

JANUSZ MIKUŁA

SPAVALNOŚĆ STALI

Ważniejsze oznaczenia

SWC	- strefa wpływu ciepła,
CTPc-S	- wykres przemian austenitu w warunkach spawalniczych cykli cieplnych,
Ms	- temperatura początku przemiany martenzytycznej,
Mf	- temperatura końca przemiany martenzytycznej,
Bs	- temperatura początku przemiany bainitycznej,
Bf	- temperatura końca przemiany bainitycznej,
Fs	- temperatura początku przemiany ferrytycznej,
tB	- czas początku przemiany bainitycznej,
tF	- czas początku przemiany ferrytycznej,
tP	- czas rozpoczęcia przemiany perlitycznej,
tMk	- czas końca przemiany martenzytycznej,
t _{8/5}	- czas przebywania w zakresie temperatur 800 a 500 ⁰ C podczas chłodzenia,
t ₁₀₀	- czas chłodzenia od temperatury maksymalnej cyklu cieplnego spawania do temperatury 100 ⁰ C,
t _{A1}	- czas przebywania w temperaturach powyżej A ₁ ,
v _{max}	- szybkość nagrzewania do temperatury maksymalnej cyklu,
T _{max}	- maksymalna temperatura cyklu cieplnego spawania,
U	- napięcie łuku,
I	- natężenie prądu,
v, v _{sp}	- prędkość spawania,
v _{el}	- prędkość podawania drutu,
d _{el}	- średnica elektrody,
n _η	- współczynnik sprawności nagrzewania,
E, E _L , q	- energia liniowa łuku,
q _c	- całkowita moc łuku,
λ ₀	- współczynnik przewodzenia ciepła,
α _k	- współczynnik wymiany ciepła przez unoszenie,
c _p	- ciepło właściwe,
T ₀	- temperatura podgrzewania spawanych elementów,
g, h	- grubość blachy,
n	- zużycie elektrod,
z _{dr}	- zużycie drutu,
z _{top}	- zużycie topnika,
γ	- ciężar właściwy stopiwa,
α _n	- stała topienia elektrody,
G _c	- masa 1 elektrody;
U _c	- uzysk elektrody,
F _{sc}	- przekrój ściegu,
F _{sp}	- przekrój spoiny,

Tmax	- temperatura maksymalna cyklu cieplnego spawania,
T ₀ , T _p	- temperatura podgrzewania wstępnego,
C _e , C _E , C _{ekw}	- równoważnik węgla,
P _{cm} , P _c , P _w	- parametr pękania,
HCS, UCS	- wskaźniki skłonności stali do tworzenia pęknięć gorących,
(σ_{kr}) _{imp}	- naprężenia krytyczne w próbie implantacyjnej,
H _D	- zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie wyznaczona metodą glicerynową,
P _I , P _L	- wskaźniki skłonności stali do tworzenia pęknięć lamelarnych,
ΔG , P _{SR}	- wskaźniki skłonności stali do tworzenia pęknięć pod wpływem powtórnego nagrzewania
HV	- twardość Vickersa,
HV _{max}	- maksymalna twardość Vickersa,
HV _M	- twardość martenzytu,
HV _B	- twardość bainitu,
HV _{FP}	- twardość mieszaniny ferrytu z perlitem,
V _{V_M} , M	- udział objętościowy martenzytu w strukturze,
V _{V_B} , B	- udział objętościowy bainitu w strukturze,
V _{V_{FP}} , FP	- udział objętościowy ferrytu z perlitem w strukturze,
R	- współczynnik korelacji liniowej Pearsona.

WPROWADZENIE

Proces spawania charakteryzuje się wieloma specyficznymi cechami, związanymi ze zmiennym polem temperatur oraz ze zmieniającymi się w szerokim zakresie właściwościami fizycznymi i mechanicznymi spawanego materiału. Zjawiska zachodzące w procesie spawania wchodzą w zakres wielu dziedzin wiedzy i rozwijane były często niezależnie, m.in. w odlewnictwie, metaloznawstwie i mechanice. Dopiero masowe stosowanie spawania, datujące się od czasów II wojny światowej, wywołało potrzebę całościowej analizy tego procesu, niezależnie od innych technik, oraz jego wpływu na właściwości zarówno złączy spawanych, jak i całych konstrukcji.

Specyficzny charakter tworzenia struktury strefy wpływu ciepła złącza spawanego, uwarunkowany cyklem cieplnym spawania, powoduje powstanie struktur o dużej różnorodności. W związku z tym opracowanie optymalnej technologii spawania winno być oparte o precyzyjną analizę zjawisk zachodzących w procesie spawania a przede wszystkim :

- skłonności do przemian struktury austenitu w warunkach spawania,
- podatności do tworzenia różnego rodzaju pęknięć w procesie spawania,
- właściwości użytkowych złącza spawanego.

Tradycyjne metody analizy zjawisk zachodzących w procesie spawania wymagają dużych nakładów finansowych, specjalistycznej aparatury oraz są bardzo pracochłonne. Jednym ze sposobów przyspieszenia i obniżenia kosztów badań spawalności stali jest zastosowanie metod obliczeniowych, które ma już kilkunastoletnią tradycję. Pierwsza międzynarodowa konferencja poświęcona tej problematyce odbyła się w Dublinie w 1977 r.

Analizując literaturę poświęconą zastosowaniu metod matematycznych w badaniach spawalności stali, można wyróżnić dwa podstawowe kierunki. Pierwszy to teoretyczne modelowanie procesu spawania [10,13,18,23,31]. Traktuje on proces spawania jako zespół zjawisk cieplnych, mechanicznych i przemian strukturalnych sprzężonych ze sobą. Tworzone w tej grupie modele termomechaniczne spawania opisują w kompleksowy sposób złożoność procesów zachodzących w złączu spawanym, uwzględniając dylatację cieplną, przemiany fazowe, przemiany plastyczne, powiązanie procesów cieplnych spawania z procesami dyfuzji, zwłaszcza w fazie krzepnięcia, itp. Modele te niestety obejmują, jak na razie, bardzo ograniczoną i najczęściej najprostszą grupę zagadnień. Wprowadzając dużą liczbę danych rzeczywistych do skomplikowanych programów komputerowych, wykorzystujących termomechaniczne modele procesów spawania, można otrzymać dobre wyniki prognozowania właściwości pewnych grup połączeń spawanych. Jest to jednak niezwykle trudne i pracochłonne, zwłaszcza w warunkach przemysłowych.

Drugi kierunek to analityczne metody oceny spawalności stali [5,10,18,21,25,23,53,67,86]. Wykorzystuje się tu złożone modele próbując dać globalne odpowiedzi, najczęściej wsparte szerokim zakresem badań doświadczalnych. Prace z tego zakresu pozwoliły na opracowanie obszernej grupy zależności o dużym znaczeniu praktycznym, mogących znaleźć bezpośrednie zastosowanie w analizie spawalności i projektowaniu technologii spawania.

Umownie zależności te można podzielić na trzy grupy, opisujące kolejno:

1. wskaźniki skłonności do pęknięć spawalniczych,
2. charakterystyczne temperatury i krytyczne czasy przemian rozkładu austenitu w warunkach spawalniczych,
3. właściwości strefy wpływu ciepła w funkcji parametrów cyklu cieplnego spawania.

Wzory określające zależności wyznaczano najczęściej na drodze analizy statystycznej zbioru wyników serii badań doświadczalnych dla pewnych grup materiałowych i określonych technik łączenia. Tak więc zależności te niekoniecznie muszą być przydatne dla innych grup materiałów i technik łączenia, skutkuje to wielością zależności i wąskimi zakresami ich zastosowania.

Dokładność podnieść można dwoma sposobami: poprzez przeprowadzenie bardzo szerokiego zakresu badań i zgromadzenie niezbędnej bazy danych dla wyznaczenia odpowiednich zależności lub poprzez tworzenie modeli fizycznych analizowanego procesu. Ten drugi sposób jest praktycznie dzisiaj jeszcze niemożliwy [10].

Pomimo tych ograniczeń, stosowanie metod analitycznych w ocenie spawalności stali pozwala odejść od tradycyjnego stosowania sztywnych wytycznych technologicznych i zastosować przy wyborze

technologii spawania podejście wariantowe, np. dokonać wyboru odpowiedniej energii liniowej łuku lub nagrzewania po spawaniu eliminując uciążliwe i kosztowne zabiegi jak np. podgrzewanie wstępne. Nadto uwaga technologa może być skupiona nie tylko na uzyskanie połączenia wolnego od wad, ale także na określenie optymalnych właściwości SWC.

Analityczne metody oceny spawalności stali mogą być także bardzo przydatne na etapie konstruowania programu badań i następnie samych badań spawalności nowo opracowanego gatunku stali lub też na etapie prac nad opracowywaniem nowego gatunku stali. Umożliwia to przyspieszenie i obniżenie kosztów badań co jest problemem o podstawowym znaczeniu dla tworzenia konstrukcji w pełni wykorzystujących potencjalne właściwości materiału.

Ze względu na wielość i złożoność opracowanych modeli matematycznych efektywne wykorzystanie metod obliczeniowych w ocenie spawalności stali wymaga zastosowania techniki komputerowej [34,52,84]. Obecnie spotykane programy dla potrzeb oceny spawalności stali można podzielić na trzy grupy [14,15,35,37,38,43,48,69,81,82,101,102,103, 104,105]:

- spawalnicze bazy danych,
- programy kalkulacyjne,
- systemy ekspertowe.

Spawalnicze bazy danych można podzielić na bazy materiałowe, technologiczne oraz systemy informacji naukowo-technicznej. Programy kalkulacyjne obejmują najczęściej programy umożliwiające przewidywanie zjawisk zachodzących w strefie wpływu ciepła połączenia spawanego, np. przebieg cyklu cieplnego spawania, udział objętościowy składników struktury w analizowanym miejscu SWC, twardość, udarność, itp. Wspólną cechą obu pierwszych grup programów jest to, że są one narzędziami dla doświadczonego spawalnika, który dobrze wie co chce osiągnąć i umie zinterpretować dostarczone przez program wyniki. Bardzo często programy kalkulacyjne do przeprowadzenia obliczeń wykorzystują bazy danych, zarówno materiałowe jak i technologiczne, dostarczane wraz z programami. Niestety brak jest obecnie krajowego, profesjonalnego oprogramowania komputerowego w tym zakresie, co znacznie ogranicza wdrażanie tej problematyki do programów kształcenia przyszłych technologów.

Pomimo dynamicznego rozwoju spawalnictwa dziedzina ta nadal cechuje się stosunkowo niskim stopniem sformalizowania. Dzieje się tak zarówno w teorii jak i w praktyce spawalniczej. Dlatego też bardzo często po dokonaniu obliczeń przeprowadza się serię badań, by drogą prób i błędów zweryfikować obliczenia. W celu rozwiązania tego problemu podjęto próby zastosowania programów, których podstawą byłby nie sztywno określony algorytm działania, lecz przeniesiona do komputera wiedza ekspertów, analizowana przezeń zgodnie z zasadami logiki. Systemami takimi są systemy ekspertowe. Systemy te wydają się szczególnie atrakcyjne w zakresie opracowywania procedur spawania [15,35,37,38].

Nowym kierunkiem jest stosowanie w oprogramowaniu sztucznych sieci neuronowych i logiki rozmytej. Główne zalety sieci neuronowych to zdolność uczenia się, duża szybkość przetwarzania, zdolność do uogólnienia nabytej wiedzy, odporność na błędy i możliwość niejawnego znajdowania zależności między wprowadzonymi danymi a wynikami. Sieci neuronowe nie wymagają definiowania żadnych zasad rozwiązywania problemu, ponieważ reguły działania są opracowywane w trakcie uczenia na przykładach. Główną zaletą systemów wykorzystujących logikę rozmytą jest umiejętność przetwarzania informacji „niepewnej”, charakteryzującej się pewną rozmytością. W zaawansowanych systemach można wprowadzanej informacji przypisać stopień niepewności. Systemy te umożliwiają także przetwarzanie informacji, dla której trudno jest przypisać wartość liczbową. Istnieją również mechanizmy przetwarzania wartości dokładnych na wartości rozmyte. Sieci neuronowe i systemy wykorzystujące logikę rozmytą znajdują już zastosowanie w niektórych dziedzinach spawalnictwa. Obecne kierunki zastosowania to między innymi budowa systemów ekspertowych, monitorowanie procesu spawania w czasie rzeczywistym oraz przewidywanie geometrii ściegu dla różnych typów połączeń i różnych technik spawania [84].

Analityczne metody oceny spawalności stali stanowią nowe, niestety jeszcze powszechnie niedoceniane narzędzie w badaniach spawalności stali i wyznaczaniu optymalnych warunków termicznych spawania. Wyniki uzyskiwane z zastosowaniem analitycznych metod oceny spawalności traktowane są jako wstępna teoretyczna analiza poprzedzająca serię badań doświadczalnych. Tymczasem przy umiejętnym wykorzystaniu tego narzędzia badania doświadczalnie można ograniczyć

do minimum. Szczególnie atrakcyjne wydaje się łączne wykorzystanie metod analitycznej oceny spawalności stali i badań symulacyjnych, co w bliskiej przyszłości może stać się podstawowym narzędziem badań spawalności stali a w szczególności wrażliwości na spajanie i wyznaczania optymalnych warunków termicznych spawania, eliminując w znacznym stopniu drogie i pracochłonne badania technologiczne.

1. TEORETYCZNE PODSTAWY OCENY SPAWALNOŚCI STALI

1.1. Spawalność stali - definicja

Podobnie jak przydatność do hartowania nazwano hartownością, do odlewania lejnością a przydatność do skrawania skrawalnością tak **przydatność materiału do spawania nazwano spawalnością**. Ze względu jednak na to, że pojęcie to związane jest nie tylko z materiałem spawanym, lecz także z wieloma innymi czynnikami wynikającymi między innymi ze stosowanych metod i technologii spawania, materiałów dodatkowych do spawania oraz rozwiązań konstrukcyjnych przez wiele lat występowały trudności w sformułowaniu zadawalającej definicji spawalności. Jedną z pierwszych definicji spawalności opublikowano w 1924 roku [62]:

Materiał uważa się za spawalny, jeżeli różne części ze stali o podobnym składzie chemicznym dają się połączyć w jedną całość, przy użyciu ciepła.

Definicja która powstała w połowie lat trzydziestych uwzględniała już pewne aspekty technologiczne procesu spawania [61]:

Spawalność jest to własność nie tylko spawanego materiału, lecz jest ona zależna od metody spawania i materiału dodatkowego.

Takie podejście do pojęcia spawalności doprowadziło do tego, że spawalność zaczęto rozpatrywać z trzech punktów widzenia, rozróżniając **spawalność metalurgiczną, spawalność technologiczną i spawalność konstrukcyjną** [79].

Spawalność metalurgiczna - związana jest z określonymi właściwościami materiału, takimi jak skład chemiczny, struktura, obecność wtrąceń niemetalicznych, gazów itp.

Spawalność technologiczna - zwana niekiedy operatywną, uzależniona jest od warunków technologicznych i parametrów spawania: metody spawania, energii źródła ciepła, prędkości spawania itp.

Spawalność konstrukcyjna - zależna jest od zespołu czynników charakteryzujących spawany element z konstrukcyjnego punktu widzenia (wymiary, rozkład obciążeń, sztywność).

Definicja spawalności ewaluowała wraz z rozwojem technik spawalniczych oraz rozwojem materiałów, dla których spawanie okazało się główną metodą ich łączenia. Równolegle rozwijane były metody badań pozwalające oceniać spawalność.

W latach sześćdziesiątych w **Międzynarodowym Instytucie Spawalnictwa** opracowano definicję spawalności przyjętą przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) [93]:

Uważa się, że materiał metaliczny jest spawalny w żądanym stopniu za pomocą określonej metody i dla danego rodzaju konstrukcji, jeśli nadaje się, przy zastosowaniu środków ostrożności, odpowiadających temu stopniowi - do wykonania połączeń między dwoma elementami. Połączenia te mają zapewnić ciągłość metaliczną, a więc utworzyć złącze spawane, które przez swoje cechy lokalne i następnie ogólne spełniają żądane wymagania będące podstawą ich oceny.

Również w kraju podejmowano próby sformułowania definicji spawalności:
wg J.Pilarczyka [56] :

Spawalność jest to zdolność do tworzenia za pomocą spawania złączy o wymaganych właściwościach fizycznych, zdolnych do przenoszenia obciążeń przewidzianych dla danego rodzaju konstrukcji, do wykonania której dana stal ma być użyta.

wg M.Myśliwca [50] :

Spawalność jest to prawdopodobieństwo zdarzenia, polegającego na tym, że złącza spawane wykonane z danego metalu, za pomocą określonego procesu technologicznego spawania, będą pracowały w sposób niezawodny w wymaganych warunkach eksploatacyjnych przez zadany okres.

Rozwój wielu gatunków stali w tym niskowęglowych stali o podwyższonej, wysokiej i bardzo wysokiej wytrzymałości oraz problemy związane z właściwościami połączeń spawanych tych stali zmusiły do podjęcia szczegółowych badań nad czynnikami wpływającymi na zachowanie się materiałów oraz wykonywanych z nich konstrukcji podczas spawania. Opracowanie nowych metod badawczych umożliwiło rozróżnienie a następnie analizę wpływu poszczególnych czynników na spawalność. Powstały podstawy do ilościowego określenia wpływu tych czynników na spawalność. Tak więc spawalność, która dotychczas rozważana była wyłącznie w kategoriach opisowych lub jakościowych, mogła zostać przedstawiona w postaci parametrycznej.

Zgodnie z normą **PN-84/M-69005 Spawalnictwo. Spajanie metali. Terminologia** :

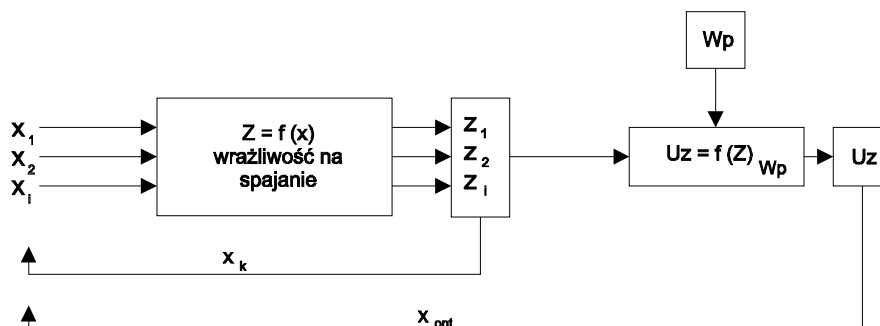
Spajalność (pojęcie nadrzędne, obejmujące: spawalność, zgrzewalność i lutowność) wyraża przydatność metalu o danej wrażliwości na spajanie, do utworzenia w określonych warunkach spajania złącza metalicznie ciągłego o wymaganej użyteczności.

Wrażliwość na spajanie wyraża reakcję metalu na procesy wywołane określonymi warunkami spajania

Warunki spajania obejmują zespół czynników technologicznych i konstrukcyjnych oddziałujących na spajane złącze w czasie jego wykonywania.

Użyteczność jest wynikiem własności złącza i określa możliwości jego wykorzystania w danych warunkach pracy.

Powyższą definicję można przedstawić w postaci graficznej (rys.1.1.)



Rys.1.1. Graficzne przedstawienie definicji spawalności stali

- x_i - warunki spawania
- z_i - właściwości złącza
- W_p - warunki pracy
- U_z - użyteczność złącza

Pomiędzy warunkami spawania a właściwościami złącza występują zależności o charakterze przyczynowo-skutkowym, których opis matematyczny, nazywany wrażliwością na spawanie, odpowiada funkcji obiektu badań w teorii eksperymentu. Wrażliwość na spawanie stanowi w takim ujęciu podstawowy czynnik materiałowy zależny od składu chemicznego i struktury stali w chwili poprzedzającej proces spawania.

Zapewne nie jest to ostateczna wersja definicji spawalności. Prace nad definicją spawalności i jej w pełni ilościowym opisem na pewno będą rozwijane, choćby tylko z tego powodu, że opracowanie w pełni ilościowego modelu spawalności pozwoli na uwzględnienie analizy spawalności na etapie projektowania materiału, biorąc po uwagę konkretne zastosowanie (np. rodzaj konstrukcji, charakter pracy) i technologię łączenia, nie wspominając już o przyspieszeniu i potaniu badań spawalności stali.

1.2. Warunki spawania

Warunki spawania to zespół czynników technologicznych i konstrukcyjnych oddziałujących na spawane złącze w czasie jego wykonywania.

Podstawowe czynniki technologiczne to:

- metoda spawania,
- energia liniowa łuku,
- temperatura podgrzewania przed i po spawaniu,
- obróbka cieplna po spawaniu,
- kolejność spawania,
- pozycja spawania,
- właściwości fizyko-chemiczne materiałów dodatkowych,
- warunki otoczenia: temperatura, wilgotność, itp.

Podstawowe czynniki konstrukcyjne to:

- grubość łączonych elementów,
- długość spoiny,
- warunki utwierdzenia,
- kształt złącza,
- sposób ukosowania.

Czynniki te decydują o przebiegu procesów cieplnych i odkształceniowych, przemianach strukturalnych, dyfuzji gazów, a w pewnych przypadkach także procesach dyfuzji niektórych pierwiastków ze spoiny do SWC złącza spawanego i na odwrót. Metal poddany tym procesom zmienia swoją strukturę i właściwości. Zmienia je w stopniu określonym przez jego wrażliwość na spawanie.

1.2.1. Cykl cieplny spawania

W wyniku oddziaływania na spawane elementy strumienia ciepłego pochodzącego ze spawalniczego źródła ciepła, w trakcie procesu spawania w elementach spawanych powstaje nierównomierny rozkład temperatur. Rozkład temperatur w spawanym elemencie w dowolnym momencie czasu nazywa się polem temperatury. Pole temperatur przedstawia się za pomocą izoterm.

Zmiany temperatur w funkcji czasu w każdym z punktów spawanego materiału, znajdujących się w zasięgu pola temperatur, nazywa się cyklem cieplnym.

Kształt cykli cieplnych spawania zależy jest od:

- metody spawania (rodzaj i charakterystyka źródła ciepła),
- parametrów spawania,
- temperatury początkowej elementów spawanych,
- pojemności cieplnej i przewodnictwa cieplnego materiału,
- masy, grubości i kształtu elementów spawanych oraz wzajemnego usytuowania elementów względem siebie.
- miejsca złącza, w którym analizujemy cykl cieplny.

Wielkościami charakteryzującymi źródło ciepła w procesie spawania są moc źródła, gęstość strumienia ciepła oraz sprawność cieplna źródła ciepła. Źródłem ciepła przy spawaniu łukowym jest łuk elektryczny.

Całkowita moc łuku elektrycznego jest zależna od parametrów prądowych [57]:

$$q_c = U \cdot I \quad [\text{W}] \quad (1.1)$$

gdzie:

U - napięcie łuku [V]
I - natężenie prądu [A]

Efektywna moc łuku, tj. moc wykorzystana do nagrzewania spawanego przedmiotu, jest mniejsza od mocy całkowitej, na skutek strat ciepła do otaczającej atmosfery :

$$q = \eta_{\eta} \cdot k_e \cdot q_c \quad [\text{W}] \quad (1.2)$$

gdzie:

η_{η} - współczynnik sprawności nagrzewania.
 k_e - współczynnik rodzaju prądu, dla prądu stałego $k_e = 1$, dla prądu przemiennego 0,7 - 0,97.

Współczynnik sprawności nagrzewania zależy od metody spawania oraz długości łuku i w zależności od metody mieści się w następujących granicach:

- spawanie elektrodami otulonymi	$n_{\eta} = 0,70 - 0,85$
- spawanie łukiem krytym	$n_{\eta} = 0,80 - 0,95$
- spawanie MIG	$n_{\eta} = 0,45 - 0,65$
- spawanie TIG	$n_{\eta} = 0,45 - 0,60$

Wielkością wiążącą ze sobą podstawowe parametry spawania łukowego, czyli natężenie prądu spawania, napięcie łuku i prędkość spawania jest **energia liniowa łuku**:

$$E = \frac{U \cdot I}{v} \cdot k_e \cdot n_{\eta} \quad [\text{J/m}] \quad (1.3)$$

gdzie:

v - prędkość spawania [m/s]

Jednym z kluczowych elementów analitycznych metod oceny spawalności stali jest opisanie pola temperatur w SWC złącza spawanego. Literatura z tego zakresu zawiera szereg szczegółowych rozwiązań równania różniczkowego przewodzenia ciepła. Przyjmuje się, że proces przepływu ciepła w dowolnym punkcie analizowanego ciała i w określonym momencie czasu spełnia równanie różniczkowe [50]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_0}{c_p q_1} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\lambda_0}{c_p q_1} \nabla^2 T \quad (1.4)$$

gdzie:

λ_0 - współczynnik przewodzenia ciepła

c_p - ciepło właściwe

q_1 - gęstość

T - temperatura

t - czas

x, y, z - współrzędne analizowanego punktu

Jednakże złożoność zjawisk przepływu ciepła w elementach spawanych sprawia, że w obliczeniach stosowanych jest szereg założeń upraszczających. Rozpatruje się zarówno uproszczone modele ciał jak i źródeł ciepła, przyjmuje się stałe materiałowe niezależne od temperatury, pomija się ukryte ciepło krzepnięcia spoiny i ciepło przemian, straty ciepła odbitego od spoiny itd.

Do obliczeń rozkładów temperatur przyjmuje się najczęściej następujące schematy obliczeniowe [50]:

- ciało masywne spawane ruchomym, punktowym źródłem ciepła,
- ciało masywne spawane szybkim, punktowym źródłem ciepła,
- płyta spawana ruchomym, punktowym źródłem ciepła,
- płyta spawana szybkim, punktowym źródłem ciepła,
- cienka płyta spawana ruchomym, liniowym źródłem ciepła,
- cienka płyta spawana szybkim, liniowym źródłem ciepła.

Ciało masywne jest to model ciała nieskończenie rozbudowanego w kierunku osi Ox i Oy , o skończonym wymiarze w kierunku osi Oz . Ciepło doprowadzane jest do jednej powierzchni ograniczającej

$z = 0$. Strumień ciepła wytworzony w ciele masywnym ma charakter przestrzenny. Modelowi temu odpowiada w rzeczywistości blacha o grubości większej od 25 mm.

Płyta to model ciała ograniczonego dwoma płaszczyznami $z = 0$ i $z = g$, o wymiarach nieskończenie rozbudowanych w kierunkach osi Ox i Oy . Powstały w płycie przestrzenny strumień ciepła jest częściowo zniekształcony powierzchniami ograniczającymi. Modelowi temu odpowiada blacha o grubości w zakresie od 3 do 25 mm.

Cienka płyta (powłoka) jest to model ciała ograniczonego dwoma płaszczyznami $z = 0$ i $z = g$, ale o nieznaczącej grubości. Strumień ciepła występujący w powłoce jest płaski, co wynika z założenia, że ciepło prowadzone jest równomiernie na całej grubości cienkiej płyty. Modelowi cienkiej płyty odpowiada w rzeczywistości blacha o grubości poniżej 3 mm.

Punktowe źródło ciepła jest to źródło o nieskończenie małej objętości. Przykładem takiego źródła jest łuk elektryczny.

Liniowe źródło ciepła jest to źródło, w którym ciepło jest rozmieszczone wzdłuż odcinka linii prostej (ciepło skoncentrowane w objętości prostopadłościanu lub walca o nieskończenie małej podstawie).

Ruchome źródło ciepła to źródło stałej mocy przemieszczające się po powierzchni lub wewnątrz analizowanego ciała ruchem prostoliniowym ze stałą szybkością.

Szybkie źródło ciepła to źródło poruszające się ruchem prostoliniowym ze stałą szybkością, zbliżoną do prędkości przepływu ciepła przed źródłem ciepła.

Obliczenia prowadzi się zwykle przy następujących założeniach:

1. Moc cieplną łuku elektrycznego w czasie całego okresu spawania przyjmuje się stałą.
2. Rozprzestrzenianie się ciepła w metalu odbywa się zgodnie z prawem Fouriera:
ilość przewodzonego ciepła dQ w czasie dt przez element powierzchni izotermicznej dF jest proporcjonalna do gradientu temperatury dT/dn , a λ jest współczynnikiem proporcjonalności

$$dQ = -\lambda_0 \frac{dT}{dn} dF dt \quad (1.5)$$

3. W przypadku ciała masywnego, powierzchnia ograniczająca jest powierzchnią adiabatyczną, na której nie występuje wymiana ciepła z otaczającą atmosferą. Wymiana taka zgodnie z prawem Newtona, odbywa się na powierzchniach granicznych w przypadku cienkiej płyty. Ilość oddawanego ciepła dQ_k przez element powierzchni granicznej dF o temperaturze T do otaczającej atmosfery o temperaturze T_0 w czasie dt jest równa:

$$dQ_k = \alpha_k (T - T_0) dF dt \quad (1.6)$$

gdzie:

α_k - współczynnik wymiany ciepła przez unoszenie

4. Współczynniki cieplno - fizyczne spawanego materiału, takie jak:
 - współczynnik przewodzenia ciepła λ ,
 - objętościowa pojemność cieplna $c\gamma$ (c - ciepło właściwe, γ - gęstość),
 - współczynnik przewodzenia temperatury $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$

są stałe w danym zakresie temperatur.

5. Przemiany fazowe i strukturalne metalu odbywają się bez wydzielania i pochłaniania ciepła.

Oczywiście założenia te, a w szczególności założenie 4 i 5, stanowią jedynie zgrubne przybliżenie stanu rzeczywistego.

Poniżej przedstawiono rozwiązania równania przewodnictwa ciepła dla typowych schematów obliczeniowych [50]:

Ciało masywne spawane ruchomym, punktowym źródłem ciepła:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda_0 R} e^{-\frac{v}{2a}(x=R)} + T_0 \quad ; \quad R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.7)$$

Ciało masywne spawane szybkim, punktowym źródłem ciepła:

$$T(y, z, t) = \frac{q}{2\pi\lambda_0 vt} e^{-\frac{r^2}{4at}} + T_0 \quad ; \quad r = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (1.8)$$

Płyta spawana ruchomym, punktowym źródłem ciepła:

$$T(r, x, z,) = m_{(r,z)} \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0\left(\frac{vr}{2a}\right) + T_0 \quad (1.9)$$

$m_{(r,z)}$ - współczynnik uwzględniający zmiany temperatury na grubości płyty δ

w zależności od $\frac{v\delta}{2a}$ oraz $\frac{r}{\delta}$.

Cienka płyta spawana ruchomym, liniowym źródłem ciepła:

$$T(r) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0(u) + T_0 \quad (1.10)$$

$K_0(u)$ - wartość funkcji Bessela dla $u = r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b_1}{a}}$

$b_1 = \frac{2\alpha_k}{c\gamma\delta}$ - współczynnik wymiany ciepła na powierzchni granicznej cienkiej płyty

Cienka płyta spawana szybkim, liniowym źródłem ciepła:

$$T(y, t) = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda tc\gamma}} e^{-\left(\frac{y^2}{4at} + b_1 t\right)} \quad (1.11)$$

Jeżeli w równaniu tym pominiemy $b_1 t$, to obliczenia prowadzone będą bez uwzględnienia wymiany ciepła z otoczeniem.

Przyjmowane do obliczeń warunki graniczne nie są spełnione lub spełnione są częściowo, w związku z tym obliczone wartości mogą odbiegać od wartości zmierzonych. Możliwe jest jednak skorygowanie obliczeń na podstawie pomiarów cykli cieplnych w określonych punktach elementów spawanych.

W dalszej części tego rozdziału, ze względu na wielość, nie prezentowano innych szczegółowych rozwiązań równania przewodzenia ciepła, zawarte są one między innymi w pracach [10, 13, 16, 59, 60, 64, 71, 87]. Poniżej przedstawiono natomiast wybrane zależności mające duże znaczenie praktyczne w analizie spawalności.

Wyznaczanie czasu chłodzenia w zakresie temperatur pomiędzy 800 a 500°C :

$$t_{8/5} = \frac{q}{2\pi\lambda v e \theta_1} \quad \text{dla ciała masywnego [87]} \quad (1.12)$$

$$t_{8/5} = \frac{q}{2\pi\lambda\rho c v^2 d^2 e \theta_2^2} \quad \text{dla cienkiej płyty [87]} \quad (1.13)$$

gdzie:

$$\frac{1}{\theta_1} = \frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0}$$

$$\frac{1}{\theta_2} = \frac{1}{(773 - T_0)^2} - \frac{1}{(1073 - T_0)^2}$$

wg Suzuki [74] :

$$t_{8/5} = F \frac{\gamma}{(600 - T_p)^\varepsilon} \cdot q(\alpha + \beta T_p) \quad (1.14)$$

gdzie:

- F - stała,
 F = 1 dla napoiny wykonanej na powierzchni blachy o grubości powyżej 20mm,
 F = 0,9 dla ściegu graniowego,
 F = 0,67 dla spoiny pachwinowej i grubości materiału powyżej 20 mm,
 F = 0,45 - 0,67 dla spoin pachwinowych i grubości materiału poniżej 20 mm
- Q - energia liniowa łuku,
 T_p - temperatura podgrzewania wstępnego,
 α, β, γ, δ - stałe

wg [30]:

$$t_{8/5} = \frac{K \cdot E^n}{\beta(T - T_0)^2 \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{g - g_0}{\alpha}\right) \right]} \quad (1.15)$$

gdzie:

E - energia liniowa łuku ($E = \frac{I \cdot U}{v}$) [J/cm]

T_0 - temperatura podgrzewania spawanych elementów [$^{\circ}\text{C}$]

g - grubość blachy [m]

K, T, g_0 , n, α , β - współczynniki zależne od metody spawania

Wartości współczynników występujących we wzorze 1.15 podano w tablicy 1.1.

Tablica 1.1 Wartości wielkości występujących we wzorze 1.1

Metoda spawania	K	n	g_0	α	T	β napoina lub spoina czołowa	β spoina pachwi nowa
Spawanie elektrodą otuloną	1,35	1,5	14,6	6	600	1	2
Spawanie w osłonie CO ₂	$\frac{1}{2,9}$	1,7	13	3,5	600	1	1,7
Spawanie łukiem g < 32	$\frac{9,5}{10^5 - 0,22g}$	2,5-0,05g	12	3	600	1	-
krytym g ≥ 32	950	0,95	12	3	600	1	-

Szerokość strefy wpływu ciepła w której temperatura przekraczała temperaturę A1:

$$r = \left(\frac{2}{\pi e \rho c} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{A_{c1} - T_0} \right)^{1/2} \quad \text{dla ciała masywnego} \quad (1.16)$$

$$r = \left(\frac{2}{\pi e} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{2\rho c} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{A_{c1} - T_0} \quad \text{dla cienkiej płyty} \quad (1.17)$$

gdzie:

r - odległość od linii wtopu

$$A_{c1} = 723 - 10,7\text{Mn} - 16,9\text{Ni} + 29,1\text{Si} + 16,9\text{Cr} + 290\text{As} + 6,3\text{W}$$

W przypadku gdy chcemy wyznaczyć szerokość SWC dla temperatur przekraczających A3 w równaniach (1.16), (1.17) należy zastąpić temperaturę Ac1 przez Ac3.

$$A_{C3} = 910 - 203C - 15,2Ni + 44,7Si + 104V + 31,5Mo + 13,1W - (30Mn + 11Cr + 20Cu - 700P - 400Al - 120As - 400Ti) \quad (1.18)$$

1.2.2. Odształceniowy cykl spawania

Odształceniowy cykl spawania jest następstwem cyklu cieplnego spawania. Zmiany pola temperatur wywołują podczas nagrzewania rozszerzanie a podczas chłodzenia skurcz materiału. Ograniczenie swobody odkształceń, wywołane otaczającym metalem, jest źródłem powstawania naprężeń:

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (1.19)$$

gdzie:

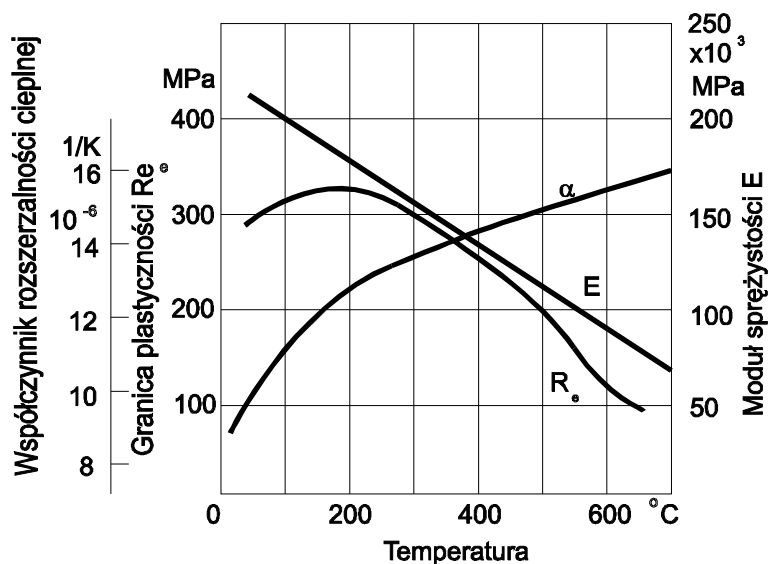
E - moduł sprężystości

α - współczynnik rozszerzalności cieplnej liniowej

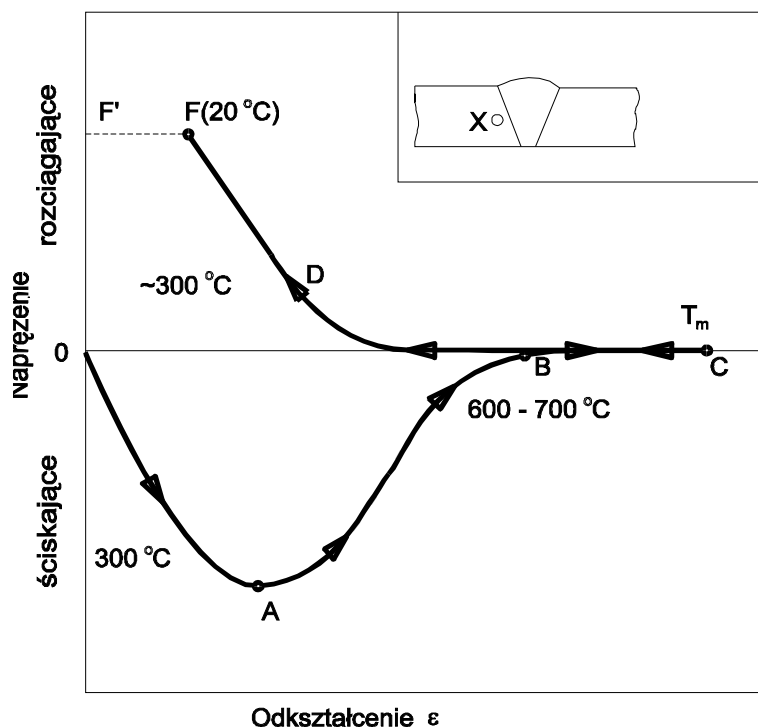
ΔT - różnica temperatur pomiędzy nagrzaną i nienagrzaną strefą metalu.

Należy pamiętać, że wartości E, α oraz granica plastyczności Re ulegają znacznym zmianom wraz ze zmianą temperatury, co ilustruje rys.1.2.

Zmiany naprężenia zachodzące w materiale spawanym zależą od sztywności i utwardzenia węzła spawanego oraz przemian fazowych zachodzących w spoinie i w strefie wpływu ciepła. Na rys.3 przedstawiono schemat zmian naprężenia w funkcji odkształcenia zachodzących w punkcie X strefy SWC podczas spawania doczołowego dwóch blach.



Rys.1.2. Zmiany właściwości stali węglowej w funkcji zmian temperatury [79]



Rys.1.3. Schemat zmian naprężenia w funkcji odkształcenia jakie zachodzą w punkcie X strefy wpływu ciepła podczas wykonywania złącza doczołowego [79]

Podczas nagrzewania do temperatury maksymalnej cyklu cieplnego spawania w analizowanym punkcie SWC powstają naprężenia ściskające. W zakresie temperatur do 300°C w stalach konstrukcyjnych zależność $\sigma = f(\epsilon)$ jest liniowa i zgodna z prawem Hooke'a. Wraz ze wzrostem temperatury granica plastyczności materiału obniża się, co przy istniejących naprężeniach wywołuje proces odkształcenia plastycznego. W zakresie temperatur powyżej 600°C , gdzie spadek wartości granicy plastyczności materiału jest największy obserwowane jest największe odkształcenie plastyczne (odcinek BC). Punkt C oznacza maksymalną temperaturę cyklu w analizowanym miejscu SWC. Maksymalne odkształcenie w tym miejscu wynosi OC.

Podczas chłodzenia, wraz z obniżaniem temperatury, w analizowanym punkcie SWC powstają naprężenia rozciągające i odkształcenia w wyniku rozciągania. Dla zakresu temperatur poniżej 300°C zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem jest ponownie liniowa. Całkowite odkształcenie w punkcie X strefy wpływu ciepła wynosi $\overline{OC} + \overline{CF}$ (gdzie \overline{CF} jest rzutem CF na oś ϵ).

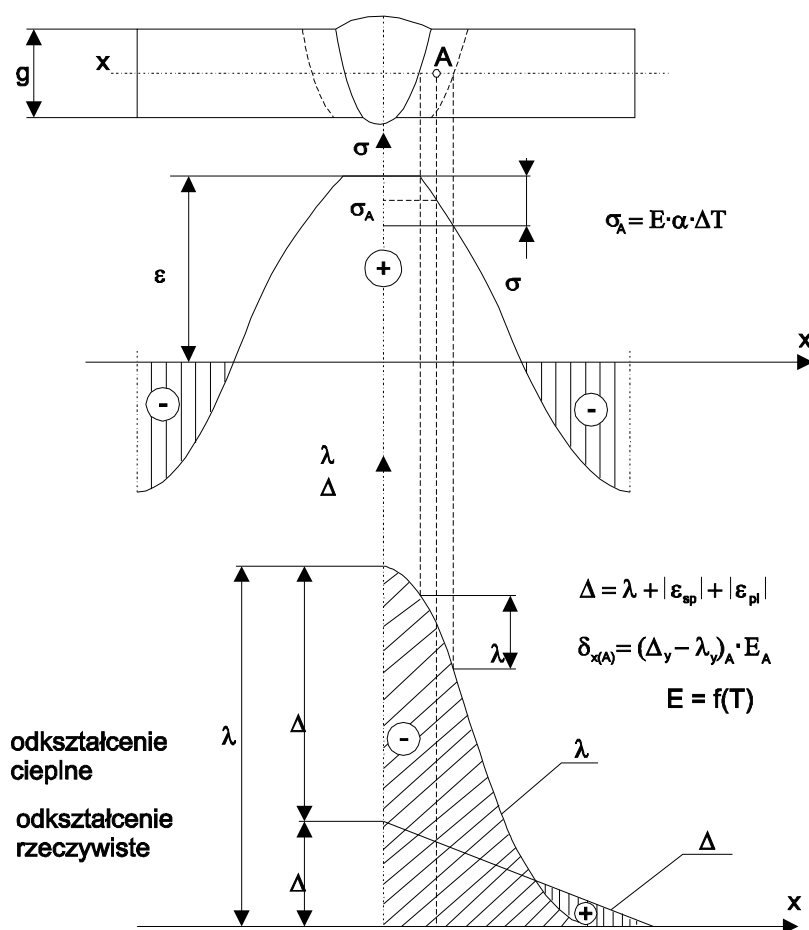
Po zakończeniu spawania w analizowanym punkcie SWC występuje szczytkowe naprężenie rozciągające OF' wywołane odkształceniem sprężystym \overline{DF} (\overline{DF} jest rzutem DF na oś ϵ). Tak więc po ochłodzeniu elementu do temperatury otoczenia w materiale występują **naprężenia własne pozostające**.

Naprężenia własne mogą się sumować z naprężeniami lokalnymi występującymi w pewnych obszarach SWC a powstającymi w wyniku zachodzących przemian strukturalnych. Naprężenia własne mogą być także potęgowane utwierdzeniem połączenia spawanego, przede wszystkim zewnętrznym mocowaniem elementów spawanych, ciężarem własnym elementów, wzajemnym oddziaływaniem pomiędzy elementami spawanymi, skurczem innych spoin w trakcie chłodzenia, mocowaniem innych elementów do spawania itp. Należy pamiętać, że końcowy stan naprężeń powstaje w wyniku nakładania się kolejnych stanów naprężeń własnych wytworzonych w procesie przetwórstwa metalu. W związku z tym na stan naprężeń własnych powstały w wyniku procesu spawania mają również wpływ naprężenia własne powstałe w wyniku procesów poprzedzających spawanie, takich jak: walcowanie, obróbka plastyczna, obróbka cieplna, obróbka mechaniczna.

W połączeniach spawanych naprężenia własne tworzą zawsze wieloosiowy stan naprężeń. Charakterystyczną cechą naprężeń własnych jest to, że ulegają wyrównaniu w pewnym obszarze elementu. Oddziaływanie naprężeń rozciągających równoważone jest zawsze oddziaływaniem naprężeń ściskających co ilustruje rys.1.4. Przedstawiono tu rozkład naprężeń oraz odkształceń w złączu doczołowym wykonanym jednowarstwowo.

1.3. Wrażliwość na spawanie

Wrażliwość na spawanie wyrażająca reakcję metalu na procesy wywołane warunkami spawania, jest czynnikiem ściśle związanym ze spawanym materiałem. Stanowi wynik procesu metalurgicznego wytwarzania stali, przetwórstwa hutniczego oraz wszelkich procesów technologicznych poprzedzających proces spawania. Z pewnym uproszczeniem można przyjąć, że wrażliwość stali na spawanie zależy do składu chemicznego oraz struktury stali w chwili poprzedzającej proces spawania. Reakcja metalu na procesy wywołane warunkami spawania obejmuje zmiany struktury i wynikające stąd zmiany właściwości oraz procesy pęknięcia zachodzące w trakcie procesu spawania.



Rys.1.4. Rozkład naprężeń oraz odkształceń w złączu doczołowym wykonanym jednowarstwowo [48]

1.3.1. Wpływ cyklu cieplnego spawania na strukturę SWC

Cykl cieplny spawania, będący funkcją charakterystyki źródła ciepła, energii liniowej łuku, grubości, kształtu i wzajemnego położenia spawanych elementów, zabiegów cieplnych przed i w trakcie spawania oraz właściwości cieplnych spawanego materiału, charakteryzuje się pewnymi parametrami decydującymi o przebiegu przemian w SWC połączenia spawanego, parametrami tymi są:

- szybkość nagrzewania (lub czas nagrzewania) do temperatury maksymalnej cyklu - v_{max} (lub t_{max}),
- temperatura maksymalna cyklu cieplnego spawania - T_{max} ,
- czas przebywania w temperaturach powyżej $A_3 - t_{A_3}$,
- czas chłodzenia w zakresie temperatur pomiędzy 800 a $500^{\circ}\text{C} - t_{8/5}$

Podczas nagrzewania, w zakresie temperatur do A_1 w SWC materiału spawanego nie zachodzą żadne przemiany strukturalne, mogą natomiast mieć miejsce zmiany związane z przechodzeniem nietrwałych składników strukturalnych w składniki trwałe. Rezultatem tych zmian są procesy starzenia i odpuszczania.

Po przekroczeniu temperatury A_1 , w materiale rozpoczyna się przemiana austenityczna, zaś po przekroczeniu temperatury A_3 następuje **proces homogenizacji (ujednorodniania) austenitu i rozrostu ziarn**.

Szybkość nagrzewania do temperatury maksymalnej cyklu cieplnego spawania oraz maksymalna temperatura cyklu to parametry decydujące o szybkości rozpuszczania węglików oraz homogenizacji austenitu. W wyniku dużej, w porównaniu z obróbką cieplną, szybkości nagrzewania do temperatury maksymalnej cyklu wzrasta temperatura początku przemiany A_1 , opóźnia się rozpuszczanie węglików, wzrasta temperatura końca przemiany A_3 , oraz rozszerza się temperaturowy zakres przemiany $\alpha \rightarrow \gamma$.

Podczas szybkiego nagrzewania, po przekroczeniu temperatury A_3 , w austenicie pozostaje duża ilość nierozpuszczonych węglików. Węgliki te rozpuszczają się w całości dopiero przy temperaturach znacznie przewyższających A_3 . W niektórych stalach z dodatkami pierwiastków silnie węglikotwórczych takich jak V, Ti, Nb, Mo czy W, węgliki nie rozpuszczają się całkowicie nawet przy bardzo wysokich temperaturach. Nierozpuszczone węgliki hamują w tych materiałach rozrost ziarn oraz nie sprzyjają procesowi ujednorodniania austenitu. Im mniejsza jest szybkość nagrzewania, tym niższa jest temperatura maksymalna, przy której występuje jednorodny austenit.

Także przy bardzo wysokich temperaturach obserwowane jest hamowanie ujednorodniania austenitu. Przyczyną tego może być dyfuzja składników stopowych i domieszek po granicach ziarn oraz procesy wydzielania w stanie stałym faz, w których rozpuszczalność pewnych pierwiastków i domieszek jest wyższa niż w podstawowym roztworze (np. przemiana δ).

Proces rozrostu ziarna w SWC złącza spawanego jest ściśle związany z poprzedzającymi go procesami powstawania austenitu i jego homogenizacji. Z tego też względu parametrami cyklu cieplnego spawania decydującymi o wielkości ziarna w SWC są: szybkość nagrzewania do temperatury maksymalnej cyklu, temperatura maksymalna cyklu cieplnego spawania oraz czas przebywania w zakresie temperatur powyżej A_3 .

Najbardziej intensywny rozrost ziarn następuje zwykle podczas nagrzewania do temperatury maksymalnej cyklu po przekroczeniu temperatury 1100°C . W nielicznych przypadkach ma to miejsce w fazie chłodzenia, po przekroczeniu temperatury T_{max} . Wraz ze wzrostem szybkości nagrzewania temperaturowy zakres najbardziej intensywnego rozrostu ziarn przesuwa się bliżej temperatury maksymalnej cyklu cieplnego spawania.

Przy chłodzeniu intensywność rozrostu ziarn zmniejsza się w wyniku ciągłego obniżania temperatury i kończy się podczas chłodzenia zwykle przy temperaturach wyższych od tych, przy których rozpoczął się podczas nagrzewania. Wraz ze wzrostem szybkości nagrzewania i chłodzenia temperatura końca procesu rozrostu ziarn zwykle obniża się, o ile fazy dyspersyjne i segregaty nie hamują migracji granic ziarn. Jeżeli jednak, w wyniku wysokich szybkości nagrzewania, węgliki nie zdążą się rozpuścić, to wzrost szybkości chłodzenia może prowadzić do podwyższenia temperatury końca rozrostu ziarn.

W procesie chłodzenia przemiana austenitu w warunkach spawalniczych następuje zwykle w temperaturze wyraźnie niższej od temperatury A_1 , co wynika z bardzo dużej szybkości chłodzenia w

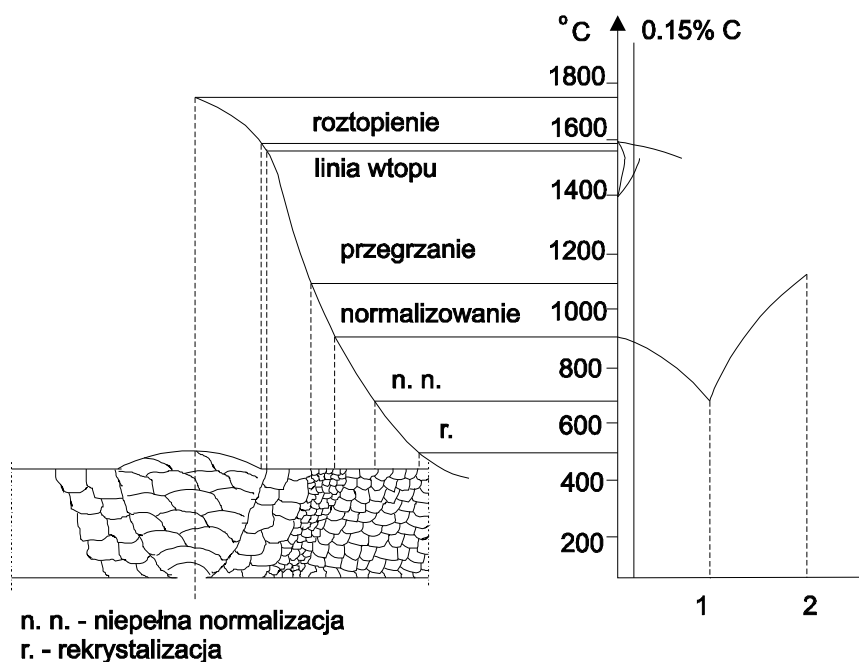
złącza spawanym. W zależności od składu chemicznego spawanej stali przemiana austenitu może być zbliżona do przemiany perlitycznej lub martenzytycznej.

Rodzaj mikrostruktury, powstającej w SWC złącza spawanego w wyniku przemiany austenitu zależy od warunków austenitacji (tj. od v_{max} , T_{max} i t_{A3}) oraz szybkości chłodzenia w zakresie temperatur najniższej trwałości austenitu. Szczególnie istotną miarą szybkości chłodzenia jest czas chłodzenia w zakresie temperatur pomiędzy 800 a 500°C, tzw. czas $t_{8/5}$.

Ze względu na charakter cyklu cieplnego spawania w SWC złącza spawanego można wyróżnić następujące obszary (rys.1.5):

- obszar przegrzania, występujący bezpośrednio za linią wtopienia. W tym obszarze maksymalna temperatura cyklu cieplnego spawania znacznie przekracza temperaturę AC3, dochodząc do temperatury solidusu, co sprzyja znacznemu rozrostowi ziarn austenitu. Ta część SWC wykazuje zazwyczaj najniższe właściwości plastyczne. Dlatego też większość badań i zależności analitycznych dotyczy właśnie tej części SWC.
- obszar normalizacji, charakteryzujący się strukturą drobnoziarnistą. Maksymalna temperatura w tym obszarze nieznacznie przekracza temperaturę AC3,
- obszar niepełnej normalizacji. Maksymalna temperatura cyklu cieplnego spawania w tym obszarze mieści się w zakresie pomiędzy temperaturami AC3 a AC1,
- obszar rekrytalizacji, w którym maksymalna temperatura cyklu cieplnego spawania nie przekracza temperatury AC1.

Poszczególne obszary SWC różnią się zarówno wielkością ziarna jak i rodzajem struktury, co wywołuje odpowiednie różnice we właściwościach tych obszarów.



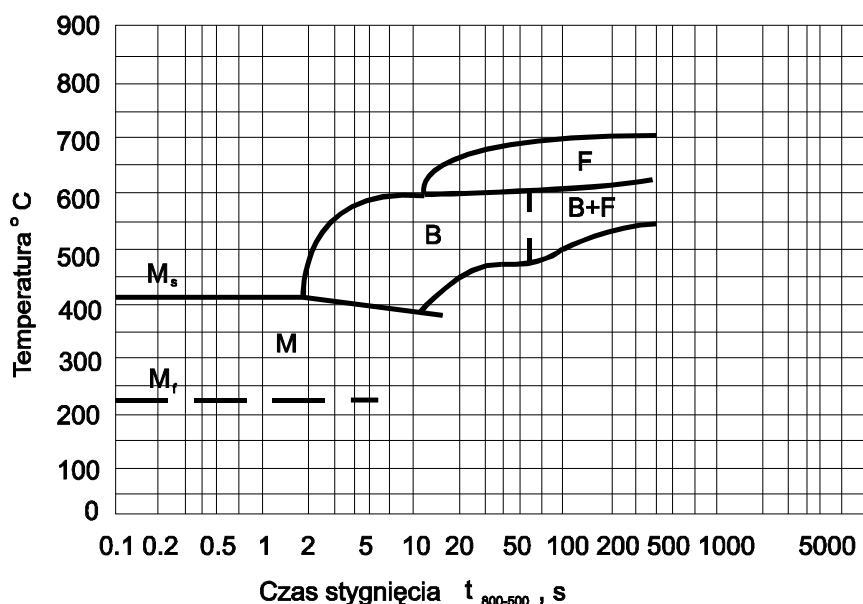
Rys.1.5. Charakterystyczne obszary strefy wpływu ciepła złącza spawanego [56]
Wykresy CTPc-S

Analizę przemian zachodzących w SWC połączenia spawanego prowadzi się najczęściej na podstawie wykresów rozpadu przechłodzonego austenitu w warunkach spawalniczych cykli cieplnych (CTPc-S).

Wyznaczanie temperatur przemian fazowych celem opracowania wykresów CTPc-S można prowadzić dwoma metodami [1,96]:

- metodą "in situ". W tej metodzie temperatury przemian wyznacza się bezpośrednio podczas spawania za pomocą analizy termicznej, polegającej na różniczkowaniu krzywej zmian temperatury w funkcji czasu $T = f(t)$.
- metodą symulacyjną. W metodzie tej próbki poddaje się cyklom cieplnym imitującym proces nagrzewania i chłodzenia w czasie procesu spawania. Próbki nagrzewa się oporowo indukcyjnie, przepuszczając przez próbkę prąd (ciepłem Joule'a) lub za pomocą energii promieniowania lamp projekcyjnych. Temperatury przemian w tej metodzie można wyznaczać dylatometrycznie $\Delta l = f(t)$, metodą analizy termicznej $dT/dt = f(t)$ lub metodą magnetyczną $d\mu/dt = f(t)$.

Wykresy CTPc-S przedstawia się w układzie półlogarytmicznym: temperatura - czas chłodzenia lub temperatura - czas chłodzenia w zakresie temperatur 800 - 500°C. W tym drugim przypadku czas $t_{8/5}$ wyznacza się z poszczególnych krzywych chłodzenia. Dla tak wyznaczonych czasów $t_{8/5}$ (linia pionowa odpowiada na omawianym typie wykresu krzywej chłodzenia) nanosi się temperatury początku i końca poszczególnych przemian, łącząc je następnie liniami. Powstają w ten sposób pola, opisujące zakres powstawania poszczególnych składników strukturalnych (rys.1.6).



Rys.1.6. Wykres CTPc-S

Zazwyczaj wykresy CTPc-S uzupełnia się wykresami zmian R_m , R_e , A_5 i Z w funkcji czasu $t_{8/5}$ oraz sporadycznie wykresami zmian R_m , R_e , A_5 i Z w funkcji czasu $t_{8/5}$.

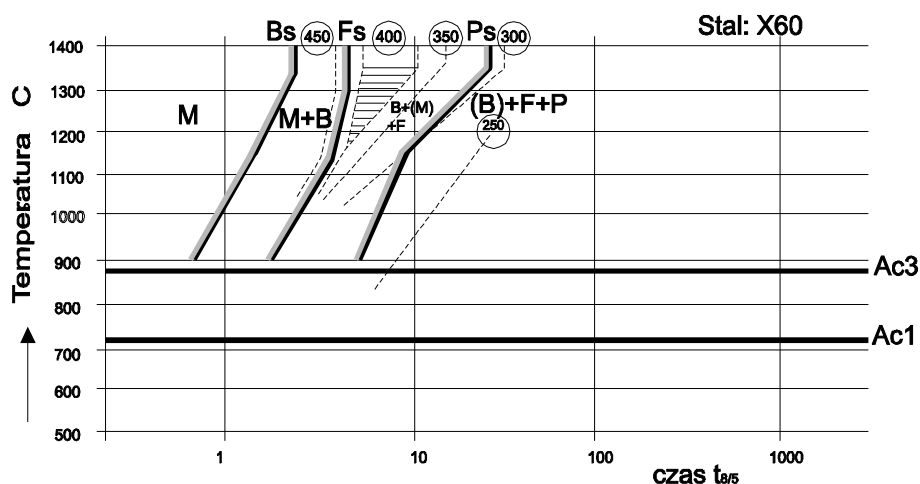
Wykresy CTPc-S wykorzystuje się do:

- przewidywania składu strukturalnego SWC,
- wstępnej oceny skłonności do utwardzania się SWC złącza spawanego, a tym samym skłonności stali do zimnego pęknięcia w procesie spawania,
- określenia warunków spawania (energii liniowej łuku i temperatury wstępnego podgrzewania) pozwalających na uzyskanie połączeń spawanych bez zimnych pęknięć oraz o dobrych właściwościach plastycznych, zabezpieczających ten obszar przed kruchym pękaniem.

W związku z tym, że istotny wpływ na przebieg przemian fazowych, a szczególnie na czas ich rozpoczęcia i zakończenia ma temperatura i czas austenizacji, wykres CTPc-S wyznaczony dla jednej temperatury maksymalnej cyklu cieplnego spawania (najczęściej 1350°C) nie pozwala na

przeprowadzenie analizy zmian strukturalnych w całym obszarze SWC. Wykres taki pozwala jedynie analizować obszar SWC, w którym wystąpiły zbliżone temperatury maksymalne cyklu cieplnego spawania. Dopiero wykonanie serii wykresów CTPc-S, różniących się maksymalnymi temperaturami cyklu cieplnego pozwala na dokładną analizę przemian w całym zakresie SWC.

Dysponując zestawem wykresów CTPc-S wykonanych dla różnych temperatur maksymalnych cyklu, można zbudować wykresy przedstawiające zmianę czasów rozpoczęcia poszczególnych przemian w funkcji maksymalnej temperatury cyklu cieplnego spawania dla analizowanej metody spawania (rys.1.7).



Rys.1.7. Wykres zmian czasów rozpoczęcia poszczególnych przemian w funkcji maksymalnej temperatury cyklu cieplnego spawania [99]

Na wykresie tym wyraźnie widać, że w miarę obniżania temperatury maksymalnej cyklu cieplnego spawania krytyczne czasy rozpoczęcia i zakończenia przemian przesuwają się w kierunku krótszych czasów chłodzenia. Przykładowo w obszarze SWC, gdzie T_{max} osiągnęła wartość $1300^{\circ}C$ otrzymamy dla określonego czasu $t_{8/5}$ strukturę złożoną z martenzytu i bainitu, tymczasem dla obszaru gdzie $T_{max} = 1000^{\circ}C$ przy tym samym czasie $t_{8/5}$ struktura będzie złożona z bainitu, niewielkiej ilości martenzytu i ferrytu. Takie zachowanie się materiału skutkuje między innymi równomierną zmianą twardości w SWC od wartości maksymalnej (dla danych warunków spawania) tuż za linią wtopu do twardości materiału rodzimego na końcu SWC, o ile nie występuje tzw. strefa miękka.

Niestety, wykresy tego typu stanowią wielką rzadkość. Dlatego też przy opracowywaniu technologii spawania dysponujemy najczęściej jedynie wykresami CTPc-S wyznaczonymi dla maksymalnej temperatury cyklu równej $1350^{\circ}C$.

1.3.2. Wpływ cyklu cieplnego spawania na właściwości SWC

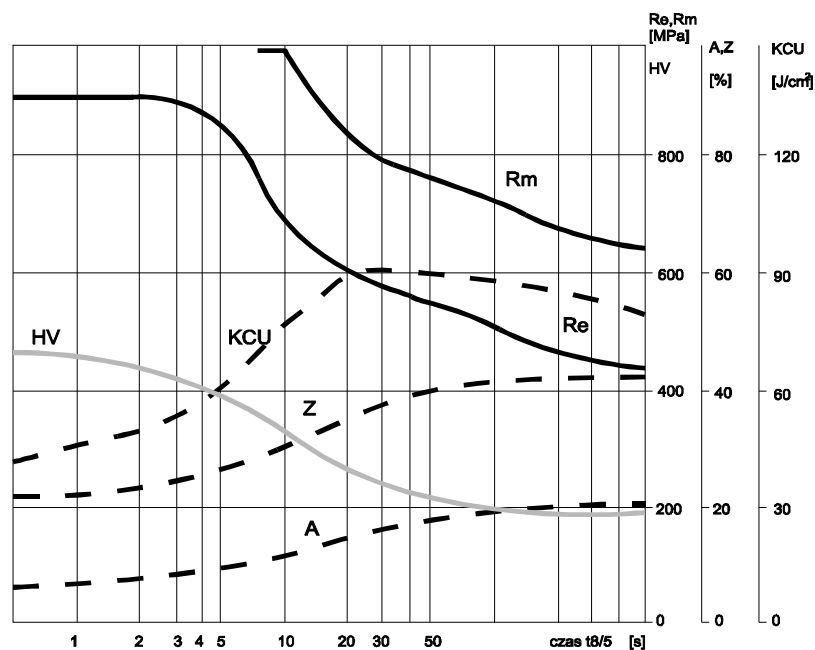
Zmiany struktury strefy wpływu ciepła złącza spawanego wywołane oddziaływaniem cyklu cieplnego spawania, obejmujące przemiany fazowe, rozrost ziarn i wydzielenia, są przyczyną istotnych zmian właściwości tego obszaru w porównaniu z właściwościami materiału rodzimego. Zmiany te tak jak zmiany struktury zależą przede wszystkim od charakterystycznych parametrów cyklu cieplnego spawania, a w szczególności od maksymalnej temperatury cyklu cieplnego spawania T_{max} , czasu przebywania

powyżej 1000°C (t_{1000}) oraz czasu chłodzenia w zakresie pomiędzy 800 a 500°C ($t_{8/5}$). Najpoważniejsze zmiany właściwości zachodzą w przegrzanej części SWC. Na rys.1.8 przedstawiono przykładowo przebieg zmian R_m , Re , A_5 , Z , KCV oraz HV w funkcji czasu $t_{8/5}$ przy maksymalnej temperaturze cyklu 1350°C dla stali 18G2A.

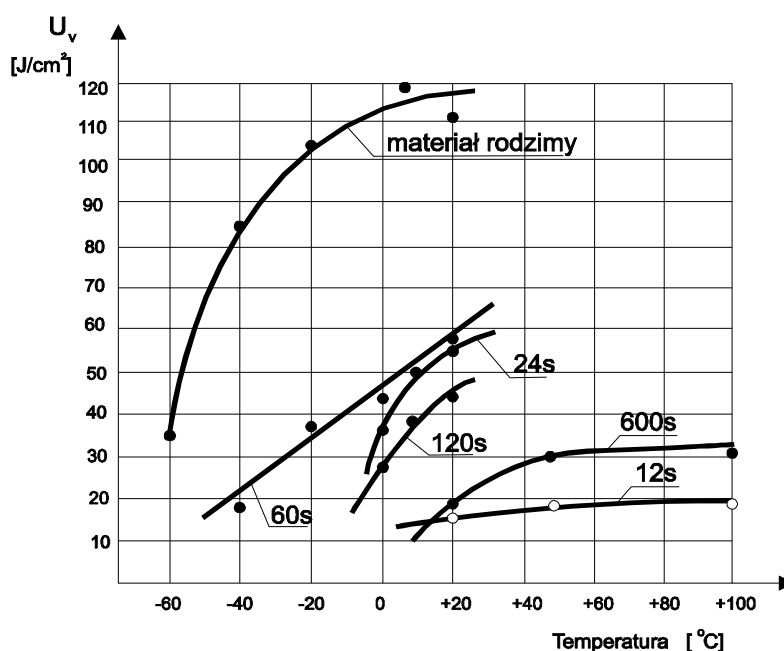
W obszarze przegrzonym, ze względu na wysoką temperaturę cyklu cieplnego spawania, najczęściej występuje znaczny rozrost ziarn. W przypadku dużych prędkości chłodzenia (krótkie czasy $t_{8/5}$) w obszarze tym powstaje struktura martenzytu iglastego lub bainitu, charakteryzująca się wysoką wytrzymałością na rozciąganie R_m i granicą plastyczności Re , wysoką twardością HV oraz niskimi wartościami wydłużenia A_5 , przewężenia Z i udarności KCV . Wraz z wydłużeniem czasu $t_{8/5}$ zmniejsza się w obszarze przegrzonym udział objętościowy martenzytu w strukturze, co powoduje obniżenie wartości R_m , Re , HV oraz wzrost wartości A_5 , Z , KCV . Dalsze wydłużenie czasu $t_{8/5}$ prowadzi do wzrostu wartości A_5 i Z oraz obniżenia wartości R_m i Re , udarność uzyskuje natomiast wartości maksymalne, po czym jej wartość ulega obniżeniu.

Odmienne przebiegi zmian udarności występują w stalach w których w przegrzonym obszarze SWC powstaje martenzyt listwowy, charakteryzujący się wysoką plastycznością. W takich przypadkach dla krótkich czasów $t_{8/5}$ wartość KCV jest wysoka i ulega obniżeniu wraz z wydłużeniem czasu $t_{8/5}$.

Cykl cieplny spawania i wywołane nim zmiany struktury oraz zmiany stanu odkształceń i naprężeń są także przyczyną wzrostu kruchości SWC złącza spawanego w porównaniu z materiałem rodzimym. Badania prowadzone za pomocą próbek udarnościowych z karbem ISO-Charpy V umieszczonym w gruboziarnistym obszarze SWC pozwalają wyznaczyć zmiany temperatury przejścia plastyczno - kruchego tego obszaru w porównaniu z temperaturą przejścia plastyczno - kruchego materiału rodzimego. Na rys.1.9 przedstawiono krzywe przejścia plastyczno - kruchego dla stali 18G2A dla różnych czasów $t_{8/5}$ przy $T_{max} = 1350^\circ\text{C}$.



Rys.1.8. Zmiany właściwości SWC w funkcji czasu $t_{8/5}$ dla $T_{max} = 1350^\circ\text{C}$ [49]



Rys. 9. Krzywe przejścia plastyczno kruchoego SWC dla stali 18G2A [56].
 Próbkki symulowane na symulatorze cykli ciepłych spawania
 przy $T_{max} = 1350^{\circ}\text{C}$ i $t_{8/5} = 12, 24, 60, 120$ i 600 s.

W obszarze normalizacji, ze względu na niższe temperatury maksymalne cyklu ciepłego spawania, mieszczące się w zakresie 1100 do 850°C , powstaje drobnoziarnista struktura dla której udziały objętościowe składników struktury różnią się w porównaniu z obszarem przegrzonym (odpowiadają wyższym czasom chłodzenia $t_{8/5}$). W efekcie obszar ten charakteryzuje się dobrymi własnościami plastycznymi i wytrzymałościowymi.

W obszarze niepełnej normalizacji temperatury maksymalne cyklu ciepłego spawania mieszczą się w zakresie $A_{c1} - A_{c3}$. Przy tych temperaturach nie wszystkie ziarna materiału spawanego ulegają przekryształowaniu. Ziarna ferrytu zachowują z reguły swoją pierwotną budowę, natomiast z perlitu i części otaczającego ferrytu powstaje austenit. Dlatego też, obszar niepełnej normalizacji składa się z nieprzemienionych ziarn ferrytu i drobnoziarnistej struktury powstałej z obszarów austenicznych, której rodzaj zależy od prędkości chłodzenia. Własności wytrzymałościowe i plastyczne tego obszaru są niższe w porównaniu z własnościami obszaru normalizacji.

W obszarze rekryształizacji lub odpuszczania temperatura maksymalna cyklu ciepłego spawania wynosi od 500 do 700°C . W przypadku złączy wykonanych ze stali poddanej uprzednio obróbce plastycznej na zimno (zgniotowi), w obszarze tym następują procesy zdrowienia, rekryształizacji i rozrostu ziarn. Towarzyszy temu zmiana własności wytrzymałościowych i plastycznych do sytuacji sprzed zgniotu, materiał zyskuje wyższą ciągliwość przy jednoczesnym spadku wartości R_m i R_e . W złączach ze stali, które przed spawaniem podlegały hartowaniu lub hartowaniu i odpuszczaniu, w obszarze tym następują zmiany prowadzące do powstawania stref odpuszczania, charakteryzujących się zmniejszoną twardością i obniżoną wytrzymałością na rozciąganie w porównaniu z materiałem rodzimym.

W obszarze dla którego temperatura maksymalna cyklu ciepłego spawania wynosiła poniżej 500°C (najczęściej w zakresie temperatur od 200 do 400°C), w stalach niskowęglowych nie zawierających dodatków stopowych może występować zjawisko starzenia. Starzenie powoduje obniżenie własności plastycznych oraz wzrost kruchości stali. W przypadku stali ulepszanych cieplnie w obszarze tym następuje jedynie wydzielanie węglików, zwłaszcza w stalach zawierających dodatek wanadu.

Przedstawiony powyżej schemat zmian struktury i właściwości SWC odpowiada warunkom spawania jednowarstwowego. Przy układaniu spoin wielowarstwowych, w wyniku powtórnego oddziaływania cyklu cieplnego następuje powtórna nagrzanie poprzedniego ściegu i odpowiadającej mu SWC, w skutek czego zachodzi samoczynna obróbka cieplna tego obszaru, wywołując zarówno zmiany struktury jak i właściwości. Prowadzi to najczęściej do rozdrobnienia struktury i poprawy właściwości mechanicznych złącza.

W celu zapobieżenia niekorzystnym zmianom występującym w czasie spawania, w szczególności zmianom struktury oraz powstawaniu naprężeń i odkształceń spawalniczych stosuje się obróbkę cieplną złącz spawanych.

Obróbka cieplna złącz spawanych obejmuje:

- grzanie w procesie spawania, na które składają się: podgrzewanie przed spawaniem, grzanie w czasie i po zakończeniu spawania,
- wyżarzanie po spawaniu obejmujące odprężanie lub normalizowanie.

Celem grzania w procesie spawaniem jest przede wszystkim zmniejszenie szybkości chłodzenia i zmniejszenie ryzyka występowania procesu hartowania lub podhartowania w SWC oraz w konsekwencji ograniczenie wzrostu kruchości i możliwości utworzenia się pęknięć w połączeniach spawanych. Celem grzania w procesie spawania jest również obniżenie naprężeń wewnętrznych wynikających z odkształceń wywołanych cyklem cieplnym spawania oraz stworzenie korzystnych warunków do dyfuzji wodoru ze spoiny. Najistotniejsze znaczenie w procesie spawania ma podgrzewanie wstępne przed spawaniem, które prowadzi się, w zależności od gatunku stali, grubości elementów spawanych oraz rodzaju i rozwiązania konstrukcji spawanej, w zakresie temperatur od kilkudziesięciu do kilkuset °C [57].

Wyżarzanie odprężające jest stosowane w celu zmniejszenia lub wyeliminowania naprężeń wewnętrznych, tzw. własnych, spowodowanych procesem spawania. Wyżarzanie odprężające polega na wyżarzeniu konstrukcji w temperaturze 620 do 650°C w czasie 3 – 5 min/1 mm grubości, przy czym czas ten nie powinien być krótszy niż 1 h, a maksymalny czas wyżarzania nie powinien być dłuższy niż 5 h. Nagrzewanie do temperatury wyżarzania odprężającego powinno się odbywać z szybkością 120 – 150°C/h, natomiast chłodzenie z szybkością 100 – 150 °C/h.

Wyżarzanie normalizujące prowadzi się w temperaturze $A_3 + 50^{\circ}\text{C}$ w czasie ok. 2 min/1mm grubości i powolnym chłodzeniu po wyżarzeniu. Zachodząca w czasie wyżarzania przemiana powoduje zmiany strukturalne w całej konstrukcji spawanej, przez co uzyskuje się korzystne rozdrobnienie ziarna i w konsekwencji poprawę właściwości mechanicznych materiału. Wyżarzanie normalizujące zapewnia również obniżenie naprężeń własnych konstrukcji spawanych.

1.3.3. Pękanie SWC w procesie spawania

Zachodzące pod wpływem cyklu cieplnego spawania zmiany struktury oraz zmiany stanów naprężeń i odkształceń wywierają istotny wpływ na powstawanie pęknięć spawalniczych. Pęknięcia mogące powstawać w SWC złącza spawanego, których przyczyny związane są z technologią spawania, można sklasyfikować w czterech grupach:

- pęknięcia gorące,
- pęknięcia zimne,
- pęknięcia lamelarne,
- pęknięcia pod wpływem powtórnego nagrzewania.

1.3.3.1. Pęknięcia gorące

Pęknięcia gorące mogą powstawać w obszarach SWC, gdzie temperatura materiału zbliżona jest do temperatury solidusu. Pęknięcia te mogą także występować w znacznie niższych temperaturach. Jako dolną granicę powstawania pęknięć gorących przyjmuje się $0.5T_m$ (T_m - temperatura topnienia w °C).

Powstawanie tego typu pęknięć wywołane jest poprzez ciekłe fazy występujące na granicach ziarn, przy podwyższonych temperaturach, w związku z czym materiał nie może relaksować występujących naprężeń skurczowych poprzez odkształcanie plastyczne, dochodzi do wzrostu naprężeń wywołujących pęknięcia wzdłuż niskotopliwych faz występujących na granicach ziarn.

W strefie wpływu ciepła, w pobliżu linii wtopienia, w procesie spawania materiał rodzimy zostaje podgrzany do temperatur niewiele niższych od temperatury solidus. Fazy na granicach ziarn, posiadające niższe temperatury topnienia aniżeli materiał rodzimy, mogą ulec roztopieniu i przy odpowiednich warunkach rozprzestrzeniać się w postaci błonek wzdłuż granic ziarn. Istotne znaczenie dla powstawania pęknięć gorących w SWC złącza spawanego ma obecność siarczków, tlenków, węglików oraz ich kształt i morfologia. Naprężenia rozciągające powstające w SWC złącza spawanego podczas cyklu chłodzenia mogą powodować wzrost zwilżalności granic ziarn przez fazy, które pierwotnie występowały w postaci globularnej. Dostatecznie duże naprężenia rozciągające powodują rozsuwanie się ziarn, których granice, zwilżone ciekłymi fazami, usytuowane są prostopadle do kierunku działania tych naprężeń. Powoduje to powstawanie pęknięć.

Także wielkość ziarna może odgrywać istotną rolę w powstawaniu pęknięć gorących. Struktura drobnoziarnista jest odporniejsza na powstawanie tego typu pęknięć ze względu na to, że całkowita powierzchnia ziarn jest większa niż w materiale gruboziarnistym. W strukturze drobnoziarnistej ilość występującej fazy ciekłej może nie wystarczyć do zwilżenia wszystkich granic ziarn.

Skłonność do powstawania pęknięć gorących w SWC złącza spawanego można zmniejszyć na etapie wytwarzania stali poprzez stosowanie dodatków powodujących koagulację zanieczyszczeń, np. metali ziem rzadkich lub dodatek Mn. Dodatki te prowadzą do powstania skoagulowanych, trudnotopliwych wtrąceń.

1.3.3.2. Pęknięcia zimne

Pęknięcia zimne zwane również pęknięciami wodorowymi czy też zwłocznymi, są zjawiskiem lokalnego niszczenia połączenia spawanego i powstają w trakcie stygnięcia połączenia spawanego, z reguły w zakresie temperatur od 200 do 100°C lub bezpośrednio po spawaniu, przy braku obciążeń zewnętrznych. W niektórych przypadkach pękanie zimne może zachodzić wyraźnie później po zakończeniu spawania, nawet po upływie kilkudziesięciu godzin. Powstawanie tego typu pęknięć w złączach spawanych uwarunkowane jest jednoczesnym oddziaływaniem trzech zjawisk [56]:

- hartowaniem się stali pod wpływem procesu spawania,
- obecnością wodoru w spoinie i w strefie wpływu ciepła złącza spawanego,
- obecnością naprężeń i odkształceń wynikających z procesu spawania prowadzonego w warunkach utwardzenia.

Istnieje wiele czynników mogących mieć wpływ na powstawanie pęknięć zimnych w konstrukcjach spawanych. Do podstawowych należą:

- właściwości fizyko-chemiczne materiału spawanego oraz materiałów dodatkowych,
- warunki spawania,
- warunki otoczenia,
- rozwiązania konstrukcyjne złącza.

Badania eksperymentalne procesu powstawania pęknięć zimnych podczas spawania stali niskowęglowych oraz niskostopowych o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości wskazują, że podstawowym czynnikiem obniżającym odporność połączeń spawanych na pękanie zimne jest obecność wodoru [24]. Nie podlega obecnie wątpliwości fakt, że przy braku wodoru w połączeniu spawanym ani wzrost prędkości chłodzenia ani wzrost naprężeń i odkształceń nie powodują powstawania pęknięć zimnych w stalach niskowęglowych oraz niskostopowych o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości. Jednakże ze względu na niedostateczną znajomość fizyko-chemicznych procesów wzajemnego oddziaływania pomiędzy wodorem a atomami struktury krystalicznej, domieszkami oraz defektami budowy krystalicznej metalu, na obecnym etapie badań nie istnieje w pełni opracowany model procesu pęknięcia zimnego.

Źródła wodoru w procesie spawania

Podczas spawania wodór wprowadzany jest do metalu spoiny przy temperaturach przekraczających temperaturę topnienia metalu i uczestniczy we wszystkich fazach przemian strukturalnych w procesie chłodzenia spoiny i strefy wpływu ciepła złącza spawanego. Zawartość wodoru w spoinie uwarunkowana jest metodą spawania i stanem materiałów dodatkowych, a przede wszystkim zawartością w nich wilgoci i wody krystalizacyjnej. Intensywne nasycanie metalu wodorem odbywa się w przestrzeni łukowej, co wiąże się z obecnością atomowego wodoru w atmosferze oraz dużą jednostkową powierzchnią roztopionego metalu znajdującego się w bezpośrednim kontakcie z gazem. W przypadku spawania elektrodami otulonymi skład atmosfery gazowej łuku może zawierać 30 - 40% H₂, do 4% pary wodnej, 1 - 11% O₂, do 45% CO i do 10% CO₂ [55]. Krople metalu stykając się z atmosferą łuku ulegają nasyceniu gazami, głównie wodorem, azotem i tlenem. Ilość rozpuszczonego w spoinie wodoru zależy od składu chemicznego stopiwa, cząsteczkowego ciśnienia wodoru w atmosferze łuku, czasu przejścia kropli roztopionego metalu z elektrody do jeziora spawalniczego, wielkości kropli oraz temperatury, do której metal nagrzewa się w procesie spawania.

Wodór w metalu

Wodór wprowadzony do spoiny w procesie spawania może, po jej zakrzepnięciu, znajdować się w niej w stanie roztworu stałego międzywęzłowego, segregować na wadach struktury krystalicznej, absorbować się na powierzchniach mikronieciągłości i cząsteczkach obcych faz lub łączyć się w molekuly w mikroporach. Z tych względów w metalurgii spawania wodór znajdujący się w złączu spawanym przyjęto umownie dzielić na:

- wodór dyfundujący, rozpuszczony w stali w stanie atomowym lub jonowym i wydzielający się z niej w temperaturze otoczenia lub nieznacznie wyższej,
- wodór trwały, nazywany też pozostającym; jest to wodór który nie wydziela się z metalu w temperaturze otoczenia lub nieznacznie wyższej.

Sumaryczną zawartość wodoru w metalu, uwzględniającą wszystkie jego formy, nazwano wodorem całkowitym.

Rozpuszczalność wodoru w metalach opisywana jest równaniem [2]:

$$H_R = A\sqrt{p} \exp(-Q/2RT) \quad (1.20)$$

gdzie:

- HR - rozpuszczalność, % (at)
- p - ciśnienie cząstkowe wodoru
- Q - ciepło rozpuszczania jednego mola gazu
- A - stała
- R - stała gazowa
- T - temperatura

Największa zmiana rozpuszczalności wodoru w stali ma miejsce na granicy przejścia metalu ze stanu ciekłego do stałego. Skokowe zmiany rozpuszczalności wodoru związane są także z przemianami alotropowymi żelaza. Zależnie od stopnia nasycenia stali wodorem oraz od warunków stygnięcia spoiny, ilość wodoru zawartego w stali w stanie rozpuszczonym może być różna. Wobec malejącej rozpuszczalności, przy niższych temperaturach roztwór wodoru w żelazie staje się przesycony. Przekraczając z dużą szybkością chłodzenia zakres temperatur poniżej punktu przemiany alotropowej $\alpha \rightarrow \gamma$, można w stopiwie zatrzymać znaczną ilość wodoru.

Wodór zatrzymany w stali w stanie rozpuszczonym dyfunduje do otaczającej atmosfery oraz do tzw. pułapek lub zbiorników. Pod pojęciem zbiorników rozumie się wszystkie możliwe mikropustki powstające w objętości metalu i na powierzchni rozdziału osnowa - wtrącenie niemetaliczne. W temperaturze poniżej 600°C w zbiornikach zachodzą nieodwracalne procesy rekombinacji wodoru w molekuly. Wodór zgromadzony w zbiornikach jest wodorem pozostającym. Pułapkami natomiast określa się obszary metalu, w których atomowy wodór posiada obniżoną energię potencjalną w porównaniu z jego normalnymi pozycjami w strukturze. Takimi obszarami są granice ziarn, dyslokacje, obszary w

których istnieje trójosiowy stan naprężeń rozciągających, zwłaszcza w okolicach wtrąceń obcej fazy. Wodór znajdujący się w pułapkach traci zdolność do dalszego przemieszczania się. Rozróżnia się pułapki odwracalne i nieodwracalne. Granica pomiędzy pułapką odwracalną a nieodwracalną jest rozmyta. Pułapka jest nieodwracalna jeżeli jej energia wiązania z atomem wodoru jest większa od 0,7 eV, w pułapkach nieodwracalnych wodór związany jest tak silnie, że można go uważać za wodór pozostający. Jeżeli energia wiązania z atomem wodoru jest mniejsza od 0,5 eV to pułapka jest odwracalna.

Pułapki z energią 0,5 - 0,7 eV charakteryzują się pośrednimi własnościami. Charakterystycznymi przykładami pułapek odwracalnych są dyslokacje, które zatrzymują wodór tworząc tzw. atmosfery.

Energia wiązania dyslokacji krawędziowej z atomami wodoru wynosi ok. 0,25 eV. Równie silne oddziaływanie występuje pomiędzy atomami wodoru a polami odkształceń sprężystych powstającymi w wyniku obciążeń zewnętrznych, a także wewnętrznymi polami odkształceń dylatacyjnych pochodzących od granic ziarn. Należy jednak zaznaczyć, że mechanizm zatrzymywania atomów wodoru przez granice ziarn jest niejasny.

Doświadczalnie określenie rozkładu wodoru w połączeniu spawanym jest bardzo trudne i pracochłonne. W celu jego zbadania stosowane są głównie: metoda ekstrakcji próżniowej oraz metoda topienia próżniowego próbek pobranych z poszczególnych stref połączenia spawanego. Badania wykazały, że największa koncentracja wodoru występuje w spoinie i w strefie wpływu ciepła w pobliżu linii wtopienia, a rozkład wodoru w złączu spawanym uzależniony jest głównie od sił napędowych dyfuzji wodoru. Uważa się, że w temperaturze powyżej 300°C głównymi siłami napędowymi dyfuzji wodoru są gradient koncentracji wodoru oraz gradient temperatury, a proces dyfuzji jest opisywany zależnością [2]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D \kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.21)$$

gdzie:

H - koncentracja wodoru

t - czas

D - współczynnik dyfuzji wodoru

Qp - ciepło transportu wodoru

$$\kappa = c Q_p R^{-1} T^{-2}$$

W temperaturach poniżej 300-200°C siłą napędową dyfuzji mogą być gradienty naprężeń, które są szczególnie wysokie w okolicach koncentratorów naprężeń. Wzajemne oddziaływanie wodoru rozpuszczonego w metalu i pola naprężeń mechanicznych opisywane jest najczęściej zależnością:

$$H = H_0 \exp \left(\frac{\sigma_{ii} V_H}{3RT} \right) \quad (1.22)$$

gdzie:

H₀ - początkowa koncentracja wodoru w metalu bez naprężeń

V_H - cząsteczkowo-molowa objętość wodoru w metalu

σ_{ii} - suma naprężeń głównych

Równanie dyfuzji można wówczas przedstawić w postaci:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \nabla^2 H - \left(\frac{D V_H}{RT} \right) (\nabla H \nabla \sigma_0) \quad (1.23)$$

Odształcenie plastyczne może w istotny sposób zmienić rozkład wodoru w złączu spawanym. W obszarach odształceń plastycznych gęstość defektów struktury jest znacznie wyższa niż w pozostałej części złącza. Pojawienie się nowego defektu powoduje powstanie strumienia wodoru skierowanego do centrum tego defektu. Równanie dyfuzji można przedstawić wówczas w postaci:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \gamma \frac{D}{L} \nabla^2 H^* \quad (1.24)$$

gdzie:

H^* - efektywna koncentracja wodoru

L - wskaźnik gęstości pułapek w metalu

$$L = \alpha \varepsilon_p + \beta$$

α, β, γ - stałe

ε_p - intensywność deformacji plastycznej

Ilościowa ocena rozkładu wodoru w metalu z jednoczesną oceną gradientów koncentracji, temperatury i naprężeń mechanicznych jest bardzo złożona i trudna. Dlatego też poszukiwanie rozkładu wodoru w konkretnych połączeniach spawanych prowadzi się przy wykorzystaniu podanych powyżej zależności i przyjęciu pewnych uproszczeń, które obowiązują tylko dla analizowanego przypadku.

Teorie kruchości wodorowej

Ogólnie przyjęto, że wpływ wodoru na powstawanie zimnych pęknięć polega na mechanizmie tzw. odwracalnej kruchości wodorowej. Istniejące hipotezy odwracalnej kruchości wodorowej można podzielić na cztery grupy:

1. teoria ciśnieniowa
2. teoria adsorpcyjna
3. teoria dekohezji
4. teoria oddziaływania pomiędzy defektami budowy krystalicznej a wodorem.

Zgodnie z **hipotezą ciśnieniową** atomowy wodór wydzielający się z roztworu do mikropustek łączy się w cząsteczki i w skutek stopniowego zwiększania ciśnienia tworzą się w sąsiedztwie mikropustek wysokie naprężenia drugiego rzędu, co w konsekwencji może prowadzić do rozprzestrzeniania się pęknięcia.

Jednakże prace mające na celu obliczenie ciśnienia wywołanego wodorem w mikropustkach spoin i strefy wpływu ciepła wykazały, że przy praktycznie spotykanych zawartościach wodoru ciśnienie to nie ma istotnego wpływu na przebieg procesu pęknięcia [10].

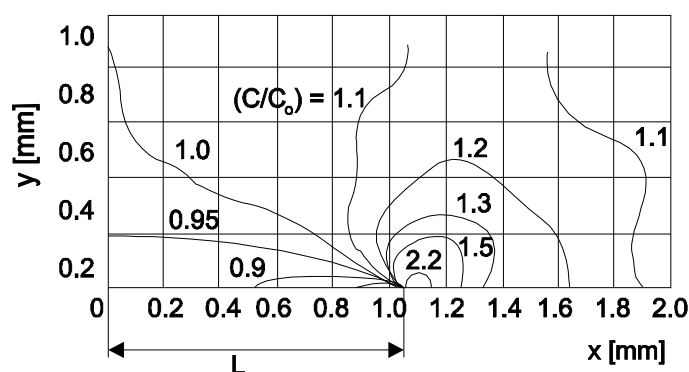
Teoria adsorpcji zakłada, że wodór gromadzi się w wierzchołkach mikropęknięć i obniża ich energię powierzchniową. Zmniejszenie energii powierzchniowej prowadzi do obniżenia naprężenia

potrzebnego do wywołania kruchego pęknięcia; $\sigma = \frac{E\gamma}{a}$. Jednakże na poparcie tej hipotezy brak jest dotychczas przekonujących dowodów eksperymentalnych.

Teoria dekohezji sformułowana przez Troiano [85], a rozwinięta przez Orianiego zakłada, że dyfuzja wodoru pod wpływem gradientu naprężeń sprężystych wywołuje akumulację atomów wodoru w miejscach sieci krystalicznej metalu, gdzie istnieje spiętrzenie naprężeń rozciągających. Lokalne spiętrzenie naprężeń rozciągających w pobliżu czoła karbu powoduje stosunkowo szybki dopływ ruchliwych atomów wodoru z pozostałych obszarów metalu.

Zgodnie z teorią dekohezji, mikromechanizm kruchości wodorowej tłumaczy się zmniejszeniem przez wodór sił wzajemnego przyciągania się atomów żelaza w sieci krystalicznej tego metalu. Na podstawie obliczeń wykazano, że siły wzajemnego przyciągania się atomów wodoru i atomów żelaza są przy małych odległościach pomiędzy nimi prawdopodobnie większe od sił kohezji atomów żelaza w sieci

żelaza. Wskutek silnego przyciągania się Fe - H atom wodoru znajdujący się pomiędzy czterema sieciowymi atomami żelaza powoduje skrócenie odległości między nimi, a w konsekwencji zwiększenie ich odległości względem pozostałych atomów żelaza, co wprowadza pole lokalnych naprężeń sprężystych. Tak więc mimo swoich małych rozmiarów, atomy wodoru rozpuszczone w sieci żelaza powodują deformacje tej struktury, co w konsekwencji może powodować zmniejszenie energii kohezji sieci krystalicznej metalu. Zgodnie z tą hipotezą, w zależności od zawartości wodoru, w rejonie geometrycznych koncentatorów naprężeń zmienia się odporność tego obszaru na kruche pękanie. Badania mające na celu pomiar KIC wysokowytrzymałych stali w zależności od stopnia nawodorowania wykazują, że wielkość KIC może obniżyć się o 5 do 7 razy. W SWC połączenia spawanego w rejonie geometrycznych koncentatorów naprężeń powstają pod wpływem spawalniczych naprężeń pozostające obszary z podwyższonym naprężeniem średnim. Obszary te są miejscami koncentracji wodoru. W zależności od zawartości wodoru w tym obszarze zmienia się jego odporność na kruche pękanie. W wyniku tego powstają warunki, przy których następuje rozprzestrzenienie pęknięcia długości $2L_1$ określonej zakresem zmiany K_{IC} , tj. koncentracji wodoru przed frontem pęknięcia. Następnie zachodzi ponowne dyfuzyjne nasycenie wodorem obszaru przed frontem pęknięcia. Na rys.1.10 przedstawiono ponownie uzyskany na drodze obliczeniowej rozkład względnej koncentracji wodoru w sąsiedztwie rozwijającego się pęknięcia.

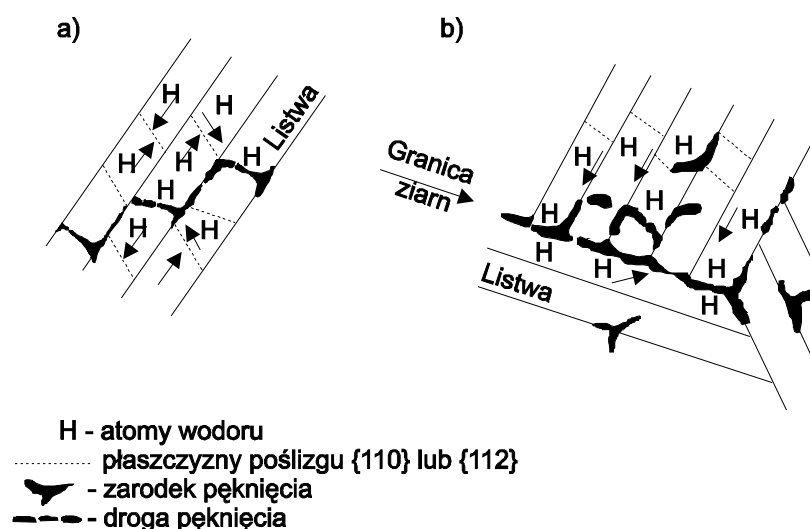


Rys.1.10. Względna koncentracja wodoru w sąsiedztwie rozwijającego się pęknięcia o długości $2L$ w czasie 290 s od momentu jego powstania [40]

Teorie wzajemnego oddziaływania pomiędzy defektami budowy krystalicznej a wodorem zakładają, że dyfuzja wodoru w złączu spawanym przebiega dwustopniowo. W pierwszej fazie dyfuzja wodoru zachodzi poprzez sieć przestrzenną metalu, zaś w drugiej fazie przez defekty struktury, takie jak dyslokacje i wakanse. Miejscami powstawania i rozwijania się zarodków pęknięć zimnych są strefy koncentracji defektów budowy krystalicznej, które jednocześnie charakteryzują się wysoką koncentracją wodoru.

Zaproponowano [44,45,46] dwa schematy powstawania pęknięć zimnych w zależności od poziomu naprężeń i czasu ich oddziaływania. Pierwszy schemat opisuje powstawanie przełomów quasi-łupliwych śródkrystalicznych, które mogą składać się z przełomów translistwowych i przełomów międzylistwowych. Występowanie przełomów translistwowych związane jest z dyfuzją wodoru w stronę dyslokacji przemieszczających się wzdłuż płaszczyzn łatwego poślizgu w listwach martenzytu. Listwy są obszarami o małej plastyczności, tak więc przy odpowiednim poziomie naprężeń zewnętrznych następuje pękanie. Przełom translistwowy ma charakter schodkowy, rozpoczyna się od obszarów o wysokiej koncentracji wodoru, które są zwykle umiejscowione na płaszczyznach poślizgu o największej gęstości dyslokacji w listwie (płaszczyzny $\{110\}$). Przełom międzykrystaliczny wywołany jest gromadzeniem się wodoru na granicach listw w ziarnach.

Drugi schemat opisuje powstawanie przełomów międzykrystalicznych. Wraz z upływem czasu do momentu rozpoczęcia procesu pęknięcia, przy danym poziomie naprężeń wzrasta o ok. trzy rzędy wielkości gęstość dyslokacji na granicach ziarn w porównaniu z ich gęstością wewnątrz ziarn. W tych warunkach dominującą formą przełomu jest przełom międzykrystaliczny.



Rys.1.11. Schematy powstawania pęknięć zimnych:

- a). powstawanie przełomów quasi-łupliwych śródkrystalicznych,
- b). powstawanie przełomów międzykrystalicznych.

Analiza poszczególnych przypadków pęknięć połączeń spawanych wskazuje, że w rzeczywistych warunkach większość przedstawionych mechanizmów kruchości wodorowej działa kompleksowo [46,76]. W zależności od konkretnych warunków, rola różnych mechanizmów w uwrażliwianiu metalu ulega zmianom i ustalenie udziału każdego z nich staje się trudnym zadaniem. Podstawowymi czynnikami decydującymi o udziale poszczególnych mechanizmów w uwrażliwianiu metalu na kruchość wodorową są: rodzaj struktury powstającej w spoinie i w strefie wpływu ciepła oraz jej właściwości, stan naprężeń i odkształceń w złączu spawanym oraz ilość wodoru wprowadzonego w procesie spawania.

Metody zapobiegania powstawaniu pęknięciom zimnym wynikają z analizy czynników wywołujących ten typ pęknięć w złączach spawanych i polegają na:

- ograniczaniu zawartości wodoru w spoinie i w SWC złącza spawanego,
- oddziaływaniu na przemiany stali w SWC,
- obniżeniu naprężeń w złączu spawanym.

Ograniczenie zawartości wodoru uzyskuje się poprzez wybór metod i materiałów dodatkowych niskowodorowych, obróbkę cieplną (suszenie) materiałów dodatkowych przed spawaniem (elektrod otulonych, topników), wydłużenie czasu stygnięcia SWC w zakresie temperatur od 300 do 100°C .

Oddziaływanie na przemiany stali w SWC może być realizowane przez wzrost energii liniowej łuku, stosowanie podgrzewania wstępnego elementów spawanych, obróbkę cieplną po spawaniu.

Obniżenie naprężeń w złączu spawanym osiąga się przez ograniczenie utwierdzeń montażowych, ograniczenie oddziaływania połączeń już wykonanych na wykonywane oraz ograniczanie oddziaływania ciężaru własnego elementów spawanych.

W niektórych przypadkach skutecznymi sposobami jest wstępne napawanie części spawanych austenitycznym lub ferrytycznym metalem (nie hartującym się przy spawaniu) lub spawanie materiałami dodatkowymi zapewniającymi uzyskanie struktury austenitycznej.

1.3.3.3. Pęknięcia lamelarne

Pęknięcia lamelarne są spowodowane obecnością pasm wtrąceń, głównie siarczków, ułożonych na przekroju blachy równoległe do kierunku walcowania. Wtrącenia te obniżają własności plastyczne blachy w kierunku jej grubości i pod wpływem naprężeń skurczowych spoin powodują w temperaturach poniżej 200°C tworzenie się pęknięć o charakterystycznym schodkowym przebiegu. W obecności wysokich naprężeń skurczowych następuje utrata kohezji na granicy wtrącenie-osnowa i powstanie pustki. Mikroszczeliny utworzone na pasmowo ułożonych wtrąceniach w obecności dostatecznie wysokich naprężeń rozciągających mogą się ze sobą łączyć w kierunku poziomym. Obecność płaskich pęknięć na różnych poziomach w stosunku do powierzchni blachy powoduje silną koncentrację naprężeń w obszarach między pęknięciami, co prowadzi do ścinania materiału osnowy znajdującego się pomiędzy nimi. Tak więc płaszczyzny pęknięć równoległe do powierzchni blachy (tarasy) są łączone prostopadłymi przejściami (uskokami). Powierzchnia przejścia przebiega w płaszczyźnie maksymalnych naprężeń ścinających. Przełomy mają charakter włóknisty.

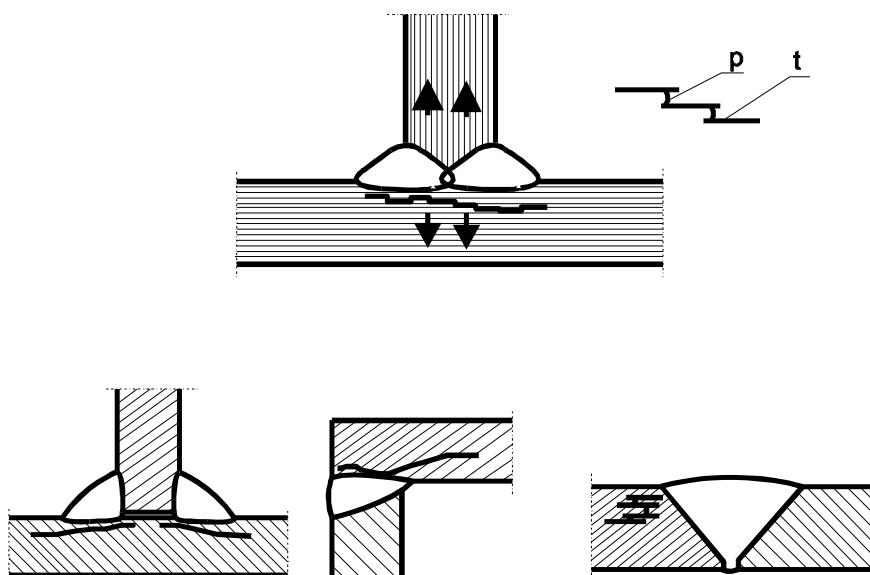
Proces pęknięcia lamelnego może być pogłębiony poprzez oddziaływanie wodoru dyfundującego, wprowadzonego do materiału podczas spawania, sprzyja to procesowi rozwijania mikroszczelin utworzonych na wtrąceniach niemetalicznych.

Pęknięcia lamelarne powstają głównie w połączeniach charakteryzujących się znacznym stopniem utwardzenia, w których blacha skłonna do pęknięcia ulega odkształceniu w kierunku prostopadłym do jej powierzchni. Pęknięcia te powstają przede wszystkim w złączach teowych i krzyżowych, z jednostronnymi lub dwustronnymi spoinami czołowymi lub spoinami pachwinowymi. Obserwowane są także przypadki pęknięć lamelarnych w złączach doczołowych.

Na pęknięcie lamelarne mają wpływ następujące czynniki:

- całkowita zawartość wtrąceń niemetalicznych, ich rodzaj, wielkość i rozmieszczenie,
- skład chemiczny stali,
- poziom naprężeń w kierunku osi Z w czasie chłodzenia złącza,
- zawartość wodoru dyfundującego.

Zmiany energii liniowej łuku mają niewielki wpływ na powstawanie pęknięć lamelarnych. Wraz ze wzrostem liczby warstw spoiny wzrasta prawdopodobieństwo powstania tego typu pęknięć.



Rys.1.12. Schemat powstawania pęknięć lamelarnych.

1.3.3.4. Pęknięcia pod wpływem powtórnego nagrzewania

Pęknięcia pod wpływem powtórnego nagrzewania zwane również pęknięciami pod wpływem obróbki cieplnej, powstają w obszarze przegrzonym SWC stali niskostopowych oraz stali austenitycznych chromowo-niklowych. Pęknięcia tego typu powstają w dwu zakresach temperaturowych:

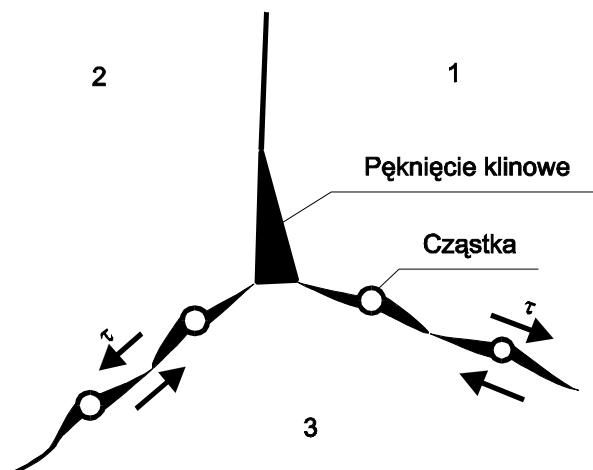
- w czasie nagrzewania do temperatury wyżarzania w zakresie temperatur od 200 do 300°C,
- w zakresie temperatur wyżarzania, poniżej temperatury A1.

Pękanie elementów spawanych podczas nagrzewania do temperatury wyżarzania związane jest ze stosowaniem zbyt dużej szybkości nagrzewania tych elementów. Powstające w nagrzewanym elemencie naprężenia cieplne, sumując się z naprężeniami strukturalnymi prowadzą do powstawania pęknięć. Najbardziej na pękanie podczas nagrzewania do temperatury wyżarzania narażona jest ta część SWC, w której w wyniku procesu spawania powstały zarodki pęknięć gorących lub zimnych.

Pękanie elementów spawanych w zakresie temperatur wyżarzania związane jest przede wszystkim z wzrostem kruchości SWC złącza spawanego wywołanym wydzielaniem się faz wtórnych (najczęściej węglików) z roztworu stałego.

W niskostopowych stalach Cr-Mo-V pęknięcia te powstają w gruboziarnistym obszarze SWC charakteryzującym się najczęściej iglastą strukturą bainityczno-martenzytyczną z pewną ilością austenitu szczątkowego. W trakcie procesu spawania w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania znaczna część węglików przechodzi do roztworu stałego, również granice ziarn pierwotnego austenitu wzbogacane są dodatkami stopowymi. W czasie nagrzewania do temperatury wyżarzania oraz w pierwszej fazie wyżarzania następuje wydzielanie się węglików. Proces ten prowadzi do znacznego utwardzenia wydzieleniowego wnętrza ziarn.

W procesie wyżarzania relaksacja naprężeń zachodzi drogą odkształcania materiału, w przypadku znacznego utwardzenia wydzieleniowego wnętrza ziarn odkształcenia te będą zachodzić po granicach ziarn. W warunkach obniżonej energii granic ziarn (np. w wyniku segregacji domieszek do granic ziarn) będzie dochodzić na styku trzech ziarn do powstawania tzw. pęknięć klinowych. Wydzielanie się węglików po granicach ziarn utrudnia poślizg ziarn względem siebie, a tym samym podwyższa wytrzymałość struktury oraz obniża jej ciągliwość. Powstają wówczas warunki do zarodkowania pustek na cząstkach leżących w granicach ziarn, a następnie do ich łączenia. Schemat tworzenia się pęknięć pod wpływem powtórnego nagrzewania przedstawiono na rys.1.13.



Rys.1.13. Schemat tworzenia się pęknięć pod wpływem powtórnego nagrzewania [79]
1,2,3 - ziarna

Na przebieg pęknięcia pod wpływem powtórnego nagrzewania istotny wpływ wywierają parametry technologiczne procesu spawania. Spawanie z niską energią liniową sprzyja pękaniu poprzez znaczne przesycenie gruboziarnistej części SWC oraz wzrost naprężeń w złączu spawanym. Stosowanie podgrzewania wstępnego lub wyższych energii liniowych spawania powoduje obniżenie prędkości chłodzenia w SWC złącza spawanego, a tym samym zmniejszenie przesycenia i obniżenie stanu naprężeń.

W celu wyeliminowania pęknięć pod wpływem powtórnego nagrzewania stosuje się nagrzewanie do temperatur 650 - 700°C dla stali ferrytycznych i ok. 1050°C dla stali austenitycznych, a następnie szybkie chłodzenie po nagrzewaniu.

1.3.4. Pęknięcia eksploatacyjne

Spośród pęknięć eksploatacyjnych, na których powstanie istotny wpływ mogą mieć czynniki spowodowane spawaniem (karb geometryczny w złączu, zmiany strukturalne, naprężenia własne) należy wymienić przede wszystkim pęknięcia kruche, zmęczeniowe oraz pęknięcia korozyjne.

Pęknięcia kruche powstają nagle, bez żadnych oznak i rozprzestrzeniają się z dużą prędkością w dowolnym czasie po spawaniu, gdy jest spełniony zespół sprzyjających mu warunków. Pęknięcie zmęczeniowe rozwija się pod wpływem okresowo i wielokrotnie zmiennych naprężeń pochodzących od obciążeń eksploatacyjnych.

Miejscem inicjacji pęknięć kruchego i zmęczeniowego jest najczęściej karb geometryczny w złączu spawanym. Swoim zakresem pęknięcia kruche i zmęczeniowe mogą obejmować nawet całe wielkogabarytowe konstrukcje przestrzenne. Efekt ich działania bywa niekiedy katastrofalny.

Pęknięcia korozyjne są rodzajem niszczenia materiałów metalicznych, które zachodzi pod wpływem jednoczesnego działania agresywnego środowiska i statycznych naprężeń rozciągających. Pęknięcie to występuje przy naprężeniach znacznie niższych od wytrzymałości na rozciąganie w powietrzu, często nawet poniżej granicy plastyczności materiału.

1.3.4.1. Pęknięcie kruche

Kruche pęknięcie rozwija się w materiale bez odkształceń plastycznych lub przy względnie małych ich wartościach, nagle, bez wcześniejszych oznak, często przy stosunkowo niskim poziomie naprężeń eksploatacyjnych, lecz na ogół wysokim poziomie naprężeń własnych, np. spawalniczych, walcowniczych.

Kruche pęknięcie zapoczątkowują najczęściej istniejące wady o ostrej krawędzi. Warunki panujące w małej objętości materiału wzdłuż krawędzi wady (karbu, pęknięcia szczeliny) określają możliwości kruchego pęknięcia całego elementu konstrukcji. W przekroju elementu w którym znajduje się karb naprężenia nie są rozłożone równomiernie, ponieważ powierzchnie karbu nie przenoszą obciążenia. W pobliżu krawędzi karbu powstaje koncentracja naprężeń, tym większa, im głębszy jest karb i wyższe przyłożone naprężenia zewnętrzne, rozciągające, szczególnie działające w kierunku prostopadłym do powierzchni wady. Jeżeli naprężenia zewnętrzne wzrastają, wzrasta wielkość koncentracji naprężeń w pobliżu krawędzi karbu tak, że naprężenia te mogą przekroczyć granicę plastyczności materiału. Materiał sąsiadujący z powierzchniami karbu nie przenosi przyłożonych naprężeń, nie wydłuż się ani nie wykazuje przewężenia, a przez to ogranicza albo nawet uniemożliwia przewężenie przy krawędzi karbu. Skutkiem tego w strefie tej powstają naprężenia działające prostopadle do kierunku naprężenia nominalnego, równoległe i prostopadłe do krawędzi karbu [3]. Stan naprężeń trójosiowych uniemożliwiający przewężenie nosi nazwę stanu odkształcenia płaskiego.

Obniżenie temperatury powoduje wzrost granicy plastyczności stali i zmniejszenie ciągliwości, zwłaszcza przy równoczesnym wpływie karbu. Mechanizm odkształcenia plastycznego zależy także od szybkości z jaką narasta obciążenie. Jeżeli ta szybkość jest duża, czas dla poślizgów (ruchu dyslokacji) może być niewystarczający, skutkiem czego naprężenia wzrosną ponad poziom granicy plastyczności.

Ważnym czynnikiem, od którego zależy skłonność do pęknięcia jest położenie temperatury kruchości. Pod pojęciem temperatury kruchości rozumie się temperaturę przy której granica plastyczności materiału R_e osiąga wartość równą wytrzymałości na rozciąganie R_m , a wydłużenie materiału spada do zera. Głównym czynnikiem decydującym o położeniu temperatury kruchości jest mikrostruktura.

Temperatura kruchości zależy od kształtu badanych próbek, stanu naprężeń i prędkości odkształcania. Najniższą temperaturę kruchości obserwuje się przy rozciąganiu próbek gładkich, najwyższą przy dynamicznym rozciąganiu lub łamaniu próbek z ostrym karbem [1]. W praktyce do określenia temperatury kruchości jest najczęściej stosowana próba udarności. Przejście materiału w stan kruchy w obniżonych temperaturach odbywa się stopniowo w pewnym zakresie, który nazywa się zakresem przejścia w stan kruchy. Zakres i charakter przebiegu temperatury przejścia zależy od właściwości materiału i od rodzaju (ostrości, głębokości) karbu.

Pękanie kruche może występować w różnych konstrukcjach, jednak najsilniej uwidacznia się w konstrukcjach spawanych. Spawanie stwarza bowiem sprzyjające warunki metalurgiczne i naprężeniowe dla kruchego pęknięcia [2].

Przejście materiału sprężysto-plastycznego w stan kruchy może być spowodowane wieloma czynnikami [1]:

1. warunkami pracy materiału w konstrukcji:
 - poziom naprężeń własnych lub od obciążeń zewnętrznych,
 - wieloosiowy stan naprężeń,
 - zwiększona prędkość odkształcania (obciążenie dynamiczne),
 - temperatura eksploatacji materiału konstrukcji;
2. metalurgiczny stan materiału, czyli:
 - skład chemiczny,
 - stopień i sposób odgazowania (uspokojenia) stali,
 - stan po obróbce cieplnej i struktura;
3. poziom wytwarzania konstrukcji np. niezgodności spawalnicze tworzące karby spiętrzające naprężenia.

Konstrukcje spawane mogą być eksploatowane przy wieloosiowym stanie naprężeń, będącym skutkiem istnienia niezgodności spawalniczych, naprężeń własnych i grubości materiału. Ostra wada jest zwykle inicjatorem kruchego pęknięcia. Wada usytuowana w polu naprężeń rozciągających powoduje wzrost naprężeń i lokalnych odkształceń na dnie karbu. Przy wzrastających naprężeniach od obciążenia zewnętrznego i sumowaniu się tych naprężeń z naprężeniami własnymi, powstającymi w procesie spawania, naprężenia lokalne szybko osiągną granicę plastyczności. Przy wierzchołku karbu powstaje z reguły trójosiowy stan naprężeń rozciągających w małej objętości materiału, zmniejszając jego ciągliwość. Trójosiowy stan naprężeń, występujący również przy spawaniu materiałów o grubości powyżej 20 mm, sprzyja inicjowaniu pęknięć kruchych w konstrukcjach spawanych. Często przyczyną zapoczątkowania pęknięcia kruchego w konstrukcji spawanej jest zmęczenie metalu w strefie koncentracji naprężeń. W niskich temperaturach, gdy stal charakteryzuje się mniejszą plastycznością, powstałe pęknięcie zmęczeniowe może rozprzestrzenić się jako kruche [7].

Metody badań odporności materiału na kruche pękanie można podzielić na trzy grupy [11]:

- badania jakościowe typu „technologicznego” stosunkowo niedużych próbek, związane głównie z kontrolą odbioru materiału i złączy spawanych,
- badania próbek będących modelami określonych węzłów konstrukcyjnych i istniejących tam warunków obciążenia,
- badania oparte na zasadach mechaniki pęknięcia.

Istnieje wiele prób technologicznych umożliwiających ocenę odporności materiału na pękanie kruche: próby udarności, próby kafarowe typu DWT określające temperaturę zerowej plastyczności (NDT) oraz wyznaczanie krzywej energii łamania stosunkowo dużych próbek z karbem (krzywa DT) itp. Do oceny przydatności stali na konstrukcje spawane narażone na pękanie kruche najczęściej stosowana jest ocena temperatury przejścia w stan kruchy na podstawie badania udarności (Charpy V) w funkcji temperatury.

Zasadniczą wadą prób technologicznych jest brak możliwości ustalenia na ich podstawie bezpośredniego związku między wynikami badań a poziomem naprężeń inicjujących pękanie [11].

Druga grupa metod badań dotyczy dużych próbek, które w pewnym stopniu odzwierciedlają określone elementy konstrukcyjne i istniejące tam warunki obciążenia. Do grupy tej należą próba Robertsona, ESSO, Wellsa itp.

Jak stwierdzono w [8] w świetle dotychczasowych doświadczeń w warunkach laboratoryjnych najdokładniejszą ocenę materiału z punktu widzenia jego odporności na pękanie kruche uzyskuje się za pomocą próby Wellsa. Polega ona na rozrywaniu szerokiej płyty ze spoiną wzdłużną i uprzednio naciętym

karbem, w odpowiednio niskich temperaturach. Badania te są jednak bardzo kosztowne. Znaczna liczba prac badawczych podjętych w celu porównania kryteriów odporności materiału na pękanie kruche, oceniana różnymi metodami wykazała, że nie uzyskuje się na ogół zgodności uzyskiwanych wyników.

Trzecią grupę metod badania odporności materiałów na pękanie są metody oparte o mechanikę pęknięcia. Metody te pozwalają za pomocą badań stosunkowo małych próbek określić warunki inicjacji pęknięć przy danej wielkości wady i przy danym poziomie naprężeń. Za pomocą tych metod określa się takie charakterystyczne parametry odporności na pękanie, jak G_c , G_{IC} , K_{IC} , COD oraz całka J [11].

Do sposobów podwyższania odporności złączy spawanych na pękanie kruche zalicza się [7]:

- wybór materiału rodzimego o małej skłonności do starzenia i dostatecznie dużej odporności na rozprzestrzenianie się pęknięć w temperaturze eksploatacji,
- konstruowanie węzłów w taki sposób, aby zmniejszyć koncentrację naprężeń roboczych w czasie eksploatacji i naprężeń powstających podczas ich wykonywania,
- wyznaczenie kolejności operacji montażowo-spawalniczych i technologicznych metod wykonywania połączeń spawanych tak, aby wykluczyć występowanie ostrych koncentracji naprężeń (brak przetopu, pęknięcia, podtopienia itp.) w strefie odkształceń plastycznych,
- zastosowanie materiałów dodatkowych i parametrów spawania zapewniających dużą plastyczność i ciągliwość metalu złącza w niskich temperaturach,
- obróbka cieplna po spawaniu (wysokie odpuszczanie, normalizacja, hartowanie i odpuszczanie).

1.3.4.2. Pękanie zmęczeniowe

W elementach konstrukcji eksploatowanych przy obciążeniach zmiennych występują naprężenia zmieniające się zarówno co do wielkości, jak i kierunku. Naprężenia zmienne po pewnym okresie eksploatacji mogą wywoływać pęknięcia zmęczeniowe. Pęknięcie zmęczeniowe rozwija się zmniejszając czynny przekrój elementu, aż do wyczerpania się zapasu wytrzymałości i zniszczenia elementu.

Złącze spawane uważa się za newralgiczny pod względem zmęczenia element konstrukcji.

W elementach spawanych pęknięcie zmęczeniowe powstaje zwykle w miejscach nagłych zmian przekrojów, karbów konstrukcyjnych, niezgodności spawalniczych zewnętrznych i wewnętrznych, czyli tam gdzie występuje znaczne spiętrzenie naprężeń [2].

Powierzchnia przełomu zmęczeniowego ma zwykle charakterystyczny wygląd o dwu lub trzech wyraźnych, dających się rozpoznać, strefach [5]. W większości przypadków pęknięcie zmęczeniowe rozpoczyna się na powierzchni. W konstrukcjach spawanych w mniejszości przypadków, ale mających duże znaczenie, pęknięcia rozpoczynają się z dala od powierzchni w miejscu niezgodności spawalniczej. W przypadku stali konstrukcyjnych strefa otaczająca ognisko pęknięcia jest gładka, jedwabista i dochodzi do granicy właściwego pęknięcia zmęczeniowego. Ten gładki obszar ma często tendencję do nieznacznego powolnego, lecz postępującego wzrostu, przy czym tekstura staje się bardziej szorstka w miarę oddalania się od ogniska pęknięcia. Badania gładkiej części powierzchni przełomu ujawniają istnienie zarówno współśrodkowych pierścieni (linii spoczynkowych) dookoła ogniska przełomu, jak i linii wychodzących w niego promieniowo, co może być często wykorzystywane do lokalizacji tego ogniska. Kierunek w którym rozwija się pęknięcie zmęczeniowe jest zawsze prostopadły do linii działania naprężeń powodujących pęknięcie. W miarę powiększania się pęknięcia naprężenia w pozostałej części przekroju rosną, co powoduje wzrost prędkości rozwoju pęknięcia. W końcu dochodzi ono do takiego stadium, że pozostałe pole przekroju nie wystarcza do przeniesienia przyłożonego obciążenia i następuje końcowe zniszczenie. Powierzchnia przełomu w polu końcowego zniszczenia może mieć wygląd krystaliczny lub włóknisty w zależności od tego, czy pęknięcie ma charakter kruchy, czy ciągliwy [5].

Istnieje wiele różnych metod badania wytrzymałości zmęczeniowej złączy i elementów konstrukcji spawanych [5],[6]. Można je podzielić zasadniczo na trzy rodzaje:

- próby przy obciążeniu osiowym,
- próby zginania (głównie dla próbek w kształcie belek),
- próby naczyń ciśnieniowych i rurociągów przy ciśnieniu tętniącym.

W celu określenia w danych warunkach obciążenia wytrzymałości zmęczeniowej danego złącza spawanego kilka jednakowych próbek (zwykle od ośmiu do dwunastu) poddaje się określonej naprężeniu cyklicznemu i rejestruje się dla każdej próbki liczbę zmian obciążenia N niezbędną do wywołania w niej pęknięcia. W ten sposób otrzymuje się zależność między przyłożonym naprężeniem σ i

liczbą cykli niezbędną do zniszczenia próbki. Zależność tę można wyrazić krzywą $\sigma - n$ (krzywa Wohlera). W przypadku złączy spawanych krzywe Wohlera są wyznaczone zwykle dla podstawy próby zmęczeniowej wynoszącej od 10^5 do $2 \cdot 10^6$ cykli.

W przypadku pęknięć zmęczeniowych badanie powierzchni przelomu wskazuje zwykle nie tylko ognisko pęknięcia, lecz także ujawnia kierunek krytycznych naprężeń oraz daje pewien pogląd co do wartości naprężeń. Informacja ta może być bardzo cenna przy określaniu środków zaradczych, ponieważ w ten sposób można wskazać, które szczegóły konstrukcji trzeba zmodyfikować oraz gdzie należy zmniejszyć naprężenia.

Wytrzymałość zmęczeniową złączy spawanych w sposób istotny obniżają spawalnicze naprężenia własne (rozciągające). Mniejsze znaczenie ma struktura metalu złącza poddana zmianom podczas procesu cieplnego, pomimo że jej właściwości mechaniczne są często pogorszone [1],[6]. Tak więc o wytrzymałości zmęczeniowej decyduje przede wszystkim rodzaj, kształt i jakość wykonania złącza spawanego.

Stale o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości są bardziej wrażliwe na działanie karbu w porównaniu do węglowych stali konstrukcyjnych. Wrażliwość tych stali na działanie karbu w obecności złącza spawanego wzrasta, szczególnie przy pracy konstrukcji poddanej obciążeniom zmiennym.

Zniszczenie złącza spawanego może zachodzić w spoinie, bądź w łączonym elemencie. Ten ostatni przypadek jest bardziej powszechny i charakteryzuje go pęknięcie rozpoczynające się od brzegu spoiny poprzecznej lub od zakończenia spoiny wzdłużnej [1]. Pęknięcie na brzegu spoiny rozpoczyna się od karbu geometrycznego, który jest zlokalizowany najczęściej na linii wtopu spoiny. Zarodkiem pęknięcia zmęczeniowego jest wówczas najczęściej ostra wada (szczelina) podobna do pęknięcia, która po niewielkiej liczbie cykli obciążeń powiększa się. Najostrzejszymi koncentratorami naprężeń są przyklejenia, brak przetopu, podtopienia, makroskopowe inkluzje żużla i naderwania na brzegu lica spoiny. Znaczna liczba pęknięć zmęczeniowych rozpoczyna się w spoinie a następnie rozwijają się w SWC. Stwierdzono, że wytrzymałość zmęczeniowa stopiwa bez karbu, otrzymanego w wyniku jakiegokolwiek poprawnie zastosowanego procesu spawania jest co najmniej równa wytrzymałości zmęczeniowej blachy stalowej ze zgorzeliną walcowniczą [1]. Dobrze wykonane złącza czołowe, po usunięciu ich nadlewów na równo z powierzchnią blachy, nie ulegają zniszczeniu, lecz pęknięcie rozpoczyna się w warstwie zgorzeli lub w SWC na skutek zmian strukturalnych.

W zakresie wpływu metody spawania na wytrzymałość zmęczeniową wytworzonego złącza, należy stwierdzić, że jest ona związana przede wszystkim z profilem lica spoiny i kątem, jaki tworzy ono z powierzchnią blachy, a w dalszej kolejności ze składem stopiwa i czynnikami metalurgicznymi. Z tych też względów wytrzymałość zmęczeniową złączy doczołowych wykonanych łukiem krytym bywa niekiedy niższa, niż wykonanych łukowo ręcznie elektrodami otulonymi. Przy spawaniu łukiem krytym kąt nadlewu lica jest mniejszy, niż uzyskany przy spawaniu łukowym ręcznym elektrodami otulonymi, a więc kąt karbu jest ostrzejszy. Profil lica zależy w dużym stopniu od parametrów spawania. W przypadku złączy wykonanych łukowo w osłonach gazów ochronnych natryskowe przenoszenie stopiwa oraz spawanie w mieszance Ar + CO₂ zwiększa kąt między licem a materiałem, a więc i wytrzymałość zmęczeniową. Spoiny wykonane w pozycjach przymusowych mają zwykle kształty niekorzystne, niezależnie od metody jaką je wykonano, można zatem spodziewać się obniżenia ich wytrzymałości zmęczeniowej.

W przypadku gdy obciążenie zmęczeniowe skierowane jest wzdłuż osi spoiny wyższą wytrzymałość zmęczeniową uzyskuje się dla złączy wykonanych łukiem krytym niż spawanych elektrodą otuloną czy w osłonach gazów ochronnych. Spoiny wykonane łukiem krytym mają zazwyczaj bardziej gładkie, pozbawione łusek lico w porównaniu z licem po spawaniu łukowym elektrodami otulonymi bądź po półautomatycznym spawaniu w osłonach mieszanek Ar + CO₂.

W celu zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji, oprócz działań na etapie projektowania konstrukcji, możliwe są także zabiegi technologiczne polegające na obróbce mechanicznej złączy spawanych oraz zmianie stanu naprężeń w złączu spawanym. Przez usunięcie nadlewu spoiny czołowej można zwiększyć wytrzymałość zmęczeniową złącza do wartości, jaką ma materiał podstawowy pod warunkiem, że złącze nie ma innych istotnych wad.. W przypadku złączy ze spoinami pachwinowymi tak znaczne zwiększenie wytrzymałości nie jest możliwe ze względu na kształt spoiny i złożoność stanu naprężeń. Tym niemniej jest możliwe zmniejszenie ostrości karbu powstałego na brzegu spoiny pachwinowej. Stopień zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej złącza spawanego zależy od staranności szlifowania [1].

Zabiegi technologiczne polegające na zmianie stanu naprężeń w złączu spawanym obejmują:

- przeciążenie wstępne,
- ściskanie miejscowe,
- nagrzewanie punktowe,
- młotkowanie lub śrutowanie,
- przetapianie brzegu spoiny.

1.3.4.3. Pęknięcia korozyjne

Korozja naprężeniowa jest rodzajem niszczenia materiałów metalicznych, które zachodzi pod wpływem jednoczesnego działania agresywnego środowiska i statycznych naprężeń rozciągających. Nastęstwem korozyjnej naprężeniowej jest tworzenie się szczelin, które rozwijają się na ogół prostopadle do kierunku działania naprężeń i ostatecznie powodują pęknięcie materiału. Pęknięcie korozyjne zachodzi w sposób makroskopowo kruchy, mimo że podlegające pękaniu materiały wykazują w normalnych warunkach dużą plastyczność. Pęknięcie to występuje przy naprężeniach znacznie niższych od wytrzymałości na rozciąganie w powietrzu, często nawet poniżej granicy plastyczności materiału [9].

Proces korozyjnej naprężeniowej rozwija się w warunkach eksploatacyjnych. Szczeliny rozwijają się lokalnie, powodując przy znikomym ubytku masy znaczne zmniejszenie roboczego przekroju poprzecznego. Powstałe szczeliny mogą być pojedyncze lub mogą posiadać liczne drobne rozgałęzienia. Pęknięcie zachodzi zarówno międzykrystalicznie, jak i śródkrystalicznie, przy czym dla danego materiału i środowiska dominuje na ogół jeden typ pęknięcia [10].

Mała agresywność środowiska w sensie korozyjnej ogólnej jest z reguły następstwem utworzenia warstewki ochronnej na powierzchni stali, w wyniku jej reakcji ze środowiskiem. Największe znaczenie w korozyjnej naprężeniowej mają tlenkowe warstewki pasywne o grubości najczęściej 2 – 5 nm. Jeśli warstewki te ulegną miejscowemu uszkodzeniu, np. na skutek zarysowania lub rozerwania w wyniku działania naprężeń rozciągających, wówczas odsłoni się metal z aktywną powierzchnią. Powierzchnia ta może pokryć się warstwą pasywną (ulec repasywacji) lub też pozostać aktywną. Uważa się, że istotną cechą środowisk wywołujących pęknięcie jest ich zdolność do wytwarzania lub utrzymywania stanu aktywno-pasywnego, charakteryzującego się współlistnieniem dużych powierzchni pasywnych i wąskich miejsc aktywnych, działających jako anody, podczas gdy powierzchnie pasywne działają jako katody [10].

Pęknięcie korozyjne zachodzi jedynie w obecności takich naprężeń statycznych, które mają składową rozciągającą. Mogą to być naprężenia zewnętrzne lub pozostające naprężenia spawalnicze, przy czym szczególnie szkodliwe są naprężenia powodujące plastyczne odkształcenie materiału. Odkształcenie to może występować miejscowo przy naprężeniach nominalnych nawet poniżej granicy plastyczności stali w wyniku obecności koncentatorów naprężeń, jakimi są niezgodności spawalnicze w złączach spawanych. Podczas odkształcania zachodzi rozrywanie warstewki pasywnej i rozwieranie rozwijających się szczelin.

Mechanizm korozyjnej naprężeniowej nie został dotychczas jednoznacznie wyjaśniony i literatura proponuje szereg modeli rozwoju szczeliny, które można podzielić na dwie grupy [10]:

- modele elektrochemiczne, przedstawiające rozwój szczeliny jako wynik elektrochemicznego rozpuszczania metalu na dnie szczeliny,
- modele mechaniczne, przedstawiające rozwój szczeliny jako wynik mechanicznego rozrywania.

[1] Ferenc K., Ferenc J.: Konstrukcje spawane. Projektowanie połączeń. WNT. Warszawa 2000.

[2] Ferenc K., Nita K., Sobiś T.: Spawalnictwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1999.

[3] Tasak E.: Metalurgia i metaloznawstwo połączeń spawanych. AGH w Krakowie. Skrypt uczelniany nr 945. Kraków 1995.

[4] Praca zbiorowa: Poradnik Inżyniera „Spawalnictwo”. WNT Warszawa, 1983.

[5] Guney t.R.: Zmęczenie konstrukcji spawanych. WNT Warszawa, 1973.

[6] Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT Warszawa, 1978.

[7] Jakubiec M., Lesiński K., Czajkowski H.: Technologia konstrukcji spawanych. WNT Warszawa

[8] Opartny-Mysliwiec D., Mysliwiec M.: Techniki Wytwarzania. Spawalnictwo. PWN. Warszawa 1981.

- [9] Brózda J.: Korozja naprężeniowa zbiorników na amoniak i jej zapobieganie. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 5/94, str.32-37.
- [10] Flis J.: Zjawisko korozji naprężeniowej metali i stopów. Praca zbiorowa pt. „Niektóre aktualne problemy chemicznego i mechano-chemicznego niszczenia metali”. Wydawnictwa PAN, Wrocław 1975.
- [11] Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali. WNT Warszawa 1975.

1.4. Wybrane zagadnienia spawalności stali stopowych konstrukcyjnych

1.4.1 Stale konstrukcyjne o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości

W stalach konstrukcyjnych o podwyższonej wytrzymałości zawartość węgla jest ograniczona do 0,2%, a podwyższenie granicy plastyczności R_e i wytrzymałości R_m uzyskuje się przez [1]:

- zwiększenie zawartości manganu (do 1,8%) i krzemu (do 0,5%),
- regulację skład chemicznego i umocnienie cieplne,
- wprowadzenie do stali mikrodotyków i umocnienie dyspersyjne.

Stale konstrukcyjne o podwyższonej granicy plastyczności dzieli się na:

- stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, w których podwyższenie wytrzymałości uzyskuje się przez zwiększenie udziału perlitu, rozdrobnienie ziarna ferrytu lub wprowadzenie pewnych pierwiastków i uzyskanie wydzielań w roztworze stałym, zwiększających umocnienie,
- stale o strukturze bainitycznej (lub martenzytycznej), ulepszone cieplnie, w których podwyższenie wytrzymałości uzyskuje się m.in. przez wprowadzenie do nich minimalnych ilości boru, co sprzyja tworzeniu struktury prawie całkowicie bainitycznej przy szybkości chłodzenia w szerokich granicach.

1.4.1.1. Stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości węglowo – manganowe (C-Mn)

Stale ferrytyczno-perlityczne, w których przez większą zawartość węgla i manganu uzyskano zwiększenie ilości perlitu, a następnie przez dodatek krzemu osiągnięto dodatkowe utwardzenie roztworu stałego, są stalami o granicy plastyczności do ok. 350 MPa. Dodatek aluminium do tych stali powoduje związanie wolnego azotu i rozdrobnienie struktury, polepszając odporność na starzenie i na kruche pękanie [5]. Stale te nazywane są w skrócie C-Mn. Stale C-Mn są reprezentowane w kraju przez gatunki: 09G2, 09G2Cu, 15GA, 18G2, 18G2A i 18G2ACu [2]. W klasyfikacji według norm europejskich stale C-Mn zaliczane są do stali niestopowych, w większości przypadków tzw. jakościowych (wg EN 10025).

Najistotniejszym problemem spawalności stali C-Mn jest pękanie na zimno. Dlatego do spawania tych stali należy z reguły stosować wysoką energię liniową spawania oraz podgrzewanie wstępne przy dużych grubościach elementów spawanych i niskiej temperaturze otoczenia [3]. Przy spawaniu przekrojów grubszych niż 30 mm należy wstępnie podgrzewać brzozy łączonych elementów do temperatury 150 – 250°C. Przy dużych elementach nagrzewanie może być miejscowe, najlepiej palnikiem gazowym, przy czym należy uważać, by przez niewłaściwy sposób podgrzewania nie doprowadzić do wzrostu naprężeń cieplnych [1]. Do spawania stali C-Mn zaleca się spawanie łukowe ręczne elektrodami zasadowymi lub spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie Ar-CO₂, a także spawanie łukowe pod topnikiem.

1.4.1.2. Stale drobnoziarniste normalizowane i obrabione cieplno-plastycznie

Zwiększenie wytrzymałości, plastyczności i udarności stali, w stosunku do stali C-Mn, uzyskuje się przez dodanie do stali typu C-Mn niewielkiej ilości pierwiastków stopowych (V, Nb, Ti). Dodatki te rozdrabniają ziarno, tworząc duże ilości zarodków krystalizacji i hamując rozrost ziarn austenitu, dzięki wydzielaniu się drobnoziarnistych węglików, azotków i węglo-azotków. Wzrost wytrzymałości jest wynikiem utwardzenia wydzieleniowego. Rozdrobnienie ziarna, a przez to poprawienie plastyczności, jest możliwe przez konwencjonalne normalizowanie stali lub obróbkę cieplno-plastyczną polegającą na kontrolowanym walcowaniu w określonym zakresie temperatur i stosowaniu po nim zabiegów cieplnych, m.in. normalizowania lub chłodzenia w wodzie. Stale drobnoziarniste normalizowane lub walcowane określają normy PN-EN 10028-3 (na urządzenia ciśnieniowe), EN 10113-2 (stale konstrukcyjne), EN 10149-3 (do kształtowania na zimno). Granica plastyczności tych stali zawiera się w granicach 260-460 MPa. Stale drobnoziarniste obrabione cieplno-plastycznie o $R_e < 700$ MPa określają normy EN 10113-3 (stale konstrukcyjne), EN 10149-2 (do kształtowania na zimno), EN 10028-5 (na zbiorniki ciśnieniowe). Stale drobnoziarniste są reprezentowane w kraju przez gatunki: 15G2ANb, 15G2ANNb, 18G2ANb, 18G2AV, 18G2AVCu.

Spawanie tych stali wiąże się z wieloma problemami. W procesie spawania, zwłaszcza łukiem o wysokiej energii liniowej, następuje przechodzenie mikrodotyków do spoin i tworzenie w spoinach

wysokodispersyjnych węglikoazotków o zbyt dużej gęstości i bardzo małej wielkości. Obniża to własności plastyczne spoiny. W spoinach dodatkowo mogą występować niekorzystne zjawiska umacniania ferrytu i wydzielenia o charakterze starzeniowym [4].

W gruboziarnistym obszarze SWC tych stali w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania mogą zachodzić procesy:

- rozrostu wydzielań węglikoazotków mikrododatków, które tracą wówczas zdolność hamowania rozrostu ziarn,
- rozpuszczanie się wydzielań i przesycanie gruboziarnistej części SWC azotem,
- rozpuszczanie się wydzielań i ich wydzielenie w czasie chłodzenia w postaci drobnodispersyjnej co wywołuje znaczny stan naprężeń wewnętrznych,
- przechodzenie mikrododatków do roztworu w wyniku rozpuszczania się wydzielań i opóźnianie przemiany austenitu.

Wymienione powyżej zjawiska wpływają na wzrost kruchości i pogorszenie właściwości mechanicznych połączeń spawanych.

W połączeniach spawanych ze stali mikrostopowych mogą występować pęknięcia gorące w SWC, spowodowane wydzieleniem siarczkoazotków lub węglików mikrododatków. Mogą występować także pęknięcia lamelarne wywołane niską ciągliwością w kierunku grubości elementów walcowanych. Mała ciągliwość stali mikrostopowych wynika z ogólnej zawartości wtrąceń niemetalicznych w stali, ale może być potęgowana obecnością wtrąceń siarczkowych na bazie Ti i Nb. Siarczki tego typu często wchodzi w kombinację z cienkimi dendrytycznymi błonkami azotku niobu tworząc siarczkoazotki [4].

Wymienione powyżej czynniki sprawiają, że technologia spawania stali mikrostopowych musi uwzględniać ograniczenie energii liniowej łuku, szczególnie przy spawaniu łukiem krytym i elektrodą topliwą w osłonach gazowych. Energia liniowa łuku powinna być utrzymana na poziomie 10-30 kJ/cm, stosowana powinna być technika wielowarstwowa spawania. Zaleca się stosowanie elektrod zasadowych oraz topników zasadowych lub neutralnych.

Tablica. Elektrody, druty i topniki do spawania stali niskostopowych o podwyższone wytrzymałości [1]

Znak stali	Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną	Spawanie łukiem krytym		Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie Ar - CO ₂
	elektroda	drut	topnik	drut
09G2	EB 146	SpG4, SpG4N	TAST-1	SpG3S
09G2Cu	EB 146	SpG4, SpG4N	TAST-1	SpG3S
15GA	EB 146	SpG4, SpG4N	TAST-1	SpG3S
18G2	EB 150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S
18G2A	EB 150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S
18G2ACu	EB 150, EB 250	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S
15G2ANb	EB 150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S
18G2ANb	EB 150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S
18G2AVCu	EB 150, EB 250	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S
18G2AV	EB 150, EB 250	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S

1.4.1.3. Stale ulepszone cieplnie

Spawalne stale konstrukcyjne ulepszone cieplnie, tzn. poddane obróbce cieplnej złożonej z hartowania i odpuszczania należą do grupy stali drobnoziarnistych [2]. Obecność w tych stalach Cr i Mo powoduje powstawanie względnie trwałych węglików i obniżenie krytycznej szybkości chłodzenia oraz zwiększenie hartowności. Wanad, tworząc węglo-azotki, umacnia stal dyspersyjnie, a nikiel poprawia własności plastyczne, zwłaszcza udarność w obniżonej temperaturze. W zależności od składu chemicznego i obróbki cieplnej ich granica plastyczności wynosi od ok. 400 do 1000 MPa.

Stale o granicy plastyczności do ok. 700 MPa są ulepszone w sposób tradycyjny poprzez powtórne ich nagrzewanie do temperatury hartowania (proces RQ-T) lub bezpośrednio po walcowaniu (proces DQ-T). W procesie DQ-T otrzymuje się grube blachy o granicy plastyczności dochodzącej do 1000 MPa przy zachowaniu wysokiej odporności na pękanie kruche. Najnowszy proces produkcji stali

ulepszanych cieplnie składa się z ciągłego odlewania połączonego z cieplno-plastycznym walcowaniem, po którym następuje proces DQ-T. Różnica pomiędzy procesem kontrolowanego walcowania z przyspieszonym chłodzeniem a procesem DQ-T polega głównie na większych szybkościach chłodzenia w procesie DQ-T oraz dodaniu odpuszczania w oddzielnym piecu. Odpuszczanie odbywa się w zakresie temperatur 600-660°C [2].

Stale ulepszone cieplnie przeznaczone są na konstrukcje budowlane, maszynowe, dźwigowe itp. (wg EN 101037-2) oraz na urządzenia ciśnieniowe (wg EN 10028-6).

W Polsce jest produkowana stal drobnoziarnista ulepszona cieplnie w gatunku 14 HNMBCu o granicy plastyczności $Re_{min} = 690$ MPa. Stale o podwyższonej wytrzymałości 18G2A i 18G2AV mogą być dostarczane w stanie ulepszonym cieplnie (Re odpowiednio do 420 i 550 MPa), lecz w zasadzie są przeznaczone do konwencjonalnego walcowania i normalizowania.

Stale ulepszone cieplnie uważane są za dobrze spawalne. Posiadają one strukturę niskowęglowego odpuszczonego martenzytu o twardości 350-400 HV i o właściwościach zdecydowanie różniących się od martenzytu uzyskiwanego w stalach C-Mn, spawanych zbyt małymi energiami liniowymi łuku. Ze względu na martenzytyczną strukturę, w połączeniach spawanych mogą wystąpić pęknięcia na zimno. Z drugiej jednak strony zbyt wysoka energia liniowa i wysoka temperatura podgrzewania przed spawaniem mogą prowadzić do powstania w SWC kruchej struktury bainitycznej. Temperatura podgrzewania przed spawaniem dla tych stali wynosi ok. 100°C. Stale ulepszone cieplnie nie wykazują skłonności do pęknięcia kruchej, jednak mogą wykazywać skłonność do tworzenia pęknięć pod wpływem powtórnego nagrzewania. Stale te należy spawać łukowo ręcznie elektrodami zasadowymi. Możliwe jest spawanie stali ulepszonych cieplnie łukowo elektrodą topliwą w osłonach gazów i łukiem krytym. Stal 14 HNMBCu można spawać elektrodami EB 170, w przypadku spawania łukiem krytym należy stosować drut Sp2Gni i topnik TAST-1.

1.4.1.4. Stale trudno rdzewiejące

Obecność w stali niektórych pierwiastków (Cu, Cr, P, Ni) w istotnym stopniu zmienia odporność na korozję atmosferyczną. Wyroby ze stali z dodatkiem miedzi charakteryzują się prawie dwukrotnie zwiększoną odpornością na korozję. Zgodnie z podziałem stali stosowanych w normach europejskich stale trudnordzewiejące należą do grupy niestopowych. Warunki techniczne dostawy stali trudnordzewiejących konstrukcyjnych są zawarte w normie EN 10155. Stale odporne na korozję stosowane winny być szczególnie na konstrukcje cienkie, o rozwiniętej powierzchni. Stale te dostarczane są bez obróbki cieplnej po walcowaniu, po wyżarzaniu rekrytalizacyjnym bądź, w przypadku odmiany D, w stanie normalizowanym lub po regulowanym walcowaniu [3].

Przy spawaniu stali trudnordzewiejących należy przestrzegać takich samych zasad, jakie obowiązują przy spawaniu stali typu C-Mn.

Do spawania stali trudnordzewiejących należy stosować materiały dodatkowe, których odporność na korozję atmosferyczną odpowiadałaby odporności stali. Spośród materiałów dodatkowych krajowych zaleca się elektrody otulone firmy Baildon w gatunkach ES 10HNB, ES 10HA i ES 10HB. Możliwe jest stosowanie spawania łukiem krytym oraz elektrodą topliwą w osłonie Ar + CO₂ pod warunkiem dobrania spoiwa właściwego pod względem odporności na rdzewienie.

Tablica. Elektrody, druty i topniki do spawania stali trudno rdzewiejących [1]

Znak stali	Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną elektroda	Spawanie łukiem krytym		Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonach gazowych	
		drut	topnik	drut	Gaz osłonowy
10H	ES 10HB, EB150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S	Ar +CO ₂
10HA	ES 10HB, EB150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S	Ar +CO ₂
10HAV	ES 10HB, EB150	SpG4, SpG5	TAST-1	SpG3S, SpG4S	Ar +CO ₂

1.4.2. Stale ferrytyczne do pracy w niskiej temperaturze

Stale o strukturze ferrytycznej z udziałem perlitu, sorbitu, bainitu czy martenzytu doskonale nadają się do zastosowań kriogenicznych [2]. Podstawowym problemem ze względu na bezpieczne użytkowanie konstrukcji ze stali ferrytycznych w niskich temperaturach jest pękanie kruche.

Stale węglowe zwykłej jakości, jeśli są właściwie odtlenione o poprawnie dobranej odmianie plastyczności, można stosować na konstrukcje pracujące w temperaturach do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stale niestopowe specjalnej jakości, po pozytywnych badaniach udarnościoowych w obniżonej temperaturze, można stosować do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. W podobnej, lub nawet nieco niższej temperaturze pracują stale drobnoziarniste.

Drugą grupą stali przeznaczonych do pracy w niskich temperaturach są stale z niklem. W programach produkcji wielu krajów występują stale, w których średnia zawartość niklu wynosi ok. 2,5%, 3,5%, 5% i 9%. Stale o zawartości do 2,5% niklu stosuje się w temperaturze do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, o zawartości do 3,5% (i rzadziej ok.5%) w temperaturze do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast o zawartości 9% niklu w temperaturze do $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dobre właściwości mechaniczne i dużą odporność na pękanie kruche stale o małej i średniej zawartości niklu osiągają dzięki specjalnej obróbce cieplnej, polegającej na normalizowaniu i chłodzeniu z określoną prędkością w piecach o kontrolowanej atmosferze. Niektóre gatunki są hartowane i odpuszczane, inne natomiast podwójnie normalizowane i odprężane.

Stale zawierające do 3,5% Ni należą do dobrze spawalnych ze względu na małą zawartość węgla i kontrolowaną ilość Mn, Si, P i S. Poprawnie prowadzony proces spawania umożliwia uzyskanie złączy bez oznak kruchości do temperatury pracy $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Energia liniowa spawania musi być utrzymana w zalecanym wąskim zakresie, a spawanie powinno być wielowarstwowe. Elementy spawane o grubości powyżej 12,5 mm należy podgrzewać przed spawaniem oraz wyżarzać odprężająco po spawaniu. Dopuszcza się spawanie łukowe ręczne elektrodami otulonymi zasadowymi oraz spawanie łukowe w osłonach gazowych i łukiem krytym, pod warunkiem stosowania spoiwa o składzie chemicznym najbliższym materiałowi rodzimemu.

W przypadku stali o zawartości 5% Ni jako spoiwa należy używać stopów wysokoniklowych typu inconel, incoloy, hastelloy itp. Do spawania stali o zawartości 9% Ni należy stosować spoiwa wysokoniklowe lub austenityczne.

1.4.3. Stale przeznaczone na elementy urządzeń energetycznych

W nowoczesnej energetyce zespoły pracują przy bardzo wysokich parametrach – ciśnienie do ok. 12 MPa i temperatura pary $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ – i do ich budowy stosowane są stale, których podstawowymi pierwiastkami stopowymi są Cr, Mo i V [1]. Ponieważ zespoły wytwarzające parę, jak i przewody wraz z armaturą i niektóre części turbin, są łączone przez spawanie, dlatego niezmiernie ważne jest dobranie takiego składu chemicznego stali, aby spełniały one wymagania wytrzymałościowe ze specjalnym uwzględnieniem wysokiej granicy pełzania i żeby spawalność stali była na poziomie umożliwiającym wykonanie połączeń w warunkach produkcyjnych [1]. Z punktu widzenia składu chemicznego stale dla przemysłu energetycznego można podzielić na:

- molibdenowe np.: 16M, 20M,
- molibdenowo-wanadowe np.: 20MF,
- chromowo-molibdenowe np.: 15HM, 34HM i 10H2M,
- chromowo-molibdenowo-wanadowe np.: 12HMF, 13HMF, 15HMF,
- chromowo-niklowo-miedziane np.: 18CuNMT.

Przy spawaniu stali do pracy w podwyższonych temperaturach istotnym zagadnieniem jest uzyskanie jak najmniejszej fizyko-chemicznej niejednorodności spoiny i materiału rodzimego, aby w czasie eksploatacji wykluczyć procesy dyfuzyjne w złączy. Dyfuzyjna migracja węgla w strefie wtopienia prowadzi bowiem do obniżenia wytrzymałości na obciążenia długotrwałe i do obniżenia plastyczności połączenia. W celu uzyskania stabilnej struktury i usunięcia naprężeń spawalniczych większość tych stali wymaga obróbki cieplnej po spawaniu. Najczęściej jest to normalizowanie bądź tylko wyżarzenie odprężające w temperaturze powyżej A_{c1} .

Stale do pracy w podwyższonej temperaturze są stalami hartującymi się i w związku z tym charakteryzują się skłonnością do tworzenia pęknięć w SWC i w spoinie. Jedynym skutecznym środkiem zapobiegającym pękaniu jest podgrzewanie elementów przed spawaniem do temperatury w zakresie 150 – 450°C. Zależnie od gatunku stali, jeśli po spawaniu przeprowadzana jest obróbka cieplna, wskazane jest utrzymanie tej temperatury od zakończenia spawania aż do obróbki cieplnej [3].

Stale molibdenowe podgrzewa się przed spawaniem do ok. 200°C, utrzymując tą temperaturą przez cały czas spawania. Wykonane połączenia odpręża się przez wyżarzanie w 650 – 680°C, utrzymując tę temperaturę przez 5 min na 1 mm grubości ścianki. Po wyżarzeniu połączenie studzi się wolno, z szybkością wynoszącą 50-75°C/h, a od temperatury 300°C studzi się w wolnym powietrzu.

Stale chromowo-molibdenowe podgrzewa się przed spawaniem do temperatury 200-300°C i podczas spawania temperatura nie może spaść poniżej 200°C. Wykonane połączenia poddaje się normalizowaniu w temperaturze 920°C i wytrzymaniu w tej temperaturze przez 0,75 min na 1 mm grubości, następnie studzeniu w powietrzu i odpuszczaniu w temperaturze 650 – 680°C z wytrzymaniem przez 2,5 – 3 min na 1 mm grubości. Dalsze studzenie przeprowadza się w podobny sposób, jak przy stalach molibdenowych. Dla połączeń mniej odpowiedzialnych można zastosować obróbkę cieplną uproszczoną, polegającą na wyżarzeniu w temperaturze 760°C z wytrzymaniem przez 2 min na 1mm grubości spawanego materiału i zastosowanie studzenia, jak dla stali molibdenowych.

Stale przeznaczone do pracy w podwyższonych temperaturach spawa się łukowo ręcznie elektrodami otulonymi, łukowo elektrodą nietopliwą w osłonach gazowych, gazowo i łukiem krytym.

Tablica. Elektrody, druty i topniki do spawania stali stopowych dla przemysłu energetycznego [1].

Znak stali	Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną	Spawanie łukiem krytym		Spawanie metodą TIG
	elektroda	drut	topnik	drut
16M	ESMoB, ESMoR	SpG1M, SpG1M1	TAST-2	SpG1M, SpG1M1
20M	ESMoB, ESMoR	SpG1M, SpG1M1	TAST-2	SpG1M
15HM	ESCrMoR, ESCrMoB	SpG1H1M	TAST-2	SpG1H1M
10H2M	ES2CrMoB, ES2CrMoR	SpG1H2M	TAST-2	SpG1H2M
12HMF	ESCrMoVB, ESCrMoVR	SpG1H1MF	TAST-2	SpG1H1MF
13HMF	ESCrMoVB, ESCrMoVR	SpG1HMF	TAST-2	SpG1HMF
15HMF	ESVCrMoB	SpG1H1MF	TAST-2	SpG1H1MF
18CuNMT	ESCuNiIB, ESCuNiIIB	SpG1N1MCu1T	TAST-1	SpG1N1MCu1T

1.4.4. Stale stopowe konstrukcyjne do ulepszania cieplnego

Stale stopowe konstrukcyjne do ulepszania cieplnego stosowane są w budowie maszyn i urządzeń, którym stawia się wysokie wymagania eksploatacyjne. Ze względu na dużą zawartość węgla oraz dodatki stopowe (Cr, Mo, Ni, V) charakteryzują się one zdolnością do głębokiego hartowania przy niedużych szybkościach chłodzenia. Z tego też powodu w warunkach spawania następuje duże utwardzenie SWC. W tej grupie stali tylko stale o stosunkowo niskiej zawartości węgla (poniżej 0,35%) znajdują zastosowanie jako części spawane. Stale te są trudno spawalne i wykazują skłonność do pęknięcia w SWC. Z tego też powodu ich spawanie musi być wykonywane z uprzednim podgrzewaniem wstępnym. Zależnie od gatunku stali oraz grubości elementów, temperatura odgrzewania może

przekraczać 400°C. Temperatura wstępnego podgrzewania stali konstrukcyjnych do ulepszenia cieplnego powinna być równa lub wyższa od temperatury początku przemiany martenzytycznej Ms [2],[3].

Przy spawaniu stali do ulepszenia cieplnego należy przestrzegać, aby występowało minimalne nasycenie spoiny wodorem, dlatego stale te należy spawać łukowo ręcznie elektrodami otulonymi zasadowymi oraz łukowo elektrodą topliwą w osłonach gazowych (inne metody mają ograniczone zastosowanie) [2]. Zaleca się spawanie ścięciem kaskadowym, krótkimi odcinkami.

Po spawaniu złącza ze stali do ulepszenia cieplnego powinny być odpuszczane lub poddane znacznie bardziej złożonej obróbce cieplnej. Temperatura w okresie od zakończenia spawania do rozpoczęcia obróbki cieplnej po spawaniu nie powinna spaść poniżej 100°C.

Temperatury wstępnego podgrzewania niektórych gatunków stali do ulepszenia cieplnego, w zależności od grubości spawanych elementów, oraz uwagi dotyczące obróbki cieplnej i doboru elektrod, podano w tabelicy .

Tablica. Temperatury wstępnego podgrzewania przy spawaniu niektórych stali do ulepszenia cieplnego [1]

Znak stali	Temperatura wstępnego podgrzewania, °C			Odpuszczanie po spawaniu	Uwagi
	Grubość spawanych elementów, mm				
	5	13	20		
30G2	-	200	330	Zalecane dla połączeń silnie obciążonych	Spawać elektrodą połączeniową o otulinie zasadowej
45G2	100	250	350	Obowiązkowe	Spawać elektrodą połączeniową o otulinie zasadowej lub elektrodą austenityczną
35SG	80	200	330	Zalecane dla połączeń silnie obciążonych	Spawać elektrodą połączeniową o otulinie zasadowej
30H	-	100	200	Zalecane dla połączeń silnie obciążonych	Spawać elektrodą połączeniową o otulinie zasadowej
40H	150	300	380	Obowiązkowe	Spawać elektrodą połączeniową o otulinie zasadowej
25HM	100	250	350	Obowiązkowe	Spawać elektrodą połączeniową o otulinie zasadowej
35HM	150	330	510	Obowiązkowe	Spawać tylko w razie nieuniknionej konieczności elektrodą austenityczną

[1] Pilarczyk J., Pilarczyk J. „Spawanie i napawanie elektryczne metali”. „Śląsk” Spółka z o.o. – Katowice 1996.

[2] Ferenc K., Ferenc J. „Konstrukcje spawane – Projektowanie połączeń”. WNT Warszawa 2000.

[3] Ferenc K., Nita Z., Sobiś T. „Spawalnictwo”. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.

[4] Praca zbiorowa; Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo WNT Warszawa, 1983.

[5] Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali. WNT Warszawa 1975.