

**POLITECHNIKA OPOLSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY



**Wpływ zginania ze skręcaniem oraz obróbki cieplnej na  
rozwój pęknięć zmęczeniowych w spoinach pachwinowych**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Opracował: mgr inż. Janusz Lewandowski

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. PO

OPOLE 2019

*Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi  
dr hab. inż. Dariuszowi Rozumek, prof. PO  
za cenne uwagi, opiekę naukową oraz pomoc w trakcie realizacji pracy doktorskiej.*

## SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	5
1. WPROWADZENIE.....	7
2. PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH ZAGADNIEŃ DOTYCZĄCYCH PRACY .....	8
2.1. Metody badań nieniszczących .....	8
2.1.1. Metody powierzchniowe.....	10
2.1.1.1. Metoda wizualna.....	11
2.1.1.2. Metoda magnetyczno-proszkowa .....	15
2.1.1.3. Metoda penetracyjna.....	20
2.1.1.4. Metoda prądów wirowych .....	22
2.1.2. Metody objętościowe .....	25
2.1.2.1. Metoda ultradźwiękowa.....	25
2.1.2.2. Metoda radiologiczna .....	30
2.2. Podstawowe zagadnienia dotyczące mechaniki pękania .....	33
2.2.1. Mechanika pękania w zakresie liniowo-sprężystym, pęknięcie kruche .....	36
2.2.2. Mechanika pękania w zakresie sprężysto-plastycznym, pęknięcie ciągłe.....	38
2.2.3. Kryteria rozwoju pęknięć zmęczeniowych.....	40
2.2.3.1. Kryteria naprężeniowe .....	41
2.2.3.2. Kryteria odkształceniowe .....	43
2.2.3.3. Kryteria energetyczne .....	45
2.2.4. Opis prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych .....	47
2.2.4.1. Modele naprężeniowe .....	50
2.2.4.2. Modele odkształceniowe.....	52
2.2.4.3. Modele energetyczne .....	53
2.2.5. Wpływ karbu geometrycznego i strukturalnego na rozwój pęknięć zmęczeniowych .....	54
2.2.5.1. Wpływ karbu geometrycznego na rozwój pęknięć zmęczeniowych.....	54
2.2.5.2. Wpływ karbu strukturalnego na rozwój pęknięć zmęczeniowych .....	57
2.2.5.3. Wpływ karbu złożonego na rozwój pęknięć zmęczeniowych.....	57
2.2.6. Wpływ współczynnika asymetrii cyklu na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych.....	58
2.2.7. Wpływ obróbki cieplnej na rozwój pęknięć zmęczeniowych .....	60
2.2.7.1. Hartowanie.....	60

2.2.7.2. Odpuszczanie .....	61
2.2.7.3. Wyżarzanie .....	61
2.2.8. Wpływ technologii spawania na rozwój pęknięć zmęczeniowych.....	64
2.7. Podsumowanie .....	66
3. CEL, ZAKRES PRACY .....	67
4. BADANIA DOŚWIADCZALNE .....	69
4.1. Metodyka badań.....	69
4.1.1. Struktura i własności badanego materiału .....	69
4.1.2. Kształt próbek przyjętych do badań.....	71
4.1.3. Stanowisko badawcze .....	72
4.1.4. Urządzenia pomiarowe .....	74
4.1.5. Warunki przeprowadzenia badań zmęczeniowych.....	74
4.2. Badania nieniszczące .....	79
4.3. Badania twardości.....	80
4.4. Badania struktury .....	83
4.4.1. Badania strukturalne próbek spawanych bez obróbki cieplnej.....	83
4.4.2. Badania strukturalne próbek spawanych po obróbce cieplnej.....	85
4.5. Obliczenia numeryczne naprężeń i odkształceń w próbkach .....	86
4.6. Badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych .....	94
4.5.1. Badania próbek litych i spawanych bez obróbki cieplnej przy zginaniu.....	95
4.5.2. Badania próbek litych i spawanych po obróbce cieplnej przy zginaniu.....	101
4.5.3. Badania próbek litych i spawanych bez obróbki cieplnej przy zginaniu ze skręcaniem .....	109
4.5.4. Badania próbek litych i spawanych po obróbce cieplnej przy zginaniu ze skręcaniem .....	113
4.7. Charakterystyka złomów zmęczeniowych.....	121
4.7.1. Kierunek rozwoju pęknięć zmęczeniowych .....	121
4.7.2. Analiza powierzchni złomów zmęczeniowych.....	128
4.8. Podsumowanie .....	133
5. WNIOSKI .....	135
6. LITERATURA .....	137

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

E	– moduł sprężystości podłużnej, GPa
G	– moduł sprężystości poprzecznej, GPa
J	– parametr energetyczny lub całka niezmiennicza w okolicy wierzchołka pęknięcia, MPa·m
K	– współczynnik intensywności naprężenia, MPa·m <sup>1/2</sup>
K <sub>c</sub>	– odporność na pękanie, MPa·m <sup>1/2</sup>
K <sub>Ic</sub> , K <sub>IIc</sub> , K <sub>IIIc</sub>	– odporność na pękanie dla I, II i III sposobu obciążenia, MPa·m <sup>1/2</sup>
K <sub>max</sub>	– wartość maksymalna WIN, MPa·m <sup>1/2</sup>
K <sub>min</sub>	– wartość minimalna WIN, MPa·m <sup>1/2</sup>
M <sub>ag</sub>	– amplituda momentu przy zginaniu, N·m
M <sub>ags</sub>	– amplituda momentu przy zginaniu ze skręcaniem, N·m
M <sub>as</sub>	– amplituda momentu przy skręcaniu, N·m
M <sub>k</sub>	– współczynniki korekcyjne uwzględniający karb strukturalny w złączy spawanym, -
N	– bieżąca liczba cykli obciążenia, cykle
N <sub>f</sub>	– trwałość zmęczeniowa, cykle
R	– współczynnik asymetrii cyklu, -
R <sub>e</sub>	– granica plastyczności, MPa
R <sub>m</sub>	– wytrzymałość na rozciąganie, MPa
Y <sub>I, III</sub>	– współczynniki korekcyjne uwzględniające geometrię próbki i rodzaj obciążenia dla I i III sposobu pęknięcia,
a	– bieżąca długość pęknięcia po stronie czynnej próbki, mm
a <sub>0</sub>	– długość karbu, mm
b	– szerokość próbki, mm
c	– bieżąca długość pęknięcia po grubości próbki (w dnie karbu), mm
da/dN	– prędkość wzrostu pęknięcia, m/cykl
n'	– współczynnik cyklicznego umocnienia,
r	– współczynnik korelacji modelu regresji liniowej, -
t	– grubość próbki, mm
w	– wysokość próbki, mm
ΔJ	– zakres całki J, MPa·m
ΔK	– zakres współczynnika intensywności naprężenia, MPa·m <sup>1/2</sup>

$\Delta\sigma$	– zakres naprężeń, MPa
$\alpha$	– kąta ustawienia głowicy obrotowej na maszynie do badań zmęczeniowych lub poziom istotności i faza ziarna, °
$\alpha_k$	– współczynnik kształtu karbu, -
$\delta$	– rozwarcie wierzchołka pęknięcia, mm
$\nu$	– współczynnik Poissona, -
$\rho$	– promień zaokrąglenia dna karbu, mm
$\sigma_a, \tau_a$	– amplituda naprężenia normalnego i stycznego, MPa
$\sigma_m$	– naprężenie średnie, MPa
$\sigma_{max}$	– wartość maksymalna naprężenia, MPa
$\sigma_{min}$	– wartość minimalna naprężenia, MPa
$\sigma_n$	– naprężenie nominalne, MPa

#### Indeksy i skróty:

a	– amplituda,
c	– wartość krytyczna,
e	– wartość odnosząca się do zakresu sprężystego,
eff	– wartość efektywna,
eq	– wartość ekwiwalentna,
g	– wartość odnosząca się do zginania,
max	– wartość maksymalna,
min	– wartość minimalna,
n	– wartość nominalna,
p	– wartość odnosząca się do zakresu plastycznego,
s	– wartość odnosząca się do skręcania,
th	– wartość progowa,
I, II, III	– odpowiednio pierwszy, drugi i trzeci sposób obciążenia,
$\Delta$	– zakres zmian,
CTOD	– rozwarcie wierzchołka pęknięcia,
PSN	– płaski stan naprężenia,
PSO	– płaski stan odkształcenia,
WIN	– współczynnik intensywności naprężenia.

## 1. WPROWADZENIE

Obiekty cywilne oraz przemysłowe w świecie wysoko rozwiniętym i dynamicznie zmieniających się warunkach muszą spełniać wysokie standardy jakościowe. Projektanci konstruują budowle wykorzystujące właściwości materiałów do granic ich możliwości, nie pozostawiając dużego marginesu błędu. W związku z czym, rolą nauki jest wypełnienie brakującej części wiedzy między innymi z zakresu wytrzymałości materiałów, trwałości zmęczeniowej oraz podatności na inicjację i rozwój pęknięć zmęczeniowych. Wiedza ta, właściwie użyta przyczyni się do tego, że konstrukcje będą bezpieczniejszymi, trwalszymi, z dłuższymi stanami bezawaryjnej pracy.

Niniejsza praca dotyczy zagadnień z zakresu mechaniki pękania w elementach spawanych. Połączenia spawane, jako metoda łączenia nierozłącznego konstrukcji technicznych, są powszechnie stosowane w wielu obszarach działalności człowieka. Jak wykazano w przeglądzie literatury tematyka ta od wielu lat poruszana była w publikacjach na całym świecie. Z powodu jednak wciąż rosnących wymagań dotyczących poprawy bezpieczeństwa konstrukcji spawanych i aby zwiększyć trwałość zmęczeniową, nadal cieszy się dużym zainteresowaniem. Obecnie naukowcy koncentrują swą uwagę na badaniach wpływu różnych czynników czy parametrów na trwałość połączeń spawanych i podatność na inicjację i rozwój pęknięć, tj.:

- rodzaju obciążenia, które przybiera różną postać np. statyczne lub zmienne (zmęczeniowe) o różnej charakterystyce przebiegu obciążenia (sinusoidalne, złożone o różnych wartościach amplitudy oraz częstotliwości), obciążenie proste np. rozciąganie, zginanie, itp., czy obciążenia złożone np. zginanie ze skręcaniem,

- rodzaju obróbki cieplnej jak hartowanie, odpuszczanie czy wyżarzanie oraz związane z nimi zmiany zachodzące w strukturze materiału,

- wpływu warunków środowiskowych, takich jak wysoka temperatura, czy oddziaływanie słonej morskiej wody na elementy platform wiertniczych albo w wysokich partiach górskich występowanie dużego gradientu temperatur, który wpływa na szybsze zużycie pracujących elementów,

- wpływu karbów geometrycznych, które powodują koncentracje naprężenia w elemencie i oddziałują na rozkład linii sił oraz miejsca szczególnie wrażliwe na inicjację i rozwój pęknięć zmęczeniowych,

- wpływu karbów strukturalnych, które jak opisano w literaturze mają mniejszy wpływ w porównaniu do karbów geometrycznych, lecz w miejscach, gdzie margines nadmiaru wytrzymałości materiału jest niewielki mogą być decydujące. Naukowcy badają ich wpływ na rozwój pęknięć zmęczeniowych, w miejscach zwykle złożonych z różnych struktur, różniących się budową od struktury materiału rodzimego.

W warunkach przemysłowych przeprowadza się najpierw badania nieniszczące, które dostarczają informacji o występowaniu pęknięć na etapie produkcji jak i w trakcie badań kontrolnych podczas eksploatacji. Badania nieniszczące pozwalają zweryfikować założenia projektowe, solidność wykonania oraz jakość użytych materiałów w warunkach przemysłowych. Dzięki tym badaniom wiele urządzeń mimo długiego okresu pracy może dalej bezpiecznie wykonywać swoje zadania pod warunkiem cyklicznie powtarzających się badań kontrolnych.

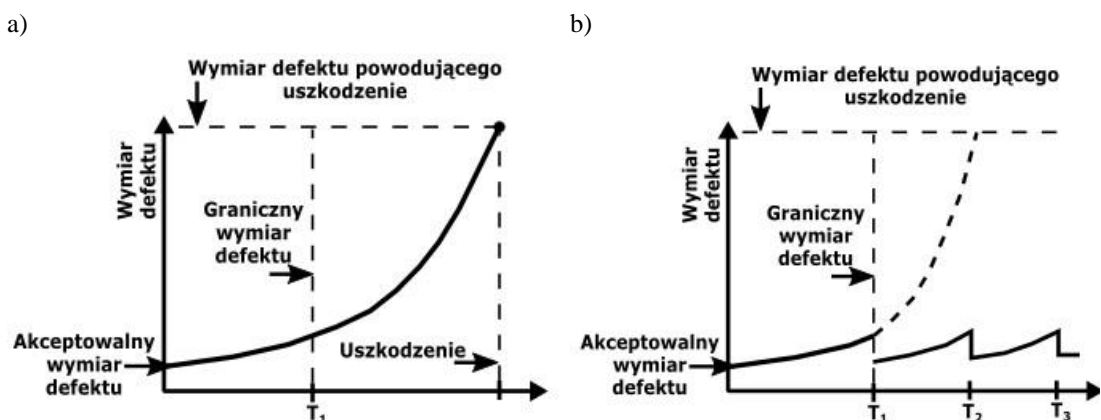
## **2. PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH ZAGADNIEŃ DOTYCZĄCYCH PRACY**

### **2.1. Metody badań nieniszczących**

Badania nieniszczące prowadzone były przez badaczy od wielu lat, ale określenie to pojawiło się w literaturze znacznie później. Początkowo oględzinom wizualnym poddawano prymitywne narzędzia używane przez ówczesnych badaczy. Z biegiem czasu, gdy następował postęp oraz rozwój techniki, na powierzchniach używanych przedmiotów poszukiwano nieciągłości, głównie pęknięć. Następnie na podstawie obserwacji dokonywano oceny przydatności tych przedmiotów do użycia w zamierzonych celach. W zamierzonych czasach nie istniały określone normy czy wskazówki dotyczące kryteriów odbioru (przydatności). Ocena przydatności badanego przedmiotu wynikała z doświadczenia oceniającego. Przez wiele stuleci w badaniach nieniszczących nic istotnego się nie działo. Przełom nastąpił w XX wieku, w okresie drugiej wojny światowej, gdzie przemysł zbrojeniowy w Stanach Zjednoczonych wymagał wyrobów najwyższej jakości, pozbawionych wad. Postawione kryterium odbioru – bez występowania wad w wyrobach (konstrukcjach), czyli zero defektów generowało ogromny wzrost kosztów produkcji – najmniejsze wskazania (defekty) powodowały wycofanie wyrobu z użycia. Takie podejście nie miało uzasadnienia, gdyż wprawdzie każda wada ma wpływ na osłabienie konstrukcji, ale przy zachowaniu odpowiednich współczynników bezpieczeństwa oraz wprowadzeniu cyklicznych, kontrolnych badań



nieniszczących pozwala konstrukcji na bezpieczną oraz długoterminową pracę. Inżynierowie potrzebowali jednak odpowiednich narzędzi, które pozwoliłyby na wykrywanie i akceptowanie wad. Naukowcom postawiono zadanie polegające na przeprowadzeniu szeregu badań oraz znalezieniu narzędzi pozwalających na wykrywanie i ocenę wad o najmniejszych wymiarach. W wyniku tych prac powstały pierwsze metody badań nieniszczących, które poprzez połączenie z rozwijającą się silnie, w latach 60-tych i 70-tych XX wieku, mechaniką pęknięcia umożliwiły zrozumienie badaczom zachowania się stosowanych materiałów pracujących w różnych warunkach. Zaakceptowano fakt, że każdy materiał, konstrukcja posiada wady (defekty). Wiedza na temat inicjacji pęknięć, rozwoju aż do zniszczenia badanego obiektu, poprzez prowadzenie cyklicznych (okresowych) badań nieniszczących pozwala na kontrolowany wzrost defektów do rozmiarów akceptowalnych (gdzie nie występuje zagrożenie wystąpienia awarii lub katastrofy). Na rysunku 2.1 pokazano zależność pomiędzy odpornością konstrukcji na uszkodzenia, a czasem okresowych (cyklicznych, kontrolnych) badań nieniszczących. Na rysunku 2.1a przedstawiono krzywą wzrostu



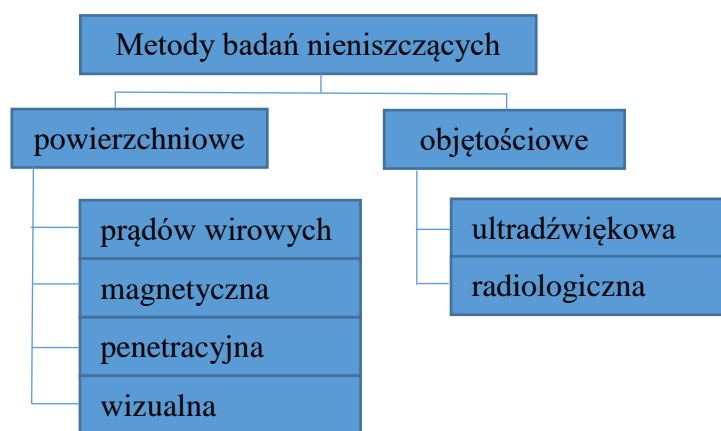
Rys. 2.1. Zależność pomiędzy odpornością konstrukcji na uszkodzenia a czasem okresowych badań nieniszczących [1, 2]: a) do uszkodzenia, b) do kolejnych badań i remontów

rozmiaru pęknięcia w funkcji czasu aż do uszkodzenia badanego obiektu. Na początku krzywa ma określony, akceptowalny wymiar defektu do czasu  $T_1$ , który po przekroczeniu  $T_1$  dalej propaguje aż do uszkodzenia. Jeżeli prowadzone są okresowe badania nieniszczące (czas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  na rys. 2.1b) można monitorować stan techniczny i sprawdzać czy obiekt nadaje się jeszcze do pracy czy też wielkość defektu przekracza wartość graniczną i obiekt należy wymienić lub poddać naprawie.

Na potrzeby realizacji monitorowania stanu technicznego obiektów opracowano wiele metod oraz technik badań nieniszczących, które uwzględniają położenie nieciągłości, tj:

- powierzchniowe,
  - podpowierzchniowe,
  - wewnętrzne,
- oraz te, które uwzględniają charakter nieciągłości na:
- płaskie,
  - przestrzenne (objętościowe).

Główny podział metod badań nieniszczących przedstawiono na rysunku 2.2. Jest to podział na metody powierzchniowe oraz objętościowe [2, 3, 4, 5].



Rys. 2.2. Główne metody badań nieniszczących

Dla poszczególnych metod zostały opracowane liczne normy opisujące warunki, wymagania i sposoby przeprowadzania badań oraz kryteria odbioru.

Personel przeprowadzający badania nieniszczące poddawany jest szkoleniom z zakresu konkretnej metody. Wiedza teoretyczna oraz umiejętności praktyczne sprawdzane są w czasie egzaminów kwalifikacyjnych oraz certyfikacyjnych w trzystopniowych poziomach certyfikacji. Wymagania stawiane przyszłym badaczom stosującym metody nieniszczące oraz sposoby prowadzenia szkoleń czy formy egzaminów kwalifikacyjnych i certyfikacyjnych opisano w normie [3] (oraz we wcześniejszej normie [4]).

### 2.1.1. Metody powierzchniowe

Metody powierzchniowe pozwalają na wykrywanie defektów pojawiających się na powierzchni badanej lub płytko zalegających pod powierzchnią (do głębokości około 2 mm). Do metod powierzchniowych zalicza się między innymi metody:

- wizualną (VT),

- magnetyczno-proszkową (MT),
- penetracyjną (PT),
- prądów wirowych (ET).

### **2.1.1.1. Metoda wizualna**

Metoda wizualna (VT) jest najbardziej powszechna i stosowana dla różnych materiałów (stal, aluminium, porcelana, tworzywa sztuczne, itp.) oraz wyrobów takich jak: odlewy, blachy, odkuwki, złącza spawane, itp. na różnych etapach produkcji i eksploatacji. Polega na dokładnych oględzinach zewnętrznych obiektu nieuzbrojonym okiem lub z elementem pośredniczącym na torze wizyjnym. Pozwala na wykrywanie nieciągłości (pęknięć) o długości od około 0,1 mm (w rzeczywistości od 0,3 mm).

Badania wizualne zostały podzielone na badania [5, 6]:

- a) bezpośrednie,
- b) pośrednie.

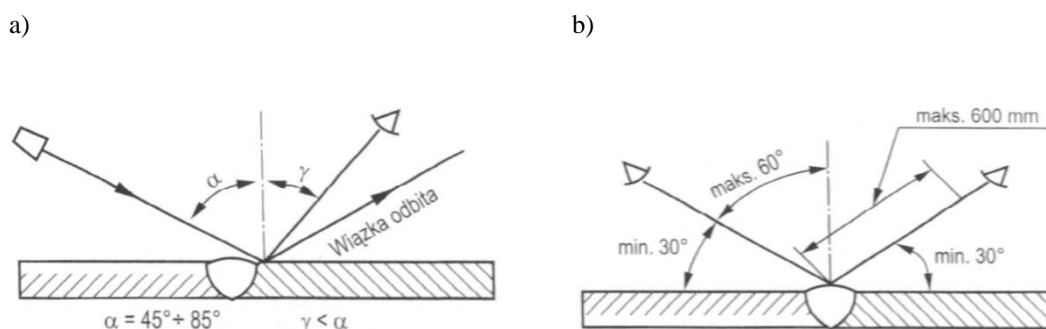
Badania wizualne bezpośrednie to takie, podczas których istnieje nieprzerwana ścieżka od oka obserwatora do obszaru badanego. Badania takie mogą być wspomagane soczewkami, mikroskopami, endoskopami, światłowodami, itp.

Badania wizualne pośrednie to badanie, podczas których ścieżka optyczna pomiędzy okiem obserwatora a obiektem badanym jest przerywana. Badania te obejmują fotografię, wideo rejestrację, systemy zautomatyzowane oraz roboty.

W przypadku badań wizualnych obejmujących zakres wyrobów opisywanych w niniejszej pracy czyli połączenia spawane, warunki przeprowadzania takich badań opisane zostało w normie [7] (wcześniej [8]). Opisano w nich między innymi wymagania dotyczące:

- oświetlenia obiektu badanego, gdzie natężenie oświetlenia powinno wynosić minimum 350 lx, przy czym zaleca się minimum 500 lx,
- wskazanej odległości obserwacji, gdzie obserwacja obiektu badanego powinna się odbywać z odległości mniejszej niż 600 mm,
- kąta obserwacji, który to kąt obserwacji powinien być nie mniejszy niż 30 stopni od powierzchni badania (rys. 2.3) oraz częstotliwości badań w trakcie produkcji tj.:
- badania powierzchni elementów przed spawaniem,
- badania w trakcie procesu spawania,
- badania złączy spawanych po przeprowadzonym spawaniu,

- badania złączy naprawianych.



Rys. 2.3. Wytyczne do badań wizualnych: a) zalecany zakres padania wiązki światła, b) zalecane kąty obserwacji i odległość obserwacji obiektów [7, 8]

W celu przeprowadzania badań wizualnych (oraz innych metod badań nie niszczących), aby określić jakość (wyrobu) złączy spawanych musiały zostać określone kryteria poszukiwania, rejestrowania i oceniania konkretnych rodzajów i wielkości wykrywanych wskazań. W tym celu opracowane zostały wytyczne zawarte w normie [9], w której określono trzy poziomy jakości:

- B – oznacza wymagania ostre,
- C – oznacza wymagania średnie,
- D – oznacza wymagania łagodne.

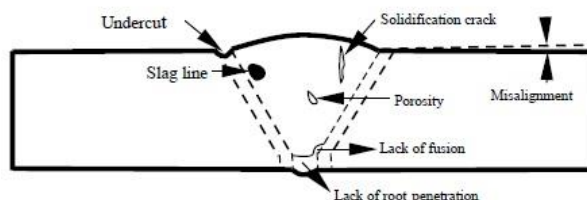
Dla każdego poziomu jakości określono dopuszczalne wielkości niezgodności spawalniczych w zależności od rodzaju tej niezgodności. Rodzaje niezgodności spawalniczych podzielono na 25 rodzajów oraz przydzielono im numery niezgodności zgodnie z normą [10]. Rodzaje niezgodności oraz ich numery przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Rodzaj niezgodności spawalniczych oraz ich numerowe oznaczenie

Nr niezgodności spawalniczej wg PN-EN ISO 5817	Określenie niezgodności spawalniczej	Oznaczenie wg PN-EN ISO 6520
1	Pęknięcia	100
2	Pęknięcia w kraterze	104
3	Pęcherze i pory	2011
		2012
		2014

		2017
4	Gniazdo pęcherzy	2013
5	Pęcherze podłużne, pęcherze kanalikowe	2015 2016
6	Wtrącenia stałe (z wyjątkiem miedzi)	300
7	Wtrącenia miedzi	3042
8	Brak wtopienia (przyklejenie)	401
9	Brak przetopu (niepełny przetop)	402
10	Niewłaściwy odstęp i niepełny przetop spoin pachwinowych	
11	Podtopienie	5011 5012
12	Nadmierny nadlew	502
13	Nadmierny nadlew spoiny pachwinowej	503
14	Nadmierna grubość spoiny pachwinowej	
15	Zbyt mała grubość spoiny pachwinowej w odniesieniu do grubości nominalnej	
16	Wyciek	504
17	Miejscowe nadmierne przetopienie	5401
18	Przesunięcie brzegów	507
19	Niezupełne wypełnienie rowka spawalniczego Wklęsnięcia	511 509
20	Nadmierna asymetria spoiny pachwinowej	512
21	Wklęsnięcie Obustronne wklęsnięcie grani	515 5013
22	Nawis	506
23	Niewłaściwe ponowne rozpoczęcie spawania	517
24	Ślad zajarzenia	601
25	Rozprysk	602
26	Występowanie wielu niezgodności spawalniczych na przekroju	

W pracy [11] autorzy przeprowadzili badania numeryczne doczołowych złączy spawanych, w których zamodelowano szereg niezgodności spawalniczych powierzchniowych oraz objętościowych. Na rysunku 2.4 przedstawiono badane niezgodności.



Rys. 2.4. Różne niezgodności spoin w złączy doczołowym [12]

Oczywiście dla wizualnej metody badań nieniszczących, w gotowym złączy spawanym istotne są tylko niezgodności widoczne czyli powierzchniowe. Autorzy prac [11, 12] wykazali, że najbardziej niebezpiecznymi niezgodnościami spawalniczymi są pęknięcia (100 - oznaczenia wg tabeli 2.1) wychodzące na powierzchni badanego złącza.

Dla celów badań wizualnych próbek ze spoinami pachwinowymi, będącymi tematem niniejszej pracy określono poziom jakości złączy gotowych – B, czyli wymagania ostre. Wymagania te określają maksymalne (graniczne) wartości dla konkretnych rodzajów niezgodności. Niezgodności, które w przypadku tej metody nieniszczącej należało uwzględnić w badaniach to niezgodności takie jak [13, 14, 15, 16]:

- pęknięcia,
- przyklejenie i brak przetopu,
- niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu.

W tabeli 2.2 określono rodzaje poszukiwanych niezgodności (wskazań) ich numery oraz wartości graniczne w trakcie badań wizualnych.

Tabela 2.2. Rodzaj niezgodności spawalniczych dotyczących badanych próbek

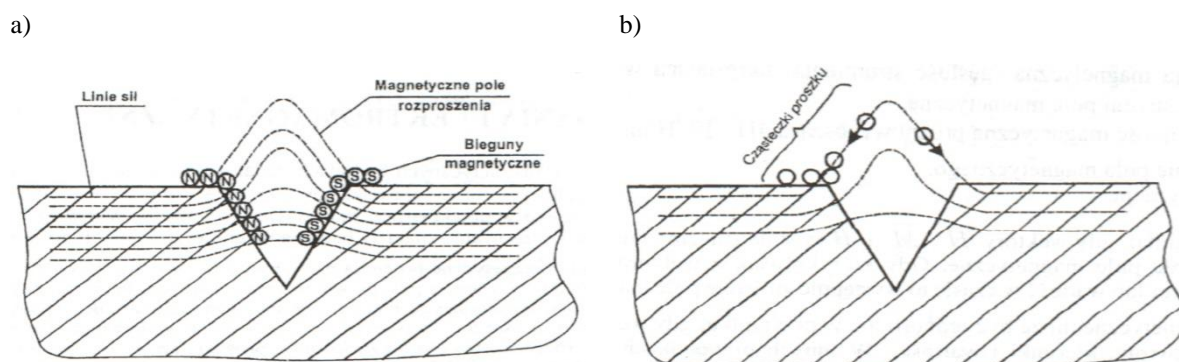
Nr niezgodności spawalniczej wg PN-EN ISO 5817	Określenie niezgodności spawalniczej	Oznaczenie wg PN-EN ISO 6520	Wymiary graniczne niezgodności spawalniczych dla poziomu jakości B
1	Pęknięcia	100	Nie dopuszcza się
2	Pęknięcia w kraterze	104	Nie dopuszcza się

8	Brak wtopienia (przyklejenie)	401	Nie dopuszcza się
9	Brak przetopu (niepełny przetop)	402	Nie dopuszcza się

Pominięto jednak niezgodności dotyczące kształtu, gdyż tematem badań doświadczalnych były próbki ze spoinami wypukłymi oraz wklęsłymi.

### 2.1.1.2. Metoda magnetyczno-proszkowa

Metoda magnetyczno-proszkowa jest stosowana w badaniach obiektów wykonanych ze stali ferromagnetycznych, żeliwa oraz staliwa, natomiast nie nadaje się do badań obiektów wykonanych ze stali austenitycznych. Polega na magnesowaniu obiektu pokrytego zawiesiną magnetyczną. Stan namagnesowania w postaci linii sił, w obiekcie wolnym od wad, jest regularny. Jeżeli w obiekcie badanym jest nieciągłość materiału (wada), np. w postaci pęknięcia, to w miejscu występowania wady powstaje strumień magnetycznego rozproszenia zawiesziny magnetycznej dając wyraźne i widoczne na rysunku 2.5 wskazanie [17].



Rys. 2.5. Schemat magnetycznego pola rozproszenia w badanym obiekcie z wadą: a) konfiguracja magnetycznego pola rozproszenia, b) oddziaływanie pola rozproszenia na zawiesinę magnetyczną powodujące skupienie proszku magnetycznego w miejscu nieciągłości [17]

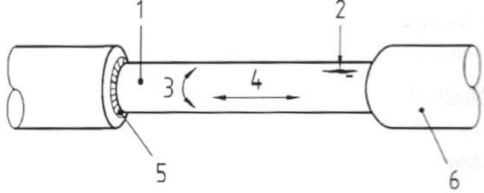
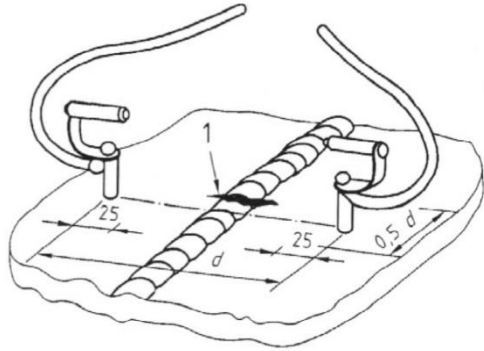
Metoda ta pozwala wykrywać nieciągłości położone do 2 mm pod powierzchnią. Przy prawidłowym wykonaniu badania możliwe jest wykrycie wad od około 0,3 mm [17, 18, 19, 20]. Badania magnetyczno-proszkowe można podzielić, w zależności od warunków obserwacji obiektów badanych i zastosowanych proszków magnetycznych na:

- niefluorescencyjne ze środkami barwnymi,

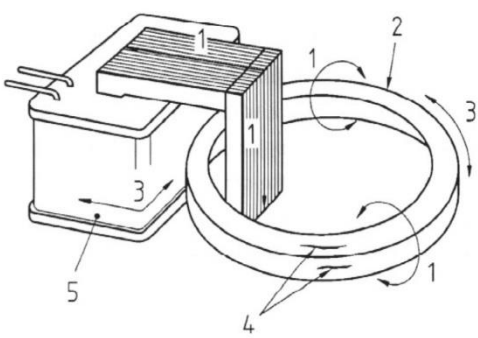
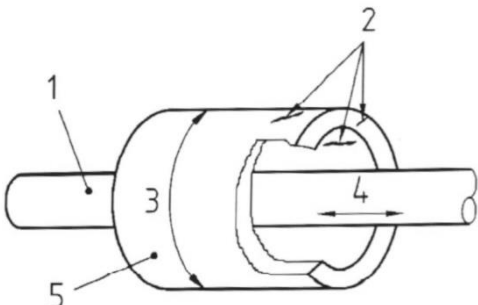
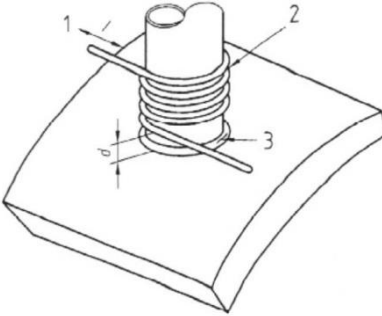
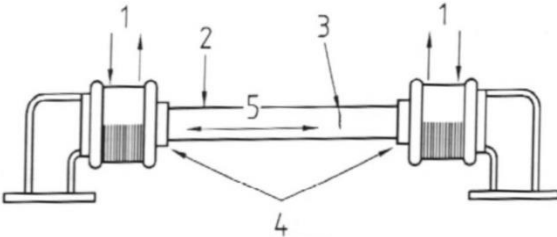
- fluorescencyjne ze środkami fluorescencyjnymi.

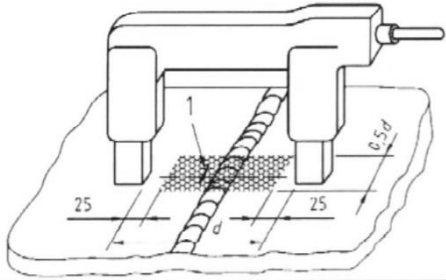
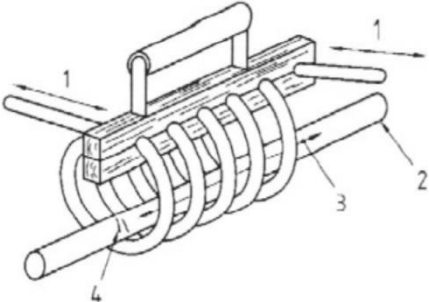
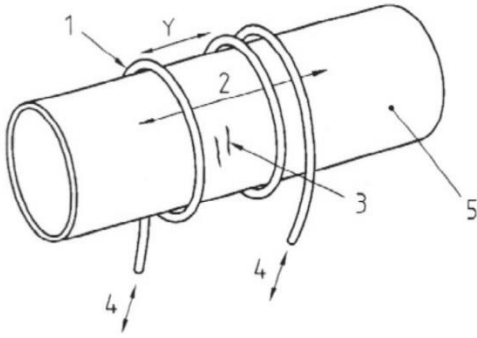
Badania niefluorescencyjne (metoda barwna) wykonuje się w świetle białym, naturalnym lub sztucznym o natężeniu minimum 500 lx. Natomiast fluorescencyjne (metoda fluorescencyjna) jest przeprowadzane przy użyciu promieniowania UV-A stosując źródło promieniowania posiadające maksymalne natężenie przy długości fali 365 nm oraz pozostałość światła białego o natężeniu oświetlenia mniejszym niż 20 lx. Warunki obserwacji w trakcie badań opisane zostały w normie [21]. W badaniach magnetyczno-proszkowych stosuje się różne techniki magnesowania [22], których podział pokazano w tabeli 2.3:

Tabela 2.3. Techniki magnesowania [22]

Techniki przepływu prądu		
1.	<p>Osiowy przepływ prądu:</p> <p>Umożliwia wykrywanie nieciągłości zorientowanych równoległe do kierunku przepływu prądu, który płynie w obiekcie badanym pomiędzy nakładkami doprowadzającymi prąd.</p> <p>Rysunek pokazuje:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. obiekt badany,</li> <li>2. nieciągłość,</li> <li>3. strumień magnetyczny,</li> <li>4. kierunek przepływu prądu,</li> <li>5. miejsce styku,</li> <li>6. zamocowanie.</li> </ol>	
2.	<p>Przepływ prądu wprowadzonego elektrodami:</p> <p>Umożliwia wykrywanie nieciągłości zorientowanych równoległe do kierunku przepływu prądu. Prąd przepływa w obiekcie badanym pomiędzy elektrodami doprowadzającymi prąd.</p> <p>Na obiekcie pokazano</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. nieciągłość.</li> </ol>	



<p>3.</p>	<p>Przepływ prądu indukowanego:</p> <p>Umożliwia badanie obiektów pierścieniowych, który stanowi wtórny obwód transformatora, pozwala wykrywać nieciągłości obwodowe.</p> <p>Rysunek pokazuje:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. strumień magnetyczny,</li> <li>2. obiekt badany,</li> <li>3. kierunek przepływu prądu,</li> <li>4. nieciągłość,</li> <li>5. uzwojenie pierwotne transformatora.</li> </ol>	
<p>Technika przepływu magnetycznego (indukcji)</p>		
<p>1.</p>	<p>Przewodnik w otworze (pomocniczy przepływ prądu).</p> <p>Prąd przepływa przez izolowany pręt umieszczony w otworze, co umożliwia wykrywanie nieciągłości zalegających równoległe do kierunku przepływu prądu.</p> <p>Rysunek pokazuje:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. izolowany przewodnik,</li> <li>2. nieciągłość,</li> <li>3. strumień magnetyczny,</li> <li>4. kierunek przepływu prądu,</li> <li>5. obiekt badany.</li> </ol>	
<p>2.</p>	<p>Przetwornik stykowy (pomocniczy przepływ prądu).</p> <p>Jeden lub więcej izolowanych przewodów, przez które płynie prąd ułożonych równoległe do badanego przedmiotu.</p> <p>Rysunek pokazuje:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. kierunek przepływu prądu,</li> <li>2. ilość zwojów N,</li> <li>3. kierunek zalegania nieciągłości.</li> </ol>	
<p>3.</p>	<p>Elektromagnes stacjonarny (otwarty).</p> <p>Obiekt badany umieszczony jest pomiędzy biegunami elektromagnesu.</p> <p>Rysunek pokazuje:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. kierunek przepływu prądu,</li> <li>2. obiekt badany,</li> <li>3. nieciągłość,</li> <li>4. bieguny,</li> <li>5. strumień magnetyczny</li> </ol>	

4.	<p>Przenośny elektromagnes jarzmowy.</p> <p>Bieguny elektromagnesu jarzmowego stykają się z obiektem badanym wytwarzając pole magnetyczne.</p> <p>Na obiekcie pokazano 1. nieciągłość.</p>	
5.	<p>Cewka sztywna.</p> <p>Obiekt badany umieszcza się wewnątrz cewki, przez którą płynie prąd, co powoduje magnesowanie w kierunku równoległym do osi cewki. Pozwala to wykrywać nieciągłości podłużne, usytuowane prostopadłe do osi cewki.</p> <p>Rysunek pokazuje: 1. kierunek przepływu prądu, 2. obiekt badany, 3. strumień magnetyczny, 4. nieciągłość.</p>	
6.	<p>Cewka elastyczna.</p> <p>Cewkę tworzy elastyczny kabel, przez który płynie prąd.</p> <p>Rysunek pokazuje: 1. izolowany przewód, 2. strumień magnetyczny, 3. nieciągłość, 4. kierunek przepływu prądu, 5. obiekt badany.</p>	

W metodzie magnetyczno-proszkowej istotną rolę odgrywa dobór środków wykrywających wadę (środków do badań). Najczęściej stosuje się zawieszinę barwną (zwykle czarną) lub fluorescencyjne cząstki w cieczy nośnej [23]. Z uwagi na fakt, że w metodzie fluorescencyjnej nie stosuje się żadnych powłok podkładowych, metoda ta charakteryzuje się wyższą czułością w porównaniu do metody barwnej, gdzie przed badaniem na powierzchnię badaną nanosi się powłokę kontrastującą (zwykle białą), która im grubsza tym bardziej obniża czułość badania. W badaniach magnetyczno-proszkowych złączy spawanych, tak jak w innych metodach badawczych istniała potrzeba określenia maksymalnych, dopuszczalnych wymiarów wskazań wykrywanych w czasie badania tzw. poziom akceptacji. Do opisu poziomu akceptacji wraz z

określeniem dopuszczalnych wielkości wskazań opracowano normę [24], w której opisano trzy poziomy akceptacji przedstawione w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Poziomy akceptacji z wielkościami wskazań [24]

	Poziom akceptacji 1	Poziom akceptacji 2	Poziom akceptacji 3
Wskazania liniowe	$l \leq 1,5 \text{ mm}$	$l \leq 3 \text{ mm}$	$l \leq 6 \text{ mm}$
Wskazania liniowe	$d \leq 2 \text{ mm}$	$d \leq 3 \text{ mm}$	$d \leq 4 \text{ mm}$

W tabeli 2.4 można zaobserwować, że poziom akceptacji 1 jest najostrzejszy, a poziom akceptacji 3 najbardziej łagodny. W przytoczonej normie można również zauważyć, że dla badań magnetyczno-proszkowych poszukuje się tylko dwóch rodzajów wskazań: liniowych oraz nieliniowych. Aby powiązać poziom akceptacji z poziomem jakości złącza spawanego normę tę trzeba rozpatrywać z opisaną wcześniej (w podrozdziale badania wizualne) normą PN-EN ISO 5817 [9]. W tabeli 2.5 przedstawiono zależności pomiędzy poziomami jakości, a poziomami akceptacji dla złączy spawanych.

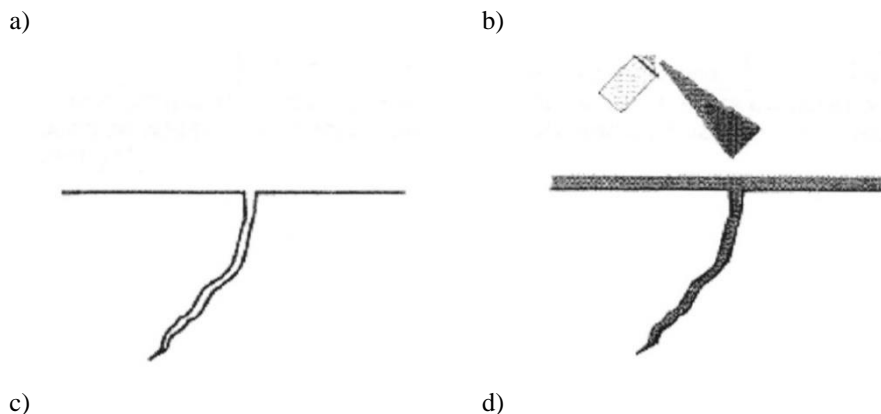
Tabela 2.5. Zależności pomiędzy poziomami jakości, a poziomami akceptacji dla złączy spawanych

Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817	Poziom akceptacji wg PN-EN ISO 23278
B	1
C	2
D	3

W podrozdziale opisującym badania wizualne dla próbek ze spoinami pachwinowymi, będącymi tematem niniejszej pracy określono poziom jakości złączy gotowych – B. Z tabeli 2.5 można łatwo wyczytać, że ustalonemu poziomowi jakości „B” wg PN-EN ISO 5817 odpowiada poziom akceptacji „1” wg PN-EN ISO 23278. Wielkości graniczne wykrytych wskazań to: dla wskazania liniowego  $l \leq 1,5 \text{ mm}$  ( $l$  - długość wskazania liniowego) i dla wskazania nieliniowego  $d \leq 2 \text{ mm}$  ( $d$  – największy wymiar wskazania nieliniowego). Należy również wziąć pod uwagę regułę odstępu pomiędzy dwoma wskazaniami czyli gdy odstęp pomiędzy dwoma wskazaniami jest mniejszy od wymiaru głównego mniejszego z nich to wskazania należy traktować jako jedno wskazanie.

### 2.1.1.3. Metoda penetracyjna

Metoda penetracyjna należy do metod powierzchniowych i jest stosowana w badaniach obiektów wykonanych ze stali ferromagnetycznych, austenitycznych, aluminium, niklu, miedzi, tytanu, itp. Ograniczeniem stosowania tej metody jest brak możliwości badań materiałów o dużej porowatości. Metoda ta opiera się na wnikanii penetrantu w otwarte nieciągłości aby później poprzez działanie wywoływacza uwidocznić nieciągłość (wadę). Zasada badań penetracyjnych opiera się na wykorzystaniu zjawiska kapilarności, które polega na wnikanii cieczy do wąskich przestrzeni i wznoszeniu się w nich nawet wbrew sile ciężkości [18, 26]. Tak jak w metodzie magnetyczno-proszkowej, metodę penetracyjną można przeprowadzić w świetle białym oraz w świetle UV stosując penetranty fluorescencyjne. Ogólny schemat, czy istota badania penetracyjnego przedstawiona została na rysunku 2.6. Rysunek 2.6a przedstawia pęknięcie powierzchniowe, na które po oczyszczeniu z zanieczyszczeń nanosi się penetrant (rys. 2.6b). Po czasie wnikanii penetratora oczyszcza się powierzchnię badania (rys. 2.6c), a następnie nanosi się wywoływacz, który ma za zadanie wydobyć penetrant zalegający w pęknięciu, czy innej nieciągłości powierzchniowej (rys. 2.6d). Sposób przeprowadzania badań penetracyjnych, jak i dobór odpowiednich środków do wykrywania nieciągłości opisany został w normie [28], gdzie w zależności od rodzaju obiektu badania, warunków prowadzenia badań oraz rodzaju poszukiwanych nieciągłości dobiera się odpowiedni „system” badania penetracyjnego. System ten składa się z komponentów, tj.: penetrantu, zmywacza (rozpuszczalnik, woda) i wywoływacza.





Rys. 2.6. Schemat badania penetracyjnego [27], gdzie: a) pęknięcie powierzchniowe, b) faza penetracji, c) powierzchnia po oczyszczeniu, d) wskazanie od pęknięcia po wywołaniu

Warunki obserwacji wskazań pojawiających się w trakcie badań określa norma [21]. Jest to ta sama norma określająca warunki obserwacji wskazań jak dla opisanych wcześniej badań magnetyczno-proszkowych czyli w zależności od warunków obserwacji obiektów badanych i zastosowanego systemu badań penetracyjnych.

W badaniach penetracyjnych, podobnie jak w przypadku badań magnetyczno-proszkowych złączy spawanych określono maksymalne, dopuszczalne wymiary wskazań wykrywanych będącymi poziomymi akceptacji. Do ich opisu wraz z wartościami dopuszczalnych wielkości wskazań opracowano normę [28, 29]. W tabeli 2.6 opisano trzy poziomy akceptacji.

Tabela 2.6. Poziomy akceptacji [28, 29]

	Poziom akceptacji 1	Poziom akceptacji 2	Poziom akceptacji 3
Wskazania liniowe	$l \leq 2 \text{ mm}$	$l \leq 4 \text{ mm}$	$l \leq 8 \text{ mm}$
Wskazania liniowe	$d \leq 4 \text{ mm}$	$d \leq 6 \text{ mm}$	$d \leq 8 \text{ mm}$

W tabeli 2.6 podobnie jak w tabeli 2.4 można zaobserwować, że poziom akceptacji 1 jest najostrzejszy, a poziom akceptacji 3 najbardziej łagodny. Podobnie jak w opisywanych poprzednio metodach powierzchniowych, tak i w przypadku badań penetracyjnych określono zależności pomiędzy poziom akceptacji, a poziomem jakości złącza spawanego i mają one takie same oznaczenia. W tabeli 2.7 przedstawiono zależności pomiędzy poziomami jakości a poziomami akceptacji dla złączy spawanych.

Tabela 2.7. Zależności pomiędzy poziomami jakości a poziomami akceptacji dla złączy spawanych

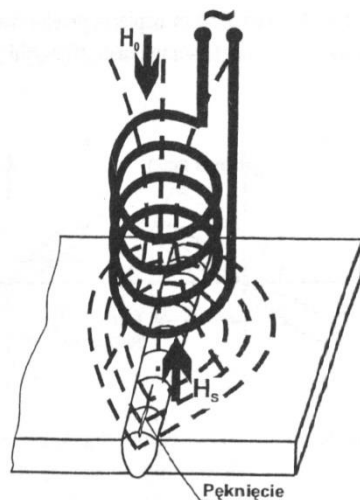
Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817	Poziom akceptacji wg PN-EN ISO 23277
B	1

C	2
D	3

Odnosząc się do próbek ze spoinami pachwinowymi określono wcześniej poziom jakości dla złączy gotowych – B. Z tabeli 2.7 wynika, że ustalonemu poziomowi jakości „B” wg PN-EN ISO 5817 odpowiada poziom akceptacji „1” wg PN-EN ISO 23277. Odnosząc się do badanych próbek ze spoinami pachwinowymi to wielkości graniczne wykrytych wskazań wynoszą: dla wskazania liniowego  $l \leq 2$  mm i dla wskazania nieliniowego  $d \leq 4$  mm. Jeśli chodzi o regułę odstępu pomiędzy dwoma wskazaniami to jest identyczna jak w opisie na końcu rozdziału 2.1.1.2.

#### **2.1.1.4. Metoda prądów wirowych**

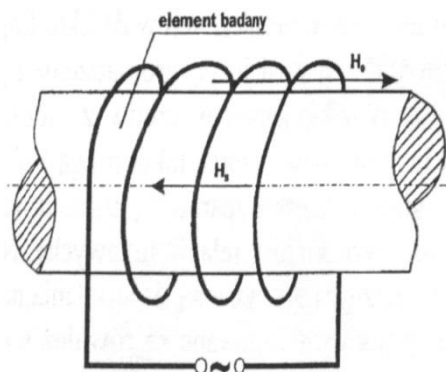
Metoda prądów wirowych (ET) umożliwia prowadzenie badań w poszukiwaniu nieciągłości powierzchniowych oraz dużych nieciągłości podpowierzchniowych w stalach, stopach miedzi, aluminium, tytanu, cyrkonu, itp. Badania prądami wirowymi opierają się na zjawisku indukcji magnetycznej. Prądy wirowe powstają w obiektach przewodzących prąd elektryczny pod wpływem zmiennego pola magnetycznego, wytworzonego przez cewkę zasilaną prądem przemiennym o natężeniu około 0,1 A i o częstotliwości od 1 kHz do 1,5 MHz [5, 16, 30, 31]. Wzbudzone w obiekcie badanym prądy wirowe wytwarzają, zgodnie z regułą Lenza, własne pole magnetyczne, które oddziałuje na pierwotne pole cewki powodując powstanie pola wypadkowego zmieniającego własności elektryczne (impedancję) cewki [30]. Na rysunku 2.7 przedstawiono w sposób schematyczny działanie metody prądów wirowych.



Rys. 2.7. Schemat działania metody prądów wirowych [18], gdzie:  $H_0$  – pole pierwotne wytwarzane przez cewkę stykową,  $H_s$  – pole wtórne wytwarzane przez prądy wirowe

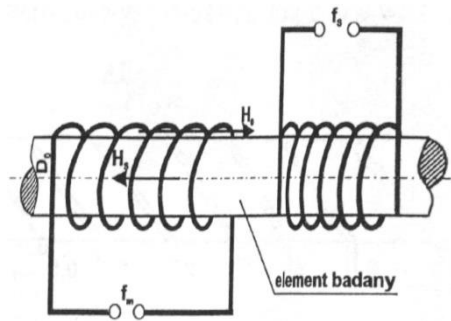
Badany obiekt wprowadza się w zmienne pole magnetyczne cewki  $H_0$  pracującej jako czujnik, zasilanej prądem przemiennym. Pod wpływem wytworzonego pola w obiekcie indukują się prądy wirowe, które wytwarzają własne pole  $H_s$  skierowane przeciwnie do pola cewki. W efekcie, w obszarze cewki wytwarza się pole wypadkowe różne od pierwotnego. Jeżeli w obiekcie badanym będzie obecna niezgodność (np. pęknięcie) spowoduje to zakłócenie w przepływie prądów wirowych, ponieważ wzrasta lokalna rezystancja materiału [18]. W badaniach defektoskopowych metodą prądów wirowych stosuje się kilka technik wykorzystujących przetworniki wiroprowadowe:

- przetlotowe (rys. 2.8),



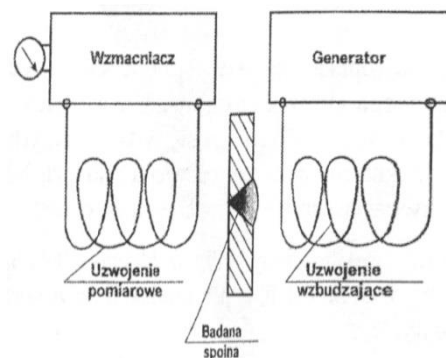
Rys. 2.8. Przetwornik przetlotowy [18], gdzie:  $H_0$  – pole pierwotne wytwarzane przez przetwornik,  $H_s$  – pole wtórne wytwarzane przez prądy wirowe w badanym obiekcie

- stykowe (rys. 2.9),



Rys. 2.9. Przetwornik stykowy [18], gdzie:  $H_0$  – pole pierwotne wytwarzane uzwojenie magnesujące,  $H_s$  – pole wtórne wytwarzane przez prądy wirowe

- widelkowe (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Przetwornik widelkowy [18]

Na potrzeby realizacji badań metodą prądów wirowych opracowano normę [32], w której określono zasady ogólne stosowane w badaniach wyrobów i materiałów metodą prądów wirowych w kolejności do zapewnienia określonych i powtarzalnych charakterystyk. Opisano również szczególne wymagania związane z zastosowaniem metody prądów wirowych do specyficznych typów wyrobów. Natomiast w normie [33] zdefiniowano techniki badania prądami wirowymi do wykrywania pęknięć powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości płaskich, głównie w materiałach ferromagnetycznych (materiał spoiny, strefy wpływu ciepła, materiały podstawowe). W artykule [34] autor przedstawił techniki badań nieniszczących metodą prądów wirowych stosowane do kontroli konstrukcji spawanych z paramagnetycznych i ferromagnetycznych materiałów i oceny zachodzących w nich przemian strukturalnych, a także ujawnienia niezgodności w złączach spawanych. Pokazano również trudności w badaniach nieniszczących metodą prądów wirowych spoin wynikających z niejednorodności przewodności elektrycznej i zmian geometrii złącza. Z kolei w pracy [35] autorzy przedstawili wyniki badań metodą prądów wirowych złączy spawanych wykonanych ze stali S235JR. Stwierdzili, że metoda



prądów wirowych jest metodą porównawczą, w której konieczne jest stosowanie konkretnych wzorców lub próbek odniesienia. Metoda ta ogranicza się do kontroli złączy spawanych, w których zmiany kształtu lica spoiny mają łagodny przebieg, a samo złącze charakteryzuje się ograniczoną liczbą czynników wpływających na sygnał wyjściowy sondy oraz powodujących trudności w jej prowadzeniu, np. rozpryski, obecność zgorzeliny, podtopienia, itd. Metoda prądów wirowych ze względu na trudności w przeprowadzaniu badań w porównaniu do metody magnetyczno-proszkowej i penetracyjnej jest rzadziej stosowana. W tej pracy metoda prądów wirowych nie była stosowana.

### **2.1.2. Metody objętościowe**

Metody objętościowe pozwalają na wykrywanie defektów pojawiających się wewnątrz obiektów badanych, zazwyczaj niewidocznych nieciągłości. Do metod objętościowych zalicza się między innymi metody:

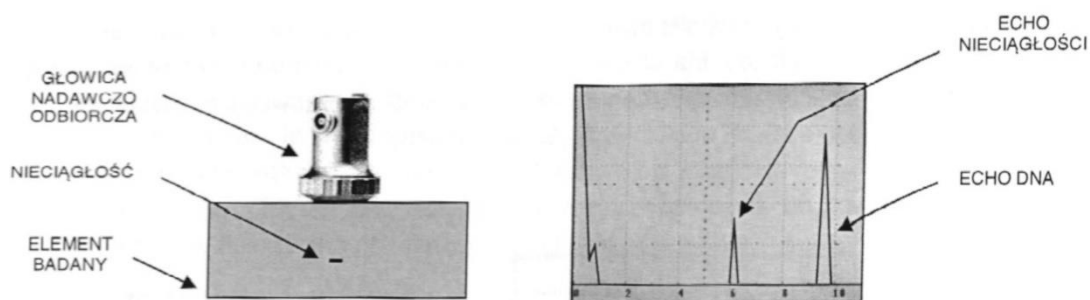
- ultradźwiękową (UT),
- radiologiczną (RT),
- emisji akustycznej (EA).

#### **2.1.2.1. Metoda ultradźwiękowa**

Metoda ultradźwiękowa (UT) umożliwia, w zależności od zastosowanych głowic ultradźwiękowych, rodzaju wprowadzanych fal, wykrycie nieciągłości wewnętrznych jak i powierzchniowych. W największym uproszczeniu badanie ultradźwiękowe polega na wprowadzeniu do obiektu badanego wiązki fal ultradźwiękowych, o częstotliwości zazwyczaj 2 - 10 MHz, poprzez przyłożenie i przemieszczanie po powierzchni obiektu badanego głowicy skanującej. Następnie, jeżeli w badanym materiale znajduje się nieciągłość, część wiązki ultradźwiękowej odbija się od niej i wraca do odbiornika głowicy ultradźwiękowej, dając na ekranie defektoskopu wskazanie widoczne w formie piku [36, 37]. W metodzie ultradźwiękowej można wyróżnić techniki badań takie jak:

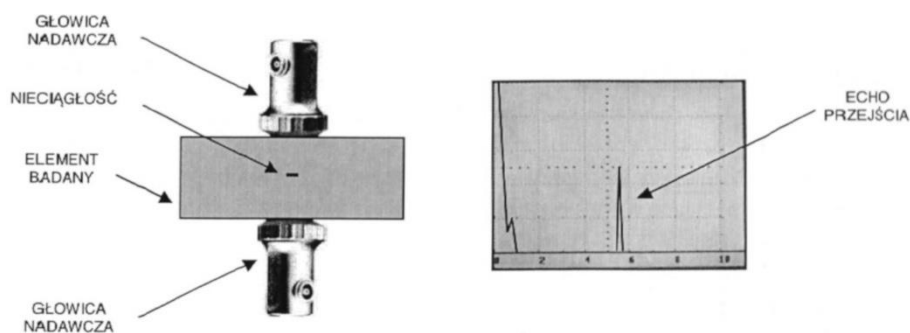
- technika echa,
- technika cienia (przepuszczania),
- technika rezonansu.

W technice echa głowica ultradźwiękowa jest na zmianę raz nadajnikiem, a raz odbiornikiem impulsu. Sygnał nadany przez nadajnik do materiału odbija się od nieciągłości lub przeciwległej powierzchni i wraca do głowicy. Zasadę działania techniki echa pokazano na rysunku 2.11.



Rys. 2.11. Zasada działania techniki echa [36]

Natomiast w technice cienia posługujemy się dwoma głowicami o jednakowych parametrach, z których jedna jest nadajnikiem a druga odbiornikiem. Zasada działania techniki cienia pokazana została na rysunku 2.12, gdzie widać, że sygnał wprowadzany przez głowicę nadawczą powinien zostać odebrany przez głowicę odbiorczą, ustawioną po drugiej stronie próbki.



Rys. 2.12. Zasada działania techniki cienia [36]

Technikę rezonansu stosuje się do pomiaru grubości. Polega na wzbudzeniu w materiale fali stojącej, wchodzącej w rezonans z długością fali. Ma to miejsce wówczas, gdy grubość materiału jest wielokrotnością połowy długości fali. W technice rezonansu nadawana jest zwykle fala ciągła. Do wyznaczenia grubości konieczna jest znajomość kolejnych częstotliwości przy których zachodzi rezonans. Żeby w badanym obiekcie utworzyła się fala stojąca (rezonans) ścianki obiektu badanego muszą być równoległe [37]. Wytyczne dotyczące doboru aparatury do badań ultradźwiękowych oraz

weryfikacja użyteczności do konkretnego problemu badawczego opisano szczegółowo w normach [38, 39, 40]. Dobór właściwego sprzętu (układ defektoskop-głowica) do badań jest niezwykle ważny, ponieważ aby można było oceniać wielkości i położenia wskazań od wad w badanych obiektach (np. złączach spawanych) należy we właściwy sposób wyskalować zasięg podstawy (zakresu obserwacji). W normie [41] opisano techniki skalowania zakresu obserwacji. W technice echa ustawienia zakresu obserwacji wykonuje się wykorzystując czas przejścia fali ultradźwiękowej do reflektora (np. przeciwległa powierzchnia, dno, itp.). Po ustawieniu zakresu obserwacji należy ustawić czułość badania w tym:

- poziom odniesienia,
- poziom obserwacji,
- poziom rejestracji [16].

Ustalenie poziomów odniesienia (amplitud echa określonego reflektora odniesienia) opisano w normach [42, 43]. Można je przeprowadzić następującymi, najczęściej stosowanymi technikami:

- DAC, metoda (1) w której wykorzystuje się *krzywą korekcji odległość-amplituda* dla poprzecznego otworu cylindrycznego o średnicy  $D_{SDH} = 3 \text{ mm}$ .
- AVG (DGS), metoda (2) w której poziomem odniesienia jest krzywa wyznaczona dla określonego reflektora płasko-kolistego.
- DAC, metoda (3) w której wykorzystuje się *krzywą korekcji odległość-amplituda* dla rowka prostokątnego o głębokości 1 mm.

Ocenę jakości połączeń spawanych w badaniach ultradźwiękowych przeprowadza się następującymi metodami [43]:

- metodą DGS, w której wykorzystuje się nakładane (lub wyświetlane na ekranie defektoskopu) skale ekranowe lub wykresy,
- metodą porównawczą, przez porównanie echa wady z echem wady wzorcowej,
- metodą 6 dB (połowę wysokości amplitudy) lub 20 dB spadku amplitudy echa,
- przez pomiar współrzędnych wady z dwóch stron spoiny.

W normie [43] określono cztery klasy (poziomy) badania (A, B, C, D). W tabeli 2.8 przedstawiono zależności pomiędzy poziomami jakości określonymi w znanej już z wcześniej opisywanych metod badań nieniszczących normę [9], a klasami badania ustalonymi w normie [43].

Tabela 2.8. Zależności pomiędzy poziomami jakości, a klasą badania dla złączy spawanych

Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817	Klasa (poziom) badania wg PN-EN ISO 17640
C	A
B	B
Wg uzgodnienia	C
Zastosowanie specjalne	D

Znając wymagany poziom jakości oraz klasę badania do oceny złącza spawanego w badaniach ultradźwiękowych niezbędne są wytyczne dotyczące poziomów akceptacji. Poziomy akceptacji opisane są w normie [42], korelacja pomiędzy poziomami jakości, a poziomami akceptacji dla złączy spawanych przedstawiono w tabeli 2.9.

Tabela 2.9. Korelacja pomiędzy poziomami jakości, a poziomami akceptacji dla złączy spawanych

Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817	Klasa (poziom) badania wg PN-EN ISO 17640	Poziom akceptacji wg PN-EN ISO 11666
B	Co najmniej B	2
C	Co najmniej A	3
D	Nie zaleca się prowadzenia badań	Nie zaleca się prowadzenia badań

Poziomy akceptacji 2 i 3 dla metody DAC (1) i DAC (3) (opisane powyżej) i wskazań podłużnych określone zostały w normie [42] oraz przedstawione w tabeli 2.10. Natomiast w tabeli 2.11 przedstawiono poziomy akceptacji 2 i 3 dla metody AVG (2) i wskazań podłużnych.

Tabela 2.10. Poziomy akceptacji 2 i 3 dla metody (1) i (3) i wskazań podłużnych wg PN-EN ISO 11666

8 mm ≤ t < 15 mm	
Długość wskazania l, mm	Maksymalna dopuszczalna wysokość echa
l ≤ t	Poziom odniesienia
l > t	Poziom odniesienia pomniejszony o 6 dB
15 mm ≤ t < 100 mm	
Długość wskazania l, mm	Maksymalna dopuszczalna wysokość echa
l ≤ 0,5 t	Poziom odniesienia powiększony o 4 dB

$0,5 t < l \leq t$	Poziom odniesienia pomniejszony o 2 dB
$l > t$	Poziom odniesienia pomniejszony o 6 dB
Poziom obserwacji = poziom odniesienia pomniejszony o 10 dB, Poziom rejestracji: dla poziomu akceptacji 2 = poziom odniesienia pomniejszony o 6 dB, dla poziomu akceptacji 3 = poziom odniesienia pomniejszony o 2 dB.	

Tabela 2.11. Poziomy akceptacji 2 i 3 dla metody (2) i wskazań podłużnych wg PN-EN ISO 11666

$8 \text{ mm} \leq t < 15 \text{ mm}$	
Długość wskazania l, mm	Maksymalna dopuszczalna wysokość echa
$l \leq t$	Poziom odniesienia powiększony o 6 dB
$l > t$	Poziom odniesienia
$15 \text{ mm} \leq t < 100 \text{ mm}$	
Długość wskazania l, mm	Maksymalna dopuszczalna wysokość echa
$l \leq 0,5 t$	Poziom odniesienia powiększony o 10 dB
$0,5 t < l \leq t$	Poziom odniesienia powiększony o 4 dB
$l > t$	Poziom odniesienia
Poziom obserwacji = poziom odniesienia pomniejszony o 4 dB, Poziom rejestracji: dla poziomu akceptacji 2 = poziom odniesienia, dla poziomu akceptacji 3 = poziom odniesienia powiększony o 4 dB.	

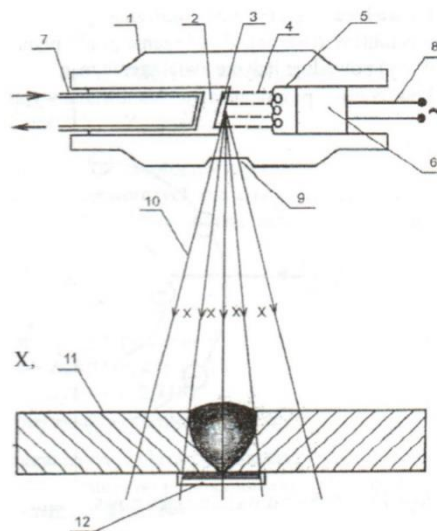
Odnosząc się do próbek ze spoinami pachwinowymi określono wcześniej poziom jakości dla złączy gotowych – B. Z tabeli 2.8 wynika, że ustalonymu poziomowi jakości „B” wg PN-EN ISO 5817 odpowiada klasa badania „B” wg PN-EN ISO 17640 oraz z tabeli 2.9 poziom akceptacji „2” wg PN-EN ISO 11666. Przyjmując, że badania ultradźwiękowe wykonane zostały metodą (1) (czyli DAC) oraz, że grubość elementów badanych wynosi min 8 mm, to poziom obserwacji oraz poziom rejestracji powinien być realizowany wg tabeli 2.10. W próbkach spawanych ze spoinami pachwinowymi grubości ścianek miały poniżej 8 mm, dlatego też badań ultradźwiękowych nie przeprowadzano. Autorzy pracy [44, 45] wykazali, że wyniki badań spoin pachwinowych metodą ultradźwiękową nie są całkowicie miarodajne. W przypadku występowania jak i nieobecności niezgodności spawalniczych w tego typu spoinach uzyskuje się niejednokrotnie zbliżone obrazy na ekranie defektoskopu. Stąd trudności w wykrywaniu takich niezgodności jak brak przetopu czy przyklejenia.

### 2.1.2.2. Metoda radiologiczna

Metoda radiologiczna (RT) umożliwia wykrycie nieciągłości wewnętrznych jak i powierzchniowych. Polega ono na naświetlaniu obiektów promieniowaniem jonizującym, najczęściej promieniowaniem rentgenowskim i rejestracji cieniowych obrazów nieciągłości na radiogramach. Jest metodą najbardziej rozpowszechnioną dzięki jej licznym zaletom, do których można zaliczyć [18, 46]:

- dobrą wykrywalność nieciągłości wewnętrznych,
  - stosunkowo prosta interpretacja wyników,
  - w wyniku badania otrzymujemy dokument, który może być wielokrotnie sprawdzany.
- Do wykrywania wewnętrznych nieciągłości w złączach spawanych wykorzystywane jest promieniowanie X (Roentgena) lub promieniowania  $\gamma$  do przenikania przez złącze. Kontrola radiologiczna badanych złączy spawanych polega na wykonaniu radiogramów badanych złączy, następnie opisaniu zarejestrowanych na radiogramach wskazań oraz na ich podstawie dokonanie oceny jakości złączy spawanych.

Promieniowanie X powstaje w wyniku zahamowania strumienia rozprędzonych elektronów na materialnej przeszkodzie. Do ich wytworzenia stosuje się lampy rentgenowskie albo akceleratory cząstek. Schemat lampy rentgenowskiej pokazano na rysunku 2.13.



Rys. 2.13. Schemat lampy rentgenowskiej i badania złącza przy pomocy promieni X [18], gdzie: 1) obudowa lampy, 2) anoda, 3) ognisko, 4) strumień elektronów, 5) włókno żarzenia katody, 6) katoda, 7)

chłodzenie anody, 8) doprowadzenie prądu, 9) okienko lampy, 10) wiązka promieniowania X, 11) badane złącze, 12) kasetta z błoną i okładkami wzmacniającymi

Promieniowanie gamma ( $\gamma$ ) obecnie uzyskuje się w wyniku przemian energetycznych jąder atomowych pierwiastków pobudzonych wcześniej do promieniowania (np. izotopów kobaltu, irydu) [47].

Niezależnie od zastosowanej metody oraz techniki badań radiologicznych do oceny powinny być brane wyłącznie radiogramy dobrej jakości. Miarą jakości radiogramu jest zdolność do wykrywania wad o określonej wielkości [16]. Jakość radiogramów jest na tyle istotna, że opracowano całą serię norm [48] do określania ich jakości i użyteczności w ocenie badań radiologicznych. Na jakość radiogramu składają się trzy wielkości tj.: kontrast, nieostrość geometryczna oraz ziarnistość.

Koncentrując się w niniejszej pracy na obiektach spawanych jakość złącza powinna odpowiadać jednemu z poziomów określonych w PN-EN ISO 5817 [9]. Podobnie jak w przypadku badań ultradźwiękowych do oceny jakości złącza spawanego poddanego badaniom radiologicznym niezbędne jest określenie klasy techniki badań, które określa się za pomocą wytycznych w normie [49], jak i poziomy akceptacji określone w normie [50]. W tabeli 2.12 przedstawiono korelację pomiędzy poziomami jakości, a poziomami akceptacji w badaniach radiologicznych.

Tabela 2.12. Korelacja pomiędzy poziomami jakości a poziomami akceptacji w badaniach radiologicznych dla złączy spawanych

Poziom jakości wg PN-EN ISO 5817	Klasa techniki badania wg PN-EN ISO 17636	Poziom akceptacji wg PN-EN ISO 10675
B	B	1
C	B	2
D	A	3

Ocenę wskazań prowadzi się na radiogramie, który odpowiada odcinkowi złącza równemu 12s lub 150 mm (gdzie „s” jest grubością przetopionej spoiny).

Wybór metody badawczej dla konkretnych złączy spawanych określono w normie [25], gdzie w zależności od rodzaju badanego materiału oraz obszaru wykrywania wad (powierzchniowych lub objętościowych) przypisana została metoda badawcza. W tabeli

2.13 przedstawiono zestawienie powierzchniowych metod badawczych oraz rodzajów materiałów.

Tabela 2.13. Zestawienie powierzchniowych metod badawczych oraz rodzajów materiałów we wszystkich rodzajach połączeń [25]

Rodzaje materiałów	Metoda badań
Stale ferrytyczne	VT VT oraz MT VT oraz PT VT oraz (ET)
Stale austenityczne, aluminium, nikiel, miedź, tytan	VT VT oraz PT

Natomiast w tabeli 2.14 przedstawiono zestawienie objętościowych metod badawczych oraz rodzajów materiałów dla złączy doczołowych oraz teowych.

Tabela 2.14. Zestawienie powierzchniowych metod badawczych oraz rodzajów materiałów we wszystkich rodzajach połączeń [25]

Rodzaje materiałów oraz rodzaj złącza	Grubość materiału podstawowego, mm		
	$t < 8$	$8 \leq t \leq 40$	$t > 40$
Złącza doczołowe ze stali ferrytycznej	RT lub (UT)	RT lub UT	UT lub (RT)
Złącza teowe ze stali ferrytycznej	(RT) lub (UT)	UT lub (RT)	UT lub (RT)
Złącza doczołowe ze stali austenitycznej	RT	RT lub (UT)	RT lub (UT)
Złącza teowe ze stali austenitycznej	(RT) lub (UT)	(RT) i/lub (UT)	(RT) lub (UT)
Złącza doczołowe ze aluminium	RT	RT lub UT	RT lub UT
Złącza teowe ze aluminium	(RT) lub (UT)	UT lub (RT)	UT lub (RT)
Złącza doczołowe ze stopów niklu i miedzi	RT	RT lub (UT)	RT lub (UT)
Złącza teowe ze stopów niklu i miedzi	(RT) lub (UT)	(RT) lub (UT)	(RT) lub (UT)
Złącza doczołowe z tytanu	RT	RT lub (UT)	



Złącza teowe z tytanu	(RT) lub (UT)	UT lub (RT)	
-----------------------	---------------	-------------	--

Na podstawie Tabeli 2.13 i 2.14 wyznaczone zostały zastosowane metody badawcze dla konkretnych potrzeb przeprowadzania badań nieniszczących. W przypadku zakresu badań obejmujących niniejszą pracę przeprowadzono badania wizualne oraz magnetyczno-proszkowe w świetle UV.

## 2.2. Podstawowe zagadnienia dotyczące mechaniki pękania

Na temat zmęczenia materiałów, trwałości i niezawodności urządzeń mówi się od co najmniej dwustu lat. Początkowo awarie związane z pęknięciami zmęczeniowymi miały miejsce na łodziach (maszty, żagle, itp.), które przebyły duże odległości i poddawane były obciążeniom zmiennym. Większość narzędzi, którymi posługiwano się były ręczne bądź napędzane siłą zwierząt, gdzie cykle obciążenia były na tyle niskie, że można było traktować jako statyczne. Wraz z nadejściem rewolucji przemysłowej zainteresowanie badaniem zjawisk zmęczenia stało się częstsze i nabrało szczególnego znaczenia. Ponieważ używane urządzenia napędzane były silnikami: parowymi, spalinowymi i elektrycznymi, zwiększyły się również częstotliwości wykonywanych cykli obciążeń, co skutkowało szybszym zużyciem lub pojawianiem się uszkodzeń. Pierwsze znane badania zmęczeniowe przeprowadzone były przez Alberta, niemieckiego radcę górniczego, który to w latach 1829 badał wytrzymałość kopalnianych łańcuchów wyciągowych w kopalniach Oberharz [52]. W 1837 roku opublikował pierwsze wyniki testów zmęczeniowych, używając maszyny zmęczeniowej zaprojektowanej do badań łańcuchów przenośników w kopalniach Clausthal. Jednak ze względu na znaczne koszty pierwszych badań zmęczeniowych nie zostały zapamiętane. Natomiast Albert wynalazł drut, który dla historii jest znacznie ważniejszy niż pierwsze testy zmęczeniowe. Następnie w latach 30 XIX wieku w Anglii powstała komisja, której zadaniem było wyjaśnienie zjawiska nazwanego zmęczeniem, polegającym na zmniejszeniu się wytrzymałości materiałów poddanych cyklicznym obciążeniom. Wykonanie badań zmęczeniowych podjął się Hodgkinson, a dotyczyły zagadnień licznych przypadków pęknięcia osi kolejowych, które produkowano w oparciu o prawidłowo wykonane obliczenia na dopuszczalne naprężenia.

W 1850 i 1860 r. niemiecki inżynier Wöhler również prowadził badania osi wagonów dla niemieckiej kolei. Przeprowadził liczne badania zmęczeniowe poddając osie obciążeniom zginającym, skrętnym i osiowym. Badania te wykazały, że trwałość zmęczeniowa zwiększyła się wraz ze spadkiem pola naprężeń, tak że poniżej pewnych wartości naprężeń wydawało się, że ma nieskończoną trwałość. Z drugiej strony stwierdził, że trwałość zmęczeniowa została drastycznie zmniejszona przez obecność karbów. Badania te sugerowały również, żeby współczynnik bezpieczeństwa był równy dwóm dla wytrzymałości statycznej i jednej drugiej dla materiałów poddanych obciążeniom zmęczeniowym, które muszą wykazywać nieskończoną trwałość. Wöhler przedstawił wyniki swoich badań w postaci tabel. Natomiast Spangenberg w 1879 roku, następca Wöhlera, jako dyrektor "Mechanisch – Technische - Versuchsanstalt" w Berlinie, sklasyfikował wyniki badań Wöhlera jako krzywe, chociaż w nietypowej formie liniowej odciętej i rzędnej, uzyskując krzywe SN. Krzywe SN od roku 1936 znane są jako "krzywymi Wöhlera".

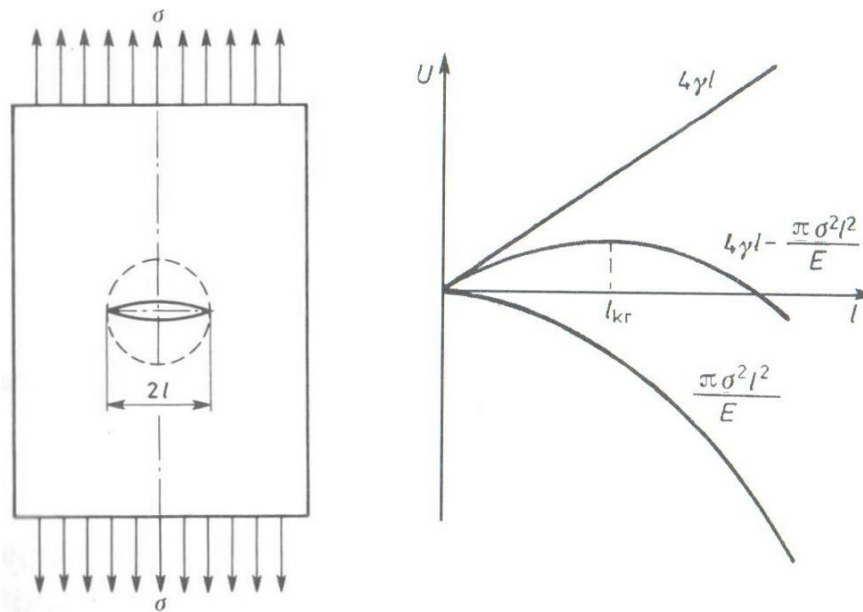
Datę powstania przedmiotu mechaniki pęknięcia przyjmuje się rok 1920, w którym to roku Griffith opublikował wyniki swoich badań dotyczących zjawisk zachodzących w materiałach podczas rozwoju pęknięć poddanych rozciąganiu [51, 53]. W swoich rozważaniach oparł się o koncepcję przedstawioną przez Iglisa, który to w roku 1913 opublikował wyniki badań płaskiego pęknięcia w tarczy o nieskończenie dużych wymiarach dla ciała kruchego (bezpostaciowego) jakim jest szkło [54]. Iglis założył, że każde ciało posiada mikropęknięcia, które powodują powstawanie w nagromadzeniu mikropęknięć koncentracje naprężeń. Griffith w swych pracach przedstawił model tarczy o jednostkowej (cienkiej) grubości z centralną szczeliną, w kształcie soczewki o długości  $2l$  (rys 2.14a). Analizował stan energetyczny szczeliny w zakresie liniowo-sprężystym oraz opisał spadek energii odkształcenia sprężystego  $\Delta U_s$  w funkcji długości szczeliny (2.1).

$$\Delta U_s = - \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} \quad (2.1)$$

Spadek energii odkształcenia sprężystego przedstawiono na rysunku 2.14b.

a)

b)



Rys. 2.14. Teoria Griffitha [55, 56], gdzie: a) tarcza z centralną szczeliną, b) zmiana energii tarczy podczas wzrostu pęknięcia (szczeliny)

Wraz ze wzrostem szczeliny oraz spadkiem energii odkształcenia sprężystego wzrasta energia powierzchniowa  $\gamma$ , która konieczna jest do utworzenia nowej powierzchni. Wartość tej energii wynosi  $4\gamma l$ . Sumując energię odkształcenia sprężystego oraz energię powierzchniową otrzymujemy całkowitą energię rozwoju pęknięcia (2.2)

$$\Delta U = 4\gamma l - \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} \quad (2.2)$$

Na rysunku 2.14b można zaobserwować, że krzywa energii  $\Delta U$  wzrasta do określonej wartości długości pęknięcia  $l_{kr}$ , gdzie osiąga maksimum a następnie gwałtownie opada. Dzieje się tak dlatego, że w trakcie wzrostu pęknięcia do wartości krytycznej energia uwalniana jest w sposób stabilny, krzywa spadku energii odkształcenia sprężystego jest linią prawie prostą. Natomiast po przekroczeniu krytycznej wartości pęknięcia energia odkształcenia sprężystego spada gwałtownie. Maksymalną całkowitą energię rozwoju pęknięcia Griffith otrzymał przyrównując do zera pierwszą pochodną energii  $\Delta U$  względem długości pęknięcia  $dl$  (2.3).

$$\frac{d(\Delta U)}{dl} = 4\gamma - \frac{\pi l \sigma^2}{E} = 0 \quad (2.3)$$

Szczelina po osiągnięciu wartości  $2l_{kr}$  rozwija się z prędkością porównywalną do prędkości dźwięku, określane jako kruche pękanie. Znając krytyczną wartość szczeliny Griffith wyznaczył krytyczne naprężenie  $\sigma_{kr}$  jako

$$\sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l_{kr}}} \quad (2.4)$$

Z uwagi na małą przydatność wzoru (2.4) w obliczeniach zachowania się rzeczywistych materiałów. W 1952 roku Orowan [57] opublikował wyniki swoich badań, w których poddał modyfikacji teorię Griffitha wyprowadzając wzór na krytyczne naprężenie  $\sigma_{kr}$  w postaci

$$\sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi l_{kr}}} \quad (2.5)$$

gdzie  $\gamma_p$  – energia odkształcenia plastycznego

Orowan w swojej publikacji uwzględnił energię odkształcenia dla materiałów kruchych oraz dla materiałów odkształczanych plastycznie. Istotny jest fakt, że dla materiałów kruchych wierzchołek pęknięcia jest zawsze ostry, natomiast dla materiałów odkształczanych plastycznie wierzchołek ulega zaokrągleniu, co powoduje zmniejszenie się koncentracji naprężeń oraz zmniejszenie prędkości wzrostu pęknięcia.

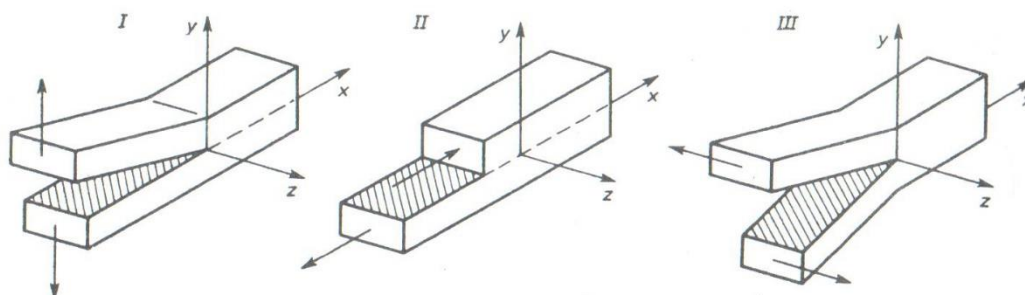
### 2.2.1. Mechanika pękania w zakresie liniowo-sprężystym, pękanie kruche

Mechanika pękania w zakresie liniowo-sprężystym dotyczy materiałów, w których odkształcenia plastyczne w wierzchołku pęknięcia nie występują lub są bardzo małe. Tak jak napisano już wcześniej pęknięcia tego typu rozwijają się gwałtownie i mają charakter kruchy.

W roku 1957 Irwin wprowadził nową wielkość, którą nazwał współczynnikiem intensywności naprężenia K. Wielkość ta opisuje związek pomiędzy polem naprężenia a długością pęknięcia występującym w wierzchołku pęknięcia i jest zapisywany w postaci

$$K = \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.6)$$

Współczynnik ten znalazł zastosowanie w teoretycznych rozważaniach poł naprężeń i przemieszczeń w wierzchołku pęknięcia [58]. Określił trzy podstawowe sposoby przemieszczeń brzegów obciążonych elementów w obszarze pęknięcia (rys. 2.15).



Rys. 2.15. Trzy podstawowe przypadki rozwoju pęknięć [58, 55, 56], gdzie: I) rozwieranie, II) ścinanie wzdłużne, III) ścinanie poprzeczne

Tak jak przedstawiono na rysunku 2.15 Irwin założył, że rozwój pęknięć odbywa się według tych trzech schematów. Pierwszy z nich jest najczęściej spotykanym schematem i dotyczy rozwierania brzegów pod obciążeniem, drugi schemat to ścinanie wzdłużne a trzeci to ścinanie poprzeczne. Dla wyznaczonych schematów rozwoju pęknięć określone zostały współczynniki intensywności naprężenia jako:

- a) dla I schematu – rozwieranie

$$K_I = \sigma_{yy} \sqrt{\pi a} \quad (2.7)$$

- b) dla II schematu – ścinanie wzdłużne

$$K_{II} = \tau_{xy} \sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

- c) dla III schematu – ścinanie poprzeczne

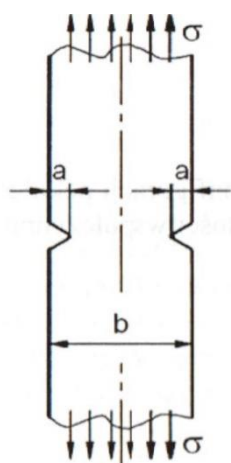
$$K_{III} = \tau_{yz} \sqrt{\pi a} \quad (2.9)$$

Zdając sobie sprawę, że wyliczone współczynniki intensywności naprężenia nie uwzględniają szeregu czynników wpływających na wynik, tj. geometrii próbki, wpływu obróbki cieplnej i rodzaju pęknięć do powyższych wzorów wprowadza się współczynniki

korekcyjny  $M_k$ . Uwzględniając współczynnik korekcyjny przykładowy wzór (dla I schematu obciążenia) można zapisać w postaci

$$K_I = M_k \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.10)$$

Współczynnik korekcyjny  $M_k$  dla różnych wariantów obciążenia, kształtu próbki oraz kształtu pęknięcia można opracować samodzielnie do analizowanego modelu, lub dopasować z wyznaczonych, sprawdzonych i dobrze opisanych w literaturze [55, 56, 59, 60, 61, 62, 63, 64] (rys. 2.16). Wzory na współczynniki intensywności naprężenia  $K$  z uwzględnieniem współczynnika korekcji  $M_k$  jest obecnie najczęściej stosowany do opisu prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych [65, 66, 67, 68, 69, 70, 71].



$$\frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} = 1,12 + 0,20 \left(\frac{a}{b}\right) - 1,20 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1,93 \left(\frac{a}{b}\right)^3$$

$$\left(\frac{a}{b} \leq 0,7\right)$$

Rys. 2.16. Przykładowy wzór opisujący wartość współczynnika  $K_I$  dla próbki rozciąganej z podwójnym karbem [56, 72]

Należy jednak pamiętać o ograniczeniach w stosowaniu tych wzorów do obliczeń, gdyż uzyskiwane wyniki są prawdziwe wyłącznie dla materiałów bez lub z bardzo niewielkimi odkształceniami plastycznymi oraz gdzie naprężenia nominalne  $\sigma_n$  mieszczą się w zakresie  $0,4R_e \leq \sigma_n \leq 0,7R_e$  [55, 56].

### 2.2.2. Mechanika pęknięcia w zakresie sprężysto-plastycznym, pęknięcie ciągłe

Mechanika pęknięcia w zakresie sprężysto-plastycznym znalazła zastosowanie w analizie stanów naprężenia oraz odkształcenia w wierzchołku pęknięcia dla materiałów z dużą strefą odkształceń plastycznych oraz gdy naprężenia nominalne  $\sigma_n$  są większe od

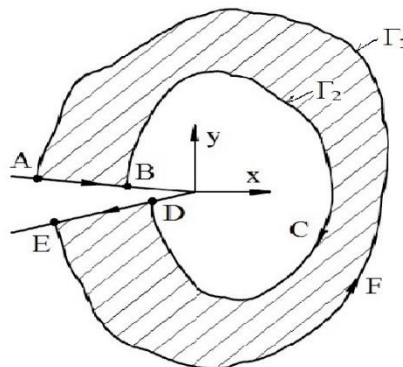
granicy plastyczności  $R_e$  ( $\sigma_n > R_e$ ) [55, 56]. Wielkością użytą do opisu tych badań jest energia dyssypowana w procesie pęknięcia, nazywana całką J. Całka J opisuje szybkość uwalniania energii podczas pęknięcia i jest często stosowana do określenia trwałości zmęczeniowych. W pewnym sensie można powiedzieć, że Całka J jest uniwersalnym parametrem, ponieważ może być stosowana dla materiałów liniowo-sprężystych oraz sprężysto-plastycznych, dając poprawne rozwiązania. Pierwszymi badaczami, którzy zaproponowali pojęcie Całki J do analizy próbek z uszkodzeniami wykonanymi z materiałów sprężysto-plastycznych byli Eshelby [73] oraz niezależnie Czerepanov [74] i Rice [75]. Opracowana całka ma następującą postać

$$J = \int_{\Gamma} \left( W \partial y - \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (2.11)$$

gdzie:

- |  |   |
|--|---|
| $W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$ | - energia odkształcenia przypadająca na jednostkę objętości,  |
| $\Gamma$   | - Krzywa $\Gamma$ obejmuje czoło pęknięcia rozpoczynające się w dolnej jego powierzchni a kończące się w górnej (rys. 2.17),              |
| $\mathbf{T} \equiv \sigma_{ij} n_j$                | - wektor sił powierzchniowych na konturze $\Gamma$ odpowiadający jednostkowemu wektorowi $\mathbf{n}$ (o kosinusach kierunkowych $n_j$ ), |
| $ds$   | - wycinek łuku,   |
| $\mathbf{u}$                                       | - wektor przemieszczenia.   |

Na rysunku 2.17 przedstawiono w sposób schematyczny przykładową ścieżkę całkowania, która może być realizowana w celu obliczania Całki J.



Rys. 2.17. Przykładowa ścieżkę całkowania, która może być realizowana w celu obliczania Całki J [56]

Rozpatrując przypadek przedstawiony na rysunku 2.17 poprzez wyznaczenie drogi (ścieżki) całkowania rozpoczynając od punktu A poprzez B, C, D, E, F oraz kończąc na punkcie A, Całkę J może być zapisana jako

$$J = J_{AB} + J_{\Gamma_2} + J_{DE} + J_{\Gamma_1} = 0. \quad (2.12)$$

Jeżeli założymy, że na powierzchni pęknięcia nie będzie obciążeń można zapisać

$$\partial_y = 0 \quad \text{i} \quad T = 0 \quad (2.13)$$

Z równania (2.11) otrzymuje się

$$J_{AB} = J_{DE} = 0. \quad (2.14)$$

Ostatecznie, po podstawieniu równania (2.14) do równania (2.12) oraz zmianie kierunku ścieżki całkowania  $\Gamma_2$  uzyskuje się

$$J_{\Gamma_1} = J_{\Gamma_2} = J \quad (2.15)$$

Z równania (2.15) wynika, że w przypadku pęknięcia Całka J jest niezależna. Jest to istotna informacja w przypadku obliczeń numerycznych niezależnie czy jest to metoda elementów skończonych, brzegowych, lub innych.

### 2.2.3. Kryteria rozwoju pęknięć zmęczeniowych

Najważniejszym celem mechaniki pęknięcia jest dostarczenie narzędzi, w postaci kryteriów pęknięcia. Kryteria te powinny zawierać określenia, równania wraz ze stałymi materiałowymi, które umożliwią:

- przewidzieć moment inicjacji pęknięcia zmęczeniowego,
- stwierdzić charakter wzrostu pęknięć (stabilny czy niestabilny),
- określić trwałość badanego materiału w konkretnych warunkach wykonania i obciążenia.

Najczęściej spotykanym podziałem kryteriów rozwoju pęknięć jest podział na kryteria:



- naprężeniowe (siłowe),
- odkształceniowe (przemieszczeniowe, deformacyjne),
- energetyczne.

### 2.2.3.1. Kryteria naprężeniowe

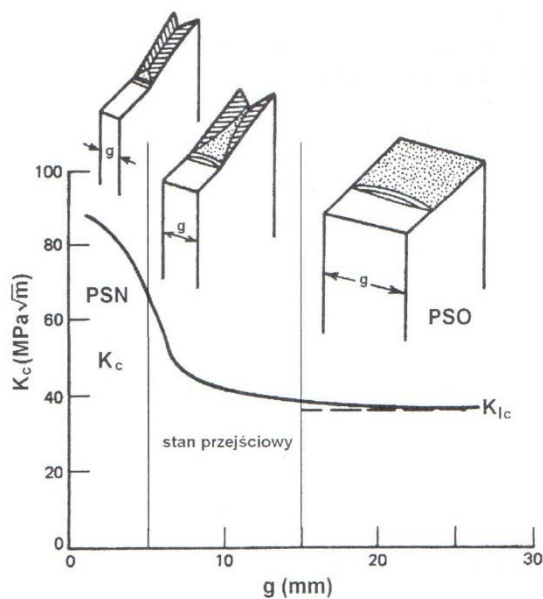
Kryterium naprężeniowe jest najczęściej stosowanym ze wszystkich opracowanych kryteriów. Używa się go do opisu prędkości rozwoju pęknięć oraz wyznaczania trwałości materiałów o charakterystyce liniowo-sprężystej, gdzie naprężenia  $\sigma_n$  w materiale (w wierzchołku pęknięcia) są stosunkowo niewielkie i mieszczą się w zakresie  $0,4R_e \leq \sigma_n \leq 0,7R_e$  oraz tam gdzie nie występują odkształcenia plastyczne. W kryterium naprężeniowym mówimy o współczynniku intensywności naprężenia (WIN) oznaczanym symbolem  $K$ , który jest funkcją obciążenia, długości pęknięcia a także dodatkowych parametrów korekcyjnych wynikających między innymi z geometrii. Zapis współczynnika intensywności naprężenia przedstawiają wzory (2.7, 2.8, 2.9). Dla materiałów liniowo-sprężystych, zgodnie z teorią Griffitha, gdy całkowita energia rozwoju pęknięcia osiągnie wartość maksymalną, odpowiadającą krytycznej długości pęknięcia  $a_{kr}$  oraz wartość naprężenia krytycznego  $\sigma_{kr}$ , to dla tego punktu wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K$  jest równa wartości krytycznej  $K_c$  (2.16).

$$K_c = \sigma_{kr} \sqrt{\pi a_{kr}} \quad (2.16)$$

Wartości  $K_c$  wyznacza się dla wszystkich trzech sposobów rozwoju pęknięć, tzn. dla:

- rozrywania (I) wartość przyjmuje oznaczenie  $K_{Ic}$ ,
- ścinania wzdłużnego (II) wartość przyjmuje oznaczenie  $K_{IIc}$ ,
- ścinania poprzecznego (III) wartość przyjmuje oznaczenie  $K_{IIIc}$ .

Na rysunku 2.18 przedstawiono zależności krytycznej wartości współczynnika naprężenia  $K_c$  w odniesieniu do grubości próbki, dla pierwszego sposobu rozwoju pęknięć zmęczeniowych.



Rys. 2.18. Zależność wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężenia  $K_c$  od grubości materiału [56]

Można zauważyć, że dla płaskiego stanu naprężenia (PSN), w której grubość materiału jest niewielka i wynosi maksymalnie 5 mm grubości, krytyczna wartość  $K_c$  zmienia się w sposób istotny. Natomiast w płaskim stanie odkształcenia (PSO), gdzie grubość materiału jest znaczna i zawiera się pomiędzy 15 a 30 mm, krytyczna wartość  $K_c$  zmienia się nieznacznie. Ze względu na małą zmienność wartości  $K_c$  z zakresu PSO oraz nieznaczne odkształcenia plastyczne w obszarze pęknięcia, przyjmuje się ją jako stałą materiałową. Stała ta określona jest dla pierwszego sposobu rozwoju pęknięć I, jest miarą odporności na pękanie dla danego materiału oraz może być stosowana, jako kryterium naprężeniowe w badaniach statycznych, w których przybiera postać

$$K_I \leq K_{Ic} \quad (2.17)$$

W badaniach zmęczeniowych wartość współczynnika intensywności naprężenia określa się, jako zakres współczynnika intensywności naprężenia, wtedy właściwy jest zapis

$$\Delta K_I \leq K_{Ic} \quad (2.18)$$

Opisane powyżej kryterium naprężeniowe daje prawidłowe wyniki w pierwszym oraz znacznej części drugiego etapu rozwoju pęknięć zmęczeniowych, w obszarze proporcjonalnego wzrostu wartości współczynnika intensywności naprężenia do

wielkości pęknięcia. Wtedy, dla materiałów o charakterystyce liniowo-sprężystej nie obserwuje się odkształceń plastycznych. Natomiast kryterium to nie daje prawidłowych wyników pod koniec drugiego etapu oraz w trzecim etapie rozwoju pęknięć, ze względu na niekontrolowany wzrost pęknięć oraz duże odkształcenia plastyczne. Niezależnie od swoich ograniczeń kryterium to często jest stosowane w praktyce [55, 56, 69, 70, 76, 77].

### 2.2.3.2. Kryteria odkształceniowe

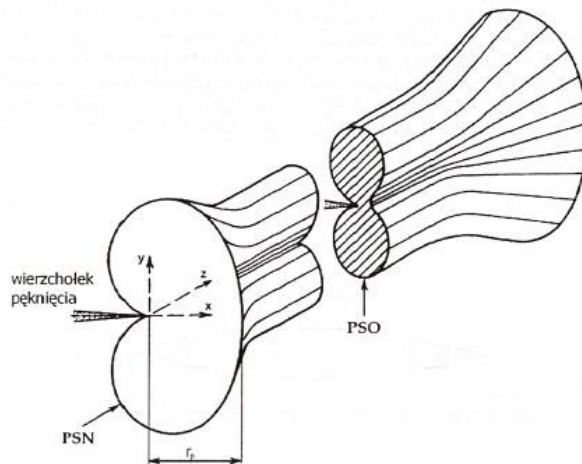
Kryterium odkształceniowe obrazuje zachowanie się większości materiałów stosowanych w rzeczywistych konstrukcjach, gdzie w wierzchołkach rozwijających się pęknięć tworzą się strefy odkształceń plastycznych. Prekursorem zajmującym się badaniami wielkości obszaru strefy plastycznej był Irwin, który to w roku 1960 opublikował pracę stanowiącą podstawy teoretyczne służące do opisu zmiany kształtu i wielkości stref plastycznych powiązanych z grubością badanego materiału [78]. Sformułował wyrażenia na promień stref plastycznych  $r_p$  przed wierzchołkiem pęknięcia dla pierwszego sposobu obciążenia (dla I schematu obciążenia) i płaskiego stanu naprężenia (PSN) w postaci

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2, \quad (2.19)$$

oraz dla płaskiego stanu odkształcenia (PSO) w postaci

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2. \quad (2.20)$$

Na rysunku 2.19 przedstawiono graficznie opisane przez Irwina zależności stref plastycznych od grubości materiału.

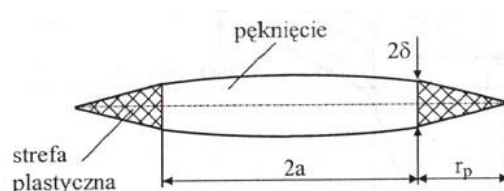


Rys. 2.19. Zmiany kształtu i wielkości stref odkształceń plastycznych w wierzchołku pęknięcia wraz z grubością materiału, gdzie: PSN – płaski stan naprężenia, PSO – płaski stan odkształcenia,  $r_p$  – promień strefy plastycznej [55, 56, 78]

Irwin stwierdził również, że strefa odkształcenia plastycznego oraz samo pęknięcie wpływa na trwałość materiału. Zaproponował wprowadzenie korekty do obliczeń, która polegała na zsumowaniu długości pęknięcia oraz wielkości promienia strefy odkształcenia plastycznego  $r_p$ . W roku 1961 A. A. Wellsa [79] opublikował pracę, w której zaproponował nową wielkość oznaczoną jako  $\delta$  opisującą rozwarście wierzchołka pęknięcia (kryterium CTOD). Następnie badacz Dugdale sformułował wyrażenie łączące promień strefy odkształcenia plastycznego  $r_p$  z długością pęknięcia  $a$  w postaci

$$\delta = \frac{8R_e a}{\pi E} \ln \sec \left( \frac{\pi \sigma_n}{2R_e} \right). \quad (2.21)$$

Na rysunku 2.20 pokazano model Dugdale'a.



Rys. 2.20. Strefy odkształceń plastycznych w wierzchołkach pęknięcia według modelu Dugdale'a [55, 56]

Przy założeniu, że wartość naprężenia nominalnego jest mniejsza od  $0,4R_e$  Dugdale, po przekształceniu zaproponował wzór na rozwarście wierzchołka pęknięcia w postaci

$$\delta = \frac{8R_e a}{\pi E} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \sigma_n}{2R_e} \right)^2 \right] = \frac{\pi \sigma_n^2 a}{ER_e} = \frac{K^2}{ER_e}. \quad (2.22)$$

Dla praktycznych zastosowań kryterium CTOD daje prawidłowe wyniki gdy naprężenie nominalne  $\sigma_n$  jest mniejsze od granicy plastyczności  $R_e$ . Dodatkowym ograniczeniem stosowania kryterium CTOD jest stosowanie go do materiałów prawie kruchych, gdyż pojawiają się problemy z pomiarem rozwarcia wierzchołka.

### 2.2.3.3. Kryteria energetyczne

Kryterium energetyczne, ze względu na swoje uniwersalne podejście do opisu stanów energetycznych w strefach wierzchołka pęknięcia może być stosowane w większości przypadków obciążenia oraz szerokiego spektrum badanych materiałów. Poprzednio opisane kryteria (naprężeniowe oraz odkształceniowe), w badaniach wzrostu pęknięć dają poprawne wyniki w zakresie naprężeń nominalnych  $\sigma_n$  maksymalnie do  $0,7R_e$  (naprężeniowe) i  $R_e$  (odkształceniowe), gdzie w przypadku kryterium energetycznego nie ma takiego ograniczenia. Kryterium energetyczne najczęściej opisywane jest za pomocą całki J sformułowanej między innymi przez Rice'a [75, 73, 74] w postaci (2.11) oraz przez gęstość energii odkształcenia [80]. Całka J może być z powodzeniem stosowana dla materiałów liniowo-sprężystych oraz sprężysto-plastycznych, gdzie występują duże odkształcenia plastyczne. Kryterium energetyczne dla badań zmęczeniowych i dla pierwszego sposobu (schematu) obciążenia można zapisać jako

$$\Delta J_I \leq J_c, \quad (2.23)$$

oraz dla mieszanego sposobu obciążenia (np. I i III) kryterium przyjmuje postać

$$\Delta J_{eq} \leq J_c \quad (2.24)$$

gdzie  $J_c$  jest krytyczną wartością parametru J [81, 82].

Gęstość energii odkształcenia badań i opisał Sih [80]. W swojej pracy przedstawił wyniki badań dla różnych materiałów poddanych mieszanym sposobom obciążenia I + III i zaproponował wyrażenie na gęstość energii odkształcenia w postaci

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_IK_{II} + a_{22}K_{II}^2 \quad (2.25)$$

gdzie współczynniki  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{22}$  wynoszą:

$$a_{11} = \frac{1}{16\pi E \cos \alpha} [(3 - 4\nu - \cos \varphi)(1 + \cos \varphi)], \quad (2.26)$$

$$a_{12} = \frac{1}{8\pi E \cos \alpha} [\sin \varphi (\cos \varphi - 1 + 2\nu)], \quad (2.27)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\pi E \cos \alpha} [4(1 - \nu)(1 - \cos \varphi) + (3 \cos \varphi - 1)(1 + \cos \varphi)]. \quad (2.28)$$

Rozumek i Macha w pracy [56] przedstawili wyniki badań doświadczalnych rozwoju pęknięć zmęczeniowych dla stopu aluminium PA6 oraz stali w gatunku 18G2A i FeP04, które stanowiły potwierdzenie słuszności zaproponowanego równania

$$\left(\frac{\Delta J_I}{J_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J_{II}}{J_{IIc}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J_{III}}{J_{IIIc}}\right)^2 = 1 \quad (2.29)$$

gdzie:  $J_{Ic}$ ,  $J_{IIc}$ ,  $J_{IIIc}$  – krytyczne wartości całki  $J$  odpowiednio dla I, II i III sposobu obciążenia. Przedstawione oraz zweryfikowane kryterium energetyczne (2.29) ma zastosowanie dla materiałów sprężysto-plastycznych oraz I, II i III sposobu obciążenia. Obliczeniami zakresu Całki  $J$  dla I i II sposobu obciążenia z zastosowaniem metody elementów skończonych zajmowali się autorzy pracy [83]. W wyniku badań i obliczeń przedstawi równanie w postaci

$$\Delta J_{I,II} = \int_{\Gamma} \int_0^{\Delta \varepsilon_{i,j}^{I,II}} \Delta \sigma_{i,j}^{I,II} d\Delta \varepsilon_{i,j}^{I,II} dy - \int_{\Gamma} \sigma_{i,j}^{I,II} n_j \frac{\partial(\Delta u_i^{I,II})}{\partial x} ds, \quad (2.30)$$

gdzie:  $\Delta \sigma_{ij}^{I,II} = \sigma_{ij}^{I,II} - \sigma_{ij}^{0,I,II}$ ,  $\Delta \varepsilon_{ij}^{I,II} = \varepsilon_{ij}^{I,II} - \varepsilon_{ij}^{0,I,II}$ ,  $\Delta u_i^{I,II} = u_i^{I,II} - u_i^{0,I,II}$ .

Po podstawieniu wzorów do programu metody elementów skończonych (MES) i przeprowadzeniu obliczeń numerycznych uzyskano porównywalne wyniki z wynikami obliczeń analitycznych.

Wyznaczeniem kryterium energetycznego do obliczeń zakresu ekwiwalentnego parametru  $\Delta J_{eq}$  dla I+II+III sposobu obciążenia zajmował się Rozumek [84, 85, 86]. Badania prowadzone były dla materiałów sprężysto – plastycznych. Stwierdził, że w przypadku badań cyklicznych zakres  $\Delta J_{eq}$  jest równy sumie poszczególnych parametrów dla I, II i III sposobu obciążenia

$$\Delta J_{eq} = \Delta J_I + \Delta J_{II} + \Delta J_{III} \quad (2.31)$$

gdzie:

$$\Delta J_I = (1 - \nu^2) \frac{\Delta K_I^2}{E} + \pi Y_I^2 \left( \frac{\Delta \sigma \Delta \varepsilon_p}{\sqrt{n'}} \right) a, \quad (2.32)$$

$$\Delta J_{II} = (1 - \nu^2) \frac{\Delta K_{II}^2}{E} + \pi Y_{II}^2 \left( \frac{\Delta \tau \Delta \gamma_p}{\sqrt{n'}} \right) a, \quad (2.33)$$

$$\Delta J_{III} = (1 - \nu) \frac{\Delta K_{III}^2}{E} + \pi Y_{III}^2 \left( \frac{\Delta \tau \Delta \gamma_p}{\sqrt{n'}} \right) a, \quad (2.34)$$

$\nu$  – współczynnik Poissona,

$\Delta K_I, \Delta K_{II}, \Delta K_{III}$  – zakres współczynnika intensywności naprężenia odpowiednio dla I, II i III sposobu obciążenia,

$E$  – moduł Younga,

$Y_I, Y_{II}, Y_{III}$  – współczynniki korekcyjne dla I, II i III sposobu obciążenia,

$\Delta \sigma, \Delta \tau$  – zakres naprężeń dla I, II i III sposobu obciążenia w dnie karbu,

$\Delta \varepsilon_p, \Delta \gamma_p$  – zakres odkształceń plastycznych dla I, II i III sposobu pęknięcia w dnie karbu,

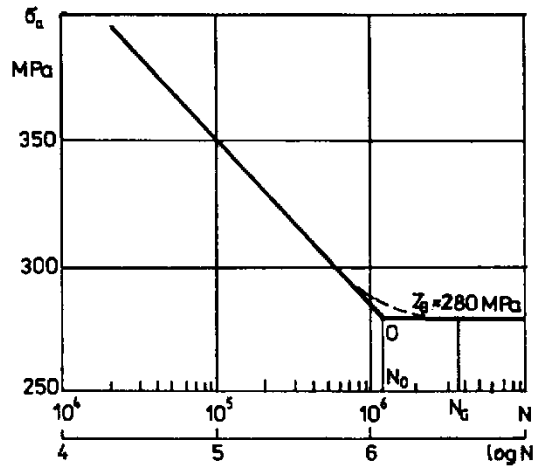
$a$  – długość pęknięcia.

Wyniki doświadczenia zostały zweryfikowane z wynikami otrzymanymi z obliczeń numerycznych dając podobne wyniki.

#### 2.2.4. Opis prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych

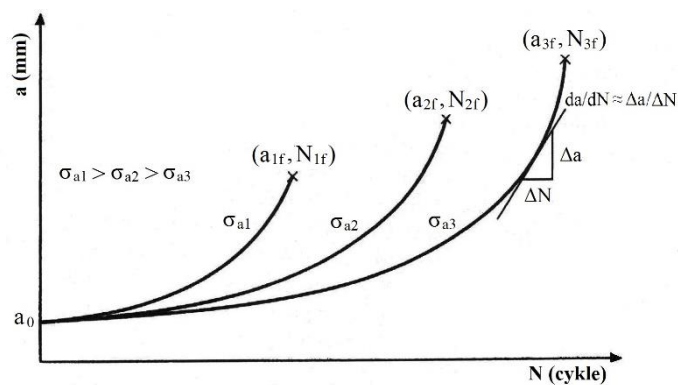
W rzeczywistych konstrukcjach często występują złożone warunki obciążenia, które mają przeważnie charakter cykliczny powodując zmiany zmęczeniowe materiału. Ma to ogromny wpływ na trwałość poszczególnych elementów konstrukcji. Powtarzające się cykle obciążenia ujawniają w materiale zmiany na poziomie jego struktury pochodzące z niedoskonałości materiałowych oraz zmiany w ciągłości materiału powstające np. w wyniku działania karbu. Niezależnie od źródła inicjacji pęknięć zmęczeniowych istotne jest, aby możliwe było oszacowanie trwałości konstrukcji przy

konkretnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, tzn. określenie inicjacji oraz prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych. Jednym z pierwszych opisujących zjawiska zmęczenia był Wöhler, który przedstawił wykres amplitudy cykli naprężenia i liczby cykli do zniszczenia próbki ( $\sigma_a - \log N$ ), zwanym wykresem Wöhlera (rys. 2.21).



Rys. 2.21. Wykres zmęczeniowy Wöhlera [55]

Natomiast wzrost pęknięć zmęczeniowych można przedstawić na wykresie przyrostu długości pęknięcia  $a$  w funkcji liczby cykli obciążenia  $N$  (rys. 2.22).



Rys. 2.22. Wykres długości pęknięć  $a$  w funkcji liczby cykli obciążeń  $N$  dla różnych poziomów amplitud naprężenia  $\sigma_a$  [55, 102]

Na rys. 2.22 pokazano przykładowe wzrosty długości pęknięć zmęczeniowych dla trzech różnych wartości amplitud naprężenia  $\sigma_{a1} > \sigma_{a2} > \sigma_{a3}$ . Wzrost długości pęknięcia zależy głównie od użytego materiału jak również od zakresu zmian naprężenia  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  występujących w badanym elemencie. Prędkość pęknięcia wyrażona została, jako przyrost



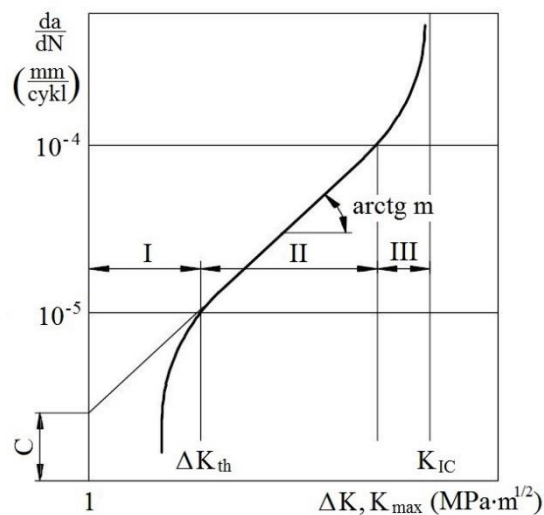
długości pęknięcia  $da$  w ciągu jednego cyklu obciążenia  $dN$ . Jednostką prędkości pęknięcia jest  $mm/cykl$  lub  $m/cykl$ . Najogólniej prędkość pęknięcia można przedstawić, jako funkcję naprężenia ( $\sigma$ ), długość pęknięcia ( $a$ ), stałej materiałowej ( $C$ ) oraz współczynnika asymetrii cyklu ( $R$ ) w postaci

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma, a, C, R), \quad (2.35)$$

gdzie:

- $\sigma$  – naprężenie,
- $a$  – długość pęknięcia,
- $C$  – stała materiałowa,
- $R$  – współczynnik asymetrii cyklu.

Do przedstawienia wyników prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego najczęściej stosuje się wykres pokazany na rysunku 2.23, na którym wykreślono krzywą  $da/dN$  w funkcji zakresu współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K$ .



Rys. 2.22. Wykres krzywej prędkości pęknięcia w układzie podwójnie logarytmicznym [55, 56, 102]

Na wykresie tym oprócz krzywej widoczne są trzy zakresy: I, II, III.

- zakres I obejmuje małe wartości zakresu współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K$  aż do osiągnięcia wartości granicznej  $\Delta K_{th}$  (jest to wartość, poniżej której pęknięcia nie rozwijają się). Powyżej wartości granicznej do końca pierwszego zakresu pojawiają się

krótkie pęknięcia o wymiarach do 0,7 mm. Jest to tzw. przedział rozwoju krótkich pęknięć.

- zakres II to obszar, w którym prędkość pęknięcia w funkcji zakresu  $\Delta K$  jest liniowa.
- zakres III to obszar, w którym występują silne strefy odkształceń plastycznych a prędkość wzrostu pęknięcia następuje w sposób niekontrolowany. Wartość  $K_{IC}$  jest krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężenia, w którym następuje zniszczenie materiału.

Suma tych trzech zakresów I, II i III określa trwałość materiału w całym zakresie rozwoju pęknięć zmęczeniowych [56].

Na przestrzeni lat opracowanych zostało wiele modeli służących do opisu prędkości pęknięcia. W zależności od rodzaju przyjętych parametrów do opisu prędkości zmęczeniowej modele te można podzielić na:

- naprężeniowe, opisane przez parametr  $K$  lub jego zakres  $\Delta K$ ,
- odkształceniowe, opisane przez parametr  $\varepsilon$  lub jego zakres  $\Delta\varepsilon$ ,
- energetyczne, opisane przez parametr  $J$  lub jego zakres  $\Delta J$ .

#### 2.2.4.1. Modele naprężeniowe

Pierwszym, znaczącym badaczem był Stanley [87], który to w 1952 r. zaprezentował równanie służące do opisu prędkości pęknięcia w postaci

$$\frac{da}{dN} = C\sigma_a^n a \quad (2.36)$$

gdzie:

$C$  i  $n$  – współczynniki wyznaczone doświadczalnie,

$\sigma_a$  – amplituda naprężenia,

$a$  – długość pęknięcia,

Przełomowym odkryciem w opisie prędkości pęknięcia było opracowane przez Parisa [88] równanie, w którym prędkość pęknięcia powiązał on ze współczynnikiem intensywności naprężenia  $K$ . Główną myślą tej koncepcji było założenie, że o rozwoju pęknięcia decyduje zmiana naprężeń zlokalizowana na czelu rozwijającego się pęknięcia, natomiast współczynnik  $K$  stanowi opis efektu działania obciążenia i pola naprężeń w obszarze tego

czoła. W równaniu Parisa przyrost pęknięcia jest funkcją zakresu współczynnika intensywności naprężenia

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.37)$$

gdzie: C i m – współczynniki wyznaczone doświadczalnie.

Wzór zaproponowany przez Parisa daje prawidłowe wyniki dla drugiego liniowego zakresu krzywej prędkości pęknięcia, natomiast dla pierwszego (do wartości progowej  $K_{th}$ ) oraz trzeciego zakresu (do wartości  $K_c$ ) wyniki są znacznie rozbieżne z wynikami otrzymanymi w badaniach doświadczalnych. Niezależnie od ograniczeń stosowania równania Parisa jest często stosowane w pracach naukowych. Rozwinięciem równania Parisa było rozwiązanie zaproponowane przez Formana [89]. Model ten uwzględnia dodatkowo współczynnik asymetrii cyklu R oraz krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K_c$ . Wyniki uzyskane z użycia równania Formana skutecznie opisują drugi i trzeci zakres krzywej prędkości pęknięcia. Równanie to przyjmuje postać

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^m}{(1 - R)K_c - \Delta K} \quad (2.38)$$

Elber [90] w swojej pracy dokonał kolejnej modyfikacji równania Parisa, która polegała na uwzględnieniu zjawiska zamykania i otwierania się pęknięcia na skutek ściskających i rozciągających naprężeń w strefie wierzchołka pęknięcia. Zaproponował on nowy współczynnik, określony jako efektywny współczynnik intensywności naprężenia

$$\Delta K_{eff} = U_{c1}(\Delta K) \quad (2.39)$$

gdzie:

$$U_{c1} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{op}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}}, \quad (2.40)$$

$\sigma_{op}$  – naprężenie otwarcia na czole pęknięcia.

Ostatecznie wzór Parisa z uwzględnieniem równania Elbera można zapisać w postaci

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad (2.41)$$

Pierwszym badaczem, który przedstawił rozwiązanie opisu całej krzywej prędkości pęknięcia na podstawie parametru K był Priddle [91]. Zaproponował równanie w postaci

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_c - K_{max}} \right)^m \quad (2.42)$$

Opisem całej krzywej prędkości pęknięcia zajmowało się wielu naukowców, którzy opracowali skuteczne równania. Warto tutaj wymienić prace między innymi McEvilya [92] oraz Pearsona [93].

#### 2.2.4.2. Modele odkształceniowe

Jednym z pierwszych badaczy, którzy zajmowali się wpływem odkształceń plastycznych na prędkość pęknięcia był Manson [94], który zaprezentował równanie opisujące prędkość wzrostu pęknięcia w postaci

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta\varepsilon_p \sqrt{a})^n \quad (2.43)$$

gdzie  $\Delta\varepsilon_p$  – zakres odkształceń plastycznych na czole pęknięcia.

W kolejnych pracach Tomkins [95] przedstawił równanie służące do opisu prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w postaci

$$\frac{da}{dN} = (\Delta\varepsilon_p + b_1 \Delta\varepsilon_s) \cdot r_p \quad (2.44)$$

gdzie:

$$b_1 \approx 1/6,$$

$\Delta\varepsilon_p$  – zakres odkształceń plastycznych,

$\Delta\varepsilon_s$  – zakres odkształceń sprężystych,

$r_p$  – wielkość strefy odkształcenia plastycznego.

Równanie zaproponowane przez Tomkinsa zostało zweryfikowane przez Wenera, który w pracy [96] potwierdził jego przydatność.

### 2.2.4.3. Modele energetyczne

Autorzy Dowling i Begley w pracy [97] zaproponowali opis prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w ujęciu energetycznym opartym na parametrze zakresu J ( $\Delta J$ ) w postaci

$$\frac{da}{dN} = B(\Delta J)^n \quad (2.45)$$

gdzie:

$\Delta J$  – zakres parametru J,

B i n – współczynniki wyznaczone doświadczalnie.

Równanie Dowlinga i Begleya zostało zweryfikowane do opisu II zakresu krzywej prędkości wzrostu pęknięć w funkcji  $\Delta J$ , dla materiału sprężysto - plastycznego. Wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi z badań doświadczalnych. Stwierdzono, że dobra zgodność z prezentowanym modelem występuje w przypadku kontrolowanego przemieszczenia, natomiast w przypadku kontrolowanego obciążenia różnice w wynikach uzyskiwano większe. W pracach [98, 99, 100] przedstawiono wyniki szeregu porównań obliczeń zaproponowanym modelem z wynikami badań doświadczalnych.

W pracy [101, 102] Rozumek i Gasiak zaproponowali modyfikację równania Formana i przedstawili energetyczny nieliniowy model do opisu drugiego i trzeciego zakresu krzywej prędkości wzrostu pęknięcia, w postaci

$$\frac{da}{dN} = \frac{B(\Delta J)^n}{(1 - R)^m J_{Ic} - \Delta J} \quad (2.46)$$

gdzie:

B i n – współczynniki wyznaczone doświadczalnie,

$J_{Ic}$  – wartość krytyczna parametru J,

R – współczynnik asymetrii cyklu,

$$\Delta J = J_{\max} - J_{\min} - \text{zakres całki } J.$$

Prezentowany model został sprawdzony dla dwóch stali konstrukcyjnych przy cyklicznym rozciąganiu i zginaniu [103, 104]. Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych są zbieżne z wynikami obliczeń za pomocą równania (2.46).

### **2.2.5. Wpływ karbu geometrycznego i strukturalnego na rozwój pęknięć zmęczeniowych**

W przedmiocie wytrzymałość materiału karbem nazywamy wszelkiego rodzaju nieciągłości materiałowe, które występują w poprzecznym przekroju badanego elementu. W miejscach tych zazwyczaj następują zmiany rozkładu naprężeń oraz wzrost ich wartości w stosunku do nominalnych naprężeń obliczeniowych. Mogą to być różnego rodzaju: odsadzenia, rowki, otwory, gwinty, wycięcia, nacięcia, gwałtowne zmiany wymiarów, złącze spawane, obszar miejscowych obróbek cieplnych, itp. Działanie karbu istotnie wpływa na obniżenie trwałości pracujących elementów [55, 105, 106, 107]. Ze względów konstrukcyjnych karby te można podzielić na trzy grupy:

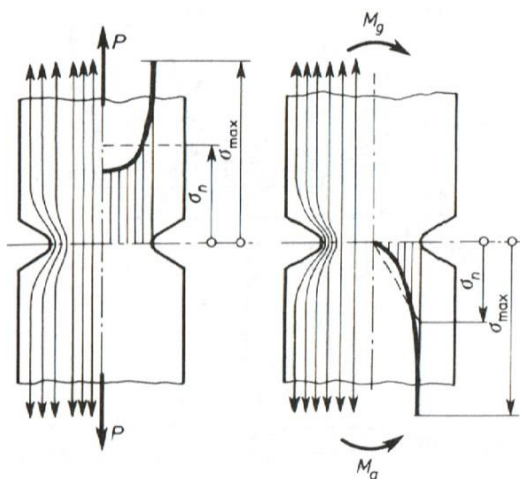
- karby geometryczne,
- karby strukturalne,
- karby złożone, które uwzględniają jednocześnie karb geometryczny i karb strukturalny.

#### **2.2.5.1. Wpływ karbu geometrycznego na rozwój pęknięć zmęczeniowych**

Charakterystycznym zagadnieniem w obszarach występowania karbu geometrycznego, w przypadku prostych stanów obciążenia, na powierzchni elementu w dnie karbu jest występowanie złożonego stanu naprężenia. Często, w dnie karbu naprężenia te zdecydowanie przekraczają założone dla konstrukcji naprężenia nominalne  $\sigma_n$ . Działanie karbu można przedstawić, jako miejscowe zagęszczenie linii sił. Na rysunku 2.23 pokazano działanie karbu geometrycznego dla próbek rozciąganych oraz zginanych. Lokalne skupienia strumienia sił na skutek zmiany przebiegu powodują, że w miejscach tych mniejszy przekrój materiału (w strefie karbu) musi przenieść cały strumień sił - występuje spiętrzenie naprężeń.

a)

b)



Rys. 2.23. Działanie karbu geometrycznego [55]: a) rozciąganie, b) zginanie

Na dnie karbu geometrycznego naprężenia osiągają wartości największe (rys. 2.23) wynoszące  $\sigma_{\max}$ . Stosunek wartości naprężeń  $\sigma_{\max}$  i  $\sigma_n$  jest miarą spiętrzenia naprężeń określoną jako współczynnik kształtu lub teoretyczny współczynnik spiętrzenia naprężeń  $K_t$  ( $\alpha_k$ ). Współczynnik ten nazywany jest również teoretycznym współczynnikiem działania karbu. Po raz pierwszy przedstawiony przez Neubera [108] w postaci:

- dla spiętrzenia naprężeń

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (2.47)$$

- dla spiętrzenia odkształceń

$$K_t = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_n} \quad (2.48)$$

gdzie:

$\sigma_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\max}$  – maksymalne naprężenia oraz odkształcenia w dnie karbu,

$\sigma_n$ ,  $\varepsilon_n$  – nominalne naprężenia oraz odkształcenia w dnie karbu.

Zgodnie z teorią Neubera współczynnik  $K_t$  może być też wyrażony, jako średnia geometryczna wyznaczonych współczynników dla spiętrzenia naprężeń oraz odkształceń

$$K_t = \sqrt{K_\sigma K_\varepsilon} \quad (2.49)$$

Współczynnik  $K_t$  ma swoje ograniczenia, które zawężają obliczenia do zakresu liniowo-sprężystego. W rzeczywistych konstrukcjach, gdzie elementy podlegają obciążeniom zmęczeniowym oraz wszędzie tam, gdzie występują strefy odkształceń plastycznych stosowany jest współczynnik działania karbu  $K_f$  ( $\beta_k$ ). Współczynnik ten nazywany również współczynnikiem karbu lub efektywnym współczynnikiem sprężenia naprężeń i określa wielkość zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej na skutek działania karbu, a obliczany jest na podstawie stosunku naprężenia próbki gładkiej  $\sigma_{sm}$  do naprężenia próbki z karbem  $\sigma_{not}$

$$K_f = \frac{\sigma_{sm}}{\sigma_{not}} \quad (2.50)$$

gdzie:

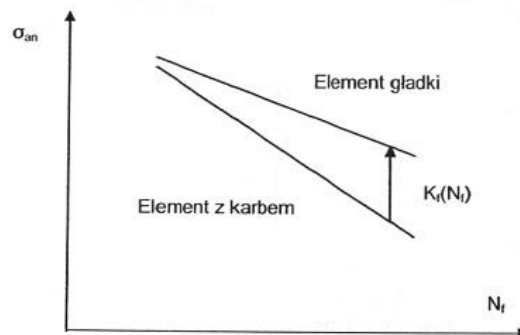
$\sigma_{sm}$  – naprężenia w elemencie gładkim,

$\sigma_{not}$  – naprężenia w elemencie z karbem.

Najczęściej zmęczeniowy współczynnik karbu określany jest dla trwałości  $10^6$  cykli, przybiera wtedy postać [106]

$$K_f(N_f) = K_f(10^6) \left( \frac{N_f}{10^6} \right)^{\frac{\log[K_f(10^6)]}{3}} \quad (2.51)$$

Graficzne zobrazowanie działania zmęczeniowego współczynnika działania karbu  $K_f$  pokazano na rysunku 2.24.



Rys. 2.24. Graficzne przedstawienie działania współczynnika  $K_f$  [106]



Ciekawą pracę na temat karbów geometrycznych przedstawił Wahab [111], gdzie opisał wpływ różnych niedoskonałości spoin (podtopienie, wtrącenie, przyklejenie, pory, pęcherze, itp.) na trwałość zmęczeniową próbek.

#### **2.2.5.2. Wpływ karbu strukturalnego na rozwój pęknięć zmęczeniowych**

W przypadku karbów strukturalnych, oprócz zmiany struktury, pojawia się dodatkowo niebezpieczeństwo występowania naprężeń własnych. Karb strukturalny występuje w elementach poddanych działaniu temperatury np.: w elementach spawanych lub poddanych obróbce cieplnej, jak również w elementach kutych, w których własności wytrzymałościowe w różnych kierunkach są znacząco inne. Badaniami wpływu struktury na trwałości elementów zajmują się badacze, gdyż wpływ na trwałość działa w różnych kierunkach tzn. w jednym przypadku wytrzymałość zmęczeniowa ulega poprawie, natomiast w innych pogorszeniu. Autorzy pracy [109] badali wpływ karbów geometrycznych oraz strukturalnych na trwałość zmęczeniową próbek wykonanych ze stali S355. Badano następujące próbki: gładkie (z litego materiału), próbki spawane gładkie (zeszlifowane lica spoin) oraz próbki z karbami geometrycznymi litymi w formie rowków i spawanymi ze spoinami. Stwierdzili, że największy wpływ na trwałość próbek miał karb geometryczny, natomiast próbki z karbem strukturalnym (spawane i szlifowane lica spoin) wykazywały nieznaczne różnice w porównaniu do próbek litych.

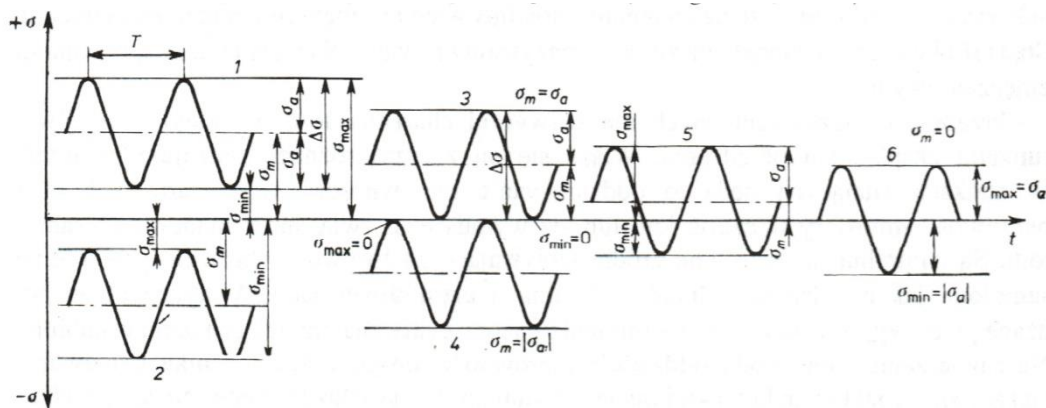
#### **2.2.5.3. Wpływ karbu złożonego na rozwój pęknięć zmęczeniowych**

Karby złożone występują w wszystkich złożonych konstrukcjach, w których spotykamy połączenia spawane czy skręcane oraz elementy konstrukcji mają skomplikowane kształty. Jednak w warunkach laboratoryjnych mówimy o karbie złożonym wtedy, gdy do karbu geometrycznego dodamy karb strukturalny. Jedną z najbardziej znanych oraz kompleksowych prac dotyczących obliczeń trwałości zmęczeniowych elementów z karbami złożonymi jest praca Hobbachera [110]. Autor przedstawił równania korekcyjne dotyczące karbu strukturalnego jak i geometrycznego dla połączeń spawanych z uwzględnieniem różnych sposobów obciążenia. Następna praca uwzględniająca karby złożone to praca Łagody [106]. Następnie praca Łagody i Biłousa [109] oraz Biłousa, Rozumka i Łagody [107]. Wahab w pracy [111] badał wpływ

zmian strukturalnych wywołanych przez nagniatanie powierzchni spoin oraz strefy wpływu ciepła na trwałości zmęczeniowe.

### 2.2.6. Wpływ współczynnika asymetrii cyklu na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych

Badania naukowe prowadzi się w celu poznania i opisanie zagadnień z życia. Tak jak już napisano wcześniej na rzeczywiste konstrukcje oddziałują siły, które zazwyczaj mają zmienny charakter. Naukowcy zajmujący się trwałością zmęczeniową w różny sposób modelują te siły (obciążenia). Najprostszym założeniem jest przyjęcie, że obciążenia zmienne mają przebieg sinusoidalny. Obciążenie takie przyjęto za podstawę wyznaczania zmęczeniowych własności materiałów i elementów konstrukcyjnych [56]. Na rysunku 2.25 przedstawiono przebiegi obciążeń sinusoidalnie zmiennych.



Rys. 2.25. Przebiegi obciążeń sinusoidalnie zmiennych [56]

W cyklach tych można wyróżnić charakteryzujące wielkości oraz zakresy obciążeń w czasie tj.:

- naprężenie maksymalne cyklu  $\sigma_{\max}$ ,
- naprężenie minimalne cyklu  $\sigma_{\min}$ ,
- amplituda naprężenia cyklu  $\sigma_a$ ,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.51)$$

- naprężenie średnie cyklu  $\sigma_m$ ,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.52)$$

- okres zmian cyklu T lub jego odwrotność – częstotliwość f.
- zakres zmian naprężeń  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}. \quad (2.53)$$

Jednym z kluczowych parametrów wykorzystywanych w badaniach zmęczeniowych jest właśnie współczynnik asymetrii cyklu oznaczony symbolem R, który przedstawia się w sposób następujący

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (2.54)$$

Współczynnik asymetrii cyklu opisuje niesymetryczność cyklu obciążenia. Jest tylko jeden przypadek, gdzie cykl jest symetryczny i dotyczy to cyklu wahadłowego, w którym  $\sigma_{\max} = |\sigma_{\min}| = \sigma_a$ . Zastosowanie współczynnika R jest bardzo szerokie i niezależne od właściwości materiału badanego. Dlatego jest tak często stosowany w badaniach naukowych i obliczeniach trwałości zmęczeniowej. Jego wpływ na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych jest bardzo różny, z reguły jednak współczynnik ten będący stosunkiem naprężeń minimalnych do maksymalnych zależy od ich wartości, wartości dodatkowego obciążenia średniego oraz częstotliwości cyklu [56, 112, 113, 114, 115, 116, 117]. Gasiak i Grzelak [118, 119, 145] w swoich pracach dowiedli, że w zakresie niskich wartości dodatkowego obciążenia średniego prędkość pęknięć zmęczeniowych maleje, dla poziomów średnich prędkość stabilizuje się, natomiast dla wysokich wartości obciążenia średniego prędkość propagacji pęknięć zazwyczaj znacznie wzrasta. Daniewicz i Bloom w pracy [120] przedstawili wyniki badań doświadczalnych prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w płaskim stanie naprężenia przy stałej amplitudzie dla próbek z karbem krawędziowym. Próbkę poddano rozciąganiu i zginaniu dla współczynnika asymetrii cyklu wynoszącego  $R = 0,5; 0; -1$  i  $-2$ . Na podstawie tych badań zauważono, że typ obciążenia, geometria, i długość pęknięcia mają duży wpływ na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych. W dalszej części pracy autorzy zaproponowali model do opisu prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych, który daje dobrą zgodność z wynikami badań doświadczalnych przy rozciąganiu i zginaniu dla

różnych wartości współczynnika asymetrii cyklu. W kolejnych pracach Bukowski i Kłysz [121] również zajmowali się badaniami wpływ różnych wartości współczynników asymetrii cyklu na rozwój pęknięć zmęczeniowych. Zaobserwowali, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika asymetrii cyklu następuje niewielki spadek prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych. Do obliczeń prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych zastosowali modele: Parisa oraz Formana, które potwierdziły zgodność wyników z wynikami badań doświadczalnych dla badanych wartości współczynnika asymetrii cyklu. Autor rozprawy w pracach [66, 69, 70, 112, 113] prowadził badania i analizy wpływu współczynnika asymetrii cyklu na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych w próbkach litych oraz spawanych ze spoinami pachwinowymi wykonanych ze stali S355. Z uzyskanych wyników stwierdził, że dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$  następuje znaczne obniżenie trwałości oraz znaczny wzrost prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych.

### **2.2.7. Wpływ obróbki cieplnej na rozwój pęknięć zmęczeniowych**

Zagadnieniem wpływu obróbki cieplnej na trwałość oraz rozwój pęknięć zmęczeniowych elementów konstrukcji zajmuje się wielu naukowców, w tym również autor [69, 70, 122]. W przypadku stali odpowiednio dobrana oraz przeprowadzona obróbka cieplna umożliwia zmianę własności mechanicznych stali w bardzo szerokim zakresie. Proces obróbki cieplnej można podzielić na taką, która ma na celu znaczną zmianę strukturę stali od stanu pierwotnego (stanu równowagi) np. hartowanie oraz taką, której celem jest przywrócenie struktury stali do stanu równowagi np. wyżarzanie lub odpuszczanie [123]. Podstawowe rodzaje obróbek cieplnych to: hartowanie, odpuszczanie, wyżarzanie.

#### **2.2.7.1. Hartowanie**

Znaczną zmianę w strukturze materiału powoduje przeprowadzenie hartowania. Ma ono na celu uzyskanie twardej struktury martenzytycznej lub bainitycznej. Struktury powyższe można uzyskać wyłącznie z austenitu. Dlatego, aby uzyskać wymaganą strukturę stal należy podgrzać do odpowiednio wysokiej temperatury, która jest uzależniona od rodzaju stali np. stopowa lub niestopowa, jest to tzw. temperatura austenitowania. W następnym etapie hartowany materiał podlega możliwie szybkiemu

chłodzeniu. Tempo chłodzenia dobiera się w sposób zapewniający ominięcie przemian w zakresie dyfuzyjnym. Najmniejsza prędkość, gdzie w austenicie nie następują zmiany dyfuzyjne nazywamy szybkością krytyczną [123, 124, 125]. Podczas chłodzenia elementu w procesie hartowania występują znaczne różnice temperatur pomiędzy rdzeniem a warstwą powierzchniową, w której występują znaczne naprężenia oraz często pęknięcia. Struktura martenzytu jest bardzo krucha i podatna na pękanie.

### **2.2.7.2. Odpuszczanie**

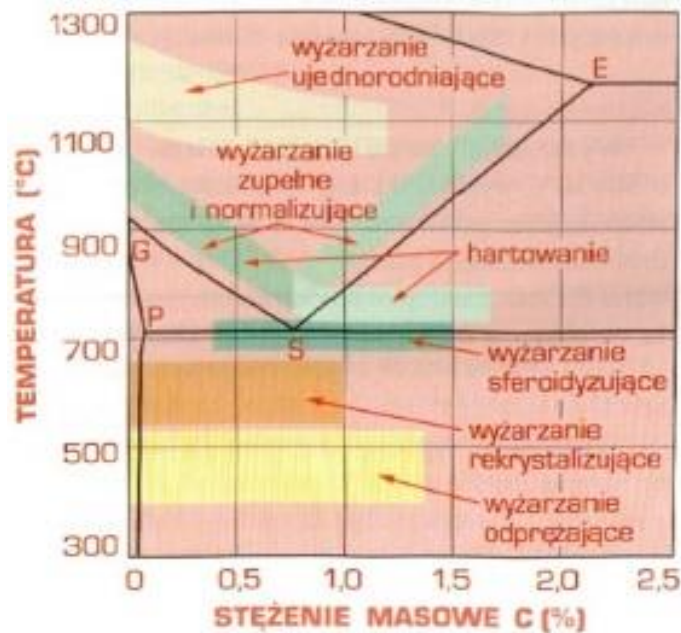
Najogólniej, odpuszczanie jest obróbką cieplną polegająca na nagraniu zahartowanej wcześniej stali w celu zwiększenia jej plastyczności. Stale po hartowaniu zazwyczaj charakteryzują się bardzo małą plastycznością. Proces hartowania oraz odpuszczenia stanowi najlepsze połączenie obróbek cieplnych w celu uzyskania ze stali o strukturze martenzytycznej optymalnej kombinacji własności wytrzymałości oraz plastyczności materiału [123, 124]. Podczas odpuszczania stali węglowych zachodzą przemiany w czterech stadiach, należą do nich:

- pierwsze, w zakresie temperatur 80 – 200°C, które jest związane z rozkładem martenzytu i wydzielaniem w nim węglików. Ten z kolei wywołuje zmniejszenie stężenia węgla w martenzycie, który to z budowy tetragonalnej zmienia się na regularną, zwanym martenzytem odpuszczonym,
- drugie, w zakresie temperatur 200 – 300°C, w którym następuje przemiana austenitu szczątkowego w martenzyt odpuszczony,
- trzecie, w zakresie temperatur 300 – 400°C, w którym węgliki w osnowie ulegają rozpuszczeniu oraz niezależnym wydzielaniu się cementytu,
- czwarte, w temperaturze powyżej 400°C, następuje koagulacja węglików wydzielonych we wcześniejszych stadiach odpuszczania. Następuje sferoidyzacja cementytu, który przyjmuje kształt kulisty. W efekcie końcowym uzyskuje się strukturę martenzytu wysokoodpuszczonego (tzw. sorbitem), o strukturze bardzo drobnych kulistych cząstek cementytu w osnowie ferrytu [124].

### **2.2.7.3. Wyżarzanie**

W zabiegu wyżarzania temperatura stanowi kluczowy parametr, który decyduje o uzyskaniu wymaganej struktury materiału. Polega na nagraniu materiału do określonej

temperatury a następnie powolnym chłodzeniu. Celem wyżarzania jest uzyskanie struktury stanu równowagi termodynamicznej. W zależności od celu oraz sposobu realizacji, wyżarzanie dzieli się najczęściej na: ujednorodniające, normalizujące, zupełne, rekrytalizujące, odprężające, zmiękczone, sferoidyzujące. Na rysunku 2.26 pokazano fragment wykresu Fe-Fe<sub>3</sub>C z zaznaczonymi zakresami temperatur wyżarzania oraz hartowania dla stali węglowych.



Rys. 2.26. Fragment wykresu Fe-Fe<sub>3</sub>C z zaznaczonymi zakresami temperatur wyżarzania oraz hartowania stali węglowych [124]

- wyżarzanie ujednorodniające polega na nagrzeniu stali do temperatury 1050 - 1200°C (100 - 200°C poniżej linii solidusu), długotrwałym wygrzaniu i powolnym schładzaniu. Zabieg ten często stosowany do dużych odlewów,
- wyżarzanie normalizujące polega na nagrzeniu stali do temperatury powyżej 30 - 50°C powyżej A<sub>c3</sub> (linia GSE na rysunku 2.26), wygrzaniu i spokojnym studzeniu na powietrzu. Zabieg ten ma na celu uzyskanie jednorodnej, drobnoziarnistej struktury i poprawę własności mechanicznych,
- wyżarzanie rekrytalizujące stosuje się najczęściej dla materiałów odkształconych plastycznie, gdzie zgniot warstwy powierzchniowej spowodował umocnienie przez zgniot. Poprzez zabieg poprawie ulegają własności takiego materiału,

- wyżarzanie odprężające polega na nagraniu stali do temperatury niższej od  $A_{c1}$  (linia PS na rysunku 2.26), wygrzaniu i spokojnym studzeniu. Celem tego zabiegu najczęściej jest usunięcie naprężeń odlewniczych, spawalniczych, itp. [56, 123, 124, 125].

Autorzy w pracy [126] przedstawili wyniki badań wpływu obróbki cieplnej stali sprężynowej 56SiCr7 na trwałość zmęczeniową oraz podatność na pękanie. Stwierdzili, że obróbka cieplna poprzez hartowanie i następnie odpuszczanie badanej stali zwiększa jej wytrzymałość zmęczeniową, głównie z powodu tworzenie się martenzytu odpuszczonego z początkowej mikrostruktury ferrytycznej - perlitycznej. W pracy [127] autorzy podjęli badania w celu poprawy wytrzymałości zmęczeniowej stali 42SiCr. Zastosowali różne procedury obróbki cieplnej. Badana stal należy do grupy materiałów nadających się szczególnie do produkcji elementów pojazdów transportowych, takich jak wały, sworznie, śruby lub sprężyny, zawiera zwiększoną ilość Si (krzemu) w celu poprawy wytrzymałości i odporności na zmęczenie. Stal poddano obróbce za pomocą konwencjonalnej obróbki cieplnej i za pomocą zaawansowanych procesów hartowania i podziału (Q-P), opracowanych w University of West Bohemia. Proces polegał na hartowaniu w odstępach czasu pomiędzy początkiem przemiany martenzytu a temperaturą zakończenia przemiany martenzytu i prowadzi do stabilizacji austenitu nietransformowanego przez dyfuzję węgla z martenzytu. W rezultacie uzyskano dobre właściwości, tj. wytrzymałość  $R_m$  około 2000 MPa i plastyczność ponad 10-15% większą, w porównaniu do standardowej obróbki cieplnej prowadzącej do wysokiej kruchości. Wytrzymałość zmęczeniowa stali poddanej procesowi Q-P była wysoka. Stwierdzili, że wpływ zwiększonej zawartości resztkowego austenitu na odporność stali na pękanie zmęczeniowe można ocenić jako bardzo korzystny. Szczególnie ważną publikacją, zdaniem autora rozprawy jest praca [128], w której autor zaprezentował wyniki badań wpływu obróbki cieplnej na trwałość zmęczeniową stali stopowej (A193-51T-B7) przeprowadzonej dla dwóch rodzajów obróbki cieplnej, mianowicie wyżarzanie oraz hartowanie z odpuszczaniem (w 200°C). Na podstawie uzyskanych wyników autor stwierdził, że tempo wzrostu pęknięć zmęczeniowych próbek hartowanych i odpuszczanych było niższe niż w przypadku próbek standardowych. Podczas gdy szybkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych próbek wyżarzanych była wyższa w porównaniu do próbek standardowych. Zaobserwował też, że hartowanie, a następnie odpuszczanie zmniejsza szybkość wzrostu pęknięć, podczas gdy wyżarzanie zwiększa tę szybkość. Zmniejszenie wytrzymałości oraz zwiększenie plastyczności, która nastąpiła w wyniku wyżarzania, wynika z tworzenia miękkich grubych ziaren ferrytu. Hartowanie,

po którym następuje odpuszczanie, daje twarde ziarna martenzytu, co prowadzi do zwiększenia wytrzymałości, podczas gdy ciągliwość jest zmniejszona. W pracy [129] badano wpływ obróbki cieplnej na powstawanie pęknięć zmęczeniowych w próbkach ze stali węglowej o zawartości węgla 0,45%. Próbki poddano obróbce cieplnej w temperaturze 930°C przez 15 minut, a następnie chłodzono w oleju. Odpuszczanie prowadzone było w temperaturach 100°, 200°, 300° i 400°C przez okres 30, 90 i 180 minut. Wyniki eksperymentalne pokazały początkowy wzrost liczby cykli do zniszczenia, gdy hartowanie zostało zmienione z 100° na 200°C przez 30 minut. Dalszy wzrost czasu i temperatury odpuszczania powodował zmniejszenie odporność na pęknięcia zmęczeniowe oraz twardość. Ten początkowy wzrost, a następnie spadek właściwości zmęczeniowych i twardości można wyjaśnić zmianami strukturalnymi zachodzącymi w stali. Stal martenzytyczna powstaje, gdy stal węglowa jest hartowana od 930°C oraz chłodzona do temperatury pokojowej w oleju. Podczas odpuszczania wysoce naprężona martenzytyczna struktura stali jest stopniowo przekształcana w bardziej stabilną strukturę składającą się z dyspersji węgla żelaza w ferrycie. Autor stwierdził, że im wyższa temperatura odpuszczania, tym grubszy będzie powstały osad węgla oraz, że elementy stalowe uzyskują maksymalną twardość, gdy są odpuszczane w temperaturze poniżej 200°C, podczas gdy elementy wymagające dobrej ciągliwości są odpuszczane w temperaturze powyżej 400°C.

#### **2.2.8. Wpływ technologii spawania na rozwój pęknięć zmęczeniowych**

Łączenie nierozłączne poprzez spawanie jest w rzeczywistych konstrukcjach, maszynach oraz urządzeniach powszechnie stosowane. Metody oraz technologie udoskonalane są nieustannie. Niestety łączenie poprzez spawanie, mimo swoich zalet posiada również wady. Niezależnie od technologii spawania zawsze do elementów łączonych wprowadzana jest wysoka temperatura, która przyczynia się do zmian w strukturze obszaru złącza spawanego oraz strefy wpływu ciepła (SWC) powodując powstawanie opisywanego wcześniej karbu strukturalnego. W przypadku, gdy połączenie spawane zaprojektowane jest w taki sposób, że lico oraz/lub grań spoiny powodują zmianę geometrii elementu powstaje również karb geometryczny. Oba powstałe karby negatywnie wpływają na trwałość zmęczeniową, w obszarach tych zazwyczaj występują koncentracje naprężenia. Kolejnym problemem, mającym wpływ na trwałość zmęczeniową połączeń spawanych są procesy termiczne zachodzące w złączu



podczas spawania. Można powiedzieć, że w złączu spawanym oraz strefie wpływu ciepła zachodzą procesy metalurgiczne, z których powstają struktury znacznie różniące się od materiału rodzimego (martenzyt, bainit, sorbit, strefy rekrytalizacji) [69, 70, 106, 107, 109]. Wpływ poszczególnych struktur na trwałość zmęczeniową opisano w pracach [122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 142]. Poza zmianami strukturalnymi, w złączach spawanych występują różnego rodzaju wady wynikające z technologii spawania. W metodzie spawania elektrodą otuloną (metoda 111) częstymi i jednocześnie najgroźniejszymi wadami są np. obszary wtrąceń żużla powstające w poszczególnych ściegach złącza, w wyniku jego wcześniejszego, niedokładnego usunięcia. Następnymi najczęściej spotykanymi wadami są podtopienia lica oraz grani złącza, które działają jak karb geometryczny a w połączeniu z karbem strukturalnym, jakim jest spoina stanowią doskonale miejsce do inicjacji oraz rozwoju pęknięć zmęczeniowych. W metodzie spawania elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego (Ar, He, Ar + He) MIG 131 (Metal Inert Gas) oraz w osłonie gazu aktywnego (CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> + gaz obojętny) metoda MAG 135 (Metal Active Gas) najczęściej występującymi wadami, mającymi wpływ na trwałość zmęczeniową są wtrącenia metalu, przyklejenia spoiny czy podtopienia. Natomiast w spawaniu łukowym elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych (Ar, He, Ar + He) TIG 141 (Tungsten Inert Gas), poza wadami wymienionymi powyżej często pojawiającymi się wadami są wtrącenia wolframu (materiału elektrody) [111]. Kolejne parametry, które mają wpływ na trwałość zmęczeniową to sposób wykonania złącza spawanego, tzn. w przypadku ręcznie wykonywanego połączenia decydujący wpływ na ostateczną jakość złącza ma spawacz. W przypadku automatycznych procesów spawania technolog określa parametry spawania natomiast urządzenie wykonuje połączenie w sposób powtarzalny, gwarantujący jednakowe właściwości w każdym miejscu złącza. Wpływ różnych spoin oraz występujących defektów na wzrost pęknięć zmęczeniowych analizowano w pracy [111]. Badania prowadzono przy cyklicznym rozciąganiu ze skręcaniem. Współczynniki intensywności naprężenia (WIN) dla różnych spoin obliczono metodą elementów skończonych. Stwierdzono, że wady obecne w spoinach istotnie zmniejszają ich trwałość zmęczeniową i zwiększają prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych. W pracy [133] przeanalizowano trzy metody oceny wytrzymałości zmęczeniowej, korzystając z liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LSMP). Badano pachwinowe złącza spawane poddane cyklicznemu zginaniu. Stwierdzono, że LSMP sprawdza się w ocenie wytrzymałości złączy spawanych, przy czym jej zastosowanie jest uzależnione od dokładności, z jaką określono WIN na czole pęknięcia.

## 2.7. Podsumowanie

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury można zauważyć, że problematyka trwałości zmęczeniowej oraz rozwoju pęknięć zmęczeniowych, także w połączeniach spawanych jest zagadnieniem bardzo złożonym. Wiele grup naukowców spogląda na nurtujące ich problemy z różnych stron. Dla badacza zajmującego się badaniami nieniszczącymi, najważniejsze jest zbadanie oraz ocena elementu i zgodnie z ustalonymi wytycznymi (normami) zakwalifikowanie go do jednej z grup lub kategorii jakości wyrobu. Mało jest istotne w jakich warunkach obciążenia element będzie pracował. Struktura badanego materiału również ma drugorzędne znaczenie, chyba że ma ona wpływ na samo przeprowadzenie badania, np. w metodzie ultradźwiękowej, dla materiałów drobnoziarnistych oraz gruboziarnistych trzeba zastosować głowicę o innej częstotliwości. Inną grupą naukowców są badacze związani z zagadnieniami mechaniki pęknięcia. Dla nich, od samego początku powstania przedmiotu „mechanika pęknięcia” celem nadrzędnym było znalezienie rozwiązań na powtarzające się awarie rzeczywistych konstrukcji. W tym celu starali się, i starają się nadal, znaleźć i opisać wpływ różnych parametrów materiałowych, parametrów obciążenia i warunków pracy obiektów na inicjację oraz rozwój pęknięć zmęczeniowych, oszacować ich trwałość i przydatność do bezpiecznej, bezawaryjnej pracy. Z uwagi na fakt, że naukowcy działają w sposób wolny oraz niezależny, mamy obecnie opracowanych wiele modeli matematycznych opisujących zachowania się materiałów o różnej strukturze, w różnych zakresach tj.: liniowo – sprężystym (np. pęknięcie kruche), czy sprężysto – plastycznym (pęknięcie ciągliwe). Dodatkowo mamy obecnie narzędzie w postaci wzorów korekcyjnych umożliwiających uwzględnienie w badaniach wpływu karbów geometrycznych oraz strukturalnych. Oczywiście opracowane modele zostały zweryfikowane podczas badań doświadczalnych, których wyniki przytaczane są w powyższym przeglądzie literatury. Nie bez znaczenia, w końcu są badania przeprowadzane przez naukowców zajmujących się procesami metalurgicznymi, procesami spawania, zwłaszcza dotyczących zmian zachodzących w strukturze podczas topienia, nagrzewania oraz chłodzenia materiału. Wyniki ich badań wpływają w znacznym stopniu na wiedzę o materiale oraz ich wpływie na inicjację i rozwój pęknięć zmęczeniowych, zwłaszcza w odniesieniu do złącza spawanego czy materiałów obrabianych cieplnie.

### 3. CEL, ZAKRES PRACY

#### Cel pracy

Badanie wpływu obciążeń pochodzących od zginania oraz zginania ze skręcaniem na rozwój pęknięć zmęczeniowych w próbkach litych oraz z teowym złączem spawanym o dwóch różnych geometriach łożysk pachwinowych: wklęsłych, wypukłych, wykonanych ze stali S355.

#### Zakres pracy:

- przegląd aktualnego stanu wiedzy z zakresu obejmującego badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych w różnych warunkach obciążenia dla próbek spawanych,
- opracowanie metodyki badań doświadczalnych,
- przeprowadzenie badań, doświadczalnych rozwoju pęknięć zmęczeniowych, próbek litych oraz spawanych, wykonanych ze stali S355 poddanych zginaniu i zginaniu ze skręcaniem dla współczynników asymetrii cyklu  $R = -1, 0$  bez i po przeprowadzonej obróbce cieplnej,
- wpływ mikrostruktury materiału na rozwój pęknięć zmęczeniowych w próbkach litych oraz spawanych bez i po przeprowadzonej obróbce cieplnej,
- obliczanie zakresu parametru  $\Delta J$  uwzględniając współczynnik korekcyjny geometrii i obciążenia próbki oraz karb strukturalny,
- obliczanie prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych z użyciem zakresu parametru  $\Delta J$ ,
- wykonanie obliczeń numerycznych, stanu naprężenia i przemieszczenia, w modelach próbek litych oraz spawanych,
- przeprowadzenie analizy rozwoju ścieżek pęknięcia oraz powierzchni złomów zmęczeniowych,
- analiza wyników oraz wnioski.

Teza pracy:

Zmiana współczynnika asymetrii cyklu (od  $R = 0$  do  $R = -1$ ) i rodzaju obciążenia (od zginania ze skręcaniem do zginania) w próbkach ze spoinami pachwinowymi (wkłęsłymi lub wypukłymi) wykonanymi ze stali S355 w procesie propagacji pęknięć powoduje wzrost trwałości badanego materiału.

## 4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

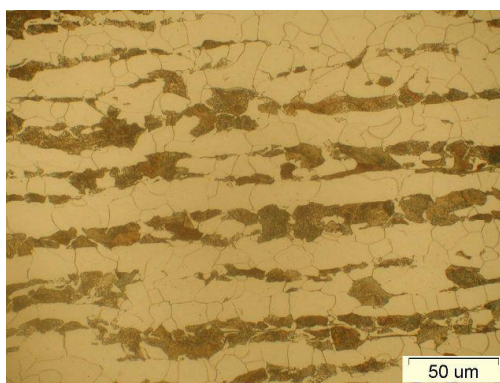
W niniejszym rozdziale przedstawiono całość działań podjętych przez autora w celu zrealizowania założonego programu badawczego pracy doktorskiej, który obejmował: opracowanie metodyki badań doświadczalnych, badania nieniszczące, badanie twardości próbek, badania strukturalne, obliczenia numeryczne, charakterystykę złomów zmęczeniowych, podsumowanie związane z przeprowadzonymi badaniami doświadczalnymi.

### 4.1. Metodyka badań

Przed rozpoczęciem badań doświadczalnych opracowana została metodyka badań. Metodyka ta opracowana została na podstawie posiadanej wiedzy, zaplecza technicznego, jak i przyjętych kształtów próbek, użytego materiału czy sposobu zastosowanego obciążania.

#### 4.1.1. Struktura i własności badanego materiału

Materiałem użytym do wykonania próbek litych oraz spawanych zastosowanych do badań doświadczalnych była drobnoziarnista, spawalna stal konstrukcyjna z gatunku S355 w stanie normalizowanym. Jest to stal niestopowa o drobnoziarnistej mikrostrukturze ferrytyczno – perlitycznej wykazującej drobne równoosiowe ziarna ferrytu (jasne) oraz bardzo drobne ziarna perlitu (ciemne) w układzie pasmowym. Mikrostrukturę materiału rodzimego pokazano na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Struktura materiału rodzimego próbki (powiększenie 500x) [69, 70]

Materiał zastosowany do badań charakteryzował się ziarnami ferrytu o średnicy od 5 do 40  $\mu\text{m}$  i podobnymi ziarnami perlitu o średnicy od 5 do 45  $\mu\text{m}$ .

W mikrostrukturze ferrytyczno – perlitycznej perlit tworzy się dzięki przemianie eutektoidalnej i występuje w stalach powyżej 0,022 % węgla. Zbudowany jest z płytek twardego cementytu i miękkiego ferrytu ułożonych naprzemiennie. Własności takiej mikrostruktury są zależne od odległości pomiędzy płytkami, grubości płytek cementytu, rozmiaru kolonii perlitu oraz średnicy pierwotnego ziarna austenitu. Mikrostrukturę ferrytyczno – perlityczną mają zazwyczaj stale konstrukcyjne stosowane do budowy konstrukcji budynków, mostów, rurociągów, kadłubów statków, itp. Mikrostruktura oraz własności stali ferrytyczno – perlitycznych zależą głównie od zawartości węgla. W stalach tych wytrzymałość na rozciąganie zwiększa się w sposób ciągły w miarę wzrostu zawartości węgla, gdyż zwiększa się również zawartość perlitu, który jest twardszy niż ferryt. Natomiast wpływ zwiększania zawartości węgla na granicę plastyczności jest znacznie mniejszy, jest to spowodowane tym, że naprężenia powodujące płynięcie plastyczne materiału są zależne głównie od osnowy ferrytycznej oraz wskazuje na to, że perlit zwiększa szybkość umocnienia odkształceniowego stali. Najogólniej można powiedzieć, że wraz ze wzrostem zawartości perlitu w stali rośnie wytrzymałość na rozciąganie i na ścieranie, natomiast maleje odporność na pękanie i ciągliwość [125].

Podstawowe właściwości chemiczne i wytrzymałościowe użytego materiału próbek przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Podstawowe właściwości chemiczne i wytrzymałościowe stali S355 [134]

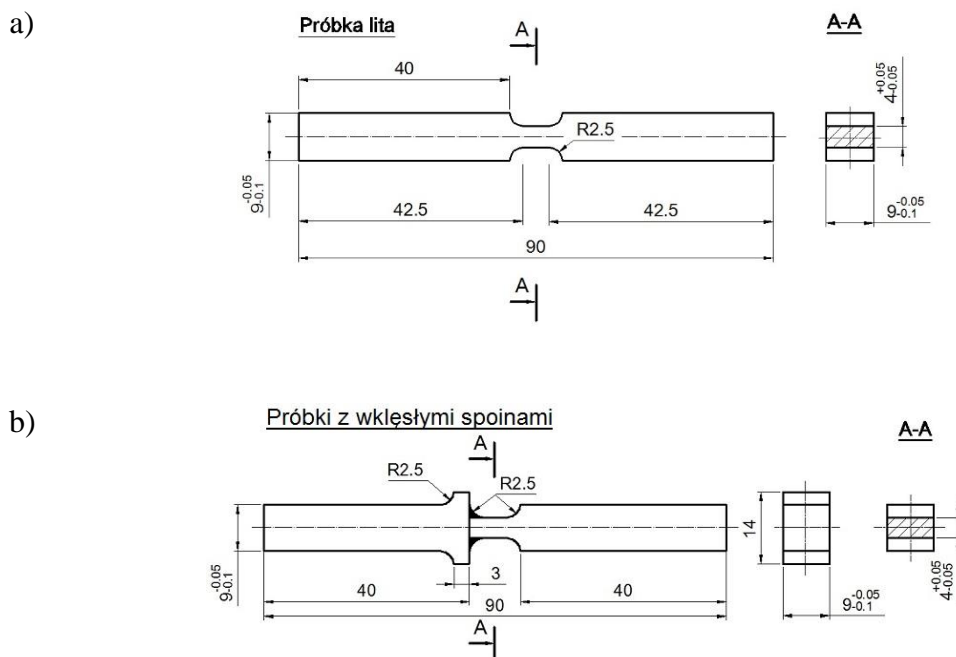
Skład chemiczny stali w [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0,2	1,49	0,33	0,023	0,024	0,01	0,01	0,035	reszta
Własności wytrzymałościowe								
R <sub>e</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>10</sub> %	Z %	E GPa	v			
357	535	21	50	210	0,30			

Badania doświadczalne wykonano na próbkach litych oraz spawanych bez obróbki cieplnej (surowych - po spawaniu) oraz na próbkach po dwóch różnych obróbkach cieplnych. Pierwsza obróbka cieplna wykonana została poprzez poddanie

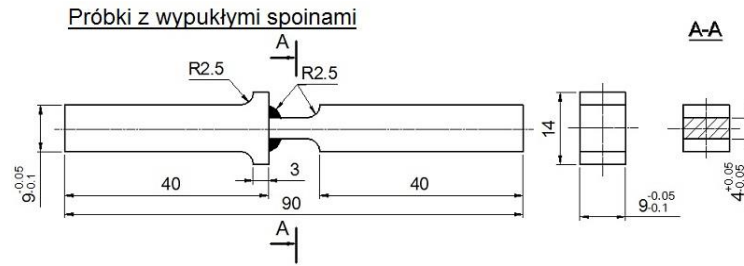
próbek wyżarzaniu odprężającemu w temperaturze 630°C przez 2 godziny. Natomiast druga obróbka cieplna polegała na wyżarzaniu normalizującym w temperaturze 940°C przez 1,1 godziny.

#### 4.1.2. Kształt próbek przyjętych do badań

Próbki do badań doświadczalnych wykonane zostały z pręta ciągnionego o średnicy  $\varnothing$  30 mm. Następnie, w wyniku przeprowadzonej obróbki mechanicznej oraz procesu spawania metodą TIG w osłonie argonu otrzymano ostateczny kształt próbek z teowymi złączami spawanymi. Złącza spawane, z pachwinowymi spoinami, wykonane zostały w dwóch wariantach lica spoin, tzn. spoiny wklęsłe oraz wypukłe. Złącza spawane wykonano ręcznie metodą TIG w osłonie gazów obojętnych (argon) oraz dodatkowo w czasie spawania podawano drut spawalniczy o oznaczeniu W-42-2-W2Sil [135]. Kształty i wymiary próbek litych oraz spawanych (z wklęsłymi oraz wypukłymi spoinami) pokazano na rysunku 4.2.



c)

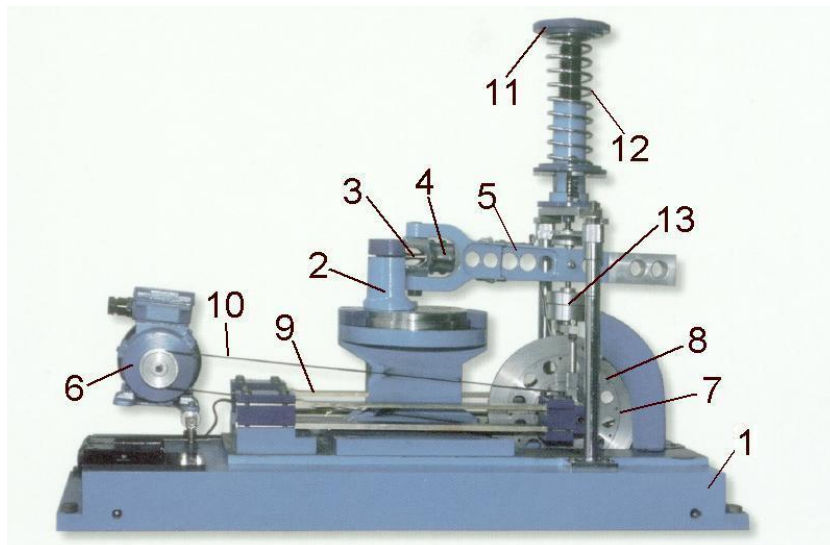


Rys. 4.2. Kształt i wymiary próbek przyjętych do badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych:

a) litych, b) z wklęsłymi licami spoin, c) z wypukłymi licami spoin

#### 4.1.3. Stanowisko badawcze

Badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych przy zginaniu oraz proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem wykonywano w laboratorium Katedry Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej. Badania przeprowadzono na stanowisku do badań zmęczeniowych MZGS-100 [56, 136, 137, 138, 139], które umożliwia realizację cyklicznego zginania, kombinacji zginania ze skręcaniem oraz skręcania. Na rysunku 4.3. przedstawiono budowę zastosowanej maszyny do badań zmęczeniowych, w której to próbka (3) zamocowana jest w uchwytach (2) i (4). Obciążenie uzyskiwano w wyniku ruchu dźwigni (5) w płaszczyźnie pionowej, wywołanej siłą bezwładności niewyrównoważonych ciężarków (8) na tarczy wirującej (7) osadzonej na płaskich sprężynach (9). Do podstawy (1) przymocowany jest siłownik sprężynowy (11), który umożliwia zadawanie średniej wartości obciążenia poprzez odpowiednie ugięcie sprężyny (12) siłownika.



Rys. 4.3. Maszyna zmęczeniowa MZGS-100 [56, 137]



Badania przeprowadzono przy obciążeniu z kontrolowaną siłą (w rozpatrywanym przypadku kontrolowano amplitudę momentu zadanego) z częstotliwością obciążenia 28,4 Hz. Momenty zginający ( $M_B(t)$ ) i skręcający ( $M_T(t)$ ) zostały wygenerowane przez przyłożenie siły do dźwigni o długości 0,2 m. Dla badań z obciążeniami zginającymi całkowity moment wynosił  $M(t) = M_B(t)$ . Na rysunku 4.4. pokazano zamocowaną próbkę w uchwytach maszyny zmęczeniowej poddaną zginaniu, gdzie uchwyty wraz z dźwignią są ustawione w jednej osi powodując moment zginający.



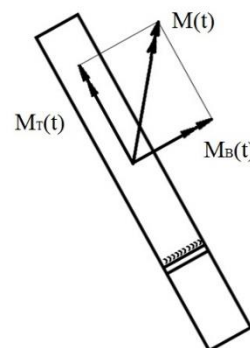
Rys. 4.4. Próbkę w uchwytach maszyny zmęczeniowej poddaną zginaniu

Natomiast do realizacji badań przy proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem całkowity moment zmieniał się w czasie zgodnie z zależnością  $M(t) = M_B(t) + M_T(t)$ . W tym celu poprzez obrócenie głowicy o kąt  $\alpha = 45^\circ$  otrzymano proporcjonalne zginanie ze skręcaniem. Na rysunku 4.5 pokazano sposób zamocowania próbki dla zginania ze skręcaniem oraz schemat rozkładu momentu zginającego i skręcającego.

a)



b)



Rys. 4.5. Badanie zmęczeniowe przy zginaniu ze skręcaniem, gdzie:  
a) próbkę w uchwytach maszyny zmęczeniowej, b) schemat obciążenia

Badania zmęczeniowe przeprowadzono w warunkach niskich cykli zmęczeniowych i wysokich cykli zmęczeniowych. Próbki badano pod obciążeniem zmęczeniowym charakteryzującym się stałą amplitudą momentu o wartości  $M_B = 9,2 \text{ Nm}$  ( $M_{\max} = M_B + M_m = 18,4 \text{ Nm}$ , gdzie  $M_m$  jest średnią wartością zastosowanego momentu) i współczynnikiem asymetrii cyklu  $R = M_{\min} / M_{\max} = -1$  i  $0$ . Teoretyczny współczynnik koncentracji naprężeń przy zginaniu, oszacowany zgodnie z opisem w [140], określono jako  $\alpha_k = 1,38$  w próbce ze spoiną wklęsłą, podczas gdy dla spoiny wypukłej wynosił on  $1,56$ . Stosunek momentu skręcającego do momentu zginającego wynosił  $M_T(t) / M_B(t) = 1$ .

#### 4.1.4. Urządzenia pomiarowe

W badaniach doświadczalnych dla zobrazowania wyników badań zastosowano urządzenia pomiarowe takie jak:

- mikroskop metalograficzny Olympus IX-70, dzięki któremu możliwe było obserwowanie mikrostruktur badanych próbek. Obrazy zglądów metalograficznych uzyskiwano przy powiększeniach od 50 do 500 razy,
- miernik mikrotwardości typu LECO MHT 200 z obciążeniem w postaci stożka diamentowego 100 g do pomiaru twardości metodą Vickersa.
- przyrosty długości pęknięć, w trakcie badań na maszynie zmęczeniowej obserwowano metodą optyczną na bocznych powierzchniach próbek. Mierzono je za pomocą mikrometru cyfrowego umieszczonego na stoliku mikroskopu przenośnego o powiększeniu 25x z dokładnością 0,01 mm notując jednocześnie liczbę cykli obciążenia  $N$ .

#### 4.1.5. Warunki przeprowadzenia badań zmęczeniowych

W pracy autor zawarł wyniki badań doświadczalnych związanych ze zjawiskiem pęknięcia zmęczeniowego w próbkach poddanych zginaniu oraz zginaniu ze skręcaniem. Wyniki przedstawione zostały w postaci wykresów długości pęknięć „a” w funkcji liczby cykli  $N$  oraz wykresów prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych  $da/dN$  w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$  – dla zginania, oraz  $\Delta J_{eq}$  – dla zginania ze skręcaniem. Badania próbek litych i próbek spawanych przeprowadzono dla dwóch współczynników asymetrii cyklu  $R = -1$  i  $0$ . Przeprowadzono również badania na próbkach poddanych

obróbce cieplnej (wyżarzaniu). Wyniki badań prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych obliczano z użyciem równania Parisa [88] zmodyfikowanego przez Dowlinga i Begleya [97] w postaci

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta J)^m \quad (4.1)$$

gdzie:

$\Delta J$  – zakres parametru J,

C i m – współczynniki wyznaczone doświadczalnie.

Zakres zmian parametru  $\Delta J$  dla mieszanego sposobu pęknięcia przyjmuje postać  $\Delta J_{eq}$  i dla przypadku proporcjonalnych obciążeń zginania ze skręcaniem połączono się równaniem [ 84, 142, 143, 144]

$$\Delta J_{eq} = \Delta J_I + \Delta J_{III}, \quad (4.2)$$

Przy czym zakresy parametru  $\Delta J$  dla poszczególnych sposobów pęknięcia składają się z części sprężystej oraz plastycznej. Dla poszczególnych sposobów pęknięcia zakres parametru  $\Delta J$  obliczono z równań [142, 144]:

- dla pierwszego sposobu pęknięcia I (zginanie)

$$\Delta J_I = (1 - \nu^2) \frac{\Delta K_I^2}{E} + \pi Y_I^2 \left( \frac{\Delta \sigma \Delta \epsilon_p}{\sqrt{n'}} \right) a \quad (4.3)$$

- dla trzeciego sposobu pęknięcia III (skręcanie)

$$\Delta J_{III} = (1 + \nu) \frac{\Delta K_{III}^2}{E} + \pi Y_{III}^2 \left( \frac{\Delta \tau \Delta \gamma_p}{\sqrt{n'}} \right) a \quad (4.4)$$

gdzie:

$\Delta \sigma$ ,  $\Delta \tau$  – zakres naprężenia dla I i III sposobu pęknięcia w okolicy wierzchołka pęknięcia lub karbu,

$\Delta \epsilon_p$ ,  $\Delta \gamma_p$  – zakres odkształceń plastycznych dla I i III sposobu pęknięcia w okolicy wierzchołka pęknięcia,

$\nu$  – współczynnik Poissona,

$Y_{I, III}$  – współczynniki korekcyjne uwzględniające geometrię próbki i rodzaj obciążenia dla I i III sposobu pęknięcia,

$n'$  – współczynnik cyklicznego umocnienia,

$a$  – długość pęknięcia.

Odpowiednio dla pierwszego sposobu pęknięcia (zginania) wartość zakresu zmian parametru  $\Delta J$  obliczono ze wzoru (4.3)

$$\Delta J = \Delta J_I \quad (4.5)$$

Do wyliczeń zakresu  $\Delta J$  niezbędne były wartości zakresu współczynników intensywności naprężenia  $\Delta K$ , dla poszczególnych sposobów pęknięcia oraz rodzaju próbek (lita, spawana). W wzorze (4.3) i (4.4) zakres zmian współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K_I$  dla zginania (I sposób pęknięcia) i  $\Delta K_{III}$  dla skręcania (III sposób pęknięcia) obliczono z równań

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \cos^2 \alpha \sqrt{\pi(a_0 + a)} \quad (4.6)$$

$$\Delta K_{III} = \Delta \sigma \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\pi(a_0 + a)} \quad (4.7)$$

gdzie:

$\Delta \sigma$  – zakres naprężenia dla I i III sposobu pęknięcia w okolicy wierzchołka pęknięcia,

$a$  – długość pęknięcia.

W przypadku czystego zginania do obliczenia zakresu współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K_I$  zastosowano równanie

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi(a_0 + a)} \quad (4.8)$$

Współczynniki korekcyjne  $Y_I$  dla zginania i  $Y_{III}$  dla skręcania [56] uwzględniające geometrię, obciążenie i skończoność wymiarów próbki obliczono z równań

$$Y_I = \frac{5}{\sqrt{20 - 13 \left(\frac{a_0 + a}{t}\right) - 7 \left(\frac{a_0 + a}{t}\right)^2}} \quad (4.9)$$

$$Y_{III} = \sqrt{\left(\frac{2t}{a_0 + a}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\pi(a_0 + a)}{2t}\right)} \quad (4.10)$$

gdzie:

$a_0$  – długość karbu, mm,

$a$  – długość pęknięcia, mm,

$t$  – grubość próbki, mm.

Nowością zawartą w tej pracy jest zastosowanie w badaniach doświadczalnych, poza współczynnikiem  $Y$ , dodatkowego współczynnika korekcyjnego  $M_k$ . Współczynnik ten uwzględnia karb strukturalny, tzn. kształt i wielkość spoiny w złączu spawanym, potwierdzony w badaniach przeprowadzonych przez autora [145]. Dodatkowy współczynnik  $M_k$  zastosowano do badanych próbek ze złączem spawanym i przedstawia się go w postaci [110]

$$M_k = B \left(\frac{a}{t}\right)^k \quad (4.11)$$

gdzie:

$a$  – długość pęknięcia, mm,

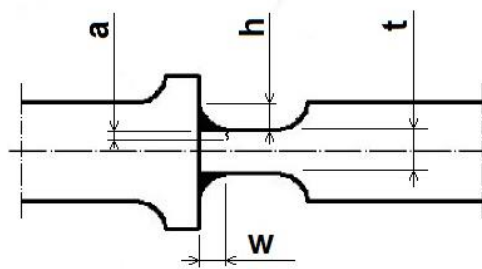
$t$  – grubość próbki, mm,

$$B = 0,8068 - 0,1554 \left(\frac{h}{t}\right) + 0,0429 \left(\frac{h}{t}\right)^2 + 0,0794 \left(\frac{w}{t}\right) \quad (4.12)$$

gdzie:  $h$  – wysokość spoiny, mm,  $w$  – szerokość spoiny, mm,

$$k = -0,1993 - 0,1839 \left(\frac{h}{t}\right) + 0,0495 \left(\frac{h}{t}\right)^2 + 0,0815 \left(\frac{w}{t}\right) \quad (4.13)$$

Na rysunku 4.6 przedstawiono wielkości pokazane na próbce i zastosowane do opisu złącza spawanego w równaniach (4.6 – 4.13).



Rys. 4.6. Wielkości zastosowane do opisu złącza spawanego w równaniach (4.6 – 4.13)

Ostatecznie równania (4.3) i (4.4) zastosowane do obliczeń przyjmują postać

$$\Delta J_I = (1 - \nu^2) \frac{\Delta K_I^2}{E} + \pi M_k Y_I^2 \left( \frac{\Delta \sigma \Delta \varepsilon_p}{\sqrt{n'}} \right) a \quad (4.14)$$

$$\Delta J_{III} = (1 + \nu) \frac{\Delta K_{III}^2}{E} + \pi M_k Y_{III}^2 \left( \frac{\Delta \tau \Delta \gamma_p}{\sqrt{n'}} \right) a \quad (4.15)$$

Amplitudę naprężenia normalnego przy zginaniu i stycznego przy skręcaniu próbek o przekroju poprzecznym prostokątnym obliczono z równań

$$\sigma_a = \frac{6M_g}{gh^2} \quad (4.16)$$

$$\tau_a = \frac{M_s}{k_1 hg^2} \quad (4.17)$$

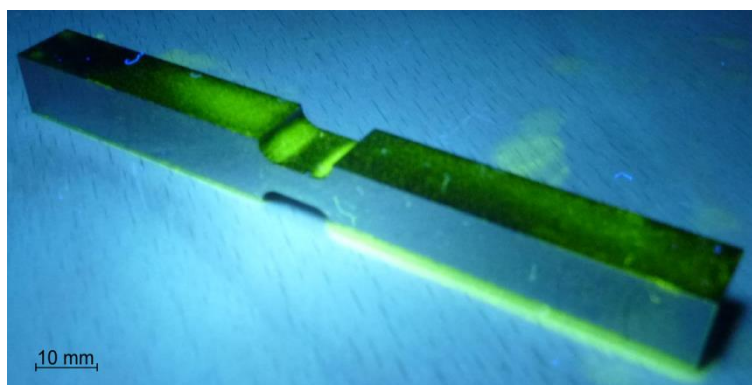
gdzie:

$k_1 = 0,208$  – współczynnik korekcyjny dla skręcania uwzględniający stosunek wysokości „h” do szerokości „g” próbki.

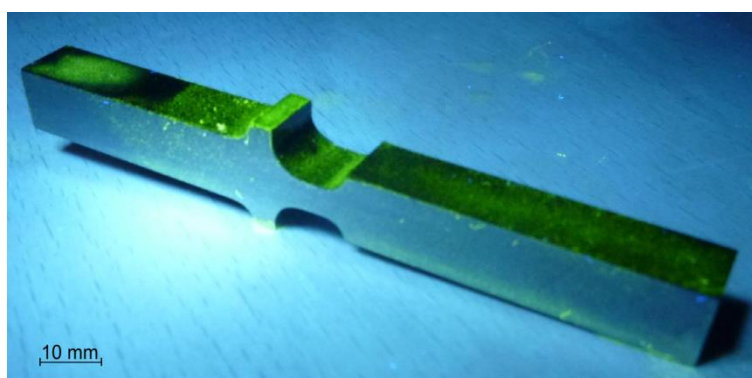
## 4.2. Badania nieniszczące

Przed przystąpieniem do badań doświadczalnych przeprowadzono badania nieniszczące wszystkich próbek, które miały zostać poddane badaniom na maszynie zmęczeniowej MZGS-100. Do badań użyto metodę magnetyczno - proszkową (MT). Badania przeprowadzono z użyciem defektoskopu prądowego z cewką o średnicy  $\varnothing 350$  mm, do której podczas badania wkładano próbkę nanosząc jednocześnie fluorescencyjną zawiesinę magnetyczną. Obserwacja wskazań prowadzona była w ultrafiolecie (UV). Badanie to miało na celu wyeliminowanie próbek, które posiadały widoczne wady (typu: pęknięcia, podtopienia, widoczne wtrącenia, itp.) mogące wpłynąć na ostateczny wynik badań. Na rysunku 4.7 przedstawiono próbki w trakcie badań nieniszczących.

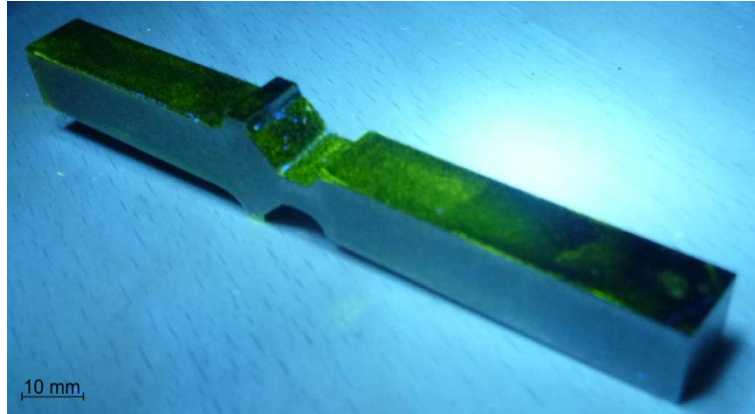
a)



b)



c)

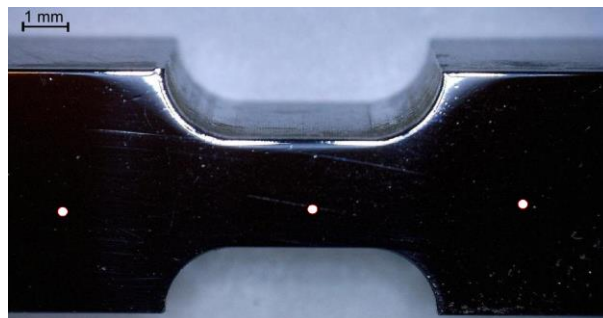


Rys. 4.7. Próbkę podczas badania MT w świetle UV, gdzie: a) próbka litej, b) próbka z wklęsłymi spoinami, c) próbka z wypukłymi spoinami

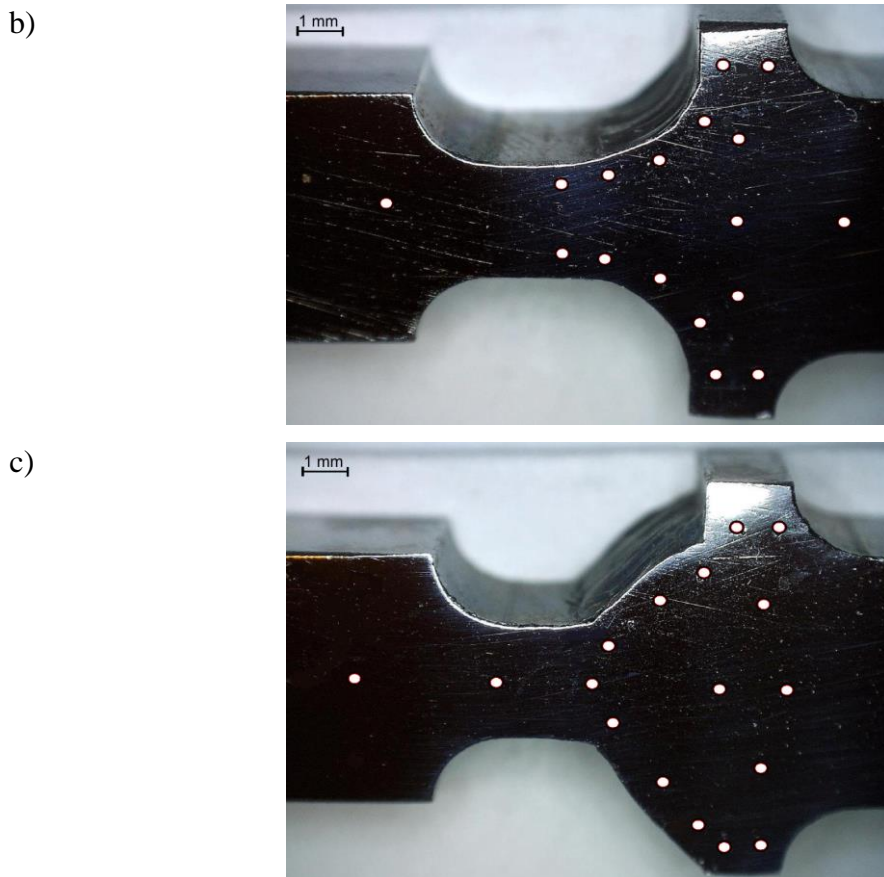
### 4.3. Badania twardości

Uzyskane z przeprowadzonych badań wyniki twardości miały istotne znaczenie, na próbkach użytych później do badań zmęczeniowych. Wartości twardości w próbkach (od litej bez obróbki cieplnej (OC), poprzez spawane bez OC, do spawanych po wyżarzaniu normalizującym) rozkładały się w bardzo szerokim zakresie. Dlatego też wszystkie próbki lite jak i spawane poddano pomiarom twardości metodą Vickersa  $HV_{01}$  zgodnie z normą EN ISO 9015-1 [146]. Na rysunku 4.8 przedstawiono punkty, w których przykładano sondę twardościomierza.

a)



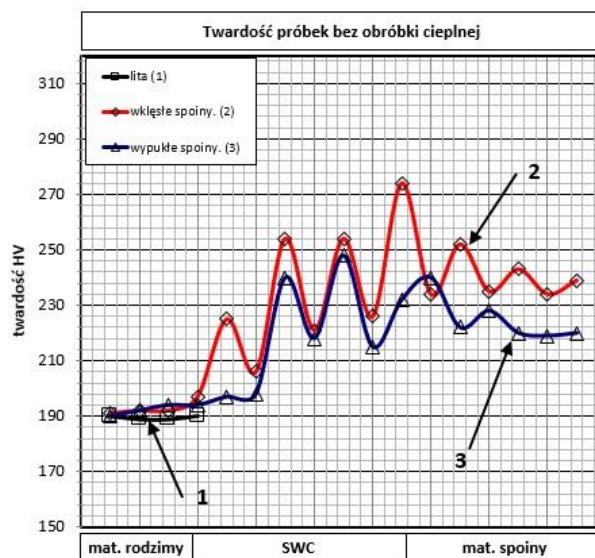




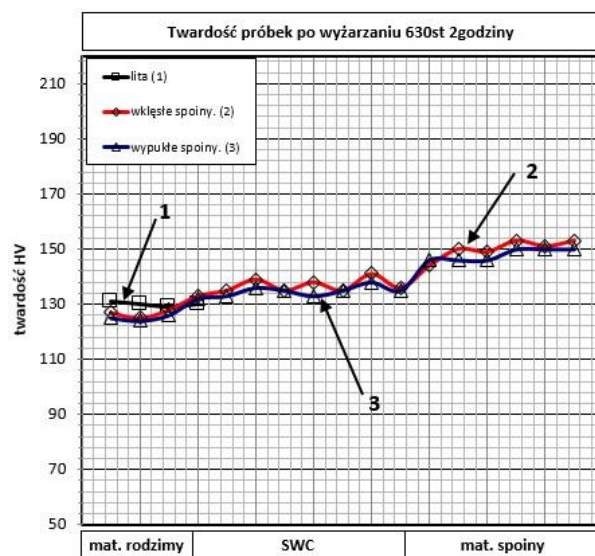
Rys. 4.8. Punkty pomiaru twardości, gdzie: a) próbka lita, b) próbka z wklęsłymi spoinami, c) próbka z wypukłymi spoinami

Wyniki pomiarów twardości próbek bez obróbki cieplnej (OC) i po przeprowadzonej obróbce cieplnej tj.: wyżarzaniu odprężającym oraz wyżarzaniu normalizującym przedstawiono na rysunku 4.9. Na rys. 4.9a widać, że dla materiału podstawowego twardość pozostała na tym samym poziomie (188–189 HV<sub>0,1</sub>). Podczas gdy w strefie wpływu ciepła (SWC) obserwuje się duże wahania twardości (197–274 HV<sub>0,1</sub> dla próbki z wklęsłymi spoinami i 194–248 HV<sub>0,1</sub> dla próbki z wypukłymi spoinami). Następnie, przechodząc do materiału spawanego, zmierzone wartości zmniejszyły się i ustabilizowały (243-239 HV<sub>0,1</sub> próbka 2 i 228–220 HV<sub>0,1</sub> próbka 3). Twardość materiału podstawowego dla próbek 1, 2, 3 jest prawie taka sama.

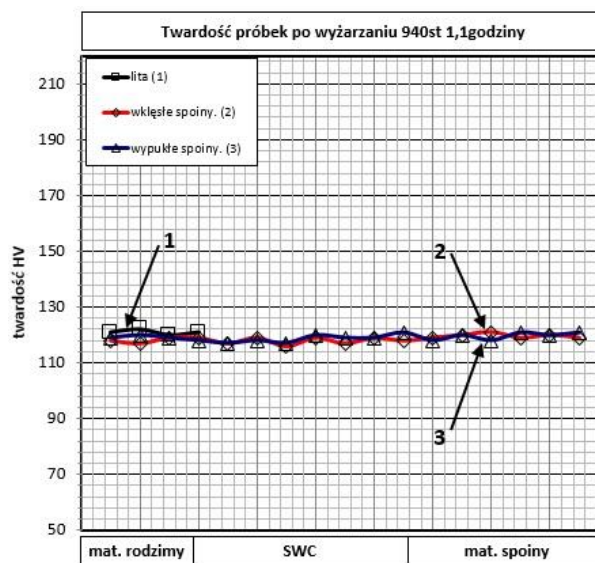
a)



b)



c)



Rys. 4.9. Wyniki pomiaru twardości, gdzie próbki: a) bez OC, b) po OC w temp. 630°C, c) po OC w temp. 940°C

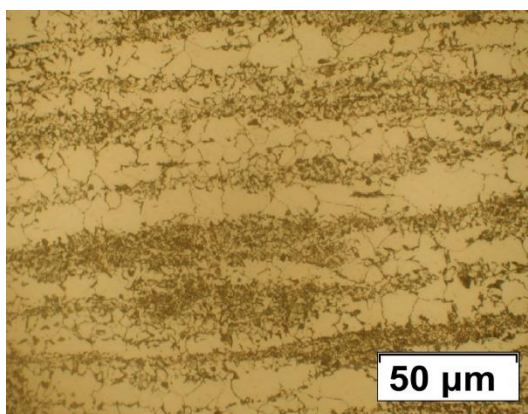
W próbkach poddanych wyżarzaniu odprężającemu (temp. 630°C i czas 2 godziny) twardości były mniejsze, w porównaniu do twardości próbek bez OC, fluktuacje również były mniejsze (rys. 4.9b). Natomiast w próbkach poddanych wyżarzaniu normalizującemu (temp. 940°C i czas 1,1 godziny) twardości osiągały wartości najmniejsze, w porównaniu do wszystkich badanych próbek, a ich wartość w całym zakresie materiału przebiegała bez istotnych wahań (rys. 4.9c).

#### **4.4. Badania struktury**

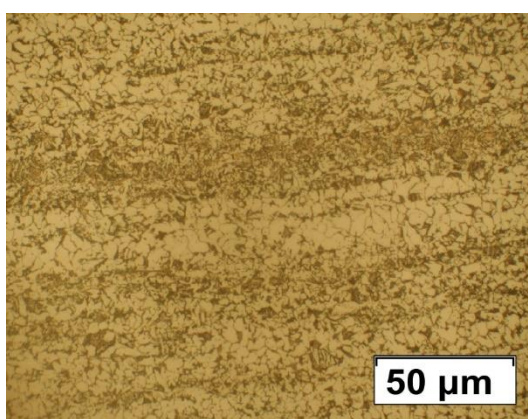
Kolejnym czynnikiem wpływającym na zachowanie się materiału próbek w warunkach obciążeń zmęczeniowych była struktura materiału. Autor pracy świadomie wpływał na budowę struktury wewnętrznej badanego materiału, poprzez liczne procesy związanych z nagrzewaniem oraz chłodzeniem materiału próbek. Spawanie, obróbka cieplna, w tym wyżarzanie, znacząco zmieniają strukturę materiału oraz warunki rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Wprowadzone zmiany struktury umożliwiły wykonanie szeregu badań zmęczeniowych oraz powiązanie ich ze strukturą poprzez badania z użyciem mikroskopu metalograficznego oraz zglądów.

##### **4.4.1. Badania strukturalne próbek spawanych bez obróbki cieplnej**

Materiałem wyjściowym była drobnoziarnista struktura stali S355 w stanie normalizowanym. Mikrostrukturę materiału rodzimego pokazano na rysunku 4.1. Na rysunkach 4.10 – 4.14 przedstawiono strukturę materiału próbki ze złączem spawanym zarówno z wklęsłymi jak i wypukłymi spoinami (spoina i SWC) bez przeprowadzonej obróbki cieplnej. Podążając z materiału rodzimego do materiału spoiny możemy, w wyniku przeprowadzonego procesu spawania wyróżnić szereg struktur. Na rysunku 4.10 możemy zauważyć strefę częściowo przekryształowaną, charakteryzująca się niejednorodną wielkością ziarna o stosunkowo dużych ziarnach ferrytu i znacznie rozdrobnionych ziarnach perlitu. Następnie na rysunku 4.11 pokazano drobnoziarnistą strefa normalizowaną (powstała przy nagrzaniu materiału rodzimego powyżej  $A_3$ ).

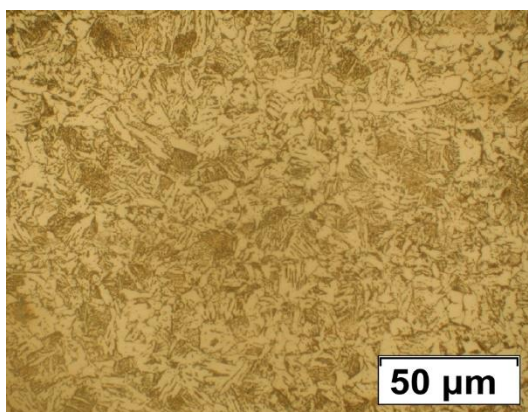


Rys. 4.10. Strefa częściowo przekryształizowana



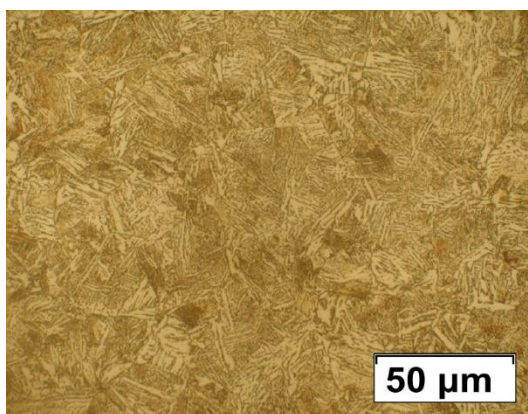
Rys. 4.11. Drobnodziarnista strefa normalizowana

Na kolejnych rysunkach przedstawiono mikrostruktury bainitu dolnego (rys. 4.12) oraz bainitu górnego przechodzącej w strukturę martenzytu (rys. 4.13). Strukturę spoiny przedstawiono na rys. 4.14, która charakteryzowała się budową dendrytyczną z ziarnami w układzie Widmanstattena.

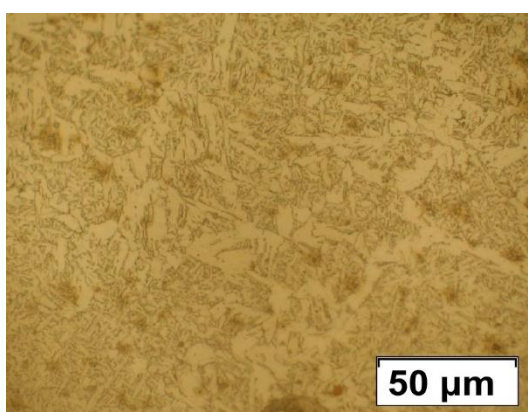


Rys. 4.12. Strefa bainitu dolnego





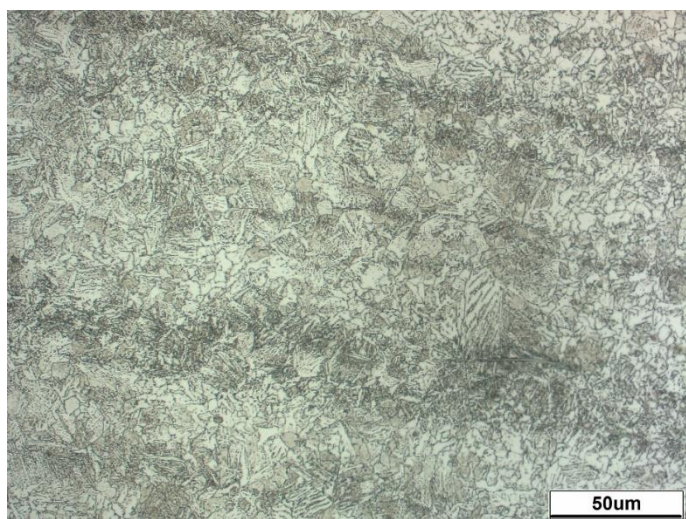
Rys. 4.13. Struktura bainitu górnego oraz martenzytu



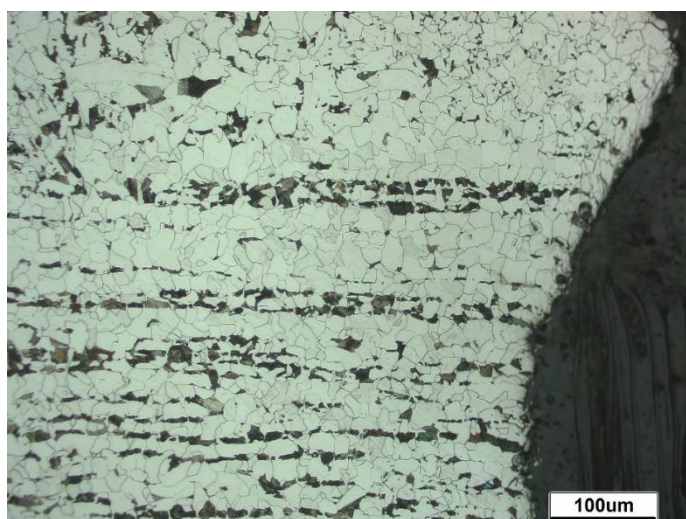
Rys. 4.14. Struktura spoiny o budowie dendrytycznej z ziarnami w układzie Widmanstattena

#### 4.4.2. Badania strukturalne próbek spawanych po obróbce cieplnej

Struktury materiałów próbek po poddaniu ich obróbce cieplnej uległy zmianie. W przypadku pierwszej obróbki cieplnej, gdzie materiał próbki spawanej został poddany wyżarzaniu odprężającemu, charakteryzował się gruboziarnistą strukturą bainitu oraz sorbitu znajdującej się w spoinie oraz strefie wpływu ciepła (SWC). Strukturę tę pokazano na rysunku 4.15. Natomiast w przypadku drugiej obróbki cieplnej polegającej na wyżarzaniu normalizującym, przeprowadzonej na innej grupie próbek w strukturze spoiny oraz SWC wytworzyła się gruboziarnista struktura ferrytu z niewielką ilością perlitu. Na rysunku 4.16 pokazana została struktura po wyżarzaniu normalizującym.



Rys. 4.15. Struktura materiału próbki spawanej po wyżarzaniu odprężającym z gruboziarnistą strukturą bainitu oraz sorbitu (powiększenie 500x)



Rys. 4.16. Struktura materiału próbki spawanej po wyżarzaniu normalizującym z gruboziarnistą strukturą ferrytu z niewielką ilością perlitu (powiększenie 200x)

#### 4.5. Obliczenia numeryczne naprężeń i odkształceń w próbkach

Dynamicznie rosnąca konkurencja jakościowa, ekonomiczna oraz oczekiwania konsumentów wywołują silne naciski na producentów. Są oni zmuszeni do podejmowania działań optymalizacyjnych polegających na wytwarzaniu wyrobów na możliwie najwyższym poziomie jakościowym przy jednoczesnym minimalizowaniu poniesionych kosztów. Doświadczalne badania próbek na maszynach wytrzymałościowych lub zmęczeniowych są drogie oraz czasochłonne. Często ograniczone są też do prostych kształtów próbek. Niemniej jednak otrzymane wyniki z

badan doświadczalnych pozwalają na poznanie zachowania się elementu, materiału, złącza spawanego, itp. w warunkach rzeczywistych, uwzględniających wszelkie niedoskonałości badanego elementu czy struktury materiału. W obecnych czasach poza badaniami doświadczalnymi powszechnie stosuje się obliczenia numeryczne. Obliczenia te pozwalają na prowadzenie analiz naprężeń, odkształceń, przemieszczeń konstrukcji o dowolnym stopniu skomplikowania jej budowy czy wymiarach, pracujących pod obciążeniami stałymi lub zmiennymi. Istotną sprawą jest fakt, że obliczenia numeryczne niestety nie odzwierciedlają w pełni zachowania się konstrukcji czy materiału. Powodem tego są wprowadzane do obliczeń liczne kompromisowe założenia i uproszczenia, takie jak: wielkość pojedynczego elementu skończonego lub brzegowego (z którego wykonano model konstrukcji), przyjęcie materiału idealnie izotropowego, przyjęcie wadliwych założeń wstępnych (miejsc przyłożenia oraz wartości obciążeń, itp.). Obliczenia numeryczne prowadzone przez osoby nie posiadające znajomości podstaw badanego zagadnienia czasami prowadzą do uzyskania wyników całkowicie błędnych. Z tego powodu wyniki uzyskane z obliczeń numerycznych często weryfikowane są wynikami uzyskanymi z badań doświadczalnych.

W niniejszej pracy autor równolegle z badaniami doświadczalnymi na maszynie zmęczeniowej prowadził obliczenia numeryczne. Obliczenia te umożliwiły weryfikację równań przyjętych do analitycznych obliczeń, między innymi pozwoliły porównać wartości współczynników intensywności naprężenia  $\Delta K$  w funkcji wzrostu pęknięć. Wyniki tej analizy autor przedstawił w pracy [145].

Modele próbek użytych do obliczeń numerycznych wykonano w programie ABAQUS. Program ten użyty został do budowy modeli próbek oraz obliczeń numerycznych, z których otrzymano wyniki w postaci map naprężeń, odkształceń lub tabel. Z uwagi na ograniczenie programu ABAQUS, polegające na braku możliwości inicjowania pęknięć oraz generowanie ścieżek pęknięcia, użyto programu FRANC3D. Możliwości programu FRANC3D pozwalają między innymi na generowanie wzrostu pęknięć o zadanej wartości oraz obliczenia współczynników intensywności naprężenia. Procedura wykonanych obliczeń numerycznych przebiegała w następujący sposób:

- z użyciem programu ABAQUS wykonano trzy modele próbek bez pęknięć, które stanowiły podstawę do dalszych obliczeń,
- z użyciem programu ABAQUS przeprowadzono pierwsze obliczenia numeryczne, w wyniku których otrzymano mapy naprężeń badanych próbek bez pęknięć,

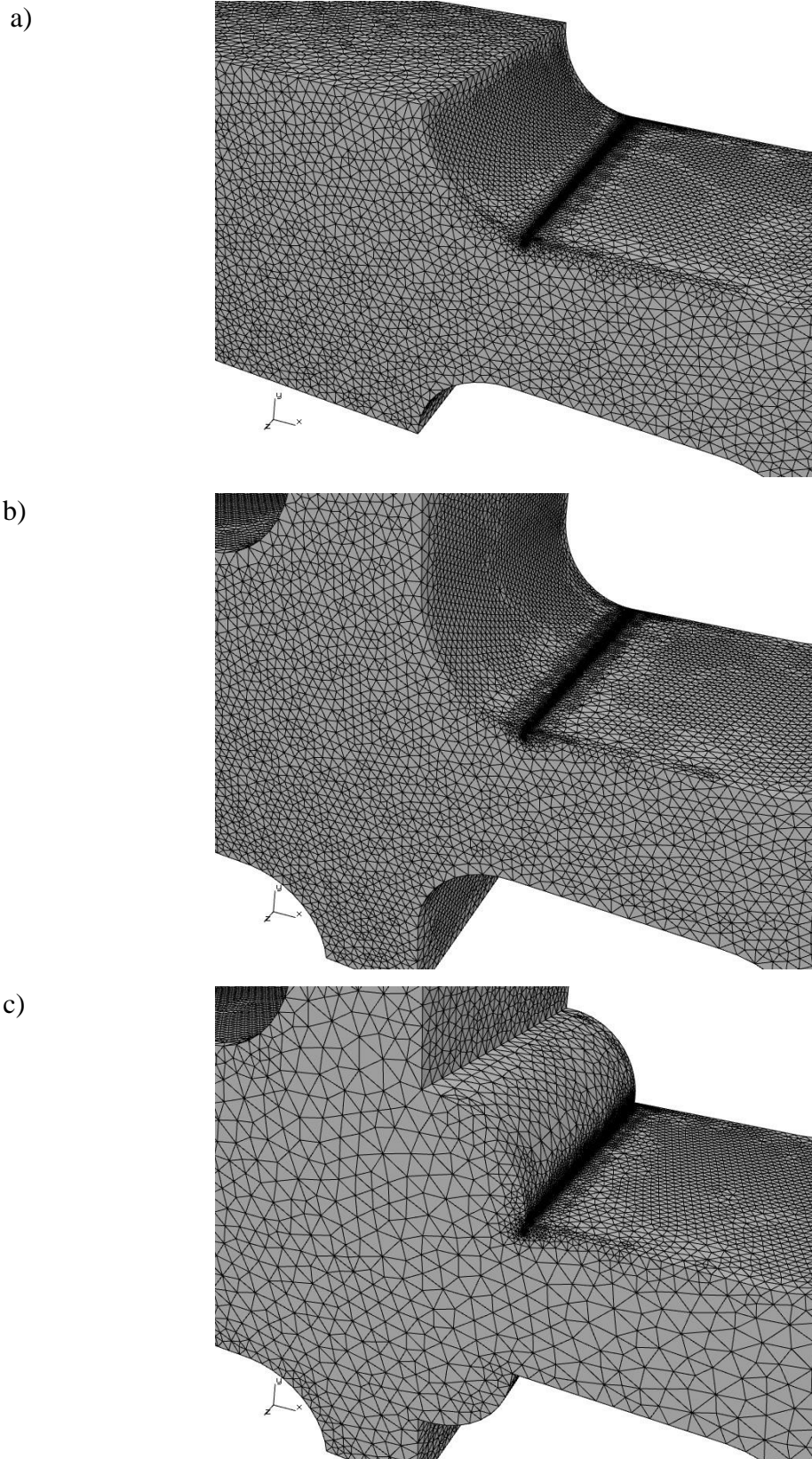
- pliki z modelami zostały eksportowane do programu FRANC3D, gdzie na górnej powierzchni, w dnie karbu zamodelowano pęknięcia o ustalonej długości  $a = 0,10$  mm przebiegające prostopadle do długości próbek,
- po utworzeniu pęknięcia (inicjacji pęknięcia) przeprowadzono, w programie FRANC3D obliczenia współczynników intensywności naprężenia dla danej długości pęknięcia,
- modele z pęknięciami o długości  $a = 0,10$  mm przeniesiono do programu ABAQUS w celu wykonania obliczeń numerycznych pozwalających otrzymać mapy naprężeń w badanych próbkach,
- w kolejnych etapach, w sposób powtarzający się, z użyciem programu FRANC3D generowano kolejne długości wzrostów pęknięć, wyliczano współczynniki intensywności naprężenia oraz obliczano naprężenia z zastosowaniem programu ABAQUS.

Na rysunku 4.17 pokazano modele próbek, w których widoczne są siatki elementów skończonych oraz zamodelowane pęknięcie o długości 0,10 mm. Modele te stanowiły bazę do dalszych obliczeń, zarówno przy zginaniu, jak i przy zginaniu ze skręcaniem. Wszystkie siatki zbudowane zostały z czworokątów o następujących wielkościach elementu skończonego oraz liczbie węzłów:

- model próbki litej: liczba elementów skończonych 199527, liczba węzłów 310583,
- model próbki spawanej z wklęsłymi spoinami: liczba elementów skończonych 308026, liczba węzłów 471699,
- model próbki spawanej z wypukłymi spoinami: liczba elementów skończonych 302092, liczba węzłów 468178.

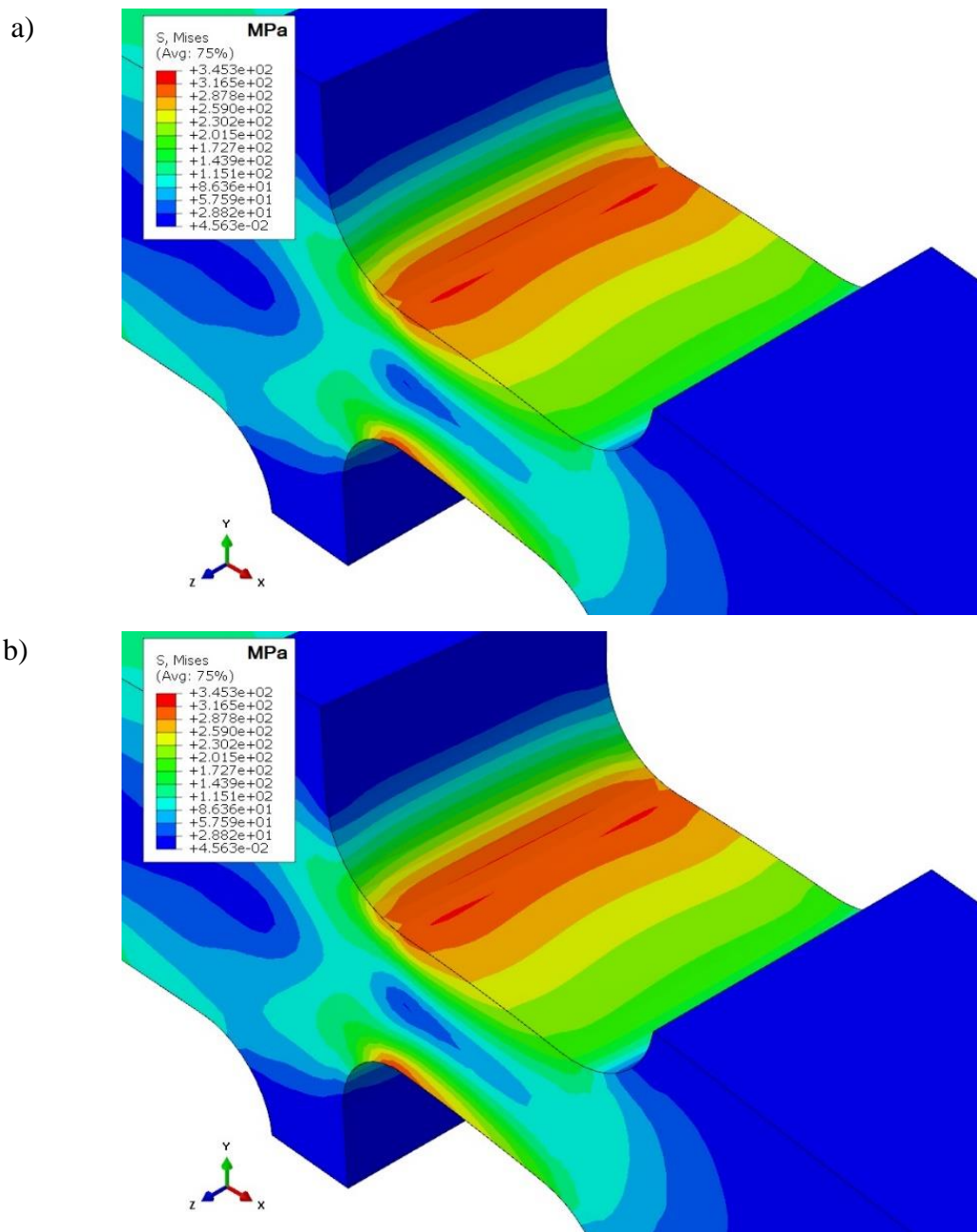
W trakcie obliczeń numerycznych, w obszarze gdzie następował wzrost długość pęknięcia zwiększała się również liczba elementów skończonych oraz liczba węzłów.

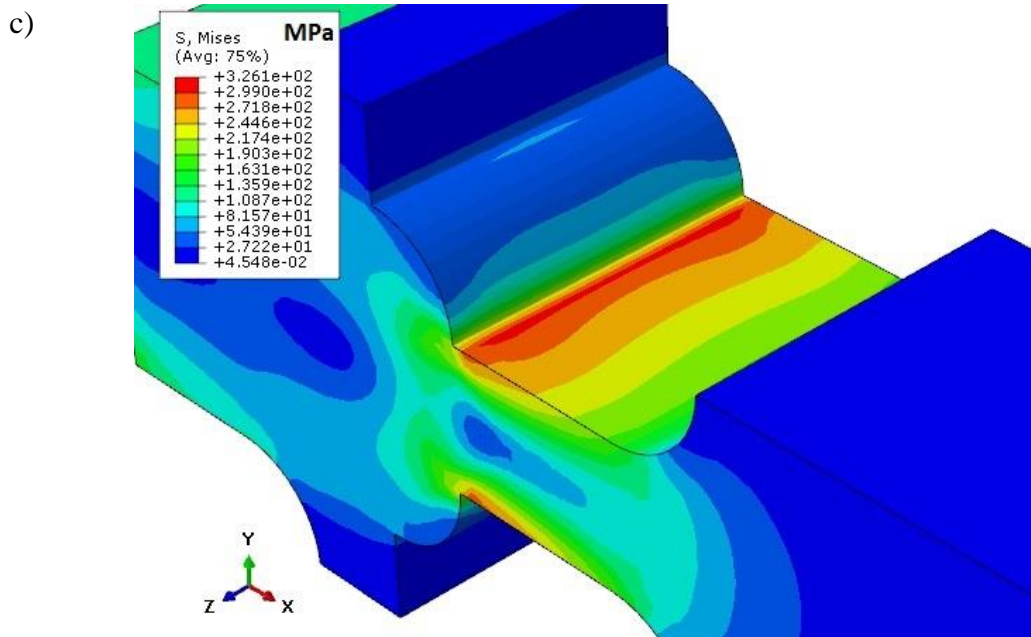




Rys. 4.17. Modele próbek z siatkami elementów skończonych oraz zamodelowanym pęknięciem o długości 0,10 mm, gdzie: a) model próbki litej, b) model próbki spawanej z wklęsłymi spoinami, c) model próbki spawanej z wypukłymi spoinami

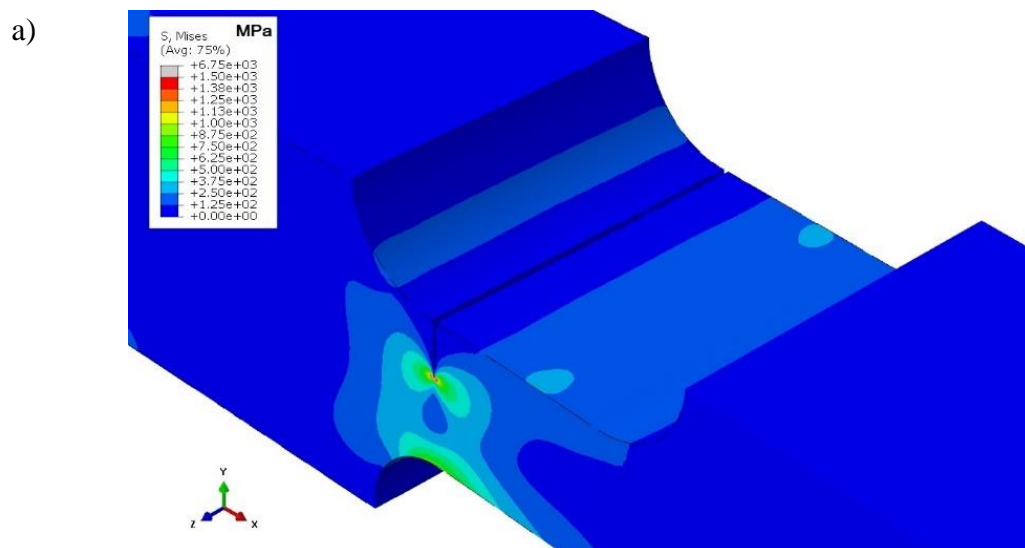
Obliczenia numeryczne próbek poddanych zginaniu (model) zostały obciążone momentem  $M_B = 9,20 \text{ Nm}$ , w przypadku współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1$ . Dla obliczeń uwzględniających wartość średnią ( $M_m$ ), czyli współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$  moment zginający wyniósł  $M_{\max} = M_a + M_m = 18,4 \text{ Nm}$ . Na rysunku 4.18 pokazano przykładowe rozkłady naprężeń (według Hubera-Misesa) dla obciążenia  $M_B = 9,20 \text{ N}\cdot\text{m}$  przy zginaniu bez pęknięcia dla: próbki litej, próbki spawanej z wklęsłymi spoinami, próbki spawanej z wypukłymi spoinami.

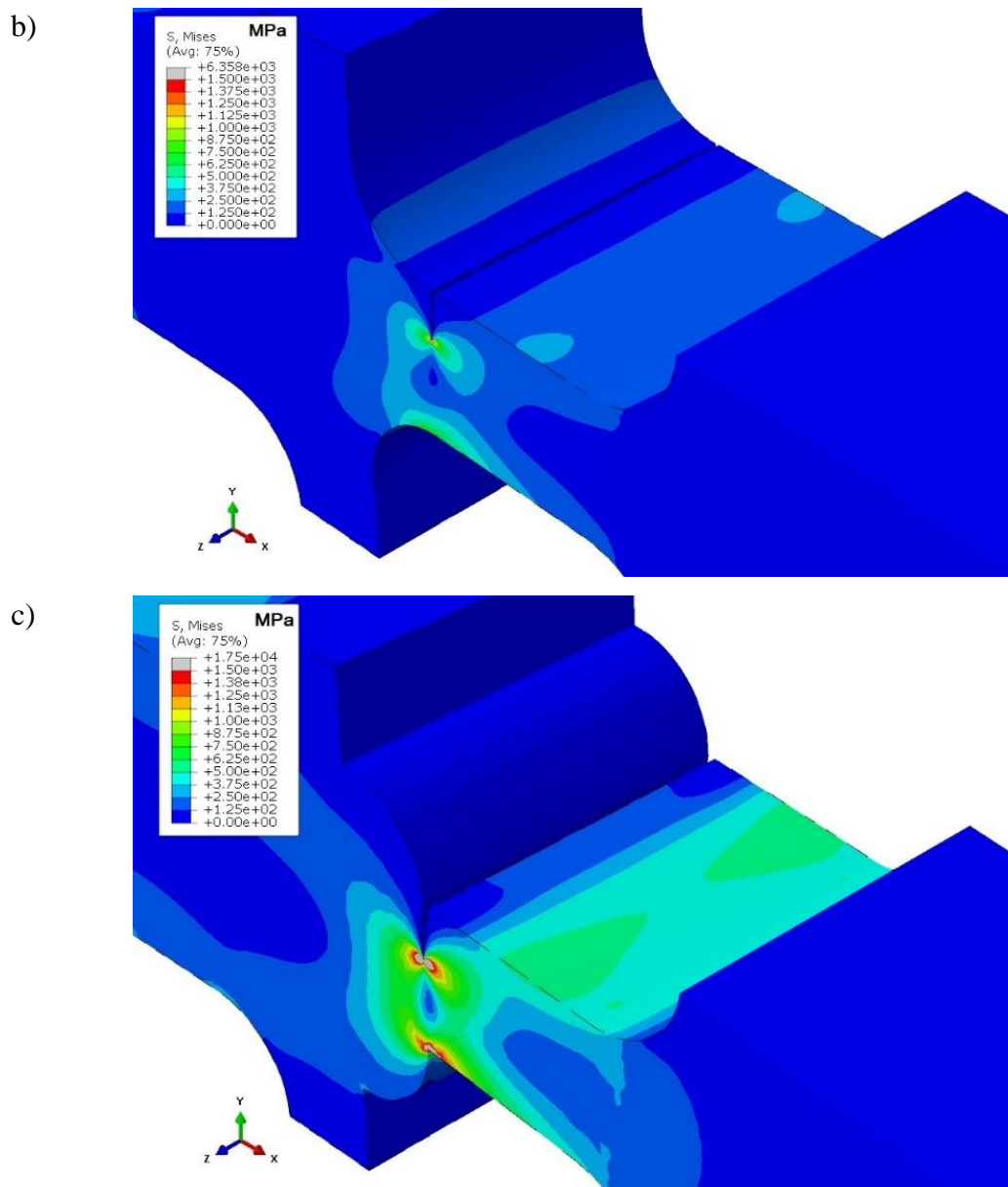




Rys. 4.18. Rozkłady naprężeń (według Hubera-Misesa) dla obciążenia  $M_B = 9,20 \text{ N}\cdot\text{m}$  przy zginaniu dla próbek bez pęknięcia a) litej, b) z wklęsłymi spoinami c) z wypukłymi spoinami

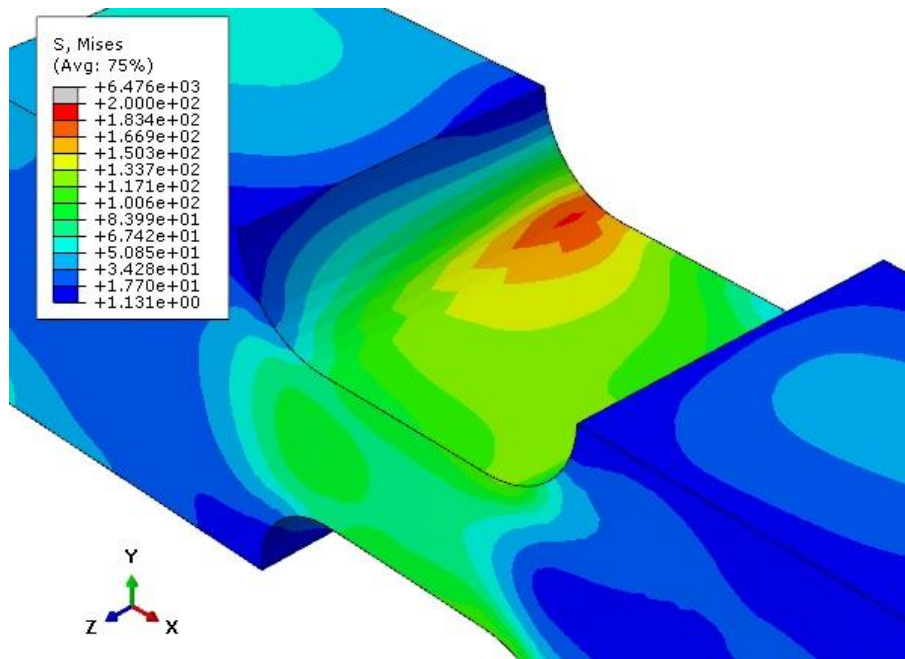
Na rysunku 4.19 pokazano przykładowe rozkłady naprężeń (według Hubera-Misesa) dla obciążenia  $M_B = 9,20 \text{ N}\cdot\text{m}$ , przy zginaniu o długości pęknięcia dla: próbki litej  $a = 1,80 \text{ mm}$ , próbki z wklęsłymi spoinami  $a = 1,48 \text{ mm}$ , próbki z wypukłymi spoinami  $a = 1,70 \text{ mm}$ .



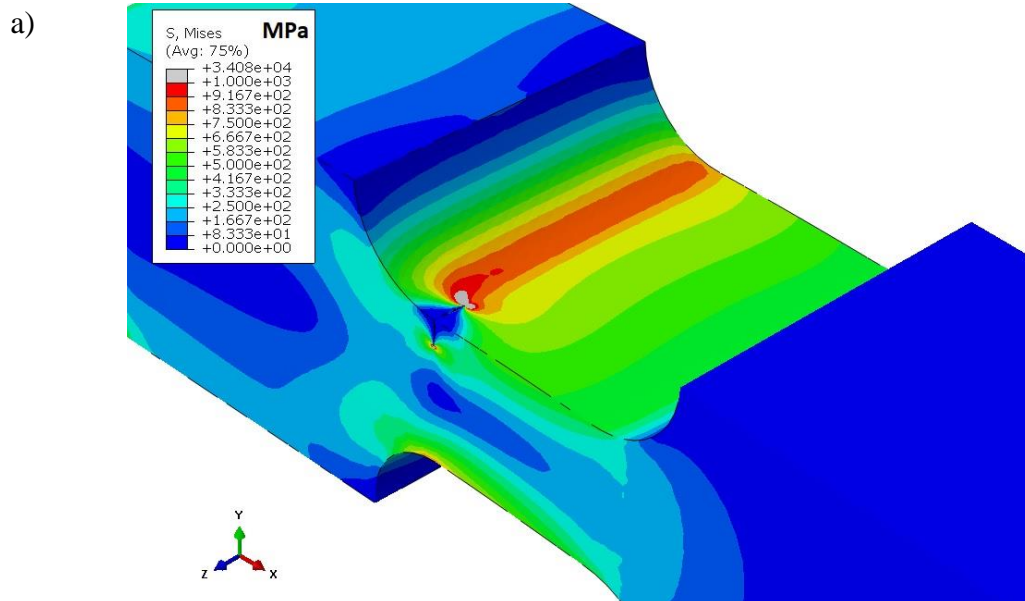


Rys. 4.19. Rozkłady naprężeń (według Hubera-Misesa) dla obciążenia  $M_B = 9,20$  N·m, przy zginaniu o długości pęknięcia dla próbki: a) litej  $a = 1,80$  mm, b) z wklęsłymi spoinami  $a = 1,48$  mm, c) z wypukłymi spoinami  $a = 1,70$  mm

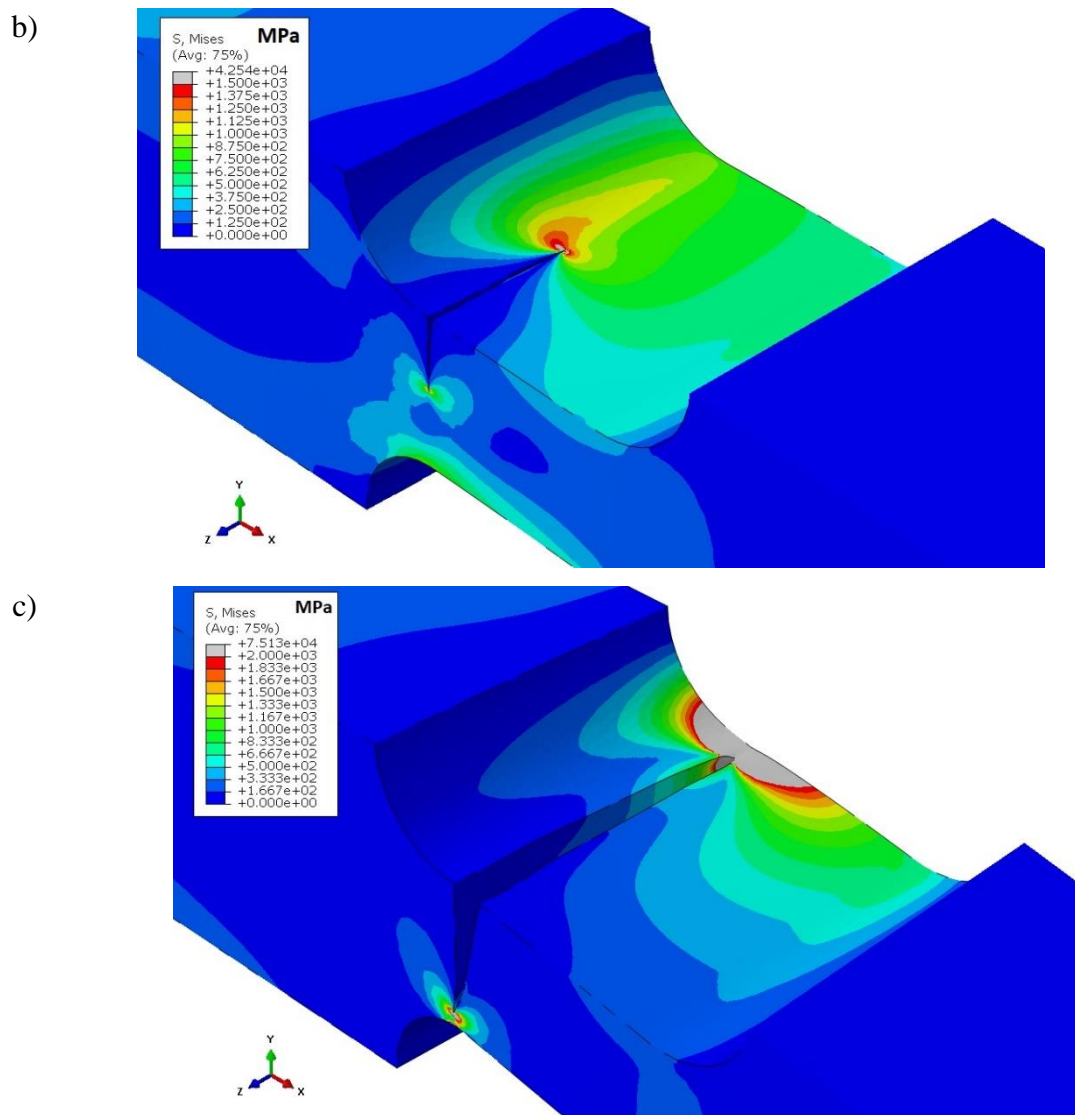
Dla realizacji obliczeń z proporcjonalnym zginaniem ze skręcaniem moment został ustalony, tak aby stosunek momentu skręcającego do momentu zginającego wynosił  $M_T(t) / M_B(t) = \tan \alpha$  (gdzie  $\alpha = 45^\circ$ ). Sumaryczny moment wynosił  $M(t) = M_B(t) + M_T(t)$ . Przykładowe wyniki obliczeń, dla próbki litej bez uszkodzenia dla  $R = -1$  przedstawiono na rysunku 4.20. Natomiast wynik obliczeń z kolejnymi etapami wzrostu pęknięć na rysunku 4.21.



Rys. 4.20. Przykładowy wynik rozkłady naprężeń (według Hubera-Misesa) dla obciążenia  $M_B + M_T$  ( $R = -1$ ), przy zginaniu ze skręcaniem próbki litej bez pęknięcia







Rys. 4.21. Etapy wzrostu pęknięć oraz wynik rozkłady naprężeń (według Hubera-Misesa) dla obciążenia  $M_B + M_T$  ( $R = -1$ ), przy zginaniu ze skręcaniem dla próbki litej i długości pęknięć: a)  $a = 0,30$  mm, b)  $a = 1,7$  mm, c)  $a = 4$  mm

#### 4.6. Badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych

Najważniejszą oraz najbardziej czasochłonną częścią pracy, zdaniem autora było przeprowadzenie doświadczalnych badań na maszynie zmęczeniowej. Próbki, zamocowane w uchwytach maszyny zmęczeniowej z jednej strony utwierdzone, a z drugiej strony poprzez ruchomą dźwignię poddawane były zginaniu i proporcjonalnemu zginaniu ze skręcaniem przy stałej amplitudzie momentu  $M_a = M_B = M_T = M_{B+T} = 9,20$  N·m, która odpowiada nominalnej amplitudzie naprężenia normalnego  $\sigma_a = 383$  MPa przy zginaniu (do inicjacji pęknięcia). Kontrolę amplitudy momentu  $M_a$  prowadzono przy

pomocy komputera (programu LabVIEW), który rejestrował przebieg zmian momentu podczas całego cyklu badań.

#### 4.5.1. Badania próbek litych i spawanych bez obróbki cieplnej przy zginaniu

W podrozdziale tym przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych próbek litych oraz spawanych poddanych zginaniu dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1, 0$ . W pierwszej kolejności, na rysunku 4.22 zaprezentowano wyniki rozwoju pęknięć zmęczeniowych w postaci wykresów długości pęknięć w funkcji liczby cykli,  $a = f(N)$  oraz wykresów prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$ ,  $da/dN = f(\Delta J)$  (rysunek 4.23).

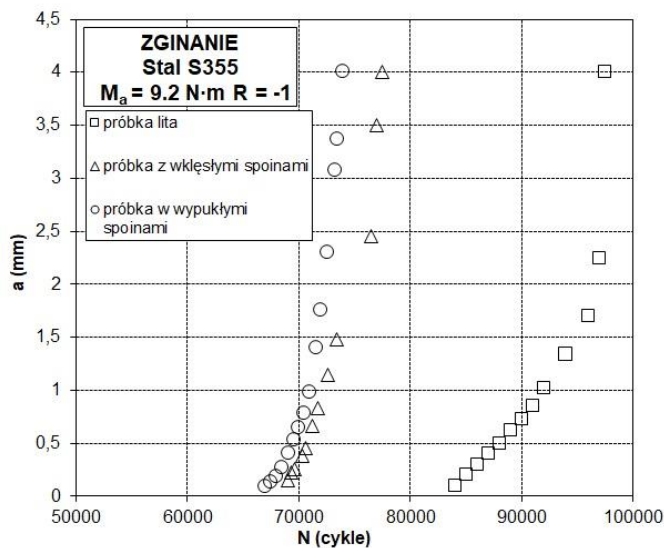
Na podstawie wykonanych serii badań doświadczalnych (od 3 - 5 próbek na każdym poziomie) otrzymano wykresy obrazujące inicjację oraz kolejne przyrosty długości pęknięć zmęczeniowych (aż do zniszczenia próbek) w funkcji liczby cykli dla próbek litych oraz ze spoinami wklęsłymi i wypukłymi (rys. 4.22). Na rys. 4.22a, podczas badań przy współczynniku asymetrii cyklu  $R = -1$ , można zauważyć, że najmniejsze trwałości zmęczeniowe wykazały próbki z wypukłymi spoinami. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 67000 cykli. Dalszy rozwój pęknięcia następował dość szybko i przy liczbie 74000 cykli próbka uległa zniszczeniu z rozrzutem wyników do 8%. Próbka z wklęsłymi spoinami w momencie wykrycia pęknięcia o długości 0,15 mm wykonała 69000 cykli. Rozwój pęknięcia następował z podobną prędkością, w porównaniu do rozwoju pęknięcia próbek z wypukłymi spoinami. Przy liczbie cykli 77500 próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 6%. Próbka lite wykazała największą trwałości zmęczeniową w porównaniu do próbek spawanych. Inicjacja pęknięcia (0,10 mm) występowała po 84000 cykli i była wyższa niż w próbkach spawanych. Rozwój pęknięcia następował w wolniejszym tempie niż w próbkach spawanych, a przy liczbie 97500 cykli próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 7%. Różnica w trwałości pomiędzy próbkami z materiału litego, a próbkami z wklęsłymi spoinami wynosiła 20000 cykli (rozrzut wyników 26%). Różnica w trwałości pomiędzy próbkami z materiału litego, a próbkami z wypukłymi spoinami była większa o 24000 cykli (rozrzut wyników 32%). Na rys. 4.22b pokazano wyniki badań dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$ . Dla wszystkich próbek trwałości uległy znacznemu obniżeniu, które spowodowane było pojawieniem się wartości średniej obciążenia. Widać wyraźnie, że i w tym przypadku próbki lite wykazywały największe trwałości. Inicjacja pęknięć następowała zazwyczaj

przy liczbie 14000 cykli, a zniszczenie próbki przy 19000 cykli z rozrzutem wyników do 9%. Próbki ze spoinami wklęsłymi trwałością zbliżyły się do trwałości próbek litych, ich pęknięcia pojawiały się przy liczbie 13000 cykli, a zniszczenie w okolicach 18000 cykli z rozrzutem wyników do 8%. Najmniejsze trwałości wykazały próbki ze spoinami wypukłymi, gdzie przy liczbie 8500 cykli najczęściej następowała inicjacja pęknięcia, a zniszczenie próbki przy 13500 cykli. Różnica w trwałości pomiędzy próbkami z materiału litego, a próbkami z wklęsłymi spoinami wynosiła 1000 cykli. Różnica w trwałości pomiędzy próbkami z materiału litego, a próbkami z wypukłymi spoinami była większa o 6500 cykli (rozrzut wyników 41%). Niezależnie od zastosowanego współczynnika asymetrii cyku wyraźnie widać różnicę pomiędzy trwałością próbek z litego materiału i próbek spawanych, przy tych samych badanych przekrojach i zastosowanym obciążeniu.

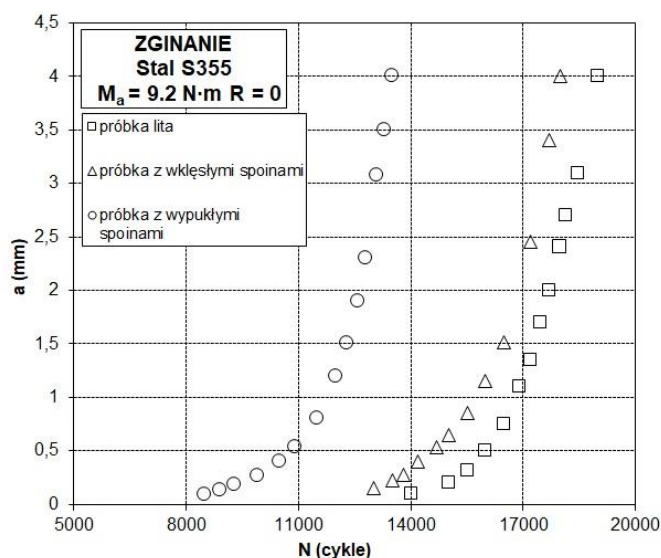
Na rysunku 4.23 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w postaci wykresów prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych  $da/dN$  w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$ . Na podstawie rys. 4.23a można zauważyć (dla  $R = -1$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięć zmęczeniowych  $da/dN = 1,00 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość  $da/dN = 1,85 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Próbki spawane prędkości początkowe mają zbliżone, dla próbek ze spoinami wklęsłymi  $da/dN = 1,33 \cdot 10^{-7}$  m/cykl oraz dla próbek ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 1,20 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Natomiast, w przypadku próbek ze spoinami wypukłymi prędkość pęknięć wzrasta do wartości  $da/dN = 5,20 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, gdzie w przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi prędkości pęknięć osiągają wartość  $da/dN = 4,13 \cdot 10^{-7}$  m/cykl.



a)



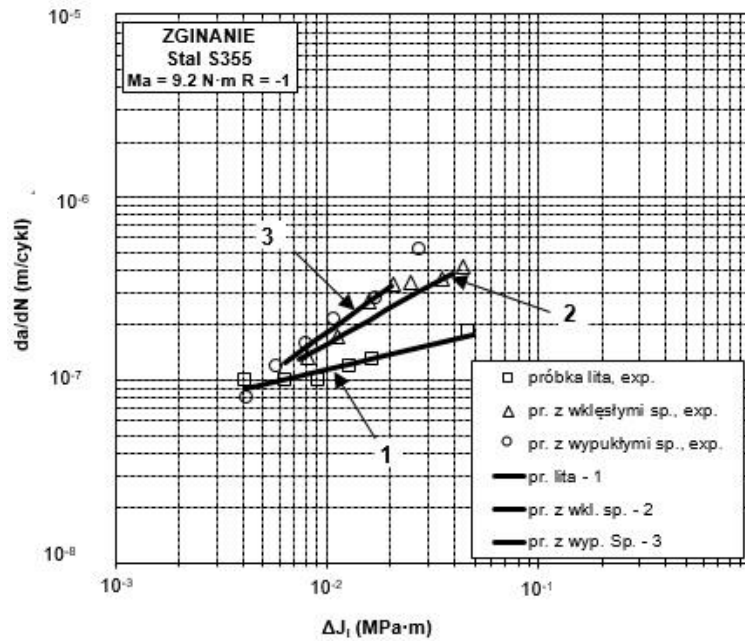
b)



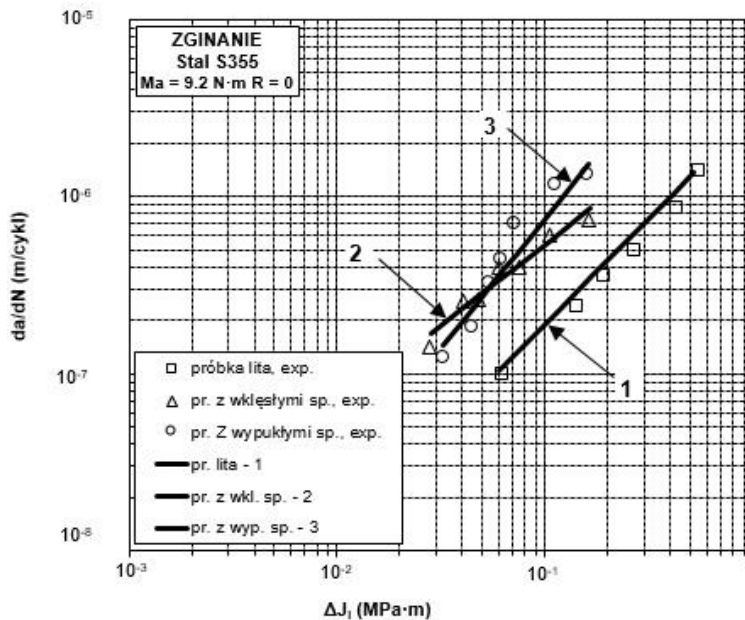
Rys. 4.22. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Na rysunku 4.23b widać (dla  $R = 0$ ), że próbka lita w momencie po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięcia  $da/dN = 1,00 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość  $da/dN = 1,4 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. W próbach ze spoinami wklęsłymi prędkość początkowa pęknięcia wynosi  $da/dN = 1,40 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbek ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 1,25 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Prędkości pęknięcia, w przypadku próbek ze spoinami wypukłymi osiągają wartości  $da/dN = 1,33 \cdot 10^{-6}$  m/cykl, gdzie w przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi prędkości te osiągają wartość  $da/dN = 7,40 \cdot 10^{-6}$  m/cykl.

a)



b)



Rys. 4.23. Prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych doświadczalnych i obliczonych według równania (4.1) dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

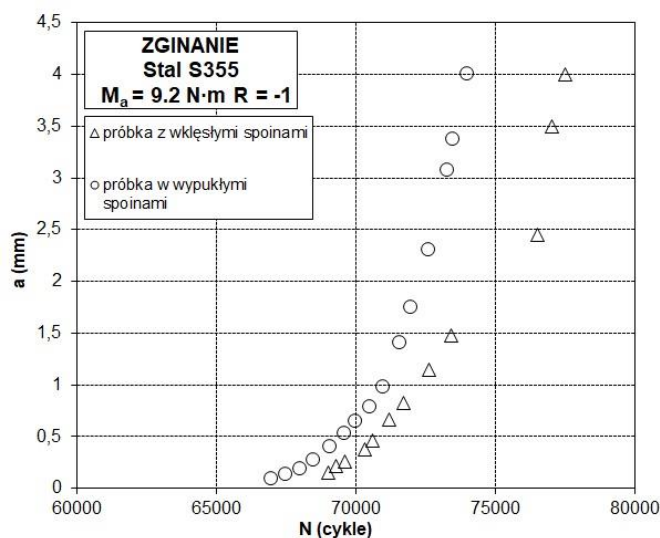
Występujące we wzorze (4.1) współczynniki  $C$  i  $m$  wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych obliczono metodą najmniejszych kwadratów oraz przedstawiono w tabeli 4.2, w której również podano współczynniki korelacji  $r$ . Wyniki badań dla zginania obarczone są błędem względnym nieprzekraczającym 9% na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Współczynniki korelacji  $r$ , we wszystkich przypadkach przyjmują duże wartości, co świadczy o istotnej korelacji wyników badań doświadczalnych z przyjętym równaniem (4,1).

Tabela. 4.2. Współczynniki C i m równania (4.1) i współczynniki korelacji r dla wykresów pokazanych na rysunku 4.23

Rysunek	Wykres	R	C, $m/(MPa \cdot m)^{-m}$ cykl	m	r
4.23a	1	-1	$4,037 \cdot 10^{-7}$	0,273	0,999
4.23a	2	-1	$3,068 \cdot 10^{-6}$	0,643	0,990
4.23a	3	-1	$8,179 \cdot 10^{-6}$	0,824	0,990
4.23b	1	0	$2,999 \cdot 10^{-6}$	1,196	0,998
4.23b	2	0	$4,551 \cdot 10^{-6}$	0,925	0,999
4.23b	3	0	$2,262 \cdot 10^{-5}$	1,473	0,999

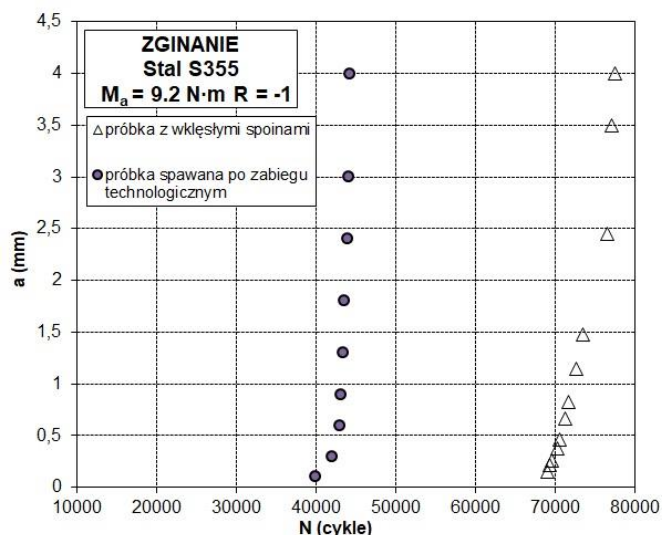
W celu poznania zachowania się oraz określenia trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych wykonano badania próbek z teowymi złączami spawanymi z uwzględnieniem zabiegu technologicznego. Zabieg technologiczny polegał na frezowaniu i szlifowaniu spoin wypukłych w próbkach. W wyniku obróbki skrawaniem uzyskano kształt spoin pokazanych na rysunku 4.2b, a następnie próbki poddano badaniom zmęczeniowym. Rezultaty tych badań pokazano na rysunku 4.24 i 4.25. Na rys. 4.24 porównano wyniki z badań próbek ze spoiną wklęsłą i wypukłą (lica surowe - po spawaniu), natomiast na rys. 4.25 porównano wyniki badań ze spoinami wklęsłymi (lica surowe - po spawaniu) oraz otrzymanymi po zabiegu technologicznym (kształt lica spoiny również wklęsły ale po obróbce skrawaniem).

Na podstawie rys. 4.24 można zauważyć, że dla próbek z licami spoin bez zabiegów technologicznych, najmniejsze trwałości zmęczeniowe wykazały próbki z wypukłymi spoinami. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 67000 cykli. Początkowy rozwój pęknięcia (do 1 mm) następował w wolniejszym tempie, natomiast dalszy wzrost pęknięcia przebiegał w szybkim tempie i przy liczbie 74000 cykli próbki ulegały zniszczeniu. Próbki ze spoinami wklęsłymi wykazywały większe trwałości zmęczeniowe w porównaniu do próbek ze spoinami wypukłymi, w których inicjacja pęknięć następowała przy liczbie cykli 69000, a ich zniszczenie przy liczbie cykli 77500.



Rys. 4.24. Długości pęknięć zmęczeniowych w funkcji liczby cykli badanych próbek ze spoinami wklęsłymi i wypukłymi poddanych zginaniu

Na rys. 4.25 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych próbek ze spoinami wklęsłymi (te same próbki co na rys. 4.24) bez oraz po zabiegu technologicznym. Można zaobserwować na rys. 4.25, że dla próbek ze spoinami po zabiegu technologicznym trwałości zmęczeniowe były niższe w porównaniu do próbek bez zabiegu technologicznego. W próbce po przeprowadzonym zabiegu technologicznym inicjacja pęknięć (0,10 mm) nastąpiła przy 36000 cykli. Wzrost pęknięć następowały w szybkim tempie i przy liczbie 41000 cykli próbka ulegały zniszczeniu. Natomiast, tak jak opisano wcześniej, próbki bez zabiegu technologicznego ze spoinami wklęsłymi, wykazywały największą trwałość zmęczeniową w porównaniu próbek spawanych. Różnice trwałości zmęczeniowych pomiędzy próbkami bez zabiegu technologicznego (próbki z wklęsłą oraz wypukłą spoiną) przedstawione na rys. 4.24 były stosunkowo nieduże w porównaniu do różnic trwałości zmęczeniowych badanych próbek ze spoinami wklęsłymi bez oraz po zabiegu technologicznym (ZT) przedstawione na rys. 4.25. Spadek trwałości zmęczeniowych próbek ze spoinami wypukłymi (rys. 4.24) wynosił 3500 cykli (co stanowiło obniżenie trwałości o 4,5%) w porównaniu do próbek ze spoinami wklęsłymi bez ZT.



Rys. 4.25. Długości pęknięć zmęczeniowych w funkcji liczby cykli badanych próbek ze spoinami wklęsłymi bez i po zabiegu technologicznym poddanych zginaniu

Natomiast spadek trwałości zmęczeniowych próbek po zabiegu technologicznym wynosił 36500 cykli (co spowodowało spadek o 47%) w porównaniu do próbek ze spoinami wklęsłymi otrzymanymi bezpośrednio ze spawania. Spadek trwałości próbek ze spoinami wypukłymi [70, 147] związany jest głównie z kształtem spoin, ostrym karbem powodującym większą koncentrację naprężeń w obszarze przejścia materiału rodzimego w spoinę. Znaczne obniżenie trwałości zmęczeniowych badanych próbek po zabiegu technologicznym mogło być spowodowane tym, że w trakcie obróbki mechanicznej (frezowania i szlifowania) spoin wypukłych zostało wprowadzone w obszar połączenia spawanego dodatkowe ciepło, co mogło spowodować zmiany w strukturze złącza. Kolejnym powodem mogącym mieć wpływ na znaczne obniżenie tej trwałości było zmniejszenie przekroju poprzecznego spoiny poprzez usunięcie całego nadlewku spoiny ze złącza spawanego. Możliwe jest również, że poprzez zabieg technologiczny odsłonięte zostały mikropęknięcia w spoinie ukryte w nadlewku pierwotnej spoiny wypukłej.

#### 4.5.2. Badania próbek litych i spawanych po obróbce cieplnej przy zginaniu

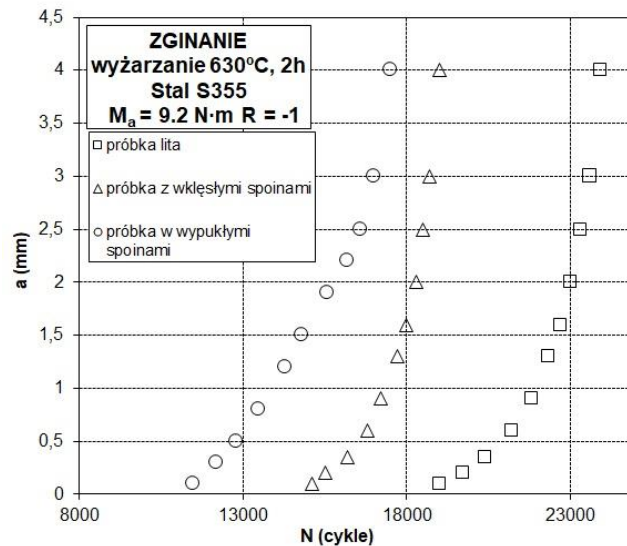
W podrozdziale tym przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych próbek litych oraz spawanych poddanych zginaniu dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1, 0$  poddanych obróbce cieplnej tj.: wyżarzaniu odprężającemu i normalizującemu. Na

rysunku 4.26 zaprezentowano wyniki długości pęknięć w funkcji liczby cykli,  $a = f(N)$  dla  $R = -1$  i  $0$  po wyżarzaniu odprężającym w temperaturze  $630^{\circ}\text{C}$  wygrzewane przez 2 godziny. Z przeprowadzonych badań ze współczynnikiem asymetrii cyklu  $R = -1$ , można stwierdzić (rys. 4.26a), że najmniejszą trwałość zmęczeniową wykazała próbka z wypukłymi spoinami. Inicjacja pęknięć ( $0,10$  mm) następowała przy 11500 cykli, a przy liczbie 17500 cykli próbka uległa zniszczeniu z rozrzutem wyników do 8%. Próbka z wklęsłymi spoinami w momencie wykrycia pęknięcia o długości  $0,10$  mm wykonała 15100 cykli. Rozwój pęknięcia następował z podobną prędkością, w porównaniu do rozwoju pęknięcia próbki z wypukłymi spoinami. Przy liczbie cykli 19000 próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 8%. Próbka lita wykazała największą trwałość zmęczeniową w porównaniu do próbek spawanych. Inicjacja pęknięcia ( $0,10$  mm) występowała po 19000 cykli i była wyższa niż w próbkach spawanych. Rozwój pęknięcia następował w wolniejszym tempie niż w próbkach spawanych, a przy liczbie 23900 cykli próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 7%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbkami z wklęsłymi spoinami wynosiła 4900 cykli (rozrzut wyników 26%). Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wypukłymi spoinami była większa o 6400 cykli (rozrzut wyników 37%). Na rysunku 4.26b pokazano wyniki badań dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$ . Dla wszystkich próbek trwałości uległy dalszemu obniżeniu, które spowodowane było pojawieniem się dodatkowej wartości średniej obciążenia. Próbka lita wykazała największe trwałości podobnie jak na rys. 4.26a. Inicjacja pęknięć następowała zazwyczaj przy liczbie 9900 cykli, a zniszczenie próbki przy 12000 cykli z rozrzutem wyników do 8%. W próbce ze spoinami wklęsłymi pęknięcie pojawiało się przy liczbie 2200 cykli, a zniszczenie w okolicach 5400 cykli z rozrzutem wyników do 6%. Najmniejsze trwałości wykazała próbka ze spoinami wypukłymi, gdzie przy liczbie 2000 cykli wystąpiła inicjacja pęknięcia, a zniszczenie próbki przy 4800 cykli z rozrzutem wyników do 5%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wklęsłymi spoinami wynosiła 6600 cykli. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wypukłymi spoinami była większa o 7200 cykli.

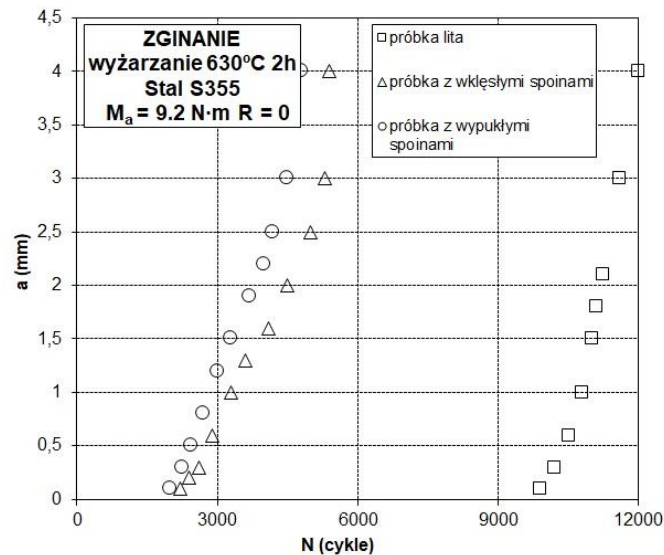
Wyniki badań doświadczalnych w postaci wykresów prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych  $da/dN$  w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$  przedstawiono na rysunku 4.27. Można zauważyć (dla  $R = -1$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięć zmęczeniowych  $da/dN = 1,00 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość  $da/dN = 1,25 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Próbki spawane mają prędkość

początkową taką samą, która wyniosła  $da/dN = 1,8 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Natomiast, prędkość pęknięcia w trakcie wzrostu pęknięć osiągała różne wartości. W przypadku próbki ze spoinami wypukłymi prędkość pęknięcia wzrasta do wartości  $da/dN = 7,00 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, gdzie w przypadku próbki ze spoinami wklęsłymi prędkość pęknięcia osiągały wartość  $da/dN = 1,16 \cdot 10^{-6}$  m/cykl.

a)



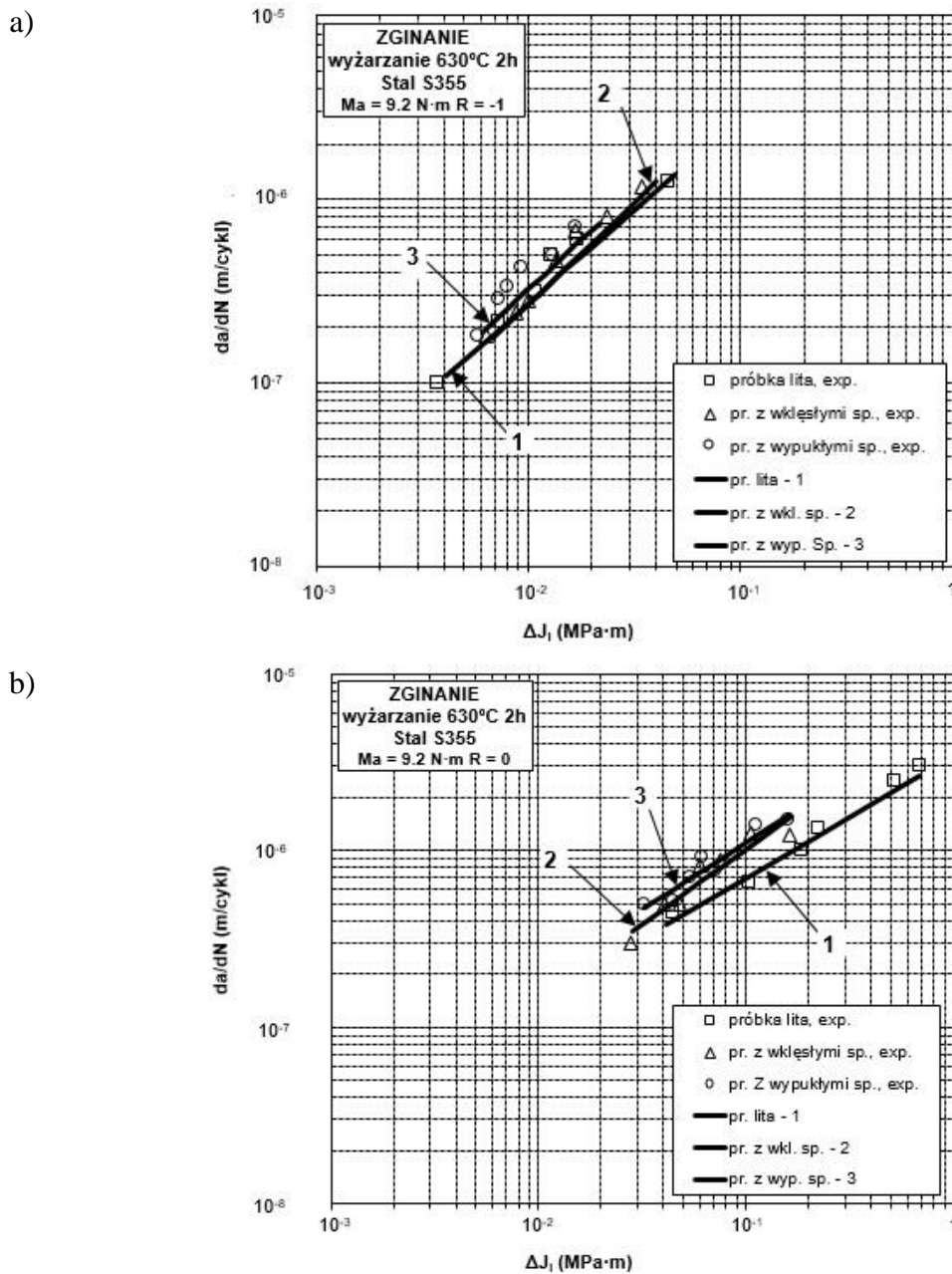
b)



Rys. 4.26. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli, dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Na rysunku 4.27b można zauważyć (dla  $R = 0$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięcia  $da/dN = 4,50 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość ta wynosiła  $da/dN = 3,0 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. W próbce ze spoinami wklęsłymi prędkość początkowa pęknięcia wynosi  $da/dN = 3,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbki

ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 5,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Prędkości pęknięcia, w przypadku próbek ze spoinami wypukłymi osiągają wartości maksymalne  $da/dN = 1,50 \cdot 10^{-6}$  m/cykl, gdzie w przypadku próbki ze spoinami wklęsłymi prędkość ta osiąga wartość  $da/dN = 1,24 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Na rys. 4.27 można również zauważyć dla  $R = -1$  bardzo dobrą korelację wyników badań dla różnych próbek z wynikami obliczonymi, co



Rys. 4.27. Wyniki eksperymentalne prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych porównane z obliczonymi według równania (4.1) dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$



mogło być spowodowane obróbką cieplną. Porównując wyniki dla współczynników  $R = -1$  i  $0$  można zaobserwować wzrost prędkości dla  $R = 0$  we wszystkich przypadkach.

Można również zauważyć, że w próbkach po obróbce cieplnej w porównaniu z próbkami bez obróbki cieplnej prędkości dla różnych próbek i  $R = -1$  są zbieżne.

Współczynniki  $C$  i  $m$  wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych obliczono metodą najmniejszych kwadratów i przedstawiono w tabeli 4.3, w której również podano współczynniki korelacji  $r$ . Wyniki badań dla zginania obarczone są błędem względnym nieprzekraczającym 9% na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

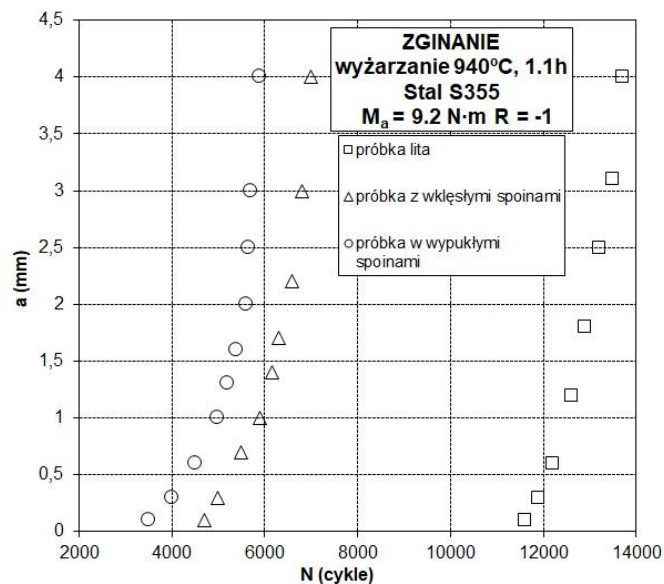
Tabela. 4.3. Współczynniki  $C$  i  $m$  równania (4.1) i współczynniki korelacji  $r$  dla wykresów pokazanych na rysunku 4.27

Rysunek	Wykres	R	$C,$ $m/(MPa \cdot m)^{-m}$ cykl	$m$	$r$
4.27a	1	-1	$3,010 \cdot 10^{-5}$	1,023	0,999
4.27a	2	-1	$4,412 \cdot 10^{-5}$	1,108	0,999
4.27a	3	-1	$4,637 \cdot 10^{-5}$	1,078	0,998
4.27b	1	0	$3,451 \cdot 10^{-6}$	0,691	0,993
4.27b	2	0	$7,196 \cdot 10^{-6}$	0,847	0,999
4.27b	3	0	$6,282 \cdot 10^{-6}$	0,753	0,999

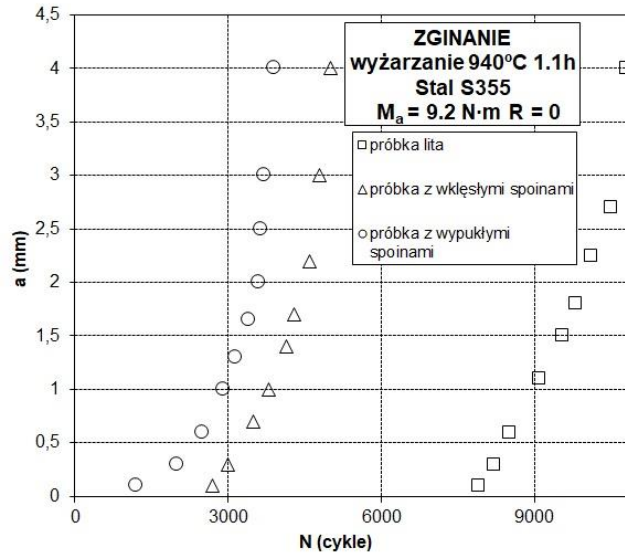
Na rysunku 4.28 przedstawiono wyniki rozwoju pęknięć zmęczeniowych w postaci wykresów  $a = f(N)$  dla  $R = -1, 0$  po wyżarzaniu normalizującym w temperaturze  $940^{\circ}C$  wygrzewane przez 1,1 godziny. Z przeprowadzonych badań ze współczynnikiem asymetrii cyklu  $R = -1$  wynika (rys. 4.28a), że najmniejszą trwałość zmęczeniową wykazała próbka z wypukłymi spoinami podobnie jak zaobserwowano we wcześniejszych badaniach. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 3500 cykli, a przy liczbie 5900 cykli próbki uległy zniszczeniu z rozrzutem wyników do 8%. Próbka z wklęsłymi spoinami w momencie wykrycia pęknięcia o długości 0,10 mm wykonały 4700 cykli. Przy liczbie cykli 7000 próbki zostały zniszczone z rozrzutem wyników do 8%. Próbka lita wykazała największą trwałość zmęczeniową w porównaniu do próbek

spawanych. Inicjacja pęknięcia (0,10 mm) występowała po 11600 cyklach i była wyższa niż w próbkach spawanych. Rozwój pęknięcia następował w wolniejszym tempie niż w próbkach spawanych, a przy liczbie 13700 cyklach próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 7%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wklęsłymi spoinami wynosiła 6700 cykli. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wypukłymi spoinami była większa o 7800 cykli. Na rysunku 4.28b pokazano wyniki badań dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$ . Próbki lite wykazywały największe trwałości. Inicjacja pęknięć następowała zazwyczaj przy liczbie 7900 cykli, a zniszczenie próbki przy 10800 cyklach z rozrzutem wyników do 7%. W próbce ze spoinami wklęsłymi pęknięcie pojawiało się przy liczbie 2700 cykli, a zniszczenie w okolicach 5000 cykli z rozrzutem wyników do 6%. Najmniejsze trwałości wykazały próbki ze spoinami wypukłymi, gdzie przy liczbie 1200 cykli najczęściej następowała inicjacja pęknięcia, a zniszczenie próbki przy 3900 cyklach z rozrzutem wyników do 6%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wklęsłymi spoinami wynosiła 5800 cykli, natomiast pomiędzy próbką z wypukłymi spoinami wynosiła o 6900 cykli.

a)



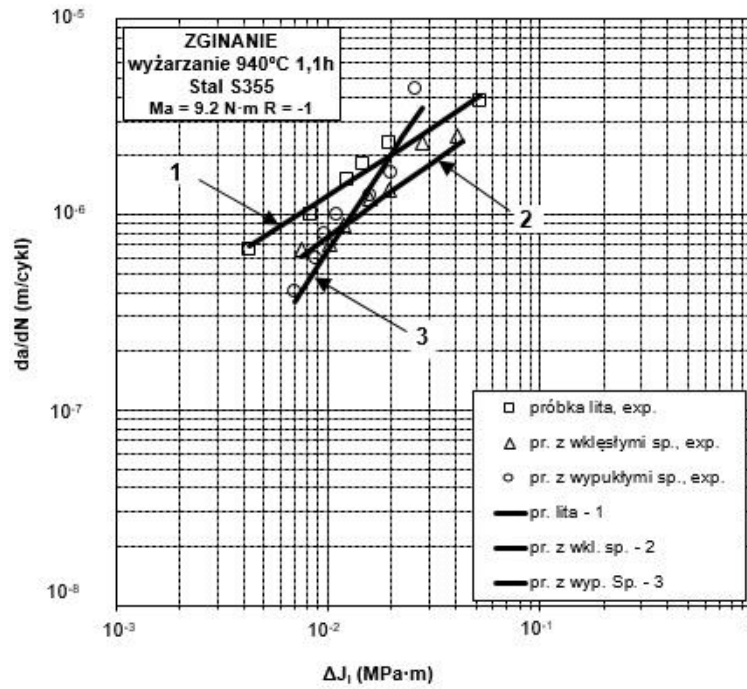
b)



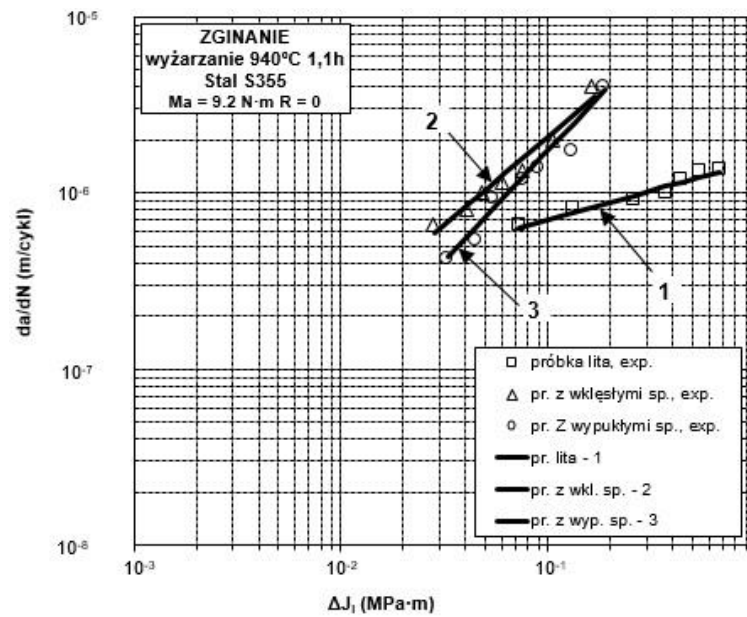
Rys. 4.28. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Wyniki badań doświadczalnych w postaci wykresów prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych  $da/dN$  w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$  przedstawiono na rysunku 4.29. Można zauważyć (dla  $R = -1$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkości pęknięć zmęczeniowych  $da/dN = 6,67 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość  $da/dN = 3,83 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Próbka ze spoinami wklęsłymi miała prędkość początkową taką samą jak próbka lita, a w końcowej fazie pęknięcia prędkość wzrosła do wartości  $da/dN = 2,5 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. W przypadku próbki ze spoinami wypukłymi prędkość pęknięcia mieściła się w granicach od  $da/dN = 4,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl do wartości  $da/dN = 4,40 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Na rys. 4.29b widać (dla  $R = 0$ ), że wszystkie próbki po inicjacji pęknięcia posiadały prędkości pęknięcia na podobnym poziomie, która wynosiła dla próbki litej i ze spoinami wklęsłymi  $da/dN = 6,67 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbki ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 4,25 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Prędkości pęknięcia przed zniszczeniem, dla próbki ze spoinami wypukłymi oraz wklęsłymi wynosiła  $da/dN = 4,0 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Natomiast próbka lita osiągała prędkość pęknięcia  $da/dN = 1,38 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Można również zauważyć, że w próbkach po obróbce cieplnej w porównaniu z próbkami bez obróbki cieplnej prędkości dla różnych próbek i  $R = -1$  nie mają dużych rozrzutów.

a)



b)



Rys. 4.29. Wyniki eksperymentalne prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych porównane z obliczonymi według równania (4.1) dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Współczynniki  $C$  i  $m$  wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych obliczono metodą najmniejszych kwadratów i przedstawiono w tabeli 4.4, w której również podano współczynniki korelacji  $r$ . Wyniki badań dla zginania obarczone są błędem względnym nieprzekraczającym 9% na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Tabela. 4.4. Współczynniki  $C$  i  $m$  równania (4.1) i współczynniki korelacji  $r$  dla wykresów pokazanych na rysunku 4.29

Rysunek	Wykres	R	$C, \text{ m}/(\text{MPa}\cdot\text{m})^{-\text{m}} \text{ cykl}$	m	r
4.29a	1	-1	$3,239\cdot 10^{-5}$	0,707	0,998
4.29a	2	-1	$2,707\cdot 10^{-5}$	0,774	0,997
4.29a	3	-1	$1,286\cdot 10^{-3}$	1,646	0,995
4.29b	1	0	$1,503\cdot 10^{-6}$	0,326	0,996
4.29b	2	0	$2,143\cdot 10^{-5}$	1,008	0,995
4.29b	3	0	$3,036\cdot 10^{-5}$	1,240	0,996

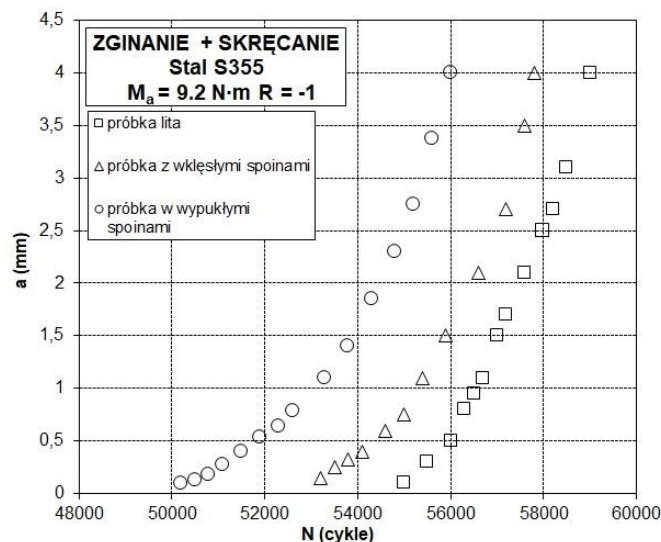
#### 4.5.3. Badania próbek litych i spawanych bez obróbki cieplnej przy zginaniu ze skręcaniem

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych próbek litych oraz spawanych poddanych proporcjonalnemu zginaniu ze skręcaniem dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1, 0$ . Na rysunku 4.30 zaprezentowano wyniki rozwoju pęknięć zmęczeniowych w postaci wykresów długości pęknięć w funkcji liczby cykli,  $a = f(N)$  oraz wykresów prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$ ,  $da/dN = f(\Delta J_{\text{eq}})$  (rysunek 4.31).

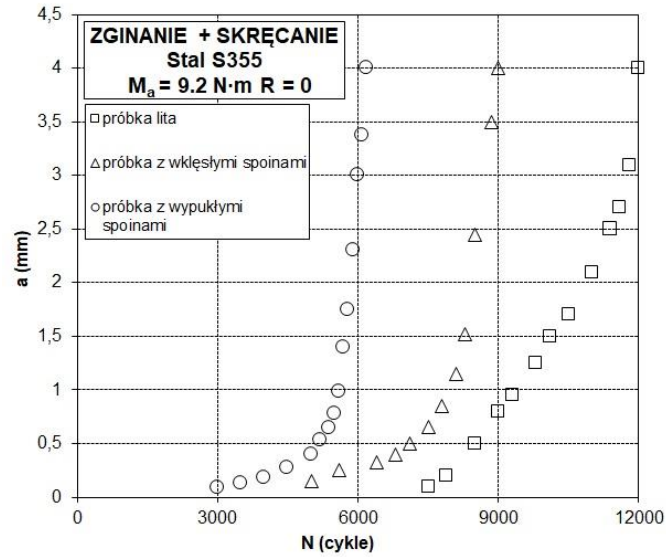
Na podstawie wykonanych serii badań doświadczalnych (od 3 - 5 próbek na każdym poziomie) otrzymano wykresy obrazujące inicjację oraz kolejne przyrosty długości pęknięć zmęczeniowych (aż do zniszczenia próbek) w funkcji liczby cykli dla próbek litych oraz ze spoinami wklęsłymi i wypukłymi (rys. 4.30). Na rys. 4.30a, podczas badań przy współczynniku asymetrii cyklu  $R = -1$ , można zauważyć, że najmniejsze trwałości zmęczeniowe wykazały próbki z wypukłymi spoinami jak wcześniej podczas badań. Inicjacja pęknięć (0,14 mm) następowała przy 50200 cykli. Dalszy rozwój pęknięcia następował dość szybko i przy liczbie 56000 cykli próbka uległa zniszczeniu z rozrzutem wyników do 8%. Próbka z wklęsłymi spoinami w momencie wykrycia pęknięcia o długości 0,12 mm wykonała 53200 cykli. Rozwój pęknięcia następował z podobną prędkością, w porównaniu do rozwoju pęknięcia próbek z wypukłymi spoinami.

Przy liczbie cykli 57800 próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 6%. Próbka lita miała największą trwałość zmęczeniową w porównaniu do próbek spawanych. Inicjacja pęknięcia (0,10 mm) występowała po 55000 cykli. Rozwój pęknięcia następował w podobnym tempie jak w próbkach spawanych, a przy liczbie 59000 cykli próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 7%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką litą, a próbką z wklęsłymi spoinami wynosiła 1200 cykli (rozrzut wyników do 2%). Różnica w trwałości pomiędzy próbką litą, a próbkami z wypukłymi spoinami była większa o 3000 cykli (rozrzut wyników do 5%). Na rysunku 4.30b pokazano wyniki badań dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$ . Dla wszystkich próbek trwałości uległy obniżeniu, w porównaniu do trwałości dla współczynnika  $R = -1$ . Największe trwałości wykazywały próbki lite. Inicjacja pęknięć następowała zazwyczaj przy liczbie 7500 cykli, a zniszczenie próbki przy 12000 cykli z rozrzutem wyników do 7%. W próbkach ze spoinami wklęsłymi pęknięcia pojawiały się przy liczbie 5000 cykli, a zniszczenie dla około 9000 cykli z rozrzutem wyników do 8%. Najmniejsze trwałości wykazały próbki ze spoinami wypukłymi, gdzie przy liczbie 3000 cykli najczęściej następowała inicjacja pęknięcia, a zniszczenie próbki przy 6200 cykli. Różnica w trwałości pomiędzy próbkami z materiału litego, a próbkami z wklęsłymi spoinami wynosiła 3000 cykli, natomiast pomiędzy próbkami z wypukłymi spoinami była większa o 5800 cykli.

a)



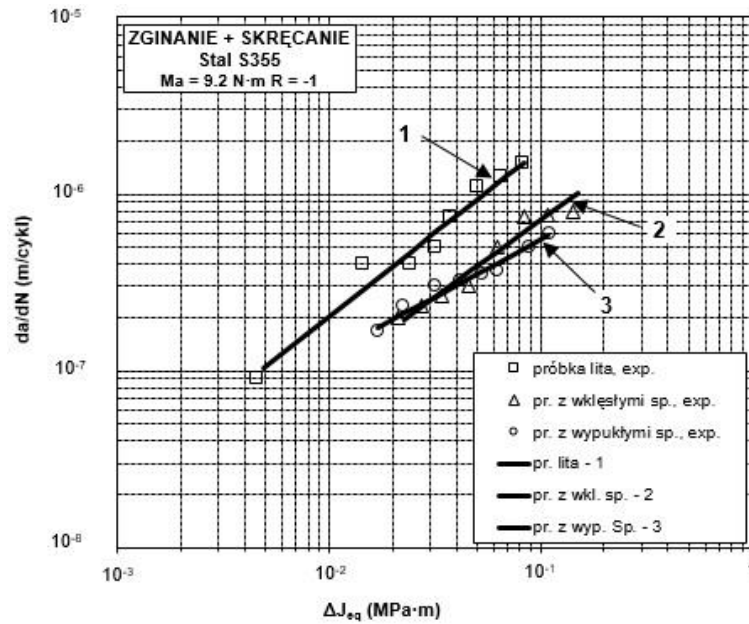
b)



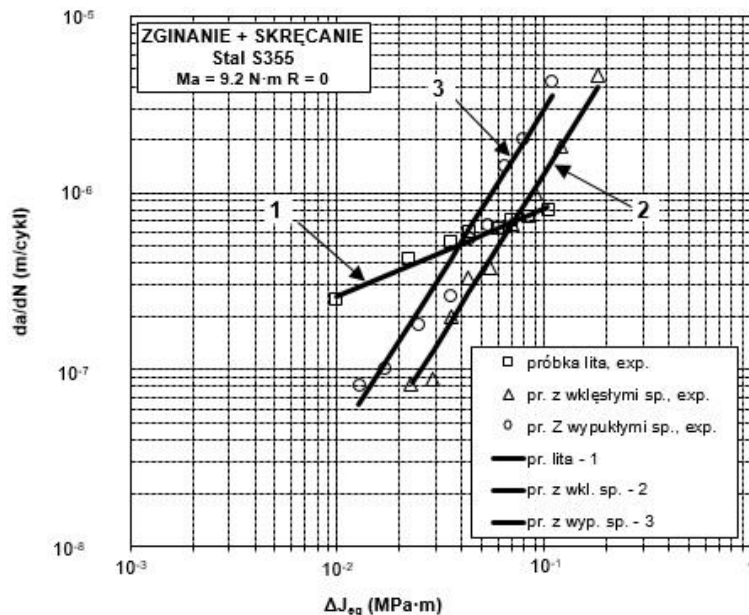
Rys. 4.30. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Na rysunku 4.31 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w postaci wykresów  $da/dN$  w funkcji zakresu parametru  $\Delta J$ . Na podstawie rys. 4.31a można zauważyć (dla  $R = -1$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięć zmęczeniowych  $da/dN = 9,00 \cdot 10^{-8}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki ma wartość  $da/dN = 1,5 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Dla próbek ze spoinami wklęsłymi prędkość początkowa wyniosła  $da/dN = 2,9 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbek ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 1,67 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. W przypadku próbek ze spoinami wypukłymi prędkość pęknięć wzrasta do wartości  $da/dN = 6,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a w przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi prędkości pęknięć osiągają wartość  $da/dN = 7,85 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Na rys. 4.31b widać (dla  $R = 0$ ), że próbka lita w momencie po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięcia  $da/dN = 2,50 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość  $da/dN = 8,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. W próbach ze spoinami wklęsłymi prędkość początkowa pęknięcia wynosi  $da/dN = 8,33 \cdot 10^{-8}$  m/cykl, a dla próbek ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 8,0 \cdot 10^{-8}$  m/cykl. Prędkości pęknięcia, w przypadku próbek ze spoinami wypukłymi osiągają wartości  $da/dN = 4,20 \cdot 10^{-6}$  m/cykl, gdzie w przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi prędkości te osiągają wartość  $da/dN = 4,65 \cdot 10^{-6}$  m/cykl.

a)



b)



Rys. 4.31. Prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych doświadczalnych i obliczonych według równania (4.1) dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Występujące we wzorze (4.1) współczynniki  $C$  i  $m$  wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych obliczono metodą najmniejszych kwadratów oraz przedstawiono w tabeli 4.5, w której również podano współczynniki korelacji  $r$ . Wyniki badań dla zginania ze skręcaniem obarczone są błędem względnym nieprzekraczającym 9% na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Tabela. 4.5. Współczynniki  $C$  i  $m$  równania (4.1) i współczynniki korelacji  $r$  dla wykresów pokazanych na rysunku 4.31



Rysunek	Wykres	R	$C,$ $m/(MPa \cdot m)^{-m}$ cykl	m	r
4.31a	1	-1	$1,585 \cdot 10^{-5}$	0,948	0,995
4.31a	2	-1	$5,318 \cdot 10^{-6}$	0,874	0,994
4.31a	3	-1	$2,416 \cdot 10^{-6}$	0,643	0,996
4.31b	1	0	$2,579 \cdot 10^{-6}$	0,499	0,994
4.31b	2	0	$9,701 \cdot 10^{-5}$	1,869	0,993
4.31b	3	0	$2,204 \cdot 10^{-4}$	1,868	0,996

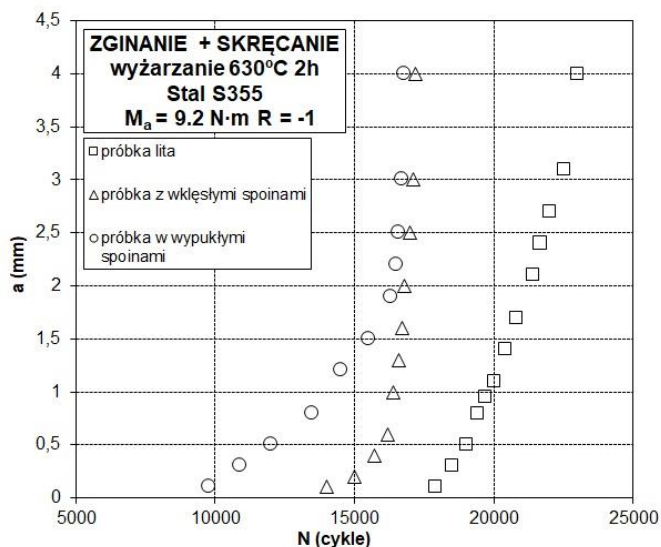
#### 4.5.4. Badania próbek litych i spawanych po obróbce cieplnej przy zginaniu ze skręcaniem

W podrozdziale tym przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych próbek litych oraz spawanych przy zginaniu ze skręcaniem dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1, 0$  poddanych obróbce cieplnej tj.: wyżarzaniu odprężającemu i normalizującemu. Na rysunku 4.32 zaprezentowano wyniki długości pęknięć w funkcji liczby cykli  $a = f(N)$  dla  $R = -1$  i  $0$  po wyżarzaniu odprężającym. Z przeprowadzonych badań dla współczynnika  $R = -1$ , można stwierdzić (rys. 4.32a), że najmniejszą trwałość zmęczeniową wykazała próbka z wypukłymi spoinami podobnie jak w pokazanych wcześniej badaniach. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 9800 cykli, a przy liczbie 16800 cykli próbka uległa zniszczeniu z rozrzutem wyników do 8%. Próbka z wklęsłymi spoinami w momencie wykrycia pęknięcia o długości 0,10 mm wykonała 14000 cykli. Rozwój pęknięcia następował z podobną prędkością w porównaniu do rozwoju pęknięcia próbki z wypukłymi spoinami. Przy liczbie cykli 17200 próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 8%. Próbka lita wykazała największą trwałość zmęczeniową w porównaniu do próbek spawanych. Inicjacja pęknięcia (0,10 mm) występowała po 17900 cykli. Rozwój pęknięcia następował w podobnym tempie do próbek spawanych, a przy liczbie 23000 cykli próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 7%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbkami z wklęsłymi spoinami wynosiła 5800

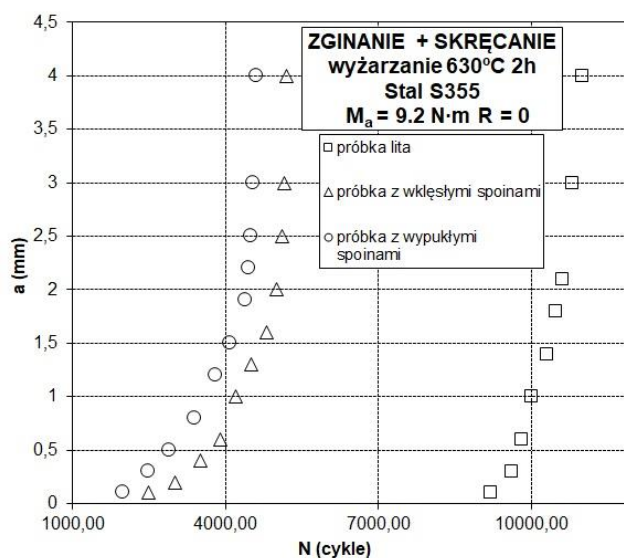
cykli (rozrzut wyników 34%). Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wypukłymi spoinami była większa o 6200 cykli (rozrzut wyników 37%). Na rys. 4.32b pokazano wyniki badań dla współczynnika  $R = 0$ . Próbkę lita wykazała największe trwałości podobnie jak na rys. 4.32a. Inicjacja pęknięć następowała zazwyczaj przy liczbie 9200 cykli, a zniszczenie próbki przy 11000 cykli z rozrzutem wyników do 8%. W próbce ze spoinami wklęsłymi pęknięcie pojawiało się przy liczbie 2500 cykli, a zniszczenie w okolicach 5200 cykli z rozrzutem wyników do 6%. Najmniejsze trwałości wykazała próbka ze spoinami wypukłymi, gdzie przy liczbie 2000 cykli wystąpiła inicjacja pęknięcia, a zniszczenie próbki przy 4600 cykli z rozrzutem wyników do 5%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wklęsłymi spoinami wynosiła 5800 cykli, a próbką z wypukłymi spoinami była większa o 6400 cykli.

Wykresy prędkości  $da/dN$  w funkcji parametru  $\Delta J_{eq}$  pokazano na rysunku 4.33. Można zauważyć (dla  $R = -1$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięć zmęczeniowych  $da/dN = 3,33 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość  $da/dN = 8,33 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Próbki spawane mają prędkość początkową podobną, która wyniosła dla próbek ze spoinami wklęsłymi  $da/dN = 1,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbek ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 9,08 \cdot 10^{-8}$  m/cykl. Natomiast, prędkość pęknięcia w trakcie wzrostu pęknięć osiągała różne wartości. W przypadku próbki ze spoinami wypukłymi prędkość pęknięcia wzrasta do wartości  $da/dN = 1,50 \cdot 10^{-6}$  m/cykl, natomiast w przypadku próbki ze spoinami wklęsłymi prędkość pęknięcia osiąga wartość  $da/dN = 3,75 \cdot 10^{-6}$  m/cykl.

a)



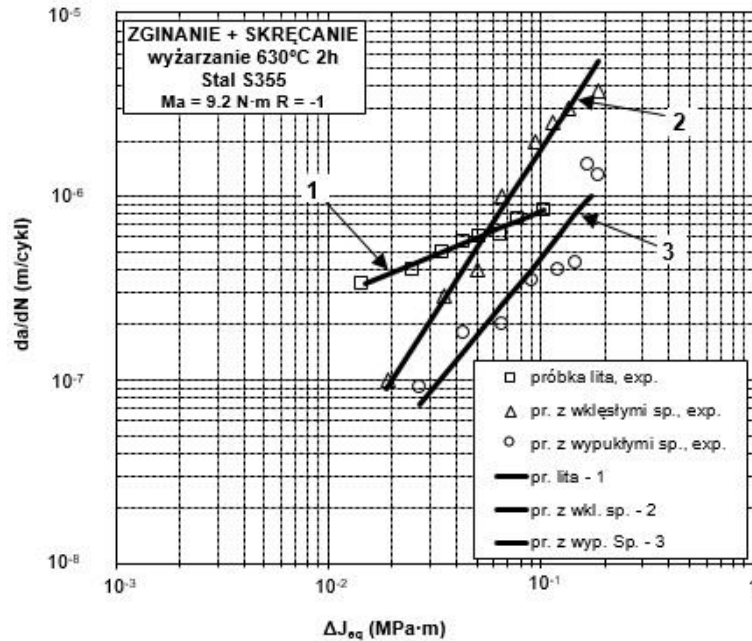
b)



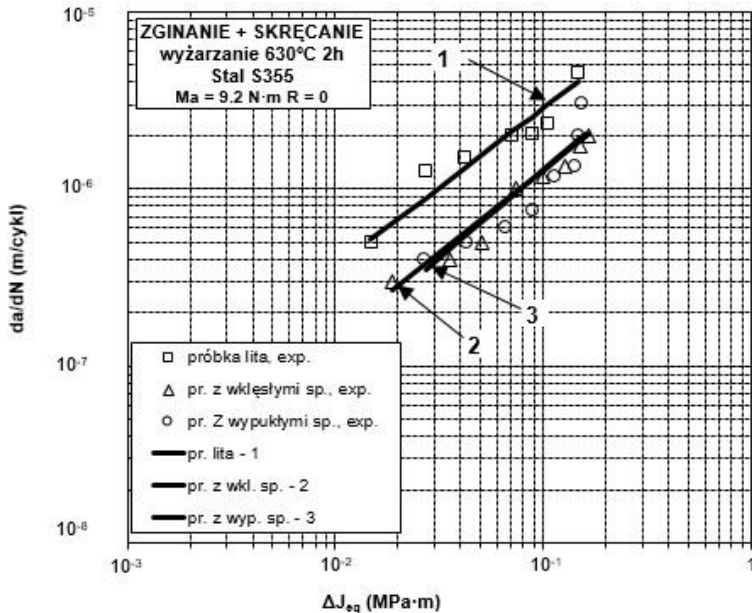
Rys. 4.32. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Na rysunku 4.33b można zaobserwować (dla  $R = 0$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia ma prędkość pęknięcia  $da/dN = 5,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wartość ta wynosi  $da/dN = 4,5 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. W próbce ze spoinami wklęsłymi prędkość początkowa pęknięcia wynosi  $da/dN = 3,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbki ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 4,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Prędkości pęknięcia w przypadku próbek ze spoinami wypukłymi i wklęsłymi są takie same i osiągają wartości maksymalne  $da/dN = 2,0 \cdot 10^{-6}$  m/cykl.

a)



b)



Rys. 4.33. Prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych doświadczalnych i obliczonych według równania (4.1) dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Współczynniki  $C$  i  $m$  wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych obliczono metodą najmniejszych kwadratów i przedstawiono w tabeli 4.6, w której również podano współczynniki korelacji  $r$ . Wyniki badań dla zginania ze skręcaniem obarczone są błędem względnym nieprzekraczającym 9% na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

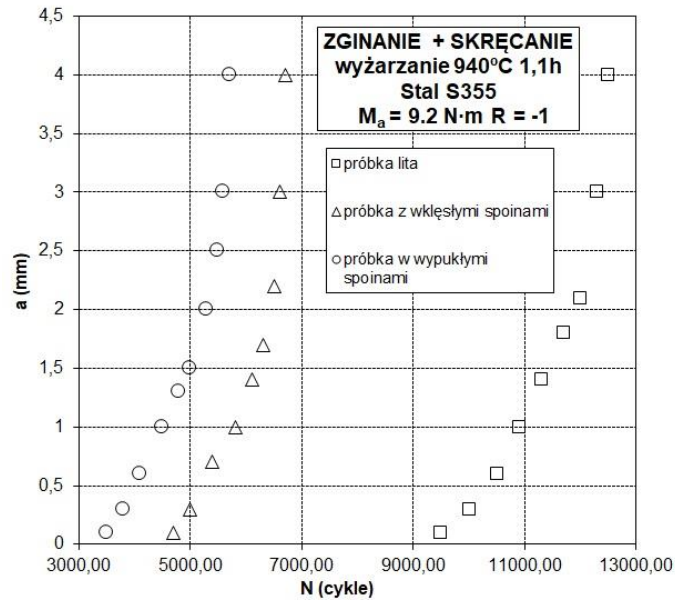
Tabela. 4.6. Współczynniki  $C$  i  $m$  równania (4.1) i współczynniki korelacji  $r$  dla wykresów pokazanych na rysunku 4.33

Rysunek	Wykres	R	$C, \text{ m}/(\text{MPa}\cdot\text{m})^{-\text{m}} \text{ cykl}$	m	r
4.33a	1	-1	$2,522\cdot 10^{-6}$	0,480	0,993
4.33a	2	-1	$1,123\cdot 10^{-4}$	1,793	0,994
4.33a	3	-1	$1,197\cdot 10^{-5}$	1,408	0,995
4.33b	1	0	$2,241\cdot 10^{-5}$	0,896	0,993
4.33b	2	0	$1,093\cdot 10^{-5}$	0,931	0,994
4.33b	3	0	$1,305\cdot 10^{-5}$	1,005	0,995

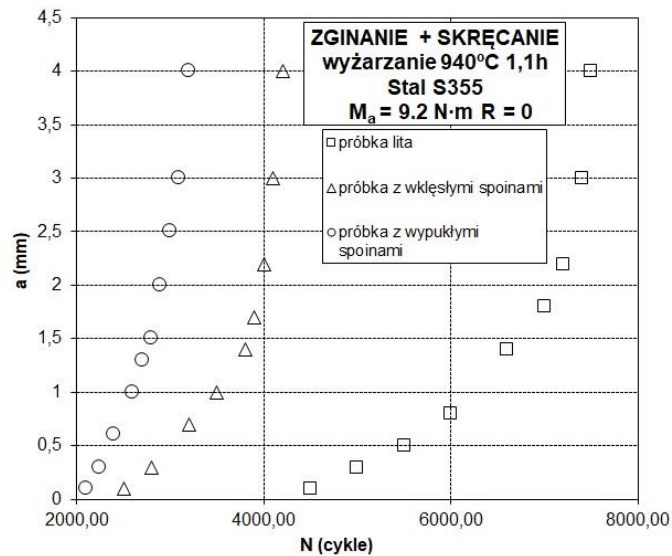
Na rysunku 4.34 przedstawiono długości pęknięć w postaci wykresów  $a = f(N)$  dla  $R = -1, 0$  po wyżarzaniu normalizującym. Z przeprowadzonych badań dla współczynnika  $R = -1$  wynika (rys. 4.34a), że najmniejszą trwałość zmęczeniową wykazała próbka z wypukłymi spoinami. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 3400 cyklach, a przy liczbie 5700 cyklach próbki uległy zniszczeniu z rozrzutem wyników do 8%. Próbka z wklęsłymi spoinami w momencie wykrycia pęknięcia o długości 0,10 mm wykonała 4600 cyklach. Przy liczbie 6700 cyklach próbki zostały zniszczone z rozrzutem wyników do 8%. Analogicznie do poprzednich wyników próbka lita wykazała największą trwałość zmęczeniową w porównaniu do próbek spawanych. Inicjacja pęknięcia (0,10 mm) występowała po 9500 cyklach i była wyższa niż w próbkach spawanych. Rozwój pęknięcia następował w wolniejszym tempie niż w próbkach spawanych, a przy liczbie 12500 cyklach próbka została zniszczona z rozrzutem wyników do 7%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z wklęsłymi spoinami wynosiła 5800 cyklach, natomiast pomiędzy próbką z wypukłymi spoinami była większa o 6800 cyklach. Na rys. 4.34b pokazano wyniki badań dla  $R = 0$ . W próbkach litych inicjacja pęknięć następowała zazwyczaj przy liczbie 4500 cyklach, a zniszczenie próbki przy 7500 cyklach z rozrzutem wyników do 7%. W próbce ze spoinami wklęsłymi pęknięcie pojawiało się przy liczbie 2500 cyklach, a zniszczenie w okolicach 4200 cyklach z rozrzutem wyników do 6%. Najmniejsze trwałości wykazały próbka ze spoinami wypukłymi, gdzie przy liczbie 2100 cyklach wystąpiła inicjacja pęknięcia, a zniszczenie próbki przy 3200 cyklach z rozrzutem wyników do 6%. Różnica w trwałości pomiędzy próbką z materiału litego, a próbką z

wklęsłymi spoinami wynosiła 3300 cykli, a pomiędzy próbką z wypukłymi spoinami wynosiła 4300 cykli.

a)



b)

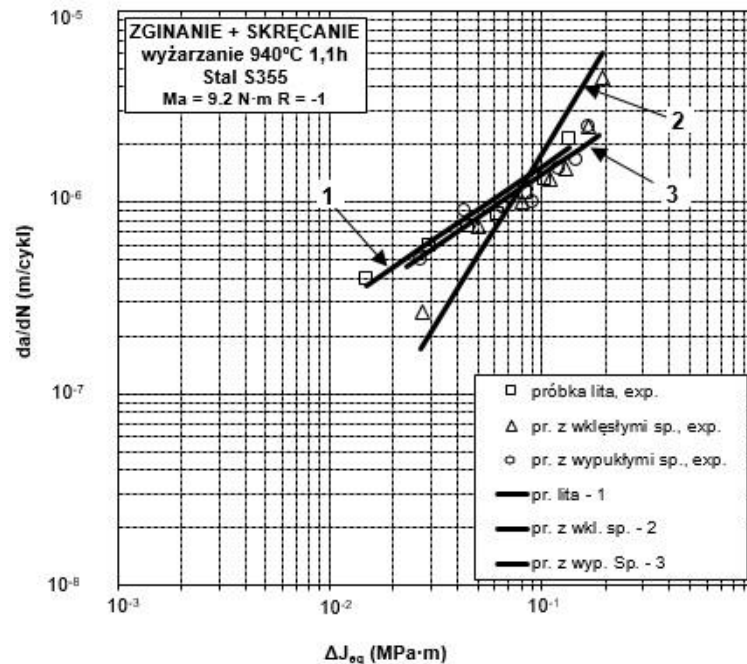


Rys. 4.34. Długości pęknięć w funkcji liczby cykli dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

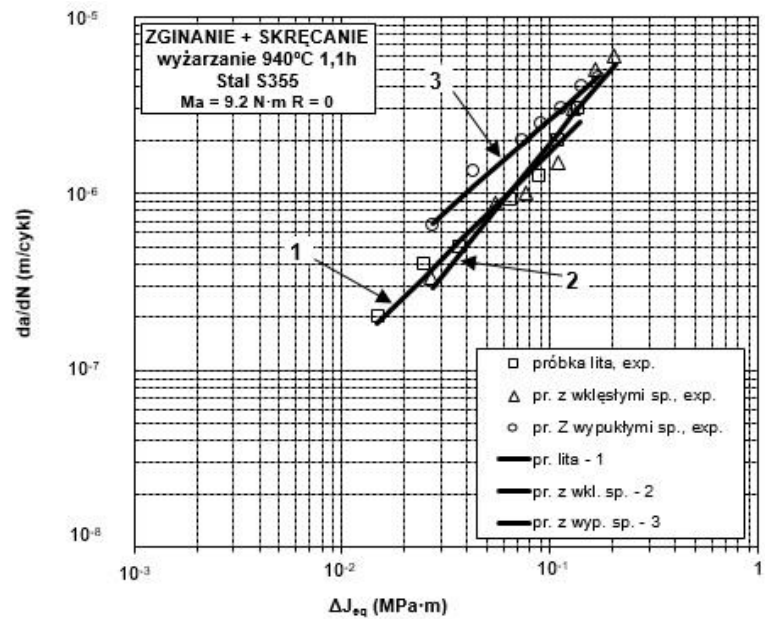
Wyniki badań doświadczalnych  $da/dN$  w funkcji parametru  $\Delta J_{eq}$  przedstawiono na rysunku 4.35. Można zauważyć (dla  $R = -1$ ), że próbka lita po inicjacji pęknięcia posiada prędkość pęknięcia zmęczeniowego  $da/dN = 4,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, prędkość wzrasta i przed zniszczeniem próbki wynosi  $da/dN = 2,167 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Próbka ze spoinami wklęsłymi miała prędkość początkową wynoszącą  $da/dN = 2,67 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a pod koniec życia prędkość wzrastała do wartości  $da/dN = 4,5 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. W przypadku próbki ze

spoinami wypukłymi prędkość pęknięcia mieściła się w granicach od  $da/dN = 5,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl do wartości  $da/dN = 2,50 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Na rys. 4.35b widać (dla  $R = 0$ ), że wszystkie próbki po inicjacji pęknięcia posiadały różne prędkość pęknięcia, które wynosiły dla próbki litej  $da/dN = 2,0 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, dla próbki ze spoinami wklęsłymi  $da/dN = 3,33 \cdot 10^{-7}$  m/cykl, a dla próbki ze spoinami wypukłymi  $da/dN = 6,66 \cdot 10^{-7}$  m/cykl. Prędkości pęknięcia przed zniszczeniem dla próbki ze spoinami wypukłymi wynosiła  $da/dN = 4,5 \cdot 10^{-6}$  m/cykl, a dla próbki ze spoinami wklęsłymi  $da/dN = 6,0 \cdot 10^{-6}$  m/cykl. Natomiast próbka lita osiągała prędkość pęknięcia  $da/dN = 2,0 \cdot 10^{-6}$  m/cykl pod koniec życia. Na rys. 4.35 b można zauważyć dobrą korelację wyników badań zarówno pomiędzy wynikami, a zastosowanym modelem obliczeń jak również pomiędzy wszystkimi wynikami badań i obliczeń.

a)



b)



Rys. 4.35. Prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych doświadczalnych i obliczonych według równania (4.1) dla: a)  $R = -1$ , b)  $R = 0$

Współczynniki  $C$  i  $m$  oraz współczynniki korelacji  $r$  przedstawiono w tabeli 4.7. Wyniki badań dla zginania ze skręcaniem obarczone są błędem względnym nieprzekraczającym 9% na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Tabela. 4.7. Współczynniki  $C$  i  $m$  równania (4.1) i współczynniki korelacji  $r$  dla wykresów pokazanych na rysunku 4.35

Rysunek	Wykres	R	$C, m/(MPa \cdot m)^{-m} \text{ cykl}$	$m$	$r$
4.35a	1	-1	$8,594 \cdot 10^{-6}$	0,747	0,992
4.35a	2	-1	$1,123 \cdot 10^{-4}$	1,127	0,997
4.35a	3	-1	$7,902 \cdot 10^{-6}$	0,752	0,993
4.35b	1	0	$2,545 \cdot 10^{-5}$	1,169	0,994
4.35b	2	0	$5,333 \cdot 10^{-5}$	1,440	0,996
4.35b	3	0	$2,882 \cdot 10^{-5}$	1,038	0,994

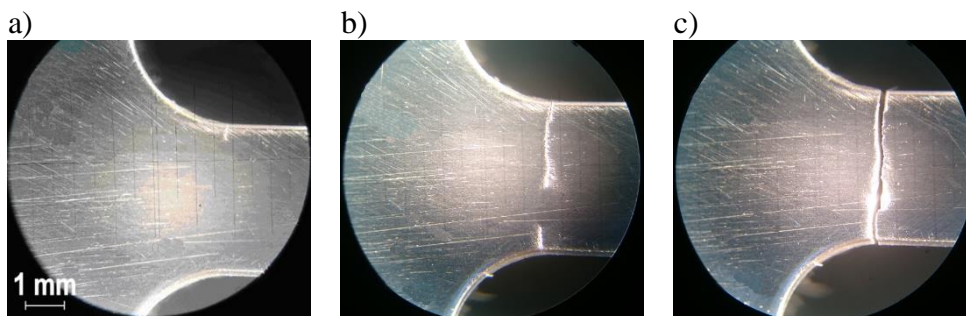


## 4.7. Charakterystyka złomów zmęczeniowych

W ostatnim rozdziale, obejmującym badania doświadczalne, podjęto próbę opisanego złomów zmęczeniowych powstałych w badanych próbkach litych oraz spawanych. Uwzględniono obciążenie próbek ( $R = -1, 0$ ), rodzaj próbki (lita, ze spoinami wklęsłymi, wypukłymi), wpływ przeprowadzonej obróbki cieplnej.

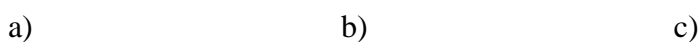
### 4.7.1. Kierunek rozwoju pęknięć zmęczeniowych

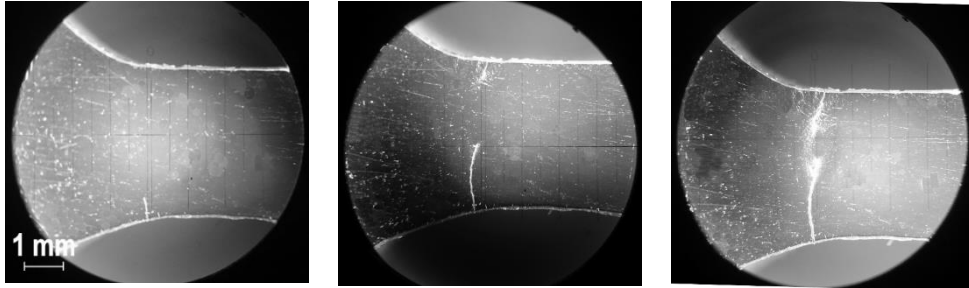
W pierwszej kolejności opisano kierunki rozwoju pęknięć dla próbek zginanych przy  $R = -1$  i  $0$ . Na rysunkach 4.36 – 4.38 przedstawione zostały fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = -1$ . Na rys. 4.36 przedstawiono fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki litej. Inicjacja pęknięcia, widoczna na rys. 4.36a, występowała z jednej strony próbki przy liczbie cykli 84000. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego wraz z inicjacją pęknięcia z drugiej strony próbki pokazano na rys. 4.36b. Zniszczenie próbki, przy liczbie cykli 97500, pokazano na rys. 4.36c.



Rys. 4.36. Wybrane etapy rozwoju pęknięć próbki litej przy cyklicznym zginaniu ( $R = -1$ ), gdzie: a) inicjacja pęknięcia, b) inicjacja i propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

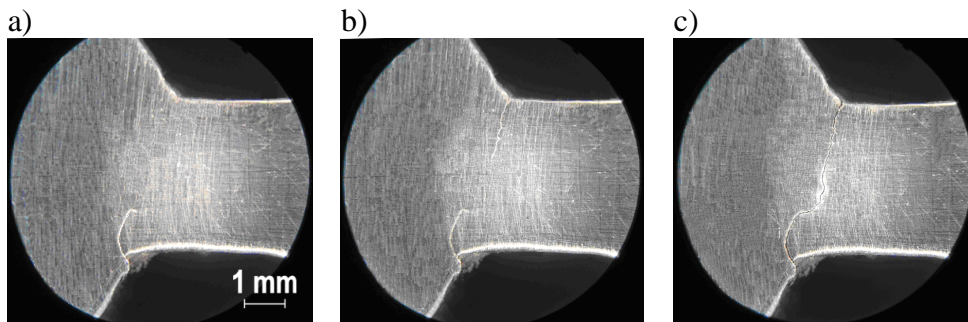
Na rysunku 4.37 przedstawiono fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki z wklęsłymi spoinami. Inicjacja pęknięcia, widoczna na rys. 4.37a, występowała z jednej strony próbki przy liczbie cykli 69000. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego wraz z inicjacją pęknięcia z drugiej strony próbki pokazano na rys. 4.37b. Zniszczenie próbki, przy liczbie cykli 77500, pokazano na rys. 4.37c.





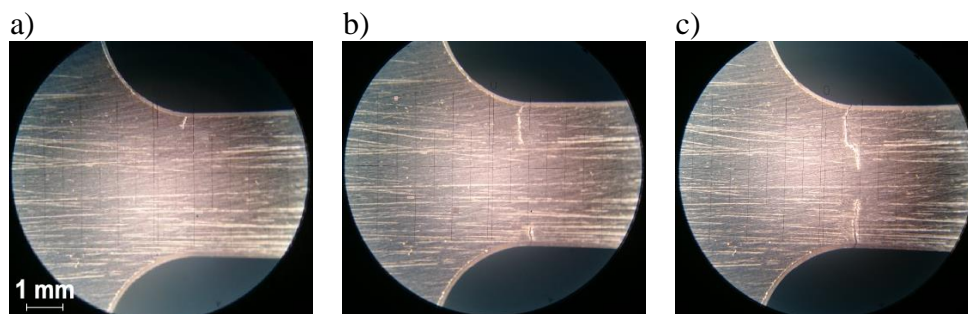
Rys. 4.37. Wybrane etapy rozwoju pęknięć próbki z wklęsłymi spoinami przy cyklicznym zginaniu ( $R = -1$ ), gdzie: a) inicjacja pęknięcia, b) inicjacja i propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

Na rysunku 4.38 przedstawiono fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki z wypukłymi spoinami. Inicjacja pęknięcia, widoczna na rys. 4.38a, występowała z jednej strony próbki przy liczbie cykli 67000. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego wraz z inicjacją pęknięcia z drugiej strony próbki pokazano na rys. 4.38b. Zniszczenie próbki, przy liczbie cykli 74000, pokazano na rys. 4.38c.



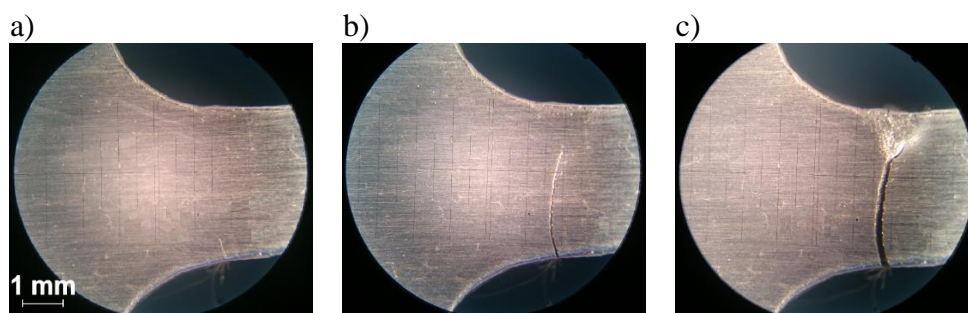
Rys. 4.38. Wybrane etapy rozwoju pęknięć próbki z wypukłymi spoinami przy cyklicznym zginaniu ( $R = -1$ ), gdzie: a) inicjacja pęknięcia, b) inicjacja i propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

Na rysunkach 4.39 – 4.41 przedstawione zostały fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych dla współczynnika asymetrii cyklu  $R = 0$ . Na rys. 4.39 przedstawiono fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki litej. Inicjacja pęknięcia, widoczna na rys. 4.39a, występowała z jednej strony próbki przy liczbie cykli 14000. Rozwój pęknięcia wraz z inicjacją pęknięcia z drugiej strony próbki pokazano na rys. 4.39b. Zniszczenie próbki, przy liczbie cykli 19000, pokazano na rys. 4.39c.



Rys. 4.39. Wybrane etapy rozwoju pęknięć próbki litej przy cyklicznym zginaniu ( $R = 0$ ), gdzie: a) inicjacja pęknięcia, b) inicjacja i propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

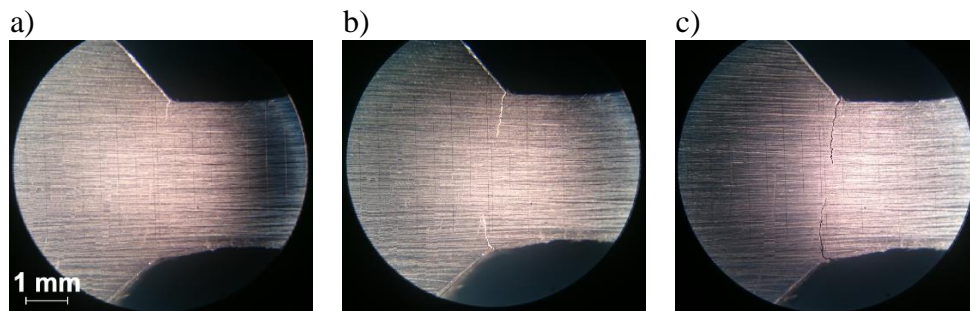
Na rysunku 4.40 przedstawiono fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w próbce z wklęsłymi spoinami ( $R = 0$ ). Inicjacja pęknięcia, widoczna na rys. 4.40a, występowała z jednej strony próbki przy liczbie cykli 13000. Propagację pęknięcia pokazano na rys. 4.40b. Zniszczenie próbki, przy liczbie cykli 18000, pokazano na rys. 4.40c.



Rys. 4.40. Wybrane etapy rozwoju pęknięć próbki z wklęsłymi spoinami przy cyklicznym zginaniu ( $R = 0$ ), gdzie: a) inicjacja pęknięcia, b) propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

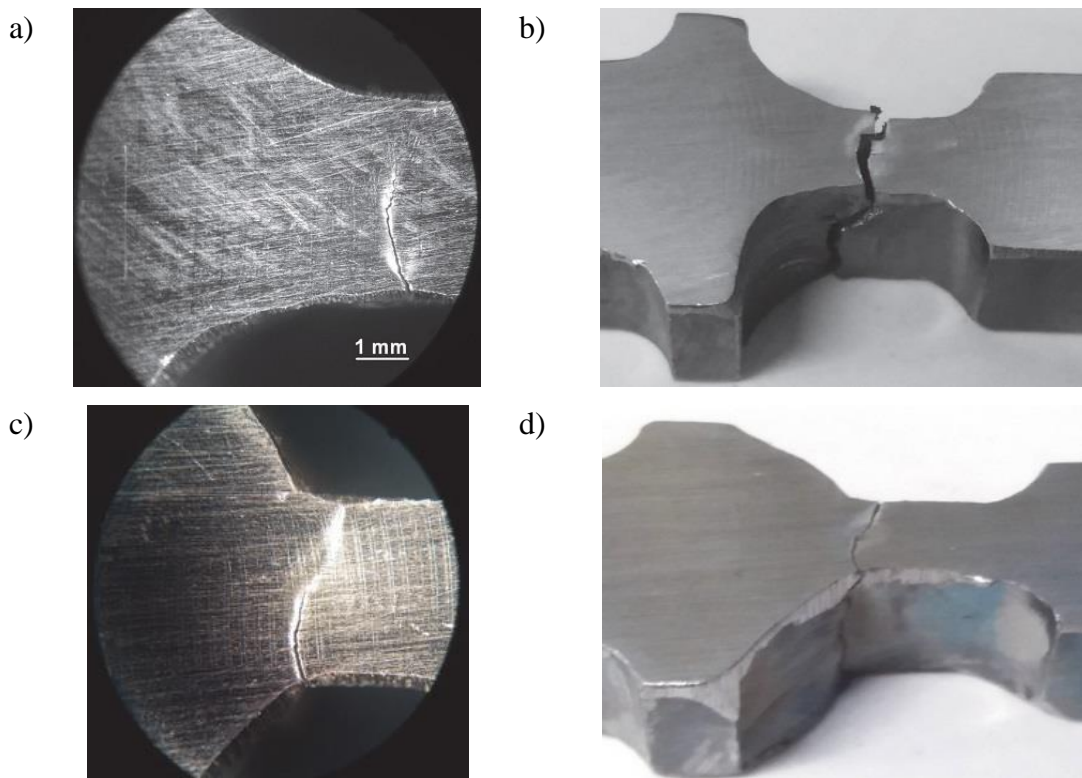
Na rysunku 4.41 przedstawiono fotografie wybranych etapów rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki z wypukłymi spoinami dla  $R = 0$ . Inicjacja pęknięcia, widoczna na rys. 4.41a, również występowała z jednej strony próbki przy liczbie cykli 8500. Rozwój pęknięcia wraz z inicjacją pęknięcia z drugiej strony próbki pokazano na rys. 4.41b. Zniszczenie próbki, przy liczbie cykli 13500, pokazano na rys. 4.41c. Inicjacja pęknięć w próbkach litych występowała w najmniejszym przekroju w okolicy karbu geometrycznego. Inicjacja i rozwój pęknięć zmęczeniowych w próbkach spawanych, niezależnie od zastosowanego obciążenia, występował w strefie wpływu ciepła (SWC) lub w miejscu przejścia materiału rodzimego w spoinę. Inicjacja występuje tylko z jednej

strony próbki (u góry lub u dołu) i w trakcie rozwoju pęknięcia pojawia się pęknięcie z drugiej strony próbki.

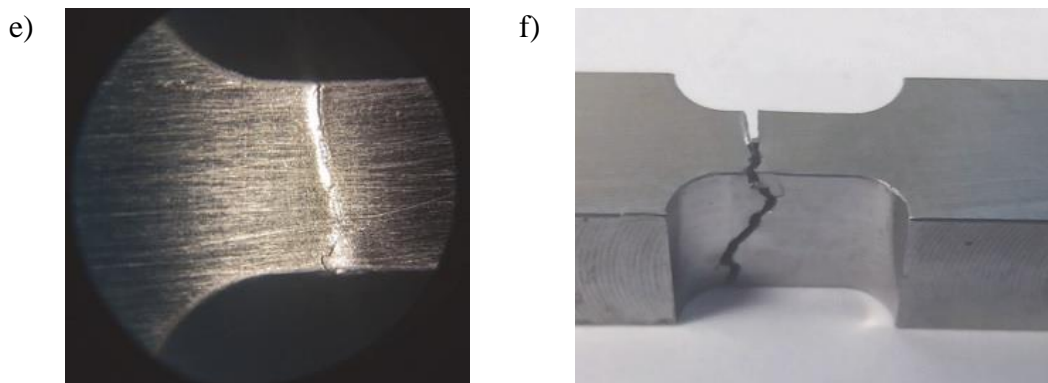


Rys. 4.41. Wybrane etapy rozwoju pęknięć próbki z wypukłymi spoinami przy cyklicznym zginaniu ( $R = 0$ ), gdzie: a) inicjacja pęknięcia, b) inicjacja i propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

W przypadku badań doświadczalnych dla zginania pękanie próbek przebiegało w jednej płaszczyźnie poprzecznej, niezależnie od zastosowanej wartości współczynnika  $R$ . Dla próbek poddanych proporcjonalnemu zginaniu ze skręcaniem ścieżka pęknięcia przebiegała z przemieszczeniem w kierunku poprzecznym. Przykładowe ścieżki pęknięć zmęczeniowych w badanych próbkach dla współczynnika  $R = -1$  pokazano na rys. 4.42, natomiast dla współczynnika  $R = 0$  na rys. 4.43.

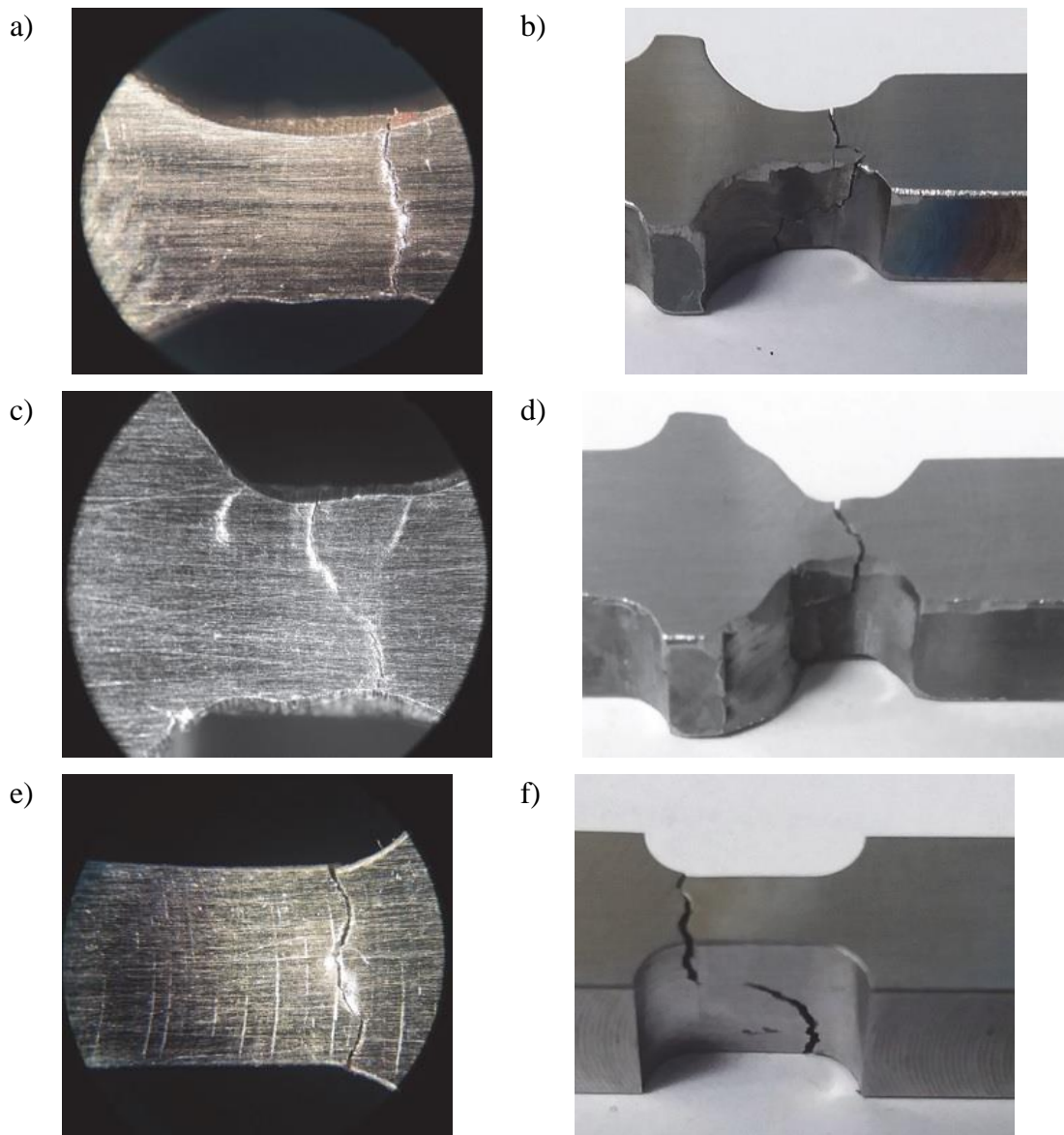






Rys. 4.42. Ścieżki pęknięć zmęczeniowych w próbkach poddanych zginaniu i skręcaniu dla  $R = -1$ : (a) wklęsłe spoiny widok z boku, (b) zniszczenie próbki; (c) wypukłe spoiny widok z boku, (d) zniszczenie próbki; (e) lita widok z boku, (f) zniszczenie próbki

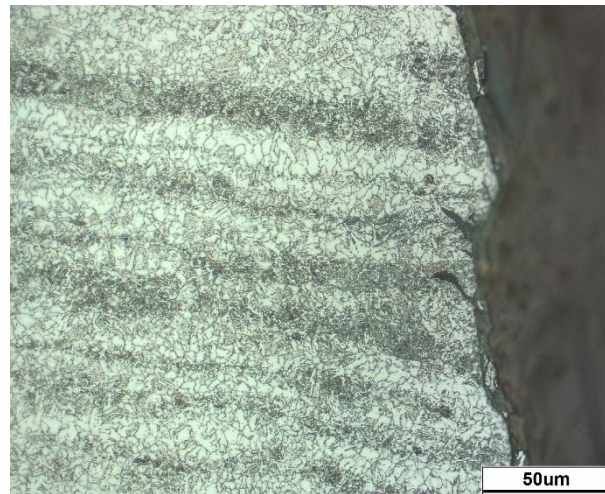
Podczas badań doświadczalnych obserwowano inicjację i dalszy wzrost pęknięć z jednej strony próbki (od góry lub od dołu) dla  $R = -1$ , po pewnym czasie propagacji następował wzrost pęknięć po drugiej stronie próbki. Rys. 4.42 (a), (c), (e) przedstawiają ścieżkę pęknięcia (powiększenie 20 razy), a na rys. 4.42 (b), (d), (f) przedstawiają zniszczenie próbki. Zniszczenie próbki nastąpiło odpowiednio po 57800 (spoina wklęsła), 56000 (spoina wypukła) i 59000 cykli (próbka lita). Rys. 4.43 przedstawia ścieżkę pęknięcia próbek po 9000 (spoina wklęsła, rys. 4.43a, b), 6200 (spoina wypukła, rys. 4.43c, d) i 12000 cykli (próbka lita, rys. 4.43e, f). Obserwowane ścieżki pęknięć (rys. 4.43) różnią się znacznie od poprzednich przypadków, dla próbki z wypukłymi spoinami (badaną przy  $R = 0$ ), trzy pęknięcia zostały zainicjowane na górze próbki (rys. 4.43c), a później jedno z nich stało się dominujące. Obrazy przedstawione na rys. 4.43 pokazują, że otrzymane ścieżki pęknięć są analogiczne do tych, które zwykle występują w mieszanym trybie pęknięcia. We wszystkich rozważanych przypadkach pęknięcia były inicjowane prostopadle do maksymalnego normalnego kierunku naprężeń. Po inicjacji pęknięcia wzrost następuje wzdłuż różnych płaszczyzn (styczna, normalna) w zależności od lokalnego stanu naprężenia przed wierzchołkiem pęknięcia, który jest silnie skorelowany z nieprężeniami własnymi występującymi w materiale po procesie spawania.



Rys. 4.43. Ścieżki pęknięć zmęczeniowych w próbkach poddanych zginaniu i skręcaniu dla  $R = -1$ : (a) wklęsłe spoiny widok z boku, (b) zniszczenie próbki; (c) wypukłe spoiny widok z boku, (d) zniszczenie próbki; (e) lita widok z boku, (f) zniszczenie próbki

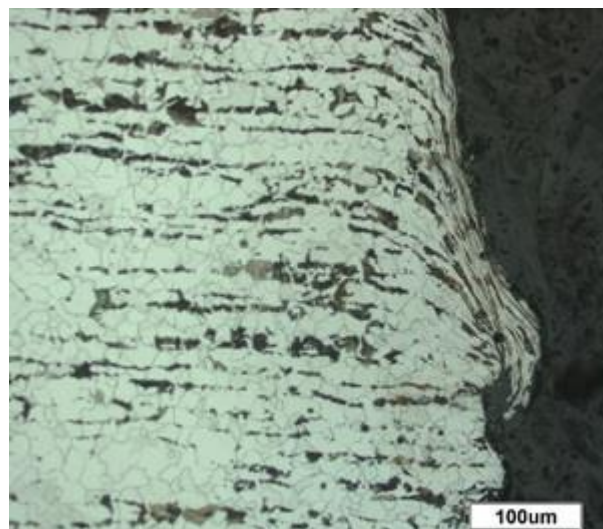
W przypadku badań doświadczalnych próbek po wyżarzaniu odprężającym oraz normalizującym zaobserwowano inny przebieg wzrostu pęknięć zmęczeniowych w porównaniu do próbek bez OC. Na rysunku 4.44 przedstawiono strukturę materiału próbki spawanej poddanej wyżarzaniu odprężającemu, gdzie główne pęknięcie przebiega poza spoiną oraz pierwotną SWC, pasmowo wzbogaconego w cementyt (węgliki) o postaci drobnoziarnistej. Od pęknięcia głównego rozwijały się liczne pęknięcia boczne inicjowane w obszarach bogatych w wydzielenia węglików. Z uwagi na przebieg pęknięcia głównego oraz licznych pęknięć bocznych przebiegających w obszarach wzbogaconych w węgliki można stwierdzić, że w wyniku cyklicznych obciążeń, w tych

obszarach nastąpiły wykruszenia węglików, następnie przyspieszony rozwój pęknięć i w rezultacie spadek trwałości zmęczeniowych.



Rys. 4.44. Rozwój pęknięcia w próbce spawanej po wyżarzaniu odprężającym (powiększenie 500x)

Strukturę materiału próbki spawanej poddanej wyżarzaniu normalizującemu pokazano na rysunku 4.45. Podczas wyżarzania w temperaturze 940°C w spoinie wytworzyła się struktura ferrytu z niewielką ilością perlitu. Pojawienie się w spoinie i SWC struktury ferrytu z niewielką ilością perlitu jest główną przyczyną obniżenia trwałości próbek. Propagacja pęknięcia głównego przebiegała poza spoiną w strukturze ferrytyczno - perlitycznej o wyraźnym pasmowym ułożeniu ziaren perlitu. Występują również nieliczne pęknięcia boczne propagujące po granicach ziaren. W obrębie złomu obserwuje się efekt silnych odkształceń plastycznych.



Rys. 4.45. Rozwój pęknięcia w próbce spawanej po wyżarzaniu normalizującym (powiększenie 200x)

#### 4.7.2. Analiza powierzchni złomów zmęczeniowych

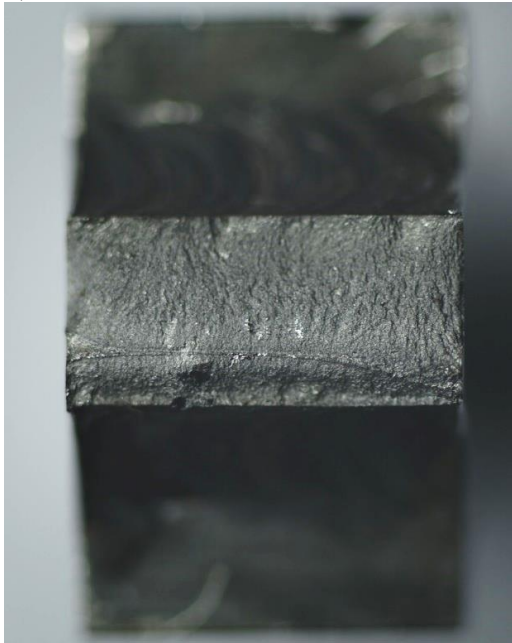
W ostatnim rozdziale pracy przedstawiono powierzchnie złomów zmęczeniowych badanych próbek. Na rys. 4.46 przedstawiono przykładowe fotografie złomów zmęczeniowych próbek poddanych zginaniu dla  $R = -1$ , a na rys. 4.47 próbek po wyżarzaniu oraz zabiegu technologicznym. Złom zmęczeniowy próbki litej pokazano na rys. 4.46a. Można zauważyć charakterystyczną dla wahadłowych obciążeń, w środkowym obszarze złomu, linię uskoku. Linia ta biegnie wzdłuż poziomego wymiaru poprzecznego próbki. W próbce litej pęknięcie zapoczątkowane zostało w górnej części, a następnie drugie pęknięcie zostało zainicjowane oraz propagowało do środka przekroju. Przełom próbki powstał w jednej płaszczyźnie bez wyraźnych uskoków. W przypadku złomu próbki ze spoinami wklęsłymi, przedstawionej na rys. 4.46b również można zauważyć linię uskoku. Inna jednak jest powierzchnia przełomu w stosunku do przełomu próbki litej. Widać, że pęknięcie rozpoczęło się z jednej strony (od góry), a po zbliżeniu się czoła pęknięcia do linii uskoku nastąpiło gwałtowne zniszczenie próbki (przełom doraźny). Można to zauważyć w dolnej części próbki tuż za linią uskoku, w postaci wyrwania części materiału. U góry próbki widać również wpływ spawania na strukturę przełomu oraz krawędzi lica spoiny, która nie jest idealnie prosta. Nierówność ta spowodowała początkowe zniekształcenia powierzchni pęknięcia. Trzeci przełom zmęczeniowy widoczny na rys. 4.46c przedstawia próbkę ze spoinami wypukłymi. Widać, że w tym przypadku decydujący wpływ na początkową powierzchnię pęknięcia miała ostra i nierówna krawędź spoiny wypukłej. Pęknięcie rozwijało się wzdłuż krawędzi lica powodując pofalowany przebieg wzrostu pęknięcia. Od góry oraz od dołu uwidoczniła się twarda struktura strefy wpływu ciepła, która decydowała o powierzchni pęknięcia. Poza tym na powierzchni pęknięcia zaobserwowano wyrwania materiału przeplatane z łagodnymi obszarami złomu zmęczeniowego (jasne, błyszczące obszary). Pęknięcie próbki ze spoinami wypukłymi rozwijało się w miarę równomiernie z góry oraz z dołu. Na rys. 4.47a pokazano przełom zmęczeniowy próbki ze spoinami wypukłymi po wyżarzaniu odprężającym. W przełomie tym, podobnie jak w przypadku innych próbek spawanych, można zaobserwować nierówną powierzchnię pęknięcia zarówno z góry jak i z dołu pod linią. Pęknięcie zainicjowane w obszarze strefy wpływu ciepła, po lewej górnej stronie powierzchni przełomu. Następnie pęknięcie pojawiło się z lewej strony u dołu. Doraźny przełom nastąpił po osłabieniu próbki widoczny w prawej części próbki.



a)



b)



c)



Rys. 4.46. Przykładowe złomy zmęczeniowe przy zginaniu ( $R = -1$ ) dla próbki: a) litej, b) ze spoinami wklęsłymi, c) ze spoinami wypukłymi

Na rys. 4.47b pokazano przełom zmęczeniowy próbki ze spoinami wklęsłymi po wyżarzaniu normalizującym. Powierzchnia przełomu przebiega w sposób bardziej spokojny, w porównaniu do próbek po wyżarzaniu odprężającym. Krawędzie pęknięcia kształtują się w jednej linii. Widoczna linia uskoku, w kierunku której pęknięcie rozwijało się w miarę równomiernie z obu stron próbki. Szeroka linia uskoku sugeruje, że materiał był bardzo plastyczny. Przełom próbki spawanej po zabiegu technologicznych przedstawiono na rysunku 4.47c. Rozwój pęknięcia następował w górnej części próbki, a pod linią widoczny jest obszar złomu doraźnego. Krawędź pęknięcia przebiega w jednej

linii, może to być spowodowane mechanicznym usunięciem nierównego lica. Pęknięcie przebiega również w SWC, gdzie widoczna jest zróżnicowana struktura pod względem budowy oraz twardości.

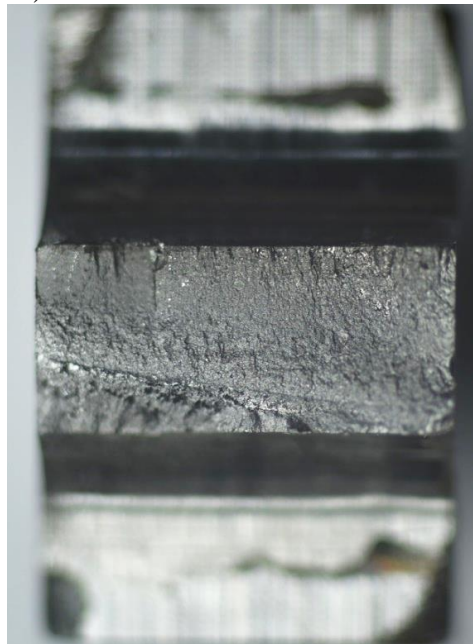
a)



b)

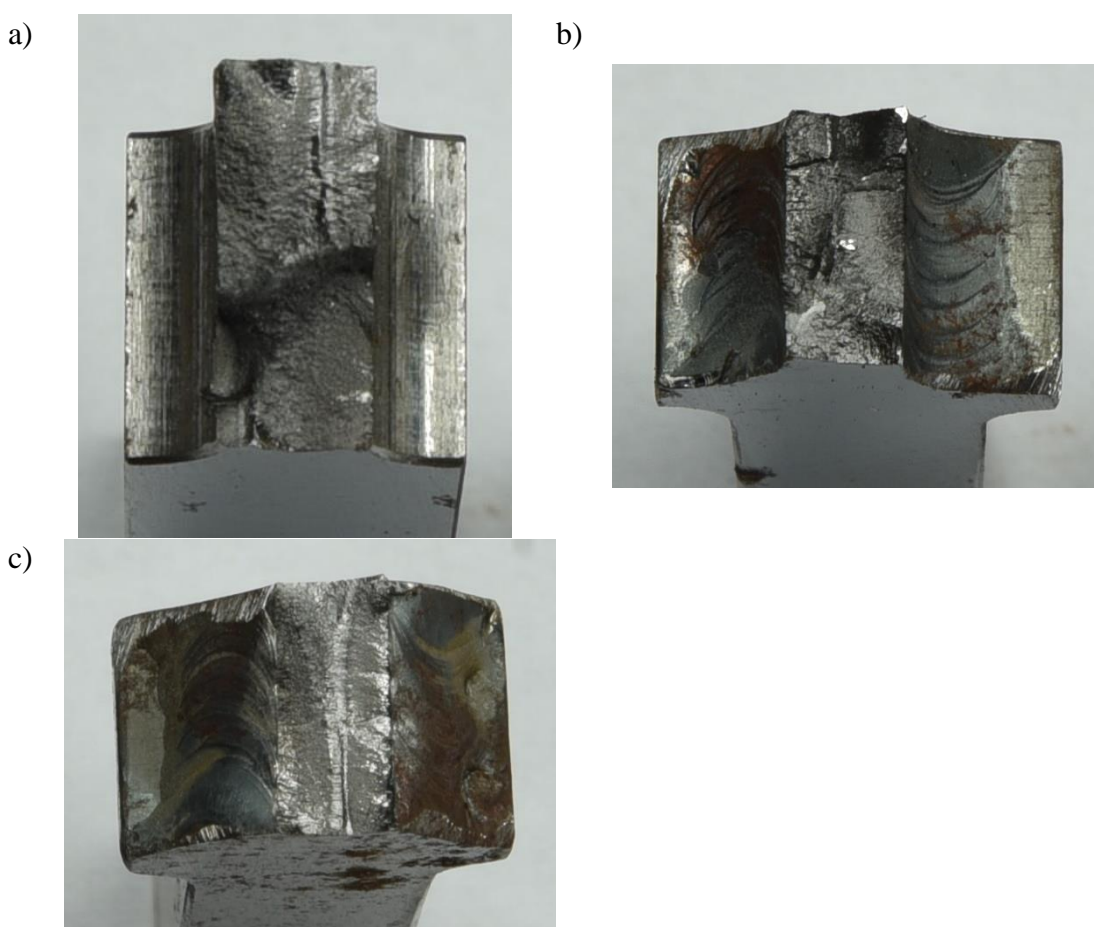


c)



Rys. 4.47. Przykładowe złomy zmęczeniowe przy zginania ( $R = -1$ ) dla próbki: a) ze spoinami wypukłymi po wyżarzeniu odprężającym, b) ze spoinami wklęsłymi po wyżarzeniu normalizującym, c) ze spoinami po zabiegu technologicznym

Na rysunku 4.48 przedstawiono złomy zmęczeniowe próbek dla  $R = -1$  poddanych zginaniu ze skręcaniem. Przełom zmęczeniowy próbki litej, widoczny na rys 4,48a charakteryzuje się bardzo nieregularnym przebiegiem. Inicjacja pęknięcia nastąpiła w prawym dolnym rogu. Z uwagi na drobną strukturę pęknięcia w tych obszarach można zauważyć, że pęknięcia rozwijały się stopniowo z niewielką prędkością. Po przekroczeniu pewnej wartości pęknięcia nastąpił doraźny przełom obserwowany w obszarze górnej prawej oraz lewej dolnej powierzchni przełomu. W lewym dolnym rogu zaobserwowano wyrwanie materiału. Nieregularny przebieg pęknięcia miał możliwości powstania w jednorodnej próbce z litego materiału.

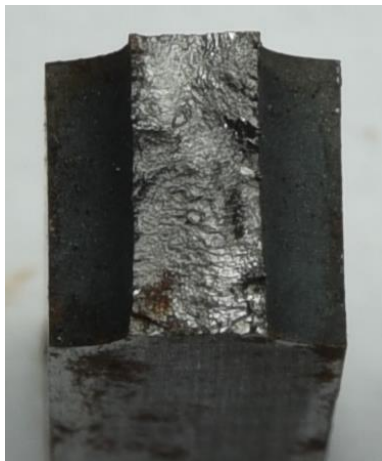


Rys. 4.48. Przykładowe złomy zmęczeniowe przy zginaniu ze skręcaniem ( $R = -1$ ) dla próbki: a) litej, b) ze spoinami wklęsłymi, c) ze spoinami wypukłymi

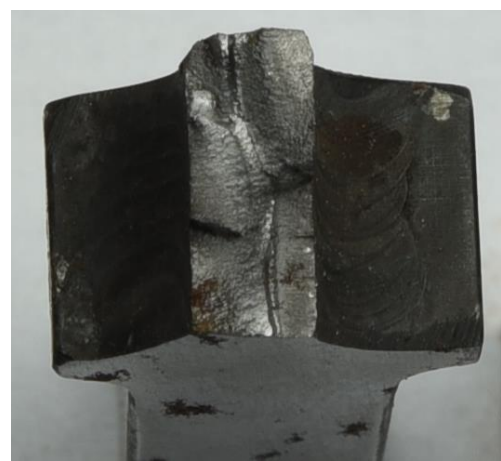
Natomiast w próbkach spawanych, gdzie struktura determinuje ścieżkę pęknięcia, z uwagi na silne jej zróżnicowanie (zwłaszcza w strefie wpływu ciepła) przebieg pęknięcia nie zgodny z kierunkiem obciążenia. Na rys. 4.48b pokazano złom zmęczeniowy próbki ze spoinami wklęsłymi. Pęknięcie zainicjowane zostało i rozwijało się po przekątnej próbki tzn. od strony lewej u dołu oraz prawej u góry. Następnie pęknięcie rozwijało się po

prawej stronie próbki, aż do skośnie biegnącej linii ugięcia, po czym obserwuje się doraźny przełom próbki z widocznymi wykruszeniami materiału w prawej dolnej oraz lewej górnej części próbki. Rys. 4.48c przedstawia złom zmęczeniowy próbki ze spoinami wypukłymi. Pęknięcie rozwijał się z obu stron próbki. Doraźny złom nastąpił w górnej lewej stronie próbki. Na rysunku 4.49 przedstawiono złomy zmęczeniowe próbek poddanych zginaniu ze skręcaniem po wyżarzaniu. Ostatnią grupą opisanych przełomów zmęczeniowych stanowią próbki po obróbce cieplnej, w których zmiany strukturalne powodują różne zachowania się materiału podczas badań zmęczeniowych. Rys. 4,49a przedstawia próbkę litą po wyżarzaniu normalizującym. W przełomie tym można zaobserwować łagodnie biegnąca linię ugięcia (z prawej dolnej do lewej górnej części próbki). Materiał próbki, poddany wyżarzaniu normalizującemu spowodował silne odkształcenia plastyczne i niewielkie trwałości zmęczeniowe, co miało wpływ, że nie powstały na powierzchni przełomu wyraźne obszary charakterystyczne dla złomów zmęczeniowych.

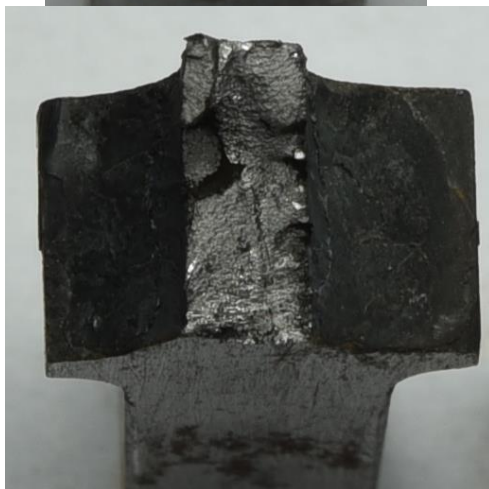
a)



b)



c)



Rys. 4.49. Przykładowe złomy zmęczeniowe przy zginaniu ze skręcaniem ( $R = -1$ ) dla próbki: a) litej po wyżarzaniu normalizującym, b) ze spoinami wklęsłymi po wyżarzaniu odprężającym, c) ze spoinami wklęsłymi po wyżarzaniu normalizującym

Na rys. 4,49b pokazano próbkę ze spoinami wklęsłymi po wyżarzaniu odprężającym. Materiał poprzez wyżarzanie odprężające stał się bardziej jednorodny oraz plastyczny w porównaniu do próbek spawanych bez obróbki cieplnej. Ścieżka przełomu jest zbliżona do przełomu próbki litej (rys. 4.48a). Linia ugięcia biegnie po przekątnej przełomu. Jasne i gładkie obszary przełomu zmęczeniowego sugerują, że rozwój następował sukcesywnie bez wykruszenia materiału. Doraźny przełom można zaobserwować po lewej dolnej stronie próbki. Złom pokazany na rys. 4.49c można porównać ze złomem pokazanym na rys. 4.48a. Struktura przełomu jest gruboziarnista z dużymi odkształceniami plastycznymi, widocznymi na powierzchni próbki.

#### 4.8. Podsumowanie

W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań doświadczalnych rozwoju pęknięć zmęczeniowych w próbkach wykonanych ze stali S355, litych oraz spawanych z teowym złączem spawanym ze spoinami pachwinowymi. Badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych przeprowadzono przy zginaniu i proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem. Badania realizowano przy obciążeniu z kontrolowaną siłą w zakresie niskiej i wysokiej liczby cykli. Prezentowane wyniki badań doświadczalnych propagacji pęknięć zmęczeniowych umożliwiają określenie zachowania się elementów spawanych w przypadku różnych koncentratorów naprężenia, współczynników asymetrii cyklu oraz prostych i złożonym (mieszanym) sposobie obciążenia. Badania doświadczalne prowadzono na trzech do pięciu próbek dla każdego poziomu obciążenia. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów długości pęknięć „a” w funkcji liczby cykli  $N$  oraz prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych  $da/dN$  w funkcji zakresu zmian parametru  $\Delta J$ . Wyniki badań doświadczalnych rozwoju pęknięć potwierdzają, że zmiana współczynnika asymetrii cyklu z  $R = -1$  do  $R = 0$  powoduje spadek trwałości zmęczeniowej. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników obliczeń z użyciem równania Dowlinga i Begleya z wynikami otrzymanymi z badań doświadczalnych. Podczas badań doświadczalnych przy

zginaniu ze skręcaniem zauważono nierównomierny rozwój pęknięć zmęczeniowych po obu stronach bocznych próbek.

Zastosowano po raz pierwszy w opisie tego typu badań doświadczalnych z użyciem parametru  $J$ , dla złączy spawanych obciążonych w sposób opisany w pracy, dodatkowy współczynnik korekcyjnego  $M_k$ , który uwzględnia karb strukturalny, tzn. wpływ geometrii i obciążenia w złączy spawanym. Ponadto zauważono, że zastosowanie obróbki cieplnej polegającej na wyżarzaniu odprężającym oraz normalizującym powoduje spadek trwałości zmęczeniowej badanych próbek. Dokonana analiza rozwoju ścieżek pęknięcia i powierzchni złomów zmęczeniowych badanych próbek umożliwiła określenie rodzaju oraz kierunku rozwoju pęknięć dla badanych sposobów obciążenia.



## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych rozwoju pęknięć zmęczeniowych i obliczeń numerycznych w próbkach litych oraz spawanych poddanych zginaniu i zginaniu ze skręcaniem można sformułować następujące wnioski:

1. Rozwój pęknięć zmęczeniowych przy zginaniu ( $R = -1$ ) następował w dwóch etapach. W początkowym etapie badań obserwowano pęknięcia inicjujące z jednej strony (z góry lub dołu) próbki, do którego podczas propagacji dochodziło pęknięcie inicjujące się z drugiej strony próbki.
2. Rozwój pęknięć zmęczeniowych przy zginaniu ze skręcaniem obserwowano w jednym z naroży próbki, które następnie rozwijało się przechodząc na wskroś próbki.
3. Zastosowano współczynnik  $M_k$ , uwzględniający karb strukturalny, który wpływa na wartości zakresu parametru  $\Delta J$  przybliżając wyniki obliczeń do otrzymanych z badań doświadczalnych.
4. Wykazano, że geometria lica spoin (wypukła lub wklęsła) wpływa na trwałość zmęczeniową całego złącza spawanego.
5. Potwierdzono, że zmiana współczynnika asymetrii cyklu z  $R = 0$  do  $R = -1$  powoduje wzrost trwałości zmęczeniowej przy zginaniu i zginaniu ze skręcaniem.
6. Stwierdzono, że próbki spawane mają mniejsze trwałości, w porównaniu do próbek litych.
7. Wykazano, że zmiana sposobu obciążenia ze zginania i skręcania na zginanie dla badanych współczynników  $R$  powoduje wzrost trwałości zmęczeniowej.
8. Zauważono po wyżarzaniu odprężającym oraz normalizującym w spoinie oraz SWC mniejsze fluktuacje twardości w porównaniu do połączeń spawanych bez obróbki cieplnej.
9. Zaobserwowano znaczny spadek twardości w próbkach poddanych wyżarzaniu normalizującemu w porównaniu do próbek bez obróbki cieplnej.
10. Wykazano, że w próbkach spawanych po wyżarzaniu normalizującym podczas pęknięcia występują duże odkształcenia plastyczne.
11. Wykazano, że próbki po wyżarzaniu odprężającym oraz normalizującym mają niższą trwałość w porównaniu do próbek bez obróbki cieplnej.
12. Porównując wyniki uzyskane z metody elementów skończonych z wynikami z metody analitycznej wykazano, że błąd względny nie przekracza 9%.

13. Metody numeryczne bez wykonania badań doświadczalnych mogą dać wyniki o dużej rozbieżności w porównaniu do wyników uzyskanych z badań doświadczalnych.



## 6. LITERATURA

- [1] Donald O. Thompson: Evolution of QNDE's core interdisciplinary science and engineering base, AIP Conference Proceedings 1211, Iowa State University, 2010
- [2] Tomasz Chady, Ryszard Sikora: Badania nieniszczące: historia, stan obecny i perspektywy rozwoju, Przegląd Spawalnictwa 12/2013
- [3] PN-EN ISO 9712, Badania nieniszczące, Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących, PKN, 2012
- [4] PN-EN 473, Badania nieniszczące - Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących - Zasady ogólne, PKN, 2008
- [5] Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące, Podstawy defektoskopii, WNT, 2001
- [6] Hlebowicz J.: Badania wizualne. Zasady ogólne i przykłady zastosowań, Wyd. "Biuro Gamma", Warszawa, 1997
- [7] PN-EN ISO 17637, Badania nieniszczące złączy spawanych - Badania wizualne złączy spawanych, PKN, 2017
- [8] PN-EN 970, Spawalnictwo -- Badania nieniszczące złączy spawanych -- Badania wizualne, PKN, 1999
- [9] PN-EN ISO 5817, Spawanie - Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) - Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych, PKN, 2009
- [10] PN-EN ISO 6520-1, Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach, część 1: Spawanie, PKN, 2009
- [11] M.A. Wahab, M.S. Alam: The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints, Journal of Materials Processing Technology 153–154, 2004, 931–937
- [12] Maddox S.J.: Applying fitness-for-purpose concepts to the fatigue assessment of welded joints, in: The International Conference on Fatigue, Toronto, Ontario, Canada, 1994, pp. 72–81
- [13] Czuchryj J.: Powierzchniowe niezgodności spawalnicze w złączach spawanych z metali. Podręcznik dla spawaczy, Instytut Spawalnictwa, 2013
- [14] TUV Rheinland: Badania wizualne (1 + 2), materiały szkoleniowe, TUV Akademia Polska Sp. z o.o., 2007

- [15] TUV Rheinland: Badania wizualne (3), materiały szkoleniowe, TUV Rheinland Polska Sp. z o.o., 2016
- [16] Pod redakcją J. Pilarczyk: Poradnik inżyniera – Spawalnictwo, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2014
- [17] TUV Rheinland: Badania magnetyczno – proszkowe MT (1 + 2), materiały szkoleniowe, TUV Akademia Polska Sp. z o.o., 2007
- [18] Czuchryj J.: Badania złączy spawanych wg norm europejskich. Przegląd metod, Wyd. “Biuro Gamma”, Warszawa, 2004
- [19] Lewandowski J., Rozumek D.: Metody nieniszczące w badaniach połączeń spawanych wirnika wentylatora, Przegląd Spawalnictwa 4/2014, 2004
- [20] Lewandowski J.: Zastosowanie metody magnetyczno – proszkowej w badaniach nieniszczących elementów maszyn i urządzeń eksploatowanych w przemyśle, Zeszyty Naukowe politechniki Opolskiej, Mechanika z. 104, Opole, 2014
- [21] PN-EN ISO 3059, Badania nieniszczące -- Badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe -- Warunki obserwacji, PKN, 2016
- [22] PN-EN ISO 9934-1, Badania nieniszczące -- Badania magnetyczne proszkowe -- Część 1: Zasady ogólne, PKN, 2017
- [23] PN-EN ISO 9934-2, Badania nieniszczące -- Badania magnetyczne proszkowe -- Część 2: Środki wykrywające, PKN, 2015
- [24] PN-EN ISO 23278, Badania nieniszczące spoin -- Badania magnetyczno-proszkowe -- Poziomy akceptacji, PKN, 2015
- [25] PN-EN ISO 17635, Badania nieniszczące spoin – Zasady ogólne dotyczące metali, PKN, 2017
- [26] Borowiecka A.: Badania penetracyjne : Poradnik, Wyd. “Biuro Gamma”, Warszawa, 2000
- [27] TUV Rheinland: Badania penetracyjne PT (1 + 2), materiały szkoleniowe, TUV Akademia Polska Sp. z o.o., 2008
- [28] PN-EN ISO 3452-1, Badania nieniszczące -- Badania penetracyjne -- Część 1: Zasady ogólne, PKN, 2013
- [29] PN-EN ISO 23277, Badania nieniszczące spoin -- Badania penetracyjne -- Poziomy akceptacji, PKN, 2015
- [30] Lewińska-Romicka A.: Defektoskopia wiroprądowa. Poradnik, Wyd. “Biuro Gamma”, Warszawa, 1997

- [31] Lewińska-Romicka A.: Wykrywanie nieciągłości i ocena własności materiałów metodą wiroprądową. Materiały seminaryjne, Zakopane, 1998
- [32] PN-EN ISO 15549, Badania nieniszczące -- Badania metodą prądów wirowych -- Zasady ogólne, PKN, 2011
- [33] PN-EN ISO 17643, Badanie nieniszczące spoin -- Badanie prądami wirowymi spoin przez analizę płaszczyzny zespolonej, PKN, 2015
- [34] Uczanin W. M.: Badania nieniszczące złączy spawanych metodą prądów wirowych, Przegląd Spawalnictwa 7/2013, 2013
- [35] Kondej A., Baranowski M.: Metoda prądów wirowych w badaniu złączy spawanych – ocena głębokości wklęsnięcia lica spoiny, Przegląd Spawalnictwa 3, 2014
- [36] TUV Rheinland: Badania ultradźwiękowe UT 2, materiały szkoleniowe, TUV Akademia Polska Sp. z o.o., 2016
- [37] TUV Rheinland: Badania ultradźwiękowe UT 3, materiały szkoleniowe, TUV Akademia Polska Sp. z o.o., 2016
- [38] PN-EN 12668-1, Badania nieniszczące – Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej - Część 1: Aparatura, PKN, 2010
- [39] PN-EN 12668-2, Badania nieniszczące – Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej - Część 2: Głowice, PKN, 2010
- [40] PN-EN 12668-3 Badania nieniszczące – Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej - Część 3: Aparatura kompletna, PKN, 2010
- [41] PN-EN ISO 16811, Badania nieniszczące - Badania ultradźwiękowe - Nastawianie czułości i zakresu obserwacji, PKN, 2014
- [42] PN-EN ISO 11666, Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe złączy spawanych – Poziomy akceptacji, PKN, 2018
- [43] PN-EN ISO 17640, Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe złączy spawanych, PKN, 2018
- [44] Halmshaw R.: Introduction to the non-destructive testing of welded joints, Abington Publishing, Cambridge, 1996
- [45] Jawor R., Marchwicki M., Niezborala J., Okrój R.: Ultradźwiękowe badania morskich konstrukcji spawanych, SIMP oraz Instytut Okr. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1985
- [46] Bruzda J.: Radiograficzna kontrola złączy spawanych. Technika badań radiograficznych, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 1992
- [47] Jeziński G.: Radiografia przemysłowa, WNT, Warszawa, 1993

- [48] PN-EN ISO 19232, Badania nieniszczące -- Jakość obrazu radiogramów, PKN, 2013
- [49] PN-EN ISO 17636, Badania nieniszczące spoin -- Badanie radiograficzne, PKN, 2013
- [50] PN-EN ISO 10675, Badania nieniszczące spoin -- Kryteria akceptacji badań radiograficznych, PKN, 2017
- [51] A. A. Griffith: The phenomena of rupture and flow in solid, *Philosophical Transactions, Series A*, tom 221, s. 163-198, 1920
- [52] Moszyński W.: Wytrzymałość zmęczeniowa części maszyn, PWT, Warszawa, 1953
- [53] D. S. Dugdale: Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 8, pp. 100-104, 1960
- [54] C. E. Inglis: Stresses in plane due to the presence of crack and sharp corners. *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Vol. 55, pp. 219-241, 1913
- [55] Kocańda S., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa 1997, s. 288
- [56] Rozumek D., Macha E., *Opis rozwoju pęknięć zmęczeniowych w materiałach sprężysto-plastycznych przy proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem*, Politechnika Opolska, Opole 2006, s. 196
- [57] E. Orwan: Fundamentals of brittle behavior of metals. In. *Fatigue and Fracture of Metals* (Ed. W. M. Murray), pp. 139-167, 1952
- [58] G. R. Irwin: Analysis of stress and strain near the end of crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364, 1957
- [59] Molski K.; Zastosowanie jednostkowej funkcji wagowej w wymiarowaniu konstrukcji metodami mechaniki pęknięcia. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika*, z. 185, 2000
- [60] Murakami Y. (Ed): *Stress intensity factors handbook*. Pergamon Press, 1987
- [61] Neimitz A.: *Mechanika Pęknięcia*. PWN, s. 436, 1998
- [62] G. C. Sih: *Handbook of stress intensity factor*. Inst. of Fracture of Solid Mechanics, Lehigh University, 1973
- [63] H. Tada, P. Paris, G. R. Irwin: *The stress analysis of crack handbook*. Del Research Corporation, Hellertown, 1973
- [64] Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W.: *Wytrzymałość materiałów*, Wyd. „Arkady”, Warszawa 1985, ss. 278-285
- [65] Erdogan F., Sih G. C.: On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 519-525, 1963

- [66] Faszynka S., Rozumek D., Lewandowski J.: Crack growth path in specimens with rectangular section under bending with torsion. *Solid State Phenomena*, Vol. 224, pp. 133-138, 2015
- [67] H. A. Richard, M. Fulland, M. Sander: Theoretical crack path prediction. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 28, pp. 3-12, 2005
- [68] D. Rozumek, C. T. Lachowicz, E. Macha: Analytical and numerical evaluation of stress intensity factor along crack paths in the cruciform specimens under out-of-phase cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 11, pp. 1808-1821, 2010
- [69] Lewandowski, J., Rozumek, D., Hepner M.: Badania połączeń spawanych poddanych wahadłowemu zginaniu. *Przegląd Spawalnictwa*, Warszawa, Vol. 88, 4/2016, s. 23-26
- [70] J. Lewandowski, D. Rozumek: Cracks growth in S355 steel under cyclic bending with fillet welded joint, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 86, 2016, pp. 342–350
- [71] J. R. Yates, K. J. Miller: Mixed mode (I+III) fatigue thresholds in a forging steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 12, 1989, pp. 259-270
- [72] W. F. Brown, J. E. Srawley: Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials. *ASTM STP 410*, American Society for Testing and Materials, 1966
- [73] J. D. Eshelby: The force on an elastic singularity. *Phil. Trans. R. Soc., London*, pp. 87-112, 1951
- [74] G. P. Czerepanov: O rasprostranieni trieszczin w spłoszonej sriedie. *PMM*, Tom 31, No. 3, ss. 476-488, 1967
- [75] J. R. Rice: A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 379-386, 1968
- [76] M. Jakubowski: Predictions of corrosion fatigue crack propagation life for welded joints under cathodic potentials, *Polish Marine Research*, no 2, pp 17-20, 2005
- [77] Féthi Hadjoui, Mustapha Benachour, Mohamed Benguediab: Fatigue Crack Growth on Double Butt Weld with Toe Crack of Pipelines Steel, *Materials Sciences and Applications*, No 3, pp. 596-599, 2012

- [78] Irwin G. R.: Plastic zone near a crack and fracture toughness. In: Proceeding of the 7th Sagamore Ordnance Materials Conference, Syracuse University, Vol. IV, 1960, pp. 63-78
- [79] Wells A.A.: Critical tip opening displacement as fracture criterion. In: Proc. Crack Propagation Symp., Cranfield, Vol. 1, 1961, pp. 210-221
- [80] Sih G. C.: Energy-density concept in fracture mechanics. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 5, No. 4, 1973, pp. 1037-1040
- [81] PN-88/H-04336, Metoda badania odporności na pękanie przez wyznaczenie krytycznej wartości całki  $J$ ,  $J_{Ic}$ . Wyd. Normalizacyjne „Alfa”, Warszawa 1988
- [82] ASTM E813 – 89, Standard test method for  $J_{Ic}$ , a measure of fracture toughness. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1987
- [83] Hertel O., Döring R., Vormwald M.: Cyclic J-integral under nonproportional loading. Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture, DVM Berlin, 2004, pp. 531-536
- [84] Rozumek D.: Influence of the slot inclination angle in FeP04 steel on fatigue crack growth under tension. Materials and Design, Vol. 30, No. 6, 2009, pp. 1859-1865
- [85] Rozumek D.: Influence of the notch radius on changes of the  $\Delta J$  parameter under fatigue crack growth rate. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 47, No. 4, 2009, pp. 751-759
- [86] Rozumek D.: Prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych w stopie PA6 przy mieszanym I+III sposobie obciążenia. Przegląd Mechaniczny, Nr 3/2006, ss. 22-26
- [87] Toth L., Krasowsky A.J.: Material characterization required for reliability assessment of cyclically loaded engineering structures. Part 2: Fatigue application. Reliability Assessment of Cyclically Loaded Engineering Structures, Ed. R. A. Smith, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 225-272
- [88] Paris P. C., Erdogan F.: A critical analysis of crack propagations laws. Journal of Basic Engineering, Trans. American Society of Mechanical Engineers. Vol. 85, No. 4, 1963, pp. 528-534
- [89] Forman R. G., Kearney V. E., Engle R. M.: Numerical analysis of crack propagations in cycling – loaded structures. International Journal of Basic Engineering 89, ASME 124, 1967, pp. 456-463
- [90] Elber W.: Einfluss der plastischen Zone auf die rissausbreitung unter schwingbelastung. Materialprüfung. No. 6, 1970, pp. 189–193

- [91] Priddle E. K.: Some equations describing the constant amplitude fatigue crack propagation characteristics of a mild steel. Berkeley Nuclear Laboratories, 1972, RD/B/N2390
- [92] McEvily A. J.: On closure in fatigue crack growth. ASTM STP 982, American Society for Testing and Materials, 1988, pp. 35-43
- [93] Pearson S.: The effect of mean stress on fatigue crack propagation in half-inch thick specimens of aluminum alloys of high and low fracture toughness. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, No. 1, 1972, pp. 9-14
- [94] Manson S. S.: Interface between fatigue, creep and fracture. International Journal of Fatigue Mechanics, Vol. 2, No. 1, 1966, pp. 327–363
- [95] Tomkins B.: Fatigue failure in high strength metals. Philosophical Magazine, 1971, Vol. 23, No 183, pp. 687-703
- [96] Werner K.: Pomiary pęknięć i odkształceń. PAN, Katowice, 2003, s. 133
- [97] Dowling N. E., Begley J. A.: Fatigue crack growth during gross plasticity and the J-integral. In: Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, 1976, pp. 82-103
- [98] Gasiak G., Lachowicz C. T., Rozumek D.: Badania wpływu parametrów geometrycznych próbki na prędkość pęknięcia przy wahadłowym zginaniu. XIX Sympozjum Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, Akademia Techniczno-Rolnicza Bydgoszcz-Pieczyska, 2000, ss. 141-148
- [99] Gasiak G., Rozumek D., Lachowicz C. T.: Badanie wpływu obciążenia średniego na prędkość pęknięcia w stali 18G2A przy zmiennym zginaniu. XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka 2000, Politechnika Warszawska, ss. 227-232
- [100] Lee J. H., Kim Y. J., Yoon K. B.: An interpretation of the C1 parameter for increasing load conditions. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 22, No. 10, 1999, pp. 859-867
- [101] Gasiak G., Rozumek D.:  $\Delta J$ -integral range estimation for fatigue crack growth rate description. International Journal of Fatigue, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 135-140
- [102] Rozumek D.: Badanie wpływu geometrii próbki, typu koncentratora i rodzaju materiału na trwałość zmęczeniową przy zmiennym zginaniu. Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2002, s.156
- [103] Rozumek D.: Opis prędkości pęknięcia zmęczeniowego w ujęciu energetycznym elementów z karbem przy rozciąganiu i zginaniu. Przegląd Mechaniczny, Nr 11/2003, ss. 33-36

- [104] Rozumek D.: Fatigue crack growth of notched members under bending for different stress ratios. *Materials Engineering, Żilina*, Vol. 10, No. 2, 2003, pp. 1-8
- [105] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. WNT, Warszawa 1985, s. 492
- [106] Łagoda T.: Trwałość zmęczeniowa wybranych złączy spawanych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2005, s. 159
- [107] Biłous P., Rozumek D., Łagoda T.: Trwałość próbek z karbem geometrycznym wykonanych ze stali S355N, *Mechanika, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, Zeszyty 9/107*, 2010, s. 3-11
- [108] Neuber H., Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen, *Konstruktion im Maschinen – Apparate – und Gerätebau*, Heft 7, 1968, pp. 245-251
- [109] Łagoda T., Biłous P.: Jednoczesne uwzględnienie karbów geometrycznych i strukturalnych w złączu spawanym, *Modelowanie inżynierskie, Gliwice 2012*, s. 179-186,
- [110] Hobbacher A.: IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, Welding Research Council, New York, 2009, p.144
- [111] M.A. Wahab, M.S. Alam, The significance of weld imperfections and Surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints, *J. Mater. Process. Technol.* 153–154 (2004) 931–937.
- [112] Faszyńska S., Rozumek D., Lewandowski J.: Crack growth path in specimens with rectangular section under bending with torsion. *Solid State Phenomena*, Vol. 224, 2015, pp. 133-138
- [113] Faszyńska S., Rozumek D., Lewandowski J.: Rozwój ścieżki pękania przy cyklicznym zginaniu ze skręcaniem w próbkach o przekroju prostokątnym. XXV Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, 20 – 23 Maj 2014, Bydgoszcz – Fojutowo, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, ss. 49-50
- [114] Kujawski D.: Enhanced model of partial crack closure for correlation of R-ratio effects in aluminum alloys, *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, No. 1, 2001, pp. 95-102
- [115] Walker K.: The effect of stress ratio during crack propagation on fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum. *Effect of Environment and Complex Load History on Fatigue Life.*, ASTM STP 462, Philadelphia 1970, pp. 1-14



- [116] Wang C.: Effect of stress ratio on short fatigue crack growth. *Trans ASME*, Vol. 118, No. 3, 1996, pp. 362-366
- [117] Xiaoping H., Torgeir M.: Improved modeling of the effect of R-ratio on crack growth rate. *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 4, 2007, pp. 591-602
- [118] Gasiak G., Grzelak J.: Badanie prędkości propagacji szczeliny zmęczeniowej przy rozciąganiu dla różnych wartościach obciążenia średniego. XVI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, 12-14.10.1994, Jachranka, Politechnika Warszawska, ss. 80-83
- [119] Gasiak G., Grzelak J.: Badanie wpływu naprężenia średniego na prędkość pęknięcia zmęczeniowego przy rozciąganiu stali 10HNAP. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanik z. 50*, Kielce, 1993, ss. 141-148
- [120] Daniewicz S. R., Bloom J. M.: An assessment of geometry effects on plane stress fatigue crack closure using a modified strip-yield model. *International Journal of Fatigue*, Vol. 18, No. 7, 1996, pp. 483-490
- [121] Bukowski L., Kłysz S.: Investigations into fatigue crack propagation in WT-9 titanium alloy. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 32, No. 1, 1994, pp. 43-57
- [122] Lewandowski, J., Rozumek, D., Marciniak, Z., Lesiuk, G., Brighenti, R. : Fatigue crack growth in welded S355 specimens subjected to combined loadings, *Frattura ed Integrità Strutturale*, no 48, 2019, pp. 10 -17
- [123] Bicharski M.: *Inżynieria materiałowa*, WNT, Warszawa, 2017, s. 674
- [124] Dobrzański L.: *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe, podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa, 2006, s. 1596
- [125] Bicharski M.: *Inżynieria materiałowa - Stal*, WNT, Warszawa, 2017, s. 551
- [126] Fragoudakisa R., Karditsasb S., Savaidisb G, Michailidis N.: The Effect of Heat and Surface Treatment on the Fatigue Behaviour of 56SiCr7 Spring Steel, XVII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM17), *Procedia Engineering* 74, 2014, pp. 309 – 312
- [127] Černý I., Mikulová D., Čipera M., Sís J.: Evaluation of fatigue strength of 42SiCr steel heat treated by advanced process considering hardness scatter and content of inclusions, *Metal 2012*, Brno, Czech Republic, 23 - 25.05. 2012

- [128] Somer M.: Effect of Heat Treatment on Fatigue Behavior of (A193-51T-B7) Alloy Steel, Proceedings of the World Congress on Engineering 2007 Vol II, London, U.K., July 2 - 4, 2007
- [129] Rafiq A. Siddiqui, Sayyad Z. Qamar, Tasneem Pervez, Sabah A. Abdul-Wahab: Effect of heat treatment and surface finish on fatigue fracture characteristics in 0.45% carbon steel, 10th International Research, Trends in the Development of machinery and Associated Technology, TMT 2006, Barcelona-Lloret de Mar, Spain, 11-15 September, 2006
- [130] Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali, WNT, Warszawa, 1991
- [131] Czuchryj J.: Systematyki i przyczyny powstawania wad w złączach spawanych, Biuro Gamma, Warszawa, 1998
- [132] Klimpel. A.: Kontrola jakości w spawalnictwie, t. 1, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1998
- [133] Zhi-Gang Xiao, Tao Chen, Xiao-Ling Zhao.: Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads, International Journal of Fatigue, Vol. 38, 2012, pp. 57÷64
- [134] PN-EN 10025-3:2007, Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych -- Część 3: Warunki techniczne dostawy spawalnych stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych po normalizowaniu lub walcowaniu normalizującym, PKN, 2007
- [135] PN-EN ISO 636:2008, Materiały dodatkowe do spawania - Pręty, druty i stopiwa do spawania elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego stali niestopowych i drobnoziarnistych -- Klasyfikacja, PKN, 2008
- [136] Achtelik H., Jamroz L.: Urządzenie do badań zmęczeniowych dla obciążeń o przebiegach niesymetrycznych. Patent – P112497, Świadectwo autorskie nr 155292 o dokonaniu wynalazku, UPPRL, Warszawa 1982
- [137] Rozumek D., Lewandowski J.: Stan naprężeń i odkształceń w próbkach o przekroju kwadratowym poddanych zginaniu i kombinacji zginania ze skręcaniem dla stali 18G2A Raport nr 5/04, Politechnika Opolska, Opole, 2004
- [138] Rozumek, D., Marciniak, Z.: Control system of the fatigue stand for material tests under combined bending with torsion loading and experimental results. Mechanical Systems and Signal Processing, 22, pp. 1289–1296
- [139] Kasprzyczak, L., Macha, E., Marciniak, Z. (2013). Energy parameter control system of strength machine for material test under cyclic bending and torsion. Solid State Phenomena, 198, pp. 489–494

- [140] Thum, A., Petersen, C., Swenson, O., Verformung: Spannung und Kerbwirkung. VDI, Düsseldorf, 1960
- [141] Rozumek D.: Mieszane sposoby pęknięcia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych. Studia i Monografie, z. 241, Politechnika Opolska, Opole 2009, s. 152
- [142] Słania J.: Plany spawania -Teoria i praktyka, Agenda Wydawnicza SIMP, 2013
- [143] Lewandowski, J., Rozumek, D.: Numerical analysis of stress intensity factor in specimens with different fillet geometry subjected to bending, Acta Mechanica et Automatica, vol.12 no.1, 2018, pp. 38 – 43
- [144] PN-EN ISO 9015-1:2011, Badania niszczące złączy spawanych metali - Badanie twardości - Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo, PKN, Warszawa, 2011
- [145] Skorupa M., Machniewicz T.: Application Of The Strip Yield Model To Crack Growth Predictions For Structural Steel, THE ARCHIVE OF MECHANICA ENGINEERING, Vol. LVII, No 1, 2010
- [146] Lewandowski J., Rozumek D.: Influence of fillet welded joints subjected to cyclic bending on fatigue crack growth in S355 steel, Solid State Phenomena, Vol. 258, 2016, pp. 615-618

## 7. STRESZCZENIE

Praca zawiera wyniki badań doświadczalnych rozwoju pęknięć zmęczeniowych oraz prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych przy zginaniu i proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem. Badania doświadczalne zostały wykonywane na maszynie zmęczeniowej MZGS-100 przy stałej amplitudzie momentu i współczynniku asymetrii cyklu  $R = -1$  i  $0$ . Próbkki do badań zmęczeniowych zostały wykonane ze stali S355 w postaci próbek litych oraz ze teowym złączem spawanym z wklęsłymi i wypukłymi spoinami. Próbkki badano w stanie bez obróbki cieplnej oraz po przeprowadzonym wyżarzaniu odprężającym oraz normalizującym. Rozwój pęknięć zmęczeniowych obserwowano metodą optyczną na powierzchniach bocznych próbek. Podczas badań doświadczalnych przy zginaniu obserwowano równomierny przyrost długości pęknięć po obu stronach bocznych próbek. Natomiast w przypadku zginaniu ze skręcaniem zaobserwowano nierównomierny przyrost długości pęknięć po obu stronach bocznych próbek. Wyniki badań doświadczalnych zostały opisane na wykresach długości pęknięć zmęczeniowych w funkcji liczby cykli oraz prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych w funkcji zakresu parametru  $\Delta J$  przy użyciu związku Dowlinga i Begleya.

The influence of bending with torsion and heat treatment on the development of fatigue cracks in fillet welds

### **ABSTRACT**

The work contains the results of experimental research on the development of fatigue cracks and the fatigue cracks growth rate in bending and proportional bending and torsion. Experimental tests were carried out on the MZGS-100 fatigue machine at a constant moment amplitude and stress ratio  $R = -1$  and  $0$ . The specimens for fatigue tests were made of S355 steel in the form of solid specimens and with a T-joint welded with concave and convex joints. The specimens were tested in a state without heat treatment and after stress relief and normalizing annealing. The development of fatigue cracks was observed by the optical method on the side surfaces of the specimens. During the experimental tests under bending uniform increase in crack length was observed on both sides of the specimens. However, in the case of proportional bending and torsion non-uniform crack growth was observed on both sides of the specimens. The results of

experimental tests have been described in graphs of fatigue crack length versus the number of cycles and the fatigue crack growth rate as a function of the  $\Delta J$  parameter range using the Dowling and Begley relationship.

Uzupełnienie autorskie do ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
mgra inż. Janusza Lewandowski „*Wpływ zginania ze skręcaniem oraz  
obróbki cieplnej na rozwój pęknięć zmęczeniowych w spoinach  
pachwinowych*”

Niniejsze uzupełnienie uwzględnia korekty Autora rozprawy oraz uwagi Recenzentów.

Na stronie 34 zdanie:

„Badania te sugerowały również, żeby współczynnik bezpieczeństwa był równy dwóm dla wytrzymałości statycznej i jednej drugiej dla materiałów poddanych obciążeniom zmęczeniowym, które muszą wykazywać nieskończoną trwałość.”

zmieniono na:

„Badania te sugerowały również, żeby współczynnik bezpieczeństwa był równy dwa dla wytrzymałości statycznej i powiększony o jeden dla materiałów poddanych obciążeniom zmęczeniowym, które muszą wykazywać nieskończoną trwałość.”

Na stronie 36 – 37 równania 2.7 – 2.9 zmieniono na:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right), \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right), \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}, \\ \sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \\ \tau_{yz} &= \tau_{xz} = 0.\end{aligned}\tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2} \left(2 + \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}\right), \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}, \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2}\right), \\ \sigma_{zz} &= \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \\ \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0.\end{aligned}\tag{2.8}$$

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2}, \\ \tau_{yz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2}, \\ \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0.\end{aligned}\tag{2.9}$$

Na stronie 37 zdanie:

„Zdając sobie sprawę, że wyliczone współczynniki intensywności naprężenia nie uwzględniają szeregu czynników wpływających na wynik, tj. geometrii próbki, wpływu obróbki cieplnej i rodzaju pęknięć do powyższych wzorów wprowadza się współczynnik korekcyjny  $M_k$ .”

zmieniono na:

„Zdając sobie sprawę, że wyliczone współczynniki intensywności naprężenia nie uwzględniają szeregu czynników wpływających na wynik, tj. wpływu obróbki cieplnej i rodzaju pęknięć do powyższych wzorów wprowadza się współczynnik korekcyjny  $M_k$ .”

Na stronie 39 równanie 2.11 skorygowano na:

$$J = \int_{\Gamma} \left( W \, dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right)\tag{2.11}$$

Na stronie 41 zdanie:

„Dla materiałów liniowo-sprężystych, zgodnie z teorią Griffitha, gdy całkowita energia rozwoju pęknięcia osiągnie wartość maksymalną, odpowiadającą krytycznej długości pęknięcia  $a_{kr}$  oraz wartość naprężenia krytycznego  $\sigma_{kr}$ , to dla tego punktu wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K$  jest równa wartości krytycznej  $K_c$  (2.16).”

zmieniono na:

„Dla materiałów liniowo-sprężystych, zgodnie z teorią Griffitha (w jednoosiowym stanie obciążenia), gdy całkowita energia rozwoju pęknięcia osiągnie wartość maksymalną, odpowiadającą krytycznej długości pęknięcia  $a_{kr}$  oraz wartość naprężenia krytycznego  $\sigma_{kr}$ , to dla tego punktu wartość współczynnika intensywności naprężenia  $K$  jest równa wartości krytycznej  $K_{Ic}$  (2.16).”

Na stronie 41 skorygowano równanie 2.16 na:

$$K_{Ic} = \sigma_{kr} \sqrt{\pi a_{kr}}\tag{2.16}$$

Na stronie 42 zdanie:

„Opisane powyżej kryterium naprężeniowe daje prawidłowe wyniki w pierwszym oraz znacznej części drugiego etapu rozwoju pęknięć zmęczeniowych, w obszarze

proporcjonalnego wzrostu wartości współczynnika intensywności naprężenia do wielkości pęknięcia.”

zmieniono na:

„Opisane powyżej kryterium naprężeniowe daje prawidłowe wyniki w pierwszym oraz znacznej części drugiego zakresu rozwoju pęknięć zmęczeniowych.”

Na stronie 44 zdanie:

„Następnie badacz Dugdale sformułował wyrażenie łączące promień strefy odkształcenia plastycznego  $r_p$  z długością pęknięcia  $a$  w postaci...”

zmieniono na:

„Następnie badacz Dugdale zaproponował wyrażenie na rozwarcie wierzchołka szczeliny, łączące strefy odkształcenia plastycznego z długością pęknięcia  $a$  w postaci...”

Na stronie 50 zdanie:

„- zakres II to obszar, w którym prędkość pęknięcia w funkcji zakresu  $\Delta K$  jest liniowa.”

zmieniono na”

„- zakres II to obszar, w którym prędkość pęknięcia w funkcji zakresu  $\Delta K$  jest potęgową.”

Na stronie 50 zdanie:

„Pierwszym, znaczącym badaczem był Stanley [87], który to w 1952 r. zaprezentował równanie służące do opisu prędkości pęknięcia w postaci ...”

zmieniono na:

„Pierwszym, znaczącym badaczem, który to w 1952 r. zaprezentował równanie służące do opisu prędkości pęknięcia był Stanley [87], w postaci...”

Na stronie 51 zdanie:

„Zaproponował on nowy współczynnik, określony jako efektywny współczynnik intensywności naprężenia”

zmieniono na:

„Zaproponował on nowy współczynnik, określony jako efektywny zakres współczynnika intensywności naprężeń”

Na stronie 55 skorygowano równania na:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (2.47)$$

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_n} \quad (2.48)$$

Na stronie 59 zdanie:



„Jego wpływ na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych jest bardzo różny, z reguły jednak współczynnik ten będący stosunkiem naprężeń minimalnych do maksymalnych zależy od ich wartości, wartości dodatkowego obciążenia średniego oraz częstotliwości cyklu [56, 112, 113, 114, 115, 116, 117].”

zmieniono na:

„Jego wpływ na prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych jest bardzo różny, co przedstawiono w literaturze [56, 112, 113, 114, 115, 116, 117].”

Na stronie 75 zdanie:

„Wyniki badań prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych obliczano z użyciem równania Parisa [88] zmodyfikowanego przez Dowlinga i Begleya [97] w postaci”

zmieniono na:

„Wyniki badań prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych opisano z użyciem równania Parisa [88] zmodyfikowanego przez Dowlinga i Begleya [97] w postaci”

Na stronie 75 zdanie:

„Zakres zmian parametru  $\Delta J$  dla mieszanego sposobu pęknięcia przyjmuje postać  $\Delta J_{eq}$  i dla przypadku proporcjonalnych obciążeń zginania ze skręcaniem posłużono się równaniem [84, 142, 143, 144]”

zmieniono na:

„Zakres zmian parametru  $\Delta J$  dla mieszanego sposobu pęknięcia przyjmuje postać  $\Delta J_{eq}$  i dla przypadku proporcjonalnych obciążeń zginania ze skręcaniem posłużono się równaniem [56, 84, 141]”

Na stronie 75 zdanie:

„Dla poszczególnych sposobów pęknięcia zakres parametru  $\Delta J$  obliczono z równań [142, 144]:”

zmieniono na:

„Dla poszczególnych sposobów pęknięcia, próbek litych, zakres parametru  $\Delta J$  obliczono z równań [141]:”

Na stronie 76 zdanie:

„W wzorze (4.3) i (4.4) zakres zmian współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K_I$  dla zginania (I sposób pęknięcia) i  $\Delta K_{III}$  dla skręcania (III sposób pęknięcia) obliczono z równań”

zmieniono na:

„W wzorze (4.3) i (4.4) zakres zmian współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K_I$  dla zginania (I sposób pęknięcia) i  $\Delta K_{III}$  dla skręcania (III sposób pęknięcia) obliczono z równań [141]”

Na stronie 76 skorygowano równania na:

$$\begin{aligned}\Delta K_I &= Y_I \Delta \sigma \cos^2 \alpha \sqrt{\pi a} - \text{próbka lita} \\ \Delta K_I &= Y_I M_k \Delta \sigma \cos^2 \alpha \sqrt{\pi a} - \text{próbka spawana}\end{aligned}\quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}\Delta K_{III} &= Y_{III} \Delta \sigma \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\pi a} - \text{próbka lita} \\ \Delta K_{III} &= Y_{III} M_k \Delta \sigma \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{\pi a} - \text{próbka spawana}\end{aligned}\quad (4.7)$$

Na stronie 76 zdanie:

„W przypadku czystego zginania do obliczenia zakresu współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K_I$  zastosowano równanie”

zmieniono na:

„W przypadku czystego zginania do obliczenia zakresu współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K_I$  zastosowano równanie [143]”

Na stronie 76 skorygowano równania na:

$$\begin{aligned}\Delta K_I &= Y_I \Delta \sigma \sqrt{\pi a} - \text{próbka lita} \\ \Delta K_I &= Y_I M_k \Delta \sigma \sqrt{\pi a} - \text{próbka spawana}\end{aligned}\quad (4.8)$$

Na stronie 80 zdanie:

„Uzyskane z przeprowadzonych badań wyniki twardości miały istotne znaczenie, na próbkach użytych później do badań zmęczeniowych.”

zmieniono na:

„Przeprowadzono badania twardości próbek bez i po obróbce cieplnej.”

Na stronie 87 zdanie:

„Obliczenia te umożliwiły weryfikację równań przyjętych do analitycznych obliczeń, między innymi pozwoliły porównać wartości współczynników intensywności naprężenia  $\Delta K$  w funkcji wzrostu pęknięć.”

zmieniono na:

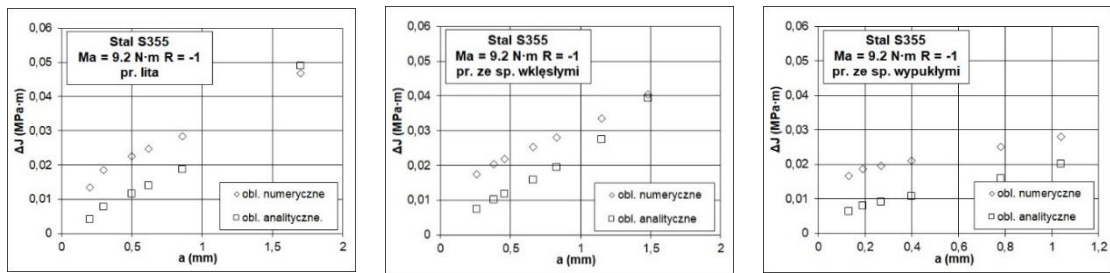
„Obliczenia te pozwoliły porównać wartości  $\Delta J$  uzyskane z obliczeń analitycznych, z wynikami obliczeń MES w funkcji wzrostu pęknięć. Wyniki tej analizy autor przedstawił w pracy [143] oraz przykładowe wyniki dla wartości  $\Delta J$  na rysunku 4.21.1.”

Na stronie 94 załączono rys. 4.21.1:

a)

b)

c)



Rys. 4.21.1. Przykładowe wyniki parametru  $\Delta J$ , obliczone analitycznie oraz otrzymane z MES, w funkcji długości pęknięcia, dla: a) próbki litej, b) próbki spawanej z wklęsłymi spoinami, c) próbki spawanej z wypukłymi spoinami

Na stronie 101 zdanie:

„Znaczne obniżenie trwałości zmęczeniowych badanych próbek po zabiegu technologicznym mogło być spowodowane tym, że w trakcie obróbki mechanicznej (frezowania i szlifowania) spoin wypukłych zostało wprowadzone w obszar połączenia spawanego dodatkowe ciepło, co mogło spowodować zmiany w strukturze złącza.”

zmieniono na:

„Znaczne obniżenie trwałości zmęczeniowych badanych próbek po zabiegu technologicznym mogło być spowodowane tym, że w trakcie obróbki mechanicznej (frezowania i szlifowania) spoin, w których istniały resztkowe ściskające naprężenia, zostały usunięte warstwy z wyższymi - a być może dodatnimi - naprężeniami resztkowymi, co przyspieszyło inicjację pęknięć.”

Na stronie 133 zdanie:

„Uzyskano zadowalającą zgodność wyników obliczeń z użyciem równania Dowlinga i Begleya z wynikami otrzymanymi z badań doświadczalnych.”

zmieniono na:

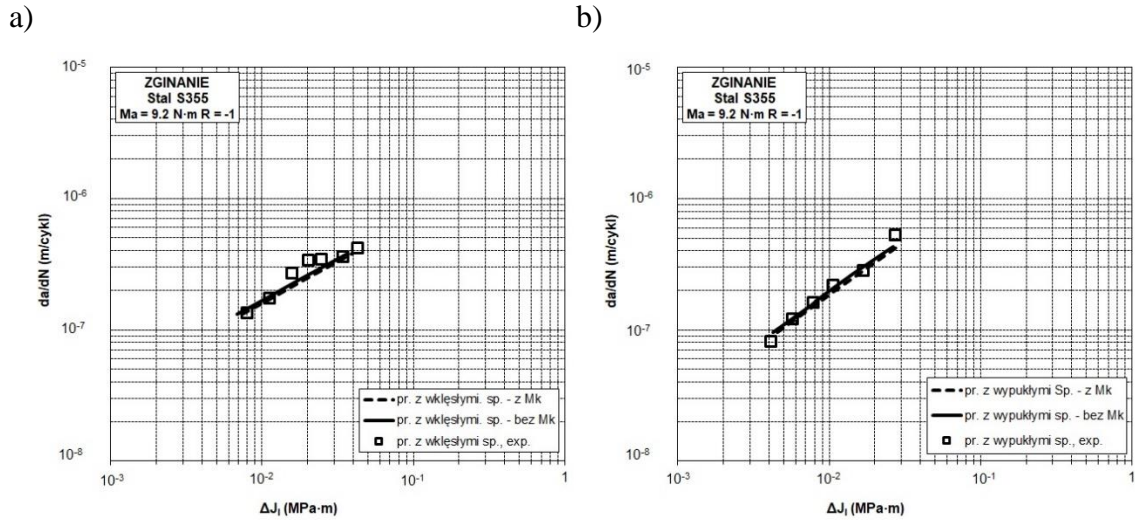
„Trendy eksperymentalne  $da/dN$  w funkcji  $\Delta J$  pokazały, że dla każdej kombinacji zmiennych, rozważanych w badaniach, dane te można opisać przy użyciu równania Dowlinga i Begleya.”

Na stronie 136 usunięto wniosek nr 13.

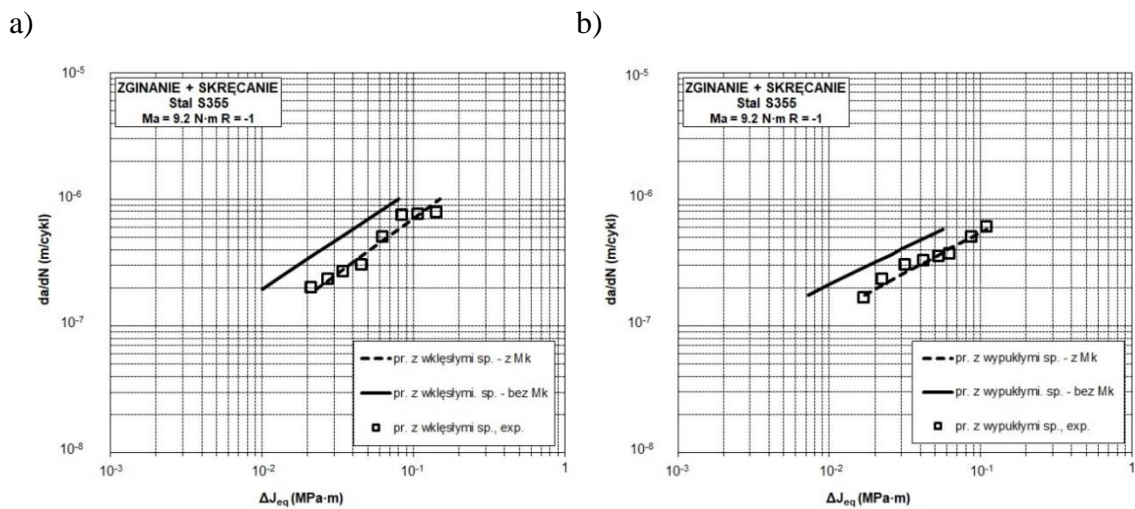
Na stronie 121 załączono rys. 4.35.1 i 4.35.2:

Na stronie 121 dodano przykładowe wykresy  $da/dN$  w funkcji  $\Delta J$  dla zginania i zginania ze skręcaniem, na których przedstawiono porównanie wyników otrzymanych z badań

doświadczalnych i obliczeń analitycznych uwzględniających i nieuwzględniających zastosowany współczynnik  $M_k$ .



Rys. 4.35.1. Przykładowe wykresy  $da/dN$  w funkcji  $\Delta J$  przedstawiające porównanie wyników otrzymanych przy zginaniu z badań doświadczalnych i obliczeń analitycznych uwzględniających i nieuwzględniających współczynnik  $M_k$  dla: a) próbki spawanej z wklęsłymi spoinami, b) próbki spawanej z wypukłymi spoinami



Rys. 4.35.2. Przykładowe wykresy  $da/dN$  w funkcji  $\Delta J$  przedstawiające porównanie wyników otrzymanych przy zginaniu ze skręcaniem z badań doświadczalnych i obliczeń analitycznych uwzględniających i nieuwzględniających współczynnik  $M_k$  dla: a) próbki spawanej z wklęsłymi spoinami, b) próbki spawanej z wypukłymi spoinami