

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY



**Trwałość połączeń spawanych wybranych stali
przy cyklicznym zginaniu**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marcel Szymaniec

Promotor: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda

Opole 2015

*Chciałbym serdecznie podziękować mojemu promotorowi
w osobie **Prof. dr hab. inż. Tadeusza Łagody**
za poświęcony czas, cenne wskazówki i uwagi
oraz za okazaną cierpliwość podczas realizacji pracy doktorskiej.
Dziękuję wszystkim, którzy wspierali mnie w procesie tworzenia niniejszej pracy*

Spis treści	s.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	6
1. WPROWADZENIE	7
2. PRZEGLĄD I SYSTEMATYZACJA WIEDZY Z ZAKRESU ZMĘCZENIA MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH.....	10
2.1. Zmęczenie materiałów w zainteresowaniach naukowców- przegląd historyczny	10
2.2. Podstawowe informacje dotyczące zmęczenia materiałów	11
2.3. Mechanizm inicjacji i rozwoju pęknięć zmęczeniowych	14
2.4. Sposoby opisu procesów zmęczeniowych.....	17
2.4.1. Metody naprężeniowe	17
2.4.2. Metody odkształceniowe.....	19
2.4.3. Metody energetyczne	20
2.4.4. Elementy mechaniki pęknięcia	21
3. WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH.....	22
3.1. Skład i struktura zastosowanego materiału	22
3.2. Kształt i wymiary elementu	23
3.3. Stan powierzchni zewnętrznej oraz warstwy wierzchniej	24
3.4. Koncentratory naprężeń	24
3.4.1. Karby geometryczne	24
3.4.2. Karby strukturalne.....	27
3.4.3. Karby mieszane.....	27
4. SPAWANIE ELEKTRYCZNE	30
4.1. Historia rozwoju procesów spawalniczych.....	30
4.2. Charakterystyka spawania ręcznego elektrodą otuloną	30
4.3. Spawanie elektryczne w przemyśle. Spawalność stali	32
4.4. Wpływ spawania na właściwości materiału rodzimego	34
5. POŁĄCZENIA SPAWANE W OPISIE ZJAWISK ZMĘCZENIOWYCH	36
5.1. Metody nominalne	36
5.2. Fikcyjny promień karbu spawalniczego.....	37

5.3. Zalecenia Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa.....	39
5.3.1. Metoda „hot spot”	43
5.3.2. Jakość połączeń spawanych	44
5.4. Podsumowanie przeglądu literatury	45
6. CEL I ZAKRES PRACY	47
7. MATERIAŁY PODSTAWOWE I POŁĄCZENIA SPAWANE.....	49
7.1. Materiały wykorzystane do badań	49
7.2. Badania metalograficzne materiałów podstawowych	52
7.3. Połączenia spawane	56
7.3.1. Materiały dodatkowe do spawania.....	56
7.3.2. Warunki wykonania spoin	58
7.3.3. Energia liniowa spawania	59
7.3.4. Sprawdzenie jakości połączeń	60
7.3.5. Badania metalograficzne makroskopowe spoin.....	61
7.3.6. Badania metalograficzne mikroskopowe	62
7.3.7. Pomiary twardości.....	63
8. BADANIA ZMĘCZENIOWE.....	68
8.1. Stanowisko do badań.....	68
8.2. Elementy próbne do badania materiałów podstawowych	70
8.3. Elementy próbne ze spoiną czołową.....	72
8.4. Charakterystyki zmęczeniowe elementów bez spoiny	74
8.5. Charakterystyki zmęczeniowe elementów ze spoiną jednoimienną.....	80
8.6. Charakterystyki zmęczeniowe elementów ze spoiną różnoimienną	84
8.7. Wartości funkcji zmęczeniowego współczynnika działania karbu K_f	88
8.7.1. Połączenia spawane jednoimienne.....	89
8.7.2. Połączenia spawane dwuimienne.....	91
8.8. Wyniki badań eksperymentalnych w świetle zaleceń IIW.....	92
8.9. Obserwacje pęknięć i przelomów zmęczeniowych.....	95
8.9.1. Obserwacja pęknięć zmęczeniowych materiałów podstawowych.....	95
8.9.2. Obserwacja przelomów zmęczeniowych elementów spawanych.....	97
9. SPOSTRZEŻENIA I WNIOSKI	99

10.LITERATURA.....	101
STRESZCZENIE.....	111
ABSTRACT.....	112

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$2N_f$ – liczba nawrotów obciążenia (półcykli),

A – pole przekroju poprzecznego,

A_5 – wydłużenie względne,

Ac_1 – temperatura przemiany perlitu w austenit przy nagrzewaniu,

Ac_3 – temperatura przemiany ferrytu w austenit przy nagrzewaniu,

E – moduł Younga,

f – częstotliwość,

F_a – amplituda siły wymuszającej,

K' – współczynnik cyklicznego umocnienia materiału,

K_f – zmęczeniowy współczynnik działania karbu,

K_t – teoretyczny współczynnik koncentracji naprężeń,

K_w – geometryczny współczynnik koncentracji naprężeń,

M_g – moment zginający,

n – stopień uszkodzenia materiału,

n' – wykładnik cyklicznego umocnienia,

N_f – trwałość zmęczeniowa liczona w cyklach,

R_e – granica plastyczności,

R_m – granica wytrzymałości na rozciąganie,

t – czas, grubość materiału

Z_g – granica zmęczenia przy zginaniu

ν – współczynnik Poissona,

$\varepsilon_{a,e}$ – amplituda odkształcenia sprężystego,

$\varepsilon_{a,p}$ – amplituda odkształcenia plastycznego,

$\varepsilon_{a,t}$ – amplituda odkształcenia całkowitego,

σ – naprężenie,

σ_a – amplituda naprężenia,

$\sigma'_f b$ – współczynnik i wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,

$\varepsilon'_f c$ – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego.

Pozostałe oznaczenia i indeksy zostały wyjaśnione w tekście.

1. Wprowadzenie

Problem zmęczenia materiałów konstrukcyjnych stał się obiektem zainteresowania naukowców w drugiej połowie XIX wieku głównie za przyczyną awarii elementów, dla których metody projektowania oparte o statyczne właściwości wytrzymałościowe materiałów zawiodły. Zauważono, że materiał poddany działaniu obciążeń zmiennych w czasie ulegał zniszczeniu przy naprężeniach wyraźnie niższych od wyznaczanych podczas prób monotonicznych. Obecnie procesy zmęczeniowe należą do najczęstszych przyczyn awarii elementów maszyn i konstrukcji, nierzadko generując znaczne koszty a nawet ofiary śmiertelne [108]. Na przestrzeni lat przeprowadzono liczne próby i badania oraz wytworzono szereg teoretycznych i eksperymentalnych modeli obliczeniowych mających stanowić pomoc w lepszym poznaniu i zrozumieniu tego rodzaju zjawisk, a także zapobiegać ich występowaniu w nowo projektowanych urządzeniach i konstrukcjach [1, 4, 99]. Jednak złożona natura procesów zmęczeniowych oraz znaczna liczba czynników oddziałujących na ich przebieg, wręcz uniemożliwiają opracowanie uniwersalnej, dokładnej i łatwej w aplikacji metody przewidywania trwałości zmęczeniowej. Jednym z problemów w określaniu czasu użyteczności zmiennie obciążonych obiektów inżynierskich jest brak znajomości rzeczywistego wyężenia materiału, szczególnie dla elementów o skomplikowanym kształcie lub niejednorodnej strukturze. Osiągnięty dzięki postępowi technologicznemu intensywny rozwój narzędzi projektowych i obliczeniowych przyczynił się do znaczącej poprawy dokładności wyznaczania wyężenia materiału, przede wszystkim w elementach o złożonej geometrii. Zastosowanie metod numerycznych w projektowaniu przyczyniło się do istotnej redukcji masy wielu elementów, co jest niewątpliwie pozytywne z punktu widzenia ekonomiki wykorzystania ograniczonych zasobów surowcowych, jednak warto pamiętać, że elementy smukłe, o mniejszych przekrojach i cieńszych ściankach ulegają relatywnie wyższym przeciążeniom podczas wystąpienia nieprzewidzianych obciążeń eksploatacyjnych. A więc pełniejsze wykorzystanie właściwości materiału wymaga dokładniejszego przewidywania warunków pracy danego elementu oraz znajomości odpowiednich parametrów jego budulca.

W dobie intensywnej racjonalizacji gospodarki surowcowej nieuwzględnienie któregoś ze składników obciążenia może wywrzeć istotny wpływ na trwałość urządzenia, a nawet na bezpieczeństwo jego użytkowania.

Rozwijane w ostatnich dekadach gatunki drobnoziarnistych niskostopowych stali konstrukcyjnych odznaczają się wysoką wytrzymałością w stosunku do konwencjonalnych stali niestopowych, dobrą spawalnością i ciągliwością przy relatywnie niskich kosztach ich wytwarzania. Na drodze kontrolowanej obróbki termomechanicznej uzyskiwany jest efekt umocnienia struktury poprzez rozdrobnienie ziarna, bez znacznego zwiększania udziału węgla i dodatków stopowych. Gatunki te z reguły cechuje łatwość wykonywania połączeń spawanych oraz brak konieczności przeprowadzania obróbki cieplnej po spawaniu. Ponieważ spawanie elektryczne należy do najczęściej wykorzystywanych w przemyśle metod wykonywania połączeń nierozłącznych, wraz z rozwojem nowych gatunków stali zachodzi ciągła potrzeba weryfikacji stosowanych metod obliczeniowych oraz możliwości ich aplikacji dla poszczególnych przypadków [88, 100]. Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa (*IIW*) w swoich publikacjach dotyczących projektowania elementów spawanych obciążonych zmęczeniowo proponuje daleko idącą standaryzację algorytmu oceny trwałości spoin i wyznaczania naprężeń w ich obszarze [36, 27]. Dla zdefiniowanych przypadków geometrii i obciążenia zaproponowano dopuszczalne wartości naprężeń przy niezawodności na poziomie 95 % dla liczby cykli $N_f = 2 \cdot 10^6$. Wprowadzono odrębne regulacje dla połączeń spawanych stopów aluminium oraz odrębne dla stali. Niezależnie od gatunku, połączenia stali ferrytyczno-perlitycznych o granicy plastyczności $R_e \leq 960 \text{ MPa}$ traktowane są jednakowo - pomijana jest wytrzymałość statyczna materiału podstawowego jako parametr o znikomym wpływie na trwałość zmęczeniową połączenia spawanego. Ponadto w literaturze bardzo niewiele jest publikacji odnośnie trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych różnych gatunków stali, mimo że w praktyce często zachodzi konieczność wykonywania takich spoin [133].

W niniejszej pracy poddano analizie wybrane aspekty wpływu obecności doczołowego połączenia spawanego na trwałość zmęczeniową elementów próbnych wykonanych z trzech gatunków stali ferrytyczno-perlitycznych poddanych wahadłowemu zginaniu. Istotny element pracy badawczej stanowiła identyfikacja i określenie oddziaływania właściwości materiału wyjściowego na wytrzymałość zmęczeniową połączeń spawanych jednoimiennych oraz różnoimiennych trzech gatunków stali o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych. Występujący podczas zginania gradient naprężeń znacznie komplikuje kwestię wyznaczenia amplitud naprężenia w stosunku do rozciągania-ściskania, przez co charakterystyki zmęczeniowe danego materiału wyznaczone dla różnych przypadków obciążenia mogą się od siebie istotnie różnić [87]. Na przykładzie elementów próbnych ze

stali 18G2A wykazano [48] zawyżone wartości amplitud naprężenia nominalnego obliczanego z warunku wytrzymałości przekroju na zginanie w stosunku do naprężeń normalnych podczas rozciągania-ściskania. W związku z powyższym aby otrzymać wiarygodne i porównywalne wyniki przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych na elementach próbnych z materiałów podstawowych oraz ich połączeń spawanych w dowolnej konfiguracji, zarówno jednorodnych jak i mieszanych.

Materiał wyjściowy stanowiły walcowane na gorąco blachy o grubości $t = 12 \text{ mm}$, wykonane ze stali oznaczonych według [114, 115] jako S235JR, S355J2+N oraz P460NH. Odnaczają się one zbliżonym udziałem masowym pierwiastków stopowych, a jednocześnie znacznym zróżnicowaniem właściwości wytrzymałościowych. Gatunek S235JR określany jest jako niestopowa, niskowęglowa spawalna stal konstrukcyjna zwykłej jakości, natomiast gatunki S355J2+N oraz P460NH normalizowane spawalne stale drobnoziarniste o podwyższonej wytrzymałości, przeznaczone odpowiednio na konstrukcje spawane oraz do zastosowań ciśnieniowych. Dokonano charakterystyki materiałów obejmującej zestawienie porównawcze ich składu chemicznego, właściwości wytrzymałościowych statycznych oraz wyników obserwacji zglądów metalograficznych. Kolejno wykonano doczołowe połączenia spawane blach rejestrując parametry procesu niezbędne do oszacowania liniowej energii spawania. Zweryfikowano jakość wykonanych spoin metodami badań nieniszczących, a także uwzględniono wpływ geometrii złącza na koncentrację naprężeń w jego otoczeniu. Następnie przygotowano elementy próbne, które poddano badaniom zmęczeniowym przy obciążeniu stałym amplitudowym zginaniem wahadłowym. Dla uzyskania rzetelnej bazy porównawczej, na elementach o zbliżonej geometrii przeprowadzono testy zmęczeniowe materiałów bazowych oraz wyznaczono ich charakterystyki zmęczeniowe typu $S-N$. W kolejnym etapie dokonano obróbki statystycznej wyników w celu ich porównania z zaleceniami I/W odnośnie projektowania połączeń spawanych podlegających działaniu obciążeń zmęczeniowych.

2. Przegląd i systematyzacja wiedzy z zakresu zmęczenia materiałów konstrukcyjnych

W kolejnych podrozdziałach przybliżono najważniejsze informacje dotyczące zjawiska zmęczenia materiałów konstrukcyjnych istotne z punktu widzenia realizowanej tematyki badawczej. Obejmują one krótką historię badań procesu zmęczenia materiałów, prezentację mechanizmów inicjacji i rozwoju pęknięć zmęczeniowych, przedstawienie wybranych modeli opisu zjawisk zmęczeniowych, analizę wpływu niektórych czynników na trwałość zmęczeniową materiałów oraz stan naprężenia w obszarze złącza spawanego. Ostatni podrozdział zawiera wybór metod obliczania trwałości zmęczeniowej elementów zawierających połączenie spawane.

2.1. Zmęczenie materiałów w zainteresowaniach naukowców- przegląd historyczny

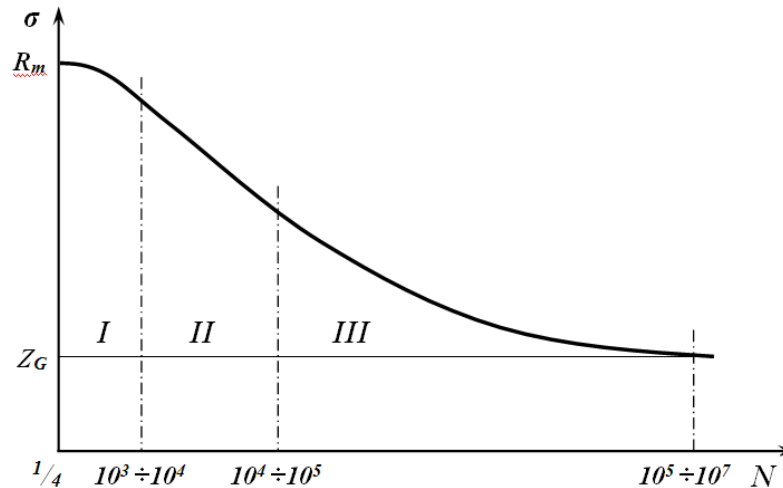
Problem zawodności elementów maszyn i konstrukcji poddanych działaniu obciążeń o zmiennych wartościach zaczął być obserwowany wraz z dynamicznym rozwojem przemysłu w XIX wieku. W roku 1837 ukazał się pierwszy artykuł naukowy na temat związków między trwałością elementów a przenoszonymi przez nie obciążeniami autorstwa Wilhelma Alberta, natomiast dwa lata później Jean-Victor Poncelet po raz pierwszy użył terminu „zmęczenie materiału” w podręczniku do mechaniki. Badaczem, który w znacznym stopniu przyczynił się do rozwoju tematyki zmęczenia materiałów był niemiecki uczony August Wöhler [168]. W swoich licznych pracach na temat przyczyn pęknięcia osi wagonów kolejowych dokonał szeregu istotnych obserwacji odnośnie wpływu cyklicznych zmian obciążenia na trwałość elementów. Opracował próbę obrotowego zginania, a także wprowadził pojęcie granicy zmęczenia, jako wartości naprężenia, poniżej której procesy zmęczeniowe nie występują. Pod koniec XIX stulecia Goodman i Gerber zaproponowali metodologię uwzględniania wpływu średnich wartości naprężenia na obserwowaną trwałość zmęczeniową, natomiast Johann Bauschinger badał relacje między naprężeniem i odkształceniem oraz przedstawił je w formie pętli histerezy. Jego badania rozwinął Bairstow [5], który zauważył, że materiały odkształcone na zimno ulegają cyklicznemu osłabieniu, natomiast elementy poddane obróbce cieplnej cyklicznemu umocnieniu. W roku 1910 Basquin zaproponował prezentację wyników prób zmęczeniowych $S-N$ w układzie podwójnie logarytmicznym [6]. W pierwszej połowie XX wieku próby ustalenia granicy wyęczenia

materiału przy obciążeniach cyklicznych podejmował też Stromeier [155]. Nieco później niezależnie od siebie Palmgren [110] i Miner [90] opracowali hipotezę liniowej kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. W latach 50-tych i 60-tych XX wieku dzięki pracom Coffina i Mansona dokonano się znaczny postęp w kwestii zrozumienia mechanizmu powstawania odkształceń plastycznych i ich wpływu na rozwój pęknięć zmęczeniowych. Dzięki opracowaniu w 1968 roku przez T. Endo i M. Matsuiski algorytmu „*Rain flow*” zyskano możliwość stosowania liniowej kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych do obciążeń o przebiegu losowym. Pod koniec XX wieku wiele uwagi poświęcono kryteriom zmęczenia wieloosiowego oraz obciążeniom termo-mechanicznym wykorzystując w obliczeniach techniki komputerowe na coraz szerszą skalę. Początek XXI wieku przyniósł skokowy wzrost znaczenia technik komputerowych zarówno na etapie projektowania elementów, symulacji rozkładu naprężeń w materiale podczas eksploatacji, a także prognozowania trwałości zmęczeniowej.

Mimo znacznej liczby przeprowadzonych badań i eksperymentów, zjawisko zmęczenia materiałów wciąż stanowi obiekt zainteresowania wielu naukowców. Istnieje ciągła potrzeba rozwijania i uzupełniania wiedzy z tej dziedziny, ponieważ jest ona nieodzowna dla podwyższania standardów bezpieczeństwa, trwałości i niezawodności nowych urządzeń i konstrukcji.

2.2. Podstawowe informacje dotyczące zmęczenia materiałów

Podczas eksploatacji obiektów inżynierskich obciążeniom o zmiennej wartości podlega większość elementów maszyn i konstrukcji. Obciążenia te mogą mieć charakter jednostkowy, okresowy, cykliczny bądź losowy. Ze względu na liczbę cykli do zniszczenia materiału wprowadzono umowny podział umowne pojęcia wytrzymałości: *I* - quasi statycznej, *II* - niskocyklowej, zwanej też średniocyklową oraz *III* - wysokocyklowej. Na rys. 2.1 przedstawiono omawiane zakresy oraz towarzyszący im przebieg zmian amplitudy naprężenia. Oś pionowa wykresu przedstawia przebieg próby statycznego rozciągania, w której to materiał ulega zniszczeniu dla $N_f = 1/4$ cyklu.



Rys. 2.1. Zakresy trwałości zmęczeniowej: I – quasi statycznej, II – niskocyklowej, III – wysokocyklowej

W literaturze spotkać można pojęcie giga cykli ($N_f \geq 10^8$), którego obszar zastosowania stanowią przede wszystkim badania zmęczeniowe zestawów kołowych pociągów szybko-bieżnych [12, 23], obrotowych elementów maszyn roboczych, silników i pojazdów mechanicznych, które podlegają działaniu zmiennych obciążeń na poziomie nawet kilkuset tysięcy cykli każdego dnia.

Pod względem wartości naprężeń charakterystyki cyklu dokonuje się poprzez wyznaczenie wartości minimalnej naprężenia σ_{min} , wartości maksymalnej σ_{max} , naprężenia średniego σ_m oraz amplitudy naprężenia σ_a . Wymienione wielkości powiązane są zależnościami:

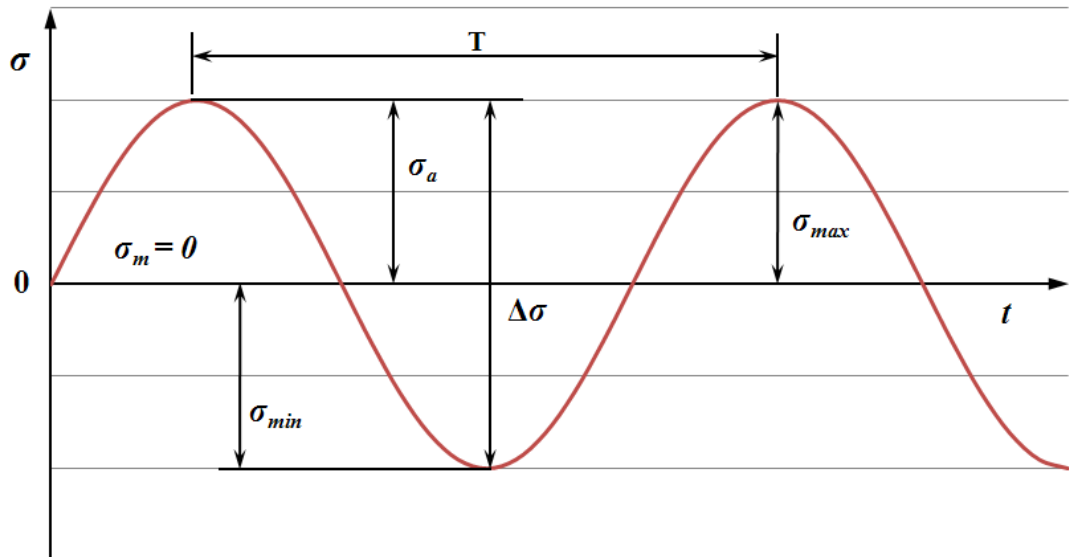
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}. \quad (2.2)$$

Dodatkowo wprowadzono pojęcie zakresu zmiany naprężeń, definiowane jako:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.3)$$

Zmęczeniowe badania eksperymentalne prowadzone są z reguły dla prostych cyklicznie zmiennych przebiegów naprężenia, a następnie uzyskane wyniki za pomocą różnych modeli obliczeniowych transformowane są na obszar obciążeń o niezerowej wartości średniej lub obciążeń losowych. Na rys. 2.2 przedstawiono graficznie cykl wahadłowy o sinusoidalnym przebiegu amplitudy naprężenia.



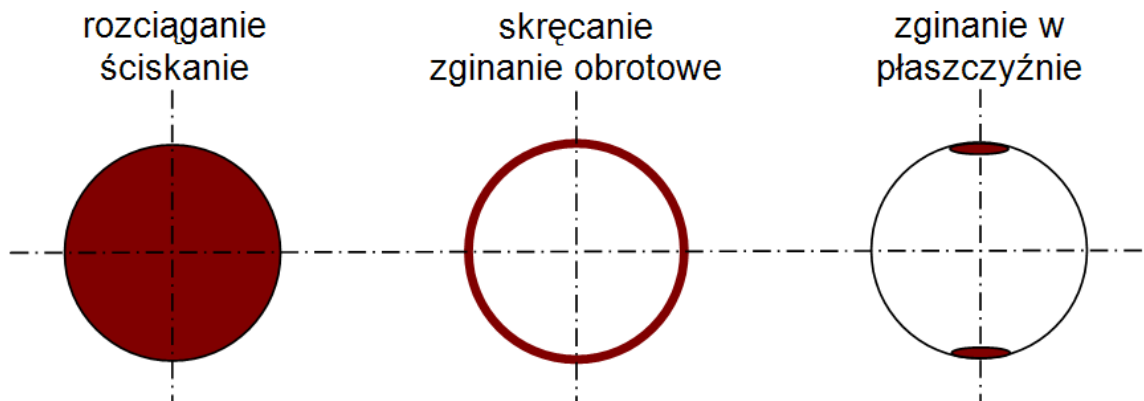
Rys.2.2. Sinusoidalny przebieg amplitudy naprężenia oraz jego wielkości charakterystyczne: T – okres, σ_a – amplituda naprężenia, σ_{min} – minimalne naprężenie cyklu, σ_{max} – maksymalne naprężenie cyklu, σ_m – wartość średnia naprężenia, $\Delta\sigma$ – zakres zmian naprężenia ($\Delta\sigma = 2\sigma_a$)

Wielkością charakteryzującą przebieg obciążenia stałoaamplitudowego jest tzw. współczynnik asymetrii cyklu R opisany wzorem:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}. \quad (2.4)$$

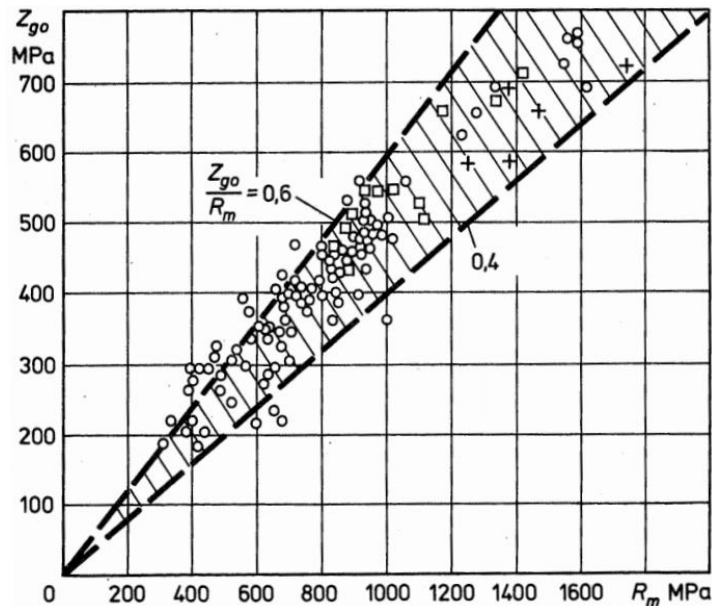
Dla cyklu wahadłowego stosowanego w badaniach w dalszej części pracy, współczynnik ten przyjmuje wartość $R = -1$.

Trwałość zmęczeniowa elementu determinowana jest przez jego najsłabsze miejsca, stanowiące lokalne inicjatory pęknięć, ale także przez sposób obciążenia, od którego zależy położenie maksymalnych wartości naprężeń i odkształceń (rys.2.3) [71, 57].



Rys.2.3. Najbardziej obciążone fragmenty przekroju pręta okrągłego w zależności od rodzaju obciążenia

Aspekt wpływu rodzaju obciążenia na trwałość zmęczeniową elementów był szeroko badany przez pracowników i doktorantów Politechniki Opolskiej, szczególnie w przypadku kombinacji zginania wahadłowego ze skręcaniem obustronnym zarówno dla obciążeń o przebiegach zgodnych jak i niezgodnych w fazie [58-60, 62]. Jak już wspomniano pod działaniem zmiennych obciążeń materiał ulega zniszczeniu przy wartościach niższych od wytrzymałości wyznaczonej w próbach statycznych. Na rys. 2.4 przedstawiono empirycznie wyznaczony stosunek amplitud odpowiadających granicy zmęczenia przy zginaniu obrotowym Z_{go} oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m .



Rys.2.4. Stosunek wartości amplitudy odpowiadającej granicy zmęczenia przy zginaniu Z_{go} oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m [159]

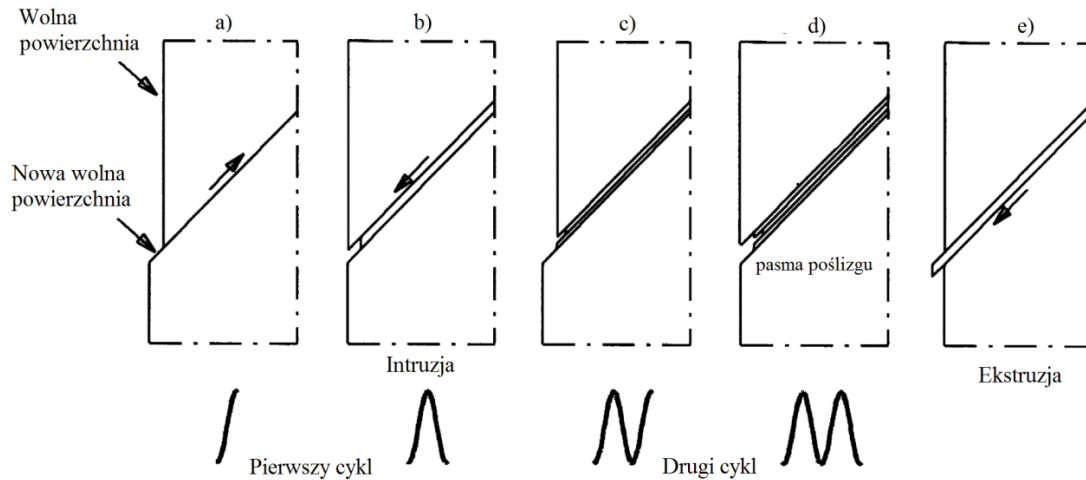
Przedstawione krzywe mają charakter przybliżony i eksperymentalny. Dla wysokowytrzymałych stali ($R_m > 2000 \text{ MPa}$) stosunek ten maleje nawet do wartości $0,30 \div 0,35$.

2.3. Mechanizm inicjacji i rozwoju pęknięć zmęczeniowych

W miejscu zapoczątkowania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego stopniowo zmniejsza się czynna powierzchnia przekroju, a w konsekwencji następuje wzrost faktycznych naprężeń jakim poddawany jest materiał aż do chwili, kiedy kolejny cykl obciążenia powoduje powstanie gwałtownego przełomu pozostałej części przekroju.

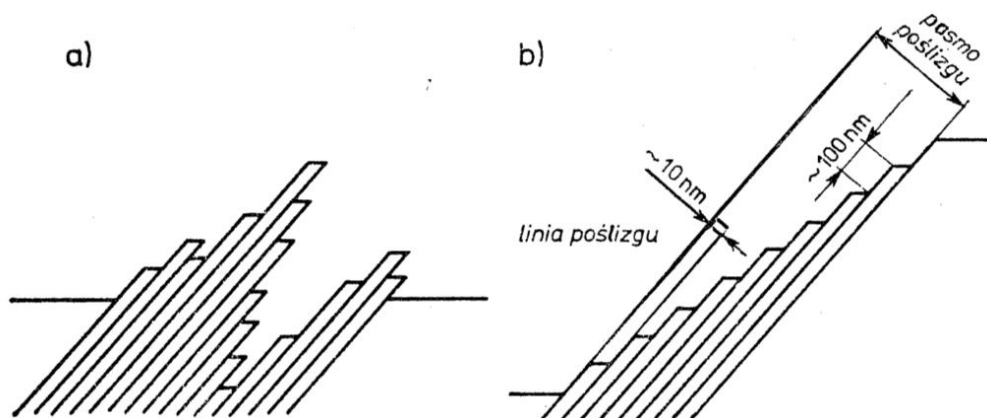
Jak wspomniano powyżej, ze względu na rozwój pęknięcia zmęczeniowego czas użytkowania elementu może być podzielony na następujące okresy: *I*- okres inicjacji pęknięcia, *II*- okres stabilnego wzrostu pęknięcia zmęczeniowego oraz najkrótszy okres *III*- gwałtowny wzrost długości pęknięcia i powstanie przełomu doraźnego.

W materiale poddanym działaniu wahadłowo zmiennych obciążeń dochodzi do lokalnych odkształceń plastycznych objawiających się w postaci tzw. pasm poślizgu (rys. 2.5).



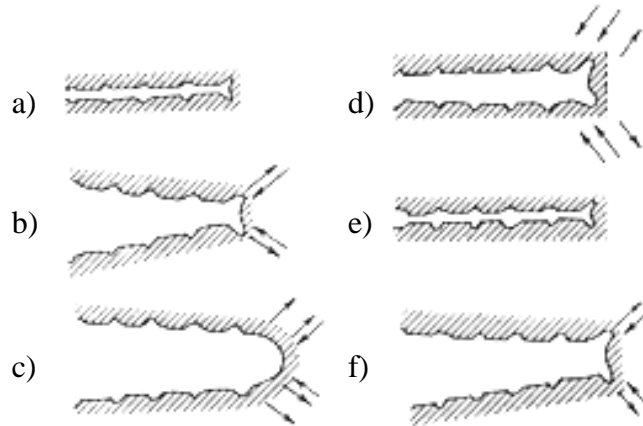
Rys.2.5. Mechanizm formowania pasm poślizgu przy obciążeniu cyklicznym [144]

Formują się one na defektach sieci krystalicznej wewnątrz ziaren ułożonych korzystnie względem oddziałującej siły zewnętrznej, tzw. dyslokacjach. Granice ziaren stanowią przeszkody w łączeniu pasm poślizgu i formowaniu pęknięcia. W zależności od przyłożonego obciążenia zewnętrznego odkształcenie plastyczne może nastąpić w pojedynczych ziarnach, natomiast powstałe pasma poślizgu nie połączą się i nie uformują pęknięcia w skali makro. W wyniku oddziaływania obciążeń cyklicznych o odpowiedniej wartości w miejscu, gdzie pasma poślizgu sięgają powierzchni swobodnej materiału, dochodzi do jego płynięcia przy każdym cyklu obciążenia, w następstwie czego dochodzi do formowania tzw. intruzji i ekstruzji, mogących stanowić ognisko propagacji pęknięcia zmęczeniowego (rys. 2.6).



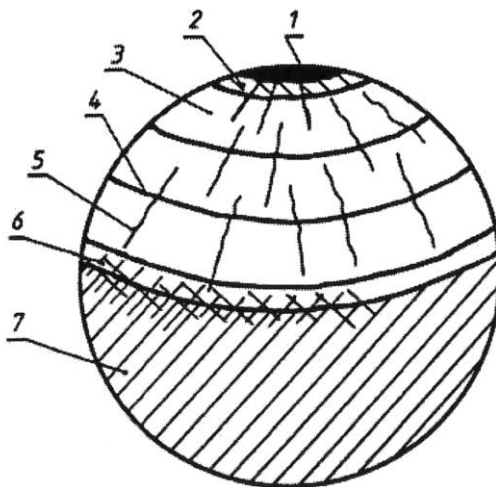
Rys. 2.6. Potencjalna lokalizacja pęknięcia zmęczeniowego a) oraz orientacyjne rozmiary pasm poślizgu w stali przy obciążeniu statycznym b) [157]

Następuje lokalne trwałe odkształcenie plastyczne materiału, a w konsekwencji jego cykliczne niszczenie wraz z rozwojem pęknięcia zmęczeniowego. Etapy wzrostu pęknięcia zmęczeniowego podczas poszczególnych momentów cyklu obciążenia przedstawiono na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Etapy wzrostu pęknięcia zmęczeniowego w materiale plastycznym: a) brak obciążenia-szczelina zmęczeniowa zamknięta, b) wzrost wartości naprężenia rozciągającego, c) maksimum naprężenia rozciągającego, d) zmiana kierunku naprężenia, e) maksimum naprężeń ściskających-zamknięcie szczeliny zmęczeniowej, f) zmiana kierunku naprężeń [75]

Każdy kolejny cykl obciążenia powoduje powtórzenie sekwencji odkształceń w obszarze wierzchołka pęknięcia zmęczeniowego oraz minimalne przesunięcie frontu pęknięcia w głąb materiału. Wzrost powierzchni obszaru uszkodzonego w wyniku procesów zmęczeniowych powoduje spadek powierzchni czynnego przekroju elementu, następuje wzrost wartości rzeczywistych naprężeń w materiale aż do przekroczenia jego wytrzymałości i powstania przełomu doraźnego. Charakterystyczne dla przełomu zmęczeniowego strefy uszkodzeń zmęczeniowych i doraźnych przedstawiono na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Schemat przełomu zmęczeniowego wału, gdzie: 1- ognisko pęknięcia, 2- strefa przyogniskowa, 3- uskoki promieniowe, 4- linie przystankowe, 5- linie promieniowe, 6- strefa przejściowa, 7- przełom doraźny [25]

Na przestrzeni lat uznawano istnienie granicy zmęczenia, definiowanej jako wartość naprężenia, poniżej której zmęczeniowe uszkodzenie materiału nie zachodzi. Jednak najnowsze prace [89, 93] wskazują, że inicjacja pęknięcia zmęczeniowego w materiale może następować już od pierwszych cykli obciążenia. Poziom naprężeń w strukturze może być zróżnicowany dla poszczególnych jej obszarów lub nawet ziaren, podobnie jak energia potrzebna do aktywowania dyslokacji zależy między innymi od wzajemnego ułożenia ziarna w sieci krystalograficznej oraz kierunku oddziaływania obciążenia zewnętrznego. Przyłożenie obciążenia o nieznaczonej wartości może spowodować powstanie charakterystycznych dla zmęczenia pasm poślizgu, jednak powstałe naprężenia mogą mieć za niską wartość dla ich koagulacji i uformowania mikro- a następnie makro-pęknięcia.

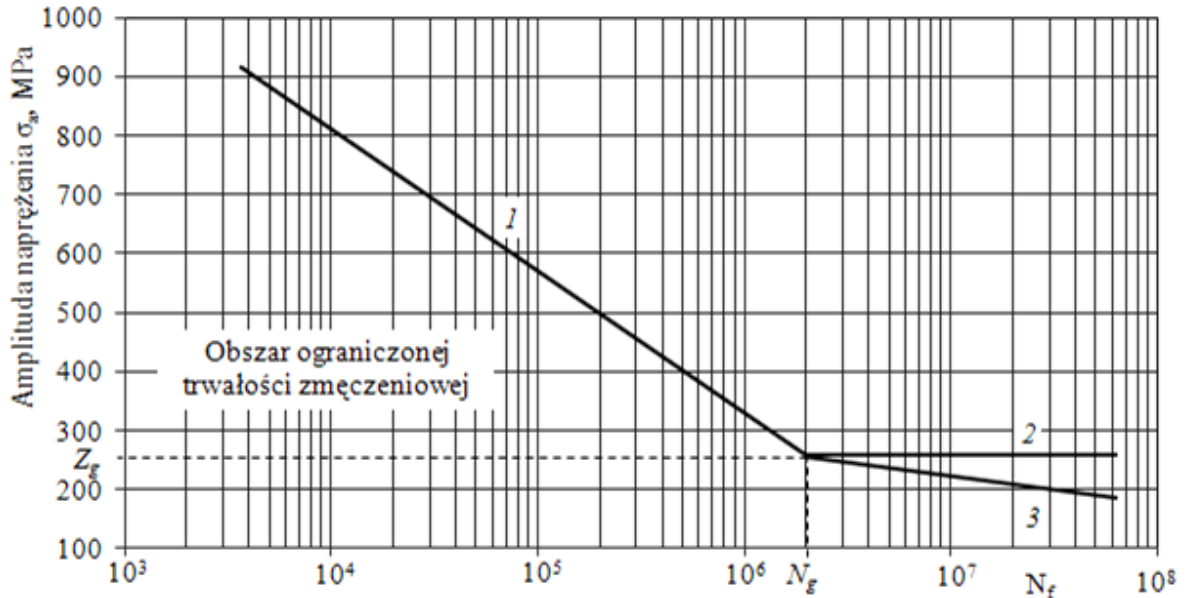
2.4. Sposoby opisu procesów zmęczeniowych

Procesy zmęczeniowe zachodzące w materiałach inżynierskich, szczególnie w początkowym etapie rozwoju, odznaczają się bardzo lokalnym zakresem oddziaływania, jednak ich efekt końcowy ma najczęściej charakter globalny w skali rozpatrywanego elementu. Metody ich opisu można również podzielić na globalne, traktujące element konstrukcyjny jako całość oraz lokalne, uwzględniające miejscowe zróżnicowanie właściwości materiału i wartości obciążenia. Metody globalne charakteryzuje łatwość obliczeń okupiona ograniczonymi możliwościami stosowania do elementów o złożonej geometrii i zróżnicowanej strukturze. Metody lokalne natomiast pozwalają znacznie dokładniej określić wyężenie materiału oraz zlokalizować miejsca koncentracji naprężeń elementów o skomplikowanym kształcie, jednak wymagają wykonania symulacji numerycznych lub przeprowadzenia pomiarów tensometrycznych na obiekcie rzeczywistym. Jednak do celów analizy właściwości materiałów, co stanowi przedmiot niniejszej pracy, zastosowanie metod nominalnych jest zupełnie wystarczające. Wyniki testów zmęczeniowych wygodnie jest przedstawiać w formie charakterystyk zmęczeniowych. Taka forma opracowania umożliwia porównywanie materiałów między sobą oraz może służyć pomocą przy ich właściwym doborze na etapie projektowania. W kolejnych punktach zaprezentowano najczęściej stosowane podejścia do opisu przebiegu procesów zmęczeniowych w materiałach inżynierskich.

2.4.1. Metody naprężeniowe

Poszukiwanie zależności wiążących trwałość elementu oraz przenoszone przez niego obciążenia było jedną z pierwszych prób matematycznego przedstawienia procesu zmę-

czenia. Charakterystykę zmęczeniową materiału uzyskuje się doprowadzając określoną liczbę próbek do zniszczenia przy różnych wartościach amplitudy naprężenia σ_a przy stałej wartości naprężeń średnich σ_m . August Wöhler jako pierwszy przedstawił wyniki swoich badań w tej formie [167]. Klasyczny wykres Wöhlera jest linią łamaną złożoną z dwóch odcinków, jak to zobrazowano na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Przykładowy wykres Wöhlera w układzie $\sigma_a - \text{Log } N_f$

Dla nachylonej części wykresu (odcinek 1) każdej wartości amplitudy naprężenia odpowiada określona liczba cykli obciążenia do zniszczenia elementu. Przebieg tego odcinka opisany jest równaniem:

$$\log N_f = A + m \cdot \sigma_a, \quad (2.5)$$

gdzie: N_f – liczba cykli do zniszczenia elementu; σ_a – amplituda naprężenia; A, m – współczynniki.

Obszar wykresu położony poniżej linii poziomej 2 symbolizuje zakres tzw. nieograniczonej trwałości zmęczeniowej dla stali, tj. teoretyczną wartość naprężenia, poniżej której w materiale nie obserwuje się zjawisk zmęczeniowych. Odcinek oznaczony numerem 3 odnosi się do metali nieżelaznych, jak stopy aluminium, miedzi itp. dla których nie obserwuje się występowania klasycznie definiowanej granicy zmęczenia. Wiele gatunków stali wykazuje załamanie krzywej zmęczeniowej w okolicach liczby cykli $N_f \approx 2 \div 3 \cdot 10^6$ cykli, natomiast metale nieżelazne jak Al. czy Cu i ich stopy cechuje regularny spadek trwałości zmęczeniowej także w zakresie liczby cykli $N_f = 2 \cdot 10^6 \div 10^7$. Pełny wykres Wöhlera obrazuje przebieg zmian wartości naprężeń niszczących dla danego materiału w zakresie od

$\frac{1}{4}$ do 10^7 cykli. Dla średniej i dużej liczby cykli Basquin [6] zaproponował podwójnie logarytmiczną formę równania $\log(\sigma_a) - \log(N_f)$ w postaci:

$$\log N_f = A' + m' \cdot \log \sigma_a. \quad (2.6)$$

gdzie: N_f – liczba cykli do zniszczenia elementu; σ_a – amplituda naprężenia; A' , m' – współczynniki.

Dzięki łatwości aplikacji oraz dużej ilości dostępnych w literaturze danych eksperymentalnych, naprężeniowe podejście do opisu zjawisk zmęczeniowych wciąż jest szeroko stosowane i stanowi istotną pomoc przy projektowaniu elementów podlegających podczas eksploatacji oddziaływaniu zmiennych obciążeń [43, 45, 47, 72].

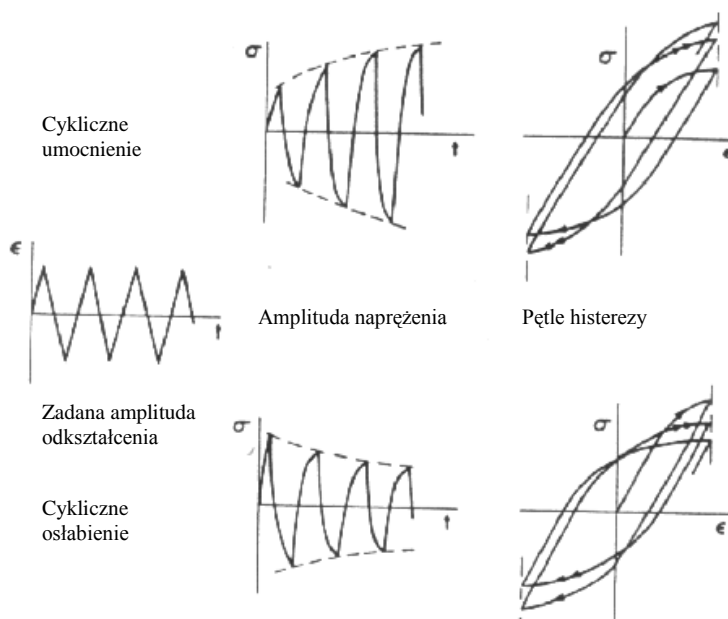
2.4.2. Metody odkształceniowe

Odształceniowe metody opisu zjawisk zmęczeniowych służą przede wszystkim do przedstawiania zakresu niskocyklowej trwałości zmęczeniowej, gdzie występują znacznej wartości odkształcenia plastyczne [29, 93, 150]. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych jest zaproponowany przez Ramberga – Osgooda [137] model obliczeniowy nazywany krzywą cyklicznego odkształcenia. Jego zastosowanie pozwala na wyznaczenie składowych odkształcenia całkowitego, jednak wymaga znajomości cyklicznych właściwości wytrzymałościowych rozpatrywanego materiału. Model ten wyrażony jest równaniem:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (2.7)$$

gdzie: σ_a – amplituda naprężenia, K' – współczynnik cyklicznego umocnienia materiału, n' – wykładnik cyklicznego umocnienia materiału [54].

Ze względu na charakter odpowiedzi materiału na działanie zmiennych obciążeń, oprócz materiałów cyklicznie stabilnych, o stałym stosunku σ - ε , wyróżnia się materiały cyklicznie osłabiające się oraz cyklicznie umacniające się. Należy pamiętać, że w zależności od stanu obróbki cieplnej i przeprowadzonych zabiegów technologicznych, ten sam materiał wyjściowy może przejawiać cechy cyklicznego osłabienia, stabilności, bądź umocnienia. Wzajemny układ krzywych naprężeń i odkształceń dla materiałów podlegających cyklicznemu osłabieniu i umocnieniu przedstawiono na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Przebieg naprężeń przy stałej amplitudzie odkształcenia dla materiałów podlegających cyklicznemu umocnieniu oraz cyklicznemu osłabieniu.

Inny model obliczeniowy wiążący amplitudę odkształcenia z trwałością zmęczeniową zaproponowany został przez Mansona-Coffina-Basquina w postaci równania:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (2.8)$$

gdzie: $\varepsilon_{a,t}$, $\varepsilon_{a,e}$, $\varepsilon_{a,p}$ – amplituda odkształcenia odpowiednio: całkowitego, sprężystego oraz plastycznego, $2N_f$ – liczba zmian kierunku obciążenia (półcykli), E – moduł Younga, σ'_f , b – współczynnik i wykładnik trwałości zmęczeniowej, ε'_f , c – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego.

2.4.3. Metody energetyczne

Ocena trwałości zmęczeniowej w tej metodzie oparta jest na energii odkształcenia [92], którą dla zakresu sprężystego wyrazić można wzorem:

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (2.9)$$

Są one znane też pod nazwą naprężeniowo- odkształceniowych, gdyż cykle nie dotyczą wprost energii rozumianej zgodnie z prawami fizyki. Miarę energii ulegającej dyssypacji w materiale podczas pojedynczego cyklu obciążenia stanowi pole powierzchni pętli histerezy w układzie σ - ε , w oparciu o które budowane są modele oceny stopnia uszkodzenia materiału [69, 106, 107]. Obliczenia zmęczeniowe w oparciu o energię procesu stanowią przedmiot licznych badań pracowników naukowych Politechniki Opolskiej [55, 56, 59 – 65].

Modele te stosowane są przede wszystkim do rozpatrywania złożonych stanów obciążenia [82], opartych o wyznaczenie położenia płaszczyzny krytycznej [65 – 67, 84].

2.4.4. Elementy mechaniki pękania

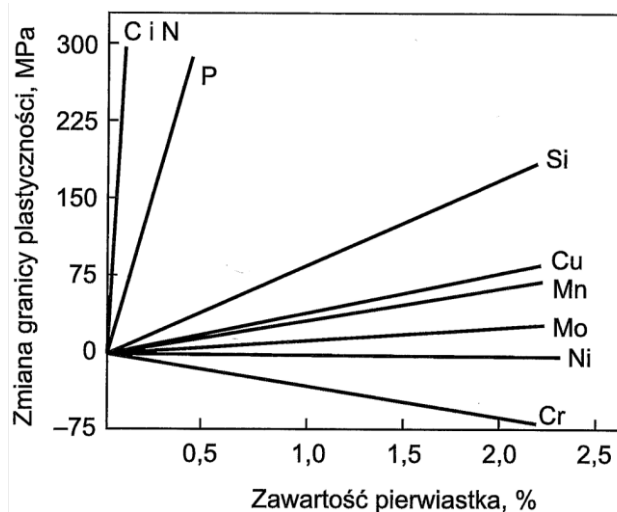
Metody określania bezpiecznego czasu eksploatacji elementów oparte o mechanikę pękania znajdują coraz szersze zastosowanie przemysłowe z uwagi na wydłużanie okresów użytkowania elementów, szczególnie tych, które mimo obecności pęknięcia podlegają dalszej eksploatacji [139]. Narzędzia mechaniki pękania służą kontrolowaniu i przewidywaniu prędkości propagacji pęknięcia zmęczeniowego w danych warunkach obciążenia [22, 26, 53, 75, 111]. Więcej informacji odnośnie szeroko pojętej mechaniki pękania i jej obszarów zastosowań praktycznych znaleźć można między innymi w pracach [10, 76, 142].

3. Wpływ wybranych czynników na trwałość zmęczeniową materiałów konstrukcyjnych

Obserwowane w materiałach konstrukcyjnych procesy zmęczeniowe cechuje złożona natura oraz znaczna ilość parametrów decydujących o ich przebiegu. W niniejszym rozdziale zaprezentowano wybrane czynniki istotnie oddziałujące na rozwój i propagację pęknięcia zmęczeniowego.

3.1. Skład i struktura zastosowanego materiału

Dobór materiału na elementy maszyn i konstrukcji powinien być przemyślany, świadomy i odpowiedzialny [98]. Kryteria doboru na podstawie wyników statycznych prób wytrzymałościowych mogą prowadzić do popełnienia znacznych błędów projektowych w stosunku do elementów pracujących w warunkach zmiennych obciążeń. Do najważniejszych właściwości wytrzymałościowych i cech fizycznych szeroko rozumianych materiałów inżynierskich zaliczyć należy: wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności, wydłużenie względne, przewężenie przekroju przy zerwaniu, udurowienie, twardość, a także izotropię bądź kierunkowość właściwości [17, 109]. Z uwagi na środowisko pracy elementu istotna może okazać się odporność korozyjna materiału, temperatura przejścia w stan kruchy, czy odporność na pęcznienie. Stale konstrukcyjne do spawania z powodu niskiej zawartości węgla muszą bazować na innych mechanizmach umocnienia struktury. Na rysunku 3.1 przedstawiono charakter oddziaływania wybranych pierwiastków stopowych na położenie granicy plastyczności ferrytycznej stali niskowęglowej.



Rys. 3.1. Wpływ zawartości wybranych pierwiastków chemicznych na granicę plastyczności niskowęglowej stali ferrytycznej

Niestopowe oraz niskostopowe gatunki stali w nieznacznym stopniu korzystają z umocnienia rozтворowego ze względu na niewielki udział masowy dodatków stopowych. Efekt umocnienia uzyskiwany jest głównie dzięki kontrolowanej obróbce termomechanicznej w procesie wytwarzania, dzięki której możliwe jest uzyskanie silniejszego rozdrobnienia składników struktury w objętości materiału. Podstawowe prawo uwzględniające wpływ budowy wewnętrznej na wartość granicy plastyczności materiałów polikrystalicznych przedstawiane jest w postaci równania Halla-Petcha [91]:

$$\sigma = \sigma_0 + \kappa \cdot d^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

gdzie: σ_0 - naprężenie uplastycznienia zależne od materiału, κ - współczynnik zależny od materiału, d – średnia średnica ziarna.

Zatem zgodnie z zapisem równania (3.1) wartość naprężenia uplastyczniającego dla danego materiału zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu średniej średnicy ziarna obserwowanej w jego strukturze. Rozdrobnienie struktury stopów żelaza powoduje umocnienie granicami ziaren, które stanowią naturalną barierę dla rozwoju dyslokacji [135]. Ponadto materiały o bardziej rozdrobnionej strukturze cechują się mniejszym zróżnicowaniem właściwości wytrzymałościowych [94]. Jednakże dla materiałów nanokrystalicznych, których wielkość ziarna jest porównywalna z rozmiarami dyslokacji zachodzi tzw. odwrotny efekt Halla-Petcha, powodujący obniżanie granicy plastyczności oraz wzrost skłonności do kruchego pęknięcia wraz ze zmniejszaniem wielkości ziarna [30]. Według niektórych badaczy, efekt umocnienia występuje zarówno dla obciążeń statycznych jak i zmiennych [16]. Ponadto rozdrobnienie struktury pozytywnie oddziałuje na plastyczność materiału oraz obniża temperaturę przejścia w stan kruchy.

3.2. Kształt i wymiary elementu

Geometria elementu istotnie wpływa na rozkład naprężeń w jego objętości. Zaleca się unikania nagłych zmian kształtu i ostrych podcięć, gdyż mogą powodować kumulację naprężeń w małej objętości materiału [101 – 104]. Mimo nieznacznego obciążenia globalnego, lokalnie może zachodzić odkształcenie plastyczne, co jest szczególnie niekorzystne w przypadku działania zmiennych obciążeń, gdyż może stanowić miejsce inicjacji pęknięcia.

Rozmiary geometryczne elementów maszyn i konstrukcji także nie pozostają bez wpływu na ich cechy wytrzymałościowe. Wprawdzie zwiększenie przekroju obniża wartości naprężeń występujących w materiale dla danego poziomu obciążenia zewnętrznego,

jednakże wzrost średnicy prętów czy grubości blach powoduje silniejsze zróżnicowanie właściwości wytrzymałościowych między warstwą przypowierzchniową a rdzeniem elementu. Ponadto zwiększenie objętości materiału pociąga za sobą wzrost akumulowanego ciepła od zabiegów technologicznych i naprężeń termicznych.

3.3. Stan powierzchni zewnętrznej oraz warstwy wierzchniej

Wolne powierzchnie elementów urządzeń mechanicznych i konstrukcji to obszary newralgiczne z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej. Najczęściej to w ich pobliżu znajdują się lokalne ekstrema naprężeń i odkształceń, a jednocześnie podlegają one działaniu szeregu niekorzystnych czynników zewnętrznych jak korozyjne środowisko eksploatacji, działanie lokalnych mikrokarbów po obróbce skrawaniem czy uszkodzenia mechaniczne. Zaleca się aby w miarę możliwości kierunek śladów obróbki powierzchni elementu był zgodny z kierunkiem występowania maksimum naprężeń.

3.4. Koncentratory naprężeń

Pojęciem karbu określa się wszelkiego rodzaju zmiany geometrii lub właściwości materiału elementu, powodujące lokalne spiętrzenie naprężeń. Z uwagi na charakter koncentratora naprężeń wyróżnić można karby geometryczne, strukturalne oraz mieszane, do których zalicza się także połączenia spawane. Poszczególne rodzaje karbów omówiono bliżej w podpunktach.

3.4.1. Karby geometryczne

Jak sugeruje nazwa efekt koncentracji naprężeń dla tego rodzaju karbów związany jest przede wszystkim ze zmianą kształtu elementów [105, 146 – 148]. Chodzi zarówno o kształt detalu konstrukcyjnego jako całości jak i jego szczegółów w postaci wszelkiego rodzaju podtoczeń, rowków, otworów, podcięć, gwintów itp. [112]. Stosunek wartości naprężeń prowadzących do zniszczenia elementu gładkiego, do naprężeń powodujących zniszczenie podobnego elementu zawierającego koncentrator naprężeń, przyjęto określać mianem teoretycznego współczynnika działania karbu i przedstawiać w postaci wzoru:

$$K_t = \frac{\sigma_{xx}^e}{\sigma_{xxn}}, \quad (3.2)$$

Obecność karbu powoduje lokalny wzrost naprężeń rzeczywistych w stosunku do naprężeń nominalnych wyznaczonych z użyciem podstawowych metod obliczeniowych.

Według reguły Neubera współczynnik K_t można przedstawić za pomocą średniej geometrycznej współczynników koncentracji naprężeń i odkształceń:

$$K_t = \sqrt{K_\sigma K_\varepsilon}, \quad (3.3)$$

zdefiniowanych jako stosunek naprężenia σ_{xx}^{e-p} i odkształcenia sprężysto-plastycznego ε_{xx}^{e-p} w elemencie bez karbu do elementu zawierającego karb:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{xx}^{e-p}}{\sigma_{xxn}} \quad (3.4)$$

oraz:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{xx}^{e-p}}{\varepsilon_{xxn}}, \quad (3.5)$$

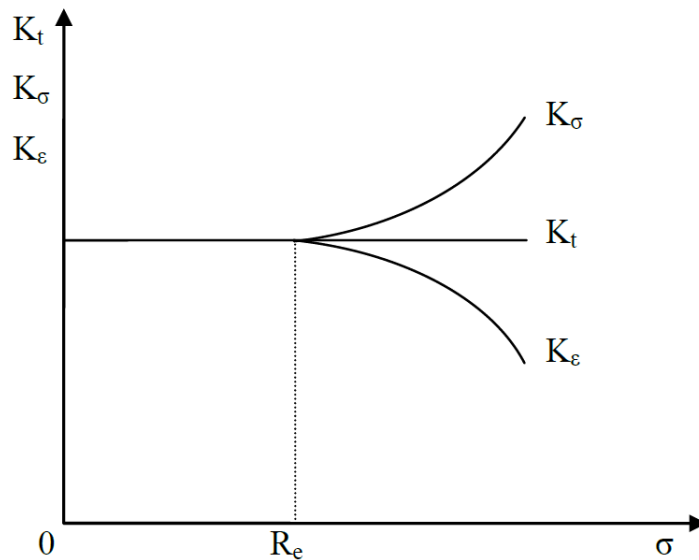
Dla poziomu do granicy plastyczności zakłada się jednakową wartość wspomnianych współczynników:

$$K_t = K_\sigma = K_\varepsilon. \quad (3.6)$$

Dla większych naprężeń zachodzi zależność [7, 11]:

$$K_\sigma \leq K_t \leq K_\varepsilon, \quad (3.7)$$

jak pokazano na rysunku 3.2.



Rys.3.2. Zależność teoretycznych współczynników działania karbu od wartości naprężenia [73]

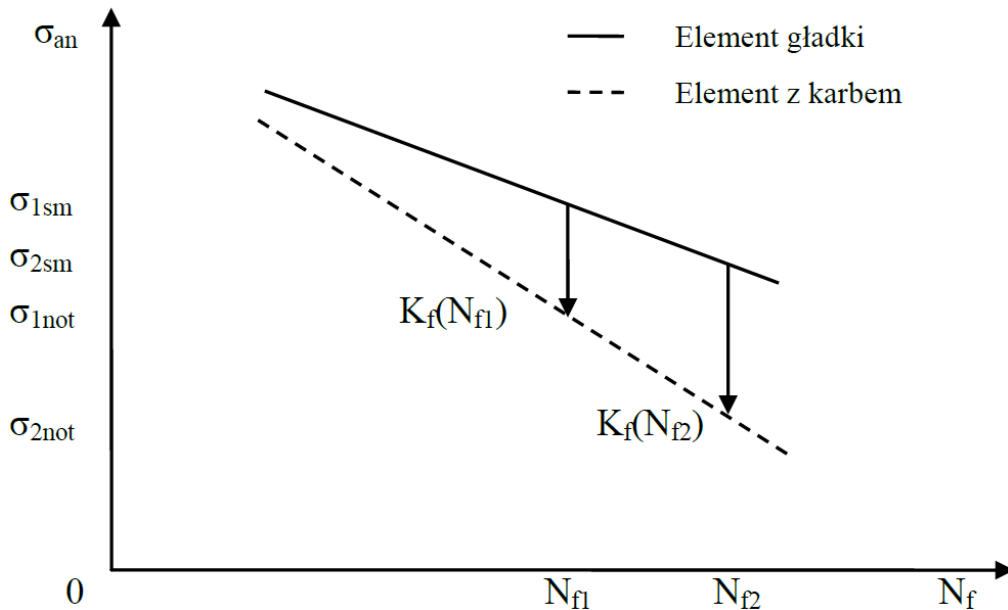
Pod pojęciem zmęczeniowego współczynnika działania karbu K_f [22] rozumie się stosunek naprężeń nominalnych przenoszonych przez elementy gładkie σ_{sm} do naprężeń wyznaczonych dla elementów z karbem σ_{not} przy jednakowej liczbie cykli do zniszczenia

$$K_f = \frac{\sigma_{sm}}{\sigma_{not}}. \quad (3.8)$$

Najczęściej wyznaczany jest on dla liczby cykli $N_f = 10^6$. Obliczenie wartości K_f dla innych poziomów naprężenia nominalnego pozwala zaobserwować, że zmęczeniowy efekt działania karbu zależy od liczby cykli N_f [7, 114]:

$$K_f = \frac{\sigma_{sm}(N_f)}{\sigma_{not}(N_f)}. \quad (3.9)$$

Interpretację graficzną współczynnika K_f przedstawiono na rys.3.3 [73, 108].

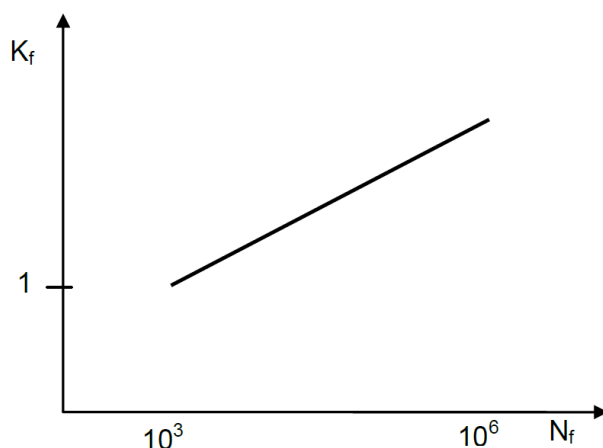


Rys. 3.3. Porównanie trwałości zmęczeniowej elementów gładkich i z karbem [73]

Stwierdzono dla stali, że do liczby cykli wynoszącej ok. $N_f \approx 10^3$ efekt oddziaływania karbu na trwałość zmęczeniową jest pomijalnie mały, tzn. $K_f \approx 1$, natomiast powyżej tej granicy w miarę wzrostu liczby cykli wartość zmęczeniowego współczynnika działania karbu rośnie. Znając wartość K_f dla $N_f = 10^6$ można wyznaczyć przebieg funkcji $K_f(N_f)$ dla dowolnej liczby cykli korzystając z równania:

$$K_f(N_f) = K_f(10^6) \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{\frac{\log[K_f(10^6)]}{3}}. \quad (3.10)$$

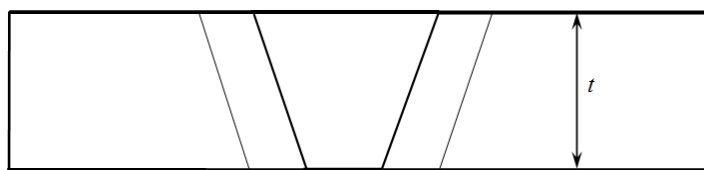
Orientacyjny przebieg funkcji $K_f(N_f)$ przedstawiono na rys. 3.4.



Rys.3.4. Zmęczeniowy współczynnik działania karbu K_f w funkcji liczby cykli N_f [73]

3.4.2. Karby strukturalne

Obecność karbu strukturalnego wiąże się z lokalnym odstępstwem od zakładanych właściwości, przede wszystkim wytrzymałościowych wynikających z niejednorodności i niedoskonałości samego materiału, pomijając inne efekty koncentracji naprężeń. Niektóre zabiegi technologiczne, szczególnie cieplne i cieplno-chemiczne mogą przyczynić się do zaistnienia niejednorodności w strukturze materiału. Zmiany mogą mieć charakter przemian fazowych lub dyfuzyjnych, cechować się lokalnym wzrostem właściwości wytrzymałościowych lub ich spadkiem, jednak w każdym przypadku wpływają na rozkład naprężeń i odkształceń w miejscu ich występowania i obszarze przyległym. Przykład karbu strukturalnego stanowić może doczołowe połączenie spawane z usuniętym nadlewem lica i grani, co schematycznie przedstawiono na rysunku 3.5.



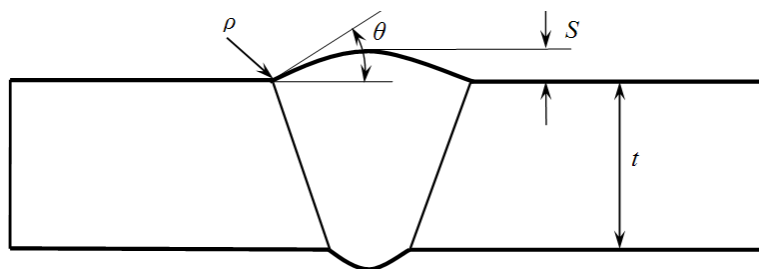
Rys. 3.5. Schemat połączenia spawanego z usuniętym nadlewem lica i grani spoiny.

Karby strukturalne często stanowią przyczynę występowania znacznej wartości naprężeń własnych, które mogą się sumować lub redukować z obciążeniem zewnętrznym, a tym samym istotnie oddziaływać na trwałość elementu [77].

3.4.3. Karby mieszane

Mieszane lub inaczej zwane złożone koncentratory naprężeń omówione zostaną na przykładzie połączenia spawanego.

Spoina oraz jej przyległe obszary wykazują cechy zarówno geometrycznych jak i strukturalnych koncentratorów naprężeń (rys.3.6).



Rys. 3.6. Przekrój poprzeczny oraz charakterystyczne parametry geometrii złącza typu V, gdzie: ρ - promień przejścia między materiałem rodzimym a licem spoiny, θ - kąt przejścia materiału rodzimego w lico spoiny, S - wysokość nadlewu spoiny, t - grubość łączonych materiałów

Lico oraz grani spoiny czołowej stanowią zaburzenie powierzchni materiału rodzimego, charakteryzowane za pomocą promienia przejścia lica lub grani w materiał rodzimy, kąta pomiędzy płaszczyzną materiału a powierzchnią boczną lica lub grani, a także wysokość nadlewu lica lub wycieku z grani spoiny.

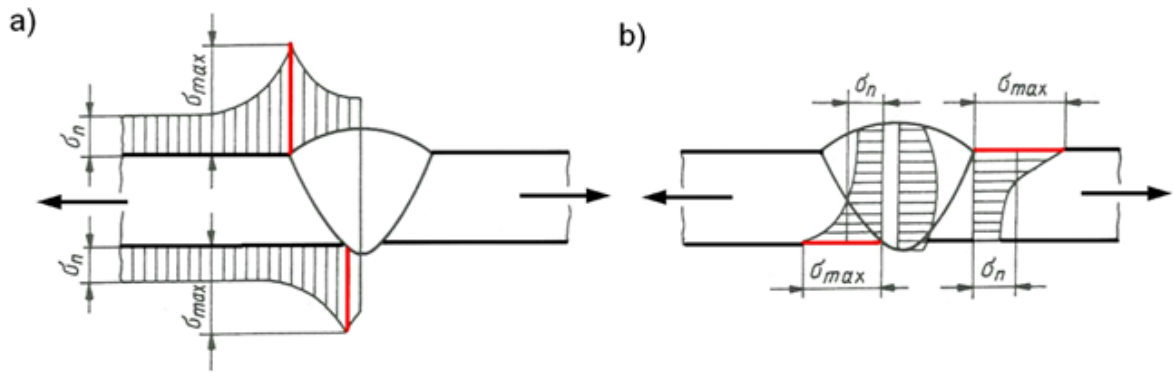
Nju i Glinka zaproponowali równanie wiążące podstawowe parametry geometryczne spoiny oraz wartość teoretycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_t w postaci

$$K_t = 1 + 0.5121(\theta)^{0.572} \left(\frac{t}{\rho} \right)^{0.469} \quad (3.11)$$

dla $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ oraz $15 \leq \frac{t}{\rho} \leq 50$.

Można zauważyć, że wartość tak przedstawionego teoretycznego współczynnika działania karbu rośnie wraz ze wzrostem kąta θ i grubości elementu t oraz ze spadkiem promienia karbu ρ . Oczywiście równanie (3.11) zwraca pewną wartość współczynnika koncentracji naprężeń przy założeniu idealnej jakości i równomiernego kształtu spoiny, co w warunkach rzeczywistych nie występuje.

Dynamika i kompleksowość procesów zachodzących w obrębie jeziorka spawalniczego powoduje powstawanie znacznej wartości naprężeń własnych w obszarze zastygłego metalu spoiny, spełniających definicję karbu strukturalnego. Naprężenia te kumulują się z wynikającym z warunków eksploatacji obciążeniem zewnętrznym i występują zarówno na powierzchni elementu (rys. 3.7a), jak i w objętości jego materiału (rys. 3.7b).



Rys. 3.7. Schemat kumulacji naprężeń własnych i obciążenia zewnętrznego w obszarze spoiny: a) na powierzchni elementu, b) w objętości materiału [38]

Niektórzy badacze [168] proponują zapis teoretycznego współczynnika działania karbu K_t dla złączy spawanych w postaci iloczynu oddziaływań złożonej geometrii spoiny K_w oraz zmiany struktury w spoinie K_s

$$K_t = K_w \cdot K_s \quad (3.12)$$

Jednakże na ogół nie wyznacza się oddzielnie współczynników K_s , dla uwzględnienia zmian struktury, i przyjmuje się:

$$K_t = K_w \quad (3.13)$$

Przeprowadzone symulacje i badania eksperymentalne przedstawione w pracy [13] wskazują na wzrastający wpływ oddziaływania naprężeń własnych na trwałość zmęczeniową wraz ze spadkiem przyłożonych obciążeń zewnętrznych. Tak więc wraz ze wzrostem liczby cykli do zniszczenia elementu obniża się stosunek naprężeń eksploatacyjnych do naprężeń własnych, co sprawia że to właśnie one przejmują decydującą rolę w rozwoju procesów zmęczeniowych w zakresie średniej i wysokiej liczby cykli.

4. Spawanie elektryczne

W kolejnym rozdziale przedstawiono najważniejsze informacje odnośnie spawania elektrycznego materiałów stalowych. W podrozdziałach zaprezentowano kolejno zarys historyczny rozwoju procesów spawalniczych, charakterystykę metody spawania ręcznego elektrodą otuloną oraz przykładowe zastosowania przemysłowe.

4.1. Historia rozwoju procesów spawalniczych

Według współczesnej definicji spawanie jest procesem spajania dokonywanym przez lokalne stopienie łączonych elementów bez wywierania siły dociskającej. Łączenie metali z wykorzystaniem ciepła znane było już w starożytności, jednak wówczas polegało na nagraniu elementów w ognisku oraz ich skuciu. Metoda ta praktycznie bez większych zmian wykorzystywana była przez stulecia, aż do początku XIX wieku, kiedy odkryto i zaczęto wykorzystywać energię chemiczną gazów do celów spawalniczych. Najbardziej rozpowszechniony acetylen uzyskiwano w wytwornicach lub podobnie jak tlen magazynowano pod wysokim ciśnieniem w stalowych butlach [18]. Prostota i mobilność urządzeń oraz wynikające z nich szerokie spektrum zastosowań uczyniły z palnika acetylenowego powszechnie wykorzystywane narzędzie do cięcia i spawania metali szczególnie w trudnych warunkach, jak budowa trakcji kolejowej. Jednak intensywny rozwój spawalnictwa nastąpił dopiero po zastosowaniu energii elektrycznej jako źródła ciepła. Opracowana pod koniec XIX w. przez Benardosa i Olszewskiego technika spawania elektrodą węglową została szybko zastąpiona wynalazkiem Sławianowa polegającym na zastosowaniu topliwej elektrody metalowej, jednak stanowiła podwaliny późniejszego rozwoju metod spawania z wykorzystaniem energii łuku elektrycznego [132]. Wprowadzenie na początku XX w. elektrod otulonych pozwoliło lepiej chronić łuk oraz roztopiony metal spoiny przed szkodliwym wpływem czynników atmosferycznych. Obecnie rozróżnia się kilkanaście metod spawania łukowego, pośród których do najważniejszych zaliczyć należy: spawanie ręczne elektrodą otuloną (*SMAW – Shielded Metal Arc Welding*), spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*) oraz spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazów ochronnych (*GTAW – Gas Tungsten Arc Welding*).

4.2. Charakterystyka spawania ręcznego elektrodą otuloną

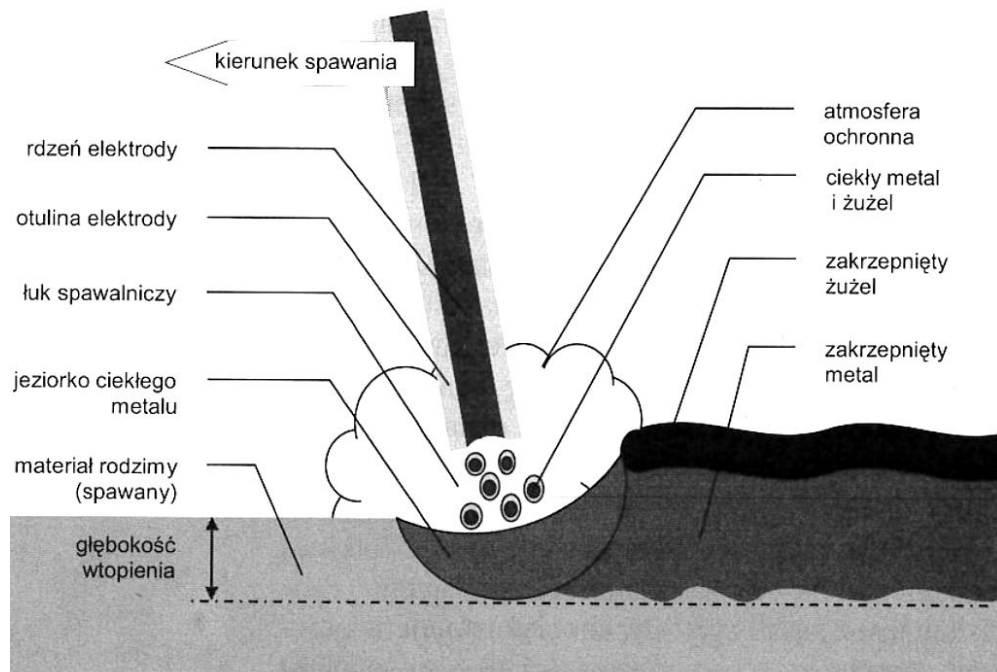
Spawanie łukowe elektrodą otuloną należy do tradycyjnych, jednak wciąż szeroko stosowanych w przemyśle metod łączenia metali. Połączenie uzyskiwane w tej technologii

powstaje wskutek stopienia brzegów łączonych elementów oraz elektrody wraz z otuliną w wyniku oddziaływania energii łuku elektrycznego (rys. 4.1), którego temperatura sięga 5000 K. Najważniejsze parametry procesu spawania łukowego, czyli natężenie prądu spawania I , napięcie łuku U oraz prędkość spawania v decydują o energii liniowej spawania Q wyrażonej wzorem:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} [\text{kJ} / \text{mm}], \quad (4.1)$$

gdzie: U – napięcie łuku [V], I – natężenie prądu spawania [A], v – prędkość spawania [m/s], k – współczynnik sprawności cieplnej danej metody spawania (w przypadku spawania ręcznego elektrodą otuloną można przyjąć $k = 0,8$)

Ponadto biegunowość i charakter prądu spawania istotnie wpływają na prędkość stapiania elektrody oraz głębokość wtopienia w materiał rodzimy. W przypadku prądu stałego na biegunie dodatnim wydziela się ok. 70% powstałego w wyniku jarzenia łuku ciepła, natomiast zastosowanie prądu przemiennego pozwala uzyskać równomierny rozkład ciepła, jednak obniża stabilność jarzenia łuku [162].



Rys.4.1. Schemat powstawania spoiny w procesie spawania ręcznego elektrodą otuloną [25]

Spawanie elektrodą otuloną jest heterogenicznym procesem spajania, ponieważ w tworzeniu połączenia udział biorą materiały o niejednorodnym składzie chemicznym. W zależności od techniki spawania, rodzaju łączonych metali oraz zastosowanych elektrod, udział materiału rodzimego w spoinie wykonanej tą metodą może wynosić od 10 do 40%.

Elektroda, którą stanowi pokryty otuliną metalowy pręt o unormowanej średnicy i długości, ulegając stopieniu stanowi jednocześnie źródło materiału dodatkowego. Średnicę elektrody dobiera się stosownie do grubości spawanego elementu, pozycji spawania oraz zakładanej liczby ściegów, natomiast rodzaj elektrody w zależności od gatunku materiału rodzimego. Najczęściej spotyka się elektrody o długości $250\div 450$ mm oraz średnicy rdzenia metalicznego w zakresie $1,6\div 6$ mm. Otulina, czyli sprasowana masa wokół rdzenia elektrody, stanowi bardzo ważny jej element istotnie oddziałujący na przebieg procesu spawania. Jej podstawową rolą jest zapewnienie odpowiedniej jakości oraz wymaganych własności eksploatacyjnych połączenia spawanego poprzez:

- ochronę łuku i ciekłego metalu jeziora spawalniczego przed wpływem atmosfery,
- odtlenianie, wiązanie azotu oraz oczyszczanie ciekłego metalu spoiny,
- wytworzenie warstwy żużla na powierzchni krzepnącego stopiwa,
- regulowanie składu chemicznego spoiny.

Obecnie na rynku oferowanych jest wiele rodzajów elektrod otulonych różniących się przede wszystkim składem chemicznym otuliny (rutylowe, kwaśne, zasadowe, rutylo-zasadowe, celulozowe itd.), a przez to właściwościami użytkowymi oraz typowymi obszarami zastosowania [123]. Ponadto ze względu ilość wytwarzającego się gazu i żużla istotny jest stosunek grubości otuliny do średnicy rdzenia metalicznego. Mimo ciągłego dążenia producentów elektrod do wytwarzania materiałów dodatkowych o możliwie najlepszych własnościach spawalniczych, przebieg procesu spawania łukowego elektrodą otuloną uzależniony jest w znacznym stopniu od umiejętności i doświadczenia operatora. Do najważniejszych zalet tej metody należą: wysoka uniwersalność wynikająca z możliwości jej stosowania dla szerokiego zakresu materiałów, wielu pozycji spawania oraz różnych grubości łączonych elementów. Dodatkowo wykorzystuje proste, przenośne i relatywnie tanie urządzenia. Czynniki przemawiające na niekorzyść tej metody to przede wszystkim: konieczność usuwania żużla między kolejnymi przejściami spoin wielościegowych, stosunkowo niska wydajność i prędkość spawania oraz znaczne uzależnienie jakości spoin od umiejętności spawacza.

4.3. Spawanie elektryczne w przemyśle. Spawalność stali

Doczołowe złącza spawane blach odznaczają się z reguły dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, co sprawia, że znajdują szerokie zastosowanie praktyczne w elementach przenoszących obciążenia statyczne i dynamiczne, głównie w elementach powłokowych takich jak: zbiorniki, zsypy, poszycia kadłubów okrętowych, ale także różnego ro-

dzaju podajniki bezwładnościowe, przenośniki wibracyjne czy przesiewacze. Pęknięcia zmęczeniowe w podobnych materiałach obserwowane były również w zmechanizowanych obudowach górniczych [133]. Ograniczenia w stosowaniu wysokowytrzymałych stali na elementy spawane obciążone zmęczeniowo wynikają głównie z powodu znacznego spadku trwałości zmęczeniowej takich materiałów wywołanego przez proces spawania jak i z ograniczonej możliwości wykonywania połączeń spawanych niektórych materiałów [2, 32]. Znane są sposoby podnoszenia trwałości zmęczeniowej elementów spawanych [14, 39, 151], głównie poprzez usuwanie nadlewu lica i grani spoiny [8, 35, 46], obróbkę termiczną (przetapianie linii przejścia spoiny w materiał podstawowy) [44, 79], czy obróbkę powierzchniową (kulowanie, śrutowanie, młoteczkowanie) [33, 140, 141, 149, 164], jednak nie są one przedmiotem niniejszej pracy i nie będą rozpatrywane w dalszej jej części.

Spawalność stali określa się na podstawie składu chemicznego za pomocą parametru zwanego równoważnikiem węgla, który obliczany jest wg formuły zaproponowanej przez *IIW* [41]:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (4.2)$$

gdzie symbole pierwiastków chemicznych odpowiadają ich stężeniu masowemu w stali.

Wartości $CEV \leq 0,45$ oznaczają spawalność stali bez ograniczeń [19]. Wyższe wartości równoważnika węgla oznaczają konieczność podgrzewania przed spawaniem, lub wyżarzania po spawaniu w celu uzyskania pożądanych właściwości złącza. Jednakże formuła ta jest zalecana dla stali o zawartości węgla $C \geq 0,18\%$. Istnieją też alternatywne równania do wyznaczania wartości równoważnika węgla w stali, jak np. rozpowszechniony w Niemczech *CET*:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}, \quad (4.3)$$

Do oceny wrażliwości materiału do powstawania pęknięć gorących stosowany jest parametr określany jako *HCS* (z ang. *Hot Cracking Susceptibility*) przedstawiony równaniem:

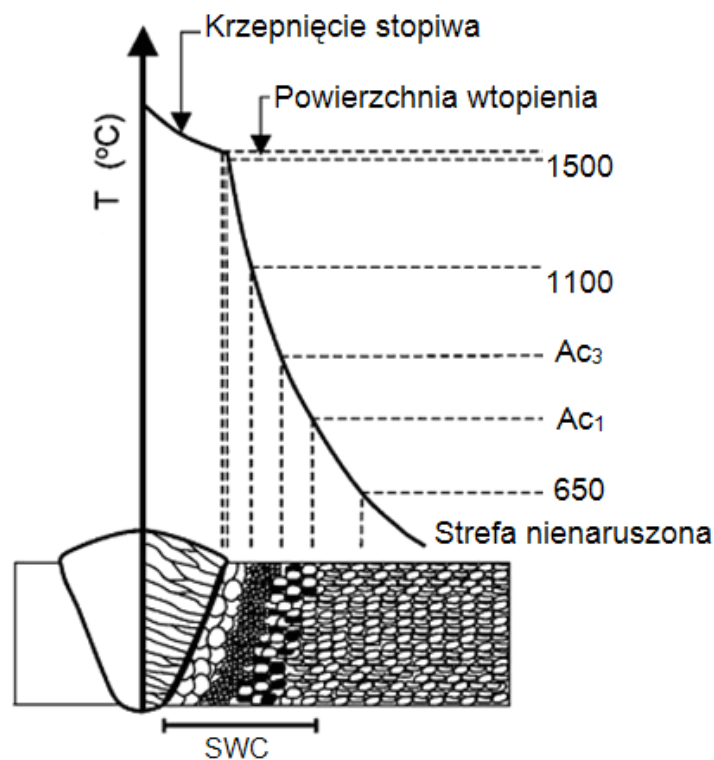
$$HCS = \frac{\left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 1000}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}. \quad (4.4)$$

Jego wartości na poziomie $HCS < 4$ świadczą o wysokiej odporności materiału na powstawanie pęknięć krystalizacyjnych podczas spawania.

Cały czas prowadzone są prace nad udoskonalaniem technik i technologii spawania, w celu pozyskiwania możliwości wykonywania połączeń spawanych o pożądanym parametrach dla jak największej liczby materiałów.

4.4. Wpływ spawania na właściwości materiału rodzimego

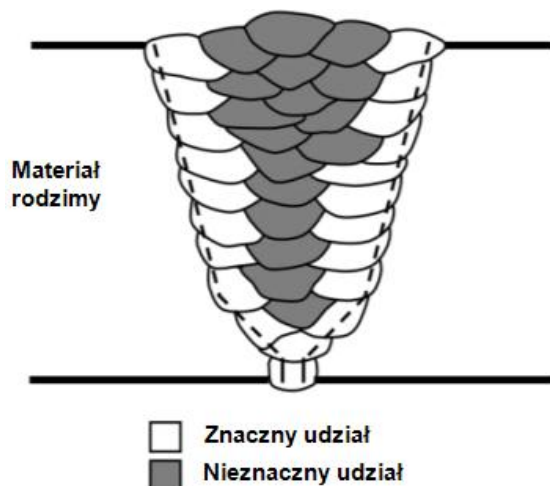
Obecność połączenia spawanego wiąże się ze zmianą struktury materiału. W wyniku oddziaływania ciepła łuku elektrycznego na materiał rodzimy, ulega on lokalnemu nagraniu powyżej temperatury topnienia (rys. 4.2). W stanie ciekłym następuje dyfuzja składników stopowych materiału podstawowego i dodatkowego oraz składników aktywnych otaczającej jeziorko spawalnicze atmosfery gazowej. Z uwagi na wręcz punktowe oddziaływanie termiczne łuku spawalniczego, jego energia wydzielona w postaci ciepła w niewielkiej objętości materiału ulega bardzo szybkiej dyssypacji. Lokalny gradient temperatur osiąga znaczne wartości.



Rys. 4.2. Struktura spoiny i przyległej strefy wpływu ciepła SWC z uwzględnieniem temperatur występowania poszczególnych obszarów na przykładzie spoiny jednościgowej [26]

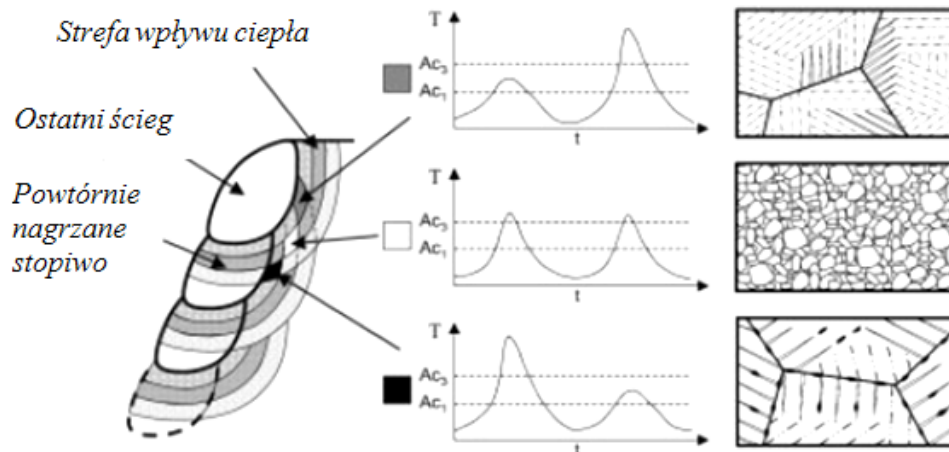
Jak widać na rysunku 4.2 w obrębie strefy wpływu ciepła można wyróżnić podstrefy o strukturze uzależnionej od stopnia nagrzania materiału w procesie spawania. W zależności od składu chemicznego spawanych materiałów oraz materiału dodatkowego, krzepnący metal spoiny może podlegać przemianom fazowym, co dodatkowo sprzyja powsta-

waniu naprężeń wewnętrznych. Skład chemiczny spoin wykonywanych w wielu przejściach nie jest jednorodny. Ściegi spawalnicze położone bezpośrednio na ściankach łączonych elementów zawierają większy udział materiału rodzimego w zastygłym metalu spoiny, niż ściegi wewnątrz spoiny, co przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Udział materiału rodzimego w zakrzepłym metalu spoiny [26]

Poszczególne przejścia w spoinach wielościegowych podlegają wielokrotnie działaniu ciepła łuku elektrycznego w wyniku czego następuje ich samoczynna obróbka cieplna (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Schematyczne przedstawienie cykli cieplnych materiału podstawowego i stopiwa w połączeniach spawanych wielościegowych oraz odpowiadających im struktur w SWC [26]

W przypadku stali niskowęglowych i niskostopowych cykle cieplne od kolejnych warstw spoiny powodują zanikanie struktury lanej oraz rozdrobnienie ziarna w efekcie normalizacji. Dzięki temu poprawie ulegają ich właściwości wytrzymałościowe, które zależą od składu chemicznego materiału podstawowego, użytych elektrod jak i stanu obróbki cieplnej [9].

5. Połączenia spawane w opisie zjawisk zmęczeniowych

Obecność połączenia spawanego powoduje znaczne lokalne odstępstwo od struktury, składu chemicznego, a często także właściwości wytrzymałościowych charakteryzujących dany materiał rodzimy. Spoina i zjawiska towarzyszące procesowi spawania wywierają istotny wpływ na właściwości materiału, który powinien być uwzględniony na etapie projektowym wytwarzania maszyn i konstrukcji. Na przestrzeni lat zaproponowano wiele sposobów uwzględniania połączeń spawanych w elementach poddanych działaniu zmiennych obciążeń, które ogólnie podzielić można na metody nominalne, nielokalne i lokalne. W kolejnych podpunktach przybliżono wybrane modele obliczeniowe.

5.1. Metody nominalne

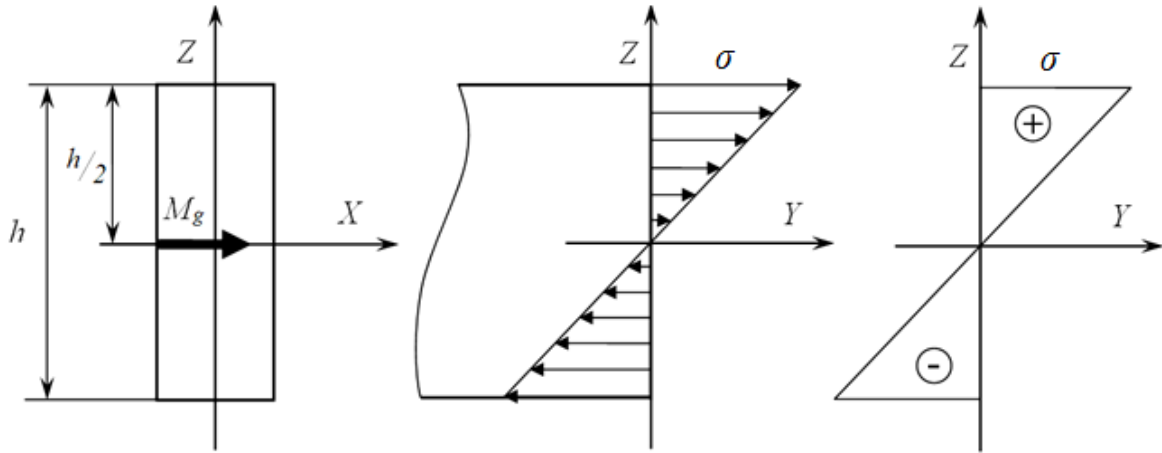
Projektowanie elementów spawanych w oparciu o proste, ogólne algorytmy obliczeniowe nie jest zalecane, szczególnie w przypadku obciążeń cyklicznych. Wywołane obecnością spoiny naprężenia własne, których wartości mogą sięgać granicy plastyczności materiału rodzimego, jak i zmiana geometrii wskutek powstania lica i grani spoiny nie są w tych metodach w żaden sposób uwzględniane. Brane pod uwagę są natomiast duże niezgodności spawalnicze (np. głębokie podtopienia, braki przetopu), które wymiennie zmniejszają przekrój roboczy elementu. Metody nominalne stosowane są przede wszystkim do wyznaczania orientacyjnych wartości naprężeń w elementach o nieskomplikowanej geometrii poddanych prostym obciążeniom, najczęściej jednoosiowemu rozciąganiu. W przypadku zginania stan naprężenia jest bardziej złożony, jednak metody oparte o wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie także są stosowane. Przy założeniu obciążenia prostym zginaniem stan naprężenia w materiale charakteryzowany jest za pomocą jednego naprężenia normalnego o wartości:

$$\sigma_n = \frac{M_g}{W_x}, \quad (5.1)$$

gdzie W_x oznacza wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie, który z kolei dla pręta o przekroju prostokątnym określony jest wzorem:

$$W_x = \frac{a \cdot h^2}{6}. \quad (5.2)$$

Tak więc wartość naprężeń normalnych w przekroju poprzecznym elementu zależy w sposób odwrotnie proporcjonalny do kwadratu jego wysokości, natomiast w zakresie sprężystym wartość naprężeń podczas zginania zmienia się liniowo wraz ze wzrostem odległości od osi obojętnej przekroju (rys. 5.1)



Rys. 5.1. Stan naprężenia w pręcie prostokątnym poddanym prostemu zginaniu

Maksymalne wartości naprężeń i odkształceń występują na powierzchniach zewnętrznych elementów.

5.2. Fikcyjny promień karbu spawalniczego

Fikcyjny promień karbu jest narzędziem do wyznaczania współczynników koncentracji naprężeń w złączu spawanym. Metoda ta bazuje na założeniu, że za inicjację pęknięcia zmęczeniowego odpowiedzialne jest naprężenie w dnie karbu uśrednione na pewnym odcinku od teoretycznego maksimum. Uśrednianie naprężeń zgodnie z propozycją Neubergera [70, 95, 96, 138] wymaga wprowadzenia dodatkowej stałej materiałowej nazywanej zastępczą długością mikrostrukturalną ρ^* . Określa ona długość odcinka skierowanego normalnie od powierzchni dna karbu w głąb materiału, na której dokonujemy uśrednienia naprężeń.

Metoda promienia fikcyjnego uwzględnia stan naprężenia w obszarze lokalnego maksimum poprzez wprowadzenie współczynnika wieloosiowości obciążenia s , którego wartość zależy od kształtu elementu, rodzaju obciążenia oraz zastosowanego kryterium obliczeniowego, i może być wyrażona liczbą stałą lub w funkcji współczynnika Poissona [50, 136, 163]. Uwzględniając powyższe, wyrażenie na umowny promień w dnie karbu przyjmuje postać:

$$\rho_f = \rho + s \cdot \rho^* . \quad (5.3)$$

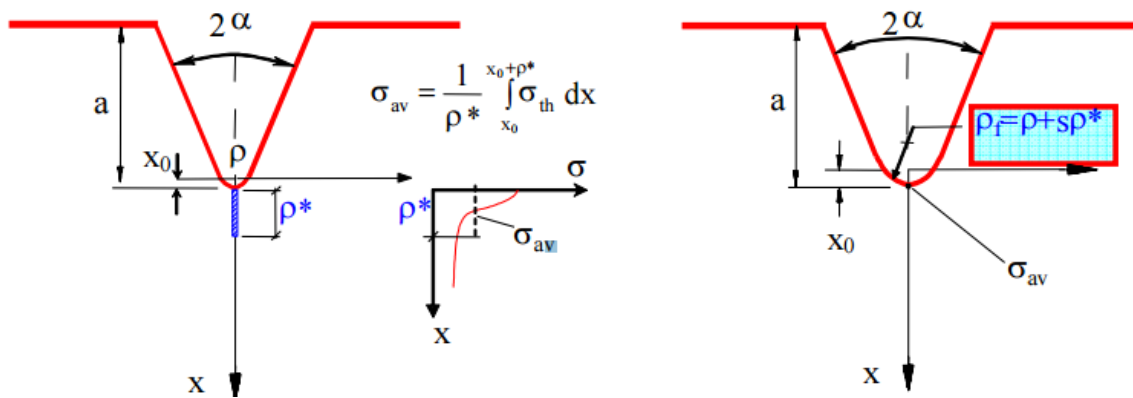
Fikcyjny promień karbu ρ_f zależy od rzeczywistego promienia zaokrąglenia dna karbu ρ , zastępczej długości mikrostrukturalnej ρ^* i współczynnika wieloosiowości obciążenia s , wynikającego z wieloosiowego stanu naprężenia w dnie karbu. W przypadku stalowych połączeń spawanych często zakłada się rzeczywisty promień karbu $\rho = 0$, przez co wyrażenie na umowny promień karbu przyjmuje postać

$$\rho_f = s \rho^* \quad (5.4)$$

W literaturze [152] można znaleźć przykłady wyrażen służących wyznaczeniu zastępczej długości mikrostrukturalnej ρ^* jak chociażby w postaci

$$\rho^* = \frac{\rho}{s} \left[\frac{(K_t - 1)^2}{(K_f - 1)^2} - 1 \right] \quad (5.5)$$

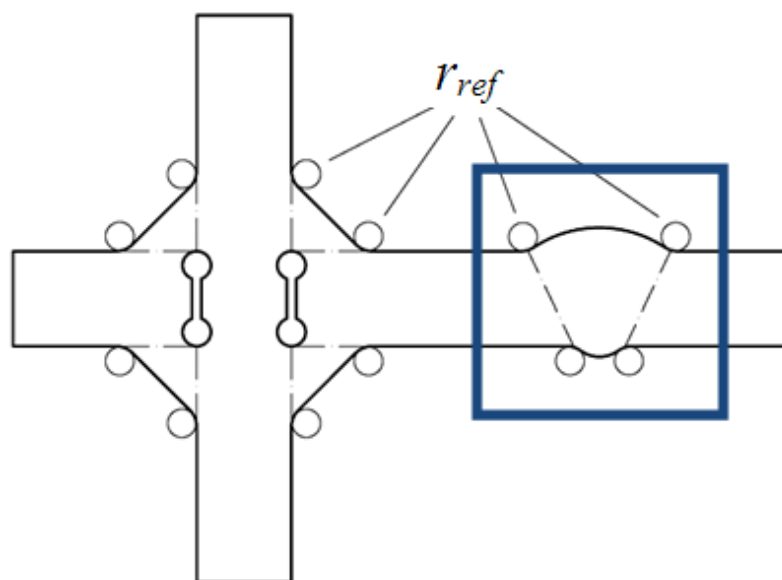
Mając promień karbu, można wyznaczyć współczynnik działania karbu, składowe lokalnego tensora naprężeń i odpowiadające im odkształcenia. Graficznie sposób uśredniania naprężeń przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Uśrednianie naprężeń w dnie karbu przy użyciu promienia fikcyjnego [154]

Zastosowanie metody promienia fikcyjnego powoduje w każdym przypadku zwiększenie promienia karbu, według którego dokonywane są obliczenia w stosunku do promienia rzeczywistego, a więc jego złagodzenie. Według tego podejścia rzeczywiste naprężenia jakim podlega materiał są niższe od wyznaczonych na podstawie geometrii karbu. Można to tłumaczyć faktem, że rzeczywista powierzchnia karbu stanowiąca powierzchnię swobodną materiału, łatwiej ulega odkształceniu niż materiał we wnętrzu objętości elementu. Ponieważ dla danego rodzaju próbki, sposobu obciążenia i kryterium wyznaczania naprężeń zwiększenie promienia w stosunku do promienia rzeczywistego zachodzi zawsze o stałą wartość $s \cdot \rho^*$ niezależnie od rzeczywistego promienia krzywizny dna karbu.

Na potrzeby standaryzacji obliczeń zmęczeniowych elementów spawanych, których rzeczywista geometria jest zróżnicowana i trudna, a czasem wręcz niemożliwa do zmierzenia, dokonano modyfikacji metody polegającej na wprowadzeniu dwóch arbitralnych wartości promienia referencyjnego r_{ref} . Dla grubości ścianek łączonych elementów $t \geq 5 \text{ mm}$ przyjmuje się wartość zastępczego promienia karbu spawalniczego równą 1 mm, natomiast dla mniejszych grubości postuluje się stosowanie promienia zastępczego o wartości $r_{ref} = 0,05 \text{ mm}$. Przyjęcie stałych wartości promienia karbu spawalniczego służy przede wszystkim ograniczaniu wzrostu naprężeń do nieskończoności w przypadku karbów lub niezgodności spawalniczych, których rzeczywisty promień dąży do zera. Promień referencyjny ma zastosowanie wszędzie tam, gdzie trudno lub nie ma możliwości określenia rzeczywistego promienia karbu, czyli np. w miejscu przejścia materiału rodzimego w lico lub grań spoiny (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Miejsca stosowania fikcyjnego promienia karbu do określania geometrycznego współczynnika koncentracji naprężeń. Ramką zaznaczono przypadek rozpatrywany w pracy [156]

W dalszej części pracy posłużono się promieniem referencyjnym do określenia wartości geometrycznego współczynnika działania karbu K_w spoiny doczołowej blach.

5.3. Zalecenia Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa

W zakresie projektowania elementów spawanych poddanych działaniu obciążeń o charakterze zmęczeniowym Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa opracował szereg przepisów i wskazówek, których stosowanie ma zapewnić niezawodną i bezpieczną eksploatację takich elementów. W publikacjach naukowców zrzeszonych wokół Międzynarodowego In-

stytutu Spawalnictwa [37, 99, 100] stan naprężenia w materiale wokół spoiny przedstawiany jest jako wypadkowa kilku składowych, a mianowicie:

- średniego naprężenia w przekroju próbki

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx \quad (5.6)$$

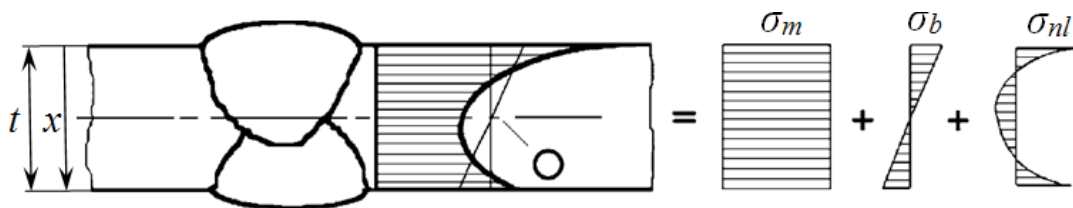
- naprężeń od zginania

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \cdot \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \cdot dx \quad (5.7)$$

- nieliniowej składowej wywołanej m.in. skurczem spawalniczym

$$\sigma_{nl}(x) = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \cdot \sigma_b \quad (5.8)$$

Graficznie w sposób poglądowy składowe stany naprężenia pokazano na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Składowe stany naprężenia w rejonie złącza spawanego według [36]

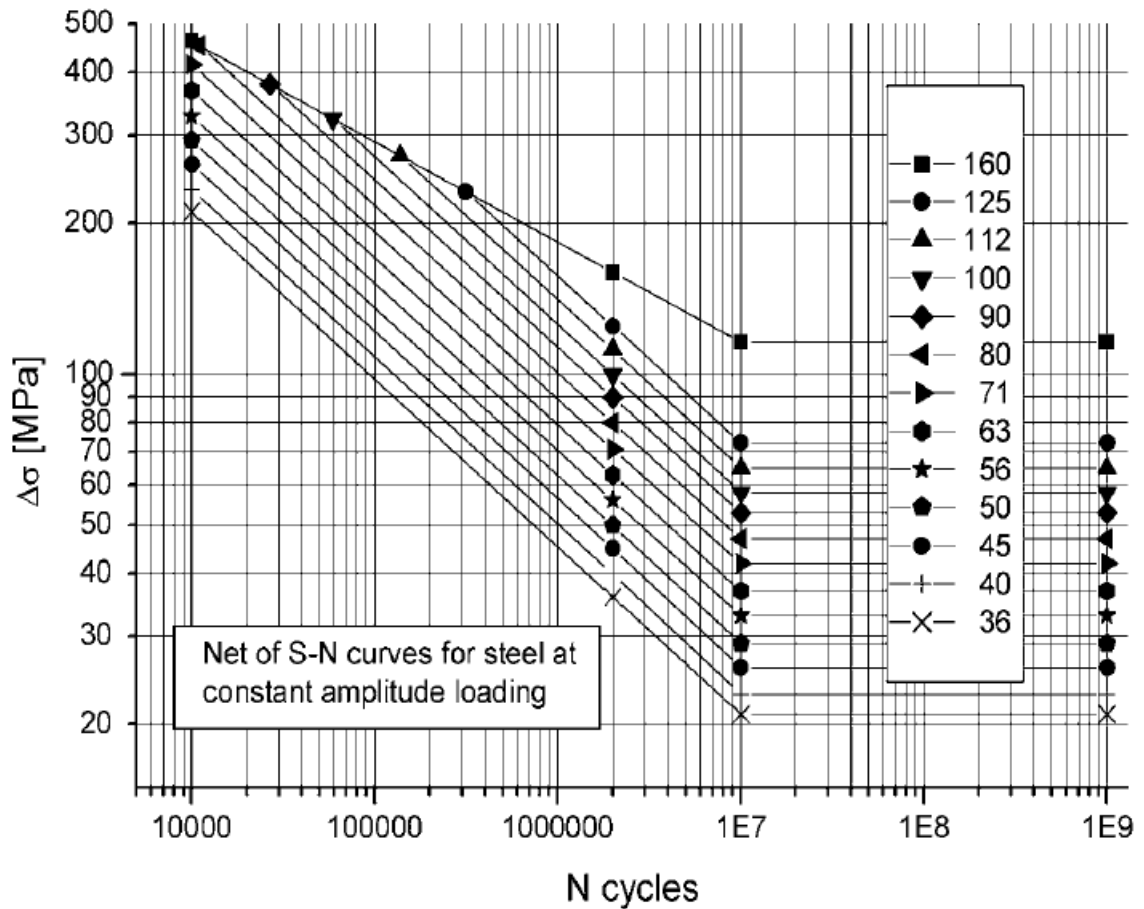
Dopuszczalne zakresy zmiany naprężenia $\Delta\sigma$ przy trwałości zmęczeniowej na poziomie $N_f = 2 \cdot 10^6$ cykli dla znacznej liczby zróżnicowanych często spotykanych w praktyce inżynierskiej detali konstrukcyjnych przedstawiono w postaci klas zmęczeniowych *FAT*. Metoda kategorii zmęczeniowych *FAT* zalecana przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa jest w pewnym sensie metodą porównawczą, bowiem spośród zaprezentowanych przypadków geometrii i obciążenia, dla których wyznaczono *FAT*, należy wybrać taki, który możliwie najprecyzyjniej odzwierciedla rozpatrywany przypadek rzeczywisty (rys. 5.5).



Rys.5.5. Detal zbliżony kształtem i sposobem obciążenia do elementów testowanych zmęczeniowo w dalszej części pracy [36]

Wartości naprężeń w materiale należy wyznaczyć poprzez symulacje z wykorzystaniem *MES* lub dokonując pomiarów tensometrycznych na obiekcie. Jedynie w niektórych przy-

padkach dopuszczalne jest bazowanie na naprężeniach nominalnych. Przykład charakterystyk $S - N$ oraz towarzyszących im kategorii FAT dla połączeń spawanych w zakresie średniej i wysokiej liczby cykli przedstawiono na rys. 5.6.



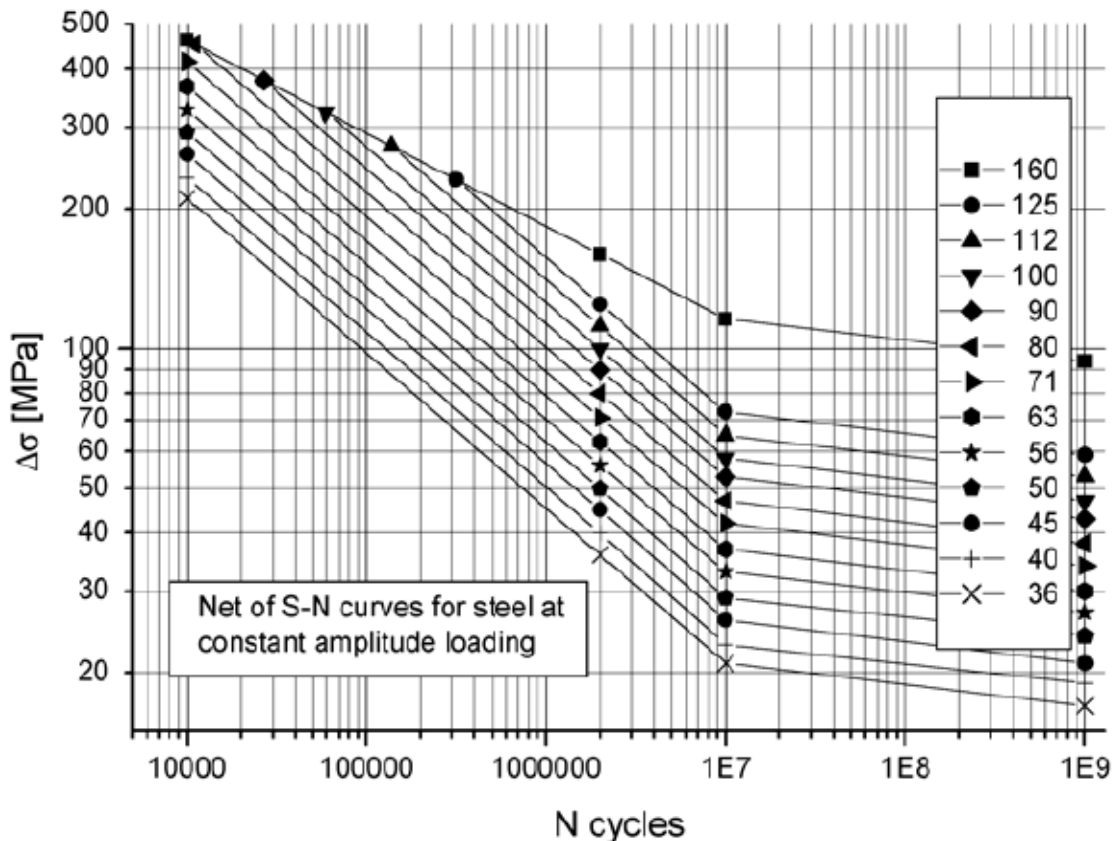
Rys. 5.6. Kategorie zmęczeniowe FAT dla połączeń spawanych stali w zakresie średniej i wysokiej liczby cykli przy obciążeniach normalnych stało amplitudowych [36]

Krzywe zmęczeniowe powstały na podstawie badań eksperymentalnych i uwzględniają takie czynniki jak:

- koncentracja naprężeń spowodowana kształtem detalu konstrukcyjnego
- lokalna koncentracja naprężeń wywołana kształtem spoiny
- obecność niezgodności spawalniczych
- kierunek działania obciążenia
- wysoki poziom naprężeń własnych
- warunki metalurgiczne
- metody badań NDT (o ile wyspecyfikowano)
- obróbkę cieplną po spawaniu.

W zakresie ograniczonej trwałości zmęczeniowej charakterystyki *FAT* dla elementów obliczanych na podstawie naprężeń normalnych mają stały współczynnik kierunkowy $m = 3$, natomiast punkt załamania krzywych przyjęto na poziomie liczby cykli $N_f = 10^7$.

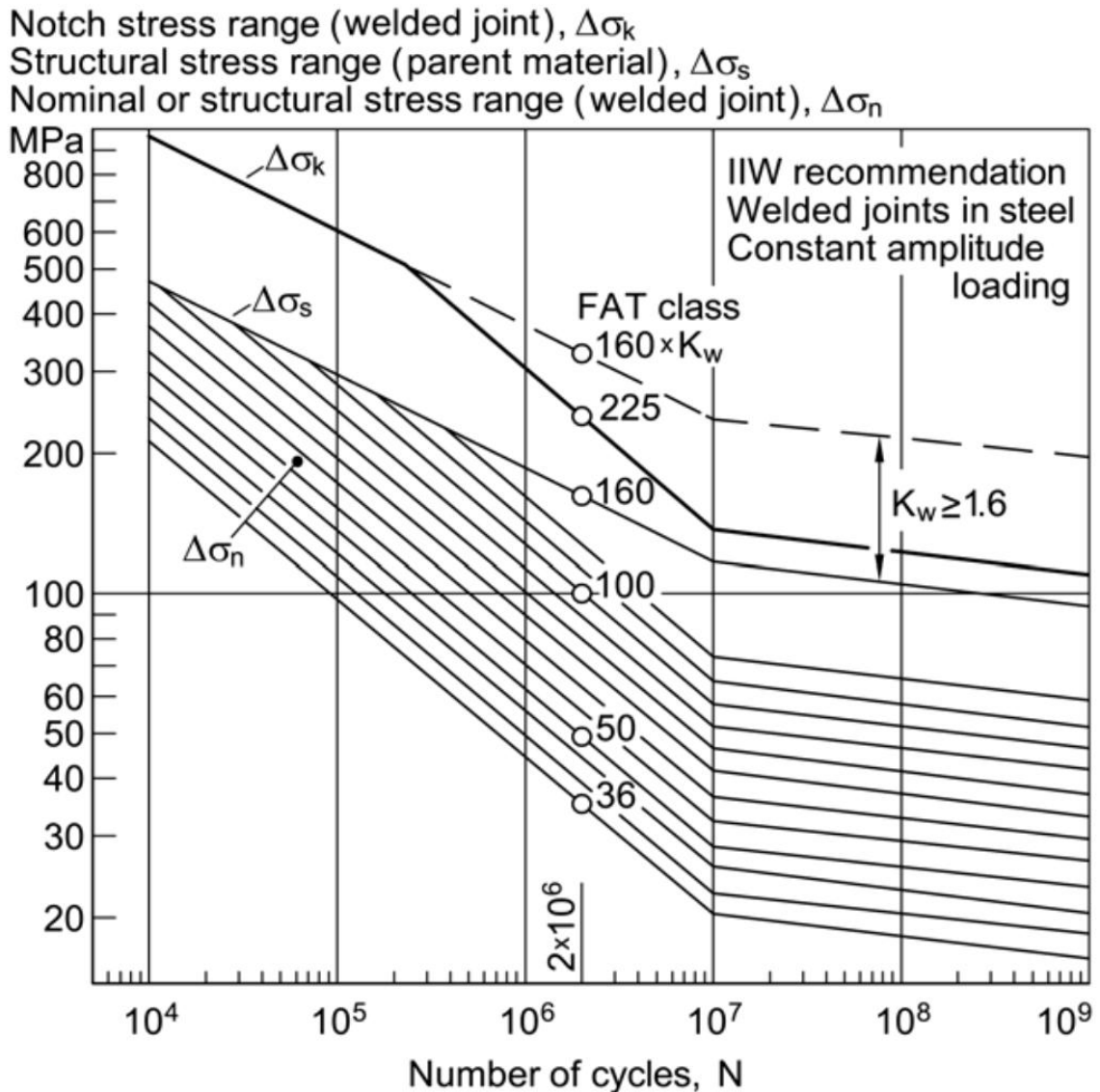
Dla elementów podlegających działaniu obciążeń zmęczeniowych w zakresie giga cykli przedstawiono osobny zbiór krzywych, uwzględniający rzeczywisty spadek wytrzymałości zmęczeniowej dla $N_f > 10^7$ cykli, jak widać na rysunku 5.7.



Rys. 5.7. Zbiór kategorii zmęczeniowych *FAT* dla połączeń spawanych stali obliczanych na podstawie naprężeń normalnych w zakresie giga cykli [36]

Uwzględniając wyniki współczesnych badań negujące istnienie granicy zmęczenia w tradycyjnym rozumieniu, założono spadek dopuszczalnego zakresu naprężeń o 10% dla każdego kolejnego pomnożenia liczby cykli przez 10. Współczynnik kierunkowy tej części krzywej zmęczeniowej wynosi $m = 22$.

W 2010 roku *IIW* zaktualizował swoje wytyczne odnośnie wyznaczania naprężeń dla celów obliczeń zmęczeniowych połączeń spawanych stali, podał rekomendacje dla karbów o łagodnych przejściach oraz zalecane zakresy projektowe dla naprężeń nominalnych oraz w obrębie karbu (rys. 5.8)



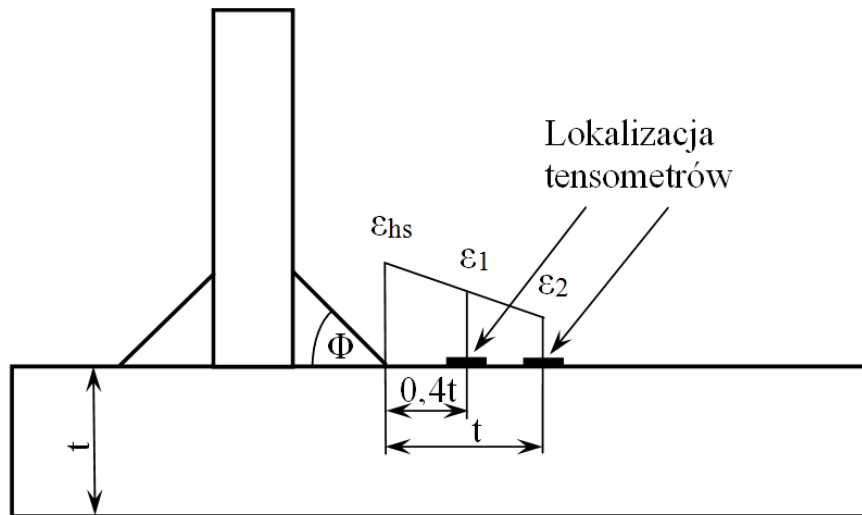
Rys 5.8. Zalecenia IIW odnośnie projektowania elementów z karbem łagodnym [27]

Jedyny sposób w jaki uwzględniono wpływ materiału podstawowego na trwałość połączeń spawanych w pracach IIW polega na opracowaniu odrębnego zestawu kategorii *FAT* dla połączeń spawanych stopów aluminium, których przebieg można odnaleźć w pracy [36].

5.3.1. Metoda „hot spot”

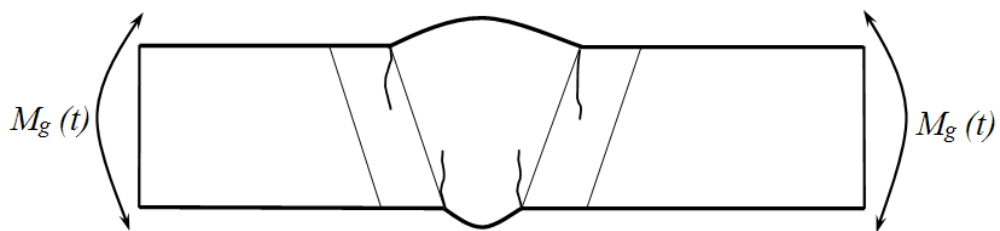
Metoda wyznaczania naprężeń w obszarze karbu w oparciu o pomiary rzeczywistych odkształceń powierzchniowych w lokalizacjach położonych w określonej odległości od miejsca występowania ich ekstremum nosi nazwę metody „hot spot” lub w tłumaczeniu na język polski, metody „gorącego punktu”. Lokalizacje takich gorących punktów ustala się na podstawie lokalizacji uszkodzeń w elementach i konstrukcjach albo na drodze symulacji komputerowych.

Pomiary tensometryczne maksymalnych odkształceń w miejscu ich faktycznego występowania są często utrudnione lub wręcz uniemożliwione z powodu nagłego charakteru przejścia materiału rodzimego w lico spoiny, dlatego w metodzie „hot spot” naprężenie i odkształcenie są wyznaczone na podstawie pomiarów prowadzonych w pewnej odległości od newralgicznego punktu, zgodnie z rys 5.9.



Rys. 5.9. Przykładowy schemat pomiaru odkształceń w metodzie „hot spot”

Metoda ta wymaga przeprowadzenia pomiarów tensometrycznych na obiekcie lub wykonania obliczeń numerycznych w celu identyfikacji wartości naprężeń wokół karbu spawalniczego. Do inicjacji pęknięć zmęczeniowych w połączeniach spawanych podlegających działaniu zmiennych obciążeń dochodzi najczęściej pomiędzy materiałem spoiny po stronie lica lub grani spoiny a materiałem rodzimym (rys.5.10).



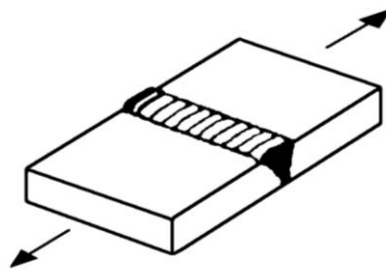
Rys. 5.10 Miejsca inicjacji i kierunki propagacji pęknięć zmęczeniowych połączeń spawanych poddanych działaniu wahadłowo zmiennego momentu zginającego

5.3.2. Jakość połączeń spawanych

Jakość połączeń spawanych odgrywa szczególną rolę w przypadku elementów obciążonych cyklicznie [28, 40, 145]. Większość niezgodności spawalniczych istotnie obniża przekrój czynny spoiny, a dodatkowo niektóre z nich, jak przyklejenia, braki przetopu, czy

ostre podtopienia stanowią koncentraty naprężeń najgroźniejszego typu, kształtem zbliżone do pęknięć.

Z tego powodu technologie oraz proces wykonywania połączeń spawanych szczególnie w przypadku odpowiedzialnych elementów są ściśle nadzorowane, a spoiny poddawane wielostopniowym badaniom jakości. Podstawowy podział wyróżnia badania niszczące (z angielskiego: *destructive testing*, w skrócie DT) oraz nieniszczące (NDT – *non destructive testing*). Znaczenie kontroli jakości w spawalnictwie przedstawiono na przykładzie blachy z jednostronną spoiną doczołową typu V, poddaną działaniu jednoosiowego stanu naprężenia (rys. 5.11)



Rys. 5.11. Element spawany poddany rozciąganiu w kierunku poprzecznym do osi spoiny

Według zaleceń zawartych w pracy [36] trwałość zmęczeniowa takiego elementu może być wyznaczana na podstawie naprężeń nominalnych w przekroju poprzecznym. Jednakże dla spoin, których grań (pierwszy ścieg spoiny – miejsce występowania najwyższego gradientu temperatur oraz największych różnic składu chemicznego) przebadano za pomocą badań nieniszczących przypisano $FAT = 71 \text{ MPa}$, natomiast spoinom nie podlegającym badaniu jedynie $FAT = 36 \text{ MPa}$.

5.4. Podsumowanie przeglądu literatury

W dostępnej literaturze stosunkowo niewiele jest pozycji traktujących o trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych różnych materiałów, a w szczególności poddanych wahadłowemu zginaniu. Zalecenia Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa (*IIW*) z inżynierskiego punktu widzenia ułatwiają projektowanie struktur zawierających połączenia spawane podlegające obciążeniom cyklicznym, jednak przyjęte założenia mają bardzo ogólny charakter. Powstające w wyniku spawania naprężenia własne niwelują efekty stosowania bardziej wytrzymałych gatunków stali, jednak zupełne pominięcie wpływu materiału rodzimego na trwałość zmęczeniową połączeń spawanych jest założeniem co najmniej dyskusyjnym i wymagającym lepszego poznania. Przy opracowywaniu tych zaleceń dla stali założono absolutny brak wpływu rodzaju i właściwości materiału rodzimego na trwałość

zmęczeniową połączeń spawanych. Dokonano jedynie rozróżnienia na połączenia spawane stali oraz stopów aluminium. W licznych publikacjach wykazano natomiast, że złącza spawane w różnym stopniu wpływają na trwałość zmęczeniową. Większość opracowań dotyczy jednak połączeń spawanych jednoimiennych, bardzo nieliczne prace podnoszą problem trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych różnych gatunków stali. W praktyce inżynierskiej racjonalne wykorzystanie materiałów bardzo często generuje konieczność wykonywania takich połączeń, jak we wspomnianych wcześniej zmechanizowanych obudowach górniczych [133]. Ponadto nie spotkano w literaturze próby oceny wpływu rozdrobnienia struktury, udziału objętościowego wybranych faz oraz ich rozmieszczenia na trwałość zmęczeniową materiałów stalowych podlegających cyklicznemu zginaniu. Ze względu na wysoką specjalizację prowadzonych badań, zauważono w literaturze niedostatek opracowań ujmujących w szerszym aspekcie koincydencje parametrów budowy wewnętrznej materiałów oraz ich właściwości wytrzymałościowych przy obciążeniach cyklicznych.

6. Cel i zakres pracy

Nadrzędnym celem pracy była identyfikacja i analiza właściwości wytrzymałościowych wybranych gatunków stali oraz ich jednoimiennych i różnoimiennych połączeń spawanych poddanych obciążeniu zginaniem wahadłowym. Badania prowadzono pod kątem weryfikacji wpływu właściwości wytrzymałościowych materiałów podstawowych na trwałość ich połączeń spawanych, który według obecnie obowiązujących wytycznych projektowo – konstrukcyjnych uznawany jest za nieistotny, podobnie jak kwestia oceny trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych różnych materiałów. Wiele spawanych elementów maszyn i konstrukcji podlegających obciążeniom cyklicznym, jak obudowy górnicze, wysięgniki dźwigów, czy konstrukcje przesiewaczy powstaje w wyniku połączenia różnych materiałów wyjściowych. W takim przypadku złącze spawane składa się z trzech materiałów zróżnicowanych zarówno pod względem struktury, składu chemicznego jak i właściwości wytrzymałościowych. Przeprowadzono badania eksperymentalne takich spoin oraz dokonano analizy wyników w stosunku do połączeń jednorodnych.

Drugoplanowym celem pracy stanowiła ocena wpływu wybranych aspektów struktury i budowy wewnętrznej analizowanych materiałów na przebieg ich charakterystyk zmęczeniowych typu *S-N*.

Zakres pracy obejmuje charakterystykę materiałów użytych do badań. Informacje uzyskane z atestów materiałowych zostały częściowo zweryfikowane i uzupełnione poprzez przeprowadzenie statycznej próby rozciągania oraz pomiary twardości. Przygotowano zglądy metalograficzne, których obserwacja dostarczyła informacji odnośnie udziału objętościowego składników struktury oraz wielkości ziarna ferrytu w strukturze każdej stali. Następnie przygotowano złącza spawane blach we wszystkich konfiguracjach materiałowych, zarówno jednoimiennych jak i różnoimiennych. Spoiny poddano kontroli jakości metodami badań nieniszczących takich jak badania wizualne, penetracyjne i radiograficzne oraz wykonano zglądy metalograficzne do obserwacji makro i mikrostruktury złączy. Powierzchnia zglądów posłużyła do przeprowadzenia pomiarów twardości sposobem Vickersa poszczególnych stref połączenia. Kolejny etap pracy obejmował dobór kształtu i przygotowanie elementów próbnych do przeprowadzenia testów zmęczeniowych na stanowisku *MZGS-100* przy obciążeniu zginaniem wahadłowym. Rozmiary próbek dobrano w taki sposób, aby badania zmęczeniowe obejmowały pełną wysokość materiału wyjściowego (grubość blachy), a jednocześnie pozwalały uzyskać odpowiedni poziom naprężeń w prze-

kroju poprzecznym przy uwzględnieniu ograniczeń stanowiska badawczego. Korzystając z narzędzi *MES* przyjęto dwa rodzaje geometrii elementów próbnych: jeden dla materiałów podstawowych bez spoiny oraz drugi dla elementów próbnych zawierających karb spawalniczy. Badania zmęczeniowe prowadzono przy obciążeniu o przebiegu sinusoidalnym, stałej wartości amplitudy momentu zginającego oraz współczynnika asymetrii cyklu wynoszącym $R = -1$. Dyskretne wyniki testów posłużyły do sporządzenia zlinearyzowanych charakterystyk zmęczeniowych typu $S-N$ przedstawionych w podwójnie logarytmicznym układzie odniesienia. W ramach analizy statystycznej przeprowadzonej zgodnie z zaleceniami *ASTM* wyznaczono pasma rozrzutu oraz przedziały ufności parametrów charakterystyk zmęczeniowych wyników dla przyjętego poziomu prawdopodobieństwa.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych poczyniono spostrzeżenia oraz sformułowano wnioski, które zamieszczono w rozdziale 9.

7. Materiały podstawowe i połączenia spawane

W niniejszym rozdziale scharakteryzowano materiały użyte do wykonania elementów próbnych, ich właściwości wytrzymałościowe statyczne oraz przedstawiono wyniki badań metalograficznych i pomiarów twardości.

7.1. Materiały wykorzystane do badań

Do wykonania elementów próbnych użyto trzech gatunków stalowych blach gorącowalcowanych o grubości $t = 12 \text{ mm}$, oznaczonych według [114, 115] jako S235JR, S355J2+N oraz P460NH. Inne spotykane oznaczenia wymienionych gatunków stali przedstawiono w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Inne oznaczenia badanych gatunków stali

Odpowiedniki badanych stali według różnych oznaczeń			
PN-EN10025-2 PN-EN 10028-3	PN-EN 10027-2	Numer stali	DIN
S235JR	St3S	1.0038	RSt37-2
S355J2+N	18G2A	1.0577	St52-3
P460NH	-	1.8935	WStE460

Stal S235JR określana jest jako spawalna stal konstrukcyjna zwykłej jakości, o wymaganej minimalnej granicy plastyczności $Re \geq 235 \text{ MPa}$. Gatunek S355J2+N jest to spawalna stal konstrukcyjna wyższej jakości, normalizowana, o wymaganej granicy plastyczności $Re \geq 355 \text{ MPa}$, natomiast P460NH to spawalna stal drobnoziarnista przeznaczona na urządzenia ciśnieniowe, normalizowana o granicy plastyczności $Re \geq 460 \text{ MPa}$. Wszystkie elementy próbne w ramach gatunku wykonane zostały z materiału pochodzącego z jednego wytopu.

Są to niskowęglowe stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, których skład chemiczny przedstawiono w tabeli 7.2.

Tab.7.2. Skład chemiczny badanych stali (reszta Fe).

Stal	Udział masowy wybranych pierwiastków na podstawie analizy wytopu w [%]													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	N	Ti	V	Nb
S235	0,14	0,72	0,22	0,01	0,011	0,02	0,02	0,05	0,047	0,002	0,005	0,001	0,002	0,002
S355	0,17	1,46	0,27	0,016	0,008	0,02	0,01	0,02	0,053	0,001	0,004	0,002	0,003	0,011
P460	0,2	1,69	0,473	0,015	0,01	0,038	0,019	0,013	0,018	0,004	0,025	0,001	0,112	0,002

Zawartość metalurgicznie czystego żelaza Fe wynosiła w strukturze każdej ze stali odpowiednio: 98,75%, 97,95% oraz 97,38%.

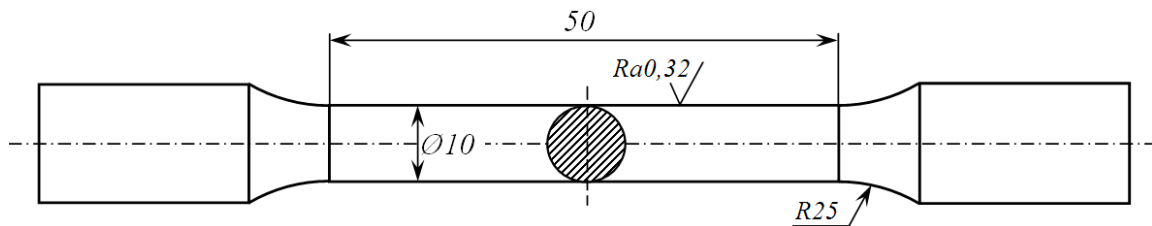
W tabeli 7.3. zestawiono odczytane z atestów niektóre właściwości wytrzymałościowe oraz wyniki pomiarów twardości badanych wyrobów hutniczych. Wartości znacznie przewyższają wymagania norm. Najwyższe wartości wydłużenia przy zerwaniu odnotowano dla stali S355.

Tab. 7.3. Właściwości wytrzymałościowe analizowanych stali według atestów materiałowych

Stal	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	R _e /R _m	Twardość
S235	291	424,5	30	0,69	132
S355	391	516	33	0,76	160
P460	616,5	717	24,6	0,86	212

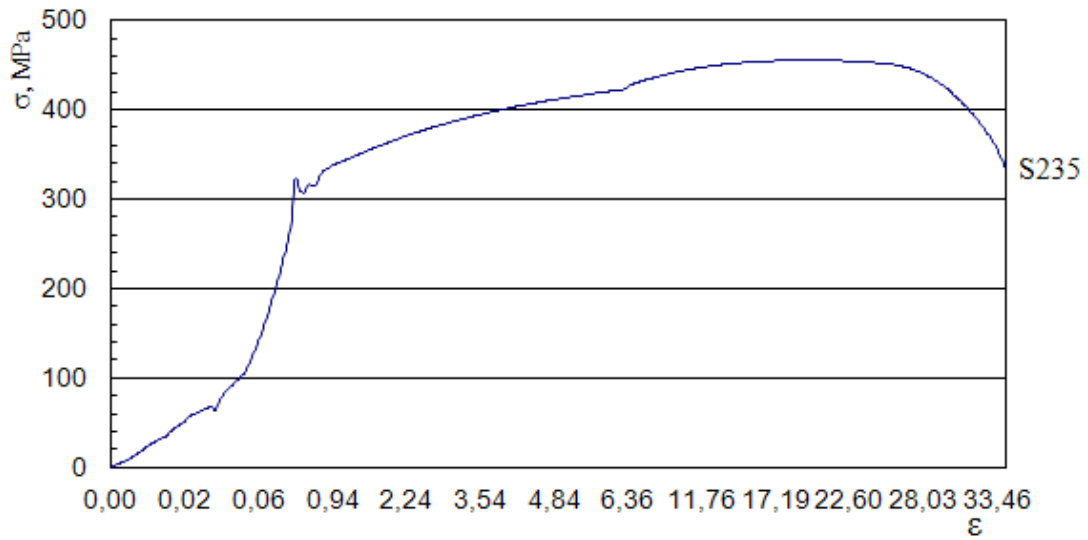
Pod względem twardości materiały zachowywały się podobnie jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie. Najniższe wartości wykazała stal S235, około 20÷25% wyższe stal S355, natomiast twardość stali P460 przewyższała wyniki dla S235 o ok. 50-60%.

Z uwagi na znacznie zawyżone względem wymagań norm wartości wytrzymałościowe, dokonano ich weryfikacji przeprowadzając próbę statycznego rozciągania na elementach gabarytowo zbliżonych do próbek badanych zmęczeniowo. W tym celu wykonano próbki pięciokrotne [128] o przekroju okrągłym, którego średnica wynosiła 10 mm. Elementy zostały pobrane w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku walcowania blach na drodze obróbki skrawaniem oraz szlifowania dokładnego. Na kolejnym rysunku (Rys. 7.2) przedstawiono krzywe $\sigma - \varepsilon$ dla statycznego rozciągania każdego materiału. Badania przeprowadzono na próbkach pięciokrotnych, o kołowym przekroju części pomiarowej. Ich kształt zobrazowano na rys. 7.1.

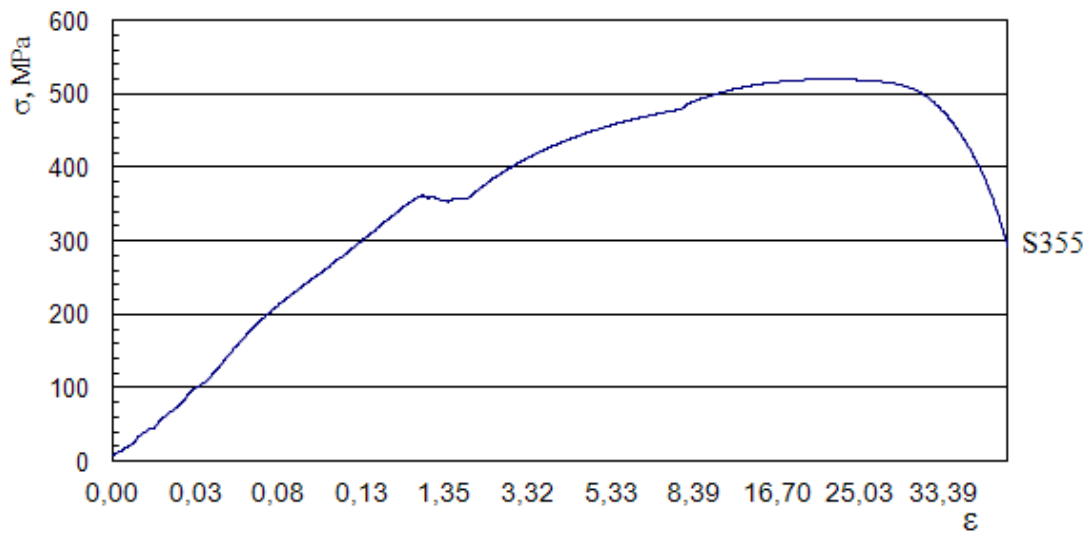


Rys. 7.1. Kształt próbek użytych do statycznej próby rozciągania

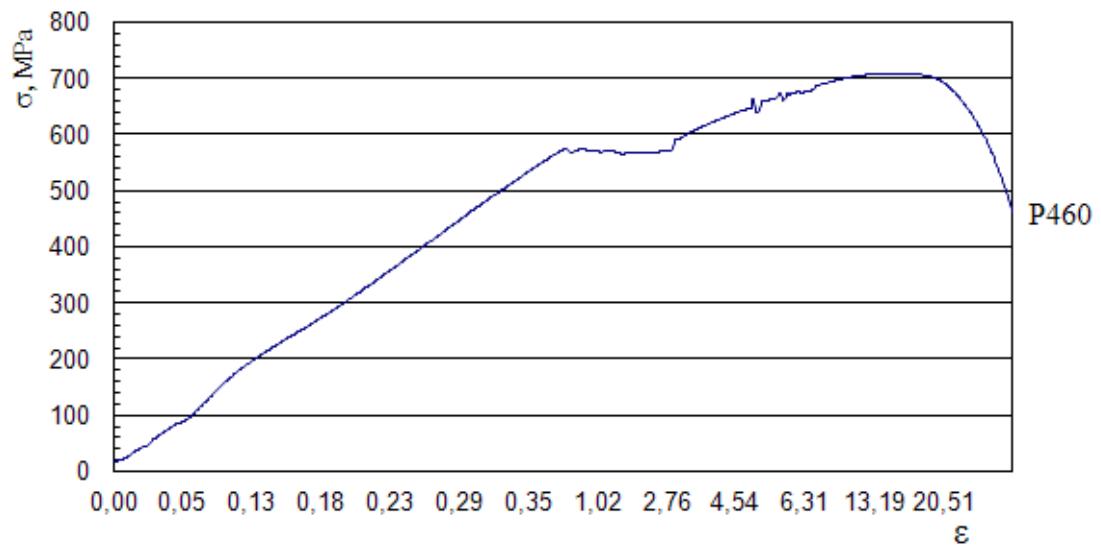
Przeprowadzenie statycznej próby rozciągania pozwoliło zweryfikować dane z atestów materiałowych, natomiast wykreślenie krzywych $\sigma - \varepsilon$ pozwoliło poznać charakter odpowiedzi materiału na działanie obciążeń. Na rysunkach 7.2 ÷ 7.4 przedstawiono krzywe statycznego rozciągania poszczególnych materiałów.



Rys. 7.2. Wykres statycznej próby rozciągania stali S235



Rys. 7.3. Wykres statycznej próby rozciągania stali S355



Rys. 7.4. Wykres statycznej próby rozciągania stali P460

Materiały o wyższej wytrzymałości cechowały się zblizoną do liniowej zależnością naprężeń i odkształceń poniżej granicy plastyczności, natomiast stal S235 wykazywała cechy progresywnego umocnienia dla naprężeń niższych od progu plastycznego płynięcia. Ponieważ są to krzywe o charakterze inżynierskim, dają one relatywnie dokładne wyniki w zakresie odkształceń sprężystych, natomiast wraz z pojawieniem się odkształceń plastycznych następuje przewężenie przekroju elementu, co przy rosnącej sile wymuszenia skutkuje znaczącym wzrostem naprężeń rzeczywistych w stosunku do wskazanych na wykresie. Po zerwaniu dokonano pomiarów średnic elementów próbnych w dwóch prostopadłych płaszczyznach w celu ustalenia stopnia przewężenia przekroju próbki. Wyniki zestawiono w tabeli 7.3.

Tab. 7.3. Właściwości wytrzymałościowe analizowanych stali wyznaczone eksperymentalnie

Stal	R_{el} , MPa	R_{ch} , MPa	$R_{p0,2rz}$, MPa	R_{mz} , MPa	A_k/A_p , %
S235	308	320	317	456	34,9
S355	349	362	360	520	22,8
P460	565	582	575	711	32,1

Zakładając, że w momencie zerwania próbki całe obciążenie przenoszone jest przez zmniejszony w wyniku plastycznego płynięcia przekrój oraz znając wartość siły w momencie zerwania, dla przypadku jednoosiowego rozciągania można z dobrym przybliżeniem oszacować naprężenia rzeczywiste powodujące powstanie przelomu doraźnego. Wyniki pomiaru średnic w kierunkach prostopadłych w miejscach najsilniejszego przewężenia oraz wartości naprężenia w chwili zerwania próbek przedstawiono w tabeli 7.4.

Tab. 7.4. Przewężenie przekroju i naprężenia nominalne w próbkach w momencie zerwania

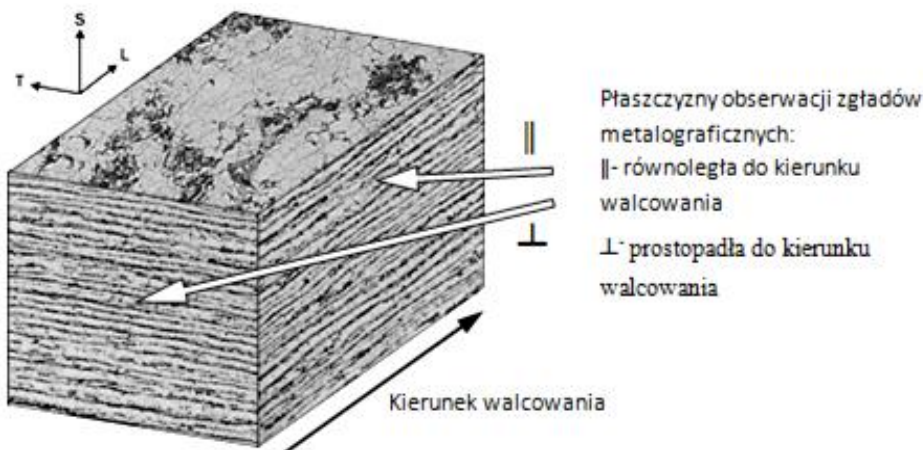
Materiał	Wartości średnie dla 3 próbek z każdego materiału		
	d_1 , mm	d_2 , mm	σ_{zerw} , MPa
S235	5,88	5,93	973,1
S355	4,79	4,76	1292,8
P460	5,66	5,68	1480,1

Naprężenia nominalne w przekrojach próbek wyznaczone z uwzględnieniem przewężenia w miejscu powstania szyjki są znacznie wyższe w stosunku do wartości odczytywanych z klasycznych krzywych statycznego rozciągania.

7.2. Badania metalograficzne materiałów podstawowych

Przeprowadzono badania metalograficzne analizowanych stali zgodnie ze wskazówkami zawartymi w pracach [80, 81]. Zgłady przygotowano na drodze obróbki skrawaniem zarówno w przekroju prostopadłym jak i równoległym do kierunku walcowania, co przed-

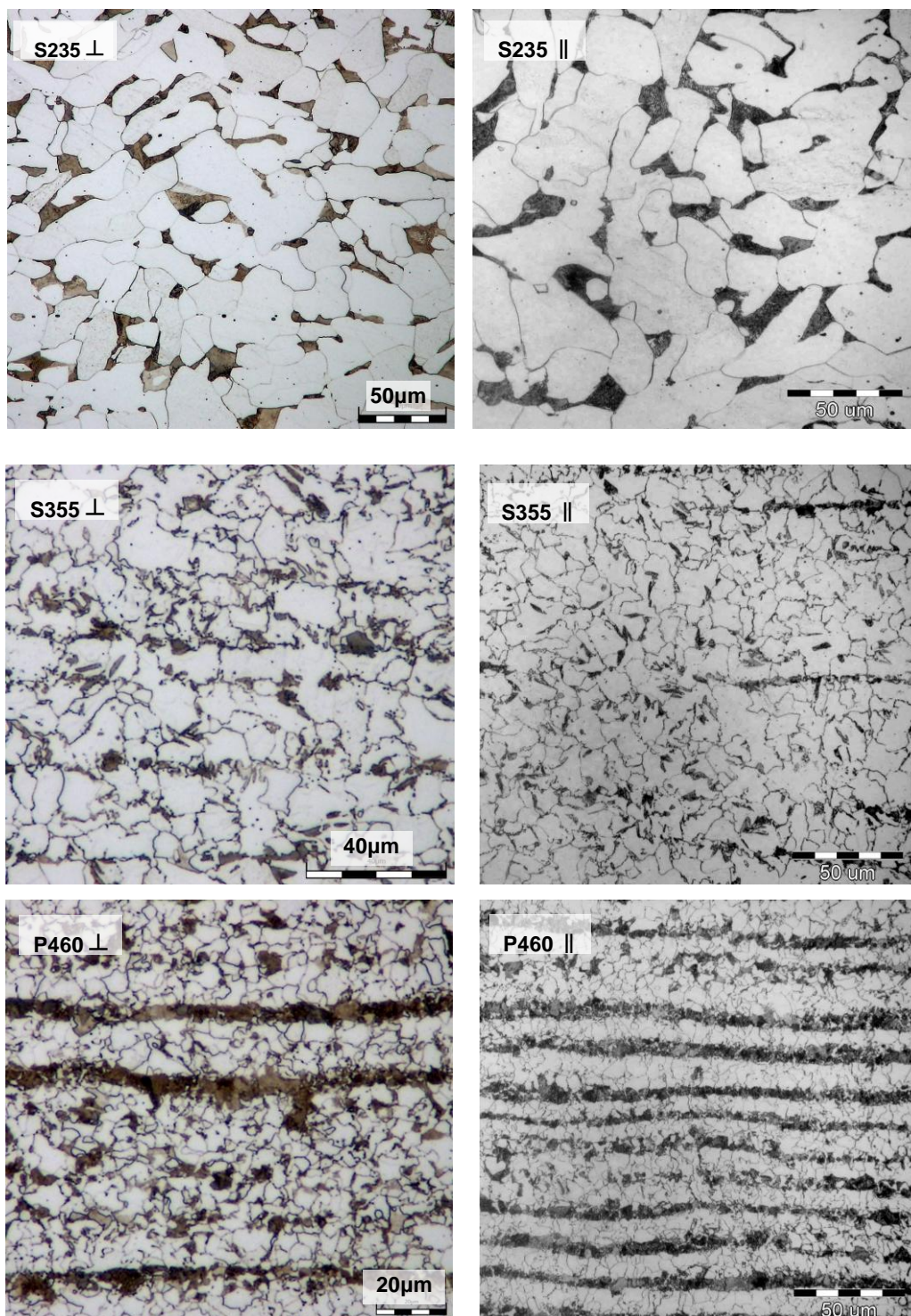
stawiono na rys. 7.5. Ortogonalne usytuowanie płaszczyzn obserwacji miało na celu sprawdzenie wpływu procesu wytwarzania badanych wyrobów hutniczych na występowanie różnic w budowie wewnętrznej materiałów. Ponadto mikroskopowe badania metalograficzne służą wykrywaniu niezgodności budowy wewnętrznej materiałów, takich jak wtrącenia, zawalcowania, segregacje itp.



Rys. 7.5. Orientacja płaszczyzn zglądów metalograficznych względem kierunku walcowania [49]

Przygotowanie powierzchni zglądów metalograficznych do obserwacji mikroskopowych obejmowało szlifowanie dokładne na papierach ściernych o malejącym ziarnie, a następnie polerowanie z użyciem zawiesiny tlenku glinu. Wypolerowana powierzchnia podlegała trawieniu przez zanurzenie na kilka sekund w dwuprocentowym roztworze kwasu azotowego w etanolu, tzw. nitalu. Obserwacja zglądów metalograficznych dostarczyła informacji odnośnie budowy wewnętrznej analizowanych materiałów. Na podstawie serii obrazów nie stwierdzono znaczących różnic ze względu na położenie płaszczyzny obserwacji względem kierunku walcowania materiału. Strukturę stali S235 charakteryzują duże ziarna ferrytu o cienkich, łagodnie przebiegających granicach oraz zwarte, względnie równomiernie rozłożone skupiska perlitu. W strukturze stali S355 można zaobserwować znaczne rozdrobnienie ziarna w stosunku do stali S235. Granice ziarna ferrytu jak i perlitu mają bardziej złożony przebieg, o wielu załamaniach i ostrych kątach. Można zaobserwować śladową pasmowość w ułożeniu perlitu. Struktura stali P460 cechuje się jeszcze bardziej rozdrobnionym ziarnem, wyraźną pasmowością w obydwu płaszczyznach obserwacji, a więc warstwowością ułożenia ferrytu i perlitu.

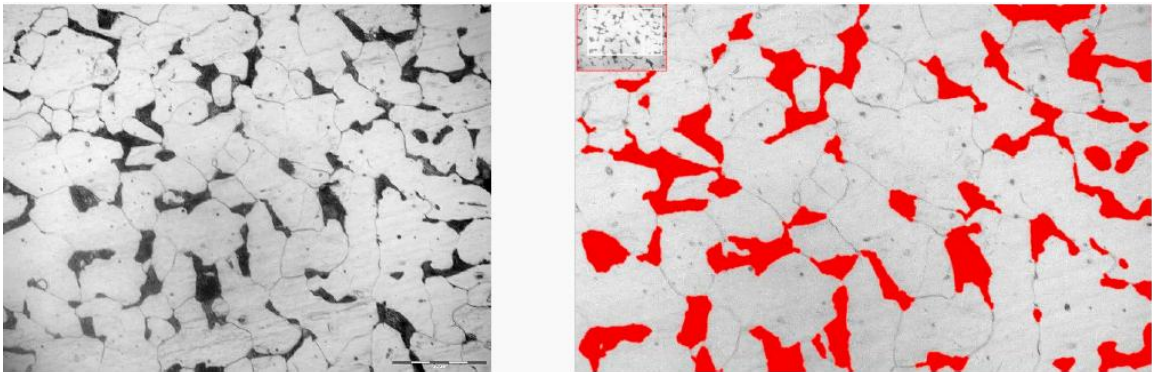
Na rys. 7.6 przedstawiono przykładowe obrazy struktur obserwowanych pod mikroskopem optycznym.



Rys. 7.6. Przykładowe obrazy struktur badanych materiałów

Obserwacje mikrostruktury uzupełniono o elementy metalografii ilościowej. Korzystając z reguły Cavalieriego-Hackuert'a, traktującej bryłę materiału jako złożenie nieskończonej liczby równoległych płaszczyzn, oszacowano udział objętościowy składników struktury na podstawie obserwacji powierzchni zglądów metalograficznych [143]. Na fotografiach struktury w odpowiednim powiększeniu za pomocą oprogramowania do cyfro-

wej analizy obrazu (rys. 7.7), dokonano pomiarów udziału ferrytu i perlitu w strukturze każdej ze stali.



Rys. 7.7. Szacowanie udziału objętościowego składników struktury na podstawie jej obrazu płaskiego na przykładzie stali S235

Obserwacje przeprowadzono dla serii 10 obrazów mikrostruktury każdego materiału. Warunki brzegowe obserwacji ustawiono w taki sposób, aby obszary zaciemnione mniejsze od pewnej określonej wielkości granicznej (np. wtrącenia, zanieczyszczenia itp.) nie były zaliczane do perlitu. Jednak użyte oprogramowanie nie uwzględniało granic ziaren, których udział także ulega zmianie wraz z rozdrobnieniem struktury materiału, a odrzucane przez warunki brzegowe obiekty zaliczane były do ferrytu, gdyż jego udział określano odejmując ilość perlitu od całości. Z tego powodu w celu weryfikacji uzyskanych wyników, zlecono wykonanie badań porównawczych w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach [42]. Średnie zmierzone wartości udziału objętościowego ferrytu i perlitu w każdej ze stali zebrano w tabeli 7.5.

Tab. 7.5. Udział objętościowy składników struktury

Stal	Średni udział objętościowy [%]			
	Badania własne		Badania IMŻ	
	Ferryt	Perlit	Ferryt	Perlit
S235	84,3	15,7	84,7	13,4
S355	70,4	29,6	71	26,9
P460	62,1	37,9	56,9	40

Wyniki badań autorskich i zleconych wykazały wysoką zgodność, jedynie w przypadku określania udziału ferrytu w strukturze stali P460 różnica oszacowania nieznacznie przekroczyła 5%. Zważywszy, że do analizy w IMŻ przesłano zglądy pobrane z innych miejsc badanych blach, strukturę każdego z materiałów można uznać za jednorodną pod względem rozmieszczenia ferrytu i perlitu.

Ponadto w ramach współpracy z *IMŻ* dokonano oszacowania wielkości ziarna ferrytu w strukturze analizowanych materiałów. Pomiarów dokonano z wykorzystaniem oprogramowania Metilo dla serii 10 fotografii danej struktury. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 7.6.

Tab. 7.6. Rozdrobnienie struktury badanych stali.

Materiał	Średnica ziarna ferrytu [μm]			
	Minimalna	Maksymalna	Średnia	Wskaźnik zmienności
S235	1,38	124,83	22,96	71,58
S355	0,67	38,32	6,97	72,92
P460	0,67	21,01	4,54	60,12

Należy zwrócić uwagę na ograniczenie stosowalności pojęcia średniej średnicy ziarna ze względu na duży rozrzut rejestrowanych wartości, potwierdzony wysokimi wartościami wskaźnika zmienności. Ponadto z powodu możliwości przecięcia płaszczyzną zglądu peryferyjnych obszarów ziarna o orientacji dalekiej od płaszczyzny jego największego przekroju poprzecznego, należy ostrożnie interpretować uzyskane wartości najniższe i średnie. Najbardziej reprezentatywne w tym przypadku są wartości maksymalne, ponieważ nie ma możliwości zaobserwowania przekroju ziarna większego od faktycznie istniejącego.

7.3. Połączenia spawane

Podczas wykonywania połączeń spawanych podjęto wysiłki mające na celu zminimalizowanie oddziaływania czynnika ludzkiego na ich właściwości, a przez to uzyskanie jak najwyższej porównywalności wyników. Prace spawalnicze prowadzone były przez doświadczonego instruktora spawania z wykorzystaniem atestowanych urządzeń w zamkniętym pomieszczeniu zapewniającym ochronę przed niekorzystnym wpływem warunków atmosferycznych (wilgoć, wiatr itp.).

7.3.1. Materiały dodatkowe do spawania

Dobór materiałów dodatkowych do spawania uzależniony jest od gatunku materiału wyjściowego [123]. Powinien się on charakteryzować składem chemicznym zbliżonym do materiału rodzimego oraz wytrzymałością przewyższającą słabszy z materiałów podstawowych. Do wykonania połączeń próbných użyto materiałów dodatkowych firmy Böhler oznaczonych jako *FOX EV 50* oraz *FOX EV 65* zalecanych przez producenta do tych gatunków stali. Ich skład chemiczny przedstawiono w tabeli 7.7.

Tab. 7.7. Skład chemiczny materiałów dodatkowych do spawania

Elektroda	Udział masowy wybranych pierwiastków na podstawie atestu wyrobu w [%]								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V
EV50	0,054	0,92	0,45	0,014	0,009	0,03	0,02	0,04	0,013
EV65	0,049	1,15	0,50	0,008	0,005	-	0,36	0,83	-

Na podstawie składu chemicznego korzystając z równań (4.2) ÷ (4.4) określono wartość równoważnika węgla *CEV*, *CET* oraz podatność do powstawania pęknięć gorących *HCS* dla materiałów podstawowych oraz dla elektrod. Wyniki zebrano w tabeli 7.8.

Tab. 7.8. Wartości równoważnika węgla oraz parametru HCS dla poszczególnych materiałów

Materiał / elektroda	CEV	CET	HCS
S235	0,27	0,22	13,7
S355	0,42	0,32	7,9
P460	0,51	0,37	8,4
EV 50	0,23	0,15	14,4
EV 65	0,37	0,22	10,8

Wysokie wartości równoważnika węgla ($> 0,5$) świadczą mogą o podatności stali do hartowania, a w konsekwencji o możliwości powstawania w spoinie i *SWC* struktur hartowniczych o wysokiej twardości. Najwyższe wartości równoważnika węgla odnotowano dla stali *P460*, jednak zgodnie z wytycznymi norm przedmiotowych, dla grubości $t = 12$ mm materiał ten może być spawany zarówno bez podgrzewania wstępnego, jak i bez obróbki cieplnej po spawaniu. Otrzymane wartości parametru *HCS* powyżej 4 świadczą o podatności zarówno materiałów podstawowych jak i dodatkowych do powstawania pęknięć na gorąco, zwanych też krystalizacyjnymi.

Do wykonania złączy użyto elektrod o średnicy rdzenia metalicznego $d = 2,5$ mm i długości 350 mm. Z atestów odczytano wartości granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie dla czystego stopiwa. Wartości zebrano w tabeli 7.9.

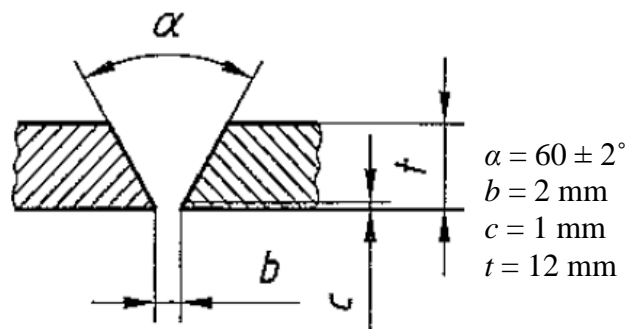
Tab. 7.9. Właściwości wytrzymałościowe stopiwa

Stopiwo	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	R_e/R_m
EV 50	420	500-600	22	0,7÷0,84
EV 65	550	630-750	20	0,73÷0,87

Właściwości wytrzymałościowe stopiwa *EV65* są nieznacznie niższe od właściwości materiału *P460*, jednakże producent zaleca stosowanie tego stopiwa do tej klasy materiału, a różnica wartości jest niewielka ($< 5\%$), dlatego zdecydowano o użyciu tego stopiwa do wykonania złączy próbnych.

7.3.2. Warunki wykonania spoin

Dla celów oceny oddziaływania połączeń spawanych na trwałość zmęczeniową analizowanych materiałów wykonano spoiny próbne metodą spawania ręcznego elektrodą otuloną w pozycji podolnej PA [129]. Materiał wyjściowy w postaci blach o wymiarach $150 \times 350 \text{ mm}$ frezowano względem dłuższego boku w celu przygotowania jego krawędzi do spawania. W ten sposób dla każdej pary blach powstał rowek spawalniczy typu V o kącie $\alpha = 60 \pm 2^\circ$. Na rys. 7.8 zaprezentowano sposób przygotowania i ustawienia blach do spawania.



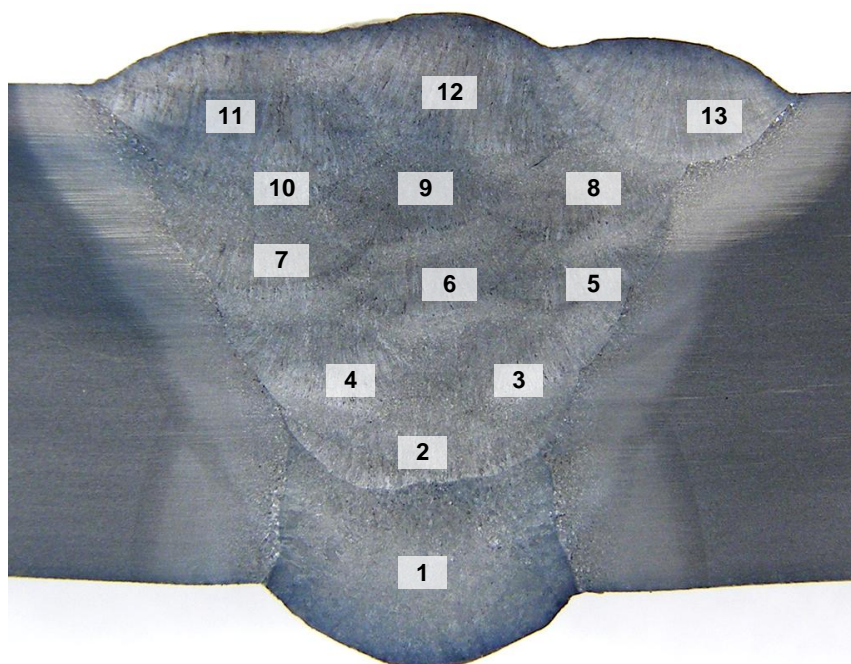
Rys. 7.8. Sposób przygotowania krawędzi i ustawienia blach do spawania

Wykonano sześć rodzajów połączeń spawanych analizowanych stali, zarówno jednoimiennych jak i różnoimiennych we wszystkich konfiguracjach. Spoiny wykonano w wielu przejściach, dokonując mechanicznego usuwania żużla przed przystąpieniem do układania kolejnego ściegu. Prowadzono rejestrację najważniejszych parametrów procesu, czyli natężenia prądu, napięcia łuku elektrycznego i prędkości spawania. Kontrolowano temperaturę między układaniem kolejnych warstw spoiny. Liczbę przejść dla wykonania poszczególnych spoin oraz zastosowany materiał dodatkowy przedstawiono w tabeli 7.10

Tab. 7.10. Liczba ściegów oraz spoino użyte do wykonania poszczególnych spoin

Rodzaj połączenia	Spoina	Liczba ściegów	Materiał dodatkowy
Jednoimienne	S235 – S235	10	FOX EV 50
	S355 – S355	13	FOX EV 50
	P460 – P460	13	FOX EV 65
Dwuimienne	S235 – S355	13	FOX EV 50
	S235 – P460	14	FOX EV 50
	S355 – P460	14	FOX EV 65

Zastosowanie większej liczby przejść pomaga obniżyć ilość energii aplikowaną bezpośrednio do materiału w strefie wpływu ciepła, a tym samym zmniejszać jej zasięg i wpływ na właściwości połączenia. Na rys. 7.9 przedstawiono kolejność układania ściegów na przykładzie jednej ze spoin.



Rys. 7.9. Schemat układania kolejnych ściegów spoiny na przykładzie połączenia P460 – P460.

Pow. 5x

7.3.3. Energia liniowa spawania

Ilość energii przypadająca na jednostkę długości wykonanej spoiny określa się mianem energii liniowej spawania. Jest ona wyrażana wzorem (4.1). Wartości energii liniowej dla poszczególnych spoin przedstawiono w tabeli 7.11.

Tab. 7.11. Wartości energii liniowej spawania dla poszczególnych połączeń i ściegów

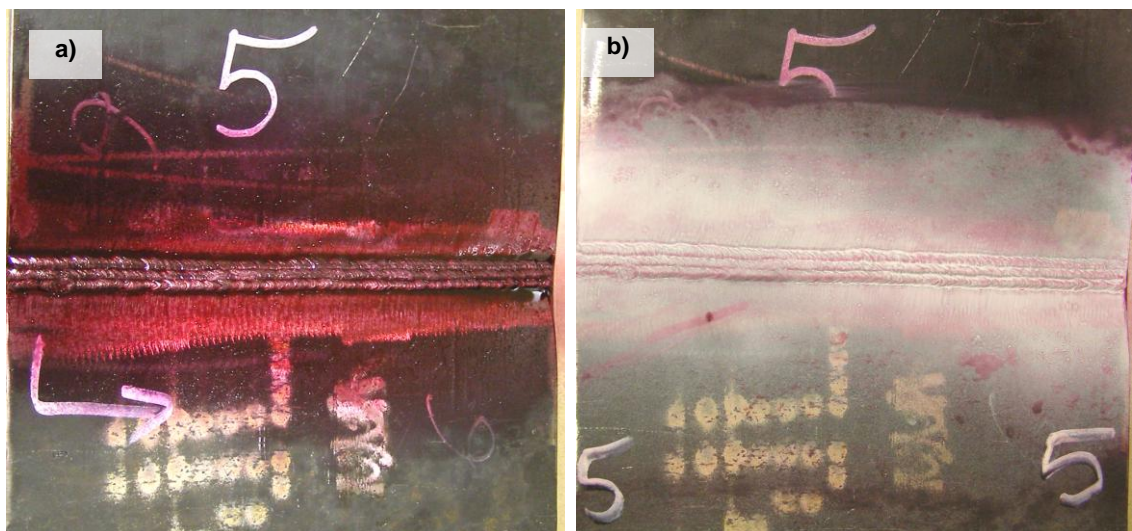
Numer ściegu	Energia liniowa spawania [kJ / mm]					
	S235–S235	S235–S355	S235–460	S355–S355	S355–P460	P460–P460
1.	1,100	1,04	1,08	1,16	1,06	1,08
2.	0,76	0,75	0,65	0,61	0,78	0,79
3.	0,62	0,57	0,49	0,49	0,54	0,50
4.	0,73	0,69	0,65	0,66	0,63	0,53
5.	0,54	0,48	0,62	0,52	0,45	0,43
6.	0,54	0,45	0,59	0,56	0,44	0,42
7.	0,76	0,52	0,63	0,59	0,59	0,51
8.	0,63	0,45	0,60	0,58	0,54	0,55
9.	0,44	0,42	0,49	0,59	0,52	0,53
10.	0,30	0,44	0,49	0,64	0,48	0,53
11.	---	0,59	0,48	0,70	0,59	0,60
12.	---	0,40	0,57	0,54	0,60	0,50
13.	---	0,42	0,50	0,33	0,50	0,37
14.	---	---	0,36	---	0,35	---

Energia liniowa spawania ma decydujący wpływ na wielkość strefy wpływu ciepła oraz szybkość chłodzenia stopiwa [116]. Zbyt wysoka jej wartość powoduje zwiększenie obsza-

ru SWC oraz znaczny rozrost ziarna, natomiast zbyt niska może być przyczyną braków przetopu czy też zbyt szybkiego spadku temperatury materiału rodzimego w obrębie SWC a w konsekwencji jego zahartowanie i nadmierny wzrost twardości. Obliczone wartości energii liniowej spawania należy uznać za niskie. Oprócz pierwszego ściegu, czyli tzw. przetopu, który wymaga większej energii, szczególnie w przypadku gdy proces spawania prowadzony jest bez podgrzewania wstępnego tak jak to miało miejsce, dla wszystkich przypadków mieściła się w przedziale $Q = 0,3 \div 0,8 \text{ kJ/mm}$.

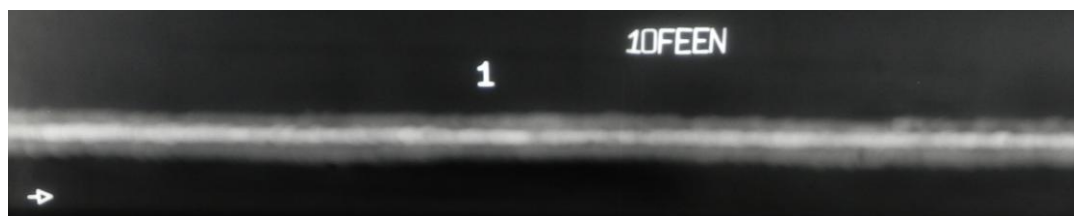
7.3.4. Sprawdzenie jakości połączeń

Po spawaniu blachy poddano kontroli wizualnej zgodnie z [119, 121], a następnie przekazano do dalszych badań. Sprawdzenia pod kątem występowania punktowych i liniowych nieciągłości wychodzących na powierzchnię dokonano na drodze badań penetracyjnych metodą barwną zgodnie z wytycznymi [118, 122, 124, 125]. Etapy obejmują kolejno nałożenie barwnego środka o wysokiej kapilarności, odczekanie określonej ilości czasu do jego wnikięcia w głąb nieciągłości, usunięcie nadmiaru środka penetrującego za pomocą zmywacza na bazie acetonu oraz nałożenie tzw. wywoływacza, którym jest najczęściej szybkooschnąca zawiesina kredy. Powierzchnia wolna od niezgodności spawalniczych pozostaje biała, natomiast obecność niezgodności powoduje wypływanie barwnika i powstanie jaskrawego wskazania na powierzchni elementu. Badania przeprowadzono zarówno od strony lica jak i grani spoiny (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Kolejne etapy badań penetracyjnych: a) element pokryty barwnym środkiem penetracyjnym, b) spoina pokryta wywoływaczem, brak wskazań od niezgodności spawalniczych

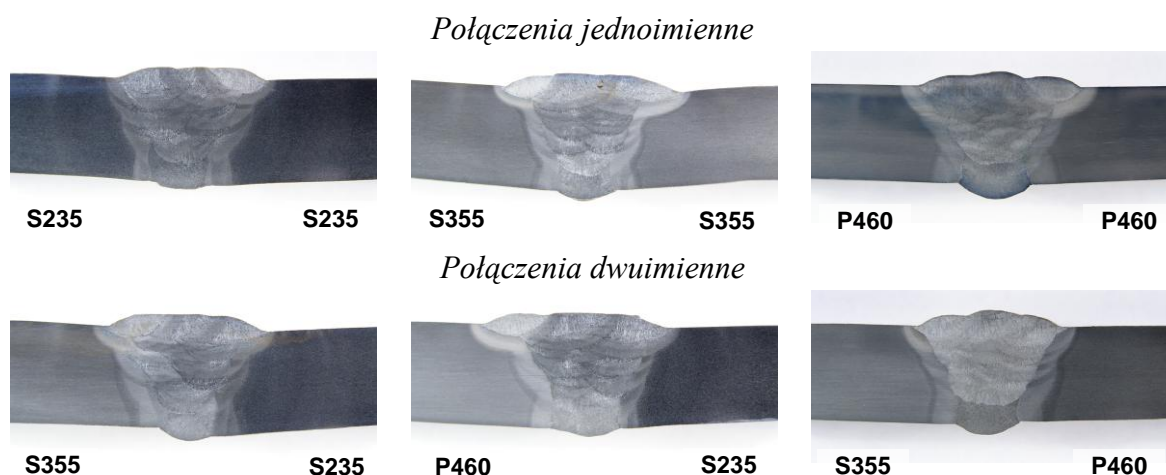
Radiografia pozwala wykryć głównie objętościowe niezgodności spawalnicze takie jak pęcherze, pustki, wtrącenia niemetaliczne, ale także braki przetopu i podtopienia (rys. 7.11). Badania radiograficzne zostały przeprowadzone zgodnie ze wskazówkami zawartymi w [117, 120, 131] na atestowanych urządzeniach przez personel kwalifikowany zgodnie z wymaganiami określonymi w normie [130].



Rys. 7.11. Przykładowy radiogram z zaznaczonym kierunkiem spawania, oznaczeniem próbki oraz numerem wzorca pręcikowego do oceny jakości odwzorowania

7.3.5. Badania metalograficzne makroskopowe spoin

Badania metalograficzne makroskopowe prowadzi się okiem nieuzbrojonym lub przy niewielkim powiększeniu w celu oceny poprawności geometrii i makrostruktury złącza. Obserwacja zglądu poprzecznego spoiny pozwala też sprawdzić wewnętrzne warstwy spoiny na obecność przyklejeń, braków przetopu, pęcherzy gazowych, wtrąceń niemetalicznych – czynników decydujących o jakości spoiny i w znacznym stopniu o jej właściwościach wytrzymałościowych. Na rys. 7.12 przedstawiono przekroje poprzeczne badanych spoin w skali zbliżonej do naturalnej.



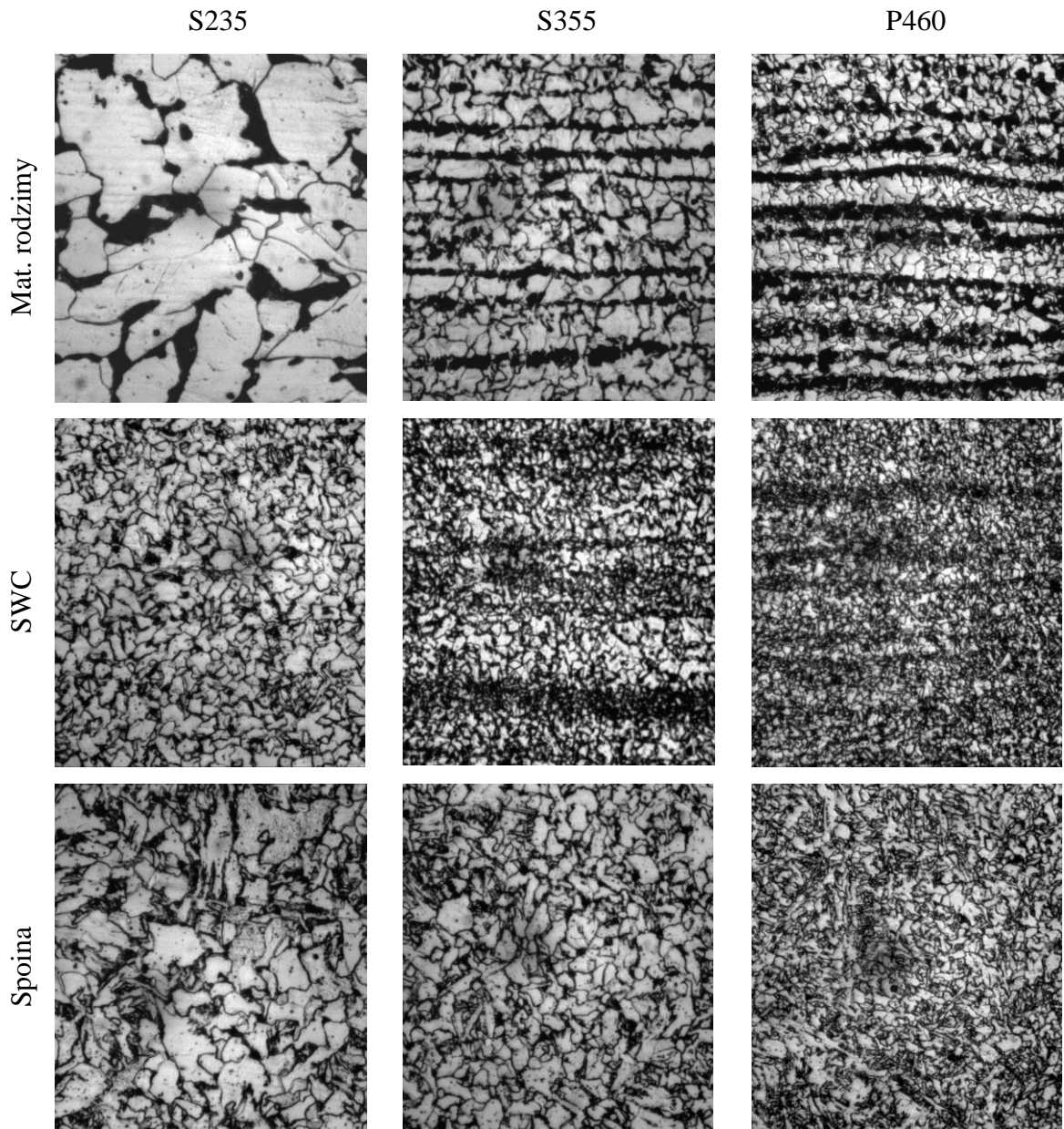
Rys. 7.12. Przekroje poprzeczne badanych spoin

Na podstawie oględzin zglądów metalograficznych stwierdzono występowanie niezgodności spawalniczych geometrycznych w postaci nieznacznych przesunięć brzegowych i kątowych. W spoinie połączenia S355–S355 zauważono niezgodność spawalniczą w postaci pojedynczego wtrącenia niemetalicznego, którą mogła być pozostałość żużla z poprzed-

niego przejścia, gdyż wystąpiła ona na granicy kolejnych ściegów. Analiza zaobserwowanych niezgodności wewnętrznych pozwoliła stwierdzić, że połączenia spełniają pod tym względem wymagania poziomu jakości *B* według [126].

7.3.6. Badania metalograficzne mikroskopowe

Celem badań metalograficznych mikroskopowych połączeń spawanych jest przede wszystkim sprawdzenie występowania mikropęknięć w obszarze spoiny i SWC, a także kontrola procesu spawania lub efektów obróbki cieplnej na podstawie oceny mikrostruktury. Na rys. 7.13 przedstawiono przykładowe obrazy struktur badanych spoin.

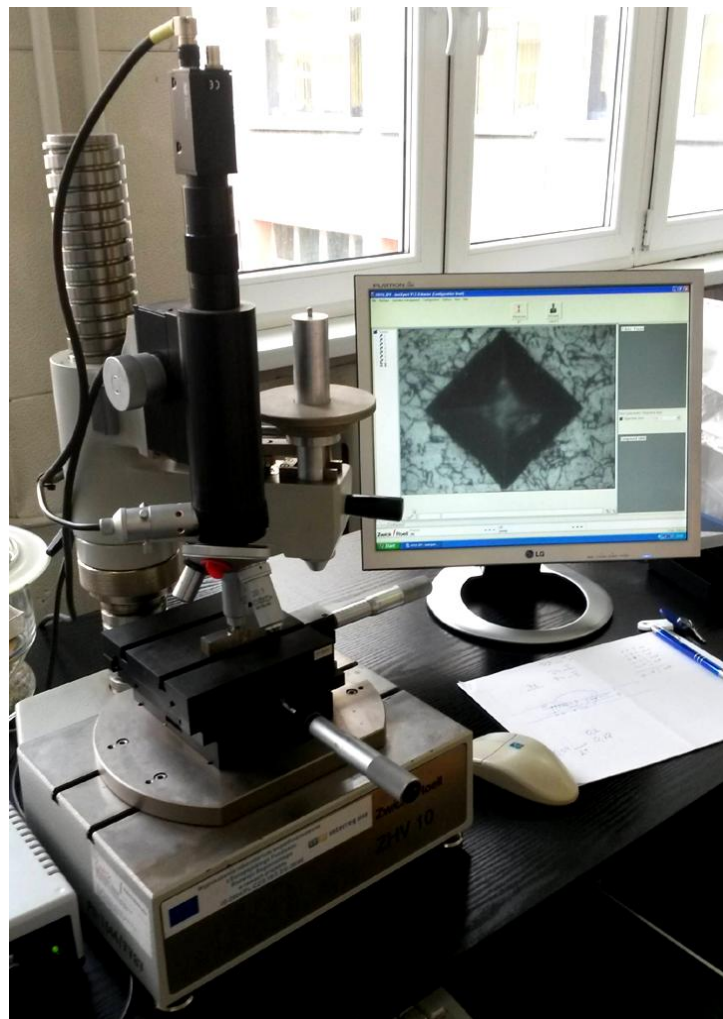


Rys. 7.13. Przykładowe obrazy mikrostruktury analizowanych połączeń spawanych. Pow. 500x

Zdjęcia *SWC* pobrano z podstrefy o najsilniejszym rozdrobieniu ziarna. Mimo podwyższonych wartości parametru *HCS* nie zaobserwowano występowania mikropęknięć krystalizacyjnych w spoinach. Dla stali *P460* zaobserwowano najwyższy stopień rozdrobnienia struktury we wszystkich obszarach spoiny. Rozdrobnienie struktury w obszarze normalizacji w *SWC* materiałów *S355* oraz *P460* powodowało zanikanie pasmowości struktury charakterystycznej dla wyrobów walcowanych.

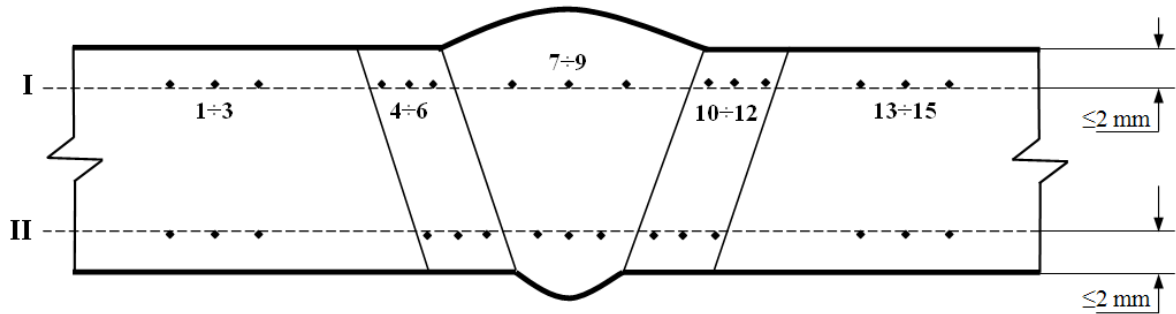
7.3.7. Pomiary twardości

Pomiary twardości połączeń spawanych przeprowadzono na wytrawionych zglądach metalograficznych zgodnie z [127]. Twardość określono w skali Vickersa *HV* przy obciążeniu wglębniaka siłą 9,807 N. Wykonano po 3 odciski w każdej ze stref połączenia spawanego wzdłuż dwóch równoległych linii pomiarowych położonych w pobliżu lica i grani spoiny. Widok ogólny stanowiska pomiarowego *ZHV10* firmy Zwick/Roell przedstawiono na rys. 7.14.



Rys. 7.14 . Widok ogólny twardościomierza *ZHV 10* firmy Zwick / Roell

Rozmieszczenie punktów pomiarowych na powierzchni zglądu przedstawiono schematycznie na rys. 7.15. Dopuszczalne wartości dla połączeń spawanych tych materiałów bez poddawania ich obróbce cieplnej wynoszą odpowiednio 380 HV dla stali S235 i S355 oraz 420 dla stali P460.



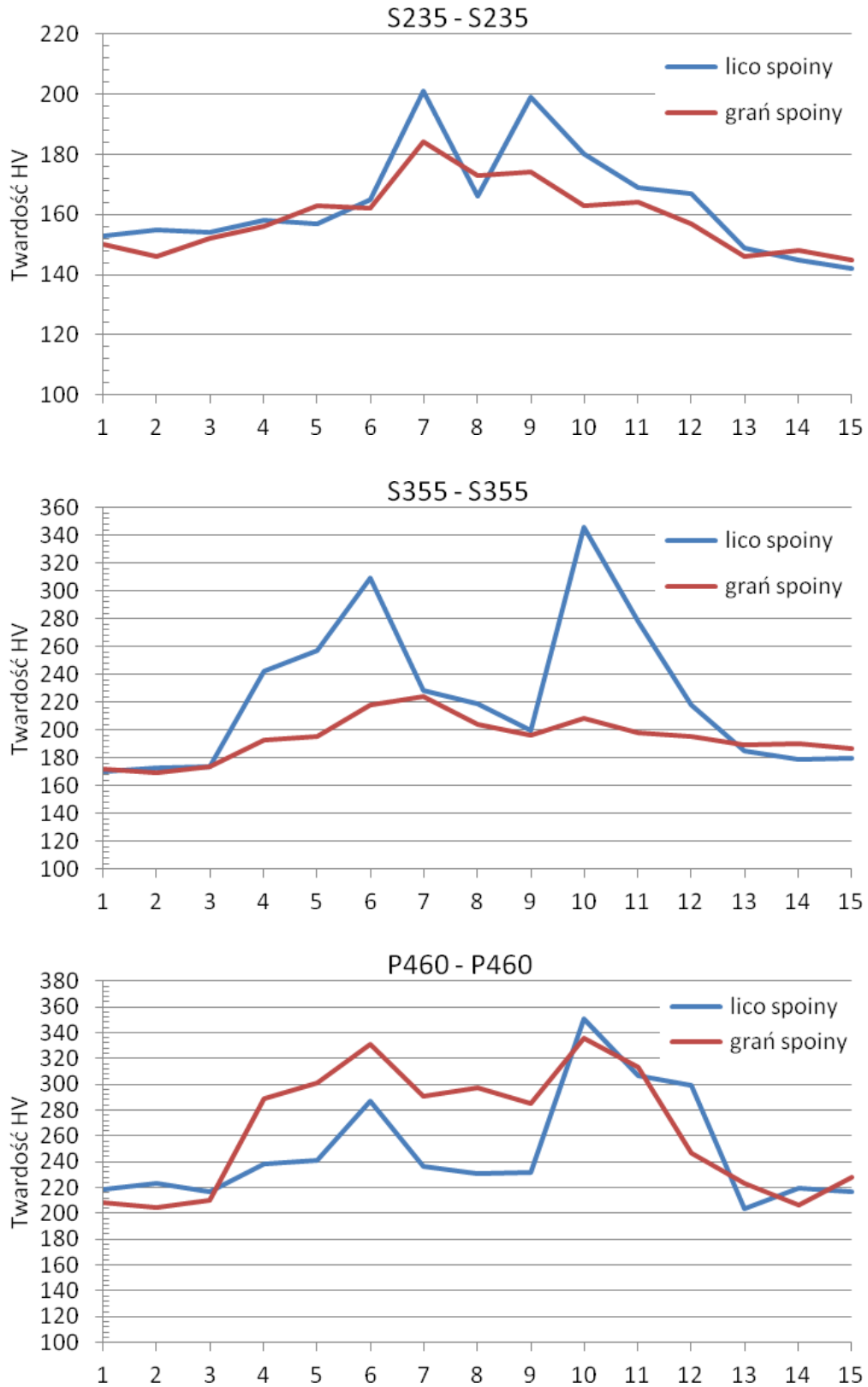
Rys. 7.15. Rozmieszczenie punktów pomiaru twardości na powierzchni zglądu metalograficznego w materiale podstawowym z obydwu stron spoiny, strefach wpływu ciepła oraz stopiwie wzdłuż linii pomiarowych zlokalizowanych w pobliżu lica (I) i grani spoiny (II). Punkty pomiarowe 6 i 10 znajdują się w odległości $\leq 0,5$ mm od linii wtopienia

Wyniki pomiarów przedstawiono na kolejnych rysunkach 7.16 i 7.17.

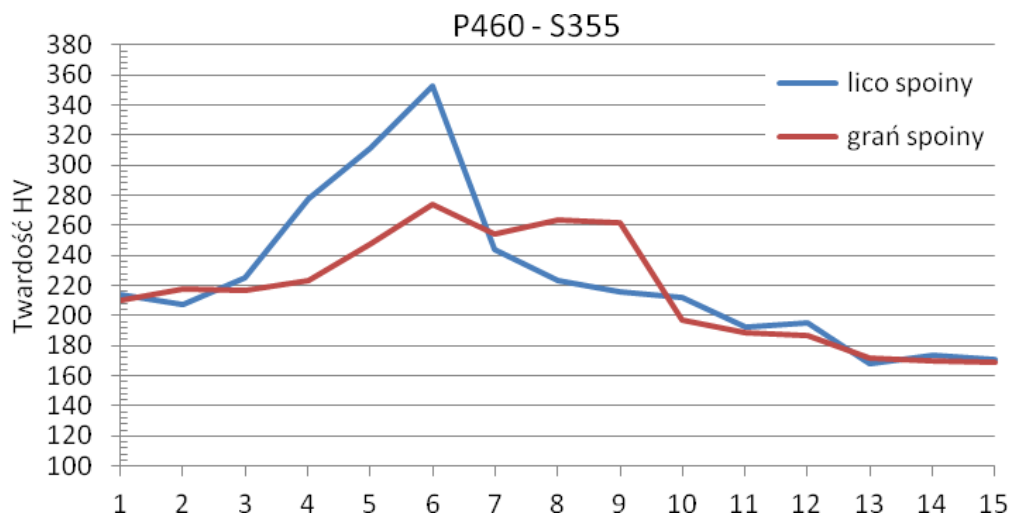
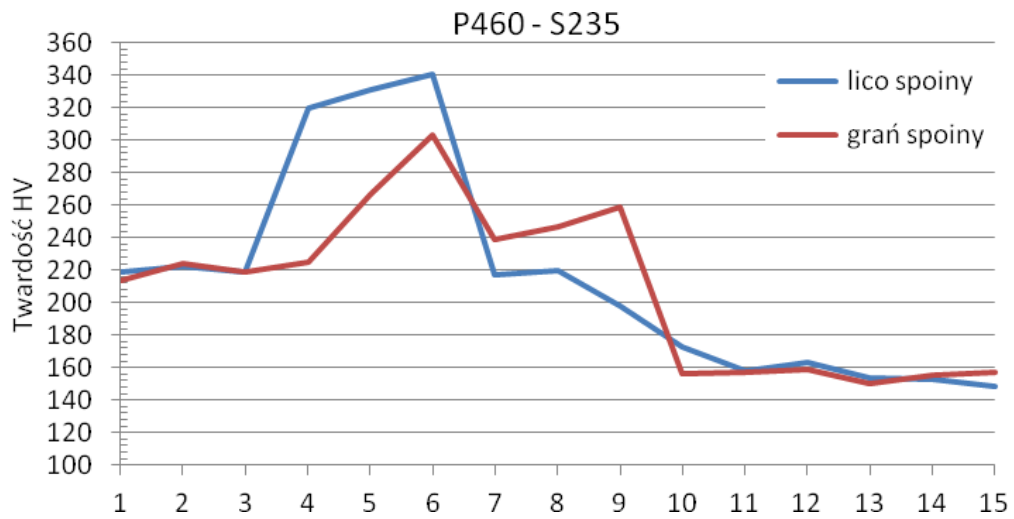
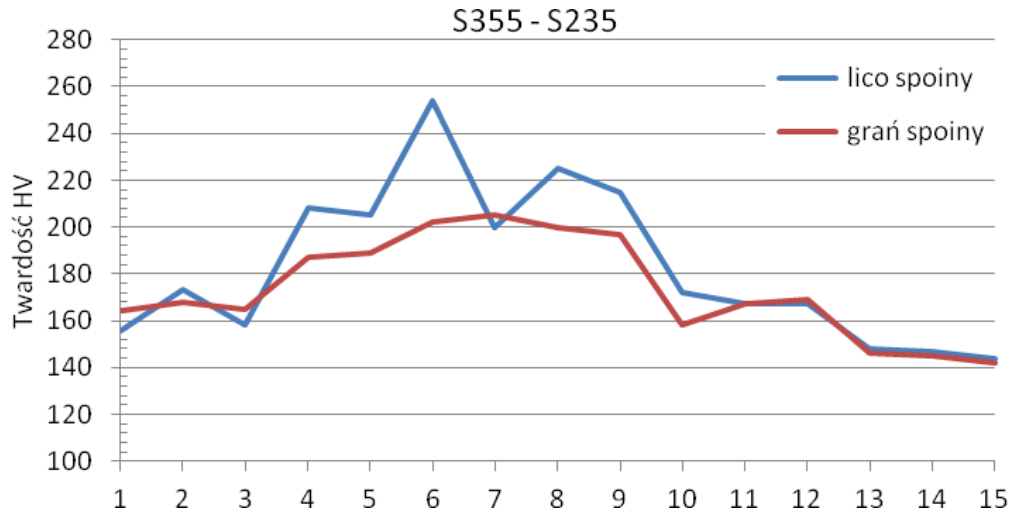
Numeracja osi rzędnych odpowiada numerowi kolejnemu odcisku, odpowiednio:

1÷3 – materiał rodzimy (1), 4÷6 – SWC (materiału 1), 7÷9 – spoina, 10÷12 – SWC (materiału 2), 13÷15 – materiał rodzimy (2).

Rozkład twardości cechował się względnie symetrycznym rozłożeniem na przekroju połączeń spawanych jednoimiennych. W przypadku połączenia S235-S235 spoiwo EV50 o wyższej niż materiał podstawowy zawartości manganu uległo silniejszemu zahartowaniu od materiału rodzimego w SWC. Jednak efekt ten nastąpił wyłącznie dla ściągów zewnętrznych podlegających wyższemu gradientowi temperatury oraz silniejszej dyfuzji węgla i pierwiastków stopowych na granicy stopiwo – materiał rodzimy. W środku spoiny twardość była niższa o ponad 30 HV. Gatunek S355 wykazał zdecydowanie najwyższe względne utwardzenie w obszarze SWC po stronie lica spoiny w stosunku do pozostających materiałów.



Rys. 7.16. Rozkład twardości na przekrojach poprzecznych elementów ze spoiną jednoimienną



Rys. 7.17. Rozkład twardości na przekrojach poprzecznych elementów ze spoiną dwumienną

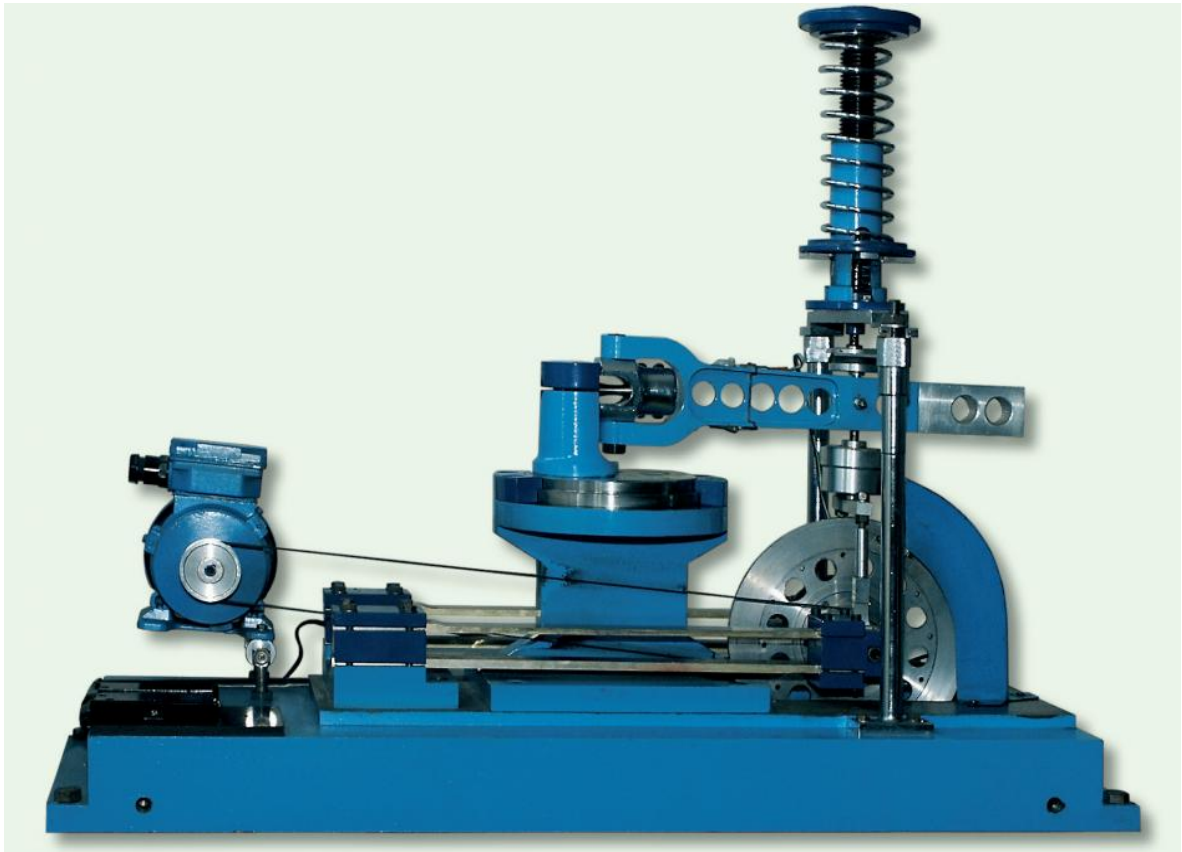
W przypadku gatunków stali o wyższej wytrzymałości obszary występowania najwyższych twardości zlokalizowane były najczęściej w obrębie strefy wpływu ciepła od strony lica spoiny, a więc w pobliżu ściegów wykonywanych jako ostatnie. Ponadto w większości przypadków w obrębie złącza, a więc w spoinie i przyległych SWC twardość od strony lica była wyższa niż twardość od strony grani spoiny. Różnice sięgały kilkudziesięciu, a nawet ponad 100 HV. Jedną z przyczyn może być fakt, że podczas układania kolejnych warstw spoiny, sąsiednie ściegi podlegają samoczynnej obróbce cieplnej, w wyniku której zanika dendrytyczna struktura materiału lanego w spoiwie.

8. Badania zmęczeniowe

Badania zmęczeniowe przeprowadzono w celu identyfikacji wpływu rodzaju materiału i jego właściwości wytrzymałościowych na trwałość zmęczeniową podobnych geometrycznie elementów zawierających jednoimienne i różnoimienne połączenia spawane tych materiałów.

8.1. Stanowisko do badań

Badania zmęczeniowe pod obciążeniem wahadłowo zmiennym momentem zginającym wykonano w Laboratorium Badań Zmęczeniowych Katedry Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej na stanowisku zmęczeniowym *MZGS-100*. Widok ogólny układu obciążającego tego stanowiska przedstawiono na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Widok ogólny układu mechanicznego stanowiska zmęczeniowego *MZGS-100*

Jest to urządzenie wywołujące w testowanym materiale obciążenia zginające, skręcające lub skręcająco- zginające bez przesunięcia w fazie. Sinusoidalny stałoamplitudowy przebieg naprężeń realizowany jest poprzez wirującą tarczę o regulowanej wartości mimośrodowo umieszczonej masy. Tarcza zamocowana jest na sprężynach płaskich, dobranych w taki sposób, aby w czasie badań wychylały się z częstotliwością zbliżoną do rezonanso-

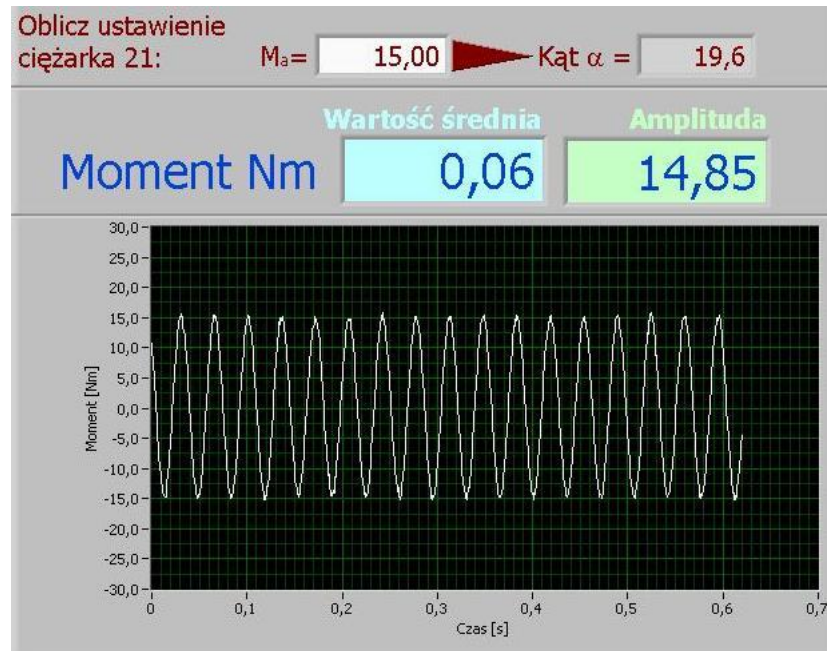
wej. Siła wymuszająca poprzez cięgno oddziałuje na dźwignię połączoną z uchwytem mocującym próbki.

Układ mechaniczny stanowiska połączony jest ze sterownikiem pozwalającym na utrzymywanie założonej prędkości kątowej tarczy oraz zliczanie cykli obciążenia (rys. 8.2).



Rys. 8.2. Widok ogólny panelu frontowego sterownika stanowiska zmęczeniowego MZGS-100

Ponadto w przewężonym przekroju ramienia na przeciwległych jego ściankach naklejono tensometry podłączone do karty pomiarowej National Instruments oraz programu do akwizycji danych w środowisku *LabView*. Pozwala to na stałą kontrolę założonego współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$, obserwację charakteru odpowiedzi materiału na działanie obciążeń cyklicznych oraz przeliczanie siły wymuszającej na wartość momentu zginającego względem punktu centralnego uchwytu na elementy próbne (rys. 8.3). Testy zmęczeniowe prowadzono przy stałej wartości siły wymuszającej, z częstotliwością zmiany kierunku działania obciążenia wynoszącą $f = 28,8 \pm 0,1 \text{ Hz}$.

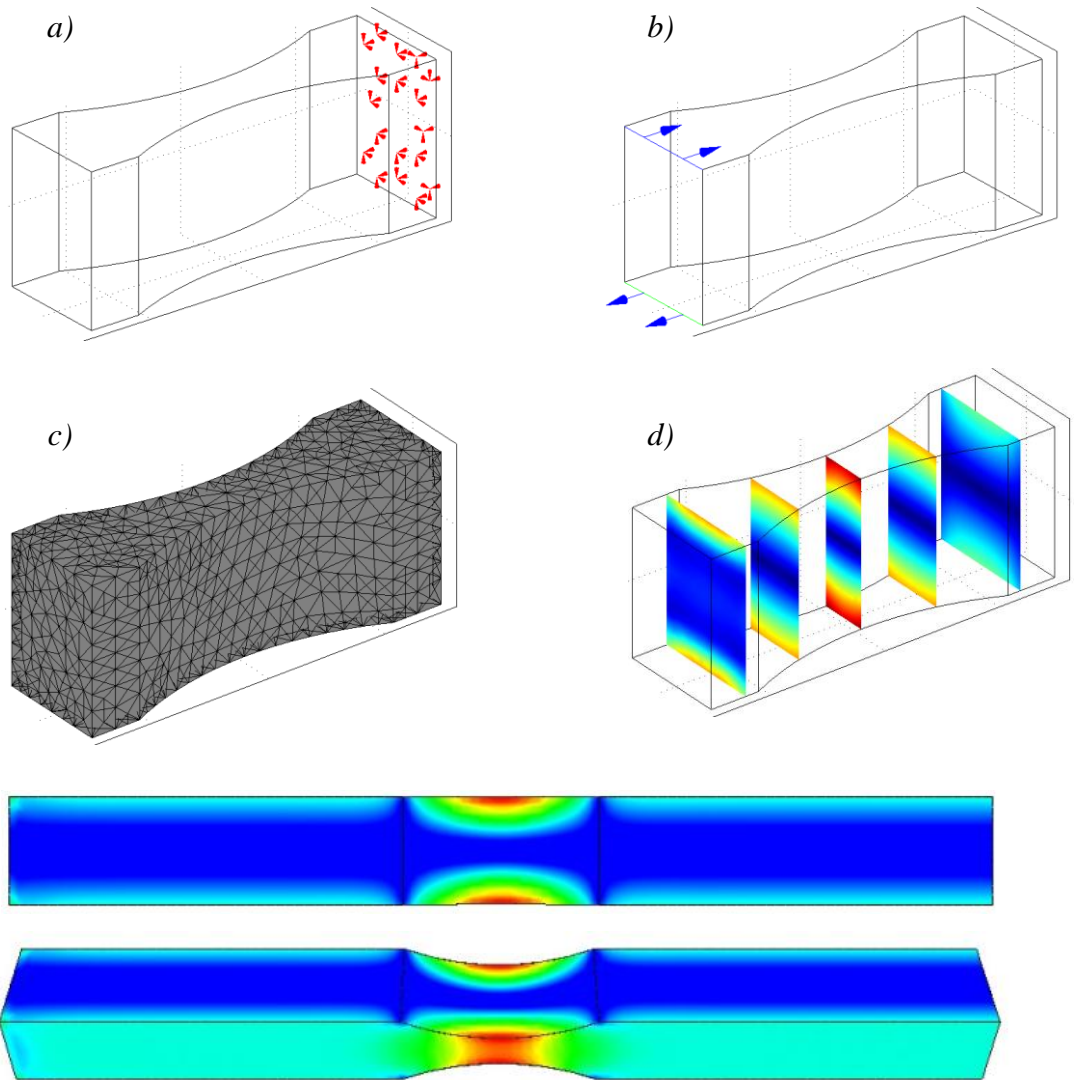


Rys. 8.3. Fragment okna dialogowego programu do akwizycji danych w środowisku LabView

Kryterium zniszczenia bazowało na przekroczeniu przez ramię układu obciążającego krytycznej amplitudy wychylenia powodującej zadziałanie wyłącznika krańcowego. Z reguły odpowiadało to pęknięciu większemu od połowy powierzchni przekroju poprzecznego badanego elementu, co pomijając koncentrację naprężeń wywołaną obecnością pęknięcia, powodowało ponad czterokrotny wzrost wartości naprężeń nominalnych. W warunkach eksploatacji konstrukcji i urządzeń przemysłowych bez wątpienia stanowi to przesłankę o wycofaniu elementu z dalszego użytkowania.

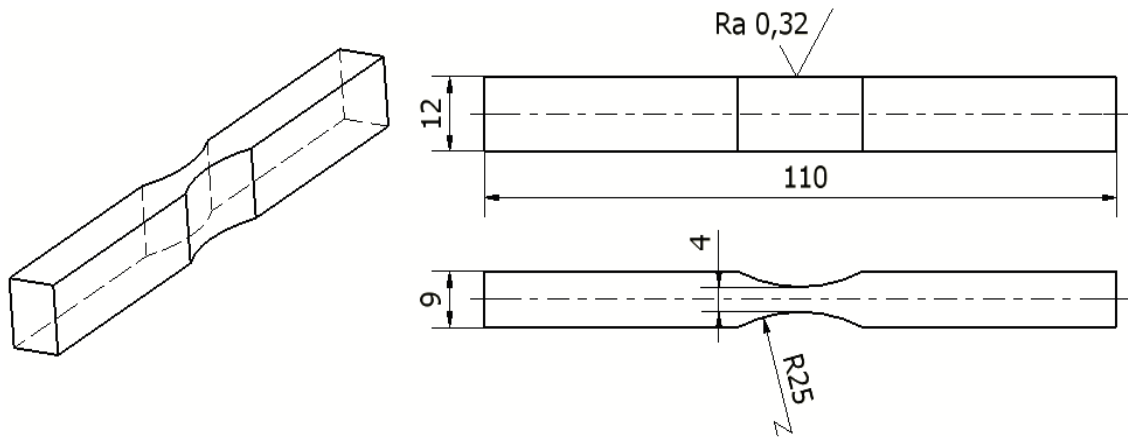
8.2. Elementy próbne do badania materiałów podstawowych

Próbki do testów zmęczeniowych zaprojektowano w taki sposób, aby objąć badaniem pełną wysokość przekroju poprzecznego materiału wyjściowego przy uwzględnieniu ograniczeń stanowiska. Wykonanie symulacji rozkładu naprężeń w objętości materiału przeprowadzono z pominięciem części uchwytowej próbki (rys. 8.4). Po zaimportowaniu geometrii i wprowadzeniu stałych materiałowych kolejno: *a*) zdefiniowano warunki utwierdzenia, *b*) zadano obciążenie w postaci pary sił generujących moment o wartości 30 *N·m*, *c*) wygenerowano siatkę 16371 czworocciennych elementów skończonych o 73743 stopniach swobody oraz *d*) przeprowadzono obliczenia. Uzyskano maksymalną wartość naprężeń redukowanych na poziomie $\sigma_{max} = 324,9 \text{ MPa}$.



Rys. 8.4. Kolejne etapy wyznaczania rozkładu naprężeń za pomocą MES oraz rozkład naprężeń na powierzchni elementu

Symulacja potwierdziła, że przewężenie przekroju elementu do 4 mm w środku jego długości poprzez frezowanie obustronne frezem walcowym o średnicy 50 mm , pozwala uzyskać łagodny efekt koncentracji naprężeń w tym obszarze. Wyznaczona na podstawie warunku wytrzymałości przekroju na zginanie wartość naprężeń normalnych dla tych samych warunków obciążenia i wielkości przekroju była niższa od uzyskanej na drodze symulacji o niespełna 4% . Uwzględniając wymagane części uchwytowe przyjęto kształt i wymiary próbek jak na rys. 8.5.

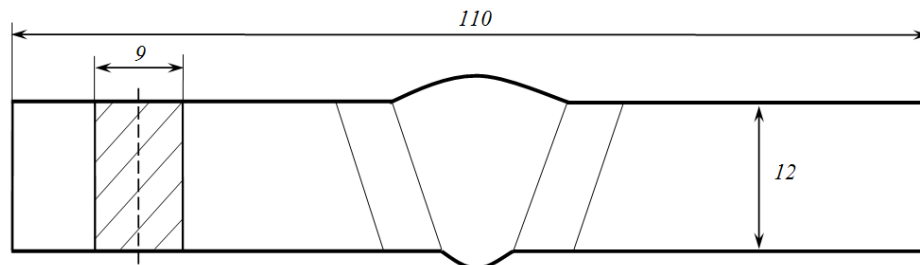


Rys. 8.5. Kształt i wymiary próbek do testów zmęczeniowych elementów bez spoiny

Z górnej i dolnej powierzchni elementu usunięto zendrę walcowniczą w celu pominięcia konieczności rozpatrywania jej wpływu na powstanie i rozwój pęknięć zmęczeniowych. Obróbkę mechaniczną prowadzono w taki sposób aby nie wprowadzać zgniotu ani nadmiernej ilości ciepła w materiał. Podlegające największym naprężeniom i odkształceniom krawędzie wzdłużne próbek w miejscu przewężenia przekroju wygładzono na ściernicy papierowej w taki sposób aby ślady obróbki zorientowane były zgodnie z kierunkiem działania największych naprężeń.

8.3. Elementy próbne ze spoiną czołową

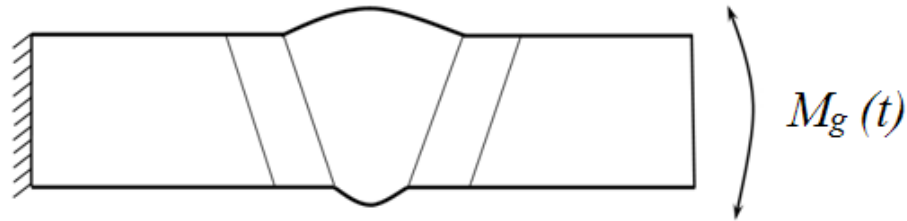
Elementy próbne do badań zmęczeniowych zawierające połączenie spawane z uwagi na niejednorodność struktury i właściwości materiału w obrębie złącza wymagały innego kształtu. Badania prowadzono na elementach ze spoiną nie obrobioną. Ponieważ w obrębie najbardziej obciążonych podczas zginania skrajnych powierzchni elementu, znajdują się naturalne koncentratory naprężeń w postaci lica i grani spoiny, zrezygnowano z dodatkowego przewężenia przekroju (rys 8.6).



Rys. 8.6. Kształt i wymiary elementów do badań zmęczeniowych połączeń spawanych

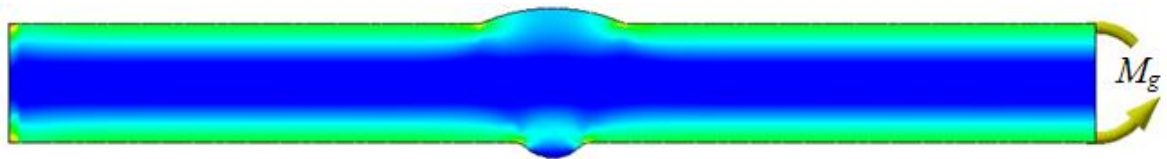
Próbki o wskazanym kształcie uzyskane zostały poprzez obróbkę skrawaniem, szlifowanie dokładne metodą na mokro oraz złagodzenie krawędzi zgodnie z kierunkiem działania największych naprężeń normalnych. Sposób utwierdzenia i przyłożenia obciążenia wzglę-

dem spoiny przedstawiono na rys. 8.7. Testy zmęczeniowe prowadzono przy obciążeniu stało-amplitudowym sinusoidalnie zmiennym momentem zginającym.



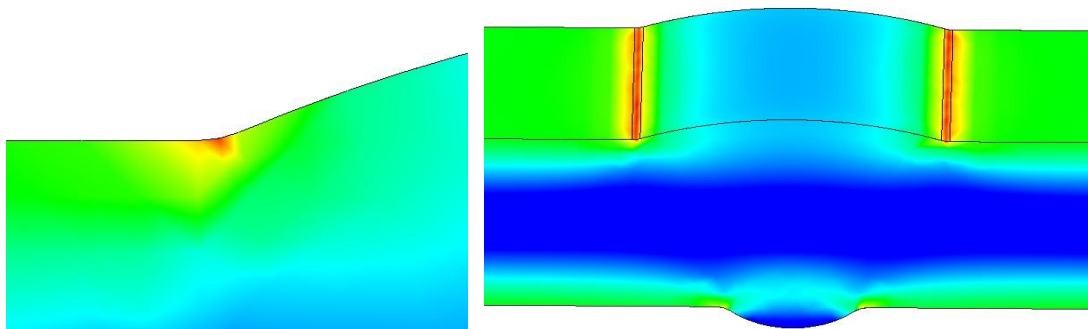
Rys 8.7. Sposób utwierdzenia i obciążenia próbki w uchwycie maszyny zmęczeniowej

Wstępne próby potwierdziły możliwość przeprowadzenia zamierzonych badań na elementach o zwiększonym przekroju. Koncentracja naprężeń wywołana obecnością połączenia spawanego była wystarczająca aby zachodziła inicjacja i rozwój pęknięcia zmęczeniowego. Przeprowadzono analizę numeryczną rozkładu naprężeń przy założeniu geometrii zgodnej z zaleceniami IIW, a więc o wartości promienia przejścia lica i grani spoiny w materiał rodzimy równej $r_{ref} = 1 \text{ mm}$. W objętości materiału wygenerowano siatkę 60 000 czworościennych elementów skończonych o ponad 80 000 węzłów. Wprowadzono dane materiałowe, zadano warunki utwierdzenia oraz zdefiniowano obciążenie (rys. 8.8).



Rys. 8.8. Rozkład naprężeń w elemencie próbnym ze spoiną poddanym działaniu momentu zginającego

Symulację numeryczną przeprowadzono w programie Inventor dla modelu ciała idealnie sprężystego bez uwzględniania karbu strukturalnego wynikającego z obecności połączenia spawanego, ale z założeniem promienia przejścia materiału w lico i grań spoiny na poziomie 1 mm. Rozkład naprężeń w elemencie pokazano na rys. 8.9.



Rys. 8.9. Koncentracja naprężeń w strefie przejścia materiału rodzimego w lico spoiny o promieniu $r_{ref} = 1 \text{ mm}$

Dla przyjętej wartości momentu zginającego wyznaczono maksimum naprężeń zgodnie z hipotezą Hubera-Misesa, a następnie korzystając z warunku wytrzymałości przekroju na zginanie obliczono wartość przy takim samym obciążeniu dla elementu o jednakowym przekroju, ale bez spoiny. Stosunek naprężeń w elemencie z karbem i bez karbu określa wartość geometrycznego współczynnika koncentracji naprężeń, zwanego też współczynnikiem działania karbu geometrycznego. W analizowanym przypadku jego wartość wyniosła:

$$K_w = 1,69.$$

8.4. Charakterystyki zmęczeniowe elementów bez spoiny

Do przeprowadzenia testów zmęczeniowych przygotowano serie 15 elementów próbnych dla każdego materiału, które następnie badano przy zróżnicowanych wartościach momentu zginającego. Wyniki badań eksperymentalnych materiałów podstawowych zebrano w tabelach 8.1 ÷ 8.3. Na ich podstawie wyznaczono przebieg charakterystyk zmęczeniowych typu $S-N$.

Tab.8.1. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbnych ze stali S235

Mat.	Oznaczenie próbki	Naprężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S235	2.1	265,5	119400
	2.2	245,8	124400
	2.3	192,8	3368500
	2.4	212,4	5657800
	2.5	237,8	241500
	2.6	228,5	369600
	2.7	213,5	490600
	2.8	203,1	1208600
	2.9	266,6	75400
	2.10	281,6	52000
	2.11	278,2	51700
	2.12	333,6	16800
	2.13	318,6	17300
	2.14	213,5	5761200
	2.15	301,2	33600

Tab.8.2. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbnych ze stali S355

Mat.	Oznaczenie próbki	Naprężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S355	3.1	340,5	30400
	3.2	313,9	55200
	3.3	289,7	96300
	3.4	271,2	226700
	3.5	253,9	451400
	3.6	238,9	1654400
	3.7	250,5	1065700
	3.8	256,5	302000
	3.9	249,3	811600
	3.10	378,6	16900
	3.11	406,3	9000
	3.12	243,5	977800
	3.13*	210,1	7431600
	3.14	247	5193000
	3.15	258,5	358100

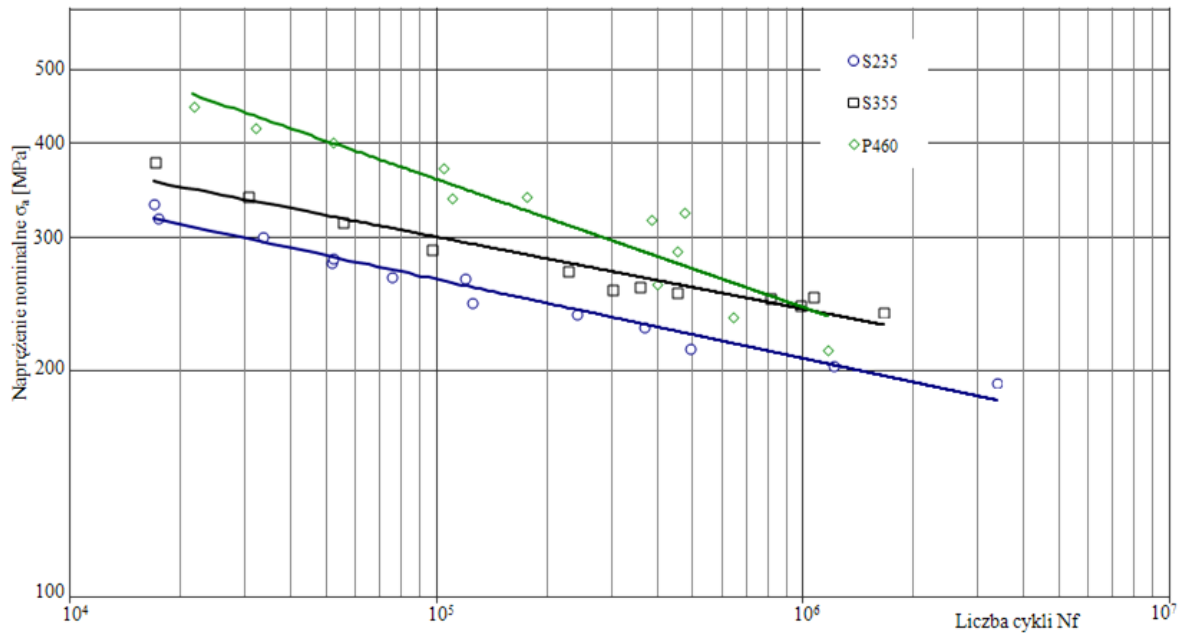
* - element uległ uszkodzeniu poza przewężeniem przekroju

Tab.8.3. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbnych ze stali P460

Mat.	Oznaczenie próbki	Naprężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
P460	4.1	340	175200
	4.2	324,1	471200
	4.3	288,1	448900
	4.4	317,8	381800
	4.5	402,5	51900
	4.6	338,9	109800
	4.7	371,8	103300
	4.8	420,5	31700
	4.9	449,1	21500
	4.10	260,6	397500
	4.11	235,2	637400
	4.12	212,9	1165700
	4.13*	224,6	3668000
	4.14*	255,3	1450800
	4.15*	238,3	2086500

* - elementy uległy uszkodzeniu poza przewężeniem przekroju i nie były brane pod uwagę w dalszych rozważaniach.

Charakterystyki $S-N$ wyznaczono w układzie podwójnie logarytmicznym na podstawie elementów, które uległy zniszczeniu w zakresie liczby cykli z przedziału ok. $N_f = 10^4 \div 3,5 \cdot 10^6$ (rys. 8.10).



Rys. 8.10. Charakterystyki zmęczeniowe S-N elementów próbnych bez spoiny w układzie podwójnie logarymicznym

Do uzyskanych wyników dyskretnych wykreślono aproksymację w postaci mediany oraz scharakteryzowano ich zgodność z wynikami badań eksperymentalnych za pomocą współczynnika determinacji R^2 , który wyrażany jest wzorem:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad (8.1)$$

gdzie: y_t – rzeczywista wartość zmiennej Y w momencie t , \hat{y}_t – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej na podstawie modelu, \bar{y} – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśnianej.

Wartość tego współczynnika mówi o tym w jakim stopniu model wyjaśnia zmienne objaśniane i mieści się ona w przedziale $[0;1]$. Im bliższa jest ona jedności, tym lepsze dopasowanie modelu do wyjaśnianej zmiennej.

Następnie równania linii trendu doprowadzono do postaci podwójnie logarymicznej zgodnie z modelem Basquina (równanie (2.6)). Zaletą takiego przedstawienia jest możliwość aproksymacji wyników testów w zakresie ograniczonej trwałości zmęczeniowej za pomocą odcinka prostej. Dodatkowo przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników dyskretnych zgodnie ze wskazówkami *ASTM* zawartymi w pracy [3]. Dla uproszczenia obliczeń dokonuje się podstawień, dzięki którym równanie (2.6) przyjmuje postać liniową:

$$Y = A + B \cdot X \quad (8.2)$$

gdzie: $Y = \log N_f$, $X = \log \sigma_a$, $A = A'$, $B = m'$

Przy założeniu rozkładu normalnego wyników testów zmęczeniowych wartości oczekiwane estymatorów A i B wyznacza się z równań:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B} \cdot \bar{X} \quad (8.3)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2}, \quad (8.4)$$

gdzie: symbol „ $\hat{}$ ” - oznacza estymator, symbol „ $\bar{}$ ” - wartość średnią, k – ilość próbek

Obliczono wariancję rozkładu zgodnie z zapisem:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2}, \quad (8.5)$$

gdzie: $\hat{Y}_i = \hat{A} + \hat{B} \cdot X_i$.

Następnie wyznaczono przedziały ufności dla parametrów A i B dla założonego poziomu prawdopodobieństwa:

$$\hat{A} \pm t_p \cdot \hat{\sigma} \cdot \left[\frac{1}{k} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.6)$$

$$\hat{B} \pm t_p \cdot \hat{\sigma} \cdot \left[\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8.7)$$

gdzie: t_p – oznacza wartość odczytaną z tablic rozkładu t-Studenta dla danej liczby zmiennych i założonego poziomu prawdopodobieństwa. Wyznaczone wartości zamieszczono w tabelach.

Dodatkowo wyznaczono pasma rozrzutu wyników eksperymentalnych wzdłuż całej mediany dla założonego poziomu prawdopodobieństwa. Do tego celu posłużono się wzorem:

$$\hat{A} + \hat{B} \cdot X \pm \sqrt{2 \cdot F_p} \cdot \hat{\sigma} \cdot \left[\frac{1}{k} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right] \quad (8.8)$$

gdzie: F_p – wartość odczytana z tablic rozkładu dwuparametrycznego.

Pasma rozrzutu dla zadanych warunków prawdopodobieństwa przedstawiono graficznie na rysunkach kolejnych charakterystyk $S-N$.

Obliczone wartości współczynników zebrano w tabeli 8.4.

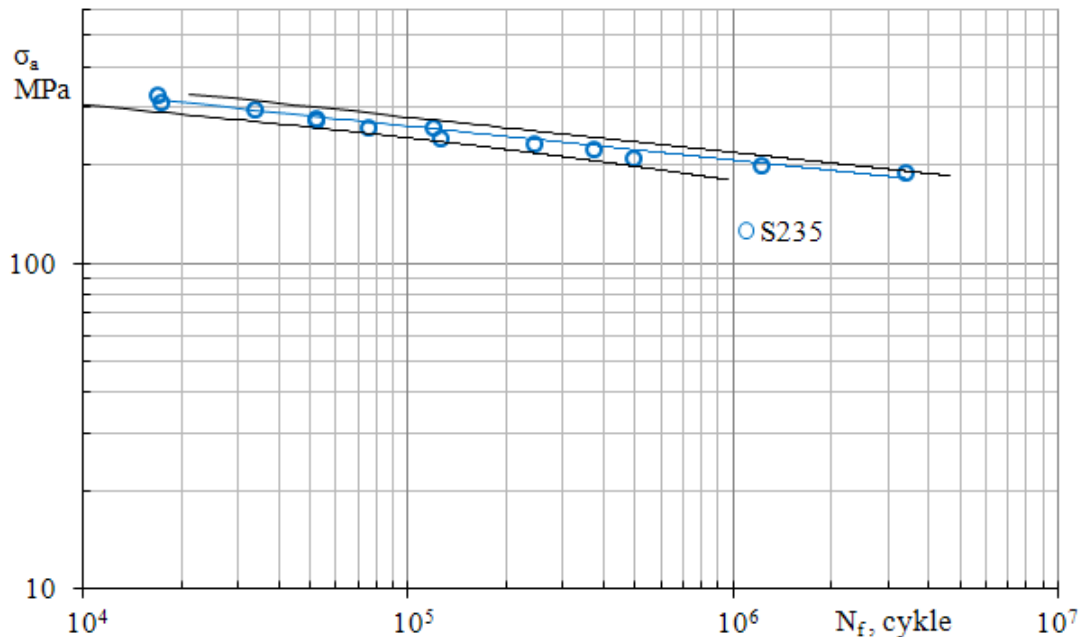
Tab.8.4. Wartości współczynników równania Basquina oraz współczynnika determinacji

Materiał	Wartości współczynników i przedziały ufności				
	A'	m'	R^2	$\Delta A'$	$\Delta m'$
S235	28,1	-9,54	0,97	2,17	0,90
S355	30,94	-10,47	0,94	2,72	1,11
P460	20,04	-5,89	0,87	2,81	1,12

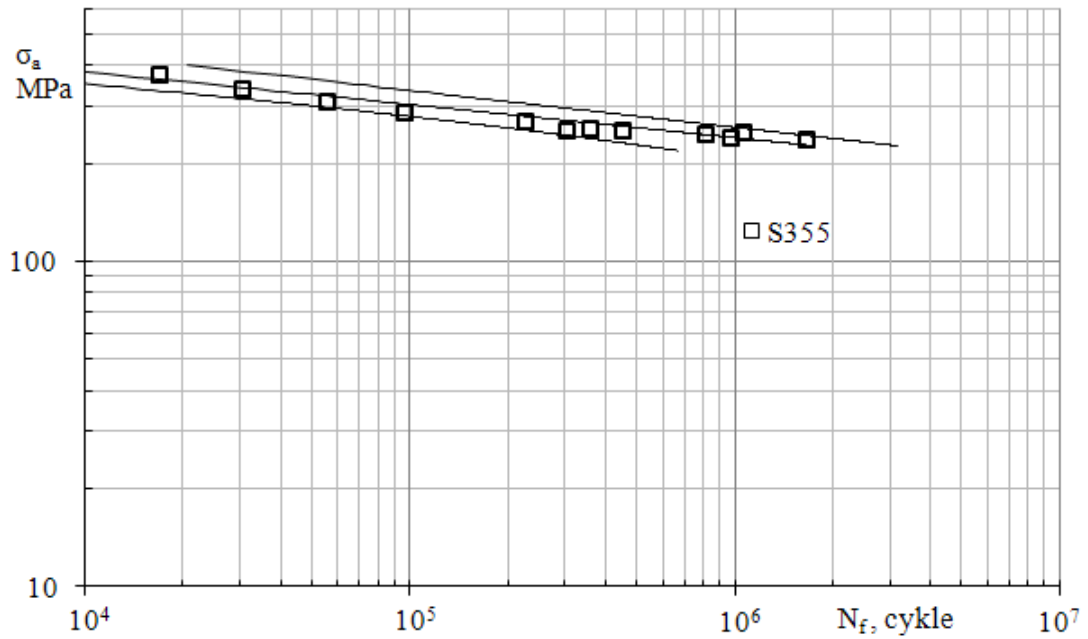
Gdzie: $\Delta A'$, $\Delta m'$ – przedziały ufności współczynników równania (2.6) dla prawdopodobieństwa uzyskania kolejnych wyników eksperymentalnych opisanych charakterystykami $S-N$ o współczynnikach $A' \pm \Delta A'$ oraz $m' \pm \Delta m'$ na poziomie 95%.

Wartości współczynnika R^2 zbliżone do jedności świadczą o wysokiej zgodności wyników eksperymentalnych oraz zastosowanego modelu.

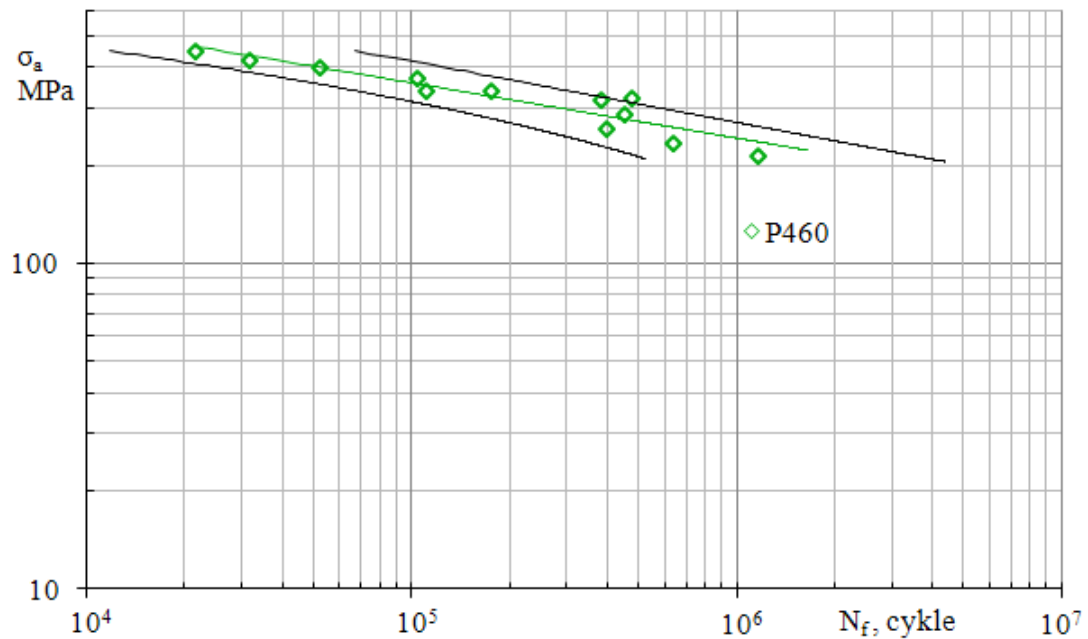
Na rysunkach 8.11 ÷ 8.13 przedstawiono charakterystyki zmęczeniowe $S-N$ materiałów podstawowych z naniesionymi pasmami rozrzutu dla prawdopodobieństwa uzyskania wyników w obrębie pasma na poziomie 95%.



Rys. 8.11. Charakterystyka zmęczeniowa $S-N$ stali S235 wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa na poziomie 95%



Rys. 8.12. Charakterystyka zmęczeniowa S-N stali S355 wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa na poziomie 95%



Rys. 8.13. Charakterystyka zmęczeniowa S-N stali S355 wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa na poziomie 95%

Rozpatrując uzyskane charakterystyki zmęczeniowe S-N przy uwzględnieniu wyników badań metalograficznych, w szczególności udziału objętościowego składników struktury oraz stopnia jej rozdrobnienia, można zaobserwować pewne prawidłowości. Zwiększanie udziału objętościowego perlitu oraz zmniejszanie średniej średnicy ziarna ferrytu prowadzi do istotnego wzrostu wytrzymałości statycznej i niskocyklowej stali. Gatunek P460, które-

go struktura zawierała 40 % pasmowo ułożonego perlitu wykazał jednak wyraźnie wyższą wrażliwość na działanie obciążeń cyklicznych od pozostałych materiałów. Ponadto dla elementów próbnych ze stali *P460* zaobserwowano największy rozrzut wyników prób zmęczeniowych. Stal *S355*, której struktura zawiera dwukrotnie wyższy udział perlitu w stosunku do *S235*, jednak znacznie bardziej rozproszonego w objętości materiału oraz wielkość ziarna ferrytu porównywalną ze stalą *P460*, wykazała najwyższą odporność na działanie obciążeń cyklicznych. Opierając się na wynikach przeprowadzonych prób zmęczeniowych można stwierdzić, że do zastosowań wymagających odporności na działanie zmiennych naprężeń w zakresie dużej liczby cykli $N_f > 10^6$ najwyższą przydatność wykazują materiały o znacznym rozdrobnieniu struktury oraz równomiernym rozmieszczeniu jej składników w objętości materiału.

8.5. Charakterystyki zmęczeniowe elementów ze spoiną jednoimienną

Testy zmęczeniowe elementów próbnych zawierających połączenie spawane jednoimienne prowadzono w analogiczny sposób jak elementów bez spoiny, jednak rolę koncentratora naprężeń spełniało w tym przypadku samo połączenie spawane. Wyniki badań eksperymentalnych zabrano w tabelach 8.5 ÷ 8.7.

Tab.8.5. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbnych ze spoiną *S235 – S235*

Poł. Sp.	Oznaczenie próbki	Naprężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S235 – S235	1	166,7	145000
	2	190,8	199600
	3	209,3	147500
	4	230,3	83800
	5	248,8	39600
	6	151,3	501700
	7	142,6	575300
	8*	129,8	10635000
	9	139,0	488500
	10	130,8	461600
	11	247,8	42500
	12	129,8	570000
	13	123,6	1567100
	14*	127,7	12165000
	15*	128,2	10468000

* - elementy próbne nie uległy zniszczeniu na zadanym poziomie obciążenia i nie były brane pod uwagę przy sporządzaniu charakterystyk zmęczeniowych.

Tab.8.6. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbných ze spoiną S355 – S355

Poř. Sp.	Oznaczenie próbki	Napřężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S355 – S355	1	168,8	453700
	2	188,8	249700
	3	226,2	347500
	4	251,9	214200
	5	269,8	107600
	6	289,3	156600
	7	309,8	98500
	8	326,3	78600
	9	165,7	819500
	10	137,5	1657000
	11	142,1	2396800
	12	158	1065700
	13	201,1	605400
	14*	120,1	8045600
	15*	118,6	10286000

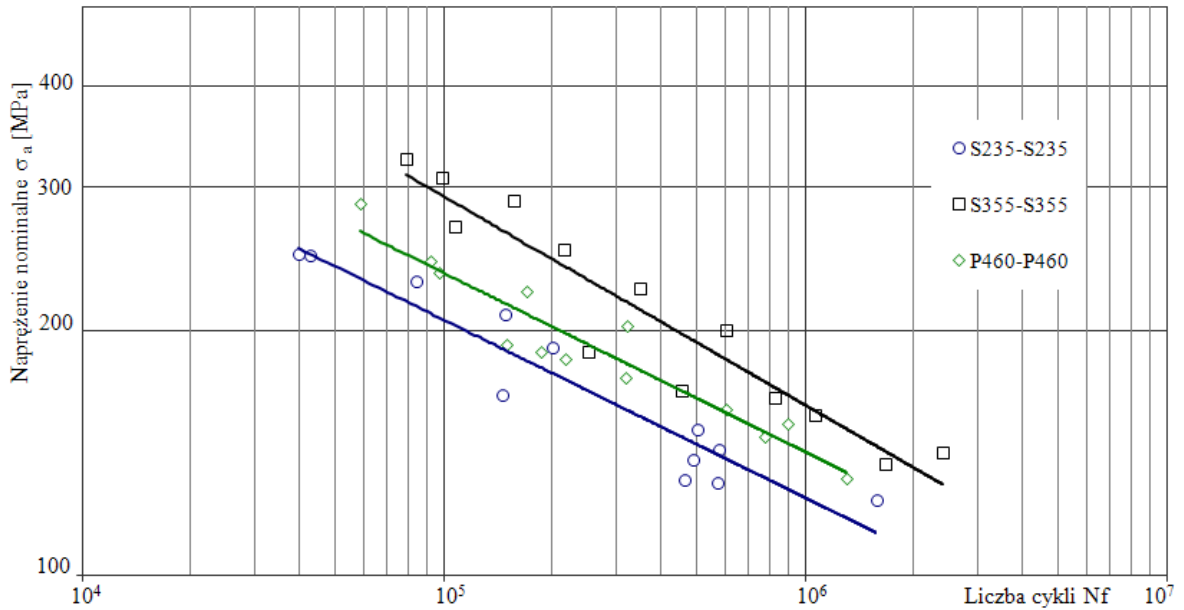
* - elementy próbne nie uległy zniszczeniu na zadanym poziomie obciążenia i nie były brane pod uwagę przy sporządzaniu charakterystyk zmęczeniowych.

Tab.8.7. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbných ze spoiną P460 – P460

Poř. Sp.	Oznaczenie próbki	Napřężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
P460 – P460	1	184,5	217600
	2	188,8	184800
	3	243,9	92100
	4	287,2	58700
	5	236,3	97400
	6	223,6	170100
	7*	122,6	9874000
	8	192,6	149500
	9	175,1	317000
	10	153,9	895400
	11	160,1	603400
	12	148,3	772000
	13	131,8	1298500
	14	202,9	320600
	15*	120,6	10243600

* - elementy próbne nie uległy zniszczeniu na zadanym poziomie obciążenia i nie były brane pod uwagę przy sporządzaniu charakterystyk zmęczeniowych.

Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych sporządzono charakterystyki zmęczeniowe $S - N$ w układzie podwójnie logarytmicznym, które przedstawiono na rys. 8.14.



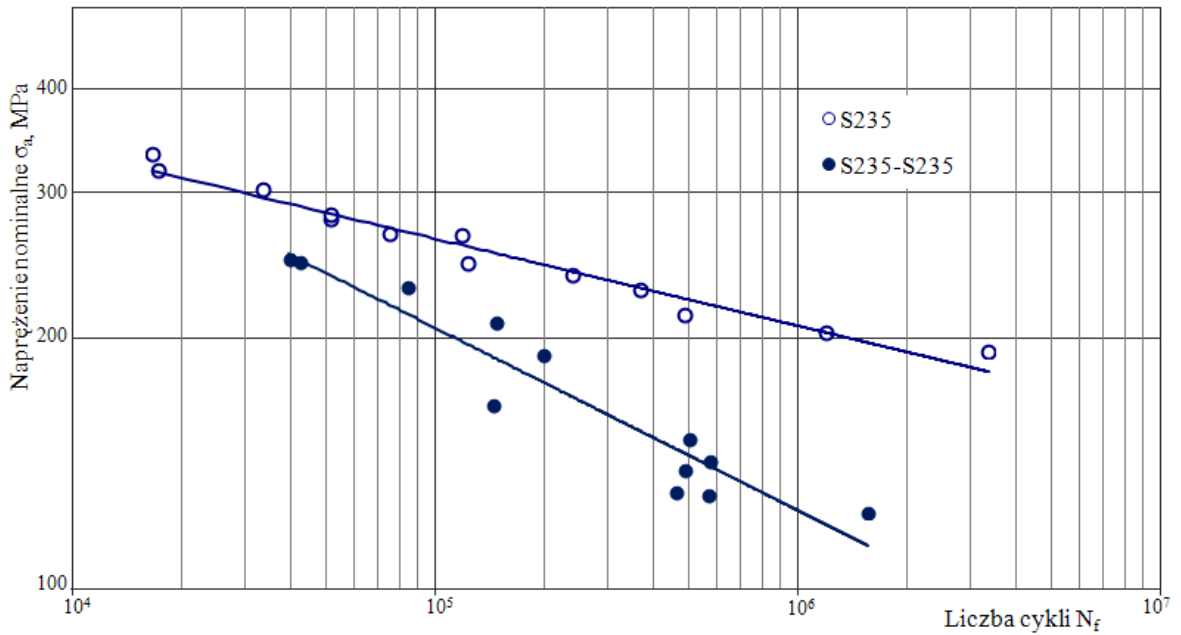
Rys. 8.14. Charakterystyki zmęczeniowe S-N połączeń spawanych jednoimiennych

Podobnie jak w przypadku elementów bez spoiny dokonano przybliżenia wyników za pomocą linii trendu, których równania doprowadzono do postaci zaproponowanej przez Basquina zgodnie z zapisem (2.6). Wyznaczone wartości zebrano w tabeli 8.8.

Tab.8.8. Wartości współczynników równania Basquina i współczynnika determinacji

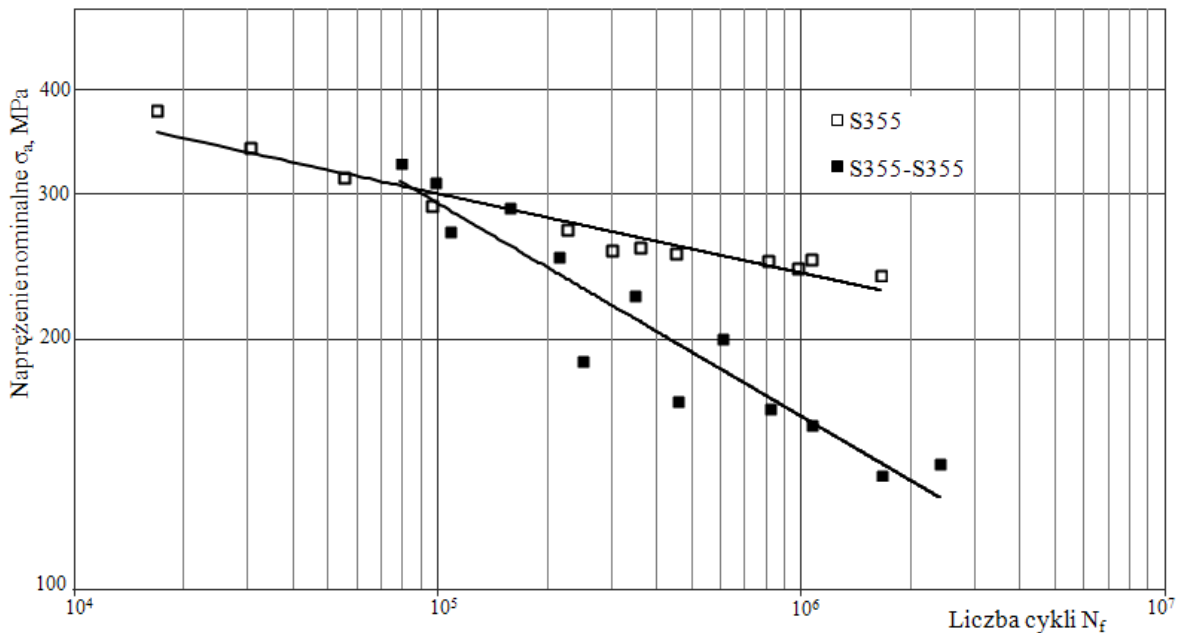
Połączenie spawane	Wartości współczynników i przedziały ufności				
	A'	m'	R^2	$\Delta A'$	$\Delta m'$
S235 – S235	15,55	-4,56	0,91	1,70	0,76
S355 – S355	13,98	-3,64	0,89	1,50	0,13
P460 – P460	15,75	-4,53	0,91	1,63	0,08

Testy zmęczeniowe elementów próbných ze spoiną jednoimienną wykazały znaczny spadek dopuszczalnych naprężeń wraz ze wzrostem liczby cykli w stosunku do materiałów podstawowych. Można odnotować pewne zróżnicowanie trwałości zmęczeniowej w zależności od materiału, które nie odpowiada wynikom prób statycznych. Dla celów uwidocznienia wpływu obecności spoiny na trwałość zmęczeniową na rysunkach 8.15 ÷ 8.17 zestawiono wyniki uzyskane dla danego materiału rodzimego oraz jego jednoimiennego połączenia spawanego.

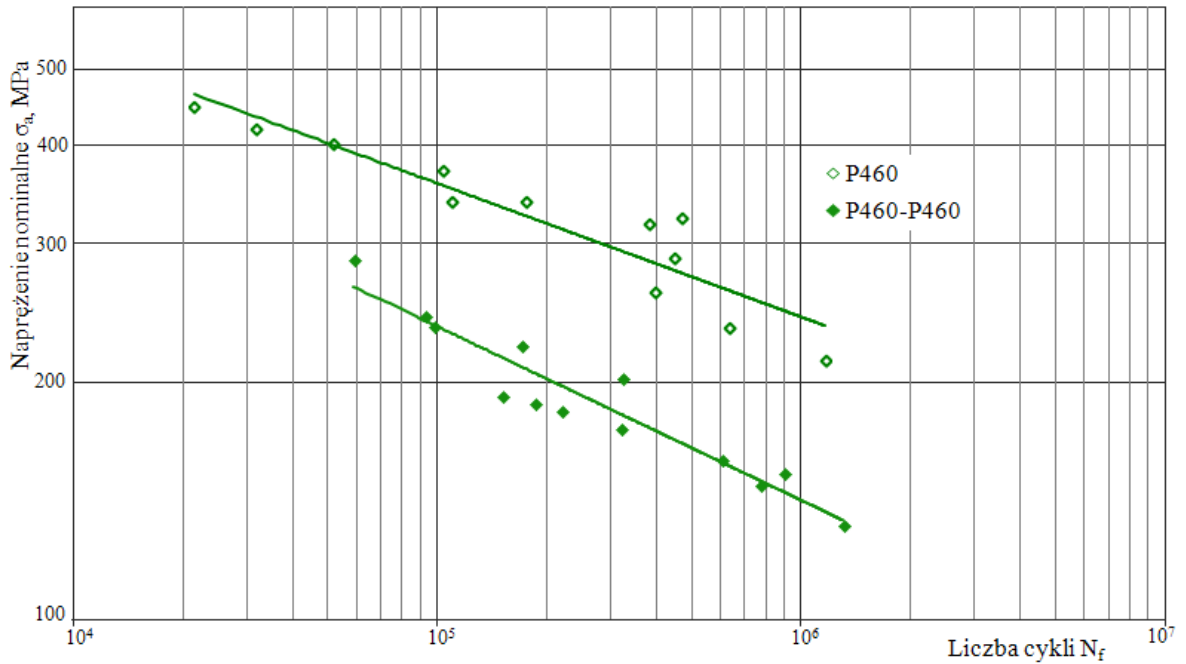


Rys. 8.15. Charakterystyki zmęczeniowe S-N materiału podstawowego S235 i jego połączenia spawanego jednoimiennego

W przypadku materiału S355 jako jedyne w analizowanym zestawieniu trwałość zmęczeniowa połączenia spawanego przewyższa trwałość materiału podstawowego, co zachodzi dla liczby cykli $N_f \approx 10^5$ cykli, jak widać na rysunku 8.16.



Rys. 8.16. Charakterystyki zmęczeniowe S-N materiału podstawowego S355 i jego połączenia spawanego jednoimiennego



Rys. 8.17. Charakterystyki zmęczeniowe S-N materiału podstawowego P460 i jego połączenia spawanego jednoimiennego

Niekorzystny wpływ połączenia spawanego na trwałość zmęczeniową wzrasta wraz z liczbą cykli, szczególnie dla stali S235 oraz S355. Dla stali P460 przebiegi charakterystyk S-N materiału podstawowego i połączenia spawanego jest wręcz równoległy.

8.6. Charakterystyki zmęczeniowe elementów ze spoiną różnoimienną

Wyniki prób zmęczeniowych połączeń różnoimiennych zebrano w tabelach 8.9 ÷ 8.11.

Tab.8.9. Wyniki testów zmęczeniowych elementów próbných ze spoiną S235 – S355

Poł. Sp.	Oznaczenie próbki	Naprężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S235 – S355	1	151,3	1419900
	2	130,8	1674100
	3*	119,0	11876600
	4	162,6	1045200
	5	179,5	909200
	6	187,8	722700
	7	207,8	170700
	8	217,5	137600
	9	202,6	292300
	10	228,3	130000
	11	131,3	3273600
	12	228,8	100400
	13	244,2	114900
	14	297,5	19600
	15	266,7	41000

* - element próbny nie uległ zniszczeniu na danym poziomie obciążenia i nie był brany pod uwagę przy sporządzaniu charakterystyk zmęzeniowych.

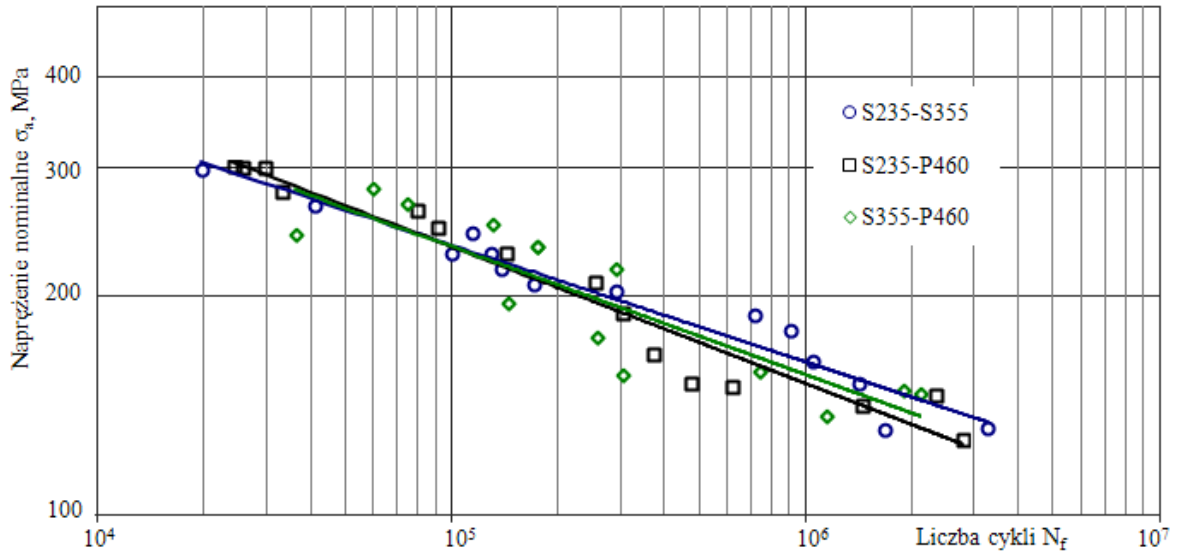
Tab.8.10. Wyniki testów zmęzeniowych elementów próbnych ze spoiną S235 – P460

Poř. Sp.	Oznaczenie próbki	Napężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S235 – P460	1	141,1	1441300
	2	300,1	25500
	3	279,1	33000
	4	262,6	79400
	5	248,8	90400
	6	228,8	141000
	7	209,3	252800
	8	189,8	302900
	9	166,7	368400
	10	151,3	470600
	11	126,7	2770200
	12	300,1	29500
	13	301,1	24000
	14	146,2	2322500
	15	150,3	614600

Tab.8.11. Wyniki testów zmęzeniowych elementów próbnych ze spoiną S355 – P460

Poř. Sp.	Oznaczenie próbki	Napężenie nominalne σ_a , MPa	Liczba cykli N_f
S355 – P460	1	280,1	60100
	2	266,9	75100
	3	250,9	130200
	4	242,5	36100
	5	233,5	174300
	6	233,1	174300
	7	218	290300
	8	195,4	145100
	9	175,6	258900
	10	155,8	305200
	11	136,5	1149400
	12	146,4	2111600
	13	147,8	1897300
	14	157,2	743200

Na bazie otrzymanych wyników eksperymentalnych wykreślono charakterystyki $S-N$ w układzie podwójnie logarytmicznym, jak przedstawiono na rys. 8.18.



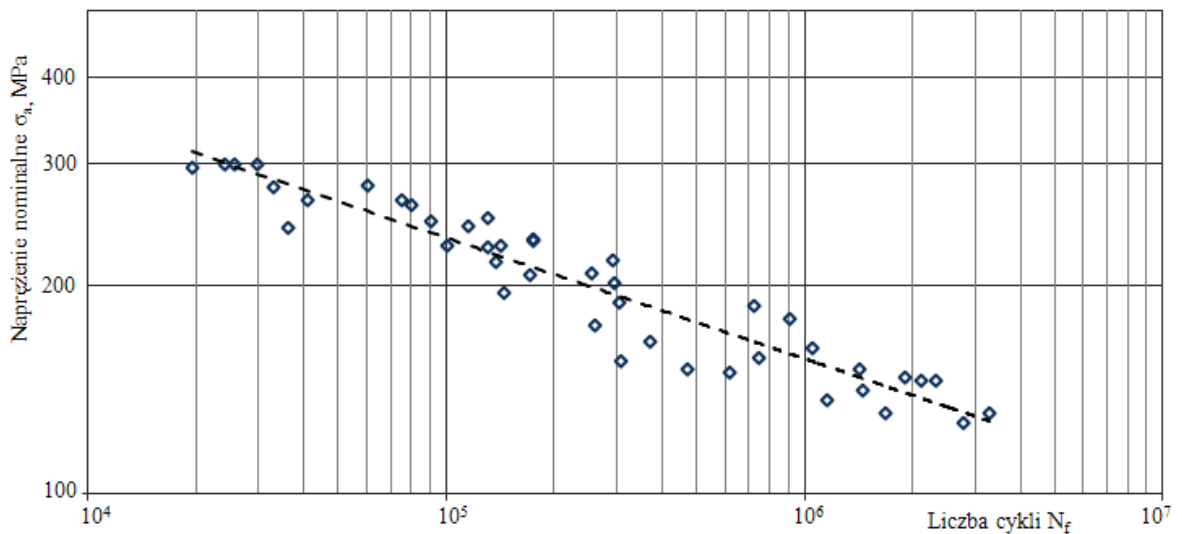
Rys. 8.18. Charakterystyki zmęczeniowe S-N połączeń spawanych dwuimiennych

Wartości współczynników A' i m' równania Basquina dla połączeń różnoimiennych oraz dla wspólnej charakterystyki połączeń niejednorodnych przedstawiono w tabeli 8.12.

Tab. 8.12. Wartości współczynników równania Basquina oraz współczynnika determinacji

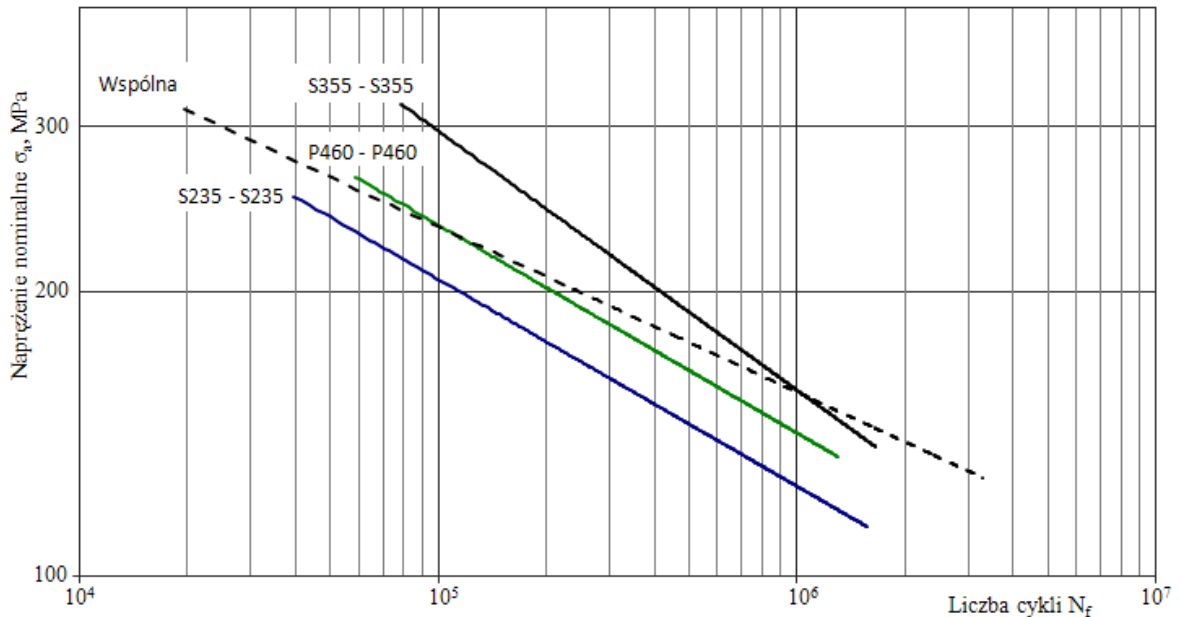
Połączenie spawane	Wartości współczynników i przedziały ufności				
	A'	m'	R^2	$\Delta A'$	$\Delta m'$
S235 – S355	19,92	-6,29	0,93	1,63	0,11
S235 – P460	17,5	-5,28	0,94	1,32	0,15
S355 – P460	18,43	-5,67	0,79	2,75	0,18
Wspólna	18,55	-5,71	0,90	1,13	0,28

Na podstawie wszystkich wyników eksperymentalnych odnoszących się do połączeń różnoimiennych wykreślono wspólną charakterystykę, której przebieg pokazano na rysunku 8.19.



Rys.8.19. Wspólna charakterystyka zmęczeniowa S-N dla połączeń spawanych różnoimiennych

Charakterystyki zmęczeniowe elementów ze spoiną doczołową różnoimiennych gatunków stali, mimo największych różnic składu chemicznego użytych do ich wykonania materiałów wykazały największe podobieństwo przebiegu. Wartości współczynników równania Basquina wskazują, że najbardziej zbliżony do charakterystyki wspólnej przebieg wykazała charakterystyka połączenia S355 – P460. W celu oceny wytrzymałości zmęczeniowej spoin jednorodnych na tle mieszanych, wykreślono ich wyniki razem, co przedstawiono na rysunku 8.20.

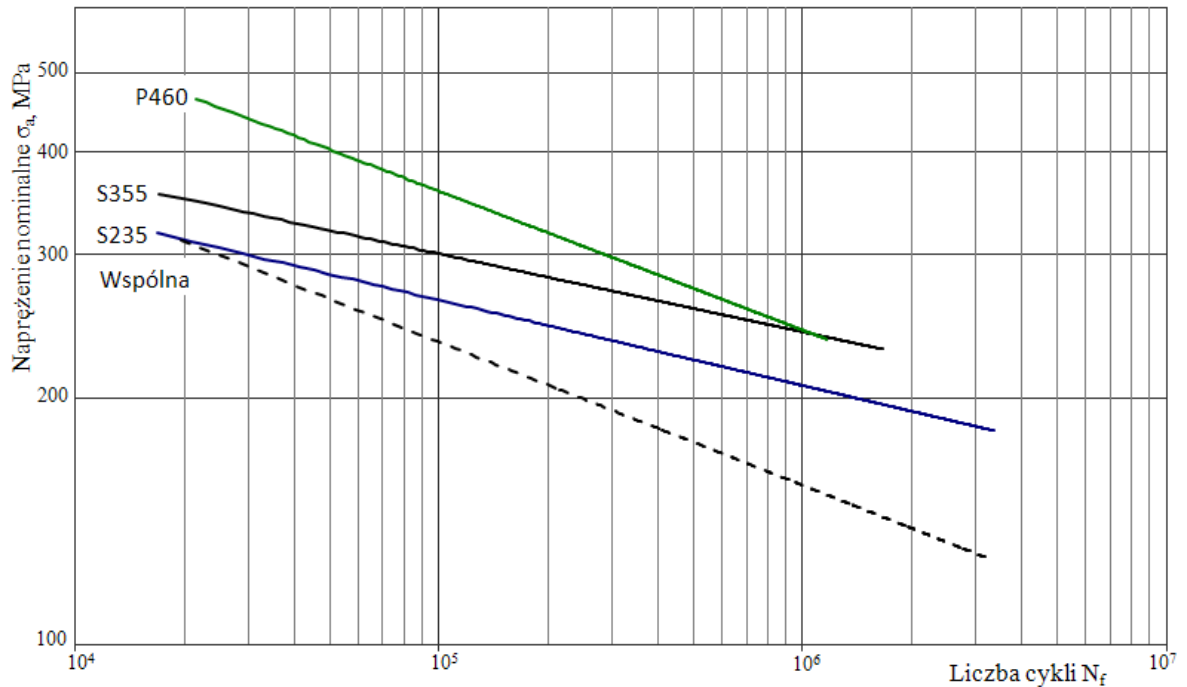


Rys. 8.20. Wspólna charakterystyka zmęczeniowa S-N dla połączeń spawanych dwuimiennych na tle połączeń jednoimiennych

Wykreślenie zbiorczej charakterystyki dla połączeń różnoimiennych na tle wyników uzyskanych dla połączeń jednakowych materiałów uwidoczniło interesujące właściwości.

W zakresie rozpatrywanej ilości cykli do zniszczenia elementu, a więc w przedziale $N_f = 2 \cdot 10^4 \div 10^6$ cykli trwałość zmęczeniowa połączenia jednorodnego S235 – S235 była niższa od trwałości połączeń niejednorodnych. Dla liczby cykli rzędu $N_f = 10^5$ wartość naprężeń nominalnych dla połączeń różnoimiennych odpowiadała wartości otrzymanej dla połączenia stali o najwyższych parametrach wytrzymałościowych statycznych, czyli P460 – P460. Natomiast dla liczby cykli $N_f = 10^6$ połączenia różnoimienne wykazały trwałość zbliżoną do najbardziej wytrzymałego z połączeń jednoimiennych, a mianowicie do S355 – S355. Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że dla liczby cykli powyżej $N_f = 10^6$ badane połączenia spawane dwuimiennie wykazały wyższą trwałość od połączeń wykonanych z tych samych materiałów.

Na rysunku 8.21 zestawiono charakterystyki $S-N$ wyznaczone na podstawie testów zmężeńiowych materiałów podstawowych ze wspólną charakterystyka wykreśloną dla trzech rodzajów połączeń dwumiennych rozpatrywanych w pracy.



Rys. 8.21. Charakterystyki zmęzeniowe $S-N$ materiałów podstawowych w zestawieniu ze wspólną charakterystyką zmęzeniową połączeń spawanych dwumiennych

Wszystkie przedstawione charakterystyki stanowią mediany rozkładu wyników dyskretnych otrzymanych podczas badań eksperymentalnych, a więc teoretyczne prawdopodobieństwo uzyskania kolejnych wyników eksperymentalnych leżących zarówno powyżej, jak i poniżej każdej charakterystyki wynosi 50%. Taka forma prezentacji dobrze obrazuje pewne trendy i ogólne współzależności wynikające głównie z właściwości samego materiału i wpływu połączenia spawanego, jednak jest mało przydatna z punktu widzenia możliwości jej praktycznego wykorzystania przy projektowaniu nowych elementów, dlatego w następnym podrozdziale dokonano ich obróbki statystycznej zgodnie z równaniem (8.8) oraz zestawiono z istniejącymi wytycznymi do projektowania elementów spawanych narażonych na zmęczenie.

8.7. Wartości funkcji zmęzeniowego współczynnika działania karbu K_f

Zmęzeniowy współczynnik działania karbu dla połączeń spawanych niesie informację na temat rzeczywistej względnej zmiany trwałości danego materiału wywołanej obecnością połączenia spawanego i szeregiem zjawisk towarzyszących procesowi spawania. Określany jest on najczęściej dla liczby cykli wynoszącej $N_f = 10^6$, jednak może też

być wyrażany w formie funkcji liczby cykli do zniszczenia materiału zgodnie z zapisem (3.10).

8.7.1. Połączenia spawane jednoimienne

Przeprowadzenie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem elementów próbnych gładkich, jak i zawierających karb spawalniczy pozwoliło uzyskać informacje odnośnie przebiegu funkcji zmęczeniowego współczynnika działania karbu K_f dla jednoimiennych i różnoimiennych połączeń spawanych badanych gatunków stali zgodnie z równaniem (3.8). W tabeli 8.13 przedstawiono wartości współczynnika K_f dla wybranych poziomów liczby cykli N_f z zakresu objętego badaniami eksperymentalnymi.

Tab. 8.13. Wartości współczynnika K_f w funkcji liczby cykli dla połączeń spawanych jednoimiennych

Material	$K_f(10^5)$	$K_f(5 \cdot 10^5)$	$K_f(10^6)$
S235 - S235	1,27	1,53	1,65
S355 - S355	1,02	1,32	1,47
P460 - P460	1,52	1,65	1,71

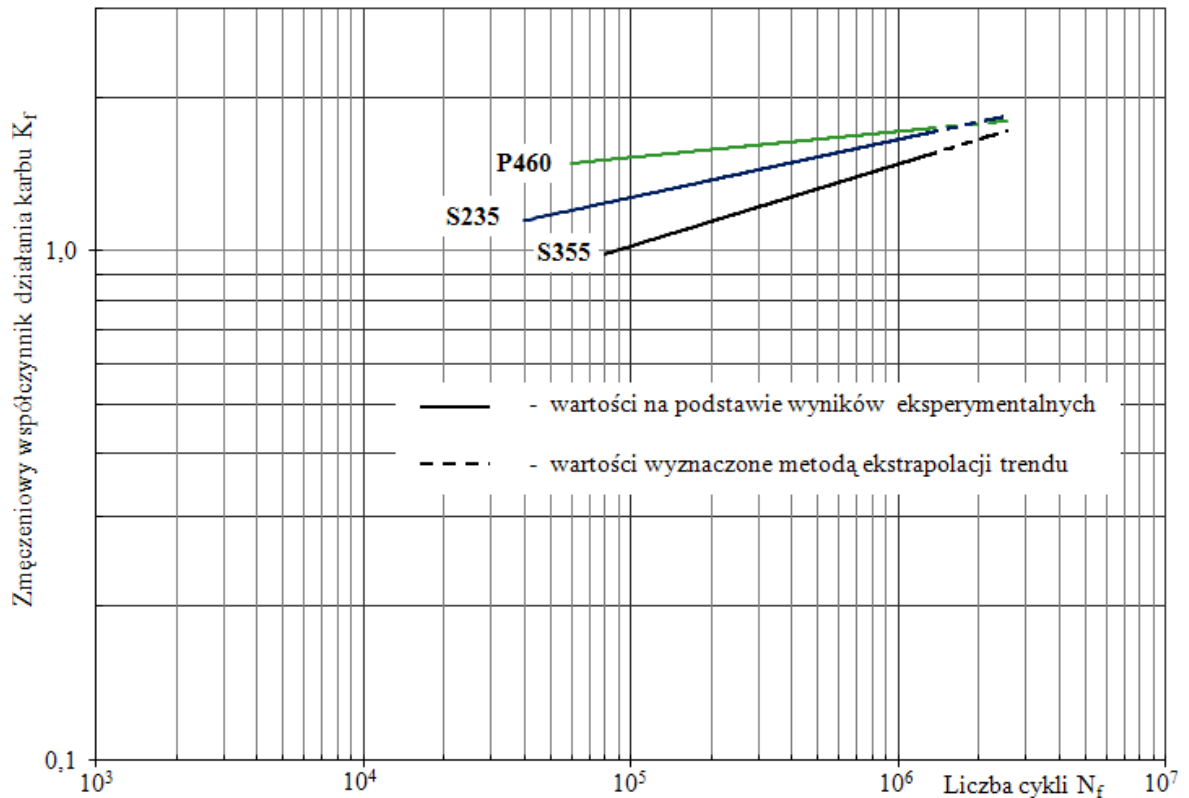
Zgodnie z zapisem (3.10) funkcje $K_f(N_f)$ dla poszczególnych połączeń jednoimiennych przyjmują postać:

- S235 – S235
$$K_f(N_f) = 1,65 \cdot \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{0,0725} \quad (8.9)$$

- S355 – S355
$$K_f(N_f) = 1,47 \cdot \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{0,0558} \quad (8.10)$$

- P460 – P460
$$K_f(N_f) = 1,71 \cdot \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{0,0777} \quad (8.11)$$

Na rysunku 8.22 przedstawiono przebiegi funkcji $K_f(N_f)$ dla elementów z karbem w postaci jednoimiennego doczołowego połączenia spawanego poddanego wahadłowemu zginaniu.



Rys.8.22. Wykresy funkcji zmęczeniowego współczynnika działania karbu $K_f(N_f)$ dla jednoimien-nych doczołowych połączeń spawanych poddanych wahadłowemu zginaniu poprzecznemu

Analizując przebiegi wyznaczonych funkcji $K_f(N_f)$ można zauważyć ich zbieżność w zakresie dużej liczby cykli $N_f = 10^6 \div 10^7$, co świadczy o tym, że niezależnie od materiału podstawowego badane elementy próbne zawierające połączenia spawane jednoimienne wykazywały podobny względny spadek trwałości zmęczeniowej w zakresie wysokiej liczby cykli, niż podobne elementy wykonane z tych samych materiałów, lecz nie zawierających koncentratora naprężeń w postaci złącza spawanego. Gatunek S355 wykazał brak wrażliwości na działanie karbu spawalniczego w zakresie liczby cykli $N_f \leq 10^5$. Przyglądając się wartościom w tabeli można zauważyć, że tworzą one niejako pewien ciąg, a mianowicie stal S355 dla liczby cykli $N_f = 5 \cdot 10^5$ wykazała porównywalną wrażliwość na działanie karbu spawalniczego co stal S235 dla $N_f = 10^5$ cykli, natomiast dla liczby cykli na poziomie $N_f = 10^6$ stal S355 odznaczała się wrażliwością na działanie karbu porównywalną z wrażliwością stali S235 dla $N_f = 5 \cdot 10^5$ cykli oraz P460 dla $N_f = 10^5$. Przebieg funkcji zmęczeniowego współczynnika działania karbu dla materiału P460 charakteryzuje się najwyższymi wartościami i najmniejszą względną zmianą wartości w przedziale $N_f = 10^5 \div 10^6$ cykli, co oznacza, że materiał o najwyższych parametrach wytrzymało-

ściowych statycznych utracił stosunkowo najwięcej ze swej wytrzymałości zmęczeniowej w całym rozpatrywanym zakresie liczby cykli.

8.7.2. Połączenia spawane dwuimienne

Ponieważ dla połączeń spawanych różnych materiałów wykreślono jedną wspólną charakterystykę zmęczeniową $S-N$, do celów wyznaczenia przebiegu funkcji $K_f(N_f)$ tych połączeń porównano wartości tej charakterystyki do charakterystyk uzyskanych dla każdego materiału z osobna. Wartości funkcji dla wybranych poziomów liczby cykli N_f z zakresu objętego badaniami eksperymentalnymi przedstawiono w tabeli 8.14.

Tab. 8.14. Wartości współczynnika K_f w funkcji liczby cykli dla połączeń spawanych dwuimiennych na podstawie uśrednionej charakterystyki $S-N$

Material	$K_f(10^5)$	$K_f(5 \cdot 10^5)$	$K_f(10^6)$
S235	1,12	1,25	1,32
S355	1,27	1,44	1,53
P460	1,52	1,53	1,54

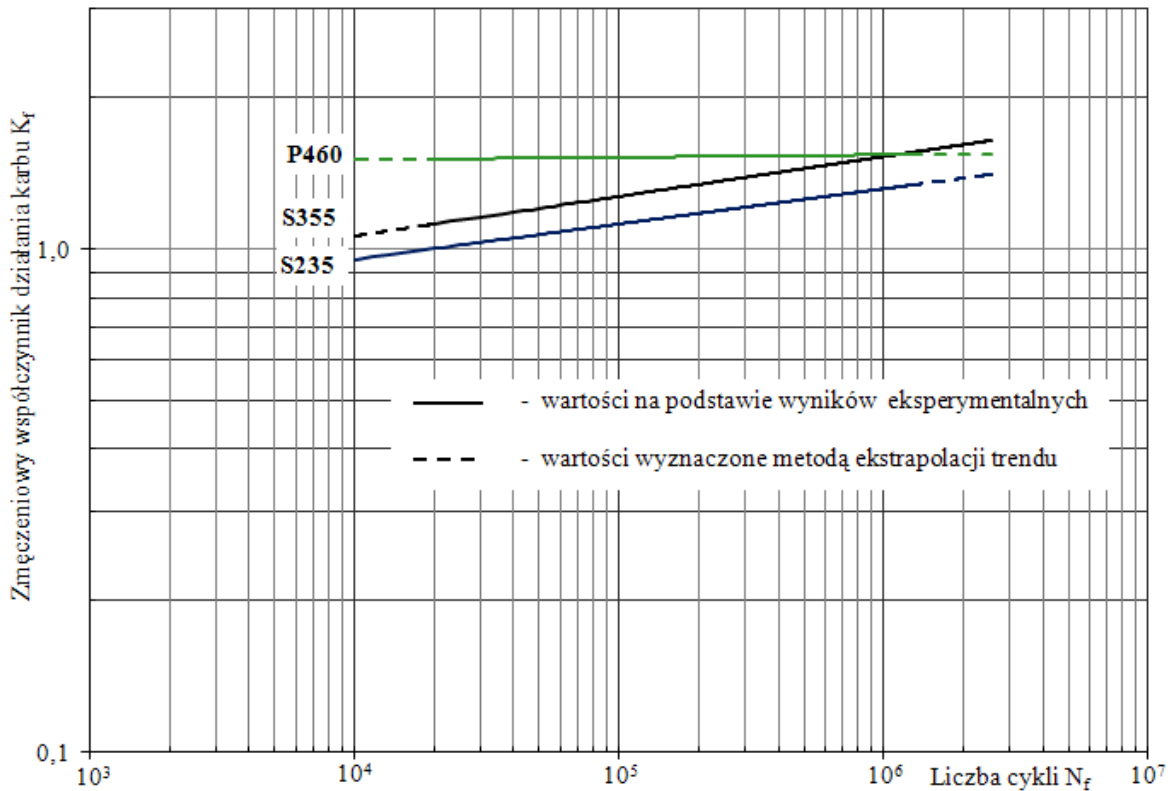
Funkcje $K_f(N_f)$ zgodnie z zapisem (3.10) dla poszczególnych połączeń różnoimiennych przyjmują postać:

- S235
$$K_f(N_f) = 1,32 \cdot \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{0,0402} \quad (8.12)$$

- S355
$$K_f(N_f) = 1,53 \cdot \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{0,0616} \quad (8.13)$$

- P460
$$K_f(N_f) = 1,54 \cdot \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{0,0625} \quad (8.14)$$

Przebiegi funkcji $K_f(N_f)$ zaprezentowano na rys. 8.23.



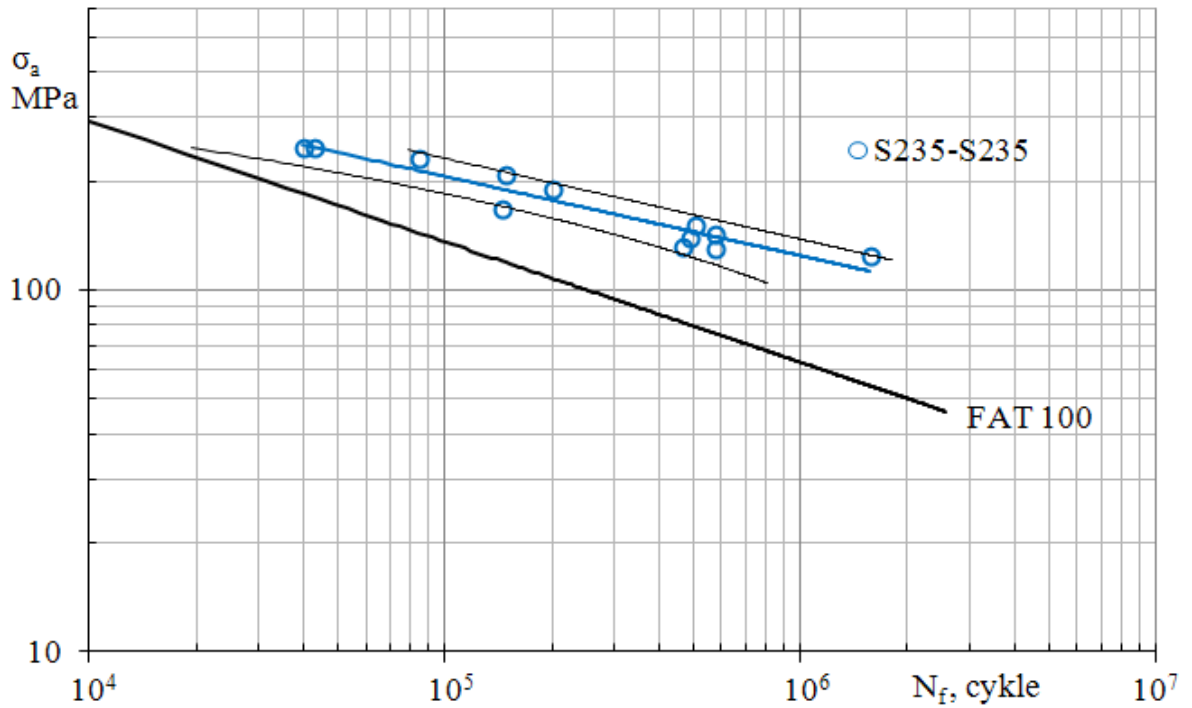
Rys. 8.23. Wykresy funkcji $K_f(N_f)$ dla wspólnej charakterystyki S-N dwumiennych doczołowych połączeń spawanych w stosunku do każdego z materiałów podstawowych

Wytrzymałość zmęzeniowa materiałów podstawowych zestawiona z uśrednioną wytrzymałością połączeń spawanych dwumiennych wskazuje, że stale o wyższej wytrzymałości tracą relatywnie więcej ze swych właściwości w stosunku do stali podstawowej w zakresie liczby cykli $N_f = 10^4 \div 10^6$. Podobnie jak w przypadku połączeń materiałów jednoimienych przebieg funkcji $K_f(N_f)$ dla stali P460 miał najbardziej stały charakter.

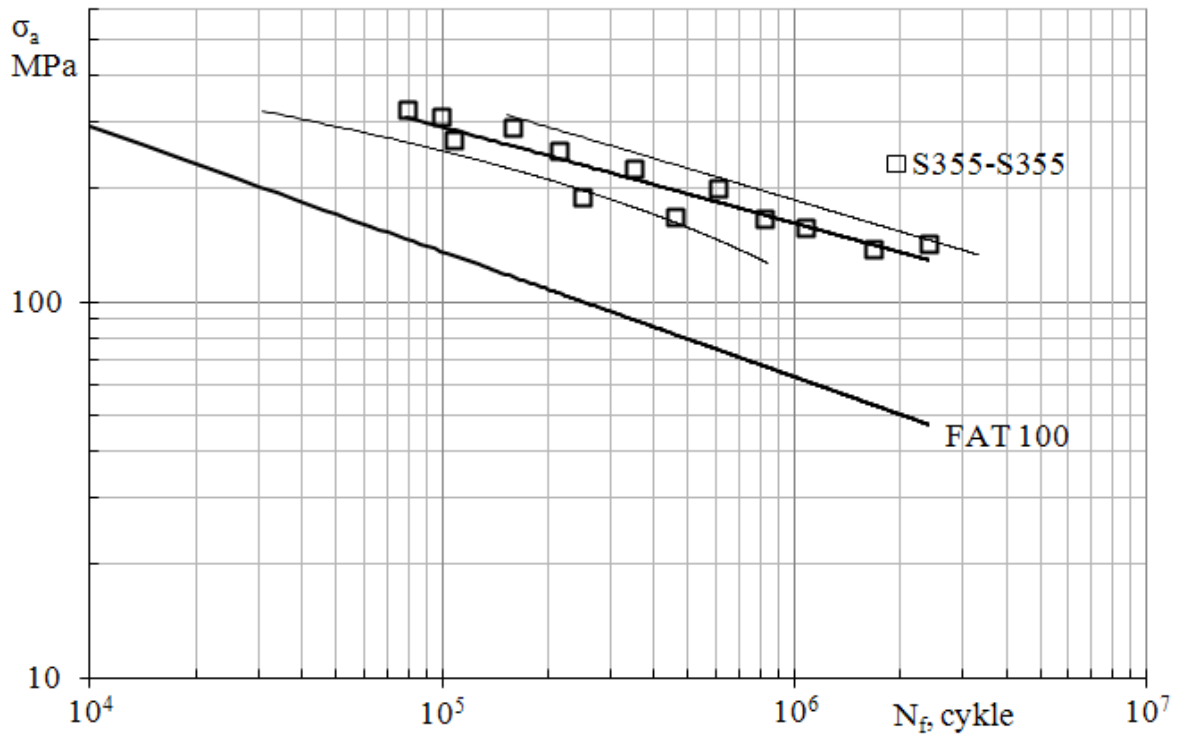
8.8. Wyniki badań eksperymentalnych w świetle zaleceń IIW

Wskazówki odnośnie projektowania elementów spawanych podlegających działaniu obciążeń cyklicznych przedstawione w postaci kategorii FAT [36] prezentują efektywny zakres naprężeń $\Delta\sigma$ jakim poddany może być konkretny detal konstrukcyjny dla prawdopodobieństwa jego przetrwania wynoszącego 95%. W celu porównania wyników badań eksperymentalnych z wytycznymi IIW dla sklasyfikowanego elementu konstrukcyjnego o porównywalnej geometrii, dokonano ich analizy statystycznej zgodnie z tokiem postępowania przedstawionym w punkcie 8.4. Na rysunkach 8.24 ÷ 8.27 przedstawiono pasma rozrzutu wyników dla prawdopodobieństwa 95% zestawione z odpowiadającą geometrii złącza i sposobowi obciążenia kategorią zmęzeniową FAT100, która dla liczby cykli $N_f = 2 \cdot 10^6$ dopuszcza zakres zmiany naprężenia o wysokości $\Delta\sigma = 100 \text{ MPa}$, który zgod-

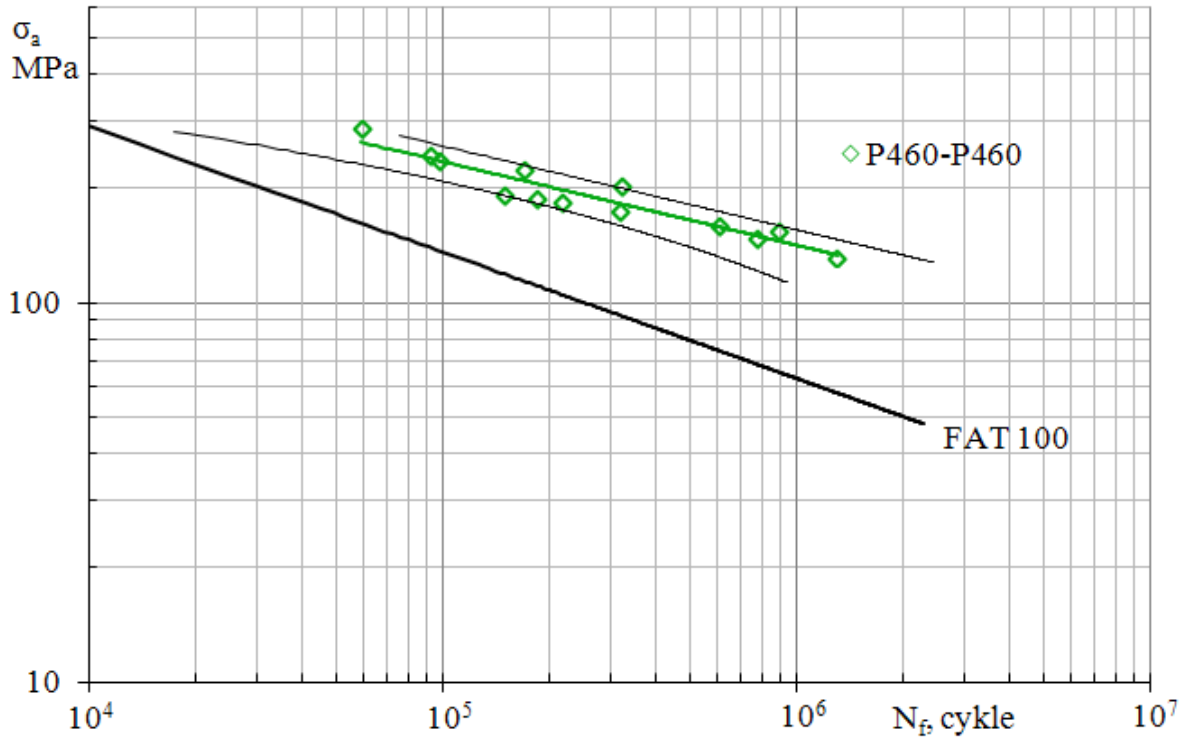
nie z wzorem (2.2) odpowiada maksymalnej wartości amplitudy naprężenia równej $\sigma_a = 50 \text{ MPa}$. Wyniki przedstawiono w postaci charakterystyk $S - N$.



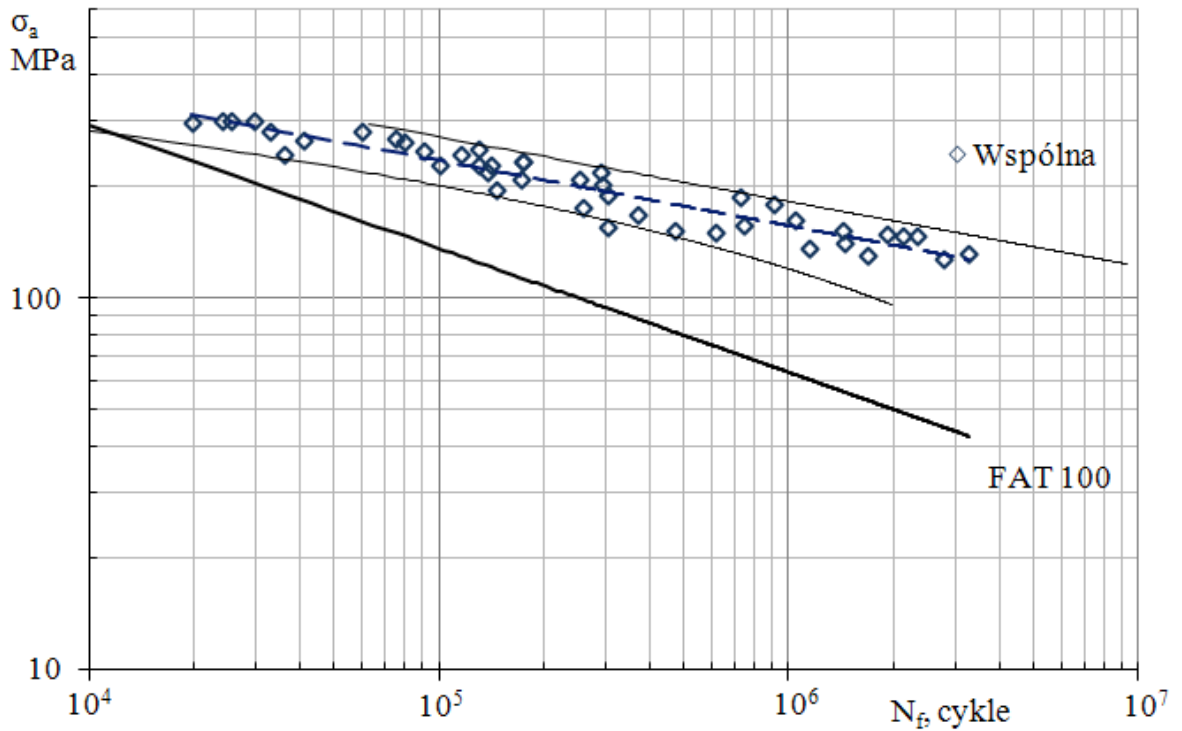
Rys. 8.24. Charakterystyka $S-N$ połączenia spawanego S235-S235 wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa 95% na tle FAT100



Rys. 8.25. Charakterystyka $S-N$ połączenia spawanego S355-S355 wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa 95% na tle FAT100



Rys. 8.26. Charakterystyka S-N połączenia spawanego P460-P460 wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa 95% na tle FAT100



Rys.8.27. Charakterystyka S-N połączeń spawanych różnoimiennych wraz z pasmem rozrzutu dla prawdopodobieństwa 95% na tle FAT100

W każdym przypadku charakterystyki zmęczeniowe otrzymane na podstawie wyników badań eksperymentalnych położone były powyżej charakterystyki *FAT 100*. Zalecenia *IIV* dla rozpatrywanego przypadku geometrii i obciążenia spoiny predestynują wyznaczenie stopnia wyężenia materiału przy użyciu metody „hot spot”. W niniejszej pracy wartości naprężenia wyznaczano na podstawie metod nominalnych. Analizując przebieg charakterystyk eksperymentalnych oraz *FAT*, zauważyć można, trwałość zmęczeniowa rzeczywistych połączeń spawanych obniża się łagodniej, niż zakłada to przebieg *FAT*. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że projektowanie doczołowych połączeń spawanych podlegających zmęczeniowemu zginaniu można w sposób bezpieczny prowadzić w oparciu o naprężenia nominalne i kategorie *FAT*. Uwzględnienie geometrycznego współczynnika koncentracji naprężeń wyznaczonego z użyciem *MES* za pomocą promienia referencyjnego $r_{ref} = 1 \text{ mm}$, powoduje dalsze zawyżenie wartości eksperymentalnych w stosunku do *FAT* o współczynnik $K_w = 1,69$.

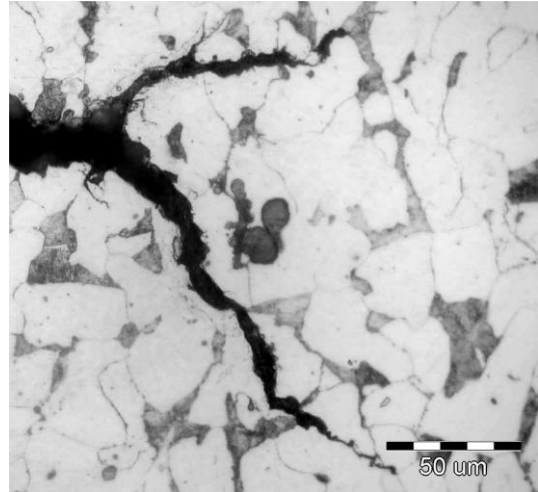
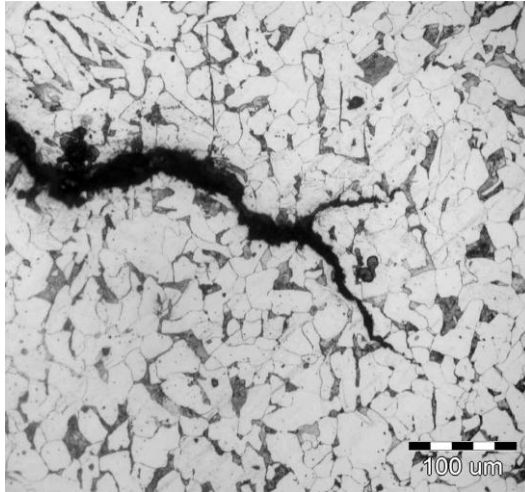
8.9. Obserwacje pęknięć i przelomów zmęczeniowych

8.9.1. Obserwacja pęknięć zmęczeniowych materiałów podstawowych

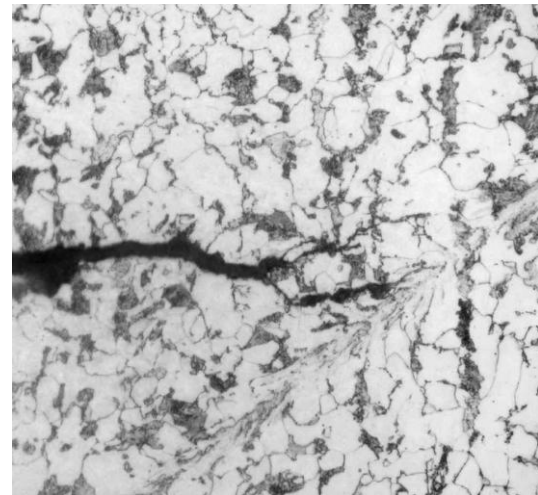
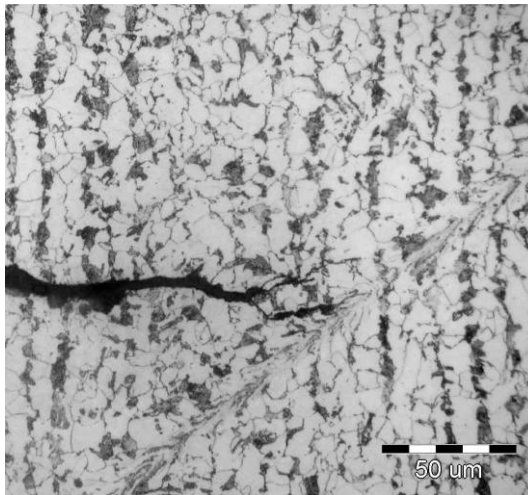
Rozwój pęknięć zmęczeniowych w materiale jest silnie związany z jego strukturą. Przebieg pęknięć może zachodzić po granicach ziaren (pęknięcie interkrystaliczne), poprzez ziarna materiału (pęknięcie transkrystaliczne) lub wykazywać charakter mieszany, występujący w przypadku badanych materiałów. Zgłady metalograficzne przygotowano z elementów próbnych z każdego gatunku materiału, które uległy zniszczeniu po liczbie cykli obciążenia N_f wynoszącej: *S235* – 490600 cykli, *S355* – 448900 cykli oraz *P460* – 471200 cykli. We wszystkich przypadkach front pęknięcia zmęczeniowego uległ rozgałęzieniu. Ze wzrostem parametrów wytrzymałościowych materiału zauważono wyraźny spadek szerokości pęknięcia zmęczeniowego. Wraz ze wzrostem długości pęknięć zmieniał się charakter ich przebiegu ze zbliżonego do prostoliniowego i normalnego do powierzchni zewnętrznej na meandrujący i przyjmujący kierunek naprężeń stycznych. Obserwowano także pęknięcia wtórne, które w materiałach wykazujących pasmowość struktury przyjmowały orientację zgodną z kierunkiem pasm perlitu i ferrytu.

Na podstawie analizy szerokości szczeliny można zauważyć, że propagacja pęknięcia w stali *S235* zachodzi przy znacznie wyższym udziale odkształceń plastycznych w stosunku do pozostałych materiałów.

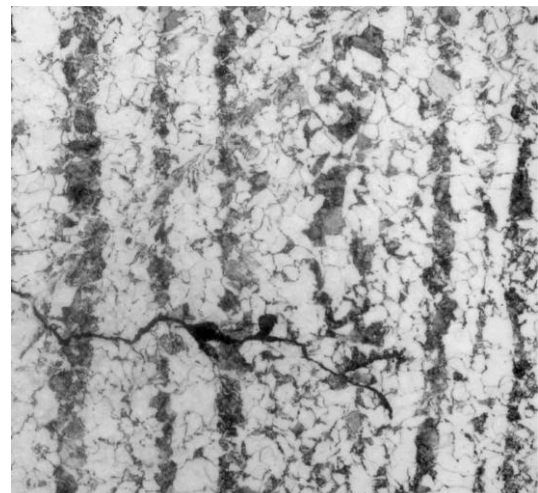
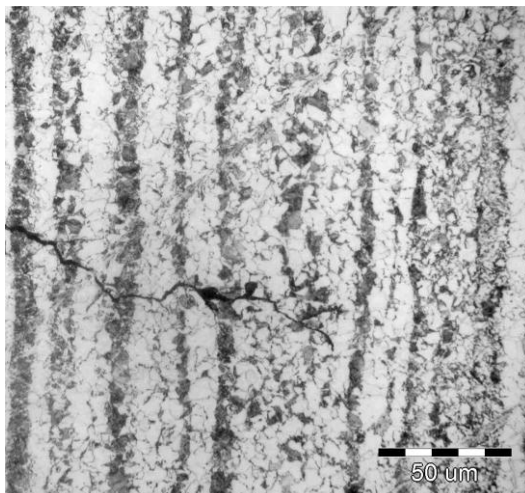
Obserwacje miały charakter jakościowy, a ich wyniki przedstawiono na rys. 8.28.



Front pęknięcia zmęczeniowego w stali S235



Front pęknięcia zmęczeniowego w stali S355



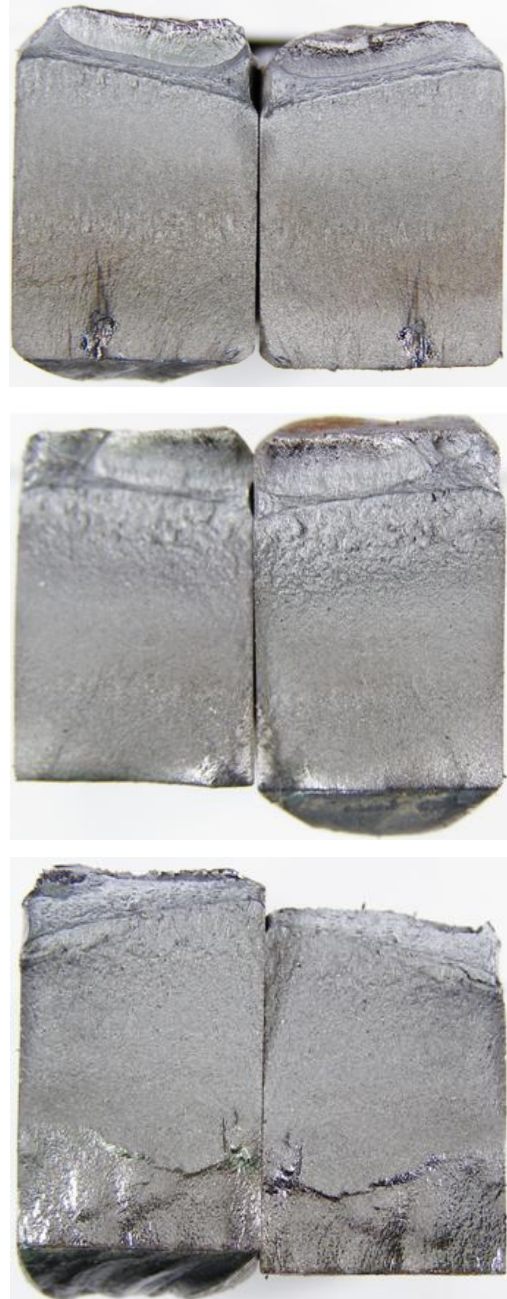
Front pęknięcia zmęczeniowego w stali P460

Rys. 8.28. Fronty pęknięć zmęczeniowych wybranych elementów próbnych

8.9.2. Obserwacja przelomów zmęczeniowych elementów spawanych

Na rysunku 8.29 przedstawiono fotografie przykładowych przelomów zmęczeniowych wraz z podstawowymi danymi pozwalającymi na identyfikację parametrów ich powstawania.

- S235 - 235
 - $N_f = 501700$ cykli
 - $\sigma_a = 151$ MPa
 - Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego od niezgodności w grani spoiny
-
- S355 - 355,
 - $N_f = 249700$ cykli
 - $\sigma_a = 189$ MPa
 - Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego od naroża po stronie grani spoiny
-
- P460 - P460
 - $N_f = 895000$ cykli
 - $\sigma_a = 154$ MPa
 - Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego od linii wtopienia po stronie grani spoiny



Rys. 8.29. Przykładowe obrazy przelomów zmęczeniowych elementów ze spoiną jednoimienną poddanych zginaniu wahadłowemu

Obserwując powstałe w wyniku zmęczenia przelomy można zauważyć charakterystyczne jego strefy. Inicjacja pęknięcia zachodzi najczęściej w obrębie najsłabszego punktu połączenia jaki może stanowić niezgodność spawalnicza, naroże, bądź obszar występowania

najwyższego gradientu temperatury zorientowany wzdłuż linii wtopienia po stronie grani spoiny, w szczególności dla spawania bez podgrzewania wstępnego. Propagacja pęknięć zmęczeniowych następowała w kierunku prostopadłym do kierunku działania największych naprężeń normalnych zarówno w obrębie strefy wpływu ciepła jak i w głąb stopiwa. Oceniając wielkość powierzchni przełomu doraźnego można stwierdzić, że pęknięcie zmęczeniowe zachodziło przy obciążeniach bardzo niskich w stosunku do tych, które były by w stanie wywołać odkształcenie plastyczne w przekroju elementu przy obciążeniu statycznym.

9. Spostrzeżenia i wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań i analiz poczyniono spostrzeżenia oraz sformułowano wnioski dotyczące:

- I- Oceny wpływu parametrów wytrzymałościowych materiału podstawowego na trwałość zmęczeniową połączeń spawanych jednoimiennych i różnoimiennych na podstawie testów zmęczeniowych elementów próbnych z połączeń spawanych blach wykonanych z trzech gatunków stali ferrytyczno-perlitycznych, w świetle zaleceń *IIW*.
- II- Zaobserwowanych współzależności wybranych parametrów struktury stalowych blach walcowanych oraz ich wytrzymałości zmęczeniowej przy obciążeniu wahadłowym momentem zginającym.

Odnośnie części I sformułowano następujące wnioski:

- Założenie jednej stałej wartości współczynnika kierunkowego krzywych zmęczeniowych *FAT* wynoszącej $m = 3$ niezależnie od materiału podstawowego jest niewłaściwe z punktu widzenia przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Dla połączeń spawanych jednoimiennych osiągały one wartości z przedziału $m = 3,64 \div 4,56$, natomiast dla połączeń różnoimiennych $m = 5,28 \div 6,29$. Uwzględniając wyznaczone zgodnie z wytycznymi *ASTM* przedziały ufności współczynników kierunkowych charakterystyk *S-N* poszczególnych połączeń dla poziomu prawdopodobieństwa, 95% wartości eksperymentalne nie osiągały wartości założonych przez *IIW*.
- Połączenie spawane wywiera najbardziej negatywny wpływ na właściwości wytrzymałościowe stali *P460*, o najwyższej wytrzymałości statycznej, w całym zakresie liczby cykli $N_f = 10^4 \div 10^6$, o czym świadczą wartości funkcji zmęczeniowego współczynnika działania karbu $K_f(N_f)$.
- Stal *P460* cechowała się ustabilizowaną wysoką wrażliwością na działanie karbu spawalniczego w całym zakresie liczby cykli objętym badaniami zmęczeniowymi, zarówno dla połączeń spawanych jednoimiennych jak i różnoimiennych, podczas gdy gatunki *S235* oraz *S355* odznaczały się wzrastającą wrażliwością wraz ze wzrostem liczby cykli.

- W przypadku połączeń spawanych jednoimiennych najmniejsza wrażliwość na działanie karbu spawalniczego cechowała stal *S355*, natomiast dla połączeń różnoimiennych stal *S235*.
- Wyższe różnice składu chemicznego materiałów podstawowych i spoiwa występujące w przypadku połączeń różnoimiennych nie wpłynęły negatywnie na trwałość zmęczeniową tych złączy w stosunku do połączeń jednoimiennych.

W odniesieniu do części II sformułowano wnioski następującej treści:

- Wzrost udziału objętościowego perlitu oraz zmniejszanie średniej średnicy ziarna ferrytu powodują wyraźny wzrost wytrzymałości statycznej i trwałości zmęczeniowej niskocyklowej stali.
- Udział objętościowy na poziomie 40% pasmowo ułożonego perlitu w strukturze, jakim odznaczała się stal *P460*, powoduje wyraźnie szybszy spadek wytrzymałości wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia od pozostałych materiałów, wskutek czego dla liczby cykli na poziomie $N_f \approx 10^6$ charakterystyki zmęczeniowe $S - N$ dla stali *P460* oraz *S355* ulegają przecięciu, natomiast wyniki pojedynczych prób zrównują się już dla liczby cykli $N_f \approx 4 \cdot 10^5$.
- Struktura stali *S355* posiadająca dwukrotnie wyższy udział objętościowy perlitu w stosunku do *S235*, jednak bardziej równomiernie rozproszonego w objętości materiału oraz wielkość ziarna ferrytu zbliżoną do *P460*, wykazała najwyższą odporność na działanie obciążeń cyklicznych.
- Stal *S235*, której struktura zawiera zwarte skupiska perlitu pośród rozległych ziaren plastycznego ferrytu, wykazała najniższą wytrzymałość statyczną jak i trwałość zmęczeniową oraz przeciętną, spośród analizowanych materiałów, wrażliwość na działanie obciążeń cyklicznych.
- Opierając się na wynikach przeprowadzonych prób zmęczeniowych można stwierdzić, że do zastosowań wymagających odporności na działanie zmiennych naprężeń w zakresie dużej liczby cykli $N_f > 10^6$ najwyższą przydatność wykazują materiały o znacznym rozdrobnieniu struktury, równomiernym rozmieszczeniu jej składników w objętości materiału oraz udziale objętościowym twardych i kruchych składników nie przekraczającym 30 %.

10. Literatura

1. ADIB H., GILGERT J., PLUVINAGE G.: Fatigue life duration prediction for welded spots by Volumetric method, *Int. J. Fatigue*, Vol. 26, 2004, pp.81-94
2. ANAMI K., MIKI C.: Fatigue strength of welded joints made of high strength steels; *Prog. Engng. Mater.* (2001), No. 3, S. 86-94
3. ASTM E 739-91 (1998), Standard Practice for Statistical Analysis of Linearized Stress-Life ($S - N$) and Strain-Life ($\epsilon - N$) Fatigue Data. In: *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, Philadelphia 1999, pp.710-718
4. Background Documentation, Eurocode 3, Chapter 9 – Document 9.01: Background Information on Fatigue Design Rules, Statistical Evaluation; First Draft (V.1), Dezember 1989
5. BAIRSTOW L.: The Elastic Limits of Iron and Steel under Cyclic Variations of Stress, *Philosophical Transactions, Series A*, vol. 210, Royal Society of London, 1910, pp. 35-55.
6. BASQUIN O.H.: The experimental law of endurance test, *Proc. ASTM*, Philadelphia 1910, Vol. 10, pp.625-630
7. BENTACHFINE S., PLUVINAGE G., GILGERT J., AZARI Z., BOUAMI D.: Notch effect in low cycle fatigue, *Int. J. Fatigue*, Vol.21, 1999, pp.421-430
8. BIGNONNET A.: Improving the fatigue strength of welded steel structures; *Steel in Marine Structures*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1987, S. 99-116.
9. BIŁOUS P.: Uwzględnienie karbów geometrycznych i strukturalnych przy wyznaczaniu trwałości zmęczeniowej elementów maszyn, *Rozprawa Doktorska*, Politechnika Opolska, 2012.
10. BOCHENEK A.: *Elementy mechaniki pękania*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1998
11. BOMAS H., LINKIEWITZ T., MAYER P.: Fatigue limit prediction of notched hard steel parts under uniaxial and torsional loading, in: *Engineering Against Fatigue*, J.H.Beynon, M.W.Brown, R.A.Smith, T.C.Lindley and B.Tomkins, Eds, Sheffield, Balkema 1999, pp.349-356
12. Bombardier, 2007, *Wheel tread damage – An Elementary Guide*
13. BOWMAN M. D., MUNSE W. H.: Fatigue Behavior of Welded Steel Butt Joints Containing Artificial Discontinuities, *Welding Research Supplement*, February 1983, pp. 37-44.
14. CHENG X., FISHER J., PRASK H., GNÄUPEL-HEROLD T., YEN B., ROY S.: Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures; *International Journal of Fatigue*, Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 25 (2003), S. 1259-1269.
15. CORTEN H.T., DOLAN T.J.: Cumulative fatigue damage, Presented at Int. Conference on fatigue of metals, Published by the Institution of Mechanical Engineers, London 1956, p.15
16. DIETER G. E. JR.: *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, INC., New York, 1961.
17. DIETRICH M.: (red.), *Podstawy konstrukcji Maszyn*, Tom 2, WNT, Warszawa 1995, s.656

18. DOBROWOLSKI Z.: Co każdy o spawaniu wiedzieć powinien? MECHANIK, Zeszyt 4, 1939
19. DOBRZAŃSKI L. A.: Metalowe materiały inżynierskie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
20. DOWNING S.D., SOCIE D.F.: Simple rainflow counting algorithms, Int. J. Fatigue, Vol. 5, 1982, pp.31-44
21. ECSC-Report: High strength steels in welded state for lightweight constructions under high and variable stress peaks, Mechanical characteristics; EUR 19989, Final report, European Commission, Luxembourg, 2001.
22. ELLYIN F.: Fatigue damage, crack growth and life prediction, Chapman and Hall, 1996 p.462
23. ERADIS – Kolejowa Baza Danych Europejskiej Agencji Interoperacyjności i Bezpieczeństwa
24. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules for Buildings. European Committee for Standardisation, Brussels 1992, ENV 1993-1-1
25. FERENC K. i in.: Technika spawalnicza w praktyce, Wydawnictwo VERLAG DASHOFER, Warszawa, 2011.
26. FRANCIS J. A., BHADESHIA H. K. D. H., WITHERS, J. P.: Welding Residual Stresses in Ferritic Power Plant Steels, Materials Science and Technology, vol. 23, 2007, pp. 1009-1020.
27. FRICKE W.: Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for welded Structures, IIW-Doc. XII-2240r2-08/XV-1289r2-08
28. Good Design Practice, A Guideline for Fatigue Design; ECCS – Technical Committee 6 – Fatigue, ECCS N° 105, 1st edition, 2000.
29. GOSS CZ., KŁYSZ S., WOJNOWSKI W.: Problemy niskocyklowej trwałości zmęczeniowej wybranych stali i połączeń spawanych, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2004, s.154
30. GRABARZ B.: Granice rozwoju materiałów konstrukcyjnych na bazie żelaza, Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, Prace IMŻ, 1, 2010
31. GURNEY T.R.: Zmęczenie konstrukcji spawanych, WNT, Warszawa 1973, s.355
32. GURNEY T.: Fatigue tests on butt and fillet welded joints in mild and high tensile structural steels; British Welding Journal (1962), Vol. 9, No. 11, S. 614-620.
33. HAAGENSEN P., MADDOX S.: IIW Recommendations for Weld Improvement by Burr Grinding, TIG Dressing and Hammer & Needle Peening for Steel and Aluminium Structures; International Institute of Welding, Doc. XIII-1815-00, IIW Commission XIII, revised Februar 2004.
34. HAIBACH E.: Modifizierte Lineare Schadensakkumulations Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Dchquadigung, Technische Mitteilungen Nr 50/70, LBF, Darmstadt 1970, s.15
35. HARRISON J.: Further techniques for improving the fatigue strength of welded joints; British Welding Journal (1966), Vol. 13, No. 11, S. 642-647.
36. HOBACHER A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW document XIII-1823-07 ex XII-2151r4-07/XV-1254r4-07. International Institute of Welding, Paris, 2007.
37. HOBACHER A.: Stress intensity factors of welded joints; Engineering Fracture Mechanics, Vol. 46, No. 2, 1993, S. 173-182.

38. http://metale.pwr.wroc.pl/files/A.Biegus-Polaczenia_Spawane.pdf
39. HUO L., WANG D., ZHANG Y.: Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude, *Int. J. Fatigue*, Vol. 27, 2005, pp.95-101
40. HUTHER I., PRIMOT L., LIEURADE J.J., COLCHEN D., DEBICZ S.: Weld quality and the cyclic fatigue strength of steel welded joints, *Welding in the World*, Vol.35, 1995, pp.118-133
41. IIW, Technical report, doc. IX-535-67, 1967
42. INSTYTUT METALURGII ŻELAZA IM. STANISŁAWA STASZICA: Analiza ilościowa składników strukturalnych w próbkach S235, S355 oraz P460, Raport z badań nr 9090, Lipiec 2013
43. JIANG Y., XU B.: Deformation analysis of notched components and assessment of approximate methods, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struci.*, Vol.24, 2001, pp.729-740
44. KADO S., ISHIGURO T., HANZAWA M., YOKOTA H.: Influence of the condition in TIG-dressing on fatigue strength in welded high strength steels; International Institute of Welding, Doc. XIII-771-75, 1975, Doc. XIII-829-77, 1977.
45. KLIMPEL A., DZIUBIŃSKI J.: Podstawy konstrukcji spawanych, Politechnika Śląska Skrypt Nr 507/21, Gliwice 1976, s.195
46. KNIGHT J.: Improving the fatigue strength of fillet welded joints by grinding and peening; International Institute of Welding, Doc. XIII-851-77, 1977.
47. KOCANDA S., SZALA J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa 1997, s.288
48. KOHUT M., ŁAGODA T.: Trwałość zmęczeniowa próbek okrągłych i kwadratowych ze stali 18G2A poddanych zginaniu wahadłowemu, *Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Wyd. ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2004, ss.195-202
49. KORDA A. A. i in.: In situ observation of fatigue crack retardation in banded ferrite- pearlite microstructure due to crack branching, *Scripta Materialia* 54, 2006, pp. 1836.
50. LABESSE-JIED F., LEBRUN B., PETITPAS E., ROBERT J.L.: Multiaxial fatigue assessment of welded structures by local approach, in: *Biaxial/Multiaxial Fatigue Fracture*, A.Carpinteri, M. de Freitas, A. Spagnoli, Eds., Elsevier 2003, pp.43- 62
51. LACHOWICZ C., ŁAGODA T., MACHA E.: Comparison of analytical and algorithmical methods for life time estimation of 10HNAP steel under random loadings, *Fatigue* 96, Berlin 1996, G. Lutjering and H. Nowack, Eds., Vol.I, pp.595-600
52. LACHOWICZ C., ŁAGODA T., MACHA E.: Trwałość zmęczeniowa elementów maszyn ze stali 10HNAP w warunkach jednoosiowego obciążenia losowego, *Problemy Maszyn Roboczych*, Vol. 5, 1995, ss.139-170
53. LAIRD, C., SMITH, G.C.: Crack propagation in high stress fatigue, *Philosophical Magazine*, vol. 7, issue 77, Cambridge, 1962.
54. ŁAGODA T., KAUFMANN H., SONSINO C.M.: Trwałość zmęczeniowa wybranych połączeń spawanych w warunkach stało- i zmiennoodprężających obciążeń, *Problemy Maszyn Roboczych*, Z.20, 2002, ss.119-126

55. ŁAGODA T., MACHA E., BĘDKOWSKI W.: A critical plane approach based on energy concepts: Application to biaxial random tension-compression high-cycle fatigue regime, *Int. J. Fatigue*, Vol. 21, 1999, pp.431-443
56. ŁAGODA T., MACHA E., BĘDKOWSKI W.: Wyznaczanie trwałości zmęczeniowej stali 10HNAP w jedno- i dwuosowym losowym stanie naprężenia za pomocą parametru energetycznego, VII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce-Cedzyna, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej – Mechanika 62, 1999, tom.II, ss.9-16
57. ŁAGODA T., MACHA E., DRAGON A., PETIT J.: Influence of Correlations Between Stresses on Calculated Fatigue Life on Machine Elements, *Int. J. Fatigue*, Vol.18, 1996, pp. 547-555
58. ŁAGODA T., MACHA E., MOLSKI K., FERENC R.: Rozkłady naprężeń i odkształceń dla próbek gładkich i z karbem w przypadku kombinacji zginania ze skręcaniem, VIII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce/Cedzyna 2001, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 73, ss. 55-62
59. ŁAGODA T., MACHA E., NIEŚLONY A., MOREL F.: Estimation of the fatigue life of high strength steel under variable-amplitude tension with torsion with use of the energy parameter in the critical plane, In: *Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*, A.Carpinteri, M.DeFreitas and A.Spagnoli, Eds, Elsevier 2003, pp.183-202
60. ŁAGODA T., MACHA E., NIEŚLONY A., MOREL F.: The energy approach to fatigue life of high strength steel under variable-amplitude tension with torsion, proceedings of 6th ICBMFF, Lisbon 2001, M. M. de Freitas, Ed., Vol.I, pp.233-240
61. ŁAGODA T., MACHA E., SAKANE M.: Opis zmęczenia elementów maszyn za pomocą energii właściwej odkształceń w płaszczyźnie krytycznej, Sympozjon PKM, Zielona Góra-Świnoujście, Politechnika Zielonogórska 1999, T. II, ss.67-72
62. ŁAGODA T., MACHA E.: Energetyczny model oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn poddanych kombinacji zginania ze skręcaniem, XIII Konferencja Naukowa – Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych – Zakopane 2000, Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej, ss.285-292
63. ŁAGODA T., MACHA E.: Energy – based approach to damage cumulation in random fatigue, in: *Reliability Assessment of Cyclically Loaded Engineering Structures*, R.A.Smith, Ed., Kluwer Academic Publishers, 1997, pp.435-442
64. ŁAGODA T., MACHA E.: Energy approach to fatigue life estimation under combined tension with torsion, 7 Letnia Szkoła Mechaniki Pękania – Pokrzywna, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Z.67, Nr269/2001, Opole 2001, pp.163-182
65. ŁAGODA T., MACHA E.: Gęstość energii odkształceń w płaszczyźnie krytycznej jako parametr wieloosiowego zmęczenia, III Konferencja PTMTS – Nowe Kierunki Rozwoju Mechaniki, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosownej, nr 14, Politechnika Śląska, Gliwice 2000, ss.95-100
66. ŁAGODA T., MACHA E.: Influence of cross-correlation between normal stresses on biaxial fatigue life, 11th European Conference on Fracture, *Futuroscope* 1996, J.Petit, Ed., Vol. II, pp. 1361-1366

67. ŁAGODA T., MACHA E.: Simulation of cross correlation effect on biaxial random fatigue, in: Fatigue 93, J.P. Bailon and J.I. Dickson, Eds., EMAS (U.K.), 1993, Vol.III, pp.1539-1544
68. ŁAGODA T., SONSINO C.M.: Comparison of different methods for presenting constant and variable amplitude loading fatigue results, Mat.-wiss.u.Werstofftech., Vol.35, 2004, pp.13-20
69. ŁAGODA T., SONSINO C.M.: Trwałość zmęczeniowa wybranych złączy spawanych według wybranych kryteriów energetycznych, Problemy Maszyn Roboczych, Z.22, 2003, ss.47-58
70. ŁAGODA T., SONSINO C.M.: Wyznaczanie współczynnika działania karbu na podstawie fikcyjnego promienia karbu, Przegląd Mechaniczny, Nr 1, 2004, ss.23-25
71. ŁAGODA T.: Stress and strain distribution modelling in the bar section including stress gradients, Journal of Transdisciplinary Systems Science – Systems, Vol.9, No. I, 2004, pp.77-85
72. ŁAGODA T.: Uwagi o wybranych kryteriach naprężeniowych, VIII Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce/Cedzonia 2001, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 73, ss. 375-381
73. ŁAGODA T.: Trwałość zmęczeniowa wybranych złączy spawanych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2005.
74. LAHTI K.E., HÄNNINEN H., NIEMI E.: Nominal stress range fatigue of stainless steel fillet welds – the effect of weld size, J. Constructional Steel Research, Vol. 54, 2000, pp.161-172
75. LAIRD C., SMITH, G.C.: Crack propagation in high stress fatigue, Philosophical Magazine, vol. 7, issue 77, Cambridge, 1962.
76. LAWRENCE F.W., MATTOS R.J., HIGASHIDA Y., BURK J.D.: Estimating the fatigue crack initiation life of welds, ASTM STP 648, Fatigue Testing of Weldments, Philadelphia PA, ASTM, 1978, pp.134-158
77. LAWRENCE F., BURK J., YUNG J.: Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments; ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials, 1982, S. 33-43.
78. LAWRENCE F., MATTOS R., HIGASHIDA Y., BURK J.: Estimating the fatigue crack initiation life of welds; ASTM STP 648, Fatigue testing of weldments, Philadelphia, 1979, S. 134-158.
79. LIXING H., DONGPO W., YUFENG Z.: Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable amplitude load; International Institute of Welding, Doc. XIII-1915-02, 2002.
80. ŁOMOZIK M.: Makroskopowe i Mikroskopowe Badania Metalograficzne Materiałów Konstrukcyjnych i Ich Połączeń Spajanych, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 2009
81. ŁOMOZIK M.: Metaloznawstwo i Badania Metalograficzne Połączeń Spawanych, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 2011
82. MACHA E., SONSINO C.M.: Energy Criteria of Multiaxial Fatigue Failure, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol. 22, 2000, pp. 1053-1070
83. MACHA E.: Modele matematyczne trwałości zmęczeniowej materiałów w warunkach losowego złożonego stanu naprężenia, Prace Nauk. Inst. Mater. i Mech. Tech. Pol. Wrocław. Nr 41, Seria: Monografie nr 13, Wrocław 1979, s.99

84. MACHA E.: Simulation investigations of the position of fatigue fracture plane in materials with biaxial loads, *Mat. –wiss. U. Werkstofftech.* Nr 20, 1989, Teil I, Heft 4/89, pp.132-136, Teil II, Heft 5/89, pp.153-163
85. MACHA E.: Simulation of fatigue process in material subjected to random complex state of stress, in: *Simulation of Systems*, L.Dekker Ed., North – Holland Publishing Company, Amsterdam 1976, pp.1033- 1041
86. MADDOX S.J., SONSINO C.M.: Multiaxial Fatigue of Welded Structures: Problems and Present Solutions, In: *Proc. Of the Sixth International conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*, Ed. Manuel de Freitas, Vol. II, Lisboa 2001, pp. 3-16
87. MANSON S.S.: Future directions for low cycle fatigue. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1988, pp. 15-39.
88. MARTINSSON J.: Fatigue Assessment of Complex Welded Steel Structures, *Rozprawa doktorska*, Sztokholm, 2005.
89. MILLER K.J., Some Recent Advances in Metal Fatigue: Understanding the Two Thresholds of Fatigue Behaviour, *Advances in Fracture Resistance and Structural Integrity*, Oxford, (1994) 321–331.
90. MINER M.: Cumulative damage in fatigue; *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, No. 3, 1945, S. 159-164.
91. MORRIS J. W. JR.: The Influence of Grain Size on the Mechanical Properties of Steel, *Lawrence Berkley National Laboratory*, Berkley, 2001.
92. MORROW J.: Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals; *ASTM STP 378*, American Society for Testing and Materials, 1965, S. 45-87.
93. MURAKAMI Y., MILLER K.J., What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process, *International Journal of Fatigue*. 27 (2005) 991–1005.
94. MUSZKA K., MAJTA J., BIENIAS Ł.: Effect of grain refinement on mechanical properties of microalloyed steels. *Metallurgy and foundry engineering*, vol. 32, 2006, pp. 93
95. NEUBER H.: *Kerbspannungslehre – Theorie der Spannungskonzentration, Genaue Berechnung der Festigkeit* Springer. Verlag, Berlin 1985. 3rd edition
96. NEUBER H.: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen, *Konstruktion*, Heft 7, 1968, pp. 245-251
97. NIE H., WU F.M., LIU J.F.: A variable K_f – Neuber’s rule for predicting fatigue crack initiation life, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol.17, 1994, pp.1015-1023
98. NIEMI E.: Aspects of good design practice for fatigue-loaded welded components, *Fatigue Design*, ESIS 16, J.Solin, G.Marquis, A.Siljander and S.Sipila, Eds., Mechanical Engineering Publications, London 1993, pp.333-351
99. NIEMI E.: Stress determination for fatigue analysis of welded components, Abington, Cambridge, *International Institute of Welding*, Abington Publishing, 1995
100. NIEMI E.: Structural stress approach to fatigue analysis of welded components – designer’s guide, *IIW-Doc. XIII-1819-00/XV-1091-01 (Final Draft)*, International Institute of Welding, 2001
101. NISITANI H.: Stress concentration of a strip with double edge notches under tension or in-plane bending, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.23, 1986, pp.1051-1065

102. NODA N.A., SERA M., TAKASA Y.: Stress concentration factors for round and flat test specimens with notches, *Int. J. Fatigue*, Vol.17, 1995, pp.163-178
103. NODA N.A., TAKASA Y.: Stress concentration formula useful for any shape of notch in a round test specimen under tension and under bending, *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, Vol.22, 1999, pp.1071-1082
104. NODA N.A., TSUBAKI M.A., NISITANI H.: Stress concentration of a strip with V- or U-shaped notches under transverse bending, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.31, 1988, pp.119-133
105. OGONOWSKI P., ŁAGODA T., ACHELNIK H.: Trwałość zmęczeniowa stali 10HNAP z koncentratorami naprężeń w warunkach proporcjonalnego zginania ze skręcaniem, *Problemy Maszyn Roboczych*, Z.24, 2004, ss.75-84
106. OGONOWSKI P., ŁAGODA T.: Energetyczny parametr uszkodzenia w złożonym stanie obciążenia oparty na płaszczyźnie krytycznej, IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania. Kielce 2003, Politechnika Świętokrzyska, ss. 365-372
107. OGONOWSKI P., ŁAGODA T.: Parametr uszkodzenia w ujęciu energetycznym w złożonym stanie naprężenia w przypadku występowania spiętrzenia naprężeń, *Zmęczenie i Mechanika Pękania*, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 2004, ss.289-296
108. OLSZOWIEC P.: Syberyjska tragedia. Zmęczenie materiału przyczyną katastrofy, *Energia Gigawat*, nr 4/2010.
109. OSIŃSKI Z., BAJON W., SZUCKI T.: *Podstawy Konstrukcji Maszyn*, PWN, Warszawa 1975, s.471
110. PALMGREN A.: Die Lebensdauer Von Kugellagern, *VDI-Z*, Vol. 68, 1924, SS.339-341
111. PARIS P.; ERDOGAN A.: Critical analysis of crack propagation law; *Journal of Basic Engineering*, Transaction, ASME Series D, Vol. 85, 1963, S. 528-534.
112. PETERSON R.: *Stress concentration factors*; John Wiley & Sons, New York, 1977.
113. PLUVINAGE G.: Notched effect in high cycle fatigue, *ICF9*, pp.1239-1250
114. PN-EN 10025-2:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych - Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych
115. PN-EN 10028-3:2010 Wyroby płaskie ze stali na urządzenia ciśnieniowe - Część 3: Stale spawalne drobnoziarniste normalizowane
116. PN-EN 1011-1:2009 Spawanie. Zalecenia dotyczące spawania metali. Część 1: Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego.
117. PN-EN 12517-1:2006 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania radiograficzne złączy spawanych. Poziomy akceptacji.
118. PN-EN 1289 Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania penetracyjne złączy spawanych – Poziomy akceptacji
119. PN-EN ISO 17635:2010 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Zasady ogólne dotyczące metali.
120. PN-EN ISO 17636-1:2013-06 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania radiograficzne złączy spawanych.
121. PN-EN ISO 17637:2011 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne.

122. PN-EN ISO 23277:2010 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania penetracyjne złączy spawanych. Poziomy akceptacji.
123. PN-EN ISO 2560:2006 Materiały dodatkowe do spawania. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych. Klasyfikacja.
124. PN-EN ISO 3059:2005 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe. Warunki obserwacji.
125. PN-EN ISO 3452-1:2013-08 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Zasady ogólne.
126. PN-EN ISO 5817 Złącza spawane łukowo – Wytyczne określenia poziomów jakości według niezgodności spawalniczych
127. PN-EN ISO 6507-1:2007 Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań.
128. PN-EN ISO 6892-1:2010 Metale- Próba rozciągania- Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
129. PN-EN ISO 6947:2011 Spawanie i procesy pokrewne. Pozycje spawania
130. PN-EN ISO 9712:2012 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących.
131. PN-EN ISO Badania nieniszczące. Jakość obrazu radiogramów. Część 1: Liczbowe wyznaczanie jakości obrazu za pomocą wskaźników jakości obrazu typu pręcikowego.
132. POCICA A., NOWAK A.: Na koniec wieku o jego początku, Przegląd Spawalnictwa, nr 1/ 2000, ss. 23-25.
133. POLAK-MICEWICZ M., ŁAGODA T.: Trwałość zmęczeniowa zmechanizowanych obudów górniczych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2014
134. PRASK H., GNÄUPEL-HEROLD T., FISHER J., CHENG X.: Residual stress modification by means of Ultrasonic Impact Treatment; Proceedings of Society for Experimental Mechanics Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Portland, 2001, S. 551-554
135. PROWANS S.: Struktura stopów, Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa, 2000.
136. RADAJ D., SONSINO C.M.: Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, Abington Publishing, Cambridge 1998
137. RAMBERG W., OSGOOD W.: Description of stress-strain curves by three parameters; Technical Note, No. 902, NACA, 1943.
138. ROBAK G., SZYMANIEC M., ŁAGODA T.: The Fictitious Radius as a Tool for Fatigue Life Estimation of Notched Elements, Materials Science Forum Vol. 726 (2012), Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 27-32. (13 p.)
139. ROLFE S., BARSOM J.: Fracture and fatigue control in structures; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1977.
140. ROY S., FISHER J., YEN B.: Fatigue resistance of welded details enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT); International Journal of Fatigue 25 (2003), S .1239-1247.
141. ROY S., FISHER J., YEN B.: Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT); ISOPE-2001, June 2001, Stavenger, Dänemark.
142. RYKALUK K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000, s.226

143. RYŚ J.: *Stereologia Materiałów*, FOTOBIT DESIGN, Kraków, 1995.
144. SCHIJVE J., *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd edition, Springer, New York, 2008.
145. SEDLACEK G.: Eurocode 3: Unified European rules for the design of steel structures, *Welding in the World*, Lo.39, 1997, pp.8-15
146. SHARPE W.N.: ASME 1993 Nadai lecture – elastoplastic stress and strain concentration, *J. Engineering Materials and Technology*, Vol.117, 1995, pp1-7
147. SŁOWIK J., ŁAGODA T.: Analiza sprężysto-plastycznych odkształceń w elementach z karbem obrączkowym przy jednoosiowym rozciąganiu-ściskaniu, III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów, 1 - 4 czerwca 2005, Politechnika Białostocka, ss.385-388
148. SŁOWIK J.; ŁAGODA, T.: Wpływ złożonego stanu naprężenia w dnie karbu na trwałość zmęczeniową elementów maszyn, *Studia i monografie*, Z. 228, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2008.
149. SMITH I., DUBOIS V., BREMEN U.: Peening methods for improvement of fatigue strength; International Institute of Welding, Doc. XIII-WG2-2-90, 1990
150. SMITH K.N., WATSON P., TOPPER T.H.: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, *J. Materials*, Vol.5, 1970, pp. 767-776
151. SMITH I., MUSTER W., BREMEN U.: Residual stresses and fatigue strength improvement of welded connections; Proceedings of Conference on Effects of fabrication related stresses on product manufacture and performance, The Welding Institute, Cambridge, September 1985.
152. SONSINO C.M., ŁAGODA T.: Assessment of multiaxial fatigue behaviour of welded joints under bending and torsion by application of a fictitious radius, *Int. J. Fatigue*, Vol. 26, 2004, pp.265-279
153. SONSINO C.M., ŁAGODA T.: Damage accumulation under variable amplitude loading of welded medium- and high-strength steels, *Int. J. Fatigue*, Vol. 26, No. 5, 2004, pp.487-495
154. SONSINO C. M.: Principles of local stress concepts for the assessment of welded joints, *ESIS Newsletter No 45-2009*, s. 30-33.
155. STROMEYER C.E.: The determination of fatigue limits under alternating stress conditions, *Proc. R. Soc. London, Ser.A*, Vol. 90, 1914, pp.411-425
156. SUSMEL L., TOVO R.: Modified Wöhler curve method and Eurocode 3: Accuracy in predicting the multiaxial fatigue strength of welded joints, pp.203-207
157. SZALA J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, *ATR Bydgoszcz 1998*, s.175
158. SZYMANIEC M.: Badanie wytrzymałości połączeń spawanych wykonanych według różnych technologii. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, seria: Mechanika, Nr 341/2011, ss. 83-84.
159. SZYMANIEC M.: Promień fikcyjny jako narzędzie do obliczania trwałości zmęczeniowej elementów z karbem. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, seria: Mechanika, Nr 345/2012, ss. 131-134.
160. SZYMANIEC M.: Trwałość zmęczeniowa wybranych stali konstrukcyjnych i ich połączeń spawanych poddanych obciążeniu cyklicznie zmiennym momentem zginającym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, seria: Mechanika, Nr 349/2013, ss. 159-162.

161. SZYMANIEC M.: Trwałość zmęczeniowa wybranych stali konstrukcyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, seria: Mechanika, Nr 351/2014, ss. 183-184.
162. TASAK E.: Metalurgia spawania, Wydawnictwo JAK, Kraków, 2008.
163. TOPPER T., WETZEL R., MORROW J.: Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens; JMLSA 4, 1969, S. 200-209.
164. TRUFIAKOV V., STATNIKOV E., MIKHEEV P., KUZMENKO A.: The efficiency of ultrasonic impact treatment for improving the fatigue strength of welded joints; International Institute of Welding, Doc. XIII-1745-98, 1998.
165. Trwałość zmęczeniowa elementów maszyn i konstrukcji w warunkach wieloosiowych obciążeń losowych, Prace Nauk. CPBP 02.05, Wyd. Pol. Warszawy., Warszawa, 1990, (pod red. E.Machy) s.93
166. WALAT K., SZYMANIEC M., ŁAGODA T.: Badanie wytrzymałości połączeń spawanych wykonanych według różnych technologii. Energetyka, Zeszyt tematyczny XXI, Wydawnictwo SEP, XI 2010, ss. 143-145. (6 p.)
167. WÖHLER A.: Über die Versuche zur Ermittlung der Festigkeit von Achsen, Z. Bauwesen, Vol. 8, 1858, SS.642-652
168. XIAO Z.G., YAMADA K.: A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joint, Int. J. Fatigue, Vo.26, 2004, pp.1277-1293

STRESZCZENIE

Podczas realizacji niniejszej pracy rozpatrywano tematykę trwałości zmęczeniowej elementów stalowych zawierających doczołowe połączenie spawane poddanych poprzecznemu zginaniu wahadłowemu. W ramach przeglądu literatury objaśniono charakterystykę procesów zmęczeniowych w materiałach konstrukcyjnych, objaśniono podstawy spawania łukowego elektrodą otuloną oraz przybliżono wybrane kryteria szacowania trwałości zmęczeniowej elementów zawierających karb spawalniczy. Wskazano na brak uwzględniania rodzaju materiału na właściwości połączeń spawanych oraz bardzo nieliczne prace dotyczące trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych różnoimiennych, mimo że w praktyce często zachodzi potrzeba wykonania takich połączeń. Badania eksperymentalne prowadzono na przykładzie trzech gatunków stali ferrytyczno-perlitycznych. Obejmowały one identyfikację wybranych parametrów wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych materiałów podstawowych, badania metalograficzne z pomiarem wielkości ziarna ferrytu i określeniem udziału objętościowego składników struktury oraz pomiary twardości. Badania zmęczeniowe ukierunkowano pod kątem oceny wpływu parametrów wytrzymałościowych materiału podstawowego na trwałość zmęczeniową połączeń spawanych, co jest pomijane w zaleceniach *IIW*. Ponadto dokonano identyfikacji i analizy rozbieżności pomiędzy trwałością zmęczeniową połączeń spawanych jednakowych materiałów (połączenia jednoimienne) oraz różnych materiałów (połączenia dwuimienne, różnoimienne) w obrębie analizowanych gatunków stali. Dyskretne wyniki prób zmęczeniowych zlinearyzowano oraz wyznaczono przedziały ufności współczynników równań je opisujących, a także wykreślono pasma rozrzutu wyników zgodnie z zaleceniami *ASTM* dla przyjętego poziomu prawdopodobieństwa wynoszącego 95%. Oceny wyników badań dokonano na podstawie analizy porównawczej przebiegu sporządzonych charakterystyk zmęczeniowych typu *S-N* oraz krzywych zmęczeniowych *FAT* dla elementów zbliżonych geometrią i sposobem obciążenia do warunków prowadzenia testów zmęczeniowych. Pracę zakończono analizą wyników i wnioskami.

ABSTRACT

This study deals with issues of the fatigue life of steel and its butt welded joints under cyclic bending. The literature review includes basic information about the development of cyclic fatigue process and influences of selected micro and macro structural features on the fatigue resistance of steel. Several methods for fatigue life estimation of welded elements are presented also. In the literature review summary lack of consideration of the material grade in fatigue life prediction methods of welded joints is indicated. Moreover, as noted, very few works deal with the problem of fatigue life of welded joints of various steel grades, although in practice a need to make such joints occurs very often. Experimental research were conducted on the example of three species of ferritic-pearlitic steels. It included identification of selected static and fatigue strength parameters of basic materials, metallographic tests with measurement of ferrite grain size, ferrite and pearlite volume fraction and hardness tests. Fatigue tests were focused on assessing the impact of base material strength parameters on the fatigue life of welded joints, which is ignored in the *IIW* recommendations. Identified and analyzed were the differences between fatigue strength of welds of the same and different materials among investigated steel grades. Discrete fatigue test results were linearized and the equations coefficients confidence intervals were determined. A scatter bands for test results in accordance with the *ASTM* recommendations at a probability level of 95% were plotted also. Evaluation of the test results was based on a comparative analysis of the course of experimental *S-N* fatigue characteristics and *FAT* curves for items of similar geometry and load conditions. The work is summarized with results analysis and conclusions.