyjmując wartość z zakresu 10-20Hz. W przypadku każdej próbki pęknięcie zmęczeniowe zwykle określa się na podstawie zmiany podatności materiału, obserwowanej na charakterystyce odciążania dla każdej pętli cyklu obciążania.

### 3.2.8. Dokumentacja z prób CTOD w temperaturze obniżonej o 15°C w stosunku do najniższej średniej temperatury eksploatowanego obiektu

Dla każdej próbki po wykonaniu pęknięcia zmęczeniowego obniżana jest temperatura do określonego poziomu wynikającego z pracy danego rurociągu, a następnie prowadzi się jednoosiowe rozciąganie w celu rozerwania próbki. Przebieg eksperymentu rejestrowany jest

na bieżąco przez komputer a wyniki zapisywane na twardym dysku w celu dalszego ich opracowania. Próby rozrywania wykonywane są na maszynie wytrzymałościowej przy sterowaniu przemieszczeniem. W czasie próby należy utrzymywać stałą wartość temperatury z dokładnością do  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Bieżących pomiarów temperatury próbki dokonuje się przy pomocy co najmniej jednej termopary przymocowanej do jej bocznej powierzchni.

Na podstawie wykresu *obciążenie P - rozwarcie szczeliny V* wyznacza się krytyczną wartość obciążenia  $P_c$ , przy którym rozpoczął się rozwój istniejącego w próbce pęknięcia zmęczeniowego. Norma opisuje sposób wyznaczania krytycznego stadium próby dla różnych kształtów zależności *obciążenie – przemieszczenie*. Praktyczne przykłady przedstawiono na rys. 3.14.



Rys. 3.14. Wykresy obciążenie-przemieszczenie do wyznaczania krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia

W przypadku trudności wyznaczenia krytycznego stadium na podstawie wykresu, chwilę rozpoczęcia propagacji szczeliny wyznacza się na podstawie wskazań metod nieniszczących czułych na długość pęknięcia, jak metoda prądów wirowych, czy metoda spadku potencjału.

Wartość CTOD odpowiadającego maksymalnej sile przy rozrywaniu próbki określa następująca zależność

$$\delta_c = \frac{K^2(1-\nu^2)}{(2 \cdot R_{e(0.2)} \cdot E)} + \frac{r_p(W - a_o)\nu_p}{r_p(W - a_o) + a_o + z}, \quad (3.6)$$

gdzie:

$$K = \frac{YF}{BW^{0.5}},$$

oraz

$$Y = \frac{(2 + a_o/W) \cdot [0.866 + 4.64 a_o/W - 13.32 \cdot (a_o/W)^2 + 14.72 \cdot (a_o/W)^3 - 5.6 \cdot (a_o/W)^4]}{(1 - a_o/W)^{3/2}},$$

natomiast

$$r_p = 0.4 \cdot (1 + \alpha),$$

$$\alpha = 2 \left[ (a_o/b_o)^2 + a_o/b_o + 1/2 \right]^{1/2} - 2(a_o/b_o + 1/2).$$

Symbole w powyższych wzorach reprezentują:

F – maksymalną siłę rozciągającą;

$\nu$  - współczynnik Poissona;

$R_{e(0.2)}$  – odpowiednio: wyraźną i umowną granicę plastyczności;

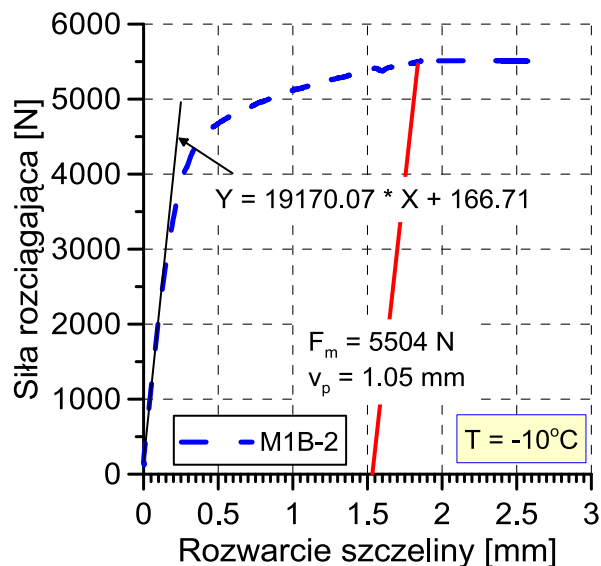
E – moduł Younga;

$v_p$  - trwale rozwarście szczeliny przy sile maksymalnej;

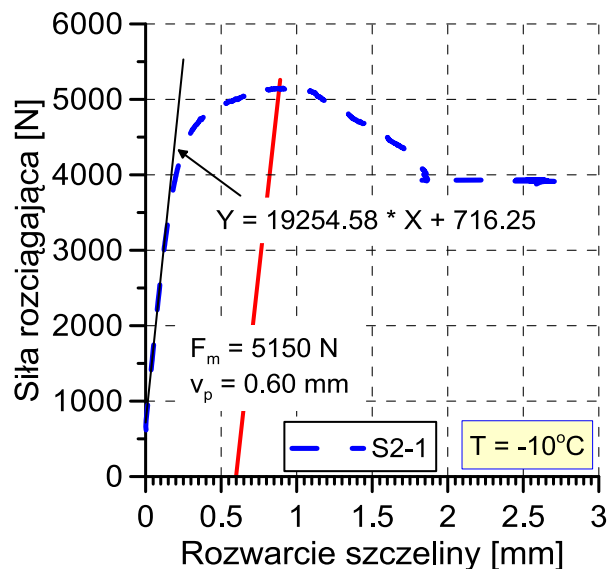
$Z$  – odległość od osi obciążenia do punktów mocowania ostrzy ekstensometru;

$r_p$  - współczynnik plastycznego obrotu.

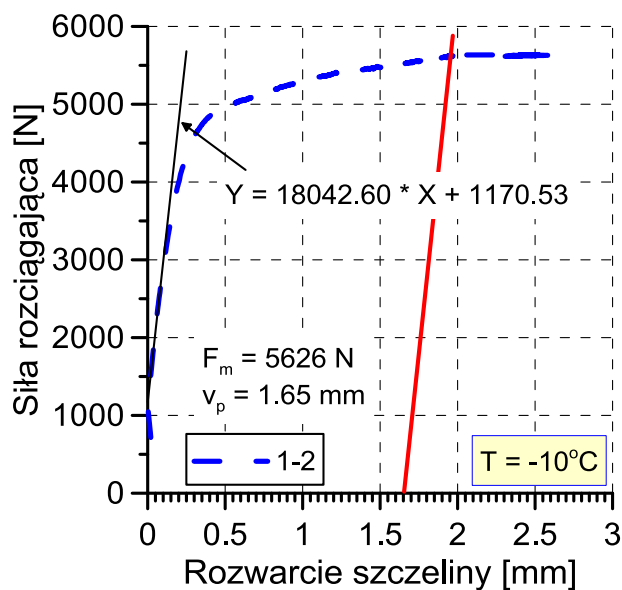
Na rysunkach 3.15, 3.16 i 3.17 przedstawiono przykładowe wykresy CTOD w funkcji siły dla próbek, w których szczelina umiejscowiona była w materiale rodzimym, środkowej części spawu oraz w strefie wpływu ciepła.



Rys. 3.15. Przebiegi siły rozciągającej w zależności od wartości rozwarcia szczeliny materiału rodzimego rury (temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , oś szczeliny wzdłuż osi rury)

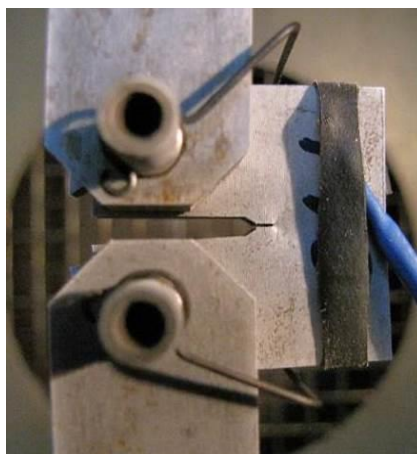


Rys. 3.16. Przebiegi siły rozciągającej w zależności od wartości rozwarcia szczeliny materiału spoiny (temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , oś szczeliny wzdłuż spawu)



Rys. 3. 17. Przebiegi siły rozciągającej w zależności od wartości rozwarcia szczeliny materiału strefy wpływu ciepła (temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , oś szczeliny wzdłuż osi rury)

Wykresy przedstawione na rys. 3.15-3.17 wyraźnie wskazują, że zarówno materiał rodzimy, jak i materiał spoiny oraz strefy wpływu ciepła uległ zniszczeniu typu ciągliwego. Świadczą o tym również fotografie zamieszczone na rys. 3.18 i 3.19, na których zostały uchwycone dwie fazy rozwoju uszkodzenia, a mianowicie moment przejścia materiału w stan plastyczny w dwóch płaszczyznach symetrycznie położonych względem pęknięcia zmęczeniowego oraz chwilę rozwoju pęknięcia dominującego wzdłuż górnej ścieżki powstałego rozwidlenia. Taki charakter pęknięcia otrzymywano dla większości badanych próbek testowanego obiektu. Zgodnie z normami wymienionymi na początku tego opracowania, dotyczącymi badań na kruche pęknięcie metodą CTOD, otrzymane wyniki nie spełniają warunków wymienionych w tych normach i stąd nie mogą być wiążące.



Rys. 3.18. Rozrywanie próbki w komorze temperaturowej w  $-10^{\circ}\text{C}$ , faza przejścia materiału w stan plastyczny

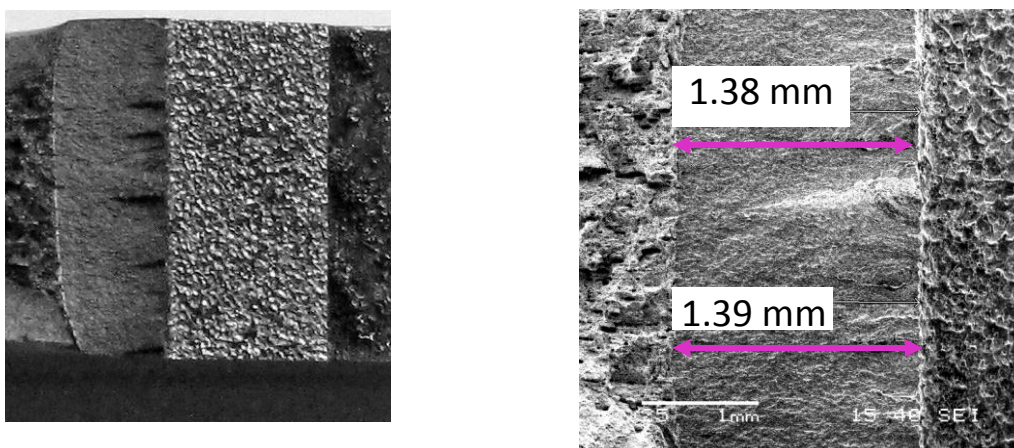




Rys. 3.19. Rozrywanie próbki w komorze temperaturowej w  $-10^{\circ}\text{C}$ , faza rozwoju pęknięcia dominującego

### 3.2.8.1. Dokumentacja fotograficzna i wyniki pomiarów przelomów badanych próbek

Istotny etap procedury badawczej obwodowych złączy spawanych stanowi ocena zgodności kształtu i wymiarów frontu wypropagowanego pęknięcia zmęczeniowego po rozerwaniu badanych próbek. Front pęknięcia musi być prostoliniowy na szerokości testowanej próbki z wyjątkiem jej obu skrajnych części przekroju. Pomiary należy prowadzić w pięciu punktach rozmieszczonych wzdłuż wymiaru stanowiącego grubość próbki. Następnie oblicza się średnią długość oraz 10% jej wartości, które stanowią kryterium wykorzystywane do oceny jakości wytworzonej szczeliny zmęczeniowej. Ilustracja prawidłowego kształtu frontu pęknięcia pokazana jest na rys. 3.20.



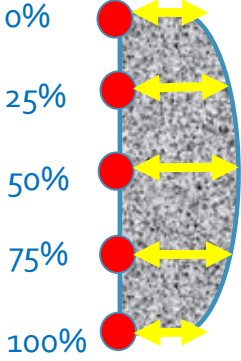
Rys. 3.20. Widok strefy pęknięcia zmęczeniowego: (a) kształt frontu pęknięcia; (b) powiększony widok pęknięcia z naniesionymi wymiarami, materiał – stal 40H

W tab. 3.2 przedstawiono przykładowo komplet wyników z pomiarów jednej badanej próbki ze stali 40H.

Wyznaczone wartości długości frontu pęknięcia przy pominięciu skrajnych punktów pomiarowych, wykorzystano zgodnie z zaleceniem normy do obliczenia różnic między nimi, tab. 3.3.

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów długości frontu pęknięcia uzyskane w badaniach stali 40H

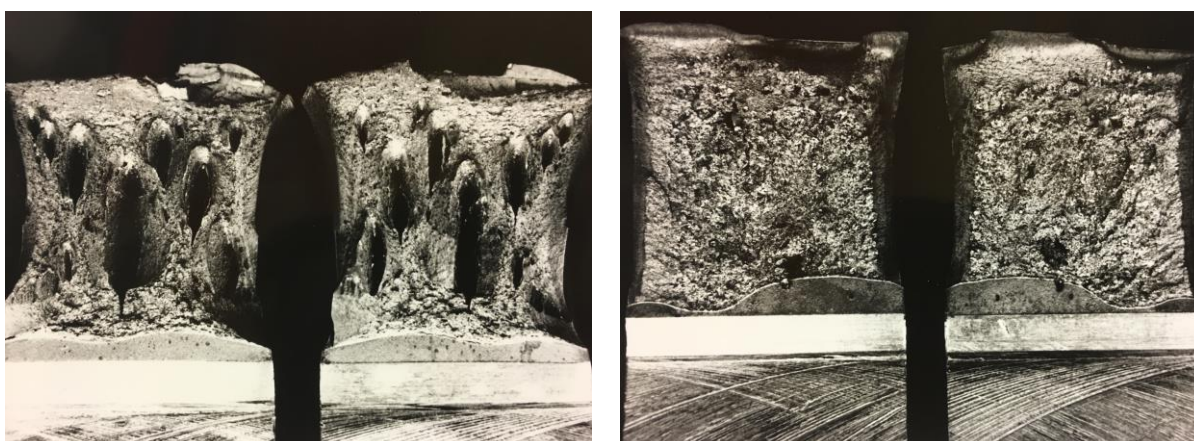
Nr	1	2	3	
		CT1 [mm]	CT2 [mm]	
<b>A</b>	0%	1.3720	1.2870	0%
<b>B</b>	25%	1.5285	1.7555	25%
<b>C</b>	50%	1.4736	1.5755	50%
<b>D</b>	75%	1.4300	1.5130	75%
<b>E</b>	100%	1.1545	1.1500	100%
<b>Średnia</b>		<b>1.4774</b>	<b>1.6147</b>	
<b>10% Średniej (BCD)</b>		<b>0.1477</b>	<b>0.1615</b>	



Uzyskane wartości porównywano z wartością stanowiącą 10% średniej (tab. 3.2). Wyniki, które przekraczają 10% średniej stanowią podstawę do uznania próby jako nieważnej i w rezultacie skutkuje wykluczeniem również pozostałych wyników takiej próbki ze zbioru danych istotnych dla określenia CTOD.

Jak widać, próbka CT1 spełnia taki warunek, natomiast próbka CT2 niestety nie, a zatem wynik dla niej otrzymany nie może być brany pod uwagę.

Bardzo często front pęknięcia zmęczeniowego nie spełnia warunków prostoliniowości i wtedy jakość połączenia spawanego uznaje się jako niezgodną z wymaganiami normy, co stanowi podstawę do zakwestionowania zastosowanej technologii spawania, o ile analogiczny wynik zostanie uzyskany dla próbek pochodzących z miejsc podobnie usytuowanych w testowanym obiekcie. Poniżej zaprezentowano na rys. 3.21 dwa przykłady, w których zaistniała taka sytuacja.



Rys. 3.21. Widok strefy pęknięcia zmęczeniowego niezgodnego z wymaganiami normy:  
(a) pierwszy przykład; (b) drugi przykład

Tabela 3.3. Wyniki obliczeń różnic w długościach frontu pęknięcia uzyskane w badaniach stali 40H

Nr	Równanie	CT 1	CT 2
1	= C2-B2	0.0549	<b>0.1800</b>
2	= D2-C2	0.0436	0.0625
3	= D2-B2	0.0985	<b>0.2425</b>

### 3.2.8.2. Raportowanie badań CTOD – wyniki i ich interpretacja

Chociaż z punktu widzenia normy do oceny jakości złączy spawanych wystarczy przeprowadzić próby w temperaturze obniżonej, można je także dodatkowo wykonywać w temperaturze pokojowej, aby sprawdzić, jakie znaczenie ma temperatura w ocenie odporności materiału na kruche pęknięcie.

W przypadku badań CTOD w temperaturze pokojowej faza rozrywania prowadzona jest bezpośrednio po wypropagowaniu pęknięcia zmęczeniowego.

Dla próbek testowanych w temperaturze ujemnej, po wykonaniu pęknięcia zmęczeniowego obniża się temperaturę o 15°C w stosunku do najniższej średniej temperatury pracy obiektu (w naszym klimacie zwykle 5 °C), a następnie prowadzone są próby jednoosiowego rozciągania w celu rozerwania próbki. Przebieg eksperymentu rejestrowany jest na bieżąco przez komputer oraz zapisywany na twardym dysku w celu dalszego opracowania uzyskanych rezultatów. W przedstawionych przykładowych wynikach próby rozrywania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej przy sterowaniu przemieszczeniem. W czasie próby utrzymywano stałą wartość temperatury z dokładnością do  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Bieżących pomiarów temperatury próbki dokonywano przy pomocy termopar przymocowanych do jej bocznej powierzchni.

Pomimo że parametr CTOD w przypadku materiałów wykazujących wysoką plastyczność nie może być wykładnikiem do oceny odporności na kruche pęknięcie, to jednak może być wskaźnikiem szacunkowym do określenia różnic w zachowaniu materiału ze szczeliną zmęczeniową w warunkach jednoosiowego rozciągania. Wyżej wspomniana sytuacja dotyczyła przedstawionego przykładu.

Przykładowy zestaw wyników zawierający: widok próbki, przed testem, wykres zmiany siły ze wzrostem rozwarcia szczeliny; widok próbki po rozerwaniu; widok frontu pęknięcia zmęczeniowego oraz wykres CTOD w funkcji siły dla próbki spełniającej i nie spełniającej wymagań normowych, pokazano odpowiednio w tabelach 3.4 i 3.5. Obie próbki pobrano z takich miejsc, aby szczelina ulokowana była w strefie wpływu ciepła spoiny.

Otrzymane wyniki z badań wszystkich próbek rozpatrywanego przykładowego połączenia (3 próbki w miejscach odpowiadających pozycji dla godziny 12; 3 oraz 6) wykazały stosunkowo niską powtarzalność pomimo faktu, że próbki były pobierane z tego samego obszaru badawczego. Siła maksymalna różniła się o ok. 1kN, natomiast wartości rozwarcia o ok. 50%. Tego rodzaju wynik świadczy o występowaniu obszarów o zróżnicowanej odporności na kruche pęknięcie, a zatem należy się liczyć z możliwością wystąpienia tzw. „słabego ogniwa”, które przy określonych warunkach obciążenia może stanowić miejsce potencjalnej inicjacji pęknięcia.

Przeprowadzone testy CTOD obejmujące materiał rodzimy obiektu, strefę wpływu ciepła oraz spoinę pokazały, że ich wyniki nie są wiążące z punktu widzenia norm API STANDARD 1104 [7] oraz BS 7448 [8]. Wszystkie wypropagowane pęknięcia zmęczeniowe pod względem wymiarowym i kształtu frontu spełniały warunki normowe. Warunków normowych nie spełniały jednak przełomy rozrywanych próbek w drugiej fazie testów CTOD (faza rozrywania próbki z wypropagowaną szczeliną zmęczeniową), większość próbek po rozerwaniu wykazywało przełom pokazany w tabeli 3.5.

Tabela 3.4. Przykładowy komplet wyników dla próbki spełniającej wymagania normowe

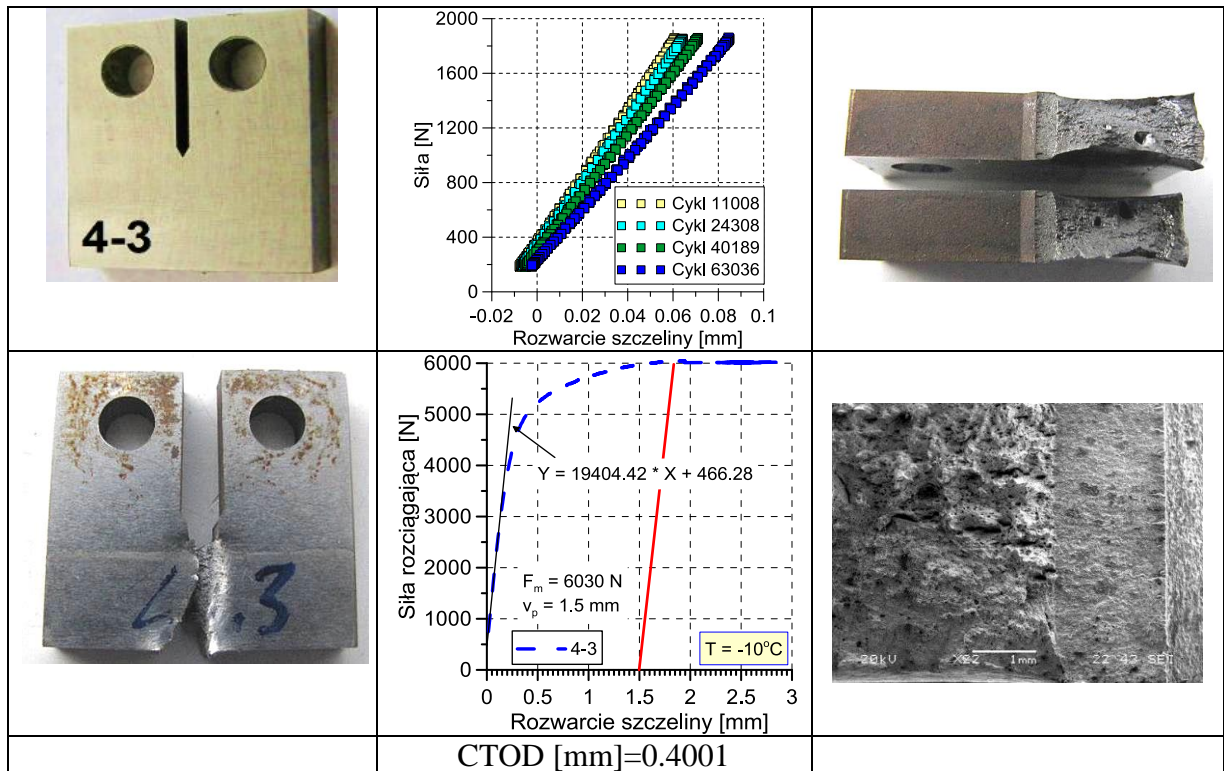
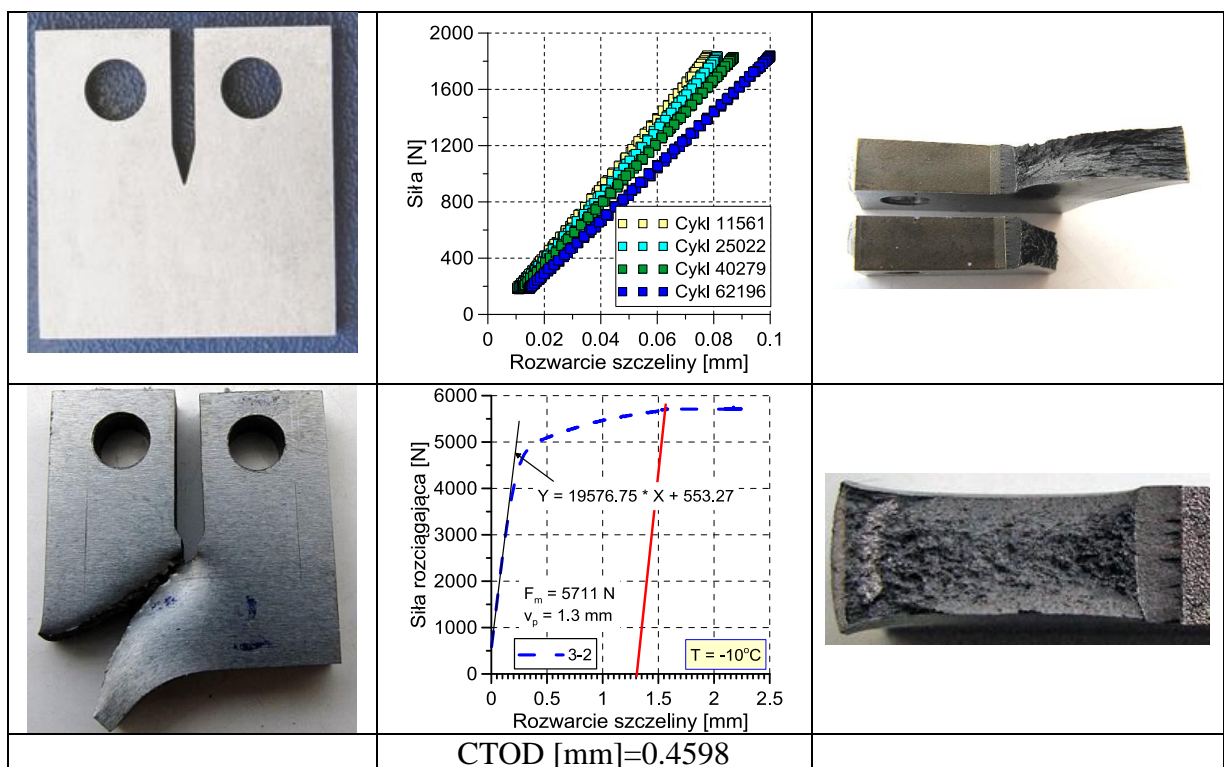


Tabela 3.5. Przykładowy komplet wyników dla próbki niespełniającej wymagań normowych



Testowane próbki miały przełom o charakterze plastycznym, przy czym w zdecydowanej większości testów rozrywania płaszczyna pęknięcia zmęczeniowego odchyłała się znacznie

więcej niż dopuszczalne 10% od płaszczyzny szczeliny wstępnej, co automatycznie dyskwalifikuje próbę według wymienionych wyżej i aktualnie obowiązujących norm. Pomimo otrzymania negatywnego wyniku w świetle obowiązujących norm, przeprowadzono obliczenia wartości CTOD (z wykorzystaniem powyższych wzorów) w celu uzyskania orientacyjnych wartości. Analiza tych wartości pokazała, że zdecydowana ich większość mieściła się powyżej wartości minimalnej wynoszącej 0.127 mm według norm BS7448 [8] oraz API1104 [7], dla której określa się dopuszczalne wymiary wad przy danym poziomie największych wartości naprężenia osiowego, jakiemu może być poddawany rozpatrywany obiekt.

#### 4. Podsumowanie

Powyższe opracowanie przedstawia wybrane badania wytrzymałościowe stosowane do elementów konstrukcyjnych, w których występują połączenia spawane i zaistniała konieczność identyfikacji wad materiałowych lub uszkodzeń w nich powstających pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Rozważania ograniczono do zbiorników oraz rurociągów.

Praca ilustruje zarówno proste badania wytrzymałościowe próbek zawierających połączenia spawane w warunkach jednoosiowego rozciągania, względnie zginania, jak i prób bardziej zaawansowanych, w których wykorzystuje się wiedzę z zakresu mechaniki pękania. Pomiary odporności na pęknięcie materiałów konstrukcyjnych należą do grupy zadań trudnych, ponieważ wymagają spełnienia wielu rygorystycznych warunków. Wyniki pomiarów są zwykle obarczone znacznym rozrzutem, dlatego wiarygodne wartości odporności na pęknięcie są najczęściej wartościami średnimi z wielu pomiarów. Szersze omówienie zagadnień poświęconych identyfikacji wad materiałowych można znaleźć w dołączonych pozycjach bibliograficznych [20-26].

#### Literatura

- [1] Regulamin nr 67 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące I. Homologacji specjalnego wyposażenia pojazdów kategorii M i N wykorzystujących w układzie napędowym skroplony gaz ropopochodny (LPG); II. Homologacji pojazdów kategorii M i N wyposażonych w specjalny układ wykorzystujący w układach napędowych skroplony gaz ropopochodny w zakresie montażu tego wyposażenia [2016/1829]
- [2] EN 10120 P265NB Gas cylinders and gas vessels steel plate, P265NB steel sheet
- [3] PN-EN 895:1997 „Badania niszczące spawanych złączy metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych”
- [4] PN-EN ISO 6892-1:2010 „Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej”
- [5] PN-EN ISO 5173:2010 „Badania niszczące spoin w materiałach metalowych - Badanie na zginanie”
- [6] PN-EN ISO 7438:2006 „Metale. Próba zginania”
- [7] ANSI/API STANDARD 1104 – 1994, „Welding of Pipelines and Related Facilities”, American National Standards Institute and American Petroleum Institute, Nineteenth Edition, September 1999, Errata 1, October 31,2001
- [8] BS 7448-1:1991, Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K<sub>Ic</sub>, critical CTOD and critical J values of metallic materials
- [9] ASTM E 1290-99 “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”

- [10] ASTM E-399 – 12e3, “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials”
- [11] PN-EN ISO 15653:2010 „Materiały metalowe – Metoda badania dotycząca wyznaczania quasistatycznej odporności na kruche pękanie spoin”
- [12] BS 7910: 2013+A1:2015 „Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”
- [13] PN-61/H-04502 Odczynniki do badania makrostruktury stopów żelaza
- [14] PN-75/H-04511 Metale nieżelazne -- Odczynniki do ujawniania makrostruktury
- [15] Metalurgia - Encyklopedia Techniki, Wyd. "Śląsk", Ed. Janusz Czermiński, Katowice 1978
- [16] PN-EN 22768-1:1999 Tolerancje ogólne -- Tolerancje wymiarów liniowych i kątowych bez indywidualnych oznaczeń tolerancji
- [17] ASTM 399 – 70T, Tentative Method of Test for Plane –Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1970
- [18] ASTM E 813-88, Standard Test Method for JIC – a measure of fracture toughness, Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01, Philadelphia, 1988
- [19] PN-H-04336:1998, Metale, Metoda badania odporności na pękanie przez wyznaczanie krytycznej wartości całki J, JIC
- [20] Neimitz A., Mechanika pękania, PWN, Warszawa 1998
- [21] Neimitz A., Ocena wytrzymałości elementów konstrukcyjnych zawierających pęknięcia (podstawowe elementy procedur SINTAP), Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004
- [22] Kowalewski Z.L., Deputat J., Identyfikacja wad materiałowych w ujęciu mechaniki pękania – podstawy teoretyczne, Dozór Techniczny, nr 5, 105-109, nr 6, 128-134, 2005
- [23] Kowalewski Z.L., Deputat J., Metody doświadczalne identyfikacji wad materiałowych na podstawie analizy parametrów mechaniki pękania, Dozór Techniczny, 2, 26-31, 2006
- [24] Kowalewski Z.L., Współczesne badania wytrzymałościowe – kierunki i perspektywy rozwoju, Biuro Gamma, Warszawa 2008, (stron 198)
- [25] Kowalewski Z.L., Kierunki i perspektywy rozwoju badań wytrzymałościowych, Wydawnictwo ITS, Warszawa, 2008, (stron 227)
- [26] Szymczak T., Kowalewski Z.L., Badanie odporności kompozytów metalowo-ceramicznych na kruche pękanie przy użyciu próbek kompaktowych (CT), Transport Samochodowy, 3, 2012, 119-131