



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika Wroclawska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOLECZNY



TECHNIKI WYTWARZANIA SPAVALNICTWO

LABORATORIUM

Pod redakcją Andrzeja Ambroziaka

WROCLAW 2010

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

AUTORZY ROZDZIAŁÓW I ĆWICZEŃ

AMBROZIAK Andrzej	(3.1, 4, 6, 10)
BARTNIK Zbigniew	(5)
BIAŁUCKI Piotr	(1)
CIEŚLA Michał	(11)
DERLUKIEWICZ Wiesław	(4)
KORZENIOWSKI Marcin	(2, 11)
KUSTROŃ Paweł	(11)
LANGE Artur	(3.1, 10)
ŁATKA Leszek	(3.2)
MIRSKI Zbigniew	(7, 8)
MOSIŃSKA Sylwia	(3.1, 10)
PIWOWARCZYK Tomasz	(2, 8)
SOZAŃSKI Lesław	(11)
SZULC Tomasz	(9)
WINNICKI Marcin	(6)

Recenzent: Kazimierz GRANAT

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>
e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-592-0

Spis treści

Przedmowa.....	8
Bezpieczeństwo i higiena pracy w spawalnictwie	9
1. Spawanie gazowe.....	18
Cel ćwiczenia.....	18
1.1. Wprowadzenie.....	18
1.2. Gazy stosowane w procesie spawania gazowego.....	19
1.2.1. Wytwarzanie i właściwości acetylenu	19
1.2.2. Wytwarzanie i właściwości tlenu.....	20
1.3. Urządzenia do spawania gazowego	20
1.3.1. Butle do gazów technicznych	21
1.3.2. Butle acetylenowe.....	21
1.3.3. Butle tlenowe	22
1.3.4. Reduktory	22
1.3.5. Węże spawalnicze.....	23
1.3.6. Bezpieczniki	23
1.3.7. Palniki acetylenowo-tlenowe.....	23
1.4. Płomień acetylenowo-tlenowy	25
1.5. Metody i techniki spawania gazowego.....	27
1.5.1. Spawanie gazowe metodą w lewo	27
1.5.2. Spawanie gazowe metodą w prawo	28
1.5.3. Spawanie gazowe metodą w górę.....	29
1.6. Spawanie gazowe stali.....	30
1.6.1. Materiały dodatkowe do spawania stali – spoiwa.....	31
1.6.2. Spawanie gazowe innych metali.....	31
1.7. Przygotowanie części do spawania.....	31
1.7.1. Szczepianie lub mocowanie blach.....	32
1.8. Część praktyczna	32
Uwagi do sprawozdania.....	32
Literatura.....	33
Wykaz norm.....	33
2. Spawanie łukowe elektrodami otulonymi.....	34
Cel ćwiczenia.....	34
2.1. Wprowadzenie.....	34
2.2. Budowa i rodzaje elektrod.....	35
2.3. Parametry spawania.....	39
2.4. Stanowisko do spawania elektrodami otulonymi	42
2.5. Zastosowanie spawania elektrodami otulonymi	43
2.6. Zalety i wady spawania elektrodami otulonymi	43
2.7. Część praktyczna	44
Uwagi do sprawozdania.....	44
Literatura.....	45
Wykaz norm.....	45

3. Spawanie w osłonach gazowych.....	46
3.1. Spawanie łukowe elektrodą topliwą w gazach ochronnych	46
Cel ćwiczenia.....	46
3.1.1. Wprowadzenie	46
3.1.2. Parametry spawania metodą MIG/MAG	47
3.1.3. Gaz osłonowy	48
3.1.4. Drut elektrodowy	53
3.1.5. Prąd spawania	54
3.1.6. Napięcie łuku	55
3.1.7. Prędkość spawania.....	56
3.1.8. Pochylenie drutu elektrodowego	56
3.1.9. Zastosowanie metody MIG/MAG	57
3.1.10. Część praktyczna	57
Uwagi do sprawozdania.....	58
Literatura	58
Wykaz norm	58
3.2. Spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w gazach ochronnych	59
Cel ćwiczenia.....	59
3.2.1. Wprowadzenie	59
3.2.2. Źródła zasilania.....	60
3.2.3. Parametry spawania	65
3.2.4. Materiały dodatkowe	66
3.2.5. Technologia spawania.....	66
3.2.6. Spawanie prądem pulsującym	68
3.2.7. Część praktyczna	68
Uwagi do sprawozdania.....	69
Literatura	69
Wykaz norm	69
4. Spawanie łukiem krytym	70
Cel ćwiczenia.....	70
4.1. Wprowadzenie.....	70
4.2. Stanowisko do spawania łukiem krytym.....	72
4.3. Spawalnicze materiały dodatkowe	73
4.4. Wpływ parametrów spawania łukiem krytym na kształt spoiny	75
4.5. Technologia spawania łukiem krytym.....	77
4.6. Część praktyczna	79
Uwagi do sprawozdania.....	79
Literatura.....	79
Wykaz norm.....	79
5. Zgrzewanie elektryczne oporowe	80
Cel ćwiczenia.....	80
5.1. Wprowadzenie.....	80
5.2. Zgrzewanie punktowe.....	81

5.3.	Zgrzewanie liniowe	83
5.4.	Zgrzewanie doczołowe	85
5.5.	Zgrzewanie garbowe.....	88
5.6.	Ocena połączeń zgrzewanych.....	89
5.7.	Część praktyczna	90
	Uwagi do sprawozdania.....	91
	Literatura.....	91
	Wykaz norm.....	91
6.	Zgrzewanie tarciove.....	92
	Cel ćwiczenia.....	92
6.1.	Wprowadzenie.....	92
6.2.	Odmiany procesu.....	94
6.3.	Parametry procesu konwencjonalnego zgrzewania tarciovego	97
6.4.	Stanowisko do zgrzewania tarciovego.....	100
6.5.	Przykłady zastosowania.....	102
6.6.	Część praktyczna	104
	Uwagi do sprawozdania.....	104
	Literatura.....	104
	Wykaz norm.....	104
7.	Lutowanie	105
	Cel ćwiczenia.....	105
7.1.	Wprowadzenie.....	105
7.2.	Zjawiska fizykochemiczne występujące w procesach lutowania	106
7.3.	Budowa i rodzaje złączy lutowanych	109
7.4.	Topniki i ich rodzaje.....	110
7.5.	Rodzaje lutów	112
7.5.1.	Luty miękkie	112
7.5.2.	Luty twarde.....	113
7.6.	Postacie lutów.....	116
7.7.	Metody lutowania miękkiego i twardego	118
7.7.1.	Metody lutowania miękkiego	118
7.7.2.	Metody lutowania twardego	119
7.8.	Część praktyczna	123
	Uwagi do sprawozdania.....	123
	Literatura.....	124
	Wykaz norm.....	124
8.	Klejenie materiałów	125
	Cel ćwiczenia.....	125
8.1.	Wprowadzenie.....	125
8.2.	Zalety i wady techniki klejenia.....	126
8.3.	Zjawiska fizykochemiczne występujące w klejeniu materiałów	126
8.4.	Czynniki wpływające na powstanie połączeń klejowych.....	129
8.5.	Przygotowanie powierzchni elementów łączonych do klejenia	131

8.6.	Podział klejów	135
8.6.1.	Kleje reaktywne (utwardzające się chemicznie).....	136
8.6.2.	Kleje utwardzające się na drodze procesów fizycznych.....	140
8.7.	Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych	141
8.8.	Część praktyczna	142
	Uwagi do sprawozdania.....	142
	Literatura.....	143
	Wykaz norm.....	143
9.	Cięcie termiczne	144
	Cel ćwiczenia.....	144
9.1.	Wprowadzenie.....	144
9.2.	Odmiany cięcia termicznego	149
9.2.1.	Cięcie tlenem	150
9.2.2.	Cięcie tlenowo-proszkowe.....	152
9.2.3.	Cięcie łańcą.....	152
9.2.4.	Cięcie łukowe	153
9.2.5.	Cięcie elementów grubościennych	155
9.2.6.	Cięcie o podwyższonej wydajności	156
9.2.7.	Cięcie plazmowe.....	157
9.2.8.	Cięcie laserowe.....	160
9.2.9.	Drażenie wiązką elektronów.....	164
9.3.	Zastosowania cięcia termicznego	165
9.4.	Część praktyczna	166
	Uwagi do sprawozdania.....	167
	Literatura.....	168
	Wykaz norm.....	168
10.	Naprężenia i odkształcenia spawalnicze.....	169
	Cel ćwiczenia.....	169
10.1.	Wprowadzenie.....	169
10.2.	Istota powstawania naprężeń spawalniczych.....	171
10.2.1.	Wpływ temperatury na zmiany niektórych własności fizycznych stali.....	171
10.2.2.	Powstawanie naprężeń w wyniku oddziaływania termicznego	172
10.3.	Odkształcenia spawalnicze	175
10.3.1.	Klasyfikacja odkształceń spawalniczych.....	176
10.3.2.	Odkształcenia poprzeczne.....	178
10.3.3.	Odkształcenia wzdłużne	179
10.3.4.	Odkształcenia kątowe	180
10.3.5.	Czynniki wpływające na wartość naprężeń i odkształceń spawalniczych.....	181
10.3.6.	Możliwości zapobiegania zniekształceniom konstrukcji spawanych.....	182
10.3.7.	Sposoby usuwania naprężeń spawalniczych.....	186

10.4. Część praktyczna	189
Uwagi do sprawozdania.....	189
Literatura.....	189
11.Badania nieniszczące złączy spajanych.....	190
Cel ćwiczenia.....	190
11.1. Wprowadzenie.....	190
11.2. Badania wizualne.....	193
11.3. Badania penetracyjne.....	195
11.4. Badania magnetyczno – proszkowe	196
11.5. Metoda prądów wirowych.....	197
11.6. Badania ultradźwiękowe.....	198
11.7. Badania radiologiczne	200
11.8. Techniki radiograficzne w zależności od rodzaju złącza.....	201
11.9. Część praktyczna	203
Uwagi do sprawozdania.....	203
Literatura.....	203
Wykaz norm.....	203

PRZEDMOWA

Skrypt do ćwiczeń laboratoryjnych realizowanych w ramach kursu Technik Wytwarzania – Spawalnictwo jest przeznaczony dla studentów pierwszego stopnia kształcenia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Może być także wykorzystywany przez studentów innych kierunków na pierwszym stopniu kształcenia, takich jak Automatyka i Robotyka, Transport, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Mechatronika.

Skrypt stanowi uzupełnienie treści wykładów z Technik Wytwarzania – Obróbka Bezubytkowa w części dotyczącej spajania i cięcia materiałów.

Skrypt do ćwiczeń laboratoryjnych obejmuje 11 tematów przedstawiających podstawowe metody spawania (spawanie: gazowe, elektrodami otulonymi, w osłonie gazów elektrodą topliwą i nietopliwą, łukiem krytym), lutowania, klejenia, zgrzewania (oporowego i tarcowego), cięcia termicznego, określenia naprężeń i odkształceń spawalniczych oraz badań nieniszczących. Całość opisu ćwiczeń poprzedzono rozdziałem pierwszym Bezpieczeństwo i Higiena Pracy w Spawalnictwie, zawierającym także podstawowe zalecenia i przepisy BHP obowiązujące uczestników laboratorium.

Każde ćwiczenie laboratoryjne, poprzedzone określeniem jego celu, składa się z obszernej części teoretycznej, stanowiącej wprowadzenie do części praktycznej, realizowanej podczas ćwiczenia laboratoryjnego, oraz uwag do opracowania sprawozdania.

Andrzej Ambroziak

BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY W SPAWALNICTWIE

WPROWADZENIE

Procesom spawania i cięcia termicznego towarzyszy wiele czynników, które mogą stanowić niebezpieczeństwo zagrażające obsłudze stanowisk spawalniczych oraz ich otoczeniu.

Do podstawowych zagrożeń należą:

- porażenie prądem elektrycznym,
- porażenie wzroku i skóry szkodliwym promieniowaniem,
- zatrucie szkodliwymi gazami, dymami i pyłami,
- poparzenie rozpryskami metali i żużli,
- eksplozja wybuchowych mieszanek gazowych,
- zagrożenie pożarowe,
- nadmierny hałas,
- radioaktywność i pole magnetyczne.

Rodzaj zagrożenia i stopień szkodliwości zależy od rodzaju procesu spawalniczego, rodzaju spawanego materiału, wielkości produkcji i organizacji pracy.

Braki i niedociągnięcia w zakresie zapewnienia bezpiecznych warunków pracy prowadzą często do wystąpienia wypadków oraz są przyczyną chorób zawodowych. Wśród głównych przyczyn wypadków przy pracach spawalniczych wymienia się brak doświadczenia zawodowego personelu spawalniczego (20%), niepełnosprawność pracowników (10%) i nieprzestrzeganie przepisów (70%). Zatem duże znaczenie w przeciwdziałaniu występującym zagrożeniom i powstawaniu wypadków w pracy ma zatrudnianie pracowników z wymaganymi uprawnieniami spawalniczymi oraz odpowiednie szkolenie załóg.

Odpowiedzialność za bezpieczne warunki pracy i ochronę środowiska spoczywa zarówno na pracodawcy jak i na pracownikach. Na pracodawcy ciąży obowiązek szkolenia w zakresie BHP, dopuszczanie pracowników do pracy zgodnie z ich kwalifikacjami i zapewnienie bezpiecznych warunków pracy. Pracownicy są zobowiązani do ścisłego przestrzegania obowiązujących instrukcji obsługi urządzeń, instrukcji bezpieczeństwa na stanowisku pracy oraz innych uregulowań organizacyjnych związanych ze stanowiskiem pracy.

ZAGROŻENIA PORAZENIEM PRĄDEM ELEKTRYCZNYM

Źródła zagrożeń porażenia prądem elektrycznym związane są zarówno z bezpośrednim przebiegiem procesu spawania, jak również z obsługą elektrycznych urządzeń pomocniczych wykorzystywanych w procesie spawania. Skutki oddziaływania prądu na organizm ludzki są bardzo groźne dla zdrowia, a często są zagrożeniem dla życia. Jego przepływ przez ciało ludzkie powoduje wydzielanie się dużych ilości ciepła, działa porażająco na układ nerwowy, wywołuje zjawisko

elektrolizy, a także może być przyczyną ciężkich, wtórnych urazów mechanicznych w wyniku upadku.

Wzrost temperatury ciała powyżej 50 °C, spowodowany przepływem prądu, powoduje zamieranie tkanek wskutek ścinania się białka. Natomiast prąd o dużym natężeniu może spowodować nawet zwęglenie części ciała, przez które przepływa.

Paraliż układu nerwowego, spowodowany przepływem prądu, objawia się zaburzeniami zmysłów wzroku, słuchu, równowagi, zakłóceniami pracy serca, a nawet zatrzymaniem oddechu. Szczególnie groźne dla porażonego są zakłócenia w pracy serca w postaci tzw. migotania komór serca, ponieważ w warunkach głębokiego omdlenia nie wykazuje on oznak życia i bez natychmiastowej pomocy medycznej dochodzi do śmierci.

Najsilniej na układ nerwowy oddziałuje prąd przemienny o częstotliwości 40-60 Hz, prąd stały jest pod tym względem mniej groźny. Prąd przemienny o natężeniu 0,01-0,025 A powoduje ból i skurcz mięśni ręki trzymającej przewód elektryczny uniemożliwiając jej oderwanie. Prąd przemienny większy od 0,05 A prowadzi do utraty przytomności, a powyżej 0,1 A grozi śmiercią.

Szczególnie groźne są wypadki związane z kontaktem spawacza z obwodem pierwotnym urządzeń spawalniczych, z powodu występującego tam wysokiego napięcia, co skutkuje często porażeniem śmiertelnym. Niebezpieczny też może być obwód wtórny tych urządzeń, a to z uwagi na napięcie biegu jałowego, które zależnie od urządzenia wynosi 62-100 V.

Wartość prądu elektrycznego płynącego przez organizm ludzki zależy od napięcia źródła prądu oraz oporu kontaktowego ciała. Im większy jest ten opór tym mniejszy płynie prąd. Sucha skóra i sucha odzież ma większą oporność elektryczną od wilgotnych. Natomiast wilgotne środowisko spawania, mokre i zabrudzone pyłem ubranie, wilgotna podłoga zmniejszają ogólny opór elektryczny i zwiększają przez to niebezpieczeństwo śmiertelnego porażenia prądem.

Przy użytkowaniu elektrycznych urządzeń spawalniczych i osprzętu należy w szczególności przestrzegać następujących wymagań bezpieczeństwa:

- nie dotykać gołymi rękami urządzeń pracujących pod napięciem,
- dbać o stan izolacji przewodów zasilających, ponieważ uszkodzona izolacja może być przyczyną przebicia i porażenia prądem,
- unikać pracy z urządzeniami elektrycznymi w wilgotnych pomieszczeniach lub w wilgotnym ubraniu, a w razie potrzeby nosić suchą odzież ochronną, gumowe rękawice oraz stawać na izolacyjnych matach,
- nie dotykać elektrody, jeżeli występuje kontakt z przedmiotem spawanym lub ziemią, lub innej elektrody od innego urządzenia,
- nigdy nie należy pracować pojedynczo, zawsze wymagana jest obecność drugiej osoby,
- należy wyłączyć wszystkie urządzenia, które nie są używane,
- nie przekładać spawalniczych przez swoje ciało,
- przy pracy wewnątrz zbiorników, kotłów i innych metalowych pomieszczeń, stosować oświetlenie elektryczne o napięciu 24 V,

- używać tylko urządzeń sprawnych technicznie, stosować się do instrukcji obsługi urządzenia,
- instalację, naprawy i przeglądy elektrycznych urządzeń spawalniczych powinni wykonywać pracownicy mający odpowiednie uprawnienia.

ZAGROŻENIA PROMIENIOWANIEM ŹRÓDEŁ CIEPŁA SPAWANIA

Procesom spawania łukiem elektrycznym oraz płomieniem gazowym a także cięcia termicznego towarzyszy promieniowanie świetlne widzialne i niewidzialne, którego intensywność zależy od metody spawania oraz parametrów procesu. Na jego szkodliwe skutki narażone są oczy i skóra odsłoniętych części ciała spawacza.

Promieniowanie widzialne działa oślepiająco, nie pozwalając na obserwację miejsca spawania. Widzialne promieniowanie niebieskie powoduje krótkotrwałe oślnienie wzroku, natomiast długotrwałe jego oddziaływanie powoduje podrażnienie oczu, trwałe osłabienie wzroku i bóle głowy.

Niewidzialne promieniowanie podczerwone, przenika w głąb oka i powoduje przegrzanie gałki ocznej. Długotrwałe oddziaływanie powoduje uszkodzenie siatkówki. Skóra odsłoniętych części ciała pochłania 95% promieniowania podczerwonego, powodując silny wzrost temperatury na jej powierzchni.

Niewidzialne promieniowanie nadfioletowe jest silnie pochłaniane przez soczewkę, powoduje zapalenie spojówek, rogówki i powiek. Działając fotochemicznie na soczewkę powoduje powstawanie zaćmy, a długotrwałe narażenie prowadzi do utraty wzroku. Skutki działania promieniowania nadfioletowego na oczy odczuwa się już po kilku godzinach jako przykry ból oka, światłowstręt i łzawienie. Groźne w skutkach może być oddziaływanie promieniowania nadfioletowego na odsłonięte części ciała. Powoduje ono oparzenia podobne do oparzeń słonecznych, a wielokrotna ekspozycja skóry na intensywne promieniowanie ultrafioletowe wywołuje zwłóknienie skóry i zanik naskórka. Długotrwałe działanie tego promieniowania na skórę prowadzi do wystąpienia zmian nowotworowych.

Skuteczną ochronę przed szkodliwym działaniem promieniowania mogą zapewnić indywidualne środki ochrony spawacza takie jak okulary ochronne do spawania gazowego, przyłbice spawalnicze do spawania łukowego, rękawice spawalnicze oraz odzież ochronna. Stanowisko spawania powinno być oddzielone od innych stanowisk pracy za pomocą parawanów.

ZAGROŻENIA GAZAMI, DYMAMI I PYŁAMI SPAVALNICZYMI

Podczas spawania oraz cięcia termicznego wydzielają się duże ilości gazów, dymów, pyłów oraz par metali, które mają szkodliwy wpływ na zdrowie spawacza i osób przebywających w pobliżu stanowiska spawalniczego. Źródłami emisji gazów jest termiczny rozkład i sublimacja związków chemicznych wchodzących w skład

otulin elektrod otulonych, topników do spawania łukiem krytym, topników do lutowania, rozpad i jonizacja gazów spawalniczych. Podczas topienia metali w łuku spawalniczym zachodzi także parowanie metali i utlenianie par metali. W niższej temperaturze lotne substancje kondensują tworząc cząstki o wielkości 0,1-0,5 μm .

Ilość oraz skład chemiczny powstających gazów, dymów, pyłów oraz par metali zależy od metody spawania, rodzaju spawanego materiału podstawowego i materiałów dodatkowych oraz parametrów spawania.

Gazy, które powstają przy spawaniu, cięciu, lutowaniu itp. i stwarzają zagrożenie dla zdrowia spawacza to najczęściej ozon, tlenki azotu, tlenek węgla, fosgen, fluorowodór, a także produkty rozkładu związków chlorowych.

Szczególną toksycznością odznaczają się dymy spawalnicze, które są aerozolem mieszaniną bardzo drobnych cząstek pyłu i gazów. Również pary metali i ich tlenki stwarzają duże zagrożenie dla zdrowia. Do najczęściej spotykanych, szczególnie niebezpiecznych, zalicza się związki cynku, ołowiu, kadmu, aluminium i miedzi.

Celem ochrony pracowników przed skutkami narażenia na działanie niebezpiecznych dla zdrowia substancji należy przestrzegać przepisów określających wartości dopuszczalnych stężeń poszczególnych związków w powietrzu na stanowisku pracy. Skutecznym sposobem ochrony w tym przypadku jest sprawnie działający system wentylacji ogólnej i lokalnej na stanowisku spawalniczym. Szczególnym nadzorem należy objąć spawaczy pracujących w ciasnych pomieszczeniach (zbiornikach), gdzie oprócz wentylacji może być konieczny również nawiew świeżego powietrza.

ZAGROŻENIA POPARZENIEM ROZPRYSKAMI METALI I ŻUŹLI

Stosowane w procesach spawania źródła ciepła o wysokiej temperaturze znajdują się w bezpośredniej bliskości spawacza. Z tego względu istnieje bezpośrednie niebezpieczeństwo poparzenia ciepłem łuku, ciepłem płomienia gazowego oraz odpryskami metalu i żużla.

Źródłem zagrożenia poparzeniem w procesach spawania może być rozgrzana elektroda, gorąca spoina, proces wstępnego podgrzewania przedmiotów jak również zabiegi obróbki cieplnej złączy po spawaniu. Podczas spawania części metalowe nagrzewają się wskutek przewodnictwa ciepła nawet na znacznej odległości od miejsca pracy spawacza i mogą stać się źródłem zagrożenia poparzeniem.

Niestabilność procesów spawania jest przyczyną występujących gorących rozprysków metalu i żużli, które mogą powodować poparzenie spawacza, a także mogą wywołać zapalenie się materiałów łatwopalnych podczas prowadzenia prac spawalniczych. Do ochrony przed oparzeniami należy nosić nieuszkodzoną ochronną odzież spawalniczą i rękawice spawalnicze, a w szczególnych przypadkach także skórzany fartuch.

ZAGROŻENIE EKSPLOZJĄ MIESZANEK WYBUCHOWYCH

Niebezpieczeństwo wybuchu mieszanek gazowych występuje w pracach spawalniczych, w których stosuje się butle z gazami palnymi lub butle z tlenem. Gazy palne tworzą z powietrzem lub tlenem mieszaniny wybuchowe w bardzo szerokim zakresie stężeń. Do zainicjowania wybuchu takiej mieszanki wystarczy niewielka iskra. Spalaniu wybuchowemu mieszanki towarzyszy niszcząca fala detonacyjna i wysoka temperatura, będąca przyczyną pożarów. Do powstania mieszanek wybuchowych przy pracach spawalniczych przyczyniają się następujące czynniki:

- niewłaściwa obsługa butli, np. rzucanie, przewracanie mogące uszkodzić zawór butli,
- nieszczelność zaworów butlowych lub reduktorów,
- nieszczelność instalacji gazowej,
- magazynowanie wspólne gazów palnych z tlenem, chlorem itp.

Wybuchowi mogą ulec również butle z gazami sprężonymi. Dlatego należy z butlami obchodzić się bardzo ostrożnie, unikać wstrząsów, chronić przed uderzeniami itp. Należy je również chronić przed nagraniem, tzn. nie wystawiać na działanie promieni słonecznych, nie stawiać w pobliżu pieców lub ognisk, aby w ten sposób nie wywołać nadmiernego ciśnienia, mogącego spowodować rozerwanie butli. Bardzo niebezpieczne jest zanieczyszczenie butli oraz instalacji sprężonego tlenu smarami, olejami czy innymi tłuszczami.

Zagrożenie wybuchem występuje również podczas prac spawalniczych przy zbiornikach, rurociągach i innych obiektach przeznaczonych do przechowywania i transportu materiałów palnych. Wówczas prace mogą być prowadzone pod szczególnym nadzorem.

ZAGROŻENIE HAŁASEM

Hałas należy do najczęściej występujących w środowisku pracy czynników oddziałujących szkodliwie na organizm ludzki, a procesy spawalnicze są jego najpoważniejszymi źródłami. Szczególnie niebezpieczne okazują się procesy cięcia termicznego oraz natryskiwanie cieplne, podczas których poziom hałasu przekracza obowiązujące normy bezpieczeństwa, w wysokości 85 dB, a często osiąga wartość 110 dB zbliżając się do progu odczuwalnego bólu.

Poziom hałasu zależy od metody cięcia i spawania oraz od stosowanych parametrów procesu takich jak parametry prądowe, rodzaj stosowanych gazów itp. Źródłami hałasu w procesach cięcia i spawania są:

- urządzenia elektryczne do spawania i cięcia,
- wypływ strumienia gazów z dyszy palnika gazowego lub plazmowego,
- układy chłodzenia urządzeń spawalniczych,
- urządzenia wentylacyjne na stanowiskach pracy.

Praca w hałasie, oddziałującym na narządy słuchu może powodować upośledzenie sprawności narządów słuchu i uszkodzenie ucha środkowego. Ryzyko uszkodzenia narządów słuchu istotnie zwiększa się wraz ze wzrostem poziomu natężenia hałasu

i długości czasu ekspozycji na hałas oraz ze wzrostem udziału dźwięków o wysokiej częstotliwości i dźwięków impulsowych. Z tego względu w warunkach zagrożenia hałasem, należy zaopatrzyć się w osłonę uszu, stosując miękkie zatyczki i nauszniki.

ZAGROŻENIA POŻAROWE

Największe zagrożenie pożarowe występuje w pracach spawalniczych nieodpowiednio przygotowanych do wykonywania takich prac. Wysoka temperatura łuku spawalniczego, płomienia gazowego, a także powstające podczas spawania, zgrzewania i cięcia rozpryski mogą stać się przyczyną zapalenia się materiałów łatwopalnych, znajdujących się w pobliżu miejsca spawania. Szczególnie niebezpiecznie, ponieważ często lekceważone, są rozpryskujące się rozżarzone cząstki metalu, które rozprzestrzeniają się niekiedy na kilka metrów od miejsca spawania czy cięcia.

Do głównych przyczyn, sprzyjających powstawaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów w pracach spawalniczych, należą:

- snop rozżarzonych cząstek metalu (iskier),
- krople ciekłego metalu,
- żarzące się cząstki żużla,
- wysoka temperatura łuku elektrycznego i płomienia gazowego,
- promieniowanie cieplne,
- niesprawna instalacja i urządzenia spawalnicze,
- wykonywanie prac spawalniczych w pobliżu obiektów będących niebezpiecznymi pod względem pożarowym i nieodpowiednio zabezpieczonymi,
- nieznajomość lub lekceważenie przepisów przeciwpożarowych,
- brak odpowiedniego nadzoru nad przebiegiem prac spawalniczych.

Bardzo ważnym działaniem zapobiegającym pożarom, jest kontrola miejsc i obiektów po zakończeniu prac spawalniczych.

ZAGROŻENIA RADIOAKTYWNOŚCIĄ I POLEM ELEKTROMAGNETYCZNYM

Promienie X oraz gamma mogą u człowieka, który otrzymał niebezpieczną dawkę promieniowania, spowodować wiele groźnych chorób, takich jak rozpad czerwonych ciałek krwi, uszkodzenie gruczołów i wiele innych.

Potencjalne źródło zagrożenia radioaktywnego występuje przy spawaniu metodą TIG (z ang. Tungsten Inert Gas) z użyciem elektrod wolframowych zawierających ok. 2% tlenku toru, przy spawaniu wiązką elektronów oraz podczas kontroli radiologicznej złączy spawanych.

Tlenek toru ThO_2 jest związkiem słabo promieniotwórczym i podczas spawania występuje w niewielkich stężeniach w dymach spawalniczych. Zagrożenie nim istnieje w przypadku całkowitego braku wentylacji stanowiska spawalniczego.

Większe zagrożenie radioaktywnością występuje w spawaniu wiązką elektronów. Szczególnie niebezpiecznym źródłem promieniowania X są urządzenia do spawania WE pracujące pod napięciem większym niż 60 kV.

Największe zagrożeniem promieniowaniem jonizującym występuje podczas badania złączy spawanych metodami radiologicznymi, które wykorzystują promieniowanie rentgenowskie X oraz promieniowanie γ izotopów promieniotwórczych.

Z uwagi na duże zagrożenie radioaktywnością personel obsługujący urządzenia do spawania wiązką elektronów oraz wykonujący badania radiologiczne, musi mieć indywidualne wskaźniki napromieniowania.

W procesach spawalniczych występuje również zagrożenia polem elektromagnetycznym, którego źródłami mogą być:

- urządzenia indukcyjne do nagrzewania i topienia metali,
- zgrzewarki elektryczne odporowe,
- urządzenia i wyposażenie do spawania elektrycznego, w tym:
 - a) spawalnicze źródła prądu,
 - b) przewody spawalnicze,
 - c) łuk elektryczny.

Negatywny wpływ długotrwałego działania promieniowania elektromagnetycznego na organizm na ludzki przejawia się zwiększoną zachorowalnością na choroby układu nerwowego, a ponadto:

- bólami głowy,
- nerwową drażliwością,
- zaburzeniami czynności serca i mózgu,
- zaburzeniami rytmów biologicznych,
- uczuciem mrowienia skóry.

Ciało ludzkie wystawione na promieniowanie elektromagnetyczne adsorbuje część energii pola i zamienia ją na ciepło, co w konsekwencji prowadzi do niebezpiecznego wzrostu jego temperatury.

PRZEPISY DOTYCZĄCE BEZPIECZEŃSTWA I HIGIENY PRACY W PRACACH SPAWALNICZYCH.

Obowiązujące przepisy w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy w pracach spawalniczych, wydane w rozporządzeniu ministra gospodarki z dnia 27 kwietnia 2000 r. zawarte są w Dz. U. Nr 40 poz. 470. Zarządzenia oparte na podstawie Kodeksu pracy, art. 237 §2, dotyczą uregulowania zasad bezpieczeństwa i odnoszą się między innymi do:

- spawalni i stanowisk spawalniczych,
- wyposażenia i materiałów technologicznych,
- kwalifikacji personelu spawalniczego,
- wykonywania prac spawalniczych.

W ujęciu Ustawy spawalnia i stanowiska spawalnicze są rozumiane następująco:

- Stanowisko spawalnicze – jest to stanowisko pracy, na którym

są wykonywane prace przy zastosowaniu procesów spajania, takich jak spawanie, napawanie, lutowanie, zgrzewanie i cięcia termicznego metali i tworzyw termoplastycznych.

- Stałe stanowisko spawalnicze – jest to stanowisko pracy przeznaczone do powtarzalnego wykonywania prac spawalniczych, którego wyposażenie techniczne i instalacje zasilające są na stałe zainstalowane.
- Ruchome stanowisko spawalnicze – jest to stanowisko pracy przeznaczone do okresowego wykonywania prac spawalniczych, którego wyposażenie techniczne i instalacje zasilające są kompletowane doraźnie na czas wykonywania określonej pracy.
- Spawalnia – jest to pomieszczenie przystosowane lub wydzielona część pomieszczenia, w którym są zlokalizowane stałe stanowiska spawalnicze.

ZALECENIA I PRZEPISY BHP OBOWIĄZUJĄCE UCZESTNIKÓW LABORATORIUM

1. Do ćwiczeń laboratoryjnych studenci powinni przystąpić ubrani w fartuch ochronny oraz inne środki ochrony osobistej przewidziane do użycia na danym stanowisku spawalniczym, takie jak okulary, przyłbice, rękawice itp.
2. Zabrania się samowolnego uruchamiania urządzeń znajdujących się na spawalni. Studenci mogą uruchamiać i obsługiwać urządzenia laboratoryjne jedynie za zgodą i pod nadzorem prowadzącego ćwiczenie.
3. W szczególności, ze względu na bezpieczeństwo uczestników laboratorium, zabrania się studentom:
 - obserwacji procesów spawania bez środków ochrony wzroku,
 - dotykania rozgrzanych przedmiotów bezpośrednio po spawaniu lub cięciu,
 - dotykania przewodów będących pod napięciem,
 - kierowania płomienia lub innych źródeł ciepła na butle ze sprężonymi gazami lub inne urządzenia lub osoby,
 - opierania się o urządzenia, przewody i inne elementy stanowisk laboratoryjnych,
 - samowolnej naprawy urządzeń spawalniczych i dokonywania zmian w ich konstrukcji,
 - używania urządzeń spawalniczych do innych celów niż to przewidziano w ćwiczeniu,
 - bezmyślnego manipulowania przyciskami i pokrętłami aparatury badawczej i innych urządzeń pomiarowych,
 - zdejmowania osłon, demontażu urządzeń oraz usuwania innych elementów wyposażenia laboratorium mających wpływ na bezpieczeństwo osób przebywających na spawalni,
 - samowolnego opuszczania stanowiska laboratoryjnego w trakcie odbywania ćwiczeń,
 - samowolnego przechodzenia do innych stanowisk laboratoryjnych, lub innych grup ćwiczeniowych, a także załatwianie podczas ćwiczeń spraw nie związanych z tematem zajęć laboratoryjnych,

- wykonywania jakichkolwiek innych czynności mających wpływ na zagrożenie bezpieczeństwa w stosunku do własnej osoby, jak i narażenie na niebezpieczeństwo innych osób przebywających w laboratorium,
4. W zajęciach laboratoryjnych studenci powinni uczestniczyć w skupieniu, zachowując na stanowisku ciszę i spokój, aby nie przeszkadzać innym.
 5. Upewnić się, czy rozpoczęcie pracy nie spowoduje zagrożeń dla osób przebywających w bezpośrednim otoczeniu stanowiska laboratoryjnego.
 6. Ponadto, uczestnicy ćwiczeń laboratoryjnych zobowiązani są do przestrzegania dodatkowych zaleceń podawanych przez prowadzącego.

LITERATURA

- [1] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 27 kwietnia 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach spawalniczych. Dz. U. nr 40 poz. 470.
- [2] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA PRZEMYSŁU I HANDLU z dnia 31 sierpnia 1993 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy w zakładach produkcji, przesyłania i rozprowadzania gazu (paliw gazowych) oraz prowadzących roboty budowlano-montażowe sieci gazowych. Dz. U. nr 83 poz. 392 z późniejszymi zmianami.

WYKAZ NORM

- PN-EN 175:1999 Ochrona indywidualna -- Środki ochrony oczu i twarzy stosowane podczas spawania i w procesach pokrewnych.
- PN-EN 169:2005 Ochrona indywidualna oczu -- Filtry spawalnicze i filtry dla technik pokrewnych -- Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecane stosowanie.
- PN-EN 379+A1:2010 Ochrona indywidualna oczu -- Automatyczne filtry spawalnicze.
- PN-EN 61140:2005 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym -- Wspólne aspekty instalacji i urządzeń.
- PN-ISO 2919:2007 Ochrona radiologiczna -- Zamknięte źródła promieniotwórcze -- Wymagania ogólne i klasyfikacja.
- PN-N-01256-03:1993/Az1:1997 Znaki bezpieczeństwa -- Ochrona i higiena pracy.
- PN-IEC 60050-195:2001 Międzynarodowy słownik terminologiczny elektryki – Uziemienia i ochrona przeciwporażeniowa.
- PN-EN ISO 11611:2009 Odzież ochronna do stosowania podczas spawania i w procesach pokrewnych.
- PN-EN ISO 15011-1:2010 Zdrowie i bezpieczeństwo przy spawaniu i procesach pokrewnych -- Metoda laboratoryjna pobierania próbek dymu i gazów -- Część 1: Określanie wielkości emisji dymu podczas spawania łukowego i pobieranie dymu do analizy.
- PN-EN 1598:2004 Zdrowie i bezpieczeństwo przy spawaniu i procesach pokrewnych -- Przezroczyste zasłony spawalnicze, taśmy i ekrany do procesów spawania łukowego.
- PN-EN 50444:2010 Norma podstawowa dotycząca oceny ekspozycji człowieka w polach elektromagnetycznych pochodzących od sprzętu do spawania łukowego i procesów pokrewnych.

1. SPAWANIE GAZOWE

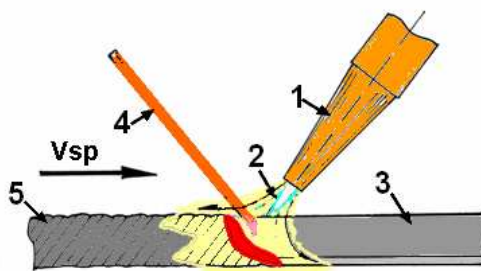
CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z:

- stanowiskiem do spawania gazowego,
- rodzajem i rozmieszczeniem stref w płomieniu acetylenowo-tlenowym,
- budową reduktora i palników gazowych,
- technologią spawania gazowego.

1.1. WPROWADZENIE

Spawanie gazowe polega na łączeniu części przez stapanie krawędzi materiałów ciepłem płomienia gazowego. Proces ten wykonuje się z dodawaniem drutu jako spoiwa, który stapia się w płomieniu jednocześnie z krawędziami łączonego metalu (rys. 1.1). Tylko cienkie blachy można spawać bez dodatku spoiwa, stapiając odpowiednio wywinięte krawędzie blach.



Rys. 1.1. Zasada spawania gazowego. 1- palnik spawalniczy, 2 – płomień gazowy, 3 - krawędź spawanego materiału, 4 – spoiwo, 5 – spoina

Płomień gazowy uzyskuje się w wyniku spalania mieszanki gazu palnego i tlenu w palniku spawalniczym. Podstawowym gazem palnym, stosowanym w spawaniu gazowym metali, jest acetylen. Najważniejsze cechy płomienia acetylenowo-tlenowego, które wyróżniają go spośród innych płomieni gazowych to przede wszystkim:

- wysoka temperatura płomienia, sięgająca 3100 °C,
- duża szybkość spalania,
- korzystny rozkład temperatury w płomieniu,
- dwustopniowy charakter spalania, dający możliwość regulowania charakteru płomienia od nawęglającego przez neutralny do utleniającego,
- redukujący charakter oddziaływania powstających produktów spalania,
- łatwa regulacja i wizualna kontrola jakości płomienia,
- najmniejsze zużycie jednostkowe tlenu.

Wysoka temperatura płomienia pozwala na szybkie stapanie krawędzi metali, i przez to prowadzenie spawania z dużą prędkością, a redukujący charakter płomienia skutecznie chroni ciekły metal przed szkodliwym wpływem powietrza z otoczenia.

Inne gazy palne, takie jak metan (CH_4), propan (C_3H_8), butan (C_4H_{10}), wodór (H_2), gaz ziemny, dają w mieszaninie z tlenem płomień o niższej temperaturze, a charakter ich chemicznego oddziaływania na ciekły metal jeziora spawalniczego jest przeważnie utleniający. Płomienie tych gazów rzadko są stosowane do spawania, natomiast z powodzeniem są w innych procesach takich jak lutowanie, podgrzewanie, cięcie i inne. Ponadto gazy te wymagają większych ilości tlenu do spalania niż acetylen.

Proces spawania gazowego jest trudny do zmechanizowania i dlatego jest on wykonywany wyłącznie metodą ręczną.

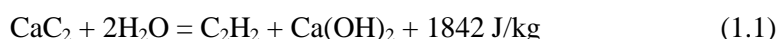
Spawanie gazowe należy do najstarszych metod spawania. Jego dynamiczny rozwój na początku XX wieku poprzedziły osiągnięcia, takie jak uruchomienie przemysłowej wytwórni acetyleny w 1892 r. w Kanadzie, skroplenie tlenu w 1902 r. przez Carla von Linde oraz opracowanie palnika do spawania, jako bezpiecznego urządzenia do spalania mieszaniny tych gazów, przez francuza Charles Picarda w 1901 r. Chociaż obecnie metoda ta nie ma istotnego znaczenia dla wytwarzania konstrukcji spawanych, to ze względu na dużą uniwersalność zastosowania płomienia gazowego i prostotę urządzeń należy wciąż do powszechnie wykorzystywanej.

Do materiałów niezbędnych w procesie spawania gazowego należą gazy techniczne, spoiwa i topniki.

1.2. GAZY STOSOWANE W PROCESIE SPAWANIA GAZOWEGO

1.2.1. WYTWARZANIE I WŁAŚCIWOŚCI ACETYLENU

Acetylen (C_2H_2) jest gazem palnym, wytwarzanym w urządzeniach zwanych wytwornicami acetylenowymi, podczas reakcji karbidu (węglika wapnia CaC_2) i wody wg reakcji:



Podczas reakcji powstaje acetylen i wapno (wodorotlenek wapnia), które jest wykorzystywane w rolnictwie i budownictwie jako wapno pokarbidowe. Reakcja karbidu z wodą jest egzotermiczna, a powstające ciepło reakcji musi być odebrane przez wodę chłodzącą.

Acetylen jest lżejszy od powietrza. Jego ciężar właściwy w warunkach normalnych wynosi $1,17 \text{ kg/m}^3$. Jest gazem bezbarwnym, nietoksycznym, lecz działającym usypiająco. Zanieczyszczenia amoniakiem (NH_3), fosforowodorem (PH_3) oraz siarkowodorem (H_2S), nadają mu lekki eteryczny zapach. Gaz ten jest bardzo nietrwałym węglowodorem, ulegającym łatwo wybuchowemu rozkładowi powyżej ciśnienia $0,18 \text{ MPa}$. Z tego względu sprężanie gazowego acetyleny powyżej $0,15 \text{ MPa}$ jest niebezpieczne i zabronione odpowiednimi przepisami.

Acetylen tworzy z powietrzem oraz tlenem mieszanki wybuchowe w bardzo szerokich granicach ($2,3\text{-}82\%$ z powietrzem i $2,3\text{-}93\%$ z tlenem). Największą siłę

wybuchu ma mieszanina zawierająca 15% acetyleny, dlatego spawanie gazowe powinno odbywać się w warunkach dobrej wentylacji. Acetylen wykazuje także duże powinowactwo chemiczne do miedzi, srebra i rtęci, tworząc z nimi wybuchowe związki zwane acetylenkami. Z tego względu materiały na instalacje i osprzęt do acetyleny nie mogą zawierać więcej niż 65% miedzi oraz 25% srebra. Acetylen rozpuszcza się bardzo dobrze w niektórych cieczach, np. w wodzie i acetonie (C_3H_6O), i w stanie rozpuszczonym nie ulega wybuchowemu rozkładowi. Dobrą rozpuszczalność acetyleny C_2H_2 w acetonie (w warunkach normalnych w 1 litrze acetonu rozpuszcza się 23% acetyleny) stosuje się do transportowania i magazynowania acetyleny w butlach stalowych pod ciśnieniem do 2 MPa w warunkach normalnych.

1.2.2. WYTWARZANIE I WŁAŚCIWOŚCI TLENU

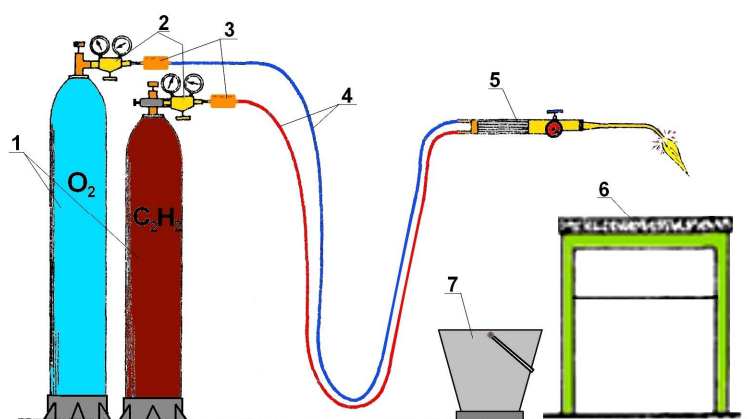
Tlen (O_2) jest gazem podtrzymującym palenie. Jest bezbarwny, pozbawiony smaku i zapachu. Tlen jest nieco cięższy od powietrza – w warunkach normalnych jego ciężar właściwy wynosi $1,43 \text{ kg/m}^3$ (powietrze $1,29 \text{ kg/m}^3$).

Na skalę techniczną tlen otrzymuje się poprzez skraplanie i destylację powietrza. Oziębione do temperatury ok. $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ i skroplone powietrze wolno ogrzewa się w celu odparowania azotu ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$) i oddzielenia go od tlenu, który pozostaje w stanie ciekłym do temperatury $-183 \text{ }^\circ\text{C}$. Tlen, po odparowaniu, jest tłoczony sprężarkami do butli tlenowych pod ciśnieniem 15 MPa.

W strumieniu sprężonego tlenu tłuszcze, oleje i smary zapalają się samoczynnie. Zaolejenie lub zatłuszczenie reduktora lub innych części armatury stykającej się z tlenem pod ciśnieniem większym niż 3 MPa prowadzi do groźnego w skutkach samozapłonu i wybuchu butli. Dlatego zabrania się smarowania i konserwacji urządzeń instalacji tlenowych wszelkiego rodzaju smarami, a jedynie wodą destylowaną.

1.3. URZĄDZENIA DO SPAWANIA GAZOWEGO

Typowe stanowisko do spawania gazowego przedstawia rys. 1.2. Stanowisko składa się z dwóch butli ze sprężonymi gazami, reduktorów, węży spawalniczych, palnika oraz bezpieczników zabezpieczających przed cofaniem płomienia do butli.



Rys. 1.2. Stanowisko do spawania gazowego: 1 - butle z gazami, 2 – reduktory, 3 - bezpieczniki suche, 4 - węże spawalnicze, 5 - palnik, 6 – stół spawalniczy, 7 - wiadro z wodą

1.3.1. BUTLE DO GAZÓW TECHNICZNYCH

W butlach do gazów technicznych przechowuje się gazy w stanie sprężonym, gazy rozpuszczone pod ciśnieniem oraz gazy skroplone. W butlach na gazy sprężone magazynuje się tlen, azot, argon, powietrze, wodór itp. Butle na gazy rozpuszczone przeznaczone są przede wszystkim do acetyleny. Natomiast takie gazy jak propan, butan i ich mieszaniny przechowuje się w butlach w stanie skroplonym.

1.3.2. BUTLE ACETYLENOWE

Butle acetylenowe są malowane na kolor kasztanowy. Wszystkie butle do przechowywania acetyleny są wypełnione wewnątrz masą porowatą, nasyconą acetonem. Rozpuszczanie C_2H_2 w acetonie oraz obecność masy porowatej, pozwala na przechowywanie acetyleny w butlach pod ciśnieniem do 2 MPa w warunkach normalnych. Masa porowata zapobiega wybuchowemu rozpadowi acetyleny oraz przyspiesza rozpuszczanie i odparowanie acetyleny z acetonu.

W typowej butli acetylenowej, o pojemności 40 dm^3 , porowata masa zajmuje ok. 20% objętości, aceton w ilości 12 kg zajmuje ok. 40% objętości, a rozpuszczony acetylen zajmuje ok. 30% objętości, resztę stanowi przestrzeń bezpieczeństwa. Z jednej butli można pobierać do $1 \text{ m}^3 C_2H_2$ na godzinę. Większy pobór powoduje porywanie przez acetylen acetonu, co pogarsza właściwości płomienia, a tym samym efekty spawania.

Dopuszczalny przepisami ubytek acetonu z butli wynosi 0,4 kg. Zmniejszająca się ilość acetonu w butli zwiększa groźbę jej wybuchu. Z tego też powodu nie wolno eksploatować butli acetylenowych w pozycji leżącej. Nie należy też opróżniać butli całkowicie z acetyleny, lecz zaleca się pozostawić nadciśnienie ok. 0,2 MPa. Podczas spawania na butli powinien zawsze znajdować się klucz do zaworu, aby w razie niebezpieczeństwa cofnięcia się płomienia można było szybko zamknąć zawór.

1.3.3. BUTLE TLENOWE

Butle tlenowe są malowane na kolor błękitny. Tlen magazynuje się w butlach stalowych pod ciśnieniem 15 MPa. W pełnej 40-litrowej butli pod ciśnieniem 15 MPa znajduje się ok. 6 m³ tlenu.

Tlen w butli zawiera niewielkie ilości zanieczyszczeń w postaci wody, azotu i gazów szlachetnych. Przy pobieraniu tlenu z butli, ze względu na obniżenie temperatury przy rozprężaniu gazu, może nastąpić skroplenie i zamarzanie pary wodnej zawartej w tlenie, nie należy więc pobierać go więcej niż 20 m³/h.

Butli tlenowych nie wolno opróżniać całkowicie. Pozostawione niewielkie nadciśnienie tlenu ma na celu zabezpieczenie butli przed zapowietrzeniem, wilgocią z atmosfery lub innymi zanieczyszczeniami z zewnątrz.

1.3.4. REDUKTORY

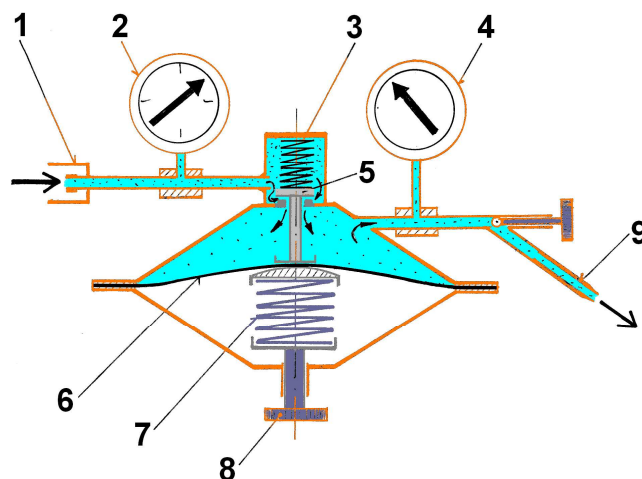
Gazy znajdujące się w butlach nie mogą być bezpośrednio użyte do zasilania palnika z uwagi na bardzo wysokie ciśnienie. Poza tym, w miarę opróżniania butli, ciśnienie gazu spada, co zmuszałoby spawacza do ciągłej regulacji płomienia. Dlatego między butlą a palnik instaluje się reduktor, którego zadaniem jest obniżenie ciśnienia gazu z butli do ciśnienia roboczego i utrzymanie stałego ciśnienia gazu w palniku, niezależnie od ciśnienia panującego w butli. Zwykle, za reduktorem, ciśnienia gazów zasilające palnik, zależnie od rodzaju palnika, wynoszą:

- tlenu 0,2-0,6 MPa,
- acetylenu 0,01-0,08 MPa.

Schemat reduktora, przedstawiono na rys. 1.3. Działanie reduktora polega na współpracy zaworu redukcyjnego z gumową przeponą oraz układu sprężyn. Po ustawieniu żądanego ciśnienia roboczego gazu reduktor działa automatycznie.

Otwarcie zaworu butlowego powoduje przepływ gazu łącznikiem (1) do komory wysokiego ciśnienia zamykanej zaworem redukcyjnym (5). Trzpień grzybka zaworu opiera się o gumową membranę (6) w komorze niskiego ciśnienia. Ciśnienie robocze gazu ustala się przez wkręcanie śruby nastawczej (8). Sprężyna regulacyjna (7) podnosi wówczas przeponę (6), która jednocześnie podnosi grzybek zaworu redukcyjnego otwierając szczelinę w zaworze dla przepływu gazu z komory wysokiego ciśnienia do komory niskiego ciśnienia i dalej do palnika. Gdy spawanie zostanie na chwilę przerwane wzrasta ciśnienie gazu w komorze niskiego ciśnienia i przepona ugina się w dół, a sprężynka pomocnicza (3), naciskając na zaworek redukcyjny, powoduje jego zamknięcie i odcięcie dopływu gazu z butli.

Manometry wskazują ciśnienia gazu w butli i ciśnienie robocze. Niekiedy zamiast manometru niskiego ciśnienia występuje rotometr, wskazujący ilościowy przepływ gazu np. w l/min.



Rys. 1.3. Przekrój reduktora; 1 - łącznik wlotowy, 2 - manometr wysokiego ciśnienia, 3 - sprężyna dociskająca, 4 - manometr niskiego ciśnienia, 5 - zaworek redukcyjny, 6 - przepona gumowa, 7 - sprężyna regulacyjna, 8 - śruba stawidłowa, 9 - króciec wylotowy gazu

Reduktory do różnych gazów mogą różnić się sposobem przyłączenia do butli. Na przykład do butli acetylenowej reduktor mocuje się za pomocą jarzma, natomiast do butli tlenowej za pomocą króćca z nakrętką.

1.3.5. WĘŻE SPAWALNICZE

Reduktory łączy się z palnikiem acetylenowo-tlenowym za pomocą elastycznych węży spawalniczych. Są to węże ciśnieniowe wykonane ze specjalnej gumy odpornej na działanie węglowodorów i tlenu, zaopatrzone w płócienne przekładki, w celu zwiększenia ich wytrzymałości. Węże te wytrzymują ciśnienie robocze do ok. 2 MPa, a ulegają rozerwaniu przy ok. 6 MPa. Węże do tlenu mają kolor błękitny, a do acetylenu czerwony. Średnica węży wynosi 4-20 mm.

1.3.6. BEZPIECZNIKI

Bezpieczniki ceramiczne najczęściej montowane są na wylocie reduktora gazowego. Zawierają filtr wstępny (dla gazów palnych), zawór zwrotny i zaporę płomieniową. Chronią one reduktory i butle gazowe zasilające palniki przed skutkiem cofnięcia płomienia i powrotnego przepływu gazu.

1.3.7. PALNIKI ACETYLENOWO-TLENOWE

Palnik do spawania gazowego powinien spełniać następujące zadania:

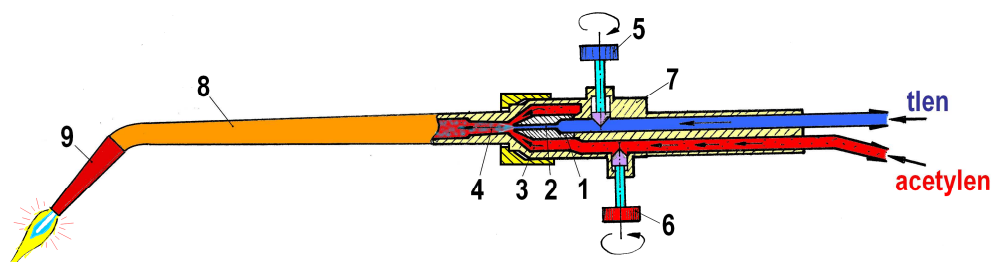
- zapewnić bezpieczne spalanie acetylenu w tlenie,
- utrzymywać stałą wydajność cieplną płomienia o określonych własnościach

fizykochemicznych,

- nadawać płomieniowi odpowiedni kształt,
- odpowiednio kierować płomień w miejsce spawania.

W palniku następuje dokładne zmieszanie gazów, po czym mieszanina tych gazów spala się u wylotu palnika. Zależnie od zasady działania palniki gazowe dzieli się na inżektorowe i bezinżektorowe.

Do spawania gazowego są stosowane najczęściej palniki inżektorowe (smoczkowe) zasilane gazami o różnym ciśnieniu (rys. 1.4). Mają one łatwą regulację płomienia i są łatwe w obsłudze.

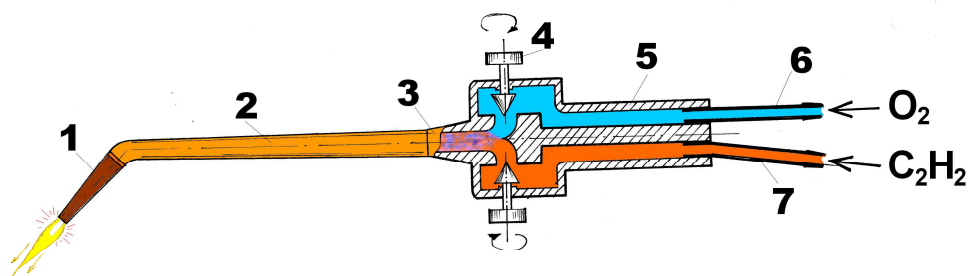


Rys. 1.4. Przekrój palnika inżektorowego; 1 - inżektor, 2 - kanał środkowy inżektora, 3 - kanał pierścieniowy, 4 - komora mieszania, 5 - zawór tlenowy, 6 - zawór acetylenowy, 7 - rękkość, 8 - wymienna nasadka, 9 - dziób

Najistotniejszym elementem palnika jest tzw. inżektor (smoczek), do którego środkowym przewodem dopływa tlen pod ciśnieniem 0,2-0,4 MPa, większym od ciśnienia acetyleny. Inżektor służy do zassania odpowiedniej ilości acetyleny do komory mieszania przez przepływający z dużą prędkością i pod większym ciśnieniem tlen.

Wielkość palników spawalniczych określa się wydajnością przepływającego w nim acetyleny w jednostce czasu (dm^3/h). Wydajność palnika można regulować przez wymianę nasadek oraz przez regulację zaworami na rękkości palnika. Palniki tego typu mają wydajność od 40 do 2000 $\text{dm}^3 \text{C}_2\text{H}_2/\text{h}$.

W palnikach bezinżektorowych (rys. 1.5) mieszanie gazów następuje wewnątrz korpusu palnika lub na zewnątrz palnika. Palniki z wewnętrznym mieszaniem gazów są zasilane gazami o jednakowym ciśnieniu i wymagają stosowania tzw. reduktorów równoprężnych. Palniki takie pracują bardzo stabilnie w zakresie wydajności 1-1000 $\text{dm}^3/\text{h} \text{C}_2\text{H}_2$. Są one często wykorzystywane do precyzyjnego spawania drobnych części, np. w pracach jubilerskich.



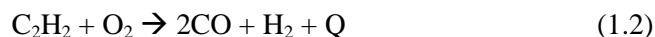
Rys. 1.5. Schemat palnika bezinżektorowego. 1- dziób, 2- nasadka, 3- nakrętka, 4- zawory odcinające, 5- korpus palnika, 6- króciec tlenowy, 7- króciec acetylenowy.

1.4. PŁOMIEŃ ACETYLENOWO-TLENOWY

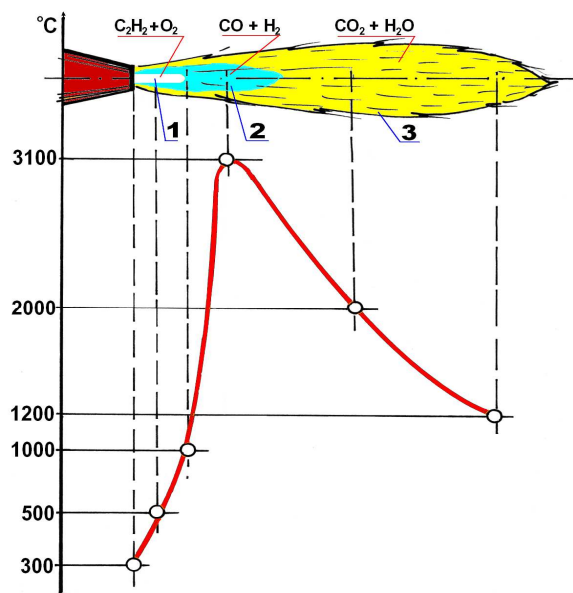
Płomień acetylenowo-tlenowy składa się z trzech charakterystycznych stref spalania: jądra płomienia, strefy odtleniającej i kity płomienia (rys. 1.6).

Pierwsza strefa, zwana jądrem płomienia, powstaje z mieszaniny $C_2H_2 + O_2$ wypływającej z palnika i ma kształt ostro zarysowanego, jasno świecącego stożka. Jaskrawo świecące jądro płomienia jest wynikiem obecności na jego powierzchni rozżarzonych cząstek węgla, powstających z rozpadu C_2H_2 w temperaturze wyższej niż $300\text{ }^\circ\text{C}$.

Druga strefa, zwana odtleniającą (redukcją), przylega bezpośrednio do jądra płomienia. Na powierzchni świecącego stożka, w bardzo cienkiej warstwie, następuje pierwszy etap spalania acetyleny w tlenie przy ich stosunku objętościowym 1:1 wg reakcji:

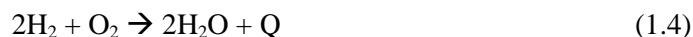


Towarzyszy tej reakcji wydzielanie dużej ilości ciepła, a temperatura gazów dochodzi do $3100\text{ }^\circ\text{C}$. W wyniku reakcji spalania pierwotnego acetyleny powstają gazy palne CO , H_2 i H o bardzo silnych właściwościach redukujących, mających podstawowe znaczenie metalurgiczne dla procesu spawania. Powstające produkty reakcji spalania pierwotnego są wypychane siłą podmuchu poza jądro, tworząc w ten sposób drugą strefę płomienia o długości do kilkunastu mm, zwaną też strefą redukującą. Strefa ta ma barwę błękitną i jest słabo widoczna.



Rys. 1.6. Rozmieszczenie stref płomienia oraz rozkład temperatury w płomieniu acetylenowo-tlenowym; 1 - mieszanina $C_2H_2 + O_2$ tworząca jądro płomienia, 2 - strefa redukująca, 3 - kita

Trzecia strefa, zwana kitą płomienia, powstaje wskutek przenikania powietrza do płomienia na drodze turbulencji i dyfuzji. W strefie tej zachodzi drugi etap spalania, w którym powstałe w reakcji pierwotnej tlenek węgla oraz wodór spalają się z tlenem z powietrza, wg reakcji:



Kita płomienia ma kolor lekko różowy. Temperatura panująca w tej strefie jest o wiele niższa niż w strefie redukującej. Powstające w wyniku spalania gazy dwutlenek węgla oraz para wodna, które nie mają już zdolności odtleniających. W tej strefie występuje też azot, który jest składnikiem powietrza.

W praktyce spawalniczej rozróżnia się trzy rodzaje płomienia acetylenowo-tlenowego, w zależności od stosunku ilościowego obu gazów:

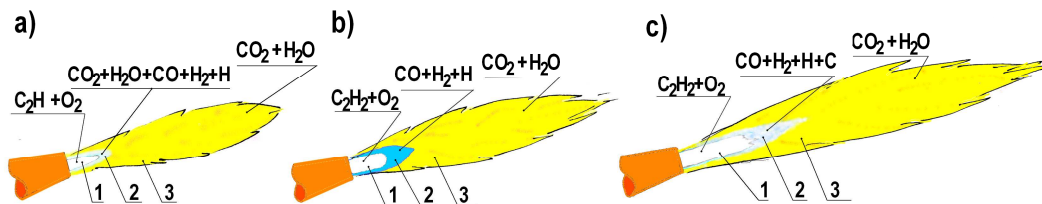
- normalny (neutralny, redukujący),
- nawęglający,
- utleniający.

Prawidłowo wyregulowany płomień normalny nie może zawierać ani nadmiaru acetyleny ani tlenu, a objętościowy stosunek tych gazów powinien, wg założeń teoretycznych, wynosić 1:1. Praktycznie jednak zużycie tlenu jest nieco większe i stosunek gazów wynosi 1:1,2. O właściwym wyregulowaniu płomienia neutralnego świadczą wyraźne ostre zarysy jasno świecącego stożka oraz lekkie białe migotanie na jego wierzchołku. Przedstawiony na rys. 1.6 płomień gazowy jest płomieniem normalnym, zwanym też neutralnym lub redukującym. Płomień neutralny stosuje się do spawania stali niestopowych i niskostopowych, miedzi oraz żeliwa.

Płomień nawęglający powstaje z nadmiaru acetylenu podawanego do palnika. W wyniku reakcji spalania pierwotnego w drugiej strefie płomienia, pozostaje nadmiar węgla niespalonego w tlenie. Rozżarzone cząsteczki wolnego węgla przenikają do strefy redukującej, nadając jej jasny świecący kolor na większej długości niż stożek płomienia. Temperatura w tej części płomienia jest nieznacznie niższa niż w płomieniu normalnym. Płomień nawęglający stosuje się do spawania aluminium oraz do napawania stellitami.

Płomień utleniający powstaje przy nadmiarze podawanego do palnika tlenu. Odnacza się krótkim jądrem i smukłą kitą. Ze wzrostem ilości tlenu płomień staje się coraz bardziej hałaśliwy. W drugiej strefie płomienia pojawiają się utleniające składniki gazowe CO_2 i H_2O , a nawet nadmiar tlenu. Płomień utleniający jest stosowany do spawania mosiądzów i lutowania stali ocynkowanej.

Rodzaje płomienia acetylenowo-tlenowego, w zależności od stosunku ilości acetylenu do tlenu, pokazano na rys. 1.7.



Rys. 1.7. Rodzaje płomienia acetylenowo-tlenowego i reakcje zachodzące w czasie spalania:
a) utleniający, b) normalny, c) nawęglający; 1 – jądro płomienia, 2 – strefa spalania pierwotnego, 3 – strefa spalania wtórnego – kity.

1.5. METODY I TECHNIKI SPAWANIA GAZOWEGO

W spawaniu acetylenowo-tlenowym stosuje się trzy zasadnicze metody:

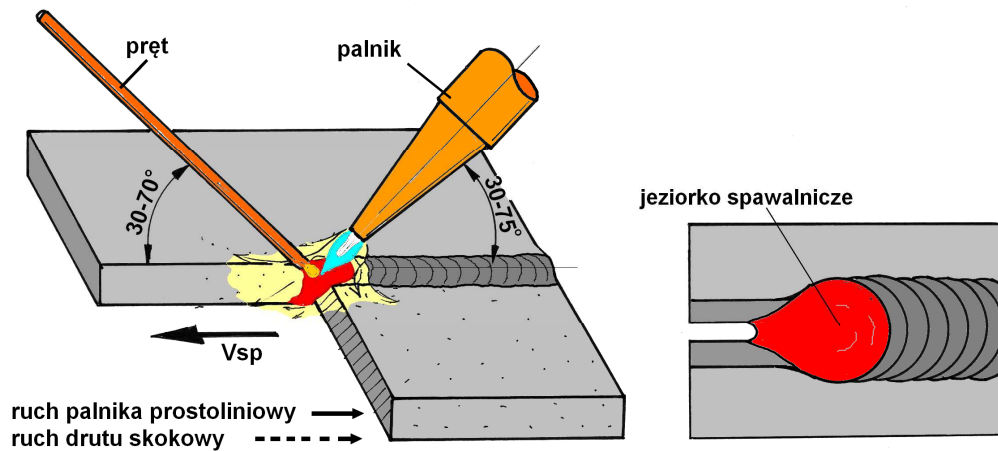
- spawanie w lewo,
- spawanie w prawo,
- spawanie w górę.

Poszczególne metody różnią się sposobem ustawienia i prowadzenia palnika, sposobem podawania spoiwa, usytuowaniem spoiny w przestrzeni oraz zakresem grubości spawanych części.

1.5.1. SPAWANIE GAZOWE METODĄ W LEWO

W spawaniu w lewo płomień skierowany jest w kierunku spawania na krawędzie jeszcze nie przetopione. Palnik wykonuje ruch od strony prawej w stronę lewą, równomiernie stapiając brzegi łączonych części, natomiast spoiwo w postaci drutu wykonuje w tym czasie niewielkie pionowe ruchy przerywane. Wyjmowanie końca drutu z jeziora ciekłego metalu ma na celu regulowanie ilości dodawanego spoiwa. Koniec stopionego drutu powinien cały czas pozostać w obszarze kity płomienia,

ze względu na ochronę metalu przed tlenem i azotem z powietrza. Schemat spawania metodą w lewo pokazano na rys. 1.8.



Rys. 1.8. Schemat spawania metodą w lewo

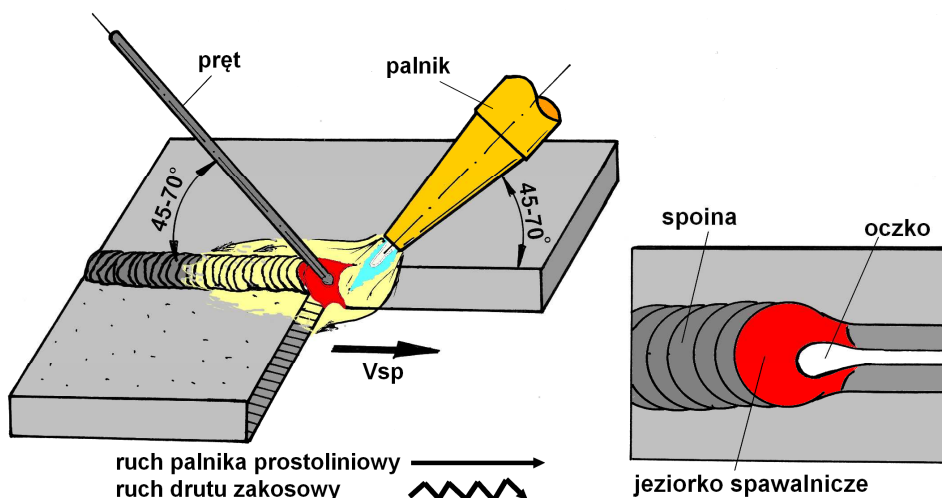
Metoda spawania w lewo jest łatwa do opanowania i można otrzymać gładkie lico spoiny o estetycznym wyglądzie. Jest stosowana przede wszystkim do łączenia cienkich blach o grubości nie większej niż 4 mm.

Do wad tej metody należy zaliczyć niskie właściwości wytrzymałościowe spoiny oraz trudność równomiernego stapienia brzegów obu elementów, wskutek czego występuje brak przetopu. Spoina wykonana metodą w lewo szybko stygnie, co sprzyja tworzeniu się porów i pęcherzy w spoinie. Z tego względu metody tej nie stosuje się do łączenia odpowiedzialnych konstrukcji, np. takich jak połączenia rurowe przegrzewacza pary.

Podczas spawania w lewo występują znaczne straty ciepła spowodowane tym, że znaczna część płomienia ogrzewa powietrze, a niewielka jego część jest skierowana na drut i krawędzie łączonego materiału.

1.5.2. SPAWANIE GAZOWE METODĄ W PRAWO

W spawaniu w prawo płomień palnika jest zwrócony w kierunku wykonanej spoiny. W czasie spawania palnik przesuwają się równomiernie ruchem prostoliniowym od strony lewej ku prawej, stapiając brzegi łączonych blach i tworząc charakterystyczne dla tej metody jezioro stopionego metalu z tzw. oczkiem.



Rys. 1.9. Schemat spawania metodą w prawo

Jądro płomienia znajduje się wewnątrz rowka spawalniczego, a spoiwo, w postaci drutu, dotyka powierzchni tego jeziora i wykonuje na nim niewielkie ruchy poprzeczne lub eliptyczne rozpraszające metal w taki sposób, aby krople stopionego spoiwa spływały ciągle do jeziora spawalniczego (rys. 1.9).

Spawanie w prawo jest stosowane zwykle do połączeń odpowiedzialnych, a także do łączenia blach o grubości większej niż 4 mm, wymagających ukosowania brzegów oraz do łączenia rur niezależnie od ich grubości.

Do zalet tej metody zalicza się:

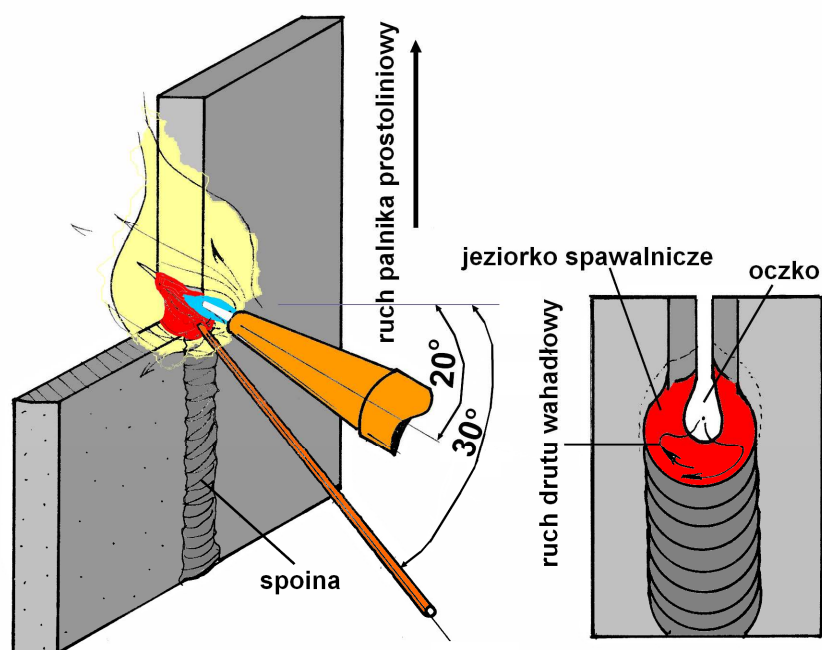
- możliwość spawania przy dowolnym położeniu spoiny w przestrzeni,
- duży stopień wykorzystania ciepła płomienia,
- dobre kontrolowanie przetopu grani dzięki ciągłej obecności „oczka”,
- powolne stygnięcie spoiny,
- lepsze właściwości wytrzymałościowe złączy niż przy spawaniu w lewo.

Ciepło płomienia nie tylko stapia brzegi łączonych elementów, ale również podgrzewa wykonaną już spoinę, dzięki czemu spoina wolniej stygnie, co ułatwia wydzielenie się z niej gazów.

Do wad spawania w prawo należą trudności w otrzymaniu gładkiego lica spoiny.

1.5.3. SPAWANIE GAZOWE METODĄ W GÓRĘ

W tej metodzie spoina układana jest w położeniu pionowym od dołu do góry. Palnik przesuwa się ruchem prostoliniowym, natomiast koniec drutu wykonuje małe ruchy wahadłowe (rys. 1.10).



Rys. 1.10. Schemat spawania metodą w górę

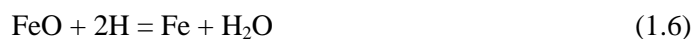
Rozróżnia się spawanie w górę jednostronne i dwustronne. Różnią się one sposobem ukosowania i zakresem grubości łączonych blach. Spawanie jednostronne w górę stosuje się do łączenia blach nieukosowanych o grubości 2-6 mm lub blach ukosowanych o grubości 7-10 mm. Spawanie w górę dwustronne, wykonywane jednocześnie przez dwóch spawaczy, stosuje się do łączenia blach nieukosowanych o grubości 3-10 mm lub blach ukosowanych o grubości 12-20 mm.

Do zalet spawania w górę należy zaliczyć:

- większą wydajność spawania niż w poprzednich metodach,
- niemal o połowę mniejsze zużycie gazów niż w poprzednich metodach,
- bardzo dobry przetop na całej grubości łączonych części,
- wykonanie spoiny w jednym przejściu, niezależnie od grubości łączonych części.

1.6. SPAWANIE GAZOWE STALI

Obecność w płomieniu acetylenowo-tlenowym redukujących i osłaniających gazów ze spalania pierwotnego CO i H₂ jest wystarczająca, aby podczas spawania stali niestopowych i niskostopowych otrzymać spoiny czyste bez stosowania dodatkowych topników. Jest to możliwe dzięki reakcjom (1.5), (1.6) zachodzącym w redukującej strefie płomienia:



Spawanie gazowe stali stosuje się do łączenia części o grubości do 12 mm. Obecnie spawanie gazowe jest stosowane przede wszystkim do prac remontowych, natomiast w produkcji przemysłowej stosuje się spawanie łukowe.

Do spawania stali używa się płomienia neutralnego.

1.6.1. MATERIAŁY DODATKOWE DO SPAWANIA STALI – SPOIWA

Gatunek spoiwa należy dobierać w zależności od własności spawanego materiału. Spoiwa wytwarzane są w postaci drutów o średnicy: 0,6-8 mm i dostarczane w kręgach lub prętach o długości do 1 m.

1.6.2. SPAWANIE GAZOWE INNYCH METALI

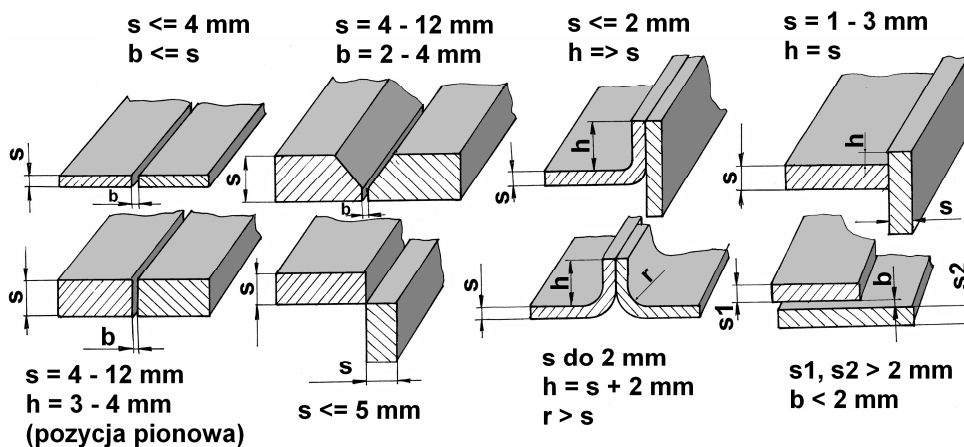
Spawanie gazowe stosuje również do łączenia żeliwa i mosiądzu. Natomiast nie używa się do spawania innych metali takich jak aluminium, miedź czy stale wysokostopowe, a to z uwagi na niskie właściwości złączy. Ewentualne spawanie gazowe tych metali musi odbywać się przy użyciu topników, gdyż redukujący charakter płomienia nie wystarcza do rozkładu tlenków tych metali.

1.7. PRZYGOTOWANIE CZĘŚCI DO SPAWANIA

Do najważniejszych operacji poprzedzających wykonanie poprawnych złączy spawanych należą:

- ukosowane krawędzi łączonych części,
- oczyszczenie brzegów z zanieczyszczeń,
- ustalenie wzajemnego położenia części i wstępny ich montaż poprzez szczipianie.

Częściej spotykane rodzaje złączy spawanych pokazano na rys. 1.11.

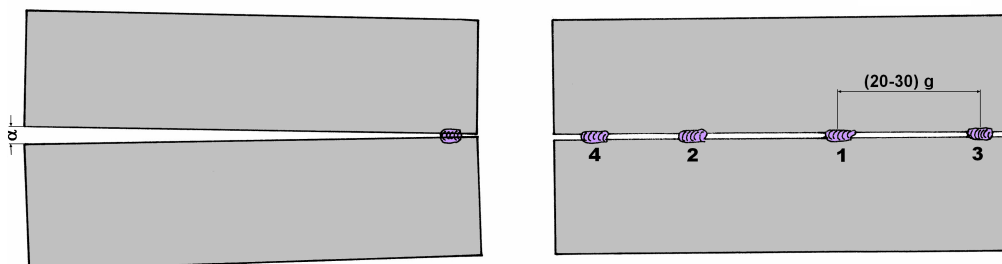


Rys. 1.11. Podstawowe rodzaje złączy spawanych gazowo; złącze doczołowe o krawędziach nieukosowanych (a, b), złącze doczołowe z ukosowanymi krawędziami (c), złącze kątowe (d, g), złącza przylgowe (e, f), złącze zakładkowe (h)

1.7.1. SCZEPIANIE LUB MOCOWANIE BLACH

Szczepianie części polega na ich połączeniu za pomocą szeregu spoin punktowych układanych wzdłuż osi spoiny.

Szczepianie krawędzi elementów nie pozwala na rozejście lub zbliżenie się elementów podczas procesu spawania. Sposób wykonania spoin szczepnych pokazano na rys. 1.12.



Rys. 1.12. Sposób wykonywania punktowych spoin szczepnych

1.8. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

Celem części praktycznej ćwiczenia jest zapoznanie studentów:

- z typowym stanowiskiem do spawania gazowego,
- z budową jego podstawowych elementów składowych: butli gazowych, zaworów, reduktorów, bezpieczników i palnika,
- technologii spawania różnymi metodami.

Rozpoczęcie ćwiczenia zostanie poprzedzone przypomnieniem przepisów BHP na stanowisku spawania gazowego.

W części praktycznej studenci uczestniczą w pokazach zapalania płomienia acetylenowo-tlenowego oraz regulacja charakteru płomienia na redukujący, nawęglający i utleniający, a następnie ćwiczą zapalanie i gaszenie palnika.

Zadanie: Spawanie blach stalowych:

- a) cienkich $g=1,5$ mm metodą w lewo,
- b) grubszych $g=4$ mm metodą w prawo.

Po pokazie procesu, studenci samodzielnie spawają blachy pod nadzorem prowadzącego.

Po spawaniu należy ocenić wykonane złącza. Przez oględziny zewnętrzne należy ocenić występujące niezgodności w spoinach, a następnie wykonać próbę technologiczną zginania złączy z blach o grubości $g=4$ mm spawanych metodą w lewo i w prawo i ocenić ich jakość.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu podać:

- krótki opis ćwiczenia,

- schemat stanowiska,
- ocenę wizualną i próbę technologiczną łamania złączy spawanych,
- wnioski własne.

LITERATURA

[1] PILARCZYK J., *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 2, WNT, Warszawa 2005.

WYKAZ NORM

- PN-EN 13622:2004 Sprzęt do spawania gazowego -- Terminologia -- Terminy dotyczące sprzętu do spawania gazowego.
- PN-CR 13259:2002 Sprzęt do spawania gazowego -- Ręczne i maszynowe przemysłowe palniki tlen-gazy palne do podgrzewania płomieniowego i procesów pokrewnych.
- PN-EN 12536:2002 Materiały dodatkowe do spawania -- Pręty do spawania gazowego stali niestopowych i stali odpornych na pełzanie -- Klasyfikacja.
- PN-EN ISO 2503:2009 Sprzęt do spawania gazowego -- Reduktory ciśnienia i reductory ciśnienia z urządzeniami dozującymi przepływ do butli gazowych stosowanych w spawaniu, cięciu i procesach pokrewnych, do 300 bar.
- PN-EN ISO 9539:2010 Sprzęt do spawania gazowego -- Materiały dla sprzętu stosowanego w gazowym spawaniu, cięciu i procesach pokrewnych.
- PN-EN ISO 15609-2:2005 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -- Instrukcja technologiczna spawania -- Część 2: Spawanie gazowe.
- PN-EN ISO 9692-1:2008 Spawanie i procesy pokrewne -- Zalecenia dotyczące przygotowania złączy -- Część 1: Ręczne spawanie łukowe, spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazów, spawanie gazowe, spawanie metodą TIG i spawanie wiązką stali.
- PN-EN 1327:1999 Sprzęt do spawania gazowego -- Węże termoplastyczne stosowane podczas spawania oraz procesów pokrewnych.
- PN-EN ISO 15615:2005 Sprzęt do spawania gazowego -- Instalacje acetylenowe do spawania, cięcia i procesów pokrewnych -- Wymagania bezpieczeństwa dotyczące urządzeń wysokociśnieniowych.

2. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODAMI OTULONYMI

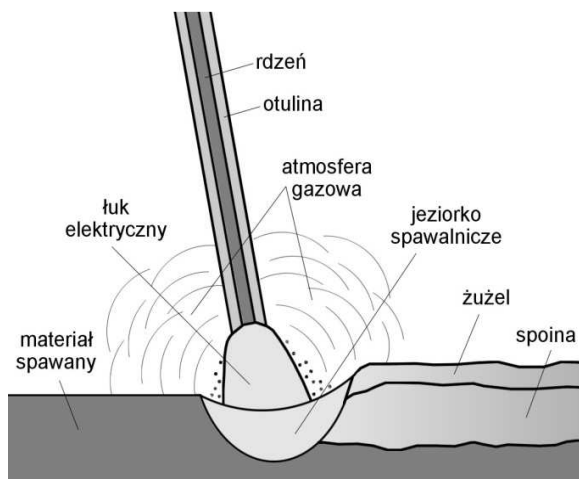
CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z:

- charakterystyką metody spawania ręcznego łukowego elektrodą otuloną,
- wyposażeniem stanowiska do spawania elektrodą otuloną,
- budową i rodzajem elektrod otulonych,
- parametrami i technikami spawania.

2.1. WPROWADZENIE

Spawanie elektrodami otulonymi należy do metod elektrycznych łukowych, w których łuk spawalniczy jarzy się między topliwą elektrodą pokrytą otuliną, a materiałem spawanym (rys. 2.1). Spoinę tworzą nadtopione krawędzie elementów łączonych, stapiający się rdzeń elektrody oraz składniki metaliczne otuliny. Udział materiału rodzimego w spoinie wynosi zazwyczaj 10-40% [1-4].

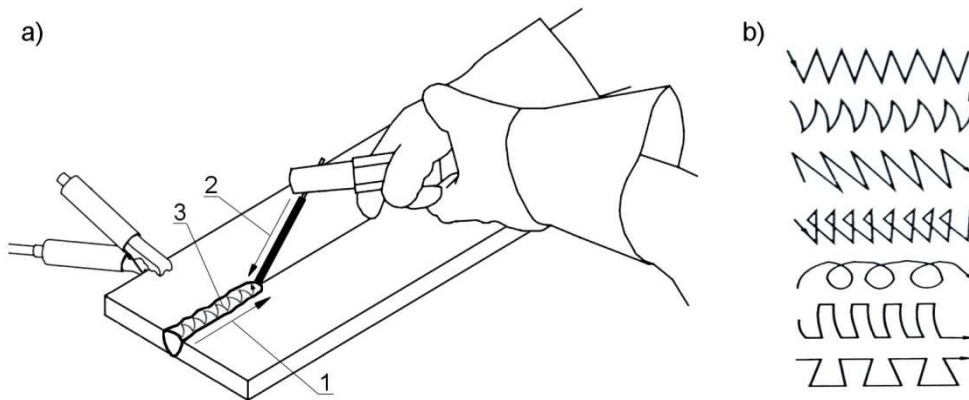


Rys. 2.1. Schemat procesu spawania łukowego ręcznego elektrodą otuloną

Krople metalu stapiającej się elektrody, ciepłe jezioro spawalnicze oraz krystalizującą spoinę chroni przed dostępem tlenu i azotu z powietrza osłona gazowa, powstająca w wyniku stapania się otuliny, złożonej głównie CO_2 , CO i H_2O wraz z produktami ich rozpadu. Podczas krystalizacji spoiny gazy ochronne wspomaga tworząca się powłoka żużlowa.

Spawanie elektrodami otulonymi zwykle jest procesem ręcznym, wymagającym od spawacza dużych umiejętności. Doświadczony spawacz musi kontrolować kilka ruchów: ruch elektrody wzdłuż linii spawania (1), ruch elektrody w kierunku spoiny (2) oraz niekiedy nieliniowe ruchy końca elektrody (3), szczególnie uzasadnione w przypadku warstw wypełniających i licowych, rzadziej przetopowych (rys 2.2).

Należy przy tym przez cały czas utrzymywać określoną odległość końca elektrody od krawędzi materiału (zalecana $0,5 \div 1d$, gdzie d – średnica elektrody) i zachować jej odpowiednie pochylenie.

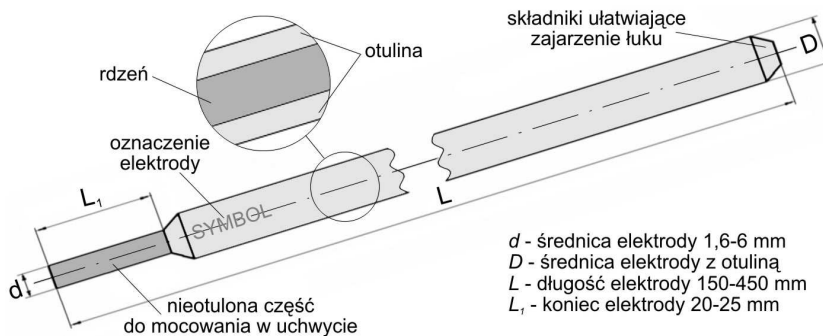


Rys. 2.2. Ruchy wykonywane podczas spawania łukowego ręcznego elektrodą otuloną (a), przykładowe sposoby prowadzenia końcówki elektrody (b)

2.2. BUDOWA I RODZAJE ELEKTROD

Elektrody otulone są metalowymi prętami otoczonymi sprasowaną otuliną (rys. 2.3), służącymi do spawania, napawania oraz rzadziej cięcia. Dobierane są głównie w zależności od składu chemicznego, właściwości i gabarytów materiałów łączonych, ale także spodziewanej wytrzymałości złącza, rodzaju źródła prądu czy pozycji spawania [5].

Rdzeń elektrody, którego średnica d jest podawaną średnicą elektrody, najczęściej wykonany jest z pręta litego. Gdy zachodzi konieczność uzyskania określonego składu chemicznego stopiwa, np. w przypadku spawania stali wysokostopowych lub napawania określonych warstw, stosuje się rdzenie proszkowe [3-5]. Rzadziej stosuje się rdzenie z prętów odlewanych, spiekanych czy bimetalowych [7]. Rdzeń elektrody w większości przypadków zbliżony jest pod względem składu chemicznego oraz struktury do gatunku materiałów łączonych. Wyjątkiem są elektrody do napawania oraz elektrody do spawania materiałów trudno spawalnych (stale ferrytyczno-martenzytyczne, żeliwa, połączenia różnoimienne) [6,7].



Rys. 2.3. Budowa elektrody otulonej

Otulina jest sprasowaną mieszaniną składników głównie mineralnych, a także organicznych, i dodatków stopowych. W celu zwiększenia uzysku stopiwa, a przez to wydajności spawania, niekiedy do otuliny dodaje się proszku żelaza. Głównym zadaniem otuliny jest osłona łuku przed dostępem atmosfery. Do pozostałych jej funkcji należą: wprowadzenie do obszaru spawania pierwiastków odtleniających, wiążących azot i rafinujących ciekły metal spoiny, wytworzenie powłoki żuźlowej nad ciekłym jeziorciem i krzepnącym materiałem spoiny, stabilizacja łuku spawalniczego, regulacja składu chemicznego spoiny [1-5]. Funkcje te spełniają następujące składniki [5-7]:

- gazotwórcze – wytwarzające odpowiednią osłonę gazową chroniącą przed dostępem tlenu i azotu z powietrza,
- żuźlotwórcze – stanowiące również barierę ochronną dla spoiny, a także zmniejszające prędkość chłodzenia i formujące lico spoiny,
- stabilizujące jarzenie się łuku – pierwiastki o niskim potencjale jonizacyjnym (Ca, K, Na),
- odtleniające ciekły metal, wiążące azot i rafinujące ciekły metal spoiny,
- stopowe – sproszkowane metale i żelazostopy,
- wiążące – np. szkło wodne i dekstryna.

Otulina powinna być jednorodna i spoista, współosiowa względem rdzenia, odporna na uderzenia i wstrząsy, bez porów, pęknięć, zgrubień i porowatości. Czoło elektrody powinno mieć kształt stożkowy, kulisty lub pośredni. Wskazane jest, aby zawierało ono specjalną powłokę, ułatwiającą zajarzenie łuku. Otulina powinna się topić równomiernie, bez nadmiernego rozprysku.

Wyróżnia się różne rodzaje elektrod, podzielone ze względu na następujące kryteria:

- Skład chemiczny otuliny [3,4,6,7]:
 - *kwaśne A* - w otulinie zawartych jest dużo składników odtleniających (głównie żelazomangan), ale również tlenków żelaza, manganu, krzemu. Przeznaczone są zwykle do spawania stali niestopowych o dobrej spawalności, z uwagi na dużą zawartość wodoru powodującego pęknięcia na zimno. Wykonane za pomocą tych elektrod spoiny wykazują przeciętne własności wytrzymałościowe i są wrażliwe na powstanie pęknięć krystalizacyjnych. Kwaśny żużel sprzyja drobnokropłowemu (natryskowemu) przechodzeniu metalu w łuku, co powoduje powstanie płaskiego i gładkiego lica. Tym rodzajem elektrod można spawać w pozycji podolnej i nabocznej, natomiast w ograniczonym stopniu nadają się one do spawania w pozycjach przymusowych. Stosuje się prąd przemienny lub stały z minusem na elektrodzie. Przed procesem spawania zaleca się suszenie elektrod przez ok. 1 h w temperaturze 100-150 °C.
 - *zasadowe B* - zawierają dużo węglanów wapnia i magnezu oraz fluorytu. Przeznaczone są do spawania stali o podwyższonej zawartości węgla, stali nisko- i wysokostopowych. Ze względu na zwiększoną udarność i odporność na pękanie stosuje się je do spawania odpowiedzialnych

konstrukcji. Duża czystość metalurgiczna zapewnia małą skłonność elektrod zasadowych do pęknięć na gorąco, natomiast mała zawartość wodoru (<15 ml/100 g stopiwa) do pęknięć na zimno złącza. W celu utrzymania niewielkiej zawartości wodoru w spoinie konieczne jest suszenie elektrod przez okres 1-3 h w temperaturze od 300-350 °C [4]. Elektrodami zasadowymi można spawać we wszystkich pozycjach, z wyjątkiem pionowej z góry na dół. Z uwagi na trudności w topieniu proces spawania odbywa się z biegunowością dodatnią (plus na elektrodzie) i musi być utrzymywany stosunkowo krótki łuk.

- *celulozowe C* - zawierają dużo substancji palnych (celuloza), które powodują intensywne jarzenie łuku. Elektrodami celulozowymi można spawać we wszystkich pozycjach (w tym pozycji pionowej z góry na dół). Najkorzystniejsze właściwości jarzenia się łuku uzyskuje się przy wilgotności otuliny ok. 3% [4], z tego względu elektrody te nie wymagają suszenia przed procesem spawania i są mało wrażliwe na oddziaływanie warunków atmosferycznych. To z kolei zwiększa zawartość wodoru w spoinie, zmniejsza udarność i własności wytrzymałościowe spoiny.
- *rutylowe R* - zawierają dużą ilość rutyłu TiO_2 oraz odtleniacze, głównie żelazokrzem i żelazomangan. Z uwagi na drobnokropłowy charakter przenoszenia ciekłego metalu w łuku znajdują szerokie zastosowanie przy spawaniu cienkich blach. Elektrodami rutyłowymi spawa się prądem przemiennym lub prądem stałym z biegunowością ujemną. Proces spawania może odbywać się we wszystkich pozycjach, za wyjątkiem pionowej z góry na dół. Elektrody rutyłowe charakteryzują się małą ilością rozprysków podczas spawania, stabilnym łukiem elektrycznym, dobrze jarzącym się przy różnych długościach łuku a także przy spawaniu prądem przemiennym. Przeznaczone są głównie do spawania stali niskowęglowych dobrze spawalnych, w tym w warunkach montażowych, w przypadku których trudno zachować jednakową długość łuku.
- *utleniające O* - (wyróżnianie przez niektóre źródła literaturowe) zawierają dużo tlenków żelaza, a małą ilość składników odtleniających, przez co spoiny mają gorsze własności mechaniczne [4,5].

Kryterium składu chemicznego otuliny różnicuje dodatkowo elektrody mieszane: rutyłowo – kwaśne RA, rutyłowo – zasadowe RB, rutyłowo – celulozowe RC.

- Zastosowanie elektrod otulonych [4,5] do:
 - spawania stali niestopowych i drobnoziarnistych,
 - spawania stali o wysokiej wytrzymałości,
 - spawania stali nierdzewnych i żaroodpornych,
 - spawania stali odpornych na pełzanie,
 - spawania żeliwa,
 - spawania metali nieżelaznych i ich stopów,
 - napawania.

- Grubość otuliny elektrody [3-6]:
 - cienko otulone $D/d \leq 1,2$,
 - średnio otulone $D/d = 1,2 \div 1,4$,
 - grubo otulone $D/d \geq 1,4$.

W tej grupie wyróżnia się niekiedy dodatkowo elektrody bardzo grubo otulone (wysokowydajne) oraz elektrody wielowarstwowe.

Elektrody otulone, szczególnie zasadowe, powinny być odpowiednio przechowywane, a w razie konieczności suszone przed rozpoczęciem procesu spawania w celu obniżenia zawartości wodoru. Wilgoć, nawet ta znajdująca się w powietrzu może mieć istotny wpływ na obniżenie własności spoin i zwiększenie ich podatności na pęknięcia na zimno. Suszenie elektrod powinno się odbywać zgodnie z zaleceniami producenta, najczęściej umieszczanymi na pudełkach z elektrodami (np. suszyć w temp. 250-350 °C przez 2 godziny). Jeżeli występuje taka konieczność, elektrody kwaśne i rutyłowe suszy się w temperaturze około 100-150 °C, natomiast elektrod celulozowych zwykle się nie suszy. Od momentu zakończenia procesu suszenia do rozpoczęcia spawania elektrody powinny być odpowiednio przechowywane, ewentualnie transportowane. Do tego celu służą suszarki (przenośne lub stacjonarne), cieplarki (przenośne lub stacjonarne) lub odpowiednie termosy. Znane są również rozwiązania pakowania próżniowego elektrod lub przechowywania w specjalnych szczelnych opakowaniach.

Każdy producent elektrod otulonych jest zobowiązany do jednolitego oznaczenia opakowania elektrod otulonych, na którym jednoznacznie określone zostanie ich przeznaczenie, rodzaj i własności. W zależności od przeznaczenia elektrod otulonych do spawania łukowego, stosowane są różne rodzaje oznaczeń, niemniej jednak zawsze wg ściśle określonych zasad. Na początku oznaczenia podawany jest numer normy z indeksem A lub B klasyfikującym elektrody na podstawie granicy plastyczności i pracy łamania 47 J (A) lub na podstawie wytrzymałości na rozciąganie i pracy łamania 27 J (B). Następnie umieszczane jest oznaczenie E symbolizujące elektrodę otuloną oraz symbole liczbowe i literowe odnoszące się do własności elektrody.

Dokładny opis symboli elektrod **(do spawania stali niestopowych i drobnoziarnistych)** na poszczególnych pozycjach zamieszczony jest w normie PN-EN ISO 2560:2010.

Oznaczenie elektrod do spawania stali o wysokiej wytrzymałości, stali nierdzewnych i żaroodpornych, do spawania żeliwa i metali nieżelaznych objęte jest odrębnymi normami.

Poza wymienionymi oznaczeniami, dotyczącymi przeznaczenia, rodzaju oraz właściwości elektrod, na opakowaniach z elektrodami znajdują się również inne wskazówki dotyczące ich właściwego użytkowania, m.in. symboliczne oznaczenia właściwych pozycji spawania (rys. 2.4a) oraz rodzaju prądu i biegunowości (rys. 2.4b).



Rys. 2.4. Oznaczenia pozycji spawania (a) oraz rodzaju prądu i jego biegunowości (b) umieszczane na opakowaniach z elektrodami

2.3. PARAMETRY SPAWANIA

Spawanie elektrodą otuloną, mimo ogromnej popularności, jest metodą wymagającą od spawacza znacznych umiejętności. Wprawdzie producenci źródeł prądu i materiałów dodatkowych, przez ciągłe udoskonalanie swoich produktów, stale dążą do poprawy ergonomii spawania, jednak prawidłowe przeprowadzenie procesu spawania wymaga połączenia doświadczenia spawacza i odpowiednio dobranych parametrów spawania. Do podstawowych parametrów spawania ręcznego elektrodą otuloną należą [1-3, 5-7]:

1. Rodzaj i natężenie prądu spawania.

Natężenie prądu spawania jest parametrem, który w największym stopniu decyduje o ilości ciepła wprowadzonego do spoiny i prędkości stapienia elektrody. Proces spawania elektrodą otuloną może być przeprowadzony:

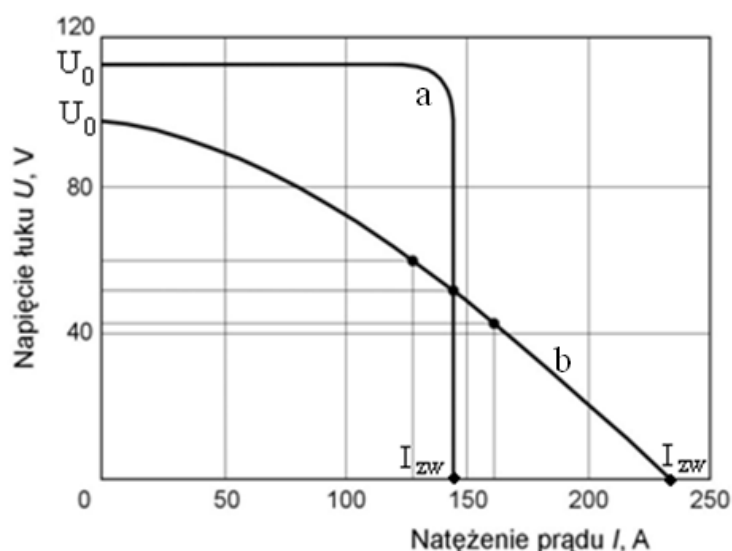
- Prądem stałym (DC):

- biegunowością dodatnią (biegun dodatni podłączony do zacisku elektrody, DC+),
- biegunowością ujemną (biegun ujemny podłączony do zacisku elektrody, DC-),

- Prądem przemiennym (AC).

Rodzaj prądu spawania wpływa na stabilność jarzenia się łuku, przenoszenie w nim kropli ciekłego metalu, kształt ścięgu spoiny oraz głębokość wtopienia. Prąd stały zapewnia bardziej stabilny łuk i równomierne przenoszenie ciekłego metalu w łuku, ograniczając liczbę rozprysków nawet przy niskich natężeniach prądu. Ponadto, większe jest przetopienie brzegów łączonych materiałów i mniejsze tendencje do zwarcia łuku. Niektóre gatunki elektrod (głównie elektrody zasadowe, przeznaczone do spawania stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości oraz stali stopowych) wymagają bardzo dobrej stabilności jarzenia się łuku, które może zapewnić spawanie z biegunowością dodatnią. W takiej konfiguracji większa jest głębokość wtopienia w porównaniu z procesem spawania z biegunowością ujemną. Spawanie prądem zmiennym stosuje się rzadko, raczej w warunkach „domowych” z uwagi na mały koszt urządzenia (spawarka transformatorowa).

Wartość natężenia prądu jest dobierana w zależności od rodzaju spawanego materiału, jego grubości, średnicy zastosowanej elektrody oraz pozycji spawania. Podczas spawania natężenie prądu powinno utrzymywać stałą, stabilną wartość, która nie zależy od długości łuku elektrycznego. Z tego względu zalecana jest stromo opadająca charakterystyka statyczna źródła prądu, która zapewnia utrzymanie stałej wartości prądu w funkcji napięcia (rys. 2.5). Im bardziej stroma charakterystyka prądowo-napięciowa źródła tym mniejsze są zmiany natężenia prądu (ΔI) przy zmieniającej się długości łuku elektrycznego (powodującej zmiany napięcia ΔU). Do spawania w pozycjach wymuszonych dopuszcza się użycie źródeł o łagodnie opadającej charakterystyce w celu regulacji natężenia prądu długością łuku.



Rys. 2.5. Statyczne charakterystyki prądowo-napięciowe źródeł do spawania ręcznego elektrodami otulonymi: a - stromo opadająca, b – łagodnie opadająca [1]

2. Napięcie łuku.

Podczas spawania ręcznego elektrodą otuloną napięcie łuku jest wielkością proporcjonalną do długości łuku. Napięcie pomiędzy elektrodą, a materiałem spawanym, przed zamknięciem obwodu spawania określane jest jako tzw. napięcie biegu jałowego (U_0), a jego wartość dla większości urządzeń do spawania elektrodą otuloną wynosi od 45-120 V. Wartość napięcia biegu jałowego określa łatwość zajarzenia łuku – im większa jego wartość tym łatwiej zajarzyć łuk. Podczas procesu spawania napięcie zmniejsza się do ok. 20-40 V, a w sytuacji zwarcia łuku spada do zera.

3. Długość łuku.

Długość łuku wpływa na charakter przechodzenia ciekłego metalu w łuku (zwarciovym, natryskowym) oraz na prędkość i efektywność procesu spawania [5]. Jego długość powinna wynosić około 0,5-1 średnicy elektrody d . Zbyt długi łuk daje duży rozprysk i ułatwia dostęp powietrza do strefy łuku, co powoduje porowatość spoin. Krótki łuk gwarantuje uzyskanie złącza

o lepszych właściwościach, jednak jego nadmierne skrócenie może spowodować zażuzlenie spoiny, a w skrajnych przypadkach przyklejenie elektrody.

4. Prędkość spawania.

Prędkość spawania najczęściej rozpatrywana jest jako prędkość przemieszczania się końca elektrody, szczególnie kiedy wykonuje ona ruch liniowy. Niekiedy jednak można ją interpretować jako prędkość wykonania odcinka spoiny, np. jednego metra, uwzględniając wtedy wszystkie czasy pomocnicze (wymiana elektrod, usuwanie zużła, itp.). Prędkość spawania zależy od rodzaju prądu, jego biegunowości i natężenia, napięcia łuku, pozycji spawania, prędkości stapiania elektrody, grubości spawanego materiału i kształtu złącza, dokładności dopasowania złącza oraz wymaganych ruchów końcówki elektrody [1-3,5].

5. Średnica elektrody.

Elektrody produkowane są w zakresie średnic: 1,6-6,0 mm i długości 150-450 mm [1-4, PN-M-69430:1991]. Najczęściej stosowane są jednak średnice 2,5; 3,25; 4,0; 5,0 i 6,0 mm, przy długościach 350 i 450 mm. Dobór odpowiedniej średnicy warunkuje przede wszystkim pozycja spawania, grubość łączonych elementów i kolejność układania ściegów. Prawdłowo dobrana średnica elektrody pozwala również przy prawidłowo dobranych parametrach spawania, uzyskać spoinę o wymaganym kształcie i wymiarach w możliwie najkrótszym czasie. Średnica elektrody otulonej decyduje o: gęstości prądu spawania, kształcie ściegu spoiny, głębokości wtopienia i możliwości spawania w pozycjach przymusowych.

6. Pochylenie elektrody.

Pochylenie elektrody pozwala na regulację kształtu spoiny, głębokości wtopienia, szerokości lica i wysokości nadlewu (rys. 2.6) [1-3]. Pochylenie elektrody w kierunku przeciwnym do kierunku spawania powoduje zmniejszenie głębokości wtopienia oraz wzrost wysokości i szerokości lica. Natomiast pochylenie elektrody w kierunku spawania powoduje wzrost głębokości wtopienia oraz zmniejszenie szerokości i wysokości lica [1,2]. W poradnikach oraz książkach o tematyce spawalniczej znaleźć można zalecenia odnośnie wartości kątów pochylenia elektrody dla wszystkich pozycji spawania.

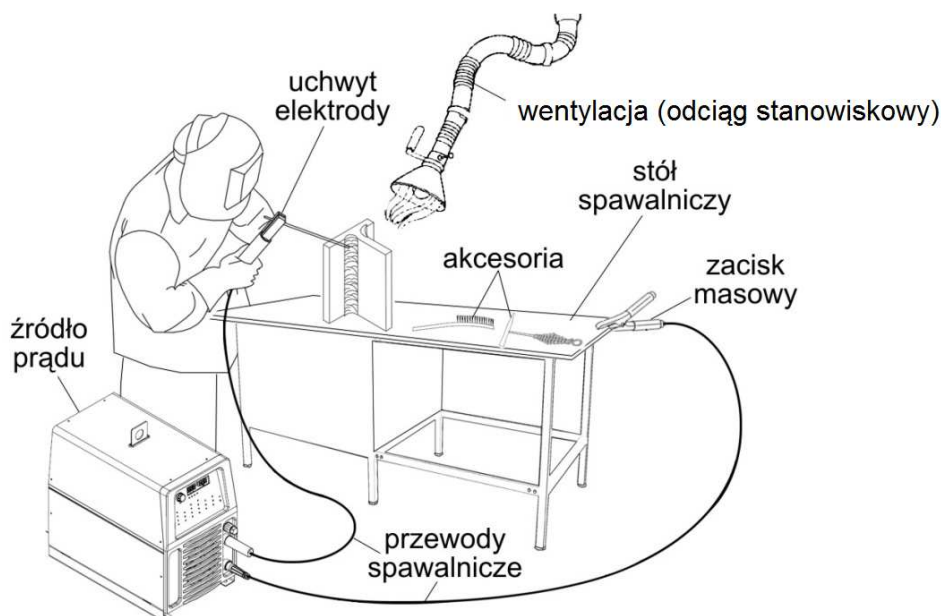


Rys. 2.6. Wpływ pochylenia elektrody na kształt spoiny [2,3]

2.4. STANOWISKO DO SPAWANIA ELEKTRODAMI OTULONYMI

W skład stanowiska do spawania elektrodami otulonymi wchodzi elementy podstawowe oraz akcesoria ułatwiające realizację procesu spawania (rys. 2.7) [3,4]:

- źródło prądu wraz z dwoma przewodami spawalniczymi, z czego jeden zakończony jest uchwytem elektrodowym, a drugi zaciskiem na masie. Ciepło niezbędne do stopienia elektrody oraz krawędzi łączonych materiałów jest generowane przez źródła prądu przemiennego tj. transformatory lub prądu stałego - najczęściej prostowniki lub inwertory spawalnicze. Nowoczesne źródła prądu charakteryzują się dużą stabilnością prądu, wysoką sprawnością energetyczną i małą masą. W szczególności źródła z układem wewnętrznej przemiany częstotliwości (inwertory spawalnicze) są kilkukrotnie lżejsze i mają większą o ok. 20% sprawność niż transformatory o podobnej mocy.
- stół spawalniczy z zaciskami mocującymi elementy łączone (wskazane, aby był wyposażony w pojemnik na elektrody i ogarki - pozostałości elektrod).
- wentylacja odciągająca dymy i pyły spawalnicze.
- akcesoria: młotek do odbijania żużla, skrobaki i szczotki do oczyszczania spoiny, kleszcze do pozycjonowania gorących przedmiotów, preparaty antyodpryskowe i akcesoria do oznaczania elementów. Do spawania niezbędna jest również odpowiednia odzież ochronna spawacza: maska (przyłbica) spawalnicza, kombinezon lub fartuch spawalniczy, niekiedy z osobnymi rękawami spawalniczymi, rękawice spawalnicze oraz obuwie ochronne.



Rys. 2.7. Wyposażenie stanowiska do spawania elektrodami otulonymi

2.5. ZASTOSOWANIE SPAWANIA ELEKTRODAMI OTULONYMI

Duży wybór elektrod, różne pozycje spawania oraz możliwość ustawiania parametrów w szerokim zakresie, powodują, iż metoda ta jest najbardziej uniwersalna, pozwalając na spajanie całej gamy materiałów inżynierskich. W większości przypadków jest to metoda ręczna, pomimo, że podejmowane są próby mechanizacji procesu (spawanie grawitacyjne, spawanie pod naciskiem sprężyny, spawanie elektrodą leżącą – metoda Harfeguta [1,2,5]). Prób mechanizacji spawania elektrodą otuloną nie znalazły jednak przemysłowego zastosowania na szeroką skalę.

Ręczne spawanie elektrodą otuloną można podzielić na następujące etapy:

- przygotowanie stanowiska, elementów łączonych i materiałów dodatkowych do spawania – ukosowanie rowka spawalniczego (niekiedy już od grubości łączonych elementów równej 3 mm), oczyszczanie mechaniczne blach i ich mocowanie lub/i szepianie,
- dobór elektrod – głównie gatunku, w zależności od rodzaju materiałów łączonych, a średnicy w zależności od grubości, suszenie elektrod,
- dobór parametrów spawania – rodzaju i natężenia prądu spawania, napięcia łuku, długości łuku, prędkości spawania i pochylenia elektrody,
- rozpoczęcie procesu spawania – zamocowanie elektrody w uchwycie i zajarzenie łuku,
- spawanie właściwe – kontrola przetopu/głębokości wtopienia przez utrzymywanie właściwej prędkości spawania i długości ruchu,
- zakończenie spawania,
- odbijanie żuźla i oczyszczanie spoiny.

Przed rozpoczęciem procesu spawania należy bezwzględnie sprawdzić stanowisko i urządzenia pod względem spełnienia warunków Bezpieczeństwa i Higieny Pracy.

2.6. ZALETY I WADY SPAWANIA ELEKTRODAMI OTULONYMI

Spawanie elektrodami otulonymi, jako bardzo uniwersalna metoda, charakteryzuje się wieloma zaletami, a mianowicie [1-5]:

- możliwe jest spawanie różnych rodzajów i gatunków metali i stopów: stali niestopowych i stopowych, żeliwa, niklu, miedzi i jej stopów,
- możliwe jest spawanie w każdej pozycji, w warunkach polowych (przy słabym wietrze), na wysokościach, a nawet pod wodą,
- zapewnia ono wysoka jakość i dobre własności mechaniczne spoin,
- możliwe jest spawanie cienkich (praktycznie od 1,5 mm) i grubych elementów (spoiny o grubościach powyżej 4 mm zaleca się wykonywać wielowarstwowo),
- umożliwia wykorzystywanie prostych w obsłudze, przenośnych i stosunkowo tanich urządzeń do spawania.

Jak każda metoda spawania, także spawanie elektrodami otulonymi wykazuje wady, do których można zaliczyć [1-5]:

- małą wydajność spawania (ok. 1-5 kg stopiwa/h), szczególnie uciążliwą przy spawaniu grubych elementów,
- małą prędkość spawania (ok. 0,1-0,4 m/min.),
- konieczność usuwania żużla i wymiany elektrod, co dodatkowo zmniejsza wydajność procesu,
- większy współczynnik strat na rozprysk,
- duże uzależnienie jakości spoin od umiejętności spawacza,
- jest metodą spawania z największą skłonnością do powstawania niezgodności,
- duża wrażliwość na wilgoć – szczególnie elektrod zasadowych,
- duża ilość wydzielanych gazów i dymów spawalniczych,
- stosunkowo duży koszt materiałów dodatkowych (elektrod) w porównaniu z innymi metodami.

2.7. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Omówienie zagrożeń i obowiązujących warunków bezpiecznej pracy.
2. Omówienie budowy i sposobu działania źródeł prądu do spawania elektrodą otuloną.
3. Przygotowanie stanowiska, materiałów łączonych i dodatkowych do spawania.
4. Przedstawienie sposobów oczyszczania powierzchni elementów łączonych, ukosowania oraz zasad wykonania spoin szepnych.
5. Omówienie parametrów cyklu cieplnego suszenia elektrod otulonych.
6. Demonstracja sposobów zajarzenia łuku spawalniczego, właściwego prowadzenia elektrody oraz zakończenia procesu spawania.
7. Zaprezentowanie wpływu zmiany parametrów spawania oraz gatunku elektrody na właściwości i wygląd spoin.
8. Zaprezentowanie wpływu gatunku elektrod na właściwości i wygląd spoin.
9. Omówienie możliwych zakłóceń procesu spawania elektrodą otuloną.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu podać:

- opis i schemat stanowiska,
- opis elektrod stosowanych do spawania,
- przebieg procesu spawania,
- ocenę złączy,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] KLIMPEL A., *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. Technologie*, WNT, Warszawa 1999.
- [2] KLIMPEL A., *Technologia spawania i cięcia metali*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [3] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 2, WNT, Warszawa 2005.
- [4] WARSZ K., *Spawanie łukowe elektrodą otuloną*, Opracowanie Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, Kurs Europejskiego Inżyniera Spawalnika EWE.
- [5] KAPIŃSKI S., MOSZUMAŃSKI J., RADWAN-WIATROWSKI K.: *Laboratorium z podstaw spawalnictwa*, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [6] FERENC K., *Spawalnictwo*, WNT, Warszawa 2007.
- [7] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 1, WNT, Warszawa, 2003.

WYKAZ NORM

- PN-EN ISO 2560:2010 Materiały dodatkowe do spawania. Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego elektrodą metalową stali niestopowych i drobnoziarnistych. Klasyfikacja.
- PN-M-69430:1991 Spawalnictwo. Elektrody stalowe otulone do spawania i napawania. Ogólne wymagania i badania.

3. SPAWANIE W OSŁONACH GAZOWYCH

3.1. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ TOPLIwą W GAZACH OCHRONNYCH

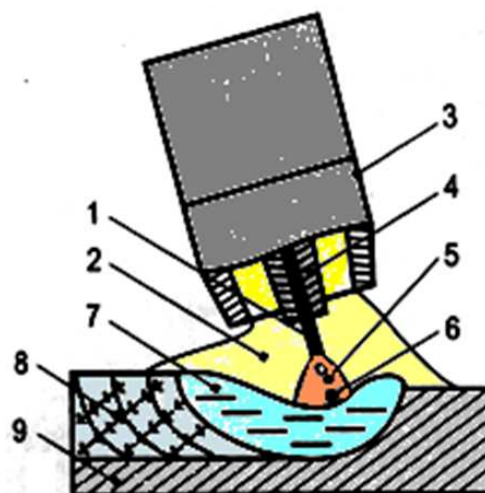
CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie studenta z:

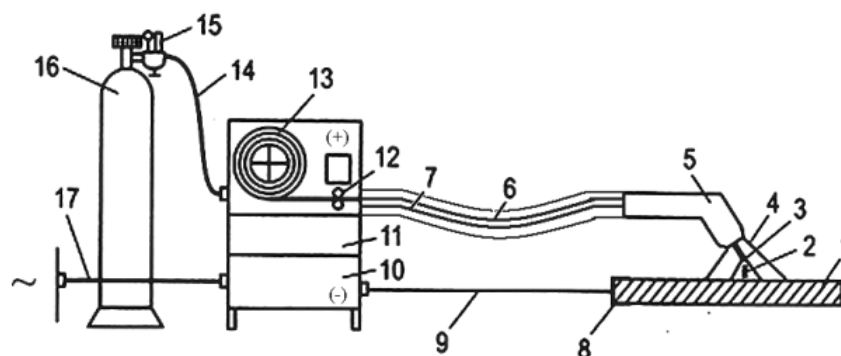
- rolę ochrony gazowej przy spawaniu łukowym,
- metodą spawania elektrodą topliwą, metoda GMA (MIG/MAG),
- podstawowymi parametrami spawania.

3.1.1. WPROWADZENIE

Jedną z najczęściej stosowanych metod łączenia konstrukcji stalowych jest spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonach gazowych – GMA (z ang. Gas Metal Arc). W praktyce spawalniczej proces ten dzielony jest na; MIG (z ang. Metal Inert Gas), który dotyczy wytwarzania konstrukcji spawanych w obojętnych osłonach gazowych takich jak argon i hel, oraz MAG (z ang. Metal Active Gas), do którego z kolei stosowane są aktywne chemicznie gazy osłonowe, takie jak; CO₂, O₂, H₂, N₂, NO – stosowane samodzielnie, lub jako dodatki do helu czy argonu. Źródłem energii cieplnej, potrzebnej do stopienia spawanego elementu i materiału elektrody topliwiej (drułu), jest ciepło łuku elektrycznego jarzącego się pomiędzy elektrodą a spawanym przedmiotem, w osłonie gazu aktywnego lub obojętnego (rys. 3.1. i 3.2.). Nawinięty na szpulę drut elektrodowy jest podawany w sposób ciągły, za pomocą podajnika drutu do obszaru spawania. Doprowadzenie prądu do drutu elektrodowego następuje przez styk prądowy. Proces spawania GMA prowadzony jest głównie prądem stałym z biegunowością dodatnią i stosowany jest do wykonywania wysokiej jakości połączeń metali. Roztopiony metal drutu elektrodowego przechodzi do jeziora spawalniczego. Metal jeziora spawalniczego, w miarę przemieszczania się łuku w kierunku spawania, krzepnąc, tworzy spoinę łączącą brzegi elementu spawanego. Elektroda topliwa stosowana jest w postaci drutu pełnego o średnicy 0,5 do 4,0 mm i jest podawana ze stałą prędkością, równą prędkości jej stapiania wynoszącej od 2,5 do 50 m/min. Z uwagi na możliwość poprawy wydajności procesu spawania od wielu lat wprowadza się do spawania w gazach ochronnych topniki pod postacią wypełnienia drutów proszkowych, dotychczas nazywanych drutami rdzeniowymi.



Rys. 3.1. Schemat metody spawania GMA: 1-drut elektrodowy, 2-gaz osłonowy, 3-dysza gazowa, 4-styk prądowy (końcówka prądowa), 5-łuk spawalniczy, 6-krople metalu elektrody, 7-jeziorko spawalnicze, 8-zakrzepła spoina, 9-element spawany [1]

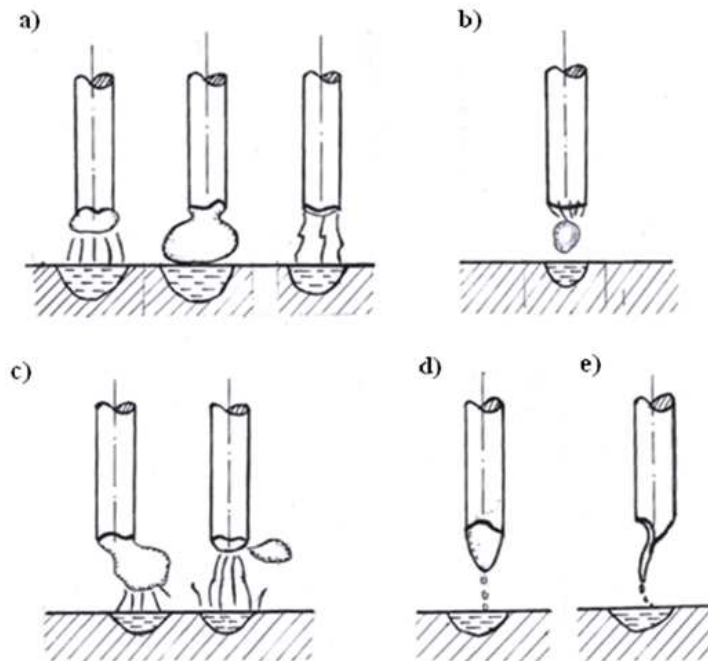


Rys. 3.2. Schemat stanowiska do spawania metodą GMA; 1-element spawany, 2-łuk spawalniczy, 3-drut elektrodowy, 4-gaz osłonowy (osłona gazowa łuku i metalu jeziora spawalniczego), 5-uchwyt spawalniczy MIG/MAG (palnik), 6-przewód podający drut elektrodowy, 7-przewód uchwyty spawalniczego (przewód doprowadzający gaz osłonowy, prąd i ewentualnie ciecz chłodzącą), 8-zacisk przewodu spawalniczego, 9-przewód spawalniczy (prądowy) przyłączony do elementu spawanego, 10-źródło prądu spawania, 11-zespół chodzenia cieczą (opcja wyposażenia), 12-podajnik drutu elektrodowego, 13-szpuła z drutem elektrodowym, 14-wąż gazu osłonowego, 15-reduktor i przepływomierz gazu osłonowego, 16-butla z gazem osłonowym, 17-połączenie źródła prądu spawania z siecią elektryczną [1]

3.1.2. PARAMETRY SPAWANIA METODĄ MIG/MAG

Przy niskim natężeniu prądu elektroda w osłonie gazów stapia się ze zwarciovym przejściem kropel do jeziora (rys. 3.3a). Zwiększenie natężenia prądu i napięcia łuku powoduje grubokropłowe przejście materiału, przy czym w osłonie gazów obojętnych stapia się bez rozprysków (rys. 3.3b), natomiast w osłonie gazów aktywnych chemicznie krople przenoszone są przez łuk nieosiowo, co powoduje rozprysk, nawet przy znacznym zwiększeniu natężenia prądu (rys. 3.3c). Przy zastosowaniu osłony gazowej, zawierającej powyżej 80% gazu obojętnego (argonu lub helu), przy

natężeniu prądu powyżej określonej wartości, zwanej wartością krytyczną, charakter przenoszenia metalu staje się osiowy względem łuku (wzdłuż osi elektrody) i drobnokropłowy, zwany natryskowym (rys. 3.3d). Gdy prąd spawania przekroczy drugą wartość krytyczną, krople metalu przenoszone są ruchem wirowym, po torze spiralnym do jeziora ciekłego metalu (rys. 3.3e). Jest to spowodowane wysokim natężeniem prądu, powodującym wyginanie końca drutu przez siły elektromagnetyczne łuku.



Rys. 3.3. Schemat przejścia kropli metalu do jeziora spawalniczego przy spawaniu metodą GMA: a) zwarciowe, b) grubokropłowe osiowo, c) grubokropłowe nieosiowo, d) natryskowe, e) spiralne

Do podstawowych parametrów spawania metodą MIG/MAG zalicza się:

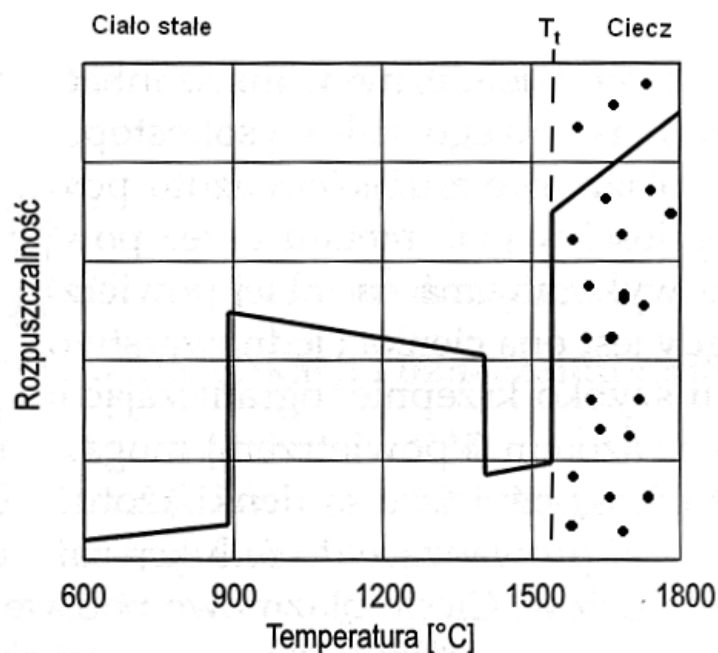
- rodzaj i natężenie przepływu gazu osłonowego [l/min],
- rodzaj drutu elektrodowego i długość wolnego wylotu elektrody [mm],
- natężenie prądu [A],
- napięcie łuku [V],
- prędkość spawania [mm/min],
- prędkość podawania drutu elektrodowego [m/min],
- średnica drutu elektrodowego [mm],
- pochylenie drutu elektrodowego (°).

3.1.3. GAZ OSŁONOWY

Na efektywność osłony gazowej łuku wpływają przede wszystkim chemiczne i fizyczne właściwości gazu. Gaz osłonowy powinien, z definicji, zapobiegać zachodzeniu niepożądanych reakcji między ciekłym stopiwem, metalem złącza nagrzanym do wysokiej temperatury i otaczającą atmosferą. W procesach MIG/MAG

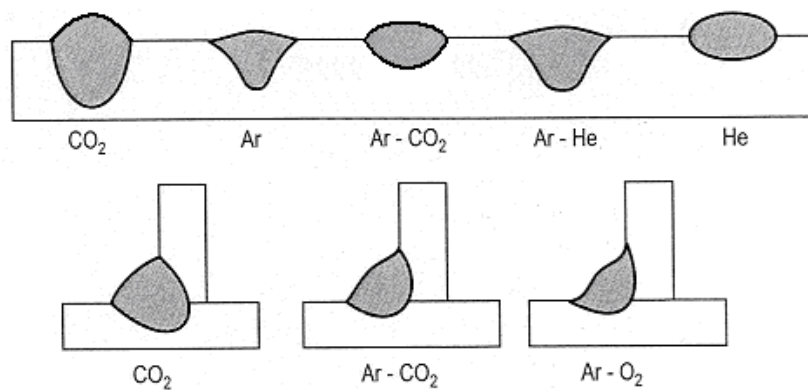
gaz powinien zapobiegać niekorzystnym reakcjom pomiędzy materiałem końca drutu, kroplami metalu oraz otoczeniem łuku. Najczęściej występującymi gazami aktywnymi, które mogą powodować problemy podczas spawania, są: tlen, azot i wodór. Tlen i azot pochodzą z otaczającego miejsce spawania powietrza, a wodór powstaje w wyniku rozkładu pary wodnej lub węglowodorów. Większość materiałów podgrzanych w atmosferze utleniającej tworzy tlenki, podczas gdy azot może tworzyć nierozpuszczalne azotki z pierwiastkami bardzo aktywnymi chemicznie, np. Ti, Ta, V, Nb.

Reakcje metalu zachodzące w jeziorce spawalniczym i wysoka temperatura ciekłego metalu mogą w efekcie powodować rozpuszczanie dużych ilości wodoru lub azotu (rys. 3.4), lecz z uwagi na małą rozpuszczalność tych gazów w stanie stałym nadmiar gazu powinien wydzieląć się przed zakrzepnięciem spoiwa. Jeżeli pęcherzyki gazu nie wydzielą się przed zakrzepnięciem spoiwa, to w efekcie powstaną pory, a w stalach konstrukcyjnych pęknięcia.



Rys. 3.4. Schemat rozpuszczalności gazów w żelazie w funkcji temperatury [1]

Wodór stanowi zasadniczą przyczynę porowatości stopów aluminium, natomiast azot – stali. Gaz ochronny ma za zadanie osłaniać obszar spawania, ale wpływa również na prędkość spawania, kształt lica spoiwa i głębokość wtopienia (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Wpływ składu osłony gazowej na kształt wtopienia [1]

Klasyfikacja, system oznaczania i skład chemiczny gazów osłonowych do spawania są określone w normie PN-EN ISO 14175:2008. Ustala ona podział gazów osłonowych, w powiązaniu z ich właściwościami chemicznymi, jako podstawę do dopuszczenia dla kombinacji drut - gaz osłonowy. Gazem osłonowym może być gaz pierwiastkowy (atom lub cząsteczka), związek chemiczny (np. CO₂) lub ich mieszanki.

W zależności od sposobu chemicznego reagowania gazu osłonowego, stosowanego w czasie procesu spawania, podzielono je na grupy oznaczone następującymi literami:

I – gazy obojętne i mieszanki obojętne,

M – mieszanki utleniające na bazie argonu, zawierające O₂ i/lub CO₂,

C – dwutlenek węgla i mieszanki na bazie CO₂.

W każdej grupie występują podgrupy, oznaczone tzw. liczbą charakteryzującą (tab. 3.1) określającą zawartość składników gazu osłonowego. Gazy osłonowe oznacza się numerem normy, numerem grupy i liczbą charakteryzującą.

Tabela 3.1. Klasyfikacja gazów osłonowych utleniających i obojętnych do łukowego spawania MIG/MAG (wg PN-EN ISO 14175:2009)

Oznaczenie ¹⁾		Składniki [% obj.]				Typowe zastosowanie, uwagi
Grupa	Liczba charakteryzująca	Utleniające		Obojętne		
		CO ₂	O ₂	Ar	He	
I	1			100		MIG (obojętne)
	2				100	
	3			Reszta ²⁾	0-95	
M1	1	0-5		Reszta ²⁾		(słabo utleniające)
	2	0-5		Reszta ²⁾		
	3		0-3	Reszta ²⁾		
	4	0-5	0-3	Reszta ²⁾		
M2	1	5-25		Reszta ²⁾		MAG
	2		3-10	Reszta ²⁾		
	3	3-5	3-10	Reszta ²⁾		
	4	5-25	3-8	Reszta ²⁾		
M3	1	25-50	10-15	Reszta ²⁾		
	2		10-15	Reszta ²⁾		
	3	5-50	8-15	Reszta ²⁾		
C	1	100				
	2	Reszta	0-30			
¹⁾ Jeżeli do mieszanki są dodane inne składniki nie wyszczególnione w tabeli, wówczas mieszanka stanowi gaz specjalny i jest oznaczana dodatkowo literą S. Szczegóły oznaczania literą S podano w normie ²⁾ Argon może być zastąpiony helem do zawartości 95%						

Przykłady oznaczania:

- gaz osłonowy PN-EN 14175:2009 – I1 (zawiera 100% Ar),
- gaz osłonowy PN-EN 14175:2009 – I3 (zawiera np. 30% He + 70% Ar),
- gaz osłonowy PN-EN 14175:2009 – M24 (zawiera np. 10% CO₂ + 3% O₂ + 87% Ar).

Gazy osłonowe, które z uwagi na ich skład chemiczny nie zostały umieszczone w tabeli 3.1, są oznaczone jako specjalne i otrzymują dodatkowo literę S na początku oznaczenia.

Efektywność osłony łuku zależy również od wielu czynników technologicznych, z których najważniejsze to:

- Wydatek gazu. Zbyt mały wydatek gazu niedostatecznie wypiera powietrze z obszaru łuku, zaś nadmierna prędkość wypływu powoduje turbulencję strumienia gazu i zasysanie powietrza do osłony. W przypadku argonu i dwutlenku węgla oraz innych mieszanek sprawdzoną w praktyce zasadą jest ustalenie wydatku w ilości 1 l/min na każdy milimetr wewnętrznej średnicy dyszy gazowej (zwykle ok. 12 l/min). Gazy o mniejszej gęstości, na przykład hel i jego mieszanki z argonem, wymagają proporcjonalnie większego wydatku gazu. Stosowanie pochłaniacza dymów na uchwycie palnika wymaga zwiększenia wydatku gazu o około 10–15%.
- Natężenie prądu. Zwiększenie natężenia prądu spawania wymaga stosowania większego wydatku gazu. Jest to związane ze wzrostem prężności par topionych metali, z dysocjacją gazów, z większą ilością oparów i dynamiką procesu w łuku oraz większym jeziorkiem spawalniczym.
- Pozycja spawania. Wpływ pozycji spawania należy kojarzyć z gęstością gazu. Na przykład, spawane w pozycji podolnej wymaga zwiększonego wydatku gazu lżejszego od powietrza, natomiast w pozycji pionowej w górę nie jest to konieczne.
- Rodzaje złącza. Spawanie w zewnętrznych narożach (o kącie rozwartym) złączy kątowych wymaga zwiększonego wydatku gazu, a spawanie w wewnętrznych narożach złączy jego zmniejszanie w porównaniu ze spawaniem złączy doczołowych płaskich.

Gazy osłonowe wpływają zarówno na skład chemiczny, strukturę, jak i właściwości mechaniczne i korozyjne stopiwa oraz spoiny. Rodzaj osłony (utleniająca, redukująca, nawęglająca) i poziom jej aktywności chemicznej może w pewnym stopniu zmienić te właściwości. Tylko osłony całkowicie chemicznie obojętne (Ar, He) nie oddziałują na skład i strukturę topionego metalu. Aktywne gazy osłonowe wpływają na właściwości stopiwa przez zmianę ilości zawartych w nim pierwiastków.

W przypadku stali niestopowych i niskostopowych główne zagadnienie dotyczy utleniania (wypalania) przede wszystkim Mn, Ni, Si, C tlenem, będącym składnikiem mieszanki gazowej i zawartym w CO₂ (w łuku następuje dysocjacja CO₂), może wystąpić również wzrost zawartości węgla, gdy spawanie odbywa się w osłonie bogatej w CO₂.

Gazy obojętne (Ar, He) doskonale chronią jeziorko spoiny, ale lepiej się spawa przy dodatku gazów aktywnych chemicznie. Dodatek CO₂, O₂, NO powoduje wzrost natężenia prądu krytycznego, ale jednocześnie poprawia stabilność jarzenia się łuku - zmniejsza się rozprysk, a zwiększa wydajność spawania oraz znacząco wpływa na obniżenie kosztów spawania. Z gazów aktywnych tylko CO₂ był w przeszłości stosowany samodzielnie do spawania złączy ze stali węglowych i niektórych niskostopowych. Jednakże, z uwagi m. in. na duże ilości powstających rozprysków i wypalanie składników stopowych, obecnie do spawania stali stosuje się głównie mieszaniny gazu zawierające ponad 80% argonu.

3.1.4. DRUT ELEKTRODOWY

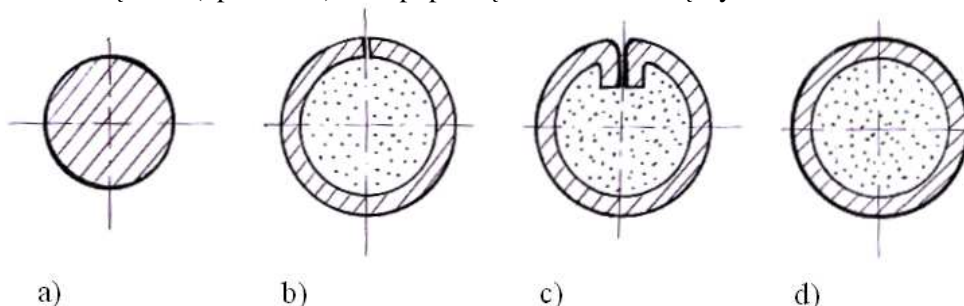
Najczęściej stosuje się druty elektrodowe o średnicy 0,8; 1,0 i 1,2 mm. Drut jest najczęściej pomiedziowany w celu zapewnienia dobrego kontaktu prądowego z końcówką prądową (rzadziej niklowany) oraz zapobieżenia korozji. Skład chemiczny najczęściej stosowanych drutów elektrodowych podano w tab. 3.2. Należy zwrócić uwagę na to, że druty do spawania metodą MAG zawierają większą ilość, niż spawane stale, składników odtleniających (Si, Mn), wprowadzonych w celu odtlenienia ciekłego metalu w jeziorce spawalniczym i zapobieżenia powstawaniu porowatości w spoinach. Przy spawaniu metodą MIG stosuje się najczęściej druty elektrodowe o składzie zbliżonym do spawanych materiałów. Najczęściej stosuje się dwa rodzaje drutów elektrodowych (G2Si1 i G3Si1), różniące się przede wszystkim zawartością krzemu i manganu.

Tabela 3.2. Symbol drutu elektrodowego do spawania metodą MAG zależy od jego składu chemicznego (wg PN-EN ISO 14175:2009)

Symbol	Skład chemiczny [% wag.] ^{1), 2)}								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti Zr
G2Si1	0,06- 0,14	0,50- 0,80	0,90- 1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G3Si1	0,06- 0,14	0,70- 1,00	1,30- 1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15

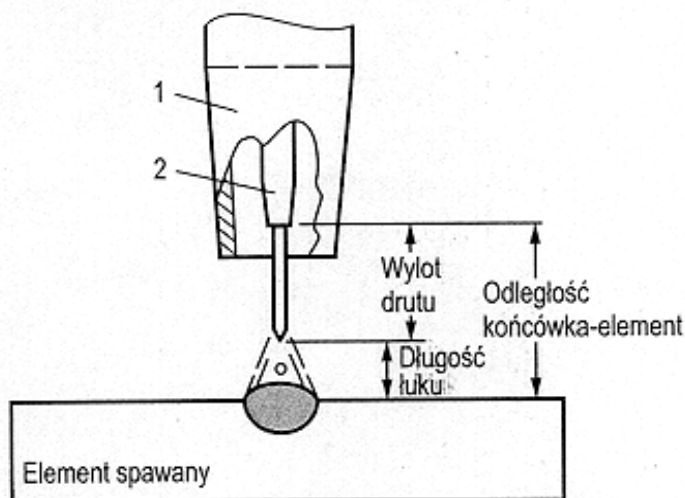
¹⁾ Pojedyncze wartości w tabeli są wartościami maksymalnymi.
²⁾ Jeśli nie ustanowiono inaczej: Cr<0,25%; V<0,03%; Cu<0,35% (zawartość miedzi w stali i w powłoce miedzianej pręta/drutu)

Oprócz drutów pełnych coraz częściej stosuje się druty proszkowe (rdzeniowe) w postaci rurek z różnymi sposobami zamknięcia, wypełnionych materiałem proszkowym (rys. 3.6). Umożliwiają one zwiększenie wydajności spawania, lepsze jarzenie się łuku (np. w CO₂) oraz poprawę właściwości złączy.



Rys. 3.6. Schemat przekrojów przykładowych drutów spawalniczych: a) drut pełny z pokryciem miedzianym, b) drut proszkowy ciągniony, c) szew zamykany bez walcowania, d) ciągła koszulka (osłona)

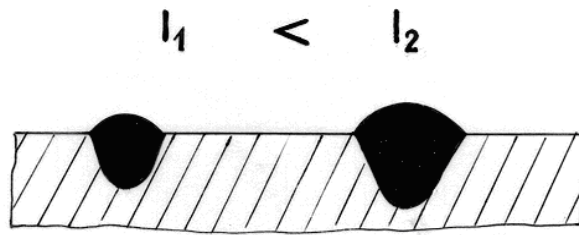
Wylot drutu elektrodowego jest odległością od końca drutu elektrodowego do najbliższego punktu kontaktu elektrycznego końcówki prądowej (rys. 3.7). Ma ona wpływ na intensywność podgrzewania oporowego drutu między stykiem prądowym a stapiającym się końcem elektrody. Wylot drutu dobiera się w zależności od rodzaju i średnicy drutu elektrodowego, natężenia prądu i pozostałych parametrów spawania. W przypadku spawania metodą MAG łukiem zwarciovym wynosi on najczęściej 6–15 mm, a łukiem natryskowym 18–25 mm. Im większa jest długość wylotu drutu elektrodowego, przy tym samym natężeniu prądu spawania, tym większa jest wydajność stapiania drutu (wskutek większego nagrzewania oporowego drutu). Przy zbyt dużym wylocie drutu elektrodowego obserwuje się zakłócenia stabilności jarzenia się łuku (strzelanie łuku), czemu towarzyszy nadmierna ilość rozprysków.



Rys. 3.7. Wylot drutu elektrodowego i odległość między końcówką prądową, a elementem spawanym; 1- dysza gazowa, 2-końcówka prądowa [2]

3.1.5. PRĄD SPAWANIA

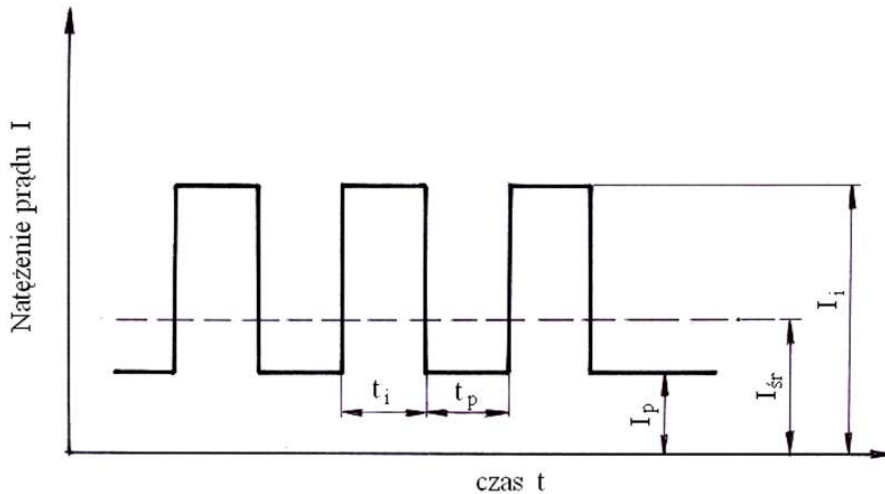
Natężenie prądu spawania decyduje o wydajności stapiania elektrody oraz kształcie i głębokości wtopienia. Spawanie prądem stałym z biegunowością ujemną w osłonie gazów obojętnych, czy aktywnych chemicznie, bez względu na natężenie prądu powoduje nieosiowe i grubokropłowe przenoszenie metalu przez jarzący się łuk elektryczny, z tego względu przy metodzie GMA stosuje się biegunowość dodatnią (tj. podłączenie uchwytu spawalniczego do „+” źródła prądu). W przypadku małego natężenia prądu (przejście kropel zwarciovych lub grubokropłowe), przetopienie ma kształt owalny, a przy natężeniu prądu powyżej krytycznego, gdy przejście kropel jest natryskowe, przetopienie ma miejscowe zagłębienie. Natężenie prądu dobiera się, przy danej średnicy drutu, w zależności od grubości spoiny, a więc od materiału spawanego. Zazwyczaj spawa się maksymalnie dużym natężeniem prądu, gdyż przez to wzrasta wydajność spawania. Zwiększenie natężenia prądu powoduje zwiększenie głębokości wtopienia oraz szerokości spoiny, a także uzyskuje się wyższe lico spoiny (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Wpływ wielkości natężenia prądu spawania na głębokość wtopienia [2]

W obecnie stosowanych urządzeniach spawalniczych wartość natężenia prądu jest najczęściej sprzężona z regulacją prędkości podawania drutu elektrycznego, tj. poprzez zwiększenie prędkości podawania drutu następuje zwiększenie natężenia prądu.

Pewną odmianą metody GMA jest spawanie prądem stałym pulsacyjnym, polegające na nakładaniu krótkotrwałych impulsów prądu na podstawowy prąd jarzącego się w sposób ciągły łuku z biegunowością dodatnią. Pozwala to na zmniejszenie natężenia prądu krytycznego w porównaniu do spawania prądem stałym z biegunowością dodatnią oraz na zwiększenie prędkości topienia elektrody. Schemat przebiegu prądu w czasie spawania prądem pulsującym pokazano na rys. 3.9.

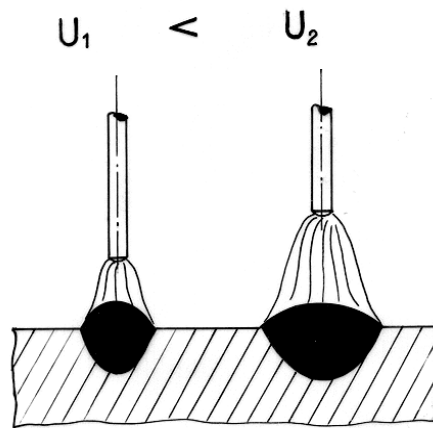


Rys. 3.9. Schemat przebiegu prądu w czasie spawania prądem pulsującym (I_{sr} – średnie natężenie prądu, I_p – natężenie prądu podstawowego, I_i – natężenie prądu w czasie impulsu, t_i – czas trwania impulsu, t_p – czas przerwy)

3.1.6. NAPIĘCIE ŁUKU

Napięcie łuku zależy od rodzaju stosowanej osłony gazowej. Wzrost napięcia łuku wpływa na zwiększenie szerokości ściegu spoiny i zmniejszenie głębokości wtopienia (rys. 3.10). Zbyt duże napięcie łuku prowadzi do powstawania rozprysku, porowatości i podtopień lica spoiny. Zbyt małe napięcie łuku natomiast powoduje, że spoiny są porowate i pojawiają się nacieki na licu. Poprawny dobór napięcia zależy od wielu czynników, m.in.: rodzaju i natężenia prądu spawania, składu gazu osłonowego,

rodzaju i średnicy elektrody, składu spawanego materiału, grubości złącza i rodzaju spoiny oraz od pozycji spawania. Należy pamiętać, że obszar optymalnych parametrów jest stosunkowo wąski, a zwiększając natężenie prądu należy nieco zwiększyć napięcie łuku.



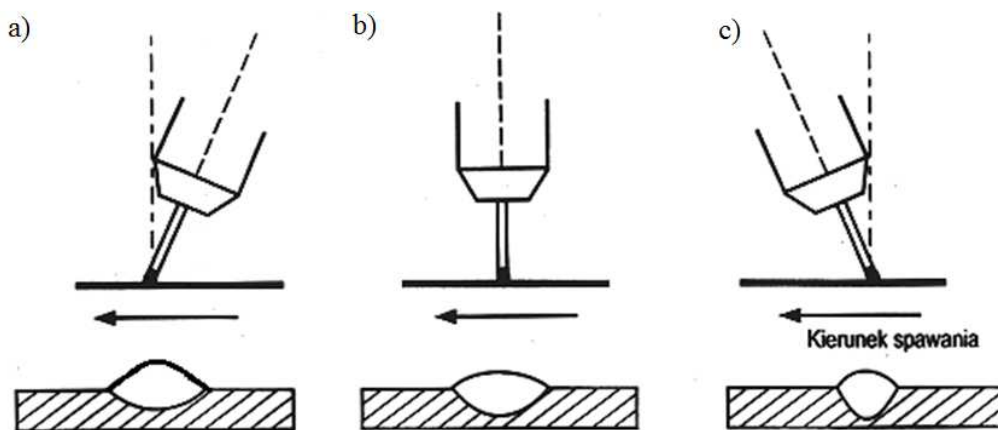
Rys. 3.10. Wpływ napięcia łuku spawalniczego na geometrię powstającej spoiny [2]

3.1.7. PRĘDKOŚĆ SPAWANIA

Prędkość spawania zależy w dużym stopniu od natężenia prądu i napięcia łuku oraz od zachowania odpowiedniego kształtu ściegu spoiny. Zwiększenie prędkości spawania powoduje, że spoina staje się węższa i zmniejsza się głębokość wtopienia. Małe prędkości spawania powodują, że zwiększa się głębokość wtopienia, lico spoiny znacznie się poszerza i zwiększa się wysokość nadlewu spoiny.

3.1.8. POCHYLENIE DRUTU ELEKTRODOWEGO

Pochylenie drutu elektrodowego w kierunku spawania zwiększa głębokość wtopienia (rys. 3.11c), pochylenie zaś w przeciwnym kierunku zmniejszają, z jednoczesnym zwiększeniem wysokości nadlewu spoiny (rys. 3.11a). Przy spawaniu w pozycji pionowej, podczas spawania z góry w dół, uzyskuje się mniejszą głębokość wtopienia niż podczas spawania z dołu do góry. Przy spawaniu złączy doczołowych palnik powinien być zawsze usytuowany w osi spoiny. Przy wykonywaniu natomiast złączy teowych spoinami pachwinowymi, powinno się palnik utrzymywać pod kątem 45° , przy skierowaniu wychodzącego drutu do krawędzi styku elementów.



Rys. 3.11. Wpływ kąta pochylenia drutu elektrodowego na kształt wtopienia [2]

3.1.9. ZASTOSOWANIE METODY MIG/MAG

Spawanie metodą MIG/MAG jest obecnie najczęściej stosowaną metodą spawania. Może być prowadzone w sposób półautomatyczny i automatyczny, na stanowiskach zrobotyzowanych, we wszystkich pozycjach spawalniczych. Typowy zakres grubości spoin czołowych to około 1,5–20 mm, spoin pachwinowych 3–12 mm. Możliwe jest spawanie wieloelektrodowe oraz wąskoszczelinowe.

Metoda MIG/MAG stosowana jest do łączenia m.in.: stali węglowych i niskostopowych, stali odpornych na korozję, stali specjalnych oraz aluminium, magnezu, miedzi, niklu, tytanu i ich stopów. Metoda MIG/MAG stosowana jest również do lutospawania łukowego (drut elektrody jest wówczas lutem), np. do wykonywania połączeń blach ocynkowanych oraz połączeń różnoimiennych, np. miedzi ze stalą, stali z aluminium itp.

Do zalet metody MIG/MAG zalicza się:

- wysoką wydajność procesu,
- możliwość spawania szerokiego asortymentu materiałów,
- możliwość mechanizacji i robotyzacji procesu,
- łatwość operowania lutem spawalniczym,
- możliwość obserwacji jeziora i łuku spawalniczego.

Natomiast do wad należy zaliczyć:

- uzależnienie jakości złącza od manualnych zdolności spawacza,
- mniejszy asortyment gatunków drutów elektrodowych niż elektrod otulonych do ręcznego spawania,
- możliwość zakłócenia osłony gazowej przez podmuchy powietrza.

3.1.10. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Przedstawienie i omówienie budowy i działania stanowiska spawalniczego.
2. Wykonanie napoin na próbkach stalowych z różnymi parametrami spawania (zwarciowe, kropłowe, natryskowe).

3. Wykonanie złączy doczołowych i pachwinowych.
4. Omówienie powstałych połączeń.
5. Dyskusje na temat zastosowania metody.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu podać:

- schemat stanowiska,
- parametry technologiczne spawania (rodzaj i ilość gazu, natężenie prądu spawania, napięcie łuku, prędkość spawania, rodzaj drutu elektrodowego,
- ocena wyglądu spoin i napoin,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 1 i 2, WNT, Warszawa 2003, 2005.
[2] BAUM L., FICHTER V., *Der Schutzgasschweißer, Teil II: MIG-/MAG- Schweißen*, DVS, Band 12, Düsseldorf 1999.

WYKAZ NORM

- PN-EN ISO 14341:2008 Spawalnictwo - Materiały dodatkowe do spawania - Druty elektrodowe i spoiwo do spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów stali niestopowych i drobnoziarnistych - Oznaczenie.
PN-EN ISO 14175:2009 Spawalnictwo - Materiały dodatkowe do spawania - Gazy osłonowe do łukowego spawania i cięcia.

3.2. SPAWANIE ŁUKOWE ELEKTRODĄ NIETOPLIwą W GAZACH OCHRONNYCH

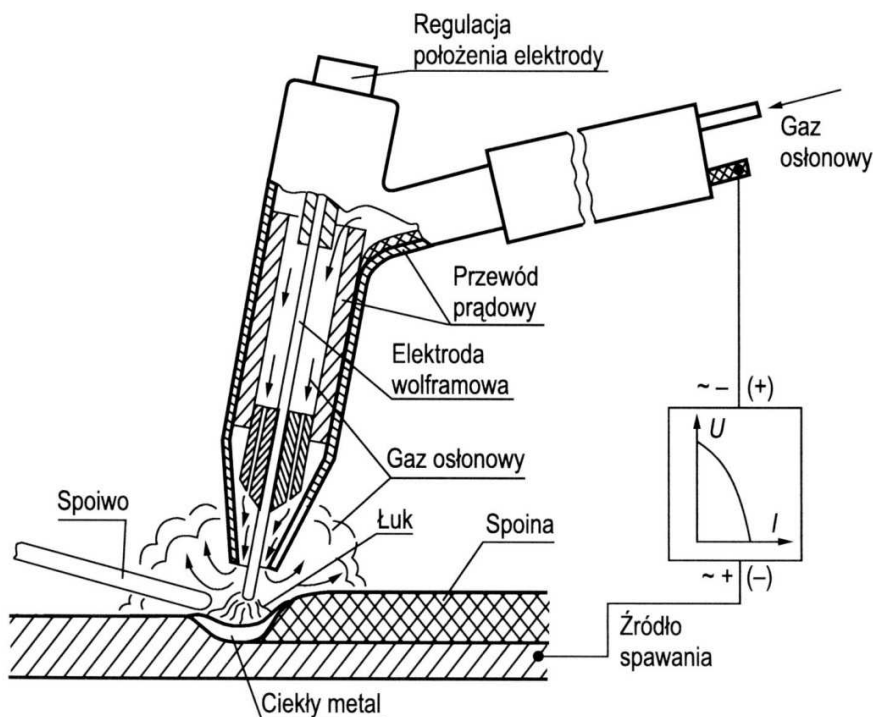
CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie studentów z:

- metodą spawania TIG,
- procesami spawalniczymi zachodzącymi podczas wykonywania połączenia,
- wadami oraz zaletami metody.

3.2.1. WPROWADZENIE

Spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazów TIG (ang. Tungsten Inert Gas), to metoda pozwalająca uzyskać wysoką jakość połączeń oraz umożliwiającą łączenie prawie wszystkich metali i ich stopów. W procesie spawania metodą TIG (rys. 3.12) ciepło wytworzone zostaje w łuku elektrycznym, jarzącym się pomiędzy elektrodą wolframową, a materiałem spawanym, powodując stąpienie brzegów łączonych elementów i spoiwa. Spawanie przebiega w osłonie gazu obojętnego (argon, hel lub ich mieszanek), możliwe jest również spawanie w mieszance redukującej argonu z wodorem (spawanie stali austenitycznych). Elektroda wolframowa nie topi się w trakcie spawania. Rowek spawalniczy jest zatem wypełniany stapianym materiałem dodatkowym (w postaci pręta lub drutu). Spoiny są czyste i mają dobre własności mechaniczne.

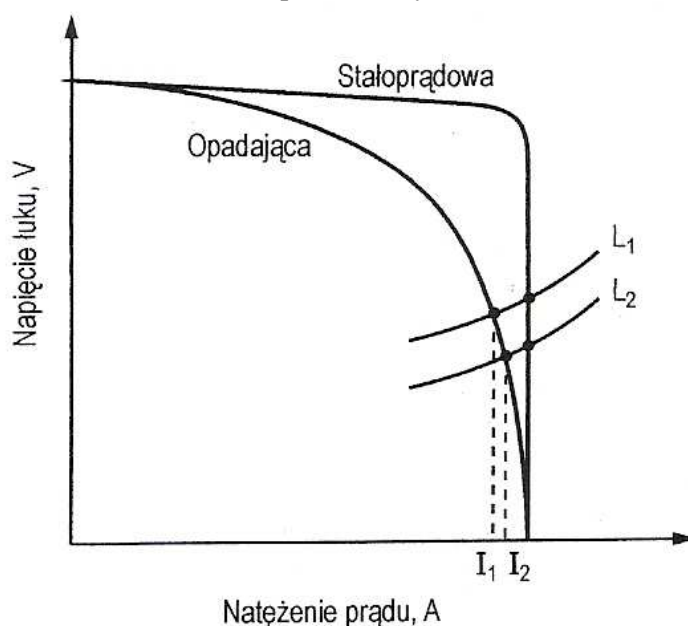


Rys. 3.12. Zasada spawania metodą TIG [1]

Metodą TIG można spawać we wszystkich pozycjach przestrzennych w sposób ręczny, zmechanizowany, półautomatyczny lub automatyczny. Pomimo, iż zakres grubości spawanych materiałów metodą TIG jest bardzo szeroki (od grubości mniejszych niż 1mm do kilkudziesięciu milimetrów), to w praktyce używa się jej do łączenia elementów o grubościach do kilku milimetrów. Natomiast w przypadku elementów grubościennych, spawania metodą TIG używa się zwykle do wykonania ściegów graniowych, następnie wypełniając rowek bardziej wydajnymi metodami spawalniczymi.

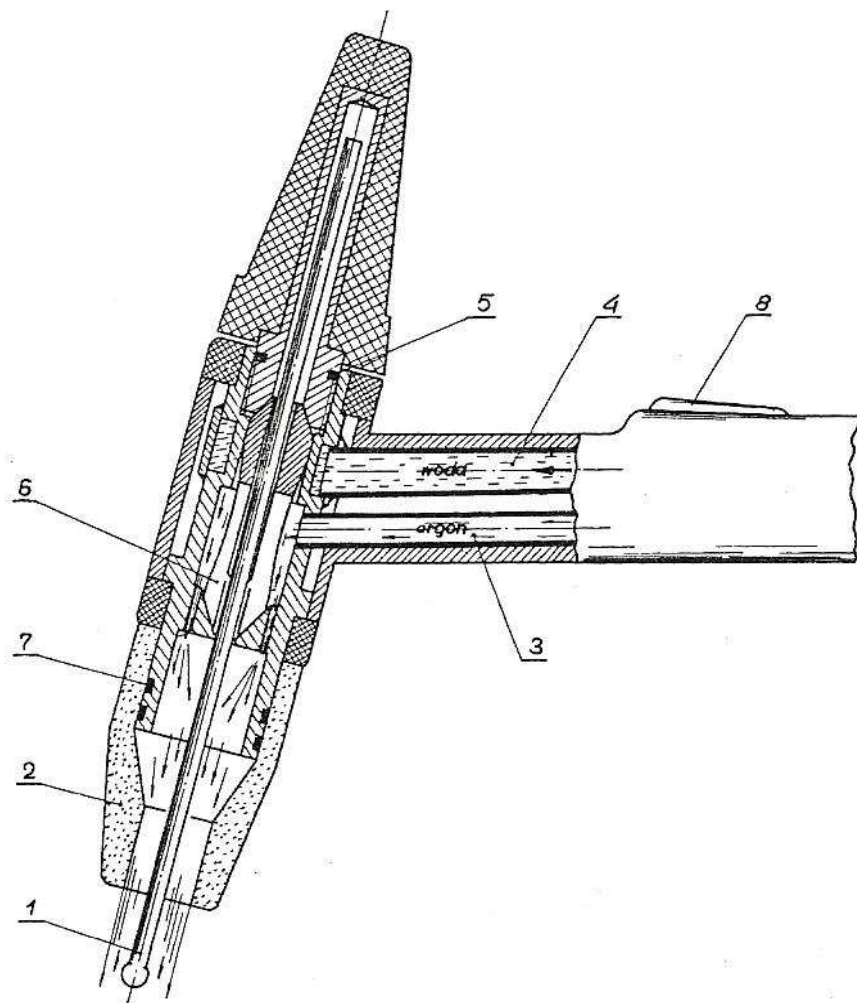
3.2.2. ŹRÓDŁA ZASILANIA

W metodzie TIG łuk spawalniczy może być zasilany prądem stałym, pulsującym lub przemiennym. Stosowane źródła energii spawalniczej mają opadającą lub stałoprądową charakterystykę zewnętrzną (rys. 3.13). Zapewniają one w przybliżeniu stałe natężenie prądu spawania, co pociąga za sobą stabilizację głębokości wtopienia podczas wahań napięcia łuku, wywołanego na przykład zmianą długości łuku między elektrodą wolframową, a materiałem podstawowym.



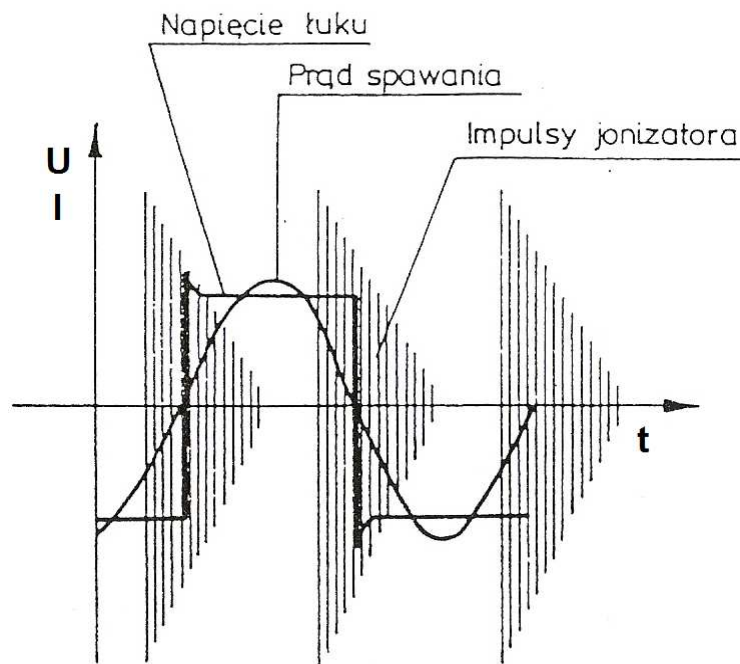
Rys. 3.13. Charakterystyka zewnętrzna źródeł energii do spawania metodą TIG [2]
(L_1 i L_2 – długości łuku przy zmianie odległości między elektrodą wolframową, a materiałem podstawowym)

W zależności od rodzaju łączonych elementów źródłami zasilania mogą być prostowniki tyrystorowe lub inwertorowe (stosowane do spawania stali, niklu i jego stopów, miedzi i jej stopów) oraz transformatory spawalnicze lub źródła inwertorowe (stosowane do spawania aluminium i jego stopów, magnezu i jego stopów, brązów aluminium). Uchwyt spawalniczy przeważnie jest lekki i łatwy w użyciu (rys. 3.14).



Rys. 3.14. Uchwyt spawalniczy do spawania ręcznego metodą TIG [3]:
 1 – elektroda wolframowa, 2 – dysza formująca strumień gazu, 3 – dopływ gazu, 4 – dopływ wody,
 5 – uszczelka, 6 – łuska zaciskająca elektrodę, 7 – uszczelki, 8 – przycisk sterujący

Urządzenia spawalnicze mają układy chłodzenia palnika (gazem lub wodą), sterowania przepływem gazu ochronnego oraz bezstykowego zajarzenia łuku. Funkcję zajarzania łuku spełnia jonizator, umożliwiający inicjację procesu spawania bez konieczności zwierania elektrody z materiałem spawanym. Jest to możliwe dzięki wytworzeniu impulsów wysokiego napięcia (rys. 3.15). Zastosowanie jonizatorów umożliwia również poprawienie warunków ponownego zajarzenia łuku elektrycznego przy przejściu prądu przez zero podczas spawania prądem przemiennym.

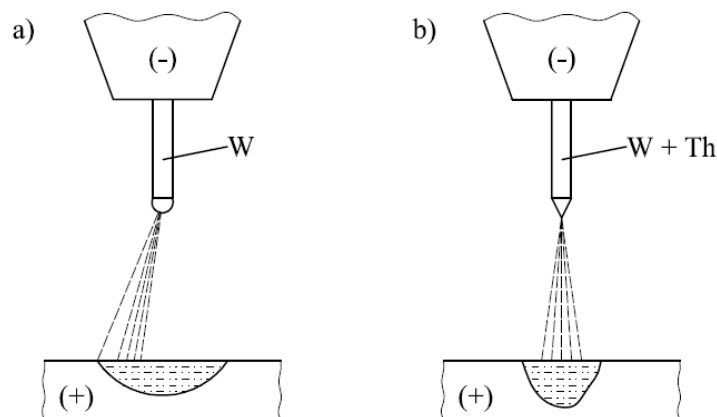


Rys. 3.15. Działanie impulsów jonizatora [4]

W metodzie TIG są stosowane elektrody nietopliwe. Mogą one być wykonane z czystego wolframu lub z dodatkiem tlenków:

- elektrody torowane (0,4–4% ThO_2),
- elektrody cyrkonowane (0,3–0,8% ZrO_2),
- elektrody lantanowane (1% LaO_2),
- elektrody itrowane (1–3% Y_2O_3),
- elektrody cerowane (2% CeO_2).

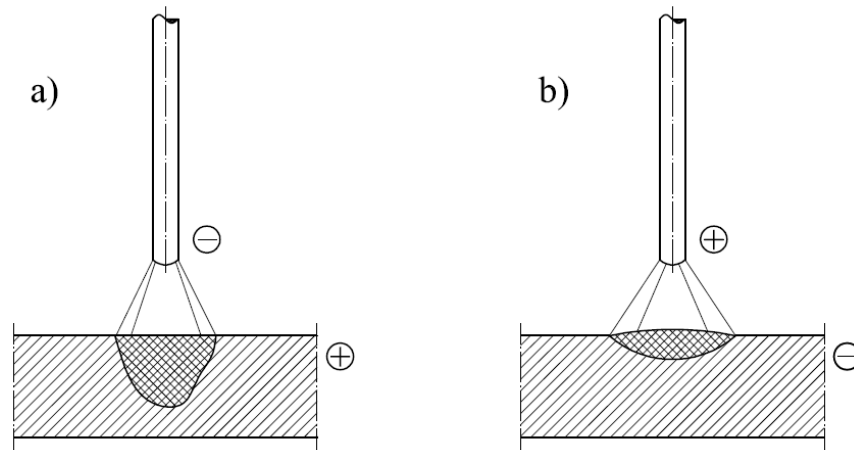
Tlenki te, dodane do elektrod wolframowych, zwiększają w znaczącym stopniu ich trwałość (nawet do 50%), wpływają korzystnie na stabilizację łuku spawalniczego oraz pozwalają na stosowanie większego obciążenia prądowego (do 25%) dla danej średnicy elektrody.



Rys. 3.16. Kształt końca elektrody z czystego wolframu (a) i tzw. torowanej (b) przy spawaniu metodą TIG prądem stałym z biegunowością ujemną [5]

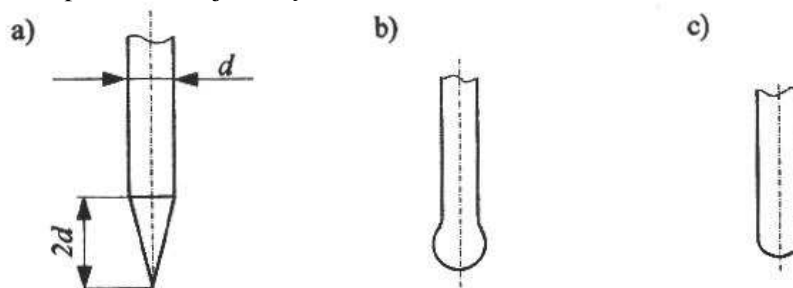
W przypadku stosowania elektrod z czystego wolframu możliwe jest tworzenia się półkolistego zakończenia elektrody, co powoduje powstawanie łuku w kształcie wachlarza, a to utrudnia przetopienie grani spoiny. Natomiast, gdy elektrody zawierają dodatki tlenkowe, wówczas łuk jest bardziej skoncentrowany (rys. 3.16).

Proces spawania większości materiałów konstrukcyjnych jest prowadzony przy zastosowaniu prądu stałego. Możliwe jest podłączenie elektrody nietopliwej do bieguna ujemnego, jak i dodatniego. Należy jednak pamiętać, że biegunowość prądu ma istotny wpływ na wydzielającą się ilość ciepła (rys. 3.17), a to ma wpływ na głębokość wtopienia oraz szybkość zużycia elektrody (rys. 3.18).



Rys. 3.17. Wpływ biegunowości na głębokość wtopienia [4]: a – biegunowość ujemna, b – biegunowość dodatnia

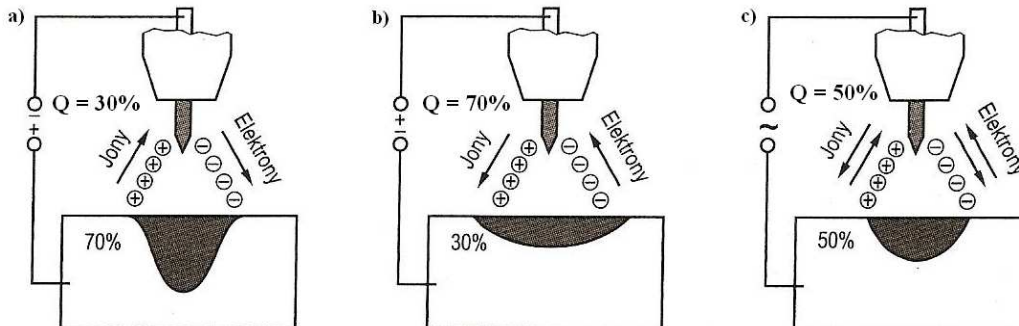
W przypadku podłączenia elektrody do bieguna ujemnego wydziela się na niej ok. 30% ciepła. Elektroda staje się wówczas katodą, która emituje strumień elektronów (rys. 3.19) w kierunku anody (materiału spawanego). W związku z tym na anodzie wydziela się więcej ciepła i materiał jest przetopiony na dużą głębokość. Gdy elektrodę podłączy się do bieguna dodatniego, to na niej wydzieli się ok. 70% ciepła, bowiem to ona staje się anodą. Natomiast materiał spawany jest słabiej nagrzanym, a głębokość wtopienia zmniejsza się.



Rys. 3.18. Przykłady kształtów końcówki elektrody przy spawaniu metodą TIG [6]: a – przy biegunowości ujemnej, b – przy biegunowości dodatniej, c – dla prądu przemiennego

Podstawową korzyścią zastosowania biegunowości dodatniej jest zjawisko tzw. katodowego czyszczenia, czyli usuwania warstewki tlenków z powierzchni jeziora kąpieli metalowej. Jest to szczególnie ważne przy spawaniu materiałów

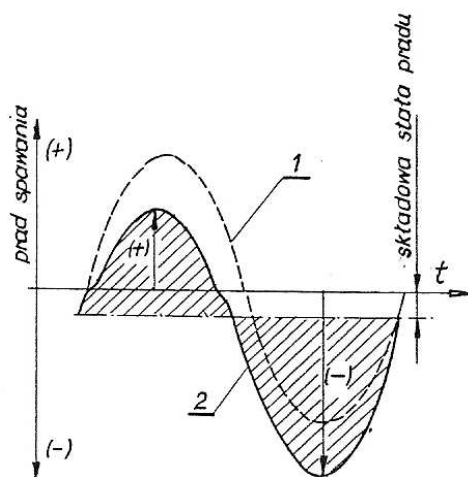
o trudno topliwej warstwie tlenków (aluminium, magnez). Jednak spawanie prądem o biegunowości dodatniej powoduje przeciążenie prądowe elektrody, co prowadzi do nadtopienia jej końcówki i szybkiego zużycia.



Rys. 3.19. Wpływ biegunowości prądu stałego podczas spawania metodą TIG na ilość ciepła Q wydzielającego się w materiale podstawowym i elektrodzie wolframowej: a – przy biegunowości ujemnej, b – przy biegunowości dodatniej, c – dla prądu przemiennego [2]

Spawanie przy użyciu prądu przemiennego stosuje się przeważnie do łączenia aluminium, magnezu i ich stopów, ze względu na połączenie cech spawania prądem stałym o biegunowości ujemnej i dodatniej. Czyszczenie katodowe następuje wówczas, gdy elektroda wolframowa jest anodą, natomiast po zmianie biegunowości staje się katodą, a to daje zwiększenie głębokości wtopienia w materiale spawanym. Zatem w jednej połowce okresu następuje odsłonięcie powierzchni czystego metalu, a w drugiej zwiększenie przetopu, bez obawy nadmiernego zużycia elektrody. Daje to również możliwość stosowania większych prądów spawania przy tej samej średnicy elektrody.

Podczas spawania prądem przemiennym pojawia się tzw. stała składowa prądu. Jest ona związana z faktem, że w różnych półokresach okresu przepływ prądu jest różny. Gdy elektroda jest katodą, elektrony emitowane są przez nagrzaną do wysokich temperatur elektrodę wolframową, natomiast po zmianie biegunowości elektrony emitowane są przez stosunkowo zimny materiał, co powoduje zmniejszenie emisji. Zatem w różnych półokresach przepływający prąd jest różny, zwiększa się udział ujemnej półowki sinusoidy prądu przemiennego (rys. 3.20), a to prowadzi do częściowego „prostowania się” prądu. Powstaje w ten sposób składowa stała prądu, która jest niekorzystna, ponieważ zmniejsza efekt rozpylania katodowego oraz powoduje pogorszenie stabilności jarzenia się łuku. Stałą składową prądu można zlikwidować poprzez włączenie w obwód spawania baterii kondensatorów lub akumulatorów (dawniej), albo poprzez odpowiednie układy elektroniczne.



Rys. 3.20. Wykres stałej składowej prądu przemiennego w metodzie TIG [3]:
 1 – wykres symetrycznej sinusoidy prądowej, 2 – sinusoida prądowa przesunięta na skutek prostowania prądu w łuku spawalniczym

3.2.3. PARAMETRY SPAWANIA

Do podstawowych parametrów spawania metodą TIG zalicza się:

- rodzaj i natężenie prądu spawania [A],
- napięcie łuku spawalniczego [V],
- prędkość spawania [m/min],
- rodzaj i natężenie przepływu gazu osłonowego [dm^3/min],
- średnica i rodzaj materiału elektrody nietopliwej [mm],
- średnica i rodzaj materiału dodatkowego (spoiwa) [mm].

Wymienione parametry spawania mają decydujący wpływ na jakość i wydajność procesu.

Natężenie prądu spawania ma największy wpływ na głębokość wtopienia, szerokość wykonanej spoiny oraz prędkość spawania. Konieczne jest jednak jego ograniczenie, wynikające z możliwości przegrzania elektrody (jej końcówki) oraz jej nadtopienia.

Napięcie łuku spawalniczego wynika z długości łuku (oraz ze stosowanego gazu osłonowego) i wpływa na kształt spoiny. Jego wartość zależy od zastosowanego prądu spawania i gazu osłonowego. Im napięcie łuku jest większe, tym gorsza jego stabilność, zwiększa się szerokość lica spoiny, a maleje głębokość wtopienia.

Prędkość spawania jest parametrem, który wpływa na energię liniową spawania, a zatem na ilość ciepła doprowadzanego do miejsca wykonywania połączenia spawanego.

3.2.4. MATERIAŁY DODATKOWE

W metodzie TIG jako gazy osłonowe stosuje się argon, hel i ich mieszaniny. Do spawania stali austenitycznych i stopów niklu możliwe jest zastosowanie mieszanki argonu i wodoru. Gaz osłonowy podczas inicjacji łuku jest jonizowany i działa jak przewodnik dla elektronów. Wpływa także na stabilność jarzenia się łuku podczas spawania oraz zapewnia on osłonę strefy spawania przed szkodliwym działaniem powietrza.

Argon jest najczęściej stosowanym w kraju, obojętnym gazem osłonowym. Zapewnia łatwe zajarzenie się i stabilność łuku. Dobrze chroni on strefę spawania, a jego zużycie jest mniejsze niż helu (jest od niego 10-krotnie cięższy). Umożliwia również czyszczenie katodowe podczas spawania aluminium i magnezu.

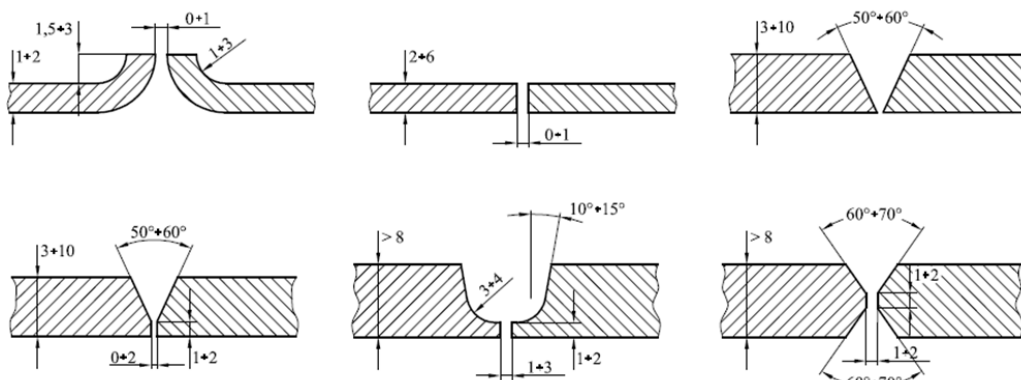
Hel charakteryzuje się większym potencjałem jonizacji niż argon, co utrudnia zajarzanie łuku, ale jednocześnie zwiększa jego moc cieplną wskutek większego napięcia łuku (korzystne podczas łączenia grubych elementów, materiałów o dużym przewodnictwie cieplnym oraz spawania z dużymi prędkościami). Jednak łuk jarzący się w helu jest mniej stabilny, ze względu na to, że ma małą gęstość (jest lżejszy od powietrza) jego zużycie jest większe niż argonu. Ponadto jest gazem droższym niż argon.

Mieszanina argonu i helu pozwala na uzyskanie dużej głębokości wtopienia oraz stabilnego i elastycznego łuku. Mieszanina argonu i wodoru używana jest jedynie podczas łączenia stali nierdzewnych i stopów na bazie niklu. Najczęściej stosuje się ją do spawania cienkościennych rur ze stali nierdzewnych. Dodatek wodoru powoduje wzrost napięcia łuku, pozwala na spawanie z większymi prędkościami oraz zmniejsza utlenienie spoiwa na skutek redukującego działania wodoru.

Metodą TIG spawać można bez spoiwa, jednak większość złączy wykonuje się z użyciem materiału dodatkowego. Podczas spawania ręcznego używa się prętów, natomiast w przypadku spawania zmechanizowanego spoiwo podaje się w postaci drutu. Średnica i długość spoiw są ujęte w normie PN-EN ISO 544:2008, wg niej pręty mają średnicę od 0,6 do 8,0 mm, natomiast druty od 0,5 do 4,0 mm. Długość prętów wynosi od 500 do 1000 mm, ale większość ma długość 1000 mm. Pręty krótsze mają przeważnie mniejszą średnicę i są stosowane do spawania cieńszych blach.

3.2.5. TECHNOLOGIA SPAWANIA

Przygotowanie elementów do spawania zależy od ich grubości. W przypadku złączy doczołowych dla grubości elementów 3–6 mm możliwe jest spawanie bez ukosowania, bez spoiwa lub z jego dodatkiem. Natomiast elementy grubsze wymagają ukosowania, w sposób podobny jak do spawania ręcznego elektrodą otuloną (rys. 3.21).



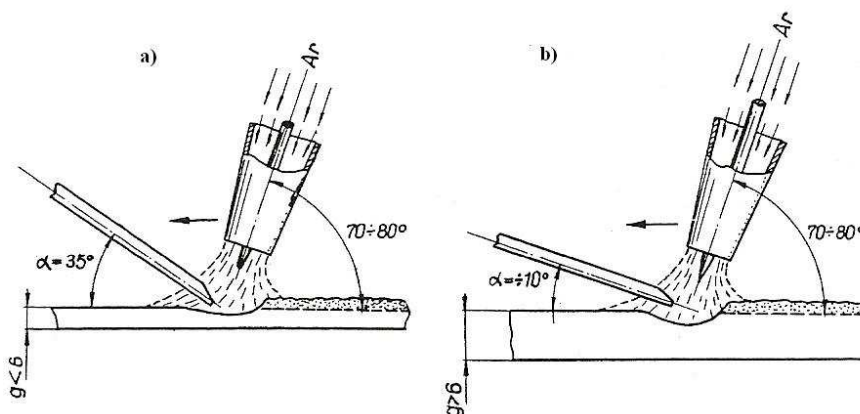
Rys. 3.21. Zalecane sposoby przygotowania brzegów złączy doczołowych blach stalowych do spawania metodą TIG [5]

Spawanie metodą TIG zapewnia bardzo wysoką jakość spoin. Stosuje się ją przede wszystkim do spawania metali nieżelaznych (aluminium, miedź, tytan) oraz stali wysokostopowych. Ma swoje zastosowania także do spawania stali konstrukcyjnych niestopowych i niskostopowych w przypadku konieczności zapewnienia dokładnego wtopienia, np. warstwy graniowej w spoinach wielowarstwowych lub w bardzo odpowiedzialnych spoinach.

Blachy aluminiowe o grubości do 6 mm zaleca się spawać jednowarstwowo. Uchwyt powinien być pochylony pod kątem ok. 70°, natomiast spoiwo pod kątem ok. 35° (rys. 3.22a). Prowadzenie uchwytu spawalniczego (palnika) odbywa się ruchem prostoliniowym, spoiwo zaś podaje się ruchem krokowym, kropla po kropli. Spoiwo, po wycofaniu, powinno znajdować się w strefie ochronnej gazu osłonowego, ale już poza zasięgiem największej temperatury łuku.

Technika spawania blach o grubości powyżej 6 mm jest trudniejsza, przede wszystkim spawa się je wielowarstwowo. Stosuje się też większe natężenia prądu, co prowadzi do większego podmuchu łuku i zwiększenia jeziora ciekłego metalu. Spoiwo podawane jest pod mniejszym kątem, ok. 10°, i stapia się w sposób ciągły (rys. 3.22b). Postępuje się tak, aby nie zaburzać łuku i nie powodować rozprysku kąpieli metalowej.

W obydwu przypadkach stosuje się prąd przemienny.



Rys. 3.22. Schemat spawania aluminium metodą TIG [3]: a – blachy cienkie, b – blachy grube

Miedź można spawać przy użyciu prądu przemiennego w przypadku materiałów o grubości do 1 mm, co powoduje zmniejszenie prędkości spawania i ułatwia kontrolę procesu. Natomiast blachy o grubości powyżej 1 mm spawane są przy użyciu prądu stałego o biegunowości ujemnej. Ułatwieniem podczas spawania są podkładki grafitowe, które kształtują grań spoiny. Prowadzenie palnika i dodawanie spoiwa odbywa się podobnie jak w przypadku spawania aluminium. Miedziane blachy o grubości do 4 mm spawa się techniką „w lewo”, natomiast powyżej 4 mm techniką „w prawo”. Elementy o grubości powyżej 8 mm spawa się odcinkami, w dwu lub wielu warstwach, przy czym warstwa pierwsza powinna być możliwie najgrubsza. W innym przypadku możliwe jest pękanie spoin.

Stale chromowo-niklowe spawane metodą TIG wykazują bardzo dobrą jakość połączenia, pozbawione są wtrąceń niemetalicznych oraz charakteryzują się wysoką jednorodnością, co skutkuje dobrą odpornością na korozję. Podobnie jak przy spawaniu miedzi stosuje się prąd przemienny dla elementów o grubości do 1 mm oraz prąd stały o biegunowości ujemnej dla blach o grubości powyżej 1 mm. Elementy o grubości powyżej 8 mm spawa się wielowarstwowo, przy czym następną warstwę układa się po całkowitym wystygnięciu uprzednio wykonanej spoiny.

3.2.6. SPAWANIE PRĄDEM PULSUJĄCYM

Jest to odmiana spawania prądem stałym, która polega na cyklicznej zmianie natężenia prądu spawania (sterowana charakterystyka prądowo–czasowa). Ma to na celu uzyskanie spoiny o korzystnym kształcie i wymiarach dzięki programowanemu dozowaniu ciepła. Łuk elektryczny o małej mocy jarzy się nieprzerwanie pomiędzy elektrodą a przedmiotem spawanym (rys. 3.9). Jest on zasilany prądem podstawowym I_p . Na ten prąd są nakładane impulsy prądowe I_i działające w czasie t_i . Czas cyklu spawania jest sumą czasu impulsu t_i i czasu przerwy t_p . Umożliwia to dokładną kontrolę jeziorka spawalniczego i głębokości wtopienia.

W porównaniu ze spawaniem łukiem ciągłym, ta metoda charakteryzuje się odmiennym sposobem krystalizacji spoiny. Powstaje bowiem ona jako łańcuch oddzielnie krzepnących jeziorek, które zachodzą na siebie. W związku z tym strefa wpływu ciepła (SWC) jest węższa, przy porównywalnej głębokości wtopienia. Powoduje to zmniejszenie poziomu naprężeń i odkształceń spawalniczych. Taki rodzaj spawania pozwala na łączenie elementów cienkich lub niedokładnie zestawionych.

3.2.7. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Przedstawianie i omówienie budowy i działania stanowiska spawalniczego.
2. Wykonanie połączeń spawanych dla próbek stalowych.
3. Omówienie powstałego połączenia.
4. Wykonanie połączeń spawanych dla próbek aluminiowych.

5. Omówienie powstałego połączenia.
6. Porównanie spoin wykonanych metodą "w lewo" i "w prawo".

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy podać:

- schemat stanowiska,
- parametry technologiczne spawania (rodzaj i ilość gazu, ilość, natężenie prądu, biegunowość, prędkość spawania, średnice elektrody, rodzaj materiału dodatkowego),
- ocena wyglądu spoin i napoin stali i aluminium,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] FERENC K.: *Spawalnictwo*, WNT, Warszawa 2007.
- [2] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*, tom 2, WNT, Warszawa 2005.
- [3] KACZMAR W., *Techniki Wytwarzania. Spawalnictwo*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.
- [4] ADAMIEC P., DZIUBIŃSKI J.: *Techniki Wytwarzania. Spawalnictwo*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
- [5] KLIMPEL A.: *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*, WNT, Warszawa 1999.
- [6] KARPIŃSKI S., MOSZUMAŃSKI J., RADWAN-WIATROWSKI K.: *Laboratorium z podstaw spawalnictwa*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.

WYKAZ NORM

PN-EN ISO 544:2008 Materiały dodatkowe do spawania - Warunki techniczne dostawy spoin do spawania - Typ wyrobu, wymiary, tolerancje i znakowanie.

4. SPAWANIE ŁUKIEM KRYTYM

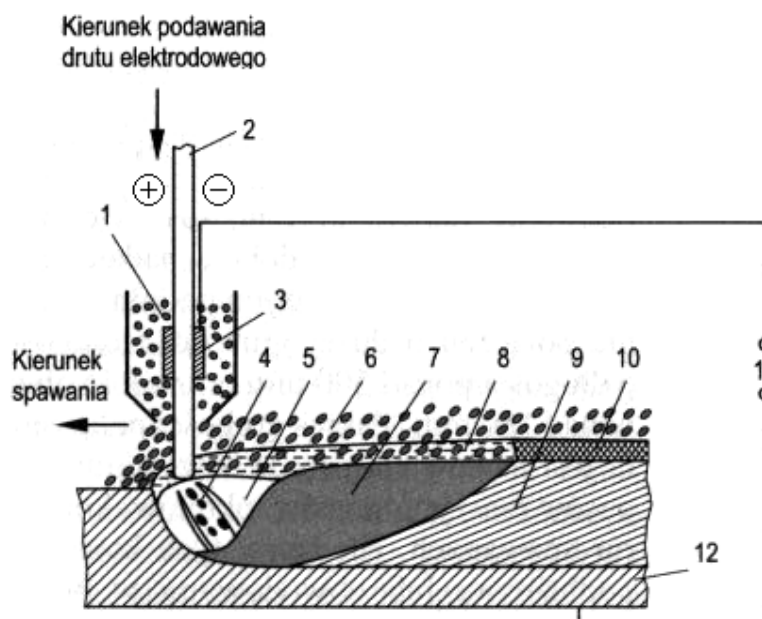
CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest praktyczne zapoznanie studentów z :

- metodą spawania łukiem krytym,
- przykładami zastosowania metody,
- wpływem podstawowych parametrów spawania na wygląd spoiny.

4.1. WPROWADZENIE

Spawanie łukiem krytym jest procesem, w czasie którego łuk spawalniczy jarzy się pomiędzy podawanym w sposób ciągły drutem elektrodowym a przedmiotem spawanym i jest niewidoczny, gdyż jest przykryty warstwą ziarnistego topnika (stąd też często używana nazwa „spawanie pod topnikiem”) [1,2,3,4,5]. Wydzielane podczas spawania ciepło stapia drut elektrodowy i część materiału rodzimego, z których powstaje spoina, a także część topnika, tworząc na jej powierzchni ciekły żużel oraz gazową atmosferę ochronną wokół łuku (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Zasada spawania łukiem krytym [1]: 1-topnik w zasobniku, 2 – drut elektrodowy, 3 – styk prądowy, 4 – łuk spawalniczy, 5 – komora łuku, 6 – warstwa topnika, 7 – jezioro spawalnicze, 8 – ciekły żużel, 9 – spoina, 10 – zakrzepły żużel, 11 – źródło prądu, 12 – przedmiot spawany

Użyty w tej metodzie topnik chroni jezioro spawalnicze przed oddziaływaniem atmosfery, stabilizuje łuk, steruje składem chemicznym stopiwa oraz kształtuje powierzchnię lica spoiny. W zależności od parametrów spawania: natężenia prądu,

napięcia łuku i prędkości spawania, metal spoiny pozostaje w stanie płynnym od kilku do kilkudziesięciu sekund. W tym wydłużonym czasie krzepnięcia jeziorka spawalniczego, w porównaniu z innymi metodami spawania, zachodzi w nim szereg procesów fizyko-chemicznych, w wyniku których spoina uzyskuje określony kształt, skład chemiczny i własności mechaniczne. Topnik, który nie został stopiony w procesie spawania, jest zbierany i ponownie wykorzystany. Spawanie łukiem krytym jest metodą spawania elektrycznego o automatycznym najczęściej przebiegu procesu, przy czym zmechanizowane jest ciągłe podawanie drutu elektrodowego, przemieszczanie łuku wzdłuż krawędzi łączonych elementów oraz zasypywanie topnika w miejscu spawania. Proces półautomatyczny nie jest praktycznie obecnie stosowany, głównie ze względu na: brak możliwości dokładnego ręcznego prowadzenia przez spawacza drutu elektrodowego w rowku spawalniczym, utrudnioną obserwację procesu spawania oraz trudności w manewrowaniu uchwytem ze zbiornikiem topnika. Spawanie łukiem krytym jest głównie prowadzone w pozycji podolnej i nabocznej, ze względu na zsypywanie się topnika oraz trudności z utrzymaniem ciekłego metalu jeziorka spawalniczego w pozycjach przymusowych.

Metoda spawania łukiem krytym charakteryzuje się:

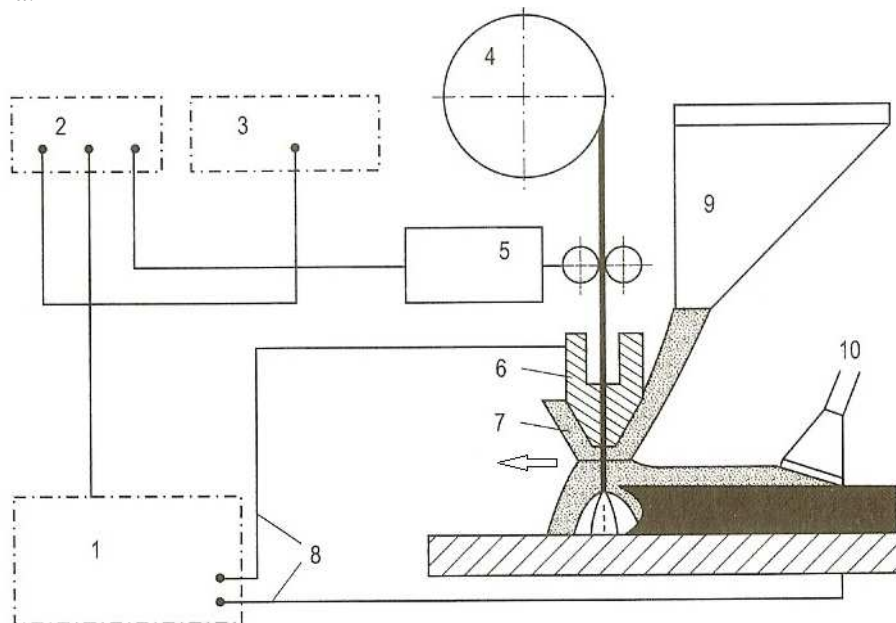
- dużą wydajnością spawania, wynikającą z możliwości stosowania wysokich energii łuku (wydajność jest 3-6 razy większa niż przy spawaniu elektrodami otulonymi),
- dobrą sprawnością procesu, w którym aż 45% energii zużywanej jest na utworzenie spoiny (przy spawaniu elektrodami otulonymi tylko 10%),
- dobrą i powtarzalną jakością złączy, ze względu na skuteczną ochronę ciekłego metalu przed dostępem tlenu i azotu z powietrza,
- brakiem rozprysków i gładkim licem spoiny,
- poprawą warunków pracy (łuk jest niewidoczny, mała ilość wydzielanych gazów).

Spawanie łukiem krytym stosuje się:

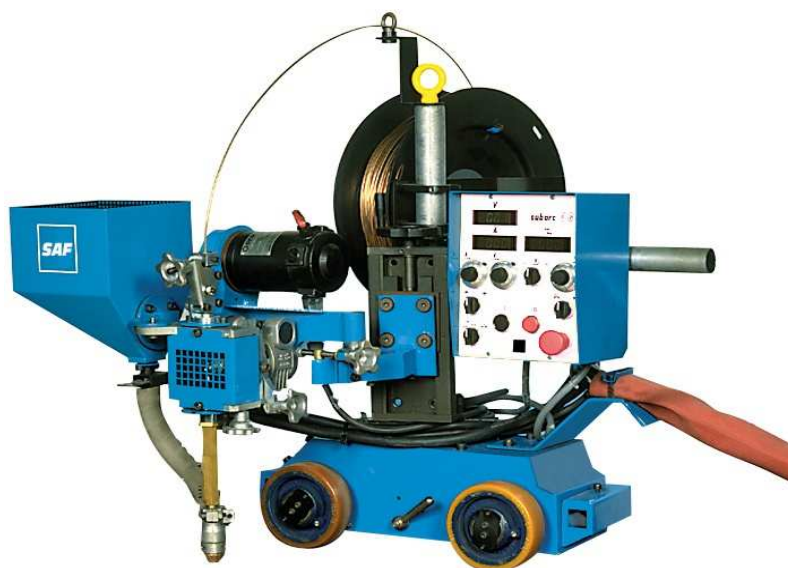
- do wykonywania spoin czołowych i pachwinowych w pozycji podolnej, nabocznej, a niekiedy naściennej,
- do wykonywania długich spoin wzdłużnych, o długości ponad 500 mm oraz spoin obwodowych o średnicy ponad 150 mm i o grubości najczęściej 5–100 mm,
- w budowie kotłów, zbiorników, korpusów maszyn, mostów, okrętów, konstrukcji przemysłowych i w produkcji rur spawanych o dużej średnicy,
- głównie do spawania stali konstrukcyjnych niskowęglowych, niskostopowych i wysokostopowych, rzadziej do spawania niklu, tytanu, miedzi i aluminium oraz ich stopów,
- oprócz spawania metoda ta jest często używana do napawania.

4.2. STANOWISKO DO SPAWANIA ŁUKIEM KRYTYM

W skład stanowiska do spawania łukiem krytym wchodzi źródło prądu stałego lub przemiennego, najczęściej o płaskiej charakterystyce statycznej, zapewniającej samoregulację długości łuku oraz automat spawalniczy (rys. 4.2, 4.3). Automat spawalniczy (rys. 4.3) składa się z głowicy zawieszonej na ramieniu utwierdzonym na pionowym słupie usytuowanym na wózku jezdnym. Po prawej stronie ramienia jest umieszczony pulpit sterowniczy ze wskaźnikami pomiarowymi, a po lewej zbiornik topnika.



Rys. 4.2. Schemat urządzenia do spawania łukiem krytym [1]: 1- źródło prądu spawania, 2 – układ sterowania, 3 – przyrządy pomiarowe, 4 – bęben z drutem, 5 – podajnik drutu, 6 – styk prądowy, 7 – zsypnik topnika, 8 – przewody prądowe, 9 – zbiornik topnika, 10 – zbierak topnika



Rys. 4.3. Automat do spawania łukiem krytym

Jednym z ważniejszych podzespołów automatu jest głowica, której zadaniem jest prostowanie i podawanie drutu elektrodowego do strefy łuku i doprowadzenie prądu. Przedstawiony na rys. 4.3 automat przeznaczony jest do wykonywania połączeń wzdłużnych, w których przemieszczanie głowicy wzdłuż złącza zapewnia tzw. „traktor spawalniczy” przesuwający się po spawanym elemencie. W innych rozwiązaniach głowica spawalnicza zamocowana jest na słupowym wysięgniku przejezdny lub w przypadku wykonywania połączeń obwodowych stałym (np. spawanie dennic zbiorników).

4.3. SPAWALNICZE MATERIAŁY DODATKOWE

Materiałami dodatkowymi stosowanymi do spawania łukiem krytym są druty pełne, druty proszkowe, taśmy oraz topniki. Topniki spełniają podobne zadanie jak otulina w elektrodach do spawania łukowego ręcznego. Ponadto mogą jeszcze wpływać na kształtowanie lica spoiny przez odpowiedni dobór lepkości i napięcia powierzchniowego żuźla.

W zależności od metody wytwarzania topniki dzieli się na:

- F – topione,
- A – aglomerowane,
- M – mieszane.

Topniki topione wytwarza się z surowców mineralnych przez topienie i granulację, natomiast topniki aglomerowane to spiekane ziarniste mieszaniny składników wyjściowych. Topniki mieszane to mieszaniny dwóch lub więcej półproduktów wytworzonych różnymi metodami. Pod względem metalurgicznym topniki dzielą się na:

- kwaśne,
- zasadowe.

Topniki kwaśne stosuje się do spawania konstrukcyjnych stali niskowęglowych, natomiast topniki zasadowe do stali wysokostopowych. Pod względem chemicznym (zawartość tlenku manganu MnO) topniki dzielą się na:

- bezmanganowe,
- niskomanganowe,
- średniomanganowe,
- wysokomanganowe.

Rodzaje topników stosowanych do spawania łukiem krytym przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Rodzaje topników do spawania łukiem krytym wg PN-EN 760:1998

Symbol	Charakterystyczne składniki chemiczne	Zawartość składników, %
MS Manganowo-krzemianowy	MnO + SiO ₂ CaO	min. 50 maks. 15
CS Wapniowo-krzemianowy	CaO + MgO + SiO ₂ CaO + MgO	min. 55 min. 15
ZS Cyrkonowo-krzemianowy	ZrO ₂ + SiO ₂ + MnO ZrO ₂	min. 45 min. 15
RS Rutyloво-krzemianowy	TiO ₂ + SiO ₂ TiO ₂	min. 50 min. 20
AR Glinianowo-rutyloво	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	min. 40
AB Glinianowo-zasadowy	Al ₂ O ₃ + CaO + MgO Al ₂ O ₃ CaF ₂	min. 40 min. 20 maks. 22
AS Glinianowo-krzemianowy	Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + ZrO ₂ CaF ₂ + MgO ZrO ₂	min. 40 min. 30 min. 5
AF Glinianowo-fluorkowy-zasadowy	Al ₂ O ₃ + CaF ₂	min. 70
FB Fluorkowy-zasadowy	CaO + MgO + CaF ₂ + MnO SiO ₂ CaF ₂	min. 50 maks. 20 min. 15
Z	inny skład chemiczny	

Druty do spawania i napawania łukiem krytym stali mają średnicę 2,5–6 mm i są pokryte miedzią w celu zabezpieczenia ich przed korozją oraz dla polepszenia styku prądowego. Mogą być pełne, z dodatkiem pierwiastków stopowych oraz rdzeniowe, wypełnione sproszkowanymi dodatkami. Skład chemiczny drutów do spawania łukiem krytym zależy zarówno od składu chemicznego spawanej stali, jak również od topnika użytego do spawania. Druty do automatycznego spawania łukiem krytym stali konstrukcyjnych mogą zawierać:

- małą zawartość manganu: 0,3 – 0,6% Mn (np. S1, S1Si, S1Mo),
- średnią zawartość manganu: 0,8 – 1,2% Mn (np. S2, S2Si, S2Mo),
- zwiększoną zawartość manganu: 1,5 – 2,5% Mn (np.S3, S4, S3Si, S4Si).

Mangan, zarówno z drutu jak i z topnika, przechodzi do jeziora spawalniczego i bierze udział w reakcji odtleniania. Dlatego też ogólny bilans zawartości manganu w topniku i drucie powinien być utrzymany na pewnym określonym poziomie. Im mniej manganu zawiera drut, tym większą jego ilość powinien zawierać topnik. Materiały dodatkowe do spawania łukiem krytym to zestaw drutu i topnika, który należy odpowiednio dobrać, aby uzyskać spoinę o wymaganych własnościach.

Przykłady zestawów materiałów dodatkowych do spawania łukiem krytym stali przedstawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Zestawy drut + topnik do spawania łukiem krytym stali [1]

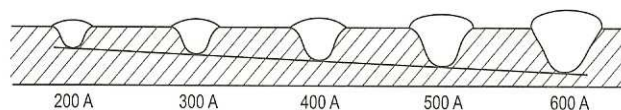
Stale	Klasyfikacja materiałów dodatkowych		
	zestaw drut + topnik	drut	topnik spawalniczy
konstrukcyjne niestopowe	EN 756-S 35 0 MS S1	EN 756-S1	PN-EN 760-SF MS 1 88 AC
	EN 756-S 38 AB S2Si	EN 756-S2Si	PN-EN 760-SA AB 1 67 AC H5
		EN 756-S1	PN-EN 760-SF MS 1 96 AC H5
SPW, $R_e = 420$ MPa	EN 756-S 38 AB S2Si	EN 756-S2Si	PN-EN 760-SA AB 1 67 AC H5
		EN 756-S2Mo	PN-EN 760-SF MS 1 87 AC H5
SPW, $R_e = 560 \pm 630$ MPa	EN 756-S 50 3 AB S3Mo	EN 756-S3Mo	PN-EN 760-SA AB 1 67 AC H5
SPW, $R_e = 700$ MPa		EN 756-S3Ni1Mo	PN-EN 760-SA FB 1 55 AC H5
nierdzewne typu 19% Cr – 10% Ni		EN 12072-S 19 9 L	PN-EN 760-SA CS 2 Cr DC
		EN 12072-S 19 9 L	PN-EN 760-SF AS 2 63 AC H5
nierdzewne typu 18% Cr – 12% Ni – 3% Mo		EN 12072-S 19 12 3 L	PN-EN 760-SA CS 2 Cr DC
		EN 12072-S 19 12 3 L	PN-EN 760-SF AS 2 63 AC H5
typu duplex		EN 12072-S 22 9 3 NL	PN-EN 760-SA AF 2 DC
typu superduplex		EN 12072-S 25 9 4 NL	PN-EN 760-SA AF 2 DC

SPW – stale o podwyższonej wytrzymałości

4.4. WPŁYW PARAMETRÓW SPAWANIA ŁUKIEM KRYTYM NA KSZTAŁT SPOINY

Na kształt spoiny wpływa zasadniczo natężenie prądu spawania i napięcie łuku oraz prędkość spawania. Oprócz tych parametrów pewien wpływ ma także: rodzaj prądu i jego biegunowość, średnica drutu elektrodowego, pochylenie drutu względem złącza, grubość warstwy topnika i jego ziarnistość, długość wolnego końca elektrody oraz kształt rowka spawalniczego.

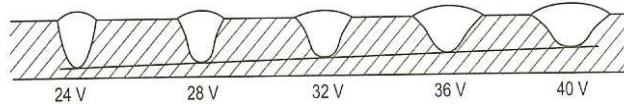
Natężenie prądu spawania, mieszczące się w przedziale 200-1000 A, wpływa na ilość ciepła wydzielanego w łuku elektrycznym oraz na siłę magnetycznego podmuchu łuku. Wraz ze wzrostem natężenia prądu spawania znacznie wzrasta głębokość wtopienia, wzrasta wysokość nadlewu, nieznacznie wzrasta szerokość ściegu oraz zwiększa się udział materiału podstawowego w spoinie (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Wpływ natężenia prądu spawania na kształt spoiny [1]

Napięcie łuku wpływa na jego długość, a tym samym na rozdział ciepła zużywanego na topienie materiału spawanego i topnika. Jego wartość (24-45 V) dobiera się w zależności od natężenia prądu spawania oraz średnicy drutu elektrodowego. Wzrost napięcia łuku powoduje zwiększenie jego długości, co przy

stożkowym kształcie łuku powoduje zwiększenie powierzchni jego oddziaływania na spawany materiał, a przez to stapia się więcej topnika, zwiększa się szerokość lica spoiny, zmniejsza się głębokość wtopienia oraz wysokość nadlewu (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Schemat wpływu napięcia łuku na kształt spoiny [1]

Prędkość spawania łukiem krytym może dochodzić do 200 m/h, ale przeważnie mieści się w przedziale 20 – 60 m/h. Zwiększenie prędkości spawania powoduje, że maleje głębokość wtopienia i szerokość spoiny a nieznacznie zwiększa się wysokość nadlewu lica.

Rodzaj prądu i biegunowość drutu elektrodowego mają duży wpływ na stabilność łuku oraz na kształt spoiny. Spawając prądem stałym, z podłączonym do elektrody biegunem dodatnim, otrzymuje się większą głębokość wtopienia i mniejszą szerokość oraz wysokość nadlewu niż podczas podłączenia elektrody do bieguna ujemnego. W przypadku spawania prądem przemiennym wymienione powyżej wielkości są pośrednie.

Średnica drutu elektrodowego jest dobierana w zależności od grubości spawanych elementów. W praktyce przemysłowej najczęściej są stosowane druty o średnicy d_e 2,5–5,0 mm. Krótki wylot drutu elektrodowego L_w (określony na podstawie zależności 4.1) pozwala na stosowanie dużych gęstości prądu spawania, co umożliwia uzyskanie dużej wydajności stapiania.

$$L_w = (8-15)d_e \quad (4.1)$$

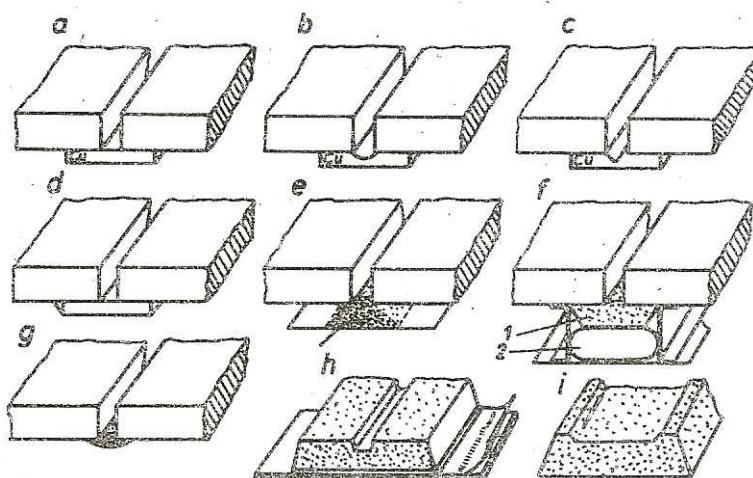
Ustawienie drutu względem złącza najczęściej jest prostopadle. Jeżeli jednak drut jest pochylony w kierunku spawania to ciekły metal i żużel podpływa pod łuk, powodując zmniejszenie głębokości wtopienia i zwiększenie szerokości lica. Pochylenie drutu elektrodowego w kierunku przeciwnym zwiększa lico i głębokość wtopienia.

Grubość warstwy topnika, wynosząca średnio 2/3 długości wolnego końca drutu elektrodowego, zależy przede wszystkim od natężenia prądu spawania i wpływa na kształt lica. Zbyt gruba warstwa topnika powoduje duży nacisk na ciekły metal jeziorka spawalniczego, utrudniając odgazowanie spoiny. Może to prowadzić do porowatości spoin, co uwidacznia się w postaci wgłębień w licu spoiny.

Wpływ składu i wielkości ziarna topnika na głębokość wtopienia jest stosunkowo mały. W miarę wzrostu wielkości ziarna topnika zmniejsza się jego gęstość nasypowa, co powoduje zmniejszenie głębokości wtopienia i zwiększenie szerokości spoiny. Ziarnistość topników do spawania łukiem krytym mieści się przeważnie w przedziale 0,3-2,5 mm. Topniki przed spawaniem należy suszyć przez 2 godziny w temperaturze 200-250 °C (topniki topione) i 275-375 °C (topniki aglomerowane).

4.5. TECHNOLOGIA SPAWANIA ŁUKIEM KRYTYM

Podczas spawania łukiem krytym należy szczególnie zwrócić uwagę na sposób właściwego przygotowania blach do spawania, który zależy od grubości materiału spawanego, sposobu zabezpieczenia grani spoiny oraz sposobu ukosowania blach. Stosuje się różne sposoby zabezpieczenia grani przed wyciekaniem stopiwa z rowka spawalniczego. Są to m. in. podkładka miedziana bez kształtowania grani (rys. 4.6a) oraz podkładka miedziana z kształtowaniem grani (rys. 4.6b,c), podkładka stalowa mocowana do spawanych blach (rys. 4.6d), podkładka topnikowa luźna (rys. 4.6e) oraz dociskana sprężonym powietrzem (rys. 4.6f), grąń podpawana ręcznie (rys. 4.6g), elastyczna taśma zabezpieczająca (rys. 4.6h) oraz podkładka ceramiczna (rys. 4.6i).



Rys. 4.6. Sposoby zabezpieczania grani przed wyciekaniem stopiwa z rowka spawalniczego [4, 5]:
a, b, c – podkładki miedziane, d – podkładka stalowa, e, f – podkładka topnikowa,
g – grąń podpawana ręcznie, h – elastyczna taśma zabezpieczająca, i – podkładka ceramiczna

Podkładki miedziane stosuje się najczęściej w seryjnym spawaniu przedmiotów jednakowej, niedużej długości. Stalowe podkładki stosuje się gdy złącze może pracować z dodatkową taśmą metalową od strony grani. Wykonuje się je z materiału takiego samego jak materiał podstawowy, a ich minimalna grubość wynosi 5 mm lub 0,5 grubości złącza. Podkładki z wysokotopliwym topnikiem, zwykle do spawania łukiem krytym, swobodnie zasypanym w stalowej rynnie lub częściej na poduszce pneumatycznej zasilanej sprężonym powietrzem, używane są w produkcji seryjnej i do spawania długich elementów. Podobne zastosowanie mają elastyczne taśmy i podkładki ceramiczne zestawione w bloki o długości nawet do kilku metrów na aluminiowej taśmie samoprzylepnej. Podpawanie ręczne grani inną metodą spawania stosuje się zazwyczaj w produkcji jednostkowej. Oprócz zabezpieczenia grani, stosuje się również w tej metodzie spawania stalowe płytki dobiegowe i wybiegowe, przyspawane na początku i końcu złącza spawanego. Na pierwszej z nich zajarza się i stabilizuje łuk a na umieszczonej na końcu złącza wyprowadza się jeziorko spawalnicze.

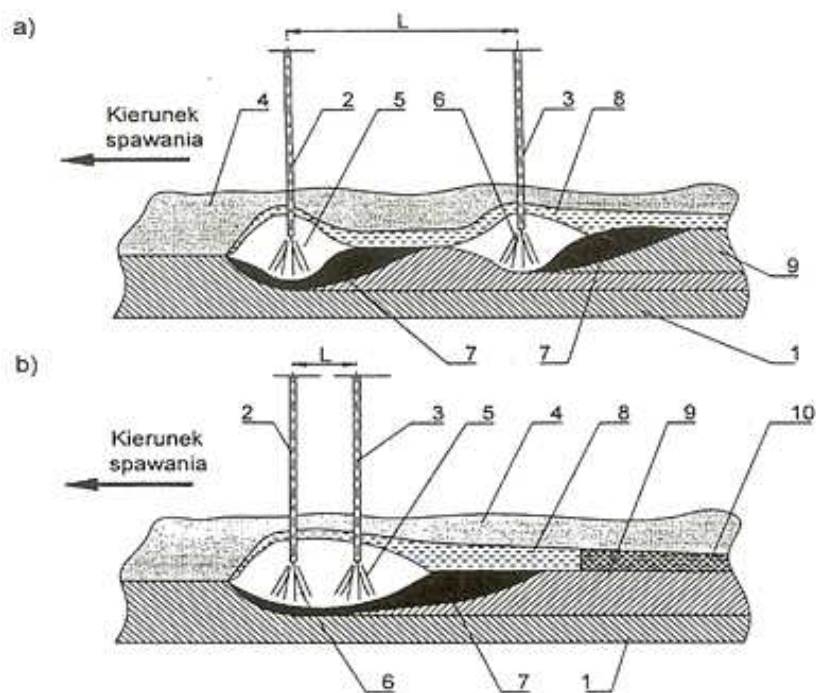
W przypadku spawania łukiem krytym zajarzanie łuku odbywa się poprzez tzw. potarcie. Druk elektrodowy przed rozpoczęciem spawania jest dosuwany do zetknięcia z elementem spawanym lub płytką wybiegową, a po załączeniu prądu spawania następuje podawanie drutu z jednoczesnym przesuwem głowicy w kierunku spawania, co ułatwia zajarzenie łuku.

Spawanie łukiem krytym jest stosowane do wykonywania następujących spoin:

- jednostronne na blachach nieukosowanych,
- jednostronne na blachach ukosowanych (V, U),
- dwustronne na blachach nieukosowanych,
- dwustronne na blachach ukosowanych (X, 2U),
- pachwinowych.

Zalecane kształty i wymiary rowków spawalniczych złączy doczołowych uzależnione od grubości materiału są podane w normie PN-EN ISO 9692-2:2002.

Zwiększenie wydajności spawania łukiem krytym uzyskiwane jest ostatnio coraz częściej poprzez zastosowanie spawania dwoma lub kilkoma drutami elektrodowymi. Najczęściej stosowane jest spawanie dwoma lub trzema łukami, które może być realizowane z oddzielnymi jeziorkami ciekłego metalu (rys. 4.7a) lub z jednym wspólnym (rys. 4.7b). W przypadku spawania dwułukowego pierwszy drut elektrodowy zapewnia odpowiednio głębokie wtopienie, a drugi wypełnia i formuje lico spoiny.



Rys. 4.7. Zasada spawania dwoma łukami [6]: a – z oddzielnymi jeziorkami spawalniczymi, b – z jednym wspólnym jeziorkiem; 1 – materiał rodzimy, 2, 3 – druty elektrodowe, 4 – topnik, 5, 6 – łuk spawalniczy, 7 – ciekły metal jeziorka, 8 – ciekły żużel, 9 – spoina, 10 – zakrzepły żużel, L – odległość między elektrodami

4.6. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Omówienie części składowych stanowiska do spawania.
2. Przygotowanie stanowiska do spawania (zamocowanie próbek, zasyp topnika, ustawienie wózka, dobór parametrów spawania).
3. Wykonanie napoin na płytach stalowych przy różnych parametrach spawania.
4. Wykonanie spoiny czołowej bez ukosowania na podkładce miedzianej.
5. Omówienie części praktycznej i dyskusja o wpływie parametrów spawania na wygląd napoin oraz spoiny.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu podać:

- schemat stanowiska,
- parametry technologiczne spawania (rodzaj topnika, natężenie prądu, napięcie łuku, prędkość spawania),
- ocenę wyglądu spoin i napoin,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera, Spawalnictwo*, Tom II, WNT, Warszawa 2005.
[2] PILARCZYK J., *Spawanie i napawanie elektryczne metali*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1996.
[3] KLIMPEL A., *Technologia spawania i cięcia stali*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
[4] KACZMAR W., *Technologia maszyn, Spawalnictwo*, Skrypt PWr, 1979.
[5] KUNA J., *Ćwiczenia laboratoryjne z budowy maszyn część III – spawalnictwo*, Skrypt PWr.
[6] MAZUR M., *Podstawy Spawalnictwa*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.

WYKAZ NORM

- PN-EN ISO 9692-2:2002 Spawanie i procesy pokrewne – Przygotowanie brzegów do spawania. Część 2: Spawanie stali łukiem krytym.
PN-EN 756:1999 Spawalnictwo. Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe i kombinacje drut-topnik do spawania łukiem krytym stali niskostopowych i drobnoziarnistych. Oznaczenia.
PN-EN 760:1998 Materiały dodatkowe do spawania. Topniki do spawania łukiem krytym. Oznaczenia.

5. ZGRZEWANIE ELEKTRYCZNE OPOROWE

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z:

- oporowym nagrzewaniem materiałów wykorzystywanym w procesach zgrzewania punktowego, liniowego, garbowego i doczołowego,
- metodami oceny połączeń zgrzewanych.

5.1. WPROWADZENIE

Połączenia zgrzewane to miejscowe połączenia nierozłączne uzyskiwane bez udziału materiału dodatkowego (bez udziału spoiwa). Najczęściej uzyskuje się je w wyniku miejscowego stopienia i docisku łączonych materiałów np.: blach, kształtowników lub części maszyn zaprojektowanych dla utworzenia określonej konstrukcji. Niezbędne ciepło do nagrzewania lub stopienia materiału w procesie zgrzewania elektrycznego oporowego powstaje w wyniku przepływu prądu przez materiały łączone, zgodnie z zależnością Joule'a –Lenza (5.1).

$$Q = \int_0^{t_k} I^2(t)R(t) dt \quad (5.1)$$

gdzie:

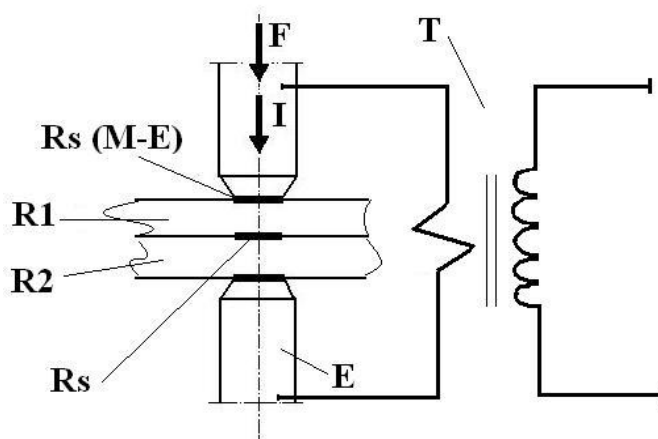
Q – ilość ciepła [J],

$I(t)$ – natężenie prądu zgrzewania [A],

$R(t)$ – oporność strefy zgrzewania [Ω],

t_k – czas przepływu prądu zgrzewania [s].

Na jakość połączenia zgrzewanego istotny wpływ wywiera ilość wydzielonego ciepła i siła docisku. Ilość wydzielonego ciepła, przy danym natężeniu prądu i czasie zgrzewania, zależy od oporności strefy zgrzewania (rys. 5.1), która jest sumą oporności zgrzewanych materiałów (R_1, R_2) i oporności stykowej, między łączonymi materiałami R_s oraz materiałem a elektrodą zgrzewarki R_s (M-E).



Rys. 5.1. Schemat zgrzewania oporowego punktowego, z zaznaczonymi składnikami oporności strefy zgrzewania; F – docisk zgrzewania; I – natężenie prądu zgrzewania; R1 i R2 oporności materiałów zgrzewanych; Rs – oporność styku zgrzewanych materiałów; Rs (M-E) – oporność styku elektroda zgrzewany materiał; E – elektroda zgrzewarki; T – transformator zgrzewarki (źródło prądu)

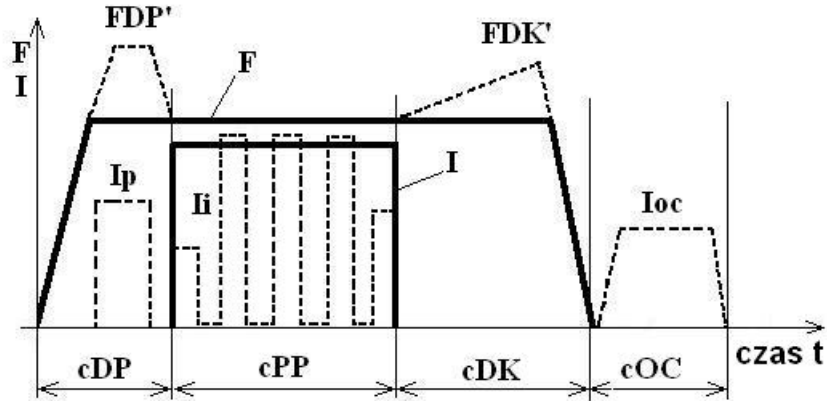
Metodami zgrzewania oporowego można łączyć metale żelazne i nieżelazne. Powszechnie stosuje się je do łączenia stali węglowych, a także stopowych i wysokostopowych. Zgrzewa się także blachy stalowe z powłokami ochronnymi z cynku, aluminium czy kadmu. Łączy się również tą metodą aluminium i jego stopy, nikiel i stopy niklu, miedź i stopy miedzi, tytan i jego stopy oraz wybrane materiały różnoimienne. W zależności od rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń wyróżnia się różne metody zgrzewania oporowego, przy czym najszersze zastosowanie znalazło zgrzewanie: punktowe, liniowe, doczołowe i garbowe.

5.2. ZGRZEWANIE PUNKTOWE

Zgrzewanie punktowe (rys. 5.1) przeprowadza się na urządzeniach zwanych zgrzewarkami punktowymi, które w zależności od wymagań produkcyjnych mogą być stacjonarne lub przenośne o małej, średniej i dużej mocy zgrzewania. Obok powszechnie stosowanych zgrzewarek prądu zmiennego stosuje się coraz częściej także zgrzewarki prądu stałego, stosowane szczególnie do zgrzewania aluminium lub jego stopów oraz stopów miedzi, a to ze względu na bardzo duże prądy zgrzewania.

Uzyskiwanie zgrzein w procesie zgrzewania punktowego odbywa się według określonego programu, prostego lub rozszerzonego (rys. 5.2). Program ten uwzględnia wartości siły docisku, natężenia prądu oraz przedziały czasu ich oddziaływania, podczas cyklu zgrzewania. W pierwszym okresie cyklu elementy ułożone na zakładkę są dociskane przez elektrody zgrzewarki przez okres czasu, nazywany czasem docisku początkowego (na rys. 5.2 oznaczony jako cDP). W kolejnym etapie cyklu, przez dociśnięte elementy przepływa prąd o natężeniu (I) i przez czas cPP, nazywany czasem zgrzewania, tworząc zgrzeinę o określonych wymiarach. W ostatnim etapie cyklu, nazywanym czasem docisku końcowego (cDK) występuje stała lub zwiększona siła docisku (FDK'), przy braku przepływu prądu, która zapobiega utworzeniu jamy

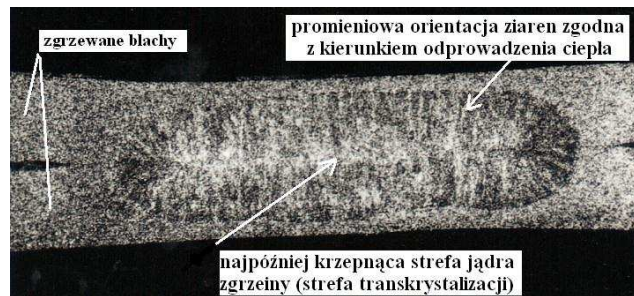
skurczowej i ustala ostateczną budowę zgrzeiny. Programy rozszerzone zawierające możliwość zmian wielkości w przedziałach FDP', FDK', Ip, Ii, Ioc, umożliwiają łączenie materiałów o zwiększonej wrażliwości na proces zgrzewania.



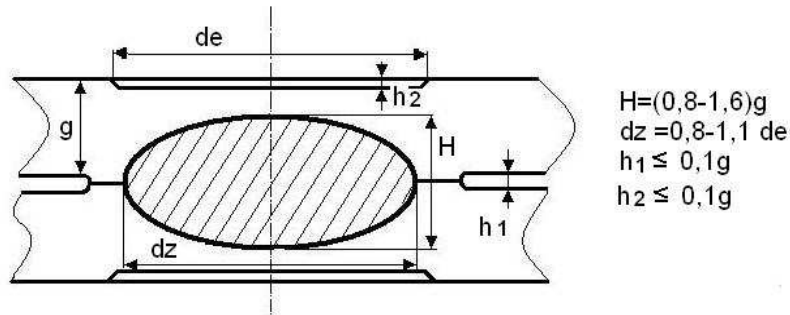
Rys. 5.2. Program zgrzewania punktowego. Linie pogrubione przedstawiają prosty program zgrzewania, a linie przerywane przedstawiają programy rozszerzone; F – siła docisku, I – natężenie prądu zgrzewania, cDP – czas docisku początkowego, cPP – czas przepływu prądu zgrzewania, cDK – czas docisku końcowego, cOC – czas obróbki cieplnej, FDP' i FDK' – siła docisku początkowego i końcowego, Ip, Ii i Ioc – prąd podgrzewania, impulsowy i obróbki cieplnej

Poprawny dobór parametrów zgrzewania, tj. natężenia prądu, czasu zgrzewania, średnicy roboczej elektrody i siły nacisku, pozwala uzyskać zgrzeinę która nie tylko łączy trwale zgrzewane materiały ale i przenosi duże obciążenia (rys. 5.3). Elektrody zgrzewarek wykonuje się głównie ze stopów miedzi.

a)



b)



Rys. 5.3. Makrostruktura (a) oraz wymiary zgrzeiny łączącej blachy stalowe, utworzonej w procesie zgrzewania elektrycznego punktowego (b); de – średnica zgrzeiny; g – grubość zgrzewanego materiału; H – wysokość jądra zgrzeiny; h₁ – odstęp między elementami; h₂ – głębokość wgniotu od elektrod

Charakterystyczny w budowie zgrzeiny (rys. 5.3a) jest promieniowy układ kryształów ukierunkowanych podczas krystalizacji zgrzeiny i zgodnych z kierunkiem odprowadzania ciepła przez elektrody zgrzewarki. W zgrzeinie występuje strefa transkrystalizacji, najpóźniej krzepnąca środkowa część zgrzeiny, mogąca zawierać zanieczyszczenia, w obecności których strefa transkrystalizacji staje się najślabszym miejscem zgrzeiny. Wymiarem charakterystycznym zgrzeiny punktowej jest jej średnica d_z , której wielkość dobiera się z zależności (2).

$$d_z = 5\sqrt{g} \quad (5.2)$$

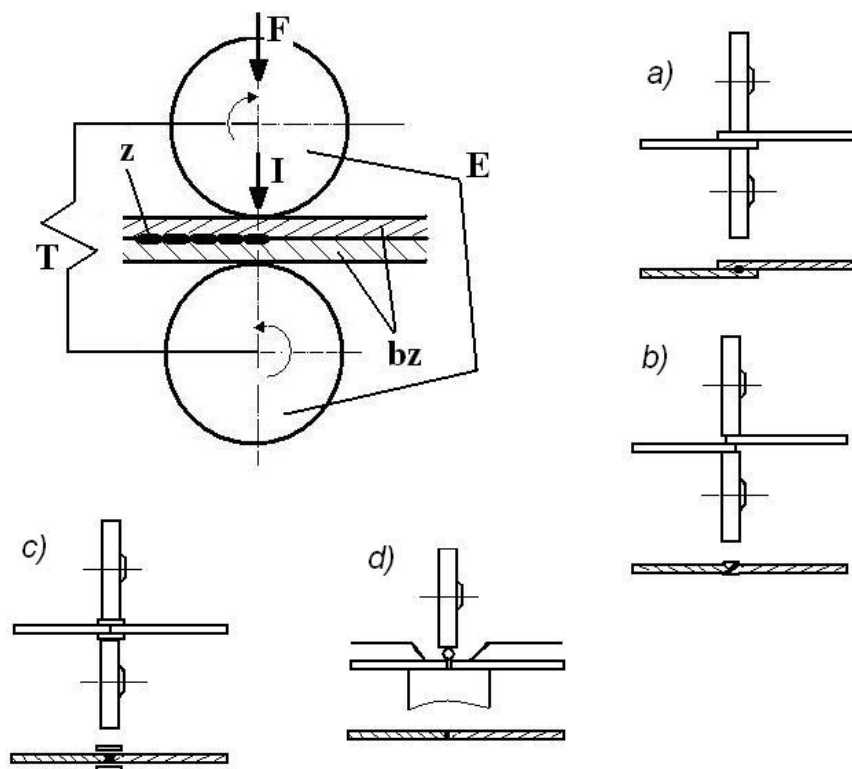
gdzie:

d_z – średnica zgrzeiny [mm],

g – grubość materiału [mm].

5.3. ZGRZEWANIE LINIOWE

Wprowadzenie do rozwiązania konstrukcyjnego zgrzewarki elektrod krążkowych pozwoliło uzyskiwać zgrzeiny liniowe, będące w istocie szeregiem zgrzein punktowych usytuowanych w określonej od siebie odległości lub zachodzących na siebie, tworząc wówczas połączenie liniowe szczelne, podobne do połączenia spawanego (schemat zgrzewania liniowego i jego odmiany przedstawiono na rys. 5.4). Zgrzewanie liniowe zwiększyło zakres połączeń możliwych do stosowania w konstrukcjach, szczególnie o połączenia szczelne (np.: zbiorniki paliwa, radiatory, części silników lotniczych oraz pojazdów kosmicznych). Zakres materiałów zgrzewanych jest podobny jak przy zgrzewaniu punktowym.



Rys. 5.4. Schemat i wybrane odmiany zgrzewania liniowego; E –elektrody zgrzewarki, bz – blachy zgrzewane, z- zgrzeina, T – transformator zgrzewarki, F – siła docisku, I – natężenie prądu zgrzewania

Odmiany zgrzewania liniowego pozwalają na uzyskiwanie połączeń liniowych blach przez:

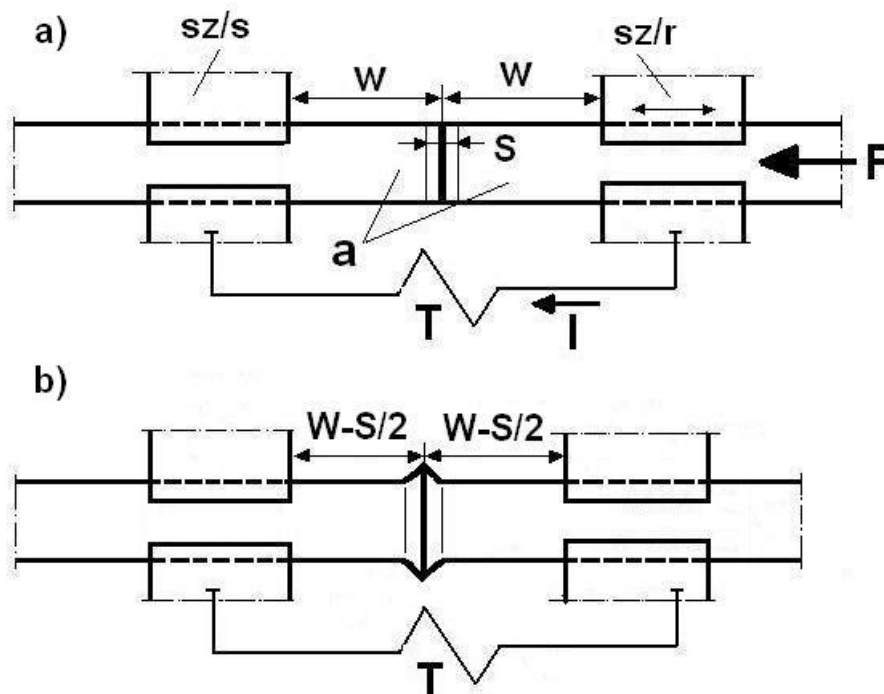
- złożenie blach na zakładkę (określane jako zgrzewanie liniowe na zakładkę, rys. 5.4a),
- złożenie blach na zakładkę ze zwiększonym dociskiem (zgrzewanie liniowo – zgmiotowe rys. 5.4b),
- złożenie blach doczołowo z dodatkowymi nakładkami (zgrzewanie liniowo – doczołowe z użyciem taśmy, rys. 5.4c),
- złożenie blach doczołowo z dodatkowym drutem (zgrzewanie liniowo – doczołowe z użyciem drutu, rys. 5.4d).

Przy zgrzewaniu liniowym obok podstawowych parametrów zgrzewania (natężenia prądu i czasu jego przepływu oraz siły docisku) występuje jeszcze prędkość zgrzewania związana z prędkością obrotową elektrod krążkowych. Istnieje możliwość stosowania, podczas wykonywania połączeń liniowych ciągłego przepływu prądu (określane jako zgrzewanie liniowe ciągłe), przepływu prądu z powtarzalnymi przerwami (zgrzewanie liniowe przerywane) oraz przepływu prądu podczas braku ruchu łączonych elementów (zgrzewanie liniowe krokowe). Sterowanie parametrami

zgrzewania pozwala uzyskiwać połączenia liniowe, w których poszczególne zgrzeiny mogą znajdować się w określonej odległości od siebie (nie dotyczy to zgrzewania liniowego ciągłego), spełniając złożone wymagania projektantów konstrukcji, co przyczynia się do zwiększenia obszaru zastosowań tej metody w technikach wytwarzania. Duże prędkości zgrzewania (wynoszące od około 3 do około 12 m/min odpowiednio dla blach o grubości 2 i 0,25 mm) oraz możliwość łączenia blach pokrytych powłokami ochronnymi, przyczyniają się ponadto do uznania zgrzewania liniowego jako jednego z najekonomiczniejszych procesów łączenia konstrukcji.

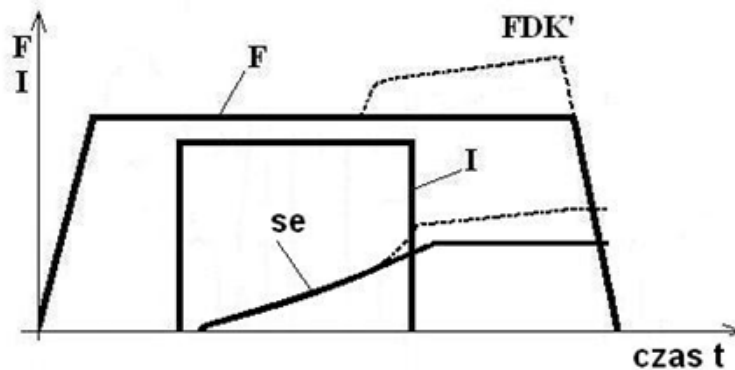
5.4. ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE

Łączenie doczołowo takich elementów jak pręty, rury, taśmy czy różnego typu kształtowniki możliwe jest metodą zgrzewania doczołowego zwarciovego lub doczołowego iskrowego. Proces łączenia doczołowego zwarciovego polega na dociśnięciu do siebie powierzchni czołowych elementów, a następnie nagraniu strefy styku przepływającym prądem (rys. 5.5). Zwiększona oporność, występująca w doczołowym styku elementów, pozwala w strefie styku uzyskać najwyższą temperaturę. Uzyskanie wymaganej temperatury (0,8-0,9 bezwzględnej temperatury topnienia łączonych metali), przy działaniu osiowego docisku, pozwala połączyć trwale elementy, którym w miejscu połączenia towarzyszy charakterystyczne spęczenie.



Rys. 5.5. Schemat zgrzewania doczołowego zwarciovego; rozpoczęcie procesu zgrzewania (a), zakończenie procesu zgrzewania (b); F – siła docisku, I – prąd zgrzewania, T – transformator zgrzewarki, a – elementy zgrzewane, W – wysunięcie elementów ze szczęk mocujących, S – naddatek na spęczenie elementów, sz/s – szczeka mocująca stała, sz/r – szczeka mocująca ruchoma

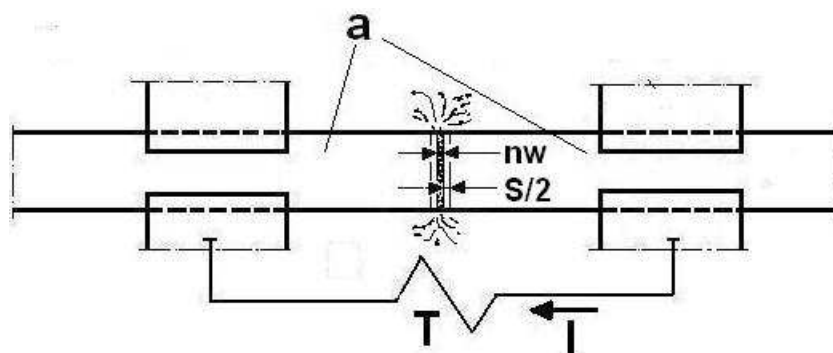
Uzyskanie powtarzalnego skrócenia elementów (o naddatek na spękanie S) wymaga wyłączenia prądu nagrzewania po przesunięciu się ruchomej szczęki zgrzewarki o ustaloną nastawną wielkość. Przebieg zmian parametrów zgrzewania zvarciowego przedstawiono na rys. 5.6. Parametry wpływające na jakość uzyskiwanego połączenia to: natężenie prądu zgrzewania i czas jego przepływu, osiowa siła docisku, naddatek na spęczenie oraz w przypadku zgrzewania różniących się opornością materiałów, długość wysunięcia poszczególnych elementów łączonych ze szczęk mocujących.



Rys. 5.6. Zmiana parametrów, natężenia prądu I, siły docisku F oraz skrócenie elementów Se (w programie prostym –linia ciągła, a w rozszerzonym –linia przerywana) w czasie zgrzewania doczołowego zvarciowego FDK' siła docisku końcowego

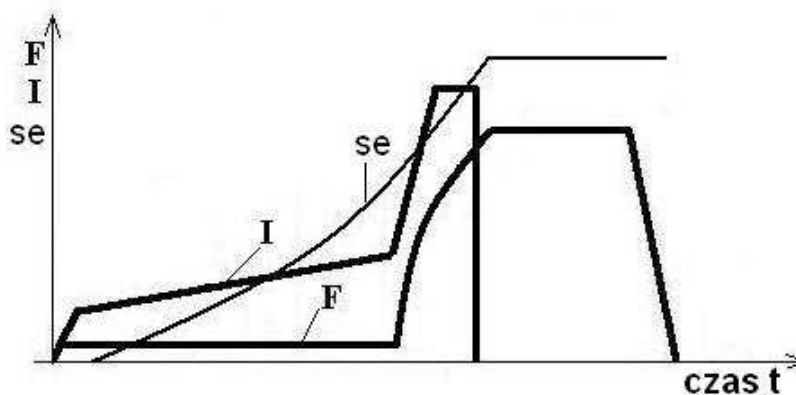
Powierzchnie łączonych elementów muszą być metalicznie czyste, bez zanieczyszczeń tlenkowych i organicznych oraz dokładnie dopasowane. W przypadku łączenia elementów różniących się wymiarami (średnicą, grubością przy elementach płaskich, grubością ścianki przy łączeniu rur), należy obróbką ubytkową przygotować elementy tak, aby nagrzewanie obu elementów było podobne. Podobną metodą do zgrzewania zvarciowego wykonuje się także rury, łączone wzdłużnie z zastosowaniem nagrzewania strefy łączenia prądami wysokiej częstotliwości (z prędkością do 90 m/min i większą).

W podobny do zgrzewania doczołowego zvarciowego sposób można też łączyć materiały doczołowo iskrowo. Połączenie doczołowe iskrowe uzyskuje się zbliżając i oddalając od siebie elementy łączone do których jest doprowadzone napięcie. Wyiskrzanie w miejscu łączenia następuje w skutek dużej gęstości prądu przepływającego przez nieliczne punkty styku na zbliżanych powierzchniach (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Charakterystyczne wyiskrzanie w procesie zgrzewania iskrowego. a – elementy zgrzewane, nw – naddatek na wyiskrzanie, S – naddatek na spęczanie, T – transformator zgrzewarki, I – prąd zgrzewania

Miejscowe połączenia styków zostają stopione, a znaczna część płynnego metalu jest wyrzucana poza strefę zgrzewania. Proces stapiania kolejnych styków rozwija się, aż do czasu, kiedy powierzchnie łączonych materiałów pokryją się jednolitą warstwą ciekłego metalu. Następuje wówczas zwiększony i szybki docisk zwilżonych powierzchni czołowych elementów, umożliwiającą uzyskanie trwałego połączenia kończącego charakterystyczne zjawisko wyiskrzania. W czasie etapu wyiskrzania występujące ciśnienie par metalu chroni tworzącą się ciekłą czołową powierzchnię przed utlenianiem. Na rysunku 5.8 przedstawiono przykładowy program zgrzewania iskrowego.



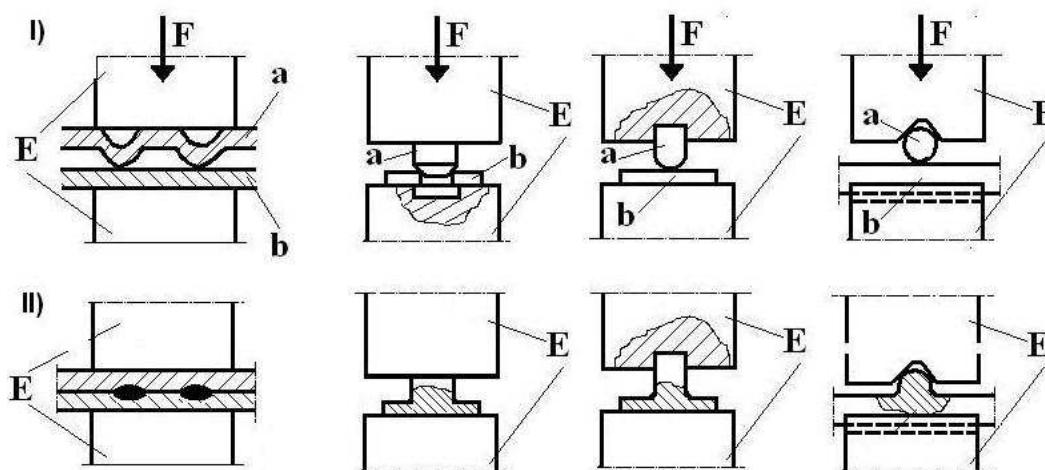
Rys. 5.8. Przebieg zmiany parametrów procesu i skrócenia elementów w czasie zgrzewania iskrowego (z wyiskrzaniem ciągłym); F – siła docisku, I – natężenie prądu, se – skrócenie elementów

Zgrzewanie doczołowe iskrowe z wyiskrzaniem ciągłym znajduje szerokie zastosowanie nie tylko do łączenia rur, kształtowników, elementów ze stali kwasoodpornych, żaroodpornych, miedzi, aluminium i ich stopów, ale także do łączenia obręczy kół samochodowych, ogniw łańcuchów oraz bieżni łożysk tocznych, m. in. z uwagi na bardzo dobrą jakość połączeń.

5.5. ZGRZEWANIE GARBOWE

Uzyskanie połączeń w ściśle określonych miejscach możliwe jest metodą zgrzewania garbowego, po uprzednim wykonaniu specjalnych występów zwanych garbami lub wykorzystaniu fragmentów elementów łączonych, jak np. cylindrycznie zakończona powierzchnia pręta, krawędź otworu, krawędź blachy czy specjalne występy na powierzchni łańcucha śruby. Przy łączeniu elementów ukształtowanych z blach najczęściej wykonuje się celowo kilka garbów określających miejsca przyszłych zgrzein. Zgrzewanie garbowe jest bardzo szeroko stosowane w technikach wytwarzania, szczególnie w produkcji wielkoseryjnej. Tą metodą łączy się elementy ze stali niestopowych, stali odpornych na korozję, a także pręty i blachy z pokryciami metalicznymi cynku czy aluminium oraz metale nieżelazne, w tym mosiądze, brązy, stopy aluminium a także blachy z tytanu i niklu. Rysunek 5.9 przedstawia schemat zgrzewania garbowego oraz sposoby wykorzystania i przygotowania elementów do zgrzewania garbowego.

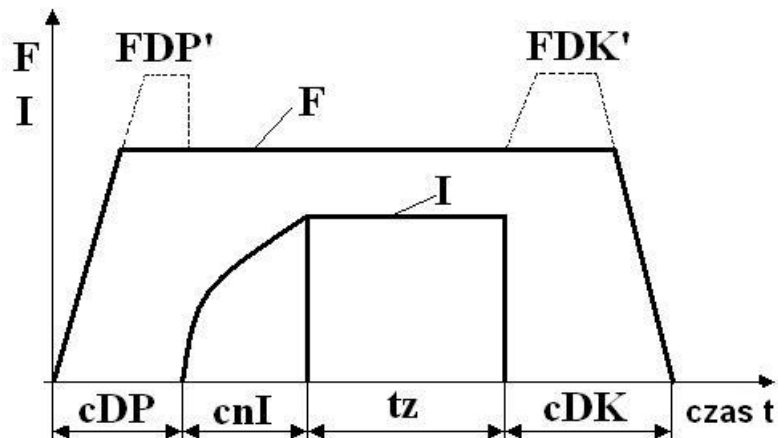
Charakterystyczną cechą zgrzewania garbowego jest jednoczesne zgrzewanie wszystkich garbów, przez co unika się zjawiska bocznikowania prądu występującego podczas wykonywania zgrzein z odstępem czasowym. W początkowym etapie tworzenia zgrzeiny garbowej przez niewielką powierzchnię styku garbu z łączonym elementem przepływa prąd o dużej gęstości, co przy jednocześnie dużym nacisku jednostkowym powoduje szybkie nagrzanie środkowej części garbu i jego plastyczne odkształcanie przemieszczające się w stronę roboczej powierzchni elektrody. W dalszym etapie odkształcający się garb zwiększa powierzchnię styku (w kształcie pierścienia), która przy dalszym przepływie prądu zwiększa jego nagrzewanie, aż do stanu ciekłego. Istniejący docisk powoduje, że część środkowa ponownie styka się z łączonym elementem, a po nagrzaniu do stanu ciekłego całego obszaru styku uzyskuje się połączenie określane jako zgrzeina garbowa. Projektując połączenia garbowe należy zapewnić



Rys. 5.9. Połączenia garbowe (I) oraz przykładowe sposoby przygotowania do zgrzewania elementów z blach, sworzni, kołków i prętów (II): E – elektrody zgrzewarki, F – siła docisku, a, b – elementy zgrzewane

możliwość przenoszenia przez garby, w czasie docisku wstępnego, wartości ustalonego nacisku jako parametru zgrzewania oraz równowagi cieplnej strefy nagrzewania dla uzyskania poprawnego połączenia.

Podobnie jak przy zgrzewaniu punktowym, podstawowe parametry zgrzewania garbowego to natężenie prądu i czas jego przepływu oraz siła docisku. Przy doborze parametrów uwzględnia się liczbę jednocześnie zgrzewanych garbów oraz zaleca się stopniowe narastanie prądu zgrzewania, do ustalonej wartości, dla równomiernego nagrzewania garbów i uzyskanie wysokiej jakości połączenia (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Program zgrzewania garbowego z narastaniem prądu; I – natężenie prądu zgrzewania, F – siła docisku, c_{nI} – czas narastania prądu, t_z – czas zgrzewania, c_{DP} – czas docisku początkowego, c_{DK} – czas docisku końcowego, F_{DP} i F_{DK} – siła docisku początkowego i końcowego

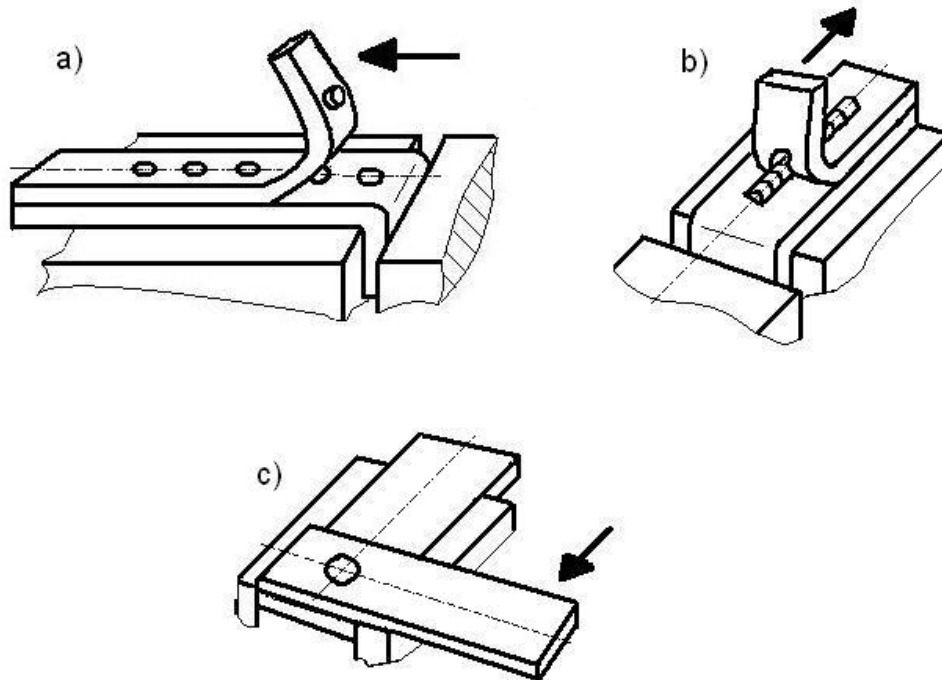
5.6. OCENA POŁĄCZEŃ ZGRZEWANYCH

W połączeniach zgrzewanych (podobnie jak spawanych) określa się tzw. niezgodności spawalnicze, ujmujące w jakim zakresie wykonane złącze zgrzewane odbiega od połączenia wykazującego wzorcowy kształt i strukturę wewnętrzną. W ocenie uwzględnia się niezgodności zewnętrzne, do których zalicza się np.: pęknięcia czy przepalenia zgrzeiny, nadmierny wgniot w materiał pozostawiony przez elektrody zgrzewarki, czy nadtopienie powierzchni zewnętrznych łączonych blach. Niezgodności wewnętrzne przykładowo będą dotyczyć właściwych wymiarów jądra zgrzeiny, wyprysków metalu jądra zgrzeiny, jamy skurczowej oraz pęcherzy czy zgrzania elementów.

Niezgodności wewnętrzne zgrzein można określić za pomocą badań nieniszczących (szczególnie za pomocą badań radiograficznych, magnetycznych, ultradźwiękowych, a także badań penetracyjnych) i badań metalograficznych. Natomiast ogólne własności połączeń zgrzewanych określa się podczas prób ścinania, rozciągania, skręcania i zginania, pozwalających określić wskaźniki wytrzymałościowe. Często stosowanymi badaniami w kontroli bieżącej procesu zgrzewania są próby technologiczne. Nie uzyskuje się w tych próbach wyników

przydatnych do obliczeń wytrzymałościowych, ale pozwalają one szybko ocenić jakość uzyskiwanych połączeń. Należą do nich próby:

- zginania (prętów, rur i blach),
- odrywania zgrzein punktowych wzdłuż linii łączenia określana jako próba wyłuskiwania, zgrzein liniowych wzdłuż i prostopadle do osi zgrzein, (rys. 5.11a,b) oraz zgrzein w złączu krzyżowym drutów
- skręcania zgrzeiny punktowej połączonych blach w złączu zakładkowym (rys. 5.11c), czy drutów w złączu krzyżowym.



Rys. 5.11. Próby technologiczne. Schemat próby odrywania zgrzein punktowych i liniowych (a, b) oraz próba skręcania zgrzeiny punktowej w złączu zakładkowym (c)

5.7. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1) Zgrzewanie doczołowo-zwarciove

Dobrać parametry zgrzewania i wykonać połączenia prętów stal - stal, aluminium – aluminium i miedź– miedź. Ocenic połączenia wizualnie oraz przeprowadzić próbę zginania połączeń. Omówić uzyskane wyniki.

2) Zgrzewanie punktowe

Wykonać kilka połączeń zgrzewanych punktowo blach stalowych przy kolejno narastającym natężeniu prądu zgrzewania. Dokonać rejestracji parametrów procesu zgrzewania. Ocenic połączenia wizualnie oraz przeprowadzić próbę odrywania (wyłuskiwania) wzdłuż osi zgrzein oraz próbę skręcania połączeń. Omówić uzyskane wyniki.

3) Zgrzewanie liniowe

Wykonać połączenie liniowe o określonej podziałce zgrzein oraz połączenie szczelne. Wykonać połączenia przy różnych prędkościach zgrzewania i dokonać oceny połączeń.

4) Zgrzewanie garbowe

Wykonać połączenie garbowe blach stalowych różniących się grubością oraz połączenie nakrętki stalowej posiadającej garby z blachą stalową. Ocenic wizualnie połączenie, a następnie przeprowadzić próbę niszczącą złącza garbowe. Omówic uzyskane wyniki.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy podać:

- schematy stanowisk do zgrzewania,
- parametry technologiczne zgrzewania (natężenie prądu, czas, elektrody),
- wygląd złącza przed i po zgrzewaniu
- ocenę złączy,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] PILARCZYK J., *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, tom 2, WNT, Warszawa 2005.
[2] PAPPALA H., *Zgrzewanie oporowe metali*, Wydawnictwo KaBe, Krosno 2003.
[3] KLIMPEL A., *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*, WNT, Warszawa 1999.

WYKAZ NORM

- PN-74/M-69006:1997 Spawalnictwo – Próby technologiczne złączy blach zgrzewanych punktowo lub garbowo.
PN-74/M-69020 Spawalnictwo – Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych.
PN-74/M-69021 Wytyczne projektowania, wykonania i kontroli złączy zgrzewanych liniowo.

6. ZGRZEWANIE TARCIOWE

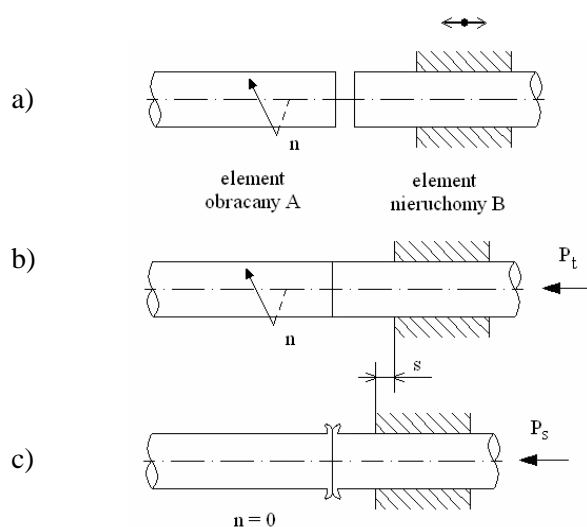
CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest:

- zapoznanie studentów z ideą procesu i jego podstawowymi parametrami,
- budową stanowiska do zgrzewania tarciowego,
- przedstawienie odmian procesu (m. in. FSW).

6.1. WPROWADZENIE

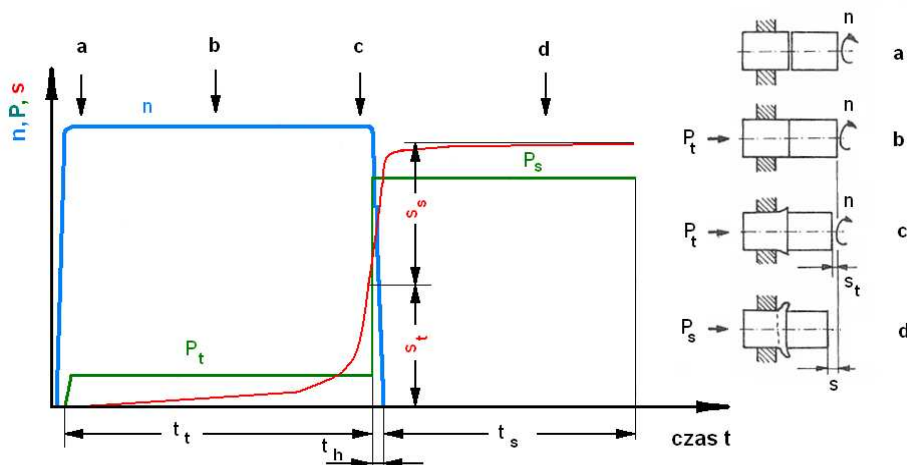
Zgrzewanie tarciove jest ciągle rozwijanym procesem łączenia elementów i znajduje coraz to nowe zastosowania. Metoda zgrzewania tarciowego została wprowadzona w przemyśle w drugiej połowie XX w., a w chwili obecnej stosowana jest przede wszystkim w produkcji masowej i wielkoseryjnej. Idea procesu polega na połączeniu, poprzez spajanie w stanie stałym, dwóch elementów (A i B, rys. 6.1a), z których jeden umieszczony jest w uchwycie nieruchomym, a drugiemu zadaje się ruch obrotowy względem ich wspólnej osi. Elementy są zbliżane do siebie, i w efekcie występuje tarcie zależne od siły docisku P_t (rys. 6.1b). W celu jego pokonania, na trących się powierzchniach wykonana zostaje energia, która następnie zamieniana jest na ciepło. Powierzchnie elementów nagrzewają się do wysokiej temperatury, bliskiej temperaturze topnienia metalu, której jednak nie przekraczają. Proces prowadzony jest w stanie stałym, a połączenie uzyskuje się dzięki zjawiskom pełzania i dyfundowania cząstek zmiękczonego materiału w obszarze styku obu elementów. Po zatrzymaniu obrotów elementy łączone są dociskane siłą P_s , zwykle większą od siły P_t , a uplastyczniony materiał ze strefy tarcia przesuwa się do wypłytki, przy czym następuje skrócenie s łączonych elementów (rys. 6.1c).



Rys. 6.1. Przebieg procesu zgrzewania tarciowego; a) nadanie elementowi A prędkości obrotowej n , b) dociśnięcie elementów powierzchniami czołowymi, c) zwiększenie docisku po zatrzymaniu obrotów

W procesie konwencjonalnego zgrzewania tarcowego można wyróżnić dwie podstawowe fazy: tarcia (t_t), w której elementy są dociskane siłą tarcia P_t , oraz spęczania (t_s), w której elementy są dociskane siłą spęczania P_s , co przedstawiono na rys. 6.2. Wykres uwidacznia przebieg poszczególnych parametrów w wybranym etapie procesu. Faza tarcia ma kluczowe znaczenie przy uplastycznieniu powierzchni. W początkowym okresie wystąpienia zjawiska tarcia wydziela się nieznaczna ilość ciepła, która prowadzi do powstania nieregularnych mostków szepnych. Nadana prędkość obrotowa n powoduje regularne ich rozrywanie, czemu towarzyszy wrywanie cząstek materiału oraz zacieranie nierówności powierzchniowych. Tym sposobem adhezja rozprzestrzenia się na cały obszar styku, a jej rozszerzenie powoduje wzrost temperatury wierzchniej warstwy materiału. Wskutek tego dochodzi do wystąpienia procesu pełzania i dyfuzji obu materiałów, znajdujących się w odległości parametru sieci. Szepienia metaliczne obejmują całą powierzchnię tarcia, temperatura wzrasta do wartości bliskiej temperaturze topienia elementu, tym samym zwiększając uplastycznienie. Etap kończy się zatrzymaniem obracającego się elementu t_h . Uplastyczniony materiał, w wyniku zadanego docisku tarcia, zostaje przemieszczany do tworzącej się wypływki wraz ze wszelkimi powierzchniowymi zanieczyszczeniami, przy czym występuje osiowe skrócenie elementów s_r (rys. 6.2c).

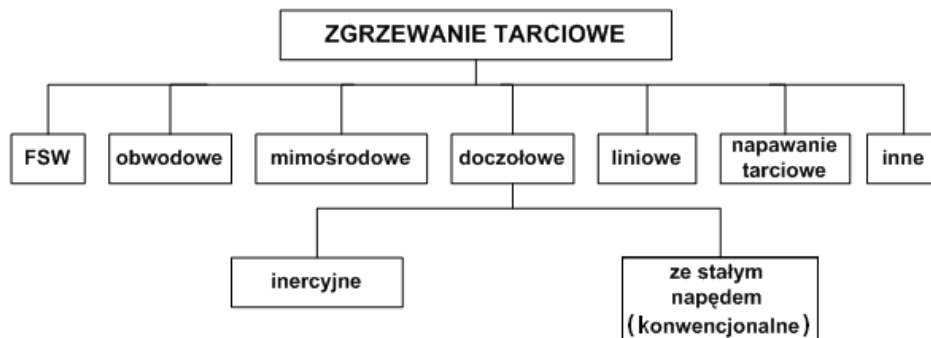
W drugiej fazie procesu, tzw. fazie spęczania, zwiększa się docisk siłą osiową P_s , czego skutkiem jest znaczna wypływka oraz skrócenie materiału (rys. 6.2d). Zastosowany w tym okresie docisk spęczania, zazwyczaj większy od docisku w okresie tarcia, ma na celu uzyskanie odpowiednio wytrzymałego połączenia. Złącze jest wolne od zanieczyszczeń, porów i pęcherzy, ponieważ wraz z uplastycznionym materiałem zostają one przeniesione na zewnątrz do wypływki. Bardzo ważną rolę odgrywa jednak kształt elementów. Wymagany jest regularny przekrój powierzchni zgrzewanych, w przeciwnym wypadku cykliczne odsłanianie powierzchni tarcia doprowadzi do jej utlenienia, a co za tym idzie otrzymane złącze będzie charakteryzować się małą wytrzymałością [3]. Szczegółowe informacje na temat procesu zgrzewania tarcowego można znaleźć w normie PN-EN ISO 15620:2005 – Zgrzewanie tarcowe metali, w której podano wymagania dotyczące zgrzewania tarcowego metalowych elementów konstrukcyjnych.



Rys. 6.2. Przebieg parametrów w czasie procesu zgrzewania tarcowego; P_t – siła docisku w okresie tarcia, P_s – siła docisku w okresie spęczania, n – prędkość obrotowa, s_t – skrócenie w czasie tarcia, s_s – skrócenie w czasie spęczania, s – skrócenie całkowite, t_t – czas fazy tarcia, t_s – czas fazy spęczania, t_h – czas hamowania

6.2. ODMIANY PROCESU

Istnieje kilka sposobów umożliwiających połączenie dwóch elementów metodą zgrzewania tarcowego. Sposoby te można podzielić ze względu na: przebieg procesu, wzajemne przemieszczenie łączonych elementów (zadanie odpowiedniego ruchu) czy zastosowanie odpowiedniego narzędzia. Podział metod zgrzewania tarcowego przedstawiono na rys. 6.3.

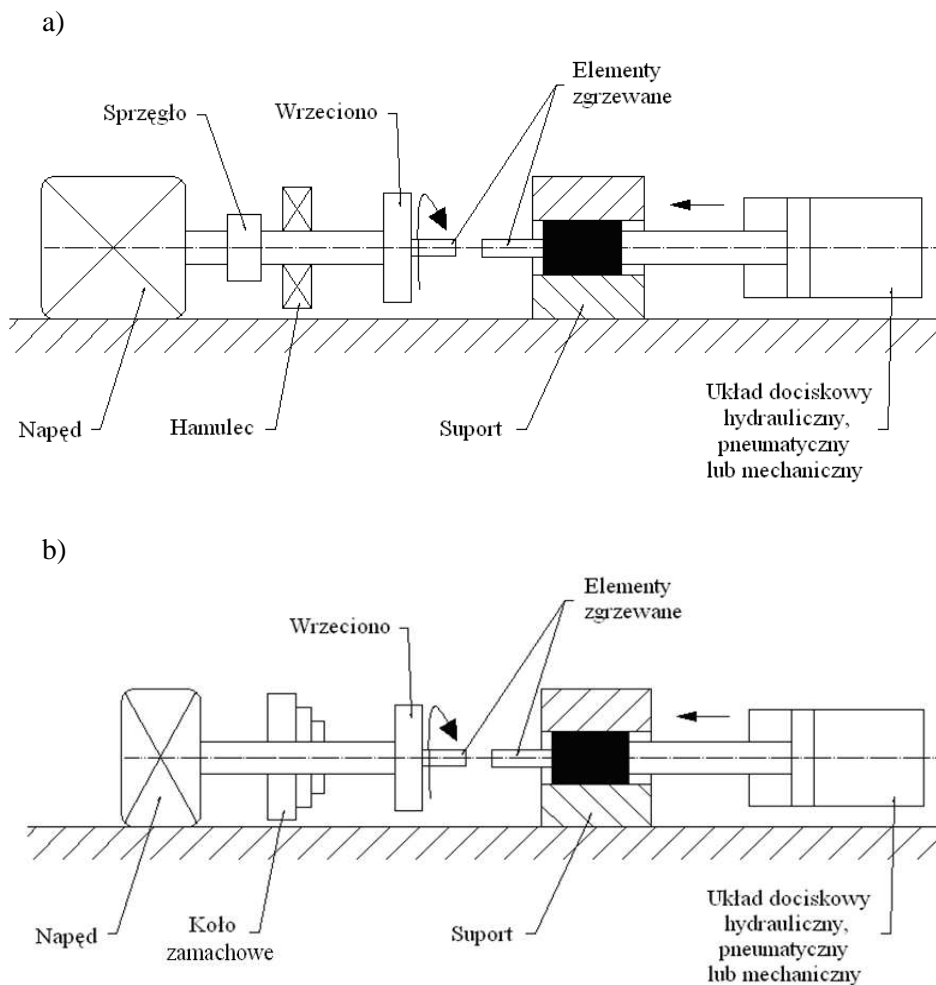


Rys. 6.3. Podział metod zgrzewania tarcowego

Najczęściej spotykane jest zgrzewanie tarciove doczołowe, w którym, ze względu na przebieg procesu, wyróżnia się metodę konwencjonalną i inercyjną [2]. Pierwsze z wymienionych, konwencjonalne zgrzewanie tarciove opiera się na rozpędzeniu wrzeciona z zamocowanym przedmiotem do określonej prędkości, zbliżeniu obu elementów do siebie, aż dojdzie do styku, przy czym prędkość utrzymywana jest na stałym poziomie, a następnie zatrzymaniu wrzeciona i zwiększeniu docisku (rys. 6.4a). W metodzie tej stosuje się energię pochodzącą z niewyczerpalnego źródła (np. napęd elektryczny, hydrauliczny), dostarczaną przez

założony okres czasu, stąd zwykle się nazywać tą metodę zgrzewaniem z napędem ciągłym, gdyż prędkość obrotowa ma wartość stałą.

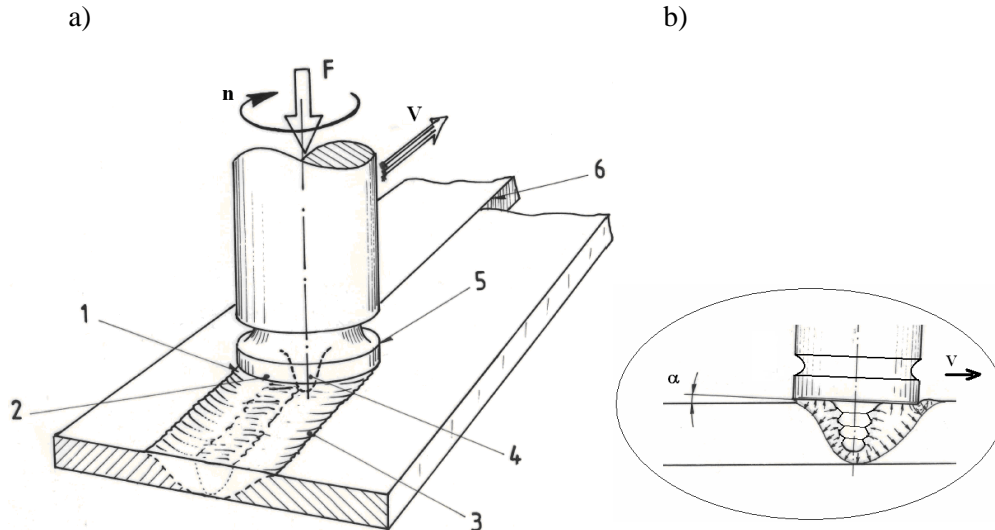
Inercyjne zgrzewanie tarciove polega na zadaniu maksymalnej prędkości już na początku procesu, dzięki wyposażeniu urządzenia w koło zamachowe, a następnie prowadzeniu procesu do chwili, aż wrzeciono zatrzyma się samoczynnie i wówczas zadaje się docisk spęczania, czyli prędkość spadnie od wartości maksymalnej do zera. W tej metodzie energia zgromadzona jest w wirujących systemach, stąd nazwa zgrzewania ze zgromadzoną energią. Istotną różnicą w budowie urządzeń stosowanych w obu metodach jest sprzęgło i hamulec w konwencjonalnej zgrzewarce tarciovej, które są zastąpione kołem zamachowym w zgrzewarce inercyjnej, co zobrazowano na rys. 6.4b.



Rys. 6.4. Schemat zgrzewarki tarciovej: a) konwencjonalnej; b) inercyjnej

Jedną z najnowszych metod zgrzewania tarciovej jest metoda FSW (z ang. Friction Stir Welding – zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny). W metodzie tej do wykonania połączenia niezbędne jest wykorzystanie narzędzia, zwanego trzpieniem mieszającym, które penetruje materiał wzdłuż linii styku elementów (rys. 6.5). Wprowadzone w ruch narzędzie w chwili styku doprowadza

do nagrzania i uplastycznienia materiału. Posiada ono specjalny kształt, najczęściej stożka gwintowanego, co umożliwia mieszanie materiału i utworzenie zwartej spoiny. Wieniec opory narzędzia, trący po powierzchni elementów, zabezpiecza obszar zgrzeiny przed utlenianiem, jak również nadaje licu zgrzeiny estetyczny wygląd.



Rys. 6.5. Schemat zgrzewania tarcowego metodą FSW (a); 1 – strona natarcia, 2 – krawędź dolna wieńca opory, 3 – strona splywu, 4 – trzpień mieszający, 5 – krawędź prowadząca wieńca opory, 6 – łączone krawędzie; powstałe pole naprężeń i kąt nachylenia wieńca (b)

Ze względu na geometrię narzędzia, metoda wykorzystywana jest zwykle do łączenia doczołowego blach, przede wszystkim aluminiowych, ale również ze stopów magnezu, cyrkonu, miedzi, tytanu oraz stali nierdzewnej. Zastosowanie tej metody do zgrzewania aluminium i jego stopów wynika z właściwości tych metali i ich szerokiego stosowania w przemyśle. Aluminium posiada niewielką gęstość, wynoszącą $2,7 \text{ g/cm}^3$ oraz temperaturą topnienia $660 \text{ }^\circ\text{C}$. W wyniku wymieszania, uplastyczniony materiał osiąga wysoką temperaturę, która wywołuje powstanie pola naprężeń, a to z kolei rozpoczyna procesy dyfuzji. W efekcie powstaje bardzo dobrej jakości złącze, o wysokich właściwościach mechanicznych, a szczególnie wytrzymałości na rozciąganie, która często przewyższa wytrzymałość materiału rodzimego (100 MPa). Wynika to z faktu, że mikrostruktura złącza nie jest dendrytyczna, jak w spoinach wykonanych metodami z przetopem, a zrekrystalizowana dynamicznie, o ziarnach osiagających rozmiary rzędu $1\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$. Zmniejszenie rozmiarów ziaren zwiększa wytrzymałość materiału.

Metoda FSW różni się znacznie od metody konwencjonalnej, stąd też w procesie występują inne podstawowe parametry (rys. 6.5), a mianowicie:

- prędkość obrotowa narzędzia (n) – mieści się w przedziale od 300 do 3000 obr/min,
- prędkość zgrzewania (V) – zależy od grubości i typu materiału, dla stopów aluminium waha się od 0,3 do 1,5 m/min,
- kąt nachylenia powierzchni wieńca opory do zgrzewanej powierzchni (α) od $1,5$ do 3° – wartość optymalna.

Metoda ta umożliwia łączenie jednostronne blach aluminiowych o grubości do 75 mm oraz stali niskostopowych lub nierdzewnych austenitycznych o grubości do 20 mm.

6.3. PARAMETRY PROCESU KONWENCJONALNEGO ZGRZEWANIA TARCIOWEGO

Jak w każdym procesie, tak i w zgrzewaniu tarciovym, główny wpływ na właściwości powstającego złącza mają jego parametry. Ich dobór jest zróżnicowany, w zależności od rodzaju zgrzewanych materiałów, średnicy i kształtu części w obszarze łączenia, co ma przede wszystkim związek z powierzchnią tarcia oraz rozkładem wydzielanego ciepła.

Podstawowymi parametrami konwencjonalnego procesu zgrzewania tarciovego są: prędkość obrotowa, docisk tarcia, czas tarcia (nagrzewania), docisk spęczania, czas spęczania, skrócenie w okresie tarcia, prędkość liniowa obwodowa, czas hamowania oraz opóźnienie spęczania (rys. 6.2). Głównymi wielkościami, które decydują o pracy tarcia, przez co mają bezpośredni wpływ na ilość wydzielonego ciepła w okresie tarcia, są [1]:

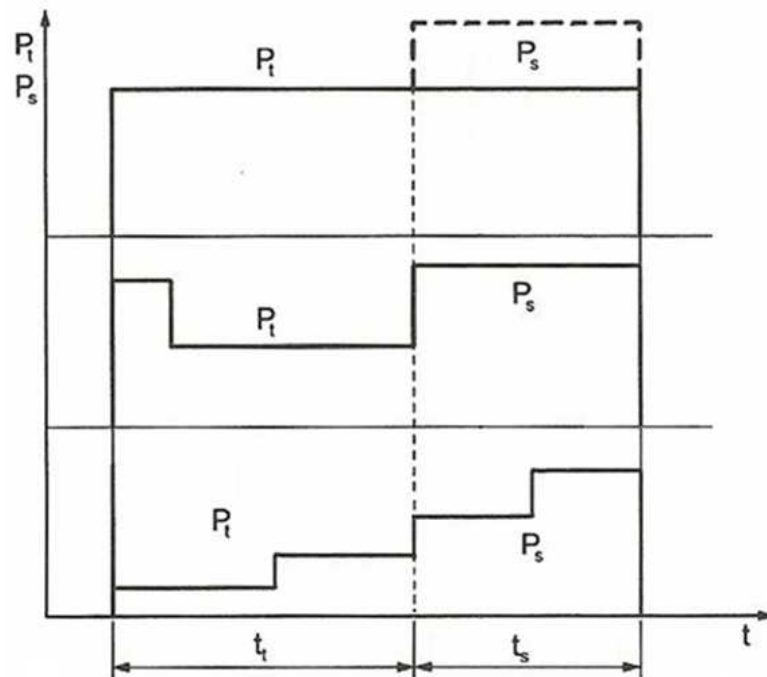
- Prędkość obrotowa – jest dobierana w zależności od rodzaju oraz geometrii łączonych materiałów i mieści się w przedziale 400–10000 obr/min. Parametr ten ma kluczowe znaczenie na wzrost temperatury w złączu. Większa temperatura pozwala otrzymać złącze przy zastosowaniu mniejszych docisków. Po przekroczeniu prędkości około 800 obr/min, temperatura zatrzymuje swój raptowny przyrost i utrzymuje do końca procesu stałą wartość, w zależności od łączonego materiału. Wzrost prędkości obrotowej zmniejsza strefę wpływu ciepła i jednocześnie sprawia, że nagrzewanie powierzchni stykowych przebiega bardziej równomiernie, natomiast jej spadek prowadzi do zwiększenia ilości wypływającego do wypłytki materiału. Dlatego też metale o dużej przewodności cieplnej powinny być zgrzewane z dużymi prędkościami obrotowymi. Przy łączeniu niektórych materiałów zbyt duża prędkość obrotowa może prowadzić do osiągnięcia temperatury eutektycznej, a następnie wydzielenia kruchych związków międzymetalicznych w zgrzeinie, co jest bardzo niepożądane. Stąd też prędkość obrotowa powinna być dobierana optymalnie, w zależności od właściwości łączonych elementów. W tym celu zaleca się, aby iloczyn prędkości obrotowej n oraz średnicy zewnętrznej łączonego elementu d mieścił się w przedziale wyznaczanym zgodnie z zależnością (6.1), z wyjątkiem tytanu, dla którego odpowiednia jest zależność (6.2).

$$1,2 \cdot 10^4 < n \cdot d < 6,0 \cdot 10^4 \quad (6.1)$$

$$N \cdot d = (8 - 10) \cdot 10^4 \quad (6.2)$$

Praktycznie przyjmuje się zazwyczaj prędkość obrotową procesu w przedziale od 450 do 3600 obr/min.

- Docisk tarcia – jest kolejnym parametrem mającym wpływ na nagrzewanie obszaru styku. Jego optymalny dobór powinien zapewnić osiągnięcie temperatury zgrzewania w możliwie najkrótszym czasie okresu tarcia i minimalnym skróceniu elementów. Wartość tego parametru, w zależności od łączonych materiałów, mieści się zazwyczaj w przedziale 10–200 MPa. Zbyt mała wartość docisku tarcia znacznie zwiększa czas trwania procesu, gdyż spowalnia nagrzanie łączonych powierzchni. Natomiast zbyt duża wartość docisku tarcia może spowodować przekroczenie nominalnej mocy maszyny (zbyt duża wartość momentu tarcia). Dlatego też zaleca się sterowanie dociskiem tarcia, co gwarantuje uzyskanie odpowiednio nagrzaną powierzchnię materiału, a dzięki temu otrzymanie prawidłowego połączenia (rys. 6.6).



Rys. 6.6. Przykładowe przebiegi zmian docisku tarcia P_t i spęczania P_s , stosowane przy konwencjonalnym zgrzewaniu tarciovym

Należy podkreślić, że zastosowane w miejscu styku obciążenie powinno mieć taką wartość, by łączone powierzchnie mogły zbliżyć się do siebie na odległość działania sił atomowych, co umożliwi powstawanie lokalnych szepień materiałów. Prowadzi to do wzrostu momentu tarcia, praca zamienia się w ciepło i dochodzi do wzrostu temperatury.

- Czas tarcia – jest parametrem w pełni uzależnionym od dwóch powyższych. Zależy również od średnicy łączonych elementów oraz powierzchni łączenia. Za jego pomocą najdogodniej jest sterować cyklem nagrzewania materiału

na odpowiednią głębokość. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wydzielanie się ciepła na powierzchni tarcia nie ma charakteru równomiernego. Największa ilość ciepła wydziela się na obwodzie powierzchni tarcia (tutaj prędkość liniowa zyskuje wartości maksymalne) i właśnie w tym obszarze temperatura sięga największych wartości, a co za tym idzie osiąga się również największą plastyczność. Obszar środkowy, w którym ciepło wydziela się w nieznacznych ilościach, ogrzewany jest wskutek przewodzenia ciepła z warstw zewnętrznych. Dlatego im większa średnica oraz im mniejszy współczynnik przewodności cieplnej metalu, tym mniejsza temperatura wydzieli się w części środkowej powierzchni tarcia, podczas gdy na obwodzie materiał uzyska temperaturę zgrzewania. W związku z tym, w celu wyrównania temperatury w całym obszarze zgrzewania, należy uwzględnić odpowiednio długi czas trwania procesu. Należy jednak zwrócić uwagę na to, aby czas tarcia nie był zbyt długi, co może doprowadzić do zmniejszenia momentu tarcia i zwiększenia skrócenia elementów. Jego wartość zazwyczaj mieści się w przedziale od 1 do 120 s.

Nagrzanie powierzchni, poza czasem tarcia, może być również kontrolowane poprzez zadanie odpowiedniego skrócenia materiału, co jest korzystne ze względu na jego oszczędność oraz estetykę złącza, jednak nie zawsze gwarantuje to uzyskanie dobrej jakości połączenia. Skróceniu elementów towarzyszy tworzenie się wokół strefy łączenia kołnierza z uplastycznionego materiału, zwanego wypływką. Po zakończeniu zgrzewania wypływka może być usunięta, w procesie toczenia, okrawania, lub pozostawiona.

Powyżej opisano parametry występujące w etapie tarcia, które mają kluczowe znaczenie w procesie. Należy jeszcze wspomnieć o pozostałych, takich jak docisk spęczania i czas spęczania, występujących w etapie spęczania, czy w czasie hamowania. Docisk spęczania pozwala otrzymać połączenie o pożądanej wytrzymałości, co dzieje się dzięki zwiększonemu dociskowi, przy jednoczesnym zahamowaniu obracającego się elementu, kiedy materiał jest wystarczająco uplastyczniony. Zazwyczaj przyjmuje się docisk spęczania w wielkości 20–400 MPa, co stanowi wzrost względem docisku tarcia o 20–100%, w zależności od rodzaju łączonych materiałów. Czas spęczania pozwala sterować dociskiem spęczania, dzięki czemu można zapobiec przedostaniu się zbyt dużej ilości materiału do wypływki. Czas hamowania występuje tylko w procesie konwencjonalnego zgrzewania tarciovego i wyznacza granicę między etapem tarcia, a spęczania.

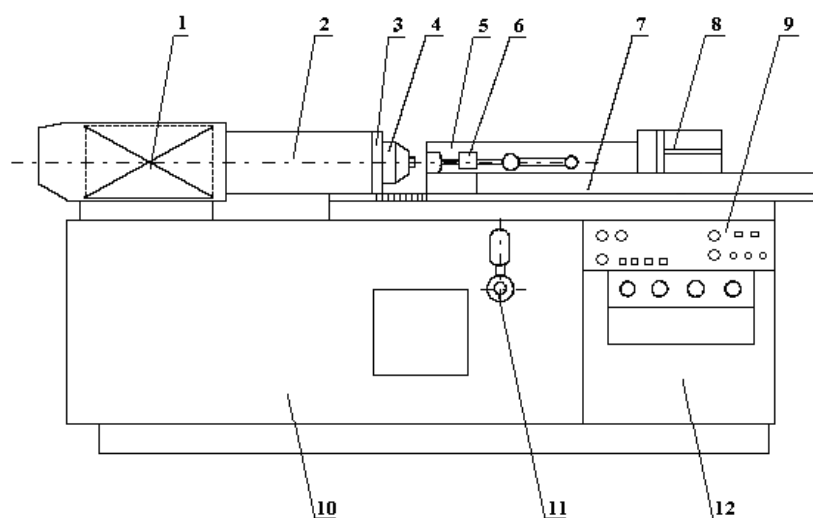
Optymalne parametry danego procesu zgrzewania tarciovego wyznacza się zazwyczaj przy wykorzystaniu modelowania metodą elementów skończonych MES. Wcześniej w tym celu prowadzono badania eksperymentalne lub stosowano metody matematyczne.

6.4. STANOWISKO DO ZGRZEWANIA TARCIOWEGO

Gabarytowo zgrzewarki tarciove należą do największych urządzeń służących do łączenia dwóch elementów, z racji tego ich budowa jest bardzo złożona. Opisu poszczególnych podzespołów dokonano na podstawie schematu przedstawionego na rys. 6.7 i tak:

- korpus – obudowa zgrzewarki w formie skrzynkowej konstrukcji spawanej,
- wrzeciennik z uchwytem tulejowym – zespół wprowadzający w ruch obrotowy jeden z elementów zgrzewanych,
- suport – zespół, w którym zamocowany jest nieobrotowy element (zaciskany na przykład pneumatycznie), wykonuje ruchy posuwowe,
- cylinder docisku – siłownik hydrauliczny dwustronnego działania z jednostronnym tłoczyskiem, przesuwa suport po prowadnicach, wywiera określone dociski,
- pulpit sterowniczy – umożliwia zadanie wszelkich parametrów oraz sterowanie procesem.

W laboratorium Zakładu Spawalnictwa na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej prowadzone są badania z wykorzystaniem zgrzewarki tarciovej wykonanej przez Zakład Budowy Urządzeń Spawalniczych w Gliwicach, model ZTa-10 (rys. 6.8).



Rys. 6.7. Schemat zgrzewarki tarciovej ZTa-10: 1– silnik elektryczny napędu wrzeciennika, 2–wrzeciennik, 3– wrzeciono, 4– uchwyt, 5– suport, 6–zderzak ustalający element, 7– prowadnica suportu, 8– siłownik hydrauliczny dociskowy, 9– pulpit sterowniczy, 10– korpus, 11–dźwignia zamykania uchwytu suportu (siłownik pneumatyczny), 12– szafa sterownicza

Zgrzewarka ta umożliwia przeprowadzenie konwencjonalnego procesu zgrzewania tarciowego przy prędkości obrotowej 1450 obr/min. Analizując przebieg cyklu roboczego maszyny, można wyróżnić następujące etapy:

1. Włożenie elementu zgrzewanego w uchwyt.

2. Włożenie drugiego elementu zgrzewanego między szczęki uchwytu na suportie i jego zamknięcie siłownikiem pneumatycznym.
3. Uruchomienie automatycznego cyklu pracy zgrzewania poprzez naciśnięcie przycisku na pulpicie, na który składa się:
 - a) dosuw suportu,
 - b) wprowadzenie w ruch wrzeciona,
 - c) tarcie czoł zgrzewanych elementów – odmierzane przełącznikiem czasowym bądź nastawionym skróceniem,
 - d) zatrzymanie wrzeciona,
 - e) wywarcie docisku spęczania odmierzone przełącznikiem czasowym,
 - f) automatyczne otwarcie uchwytu i odsunięcie suportu.
5. Otwarcie uchwytu imadłowego suportu i wyjęcie zgrzanych elementów.

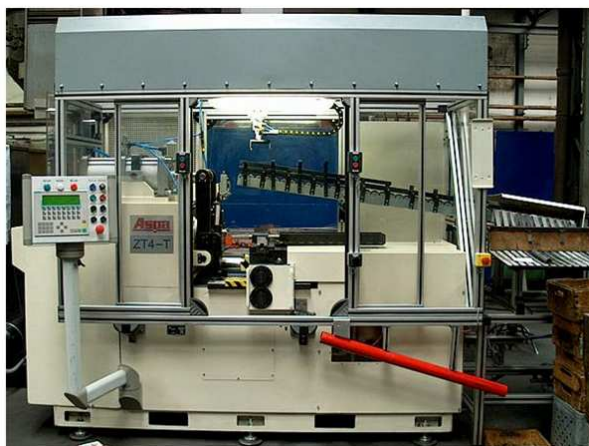
Przed przystąpieniem do zgrzewania elementów zaleca się przeprowadzenie cyklu kontrolnego, co ma na celu ustawienie i sprawdzenie prawidłowości doboru parametrów procesu technologicznego zgrzewania. Cykl kontrolny od cyklu roboczego różni się jedynie brakiem ruchu obrotowego wrzeciona.



Rys. 6.8. Zgrzewarka ZTa-10 wyprodukowana przez Zakład Budowy Urządzeń Spawalniczych w Gliwicach

Spośród zgrzewarek tarciovych można również wyróżnić modele o specjalnym przeznaczeniu, które charakteryzują się możliwością zgrzewania części jednego rodzaju w produkcji masowej (np. samochodowych wałów przegubowych, elementów amortyzatorów). Są to zazwyczaj urządzenia automatyczne, wyposażone w zespoły do wkładania łączonych części do uchwytów i ich odtransportowania z przestrzeni roboczej za pomocą manipulatora, po zakończeniu procesu. Widok takiego stanowiska pokazano na rys. 6.9.

Najważniejszym parametrem zgrzewarki jest jej moc, gdyż od niej zależy maksymalna średnica zgrzewanych elementów.



a)

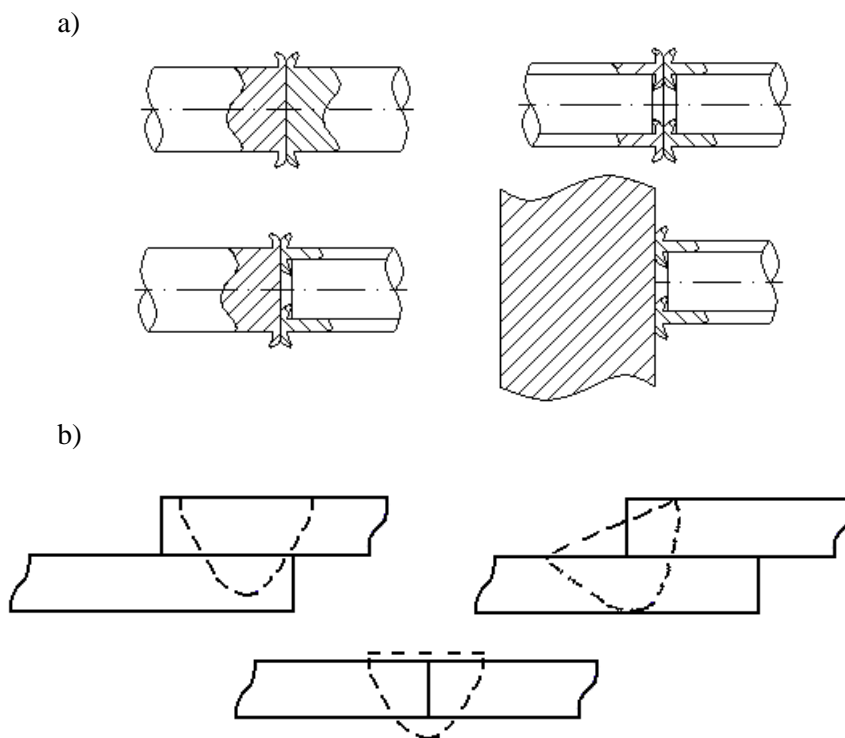


b)

Rys. 6.9. Zgrzewarka tarciowa ZT4-T specjalizowana do produkcji tłoczków amortyzatorów samochodowych wyprodukowana przez firmę ASPA (a); przykład połączonych elementów (b)

6.5. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA

Przykładowe rodzaje połączeń zgrzewanych tarciowo pokazano na rys. 6.10.



Rys. 6.10. Przykłady połączeń zgrzewanych tarciowo: a) konwencjonalnego, b) metodą FSW

Korzystne właściwości techniczno – ekonomiczne zgrzewania tarciowego sprawiają, że metoda ta jest szeroko stosowana w przypadkach, w których wymaga się znacznej wydajności przy dużych nakładach produkcji. Można tu wyróżnić przede wszystkim przemysł samochodowy, lotniczy, ponadto wytwarzanie narzędzi

do skrawania (wiertła, rozwiertaki, frezy, gwintowniki), narzędzi górniczych i rzemieślniczych, matryc kuźniczych, elementów przyrządów i uchwytów, maszyn włókienniczych [4].

Zgrzewanie tarciove, jako jedna z metod spajania, umożliwia łączenie szerokiego zakresu materiałów, chociażby miedzi, aluminium, stali nierdzewnych, stali konstrukcyjnych o zawartości węgla poniżej 0,59%, a także materiałów różnoimiennych. Pewne trudności mogą pojawić się przy łączeniu stali o zawartości węgla powyżej 0,6%, wówczas należy podgrzać materiał przed rozpoczęciem procesu. Spośród materiałów, których nie można połączyć tą metodą można wyróżnić: materiały zdolne do tworzenia poślizgów powierzchniowych, materiały nieodkształcalne, stale o strukturze z równoległymi pasmami zanieczyszczeń oraz stale zawierające niektóre zanieczyszczenia, np. siarkę.

Przykładami elementów zgrzewanych tarciove są: zawory ssące i wydechowe silników, cylindry hydrauliczne, armatura do końcówek węży hydraulicznych, końcówki cięgien, kolumna kierownicy, tłoczyska, części przekładni zębatych, wały napędowe i wały turbin (rys. 6.11.a).

Zgrzewanie tarciove metodą FSW znajduje głównie zastosowanie do wykonywania złączy liniowych (doczołowych lub zakładkowych), w tym również do łączenia stopów różnych metali, co jest trudne w przypadku stosowania innych metod spajania (rys. 6.11.b). Fakt ten został wykorzystany przy produkcji felg aluminiowych, gdzie dwie części tworzące felgę, wykonane z różnych stopów aluminium i często przy użyciu różnych technik (kucie, odlewanie, tłoczenie, itp.) są zgrzewane obwodowo przy użyciu metody FSW.

a)



Wały napędowe



Elementy skrzyni biegów



Narzędzia



Elementy turbospężarki

b)



Rys. 6.11. Przykłady zastosowań zgrzewania tarcowego: a) konwencjonalnego, b) metody FSW

6.6. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Zapoznanie studentów z budową i funkcjonowaniem zgrzewarki tarcowej ZTa-10.
2. Scharakteryzowanie zgrzewanych materiałów (rodzaje, wymiary).
3. Dobór i ustawienie parametrów zgrzewania.
4. Wykonane zgrzewania tarcowego.
5. Ocena złącza.
6. Zapoznanie z innymi przykładowymi próbkami zgrzewanymi tarcowo.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu podać:

- schemat stanowiska,
- parametry technologiczne zgrzewania (prędkość obrotowa, dociski, czasy, skrócenia),
- opis przed łączeniem złącza i po procesie zgrzewania,
- ocenę wyglądu zgrzeiny,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] PILARCZYK J., *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, tom 2, WNT, Warszawa 2005.
- [2] KLIMPEL A., *Technologia zgrzewania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.
- [3] AMBROZIAK A., *Zgrzewanie tarcowe metali trudno topliwych w cieczy na tle innych metod spajania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
- [4] MICHAŁSKI R., KAMIŃSKI Z., *Zgrzewanie tarcowe*, WNT, Warszawa 1975.

WYKAZ NORM

PN-EN ISO 15620:2005 Zgrzewanie tarcowe metali.

7. LUTOWANIE

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie studentów z:

- charakterystyką metod lutowania miękkiego i twardego,
- wyposażeniem stanowisk do procesów lutowania,
- materiałami dodatkowymi do lutowania miękkiego i twardego,
- techniką lutowania wybranych elementów i materiałów.

7.1. WPROWADZENIE

Lutowanie, obok klejenia, zaliczane jest do najstarszych technik spajania materiałów. Znane było już 4–5 tysięcy lat p.n.e. [1,2]. Lutowano wtedy ozdoby i biżuterię ze złota i srebra. Dzisiaj lutowanie należy, obok spawania, do najczęściej stosowanych metod spajania. Za pomocą lutowania można łączyć metale, a także niemetale, takie jak: ceramikę, szkło, grafit, węgliki spiekane, nie tylko między sobą, ale również w połączeniach materiałów różnoimiennych [1,3-9].

Lutowanie jest procesem wyraźnie różniącym się od spawania. Nie występuje tu nadtapianie materiałów łączonych, a jedynie stapianie materiałów dodatkowych, którymi są najczęściej topnik i lut. Cechą charakterystyczną lutowania jest szczelina lutownicza, tj. odstęp o właściwościach kapilarnych, pomiędzy elementami lutowanymi. Jeśli stosuje się proces lutowania przy odstępie niekapilarnym i ukosowaniu elementów łączonych, tak jak przy spawaniu, proces taki nosi nazwę lutospawania.

Ogólnie, z uwagi na temperaturę topnienia lutów, rozróżnia się lutowanie miękkie i twarde. Lutowanie miękkie, jest procesem, w którym temperatura likwidus lutu jest mniejsza od 450 °C. Lutowanie twarde jest metodą lutowania, które zachodzi przy stosowaniu lutów o temperaturze likwidus powyżej 450 °C. W literaturze niemieckiej można się spotkać również z terminem procesu lutowania wysokotemperaturowego, które występuje przy stosowaniu lutów o temperaturze topnienia powyżej 900 °C [1]. Ze względu na znaczne utlenianie nagrzewanych materiałów w wysokich temperaturach, przeprowadza się je zwykle w piecach w osłonie gazowej lub w próżni, bez potrzeby stosowania topników.

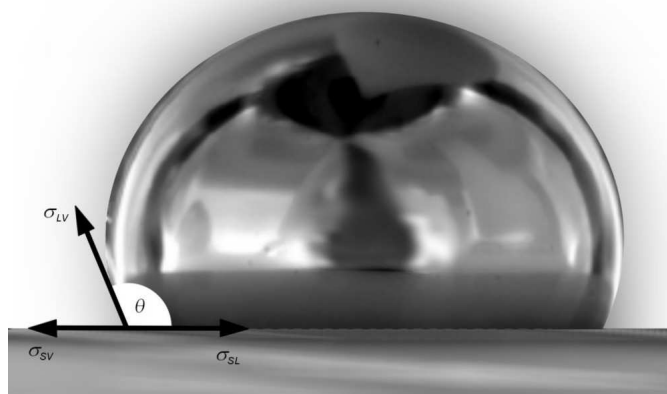
W technologiach lutowania wymagane jest, jak już wspomniano, stosowanie materiału dodatkowego – lutu (spoiwa), o niższej temperaturze topnienia od materiałów lutowanych, który po stopieniu stanowi lutwinę między łączonymi elementami. Materiałami dodatkowymi stosowanymi w technikach lutowania są również topniki i gazy ochronne, które mają za zadanie osłonię nagrzewanych elementów przed utlenianiem oraz oczyszczanie i roztwarzanie nowo tworzących się tlenków na powierzchni elementów lutowanych. Umożliwia to wystąpienie podstawowych zjawisk powierzchniowych, zachodzących podczas każdego procesu lutowania, takich jak: zwilżanie, rozpląnięcie lutu i jego kapilarność.

7.2. ZJAWISKA FIZYKOCHEMICZNE WYSTĘPUJĄCE W PROCESACH LutowANIA

Zjawiska powierzchniowe, takie jak: zwilżalność, kapilarność i rozplątliwość występują w każdym procesie lutowania, niezależnie od temperatury. Ze względu na temperaturę topnienia lutu i temperaturę lutowania lutowanie miękkie i twarde różnią się istotnie zjawiskami fizykochemicznymi, w wyniku których powstaje połączenie lutowane o określonej wytrzymałości mechanicznej. W lutowaniu miękkim zachodzą zjawiska adhezji i kohezji, natomiast w lutowaniu twardym występują zjawiska dyfuzji.

Zwilżalność w procesach lutowania to zdolność lutu do pokrywania powierzchni elementów łączonych cienką, równomierną i nieprzerwaną warstwą. Zwilżanie lutem związane jest z napięciem powierzchniowym materiału lutowanego.

Wartość napięcia powierzchniowego σ wyznacza się z równania Younga, co wynika z warunku równowagi termodynamicznej kropli lutu na powierzchni materiału lutowanego podczas oddziaływania topnika lub osłony gazowej. Graficzną interpretację równania Younga pokazuje rys. 7.1.



Rys. 7.1. Graficzna interpretacja równania Younga

Dla lutu w fazie ciekłej można przyrównać napięcie powierzchniowe σ do energii powierzchniowych ω i stąd:

$$\cos \theta = \frac{\omega_{SV} - \omega_{SL}}{\omega_{LV}} \quad (7.1)$$

w którym:

$\cos \theta$ – współczynnik zwilżania,

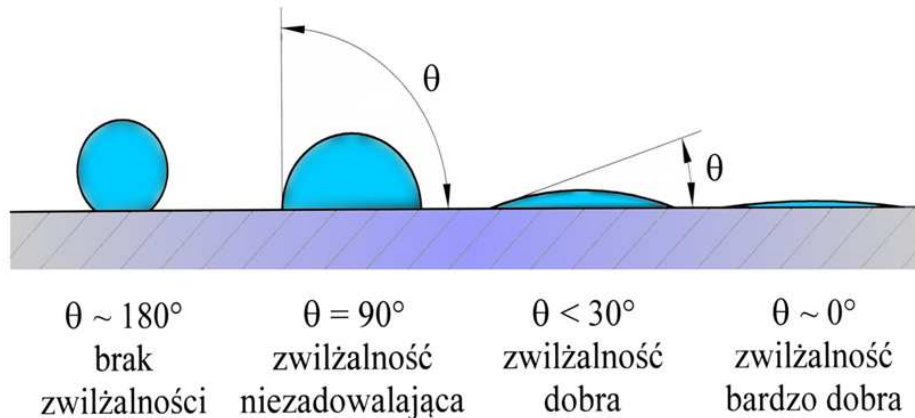
ω_{SV} – energia powierzchniowa pomiędzy fazą stałą i gazową,

ω_{SL} – energia powierzchniowa pomiędzy fazą stałą i ciekłą,

ω_{LV} – energia powierzchniowa pomiędzy fazą ciekłą i gazową.

Wartość kąta zwilżania ciekłym lutem θ służy często do określania lutowności łączonych materiałów. Gdy kąt θ jest zawarty między 90 a 180°, tj. gdy

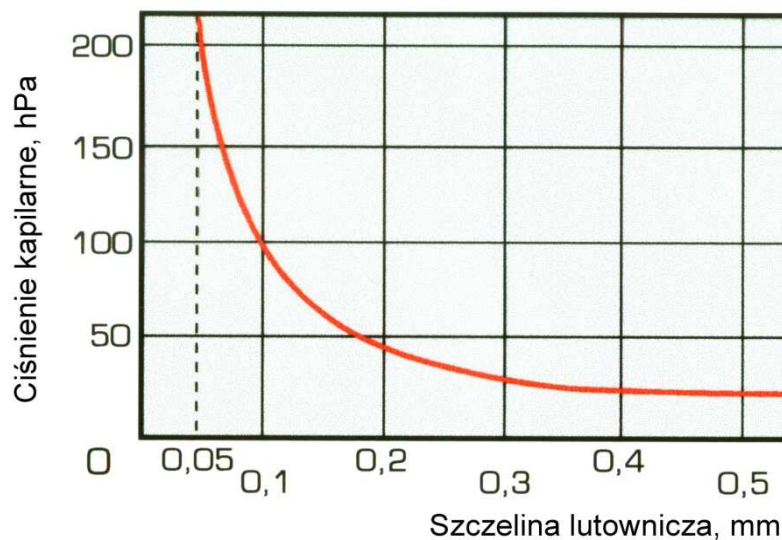
$0 \geq \cos \theta \geq -1$, przyjmuje się, że ciekły lut nie zwilża ciała stałego [3-6,10]. Dobrą zwilżalność materiału określa się kątem zwilżania, najczęściej poniżej 30° . Poszczególne przypadki oddziaływania lutu na powierzchni lutowanej pokazano na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Przypadki zwilżania lutem materiału lutowanego

Kapilarność w procesie lutowania określa zdolność do samoczynnego wypełniania szczelin przez ciekły lut, która wynika z różnicy między ciśnieniem powstającym wewnątrz szczeliny, a ciśnieniem otoczenia.

Największy wpływ na kapilarność, oprócz napięcia powierzchniowego oraz lepkości i gęstości lutu, ma szerokość szczeliny lutowniczej. Zależność ciśnienia kapilarnego od szerokości szczeliny lutowniczej pokazano na rys. 7.3.



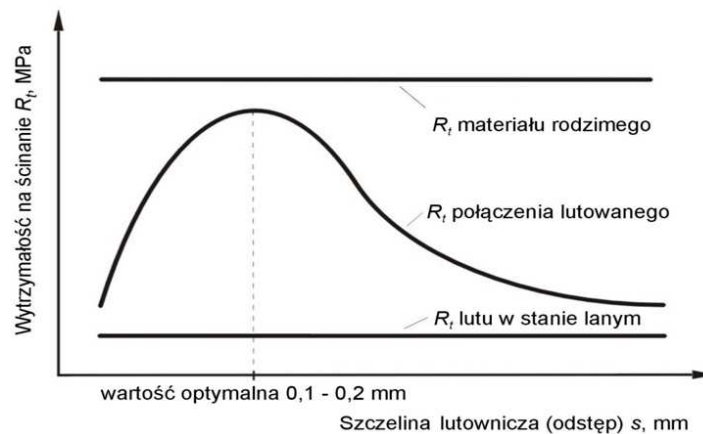
Rys. 7.3. Zależność ciśnienia kapilarnego od szerokości szczeliny lutowniczej w lutowaniu pod osłoną topnika [6]

Największe ciśnienie kapilarne występuje dla szczelin lutowniczych poniżej 0,05 mm. Są one korzystne w warunkach lutowania beztopnikowego. Zdolność wypełnienia lutem tak wąskich szczelin, w warunkach lutowania topnikowego, jest jednak ograniczona. Szczeliny poniżej 0,05 mm w lutowaniu topnikowym nie

są zalecane ze względu na wtrącenia żużli potopnikowych oraz pory obniżające właściwości mechaniczne połączenia lutowanego. Z punktu widzenia kapilarności zaleca się w lutowaniu topnikowym stosowanie szczelin lutowniczych w zakresie 0,05-0,2 mm. Dotyczy to jednak lutowania materiałów jednoimiennych, o jednakowych właściwościach fizykochemicznych. W przypadku szczelin o szerokości powyżej 0,3 mm większość lutów traci już właściwości kapilarne [3-8].

Jeżeli wartości szczeliny przekraczają 0,5 mm pojęcie szczeliny lutowniczej traci swój sens, a tego rodzaju odstęp między lutowanymi materiałami występuje w procesach lutowania [6].

Szerokość szczeliny lutowniczej ma istotny wpływ na wytrzymałość połączenia lutowanego (rys. 7.4). Dla każdego rodzaju lutu występuje optymalna szczelina lutownicza, przy której złącze lutowane uzyskuje największą wytrzymałość mechaniczną. Dla większości lutów optymalna szerokość szczeliny lutowniczej wynosi 0,1-0,2 mm.



Rys. 7.4. Zależność wytrzymałości na ścinanie połączenia lutowanego w funkcji szerokości szczeliny lutowniczej

Rozpływność lutu jest ściśle związana ze zwilżalnością i zależy od właściwości powierzchni materiału lutowanego, a także od właściwości fizykochemicznych spoiwa. Istotne znaczenie mają tu siły adhezji między lutem, a materiałem lutowanym, a także siły kohezji występujące w lucie. Miarą rozpływności lutu jest zwykle wielkość powierzchni materiału lutowanego, na której rozpułnął się stopiony lut.

Adhezja (łac. adhesio – szepianie, przyleganie) jest zjawiskiem powierzchniowego wiązania się warstw wierzchnich dwóch ciał, w tym przypadku lutu i materiału lutowanego. Adhezję dzieli się na właściwą i mechaniczną [4,6].

Adhezja właściwa przedstawia oddziaływanie sił między cząsteczkami lutu i łączonych materiałów. Są to siły van der Waalsa, które mimo to że są stosunkowo małe, odgrywają decydującą rolę w procesach lutowania miękkiego.

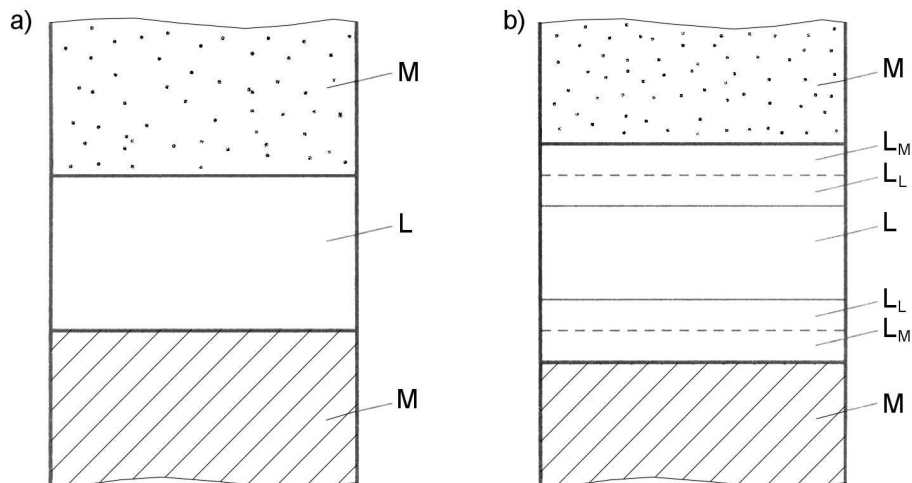
Adhezja mechaniczna związana jest z chropowatością i rozwinięciem powierzchni materiałów lutowanych.

Kohezja (łac. cohaesio – spójność) jest określana siłami spójności, występującymi w powstałej lutowninie.

Zjawiska dyfuzji mają podstawowe znaczenie w procesach fizykochemicznych zachodzących podczas lutowania twardego, w wyższych temperaturach. Dyfuzja jest procesem aktywowanym termicznie, co wyraźnie wynika z prawa Arrheniusa, w którym współczynnik dyfuzji D jest funkcją temperatury T i czasu lutowania t .

7.3. BUDOWA I RODZAJE ZŁĄCZY LUTOWANYCH

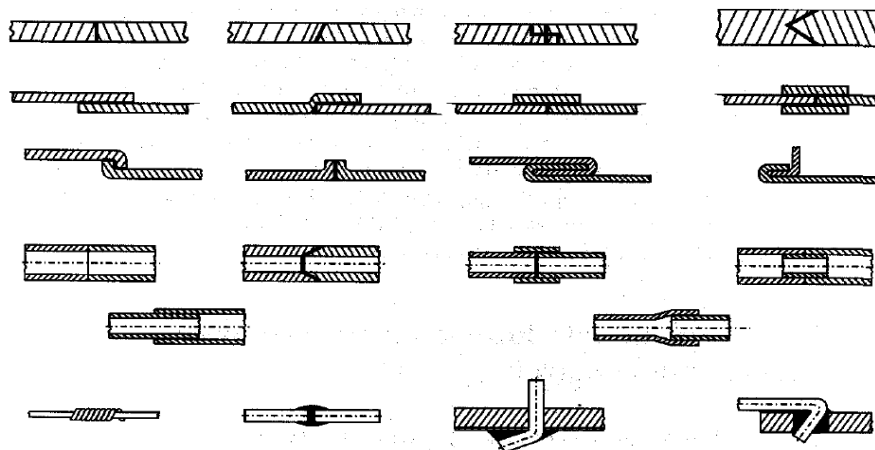
Schematycznie budowę złączy lutowanych pokazano na rys. 7.5. W lutowaniu miękkim powstaje połączenie lutowane, zwykle bez rozbudowanych stref reakcyjnych, podobnie jak w procesach klejenia (rys. 7.5a). W lutowaniu twardym, w wyniku zjawisk dyfuzji, występują zwykle rozbudowane strefy reakcyjne (dyfuzyjne L_M i L_L), w których mogą występować twarde i kruche fazy międzymetaliczne (rys. 7.5b). Mogą one, w granicznych przypadkach, prowadzić do erozji i zniszczenia połączenia lutowanego.



Rys. 7.5. Schemat budowy połączenia lutowanego [4,11]: a - bezdyfuzyjnego (adhezyjnego, charakterystyczne dla lutowania miękkiego), b - o rozbudowanych strefach reakcyjnych w wyniku dyfuzji (charakterystyczne dla lutowania twardego), oznaczenia: M-materiał rodzimy, L-lutowina, L_M - strefa dyfuzji wzbogacona w składniki materiału podstawowy, L_L - strefa dyfuzji wzbogacona w składniki lutu

Połączenia lutowane na miękko zwykle nie przenoszą większych obciążeń mechanicznych. Najczęściej projektuje się tu złącza, które powinny zapewniać szczelność połączeń lutowanych lub kontakt elektryczny. W przypadku obciążeń mechanicznych powinny one przenosić naprężenia ścinające, zwykle w połączeniach o budowie zakładkowej lub nakładkowej. Wytrzymałość na ścinanie połączeń lutowanych na miękko nie jest duża i wynosi w granicach 30–70 MPa, jest porównywalna z wytrzymałością połączeń klejowych. Znacznie większą wytrzymałość mechaniczną osiągają połączenia wykonane lutami twardymi. Ich wytrzymałość na ścinanie osiąga wartości rzędu 150–500 MPa [3,4,9].

Najczęściej stosowane rozwiązania konstrukcyjne połączeń lutowanych pokazano na rys. 7.6. Tam gdzie występuje konieczność stosowania złączy doczołowych należy dążyć do możliwie największej powierzchni lutowania. W złączach rurowych stosuje się konstrukcję kielichową, o ściśle określonej długości połączenia lutowanego. W konstrukcji złączy lutowanych dąży się, o ile jest to możliwe, do swobodnego przepłynięcia topnika i lutu na drugą stronę połączenia, co ułatwia też kontrolę połączenia lutowanego. Nie zaleca się stosowania nierównoległych szczelin rozwartych, o kształcie klinowym.



Rys. 7.6. Przykłady konstrukcji połączeń lutowanych [4]

7.4. TOPNIKI I ICH RODZAJE

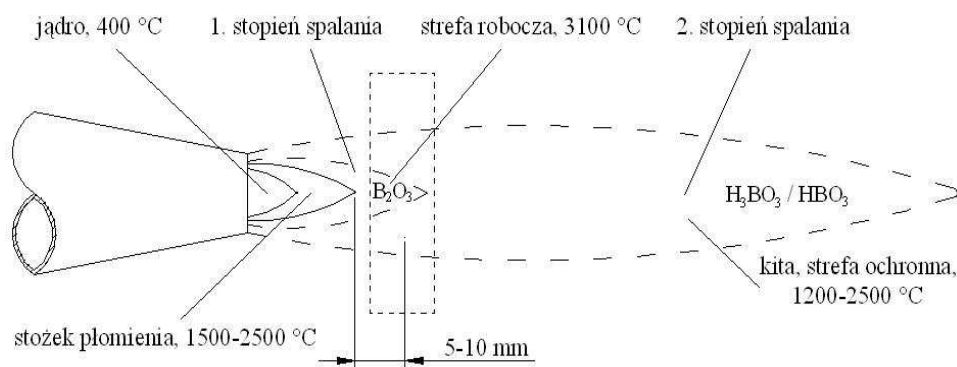
Topnik jest substancją, która umożliwia i znacznie ułatwia lutowanie, zarówno miękkie jak i twarde, poprzez chemiczne oczyszczanie powierzchni łączonych materiałów. Temperatura aktywności (topnienia) topnika powinna być dostosowana do temperatury topnienia lutu w taki sposób, aby topnik wcześniej, przed stopieniem lutu, oczyszczał powierzchnie elementów lutowanych i przygotowywał do zwilżania i kapilarnego wnikania lutu w szczelinę. Stąd zaleca się, aby temperatura topnienia topnika była przynajmniej 30-50 °C mniejsza od początku temperatury topnienia lutu. Czas oddziaływania stopionego topnika jest również ograniczony i nie powinien przekraczać 2-4 minut. Dłuższe funkcjonowanie topnika nie tylko ogranicza jego skuteczność, ale również stwarza większe problemy w usunięciu żużla potopnikowego. Pozostałości topnika zwykle stwarzają zagrożenie korozyjne dla złącza lutowanego i powinny być usunięte po zakończeniu procesu lutowania. Opracowywane są i stosowane coraz częściej topniki niekorozyjne, które nie wymagają usuwania pozostałości po lutowaniu.

Nie istnieją topniki uniwersalne, nadające się zarówno do lutowania miękkiego jak i twardego. Stosowanie podobnych spoiw do lutowania różnych materiałów wymaga użycia również odmiennych topników.

Do lutowania miękkiego stosowane są zarówno topniki niekorozyjne jak i korozyjne. Są one klasyfikowane wg normy PN-EN 29454:2000. Topniki

niekorozyjne, oparte są na związkach organicznych, stanowiących żywice i kwasy organiczne. Przykładem takich topników są: kalafonia (kwas abietynowy), i jej roztwory alkoholowe używane przede wszystkim do lutowania miedzi w elektronice. Do topników wywołujących korozję złączy lutowanych należą: chlorek cynku i wodne roztwory kwasu solnego, wymagające starannego usunięcia po lutowaniu. Są one stosowane do lutowania stali niepokrywanych i ocynkowanych. Do lutowania stali nierdzewnych i kwasoodpornych służą topniki oparte na roztworach kwasu ortofosforowego [3]. Topniki do lutowania miękkiego mogą występować w postaci stałej, ciekłej, tłuszczu, proszków lub past.

Topniki do lutowania twardego są klasyfikowane według PN-EN 1045:2001. Ich skład chemiczny jest oparty na chlorkach i fluorkach metali alkalicznych oraz związkach boru. Te pierwsze stosowane są do lutowania spoiwami srebrnymi. Luty mosiężne, o większej temperaturze topnienia, stosowane są z topnikami opartymi na mieszaninach boraksu ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) i kwasu borowego (H_3BO_3) [3,4]. Norma wyróżnia dwie klasy topników: FH i FL. Pierwsza grupa topników klasy FH jest stosowana do lutowania metali ciężkich, tj. różnego rodzaju stali, miedzi, niklu i ich stopów oraz metali szlachetnych. Topniki klasy FL są stosowane do lutowania aluminium i jego stopów. W tej grupie ważną rolę odgrywa topnik niekorozyjny o nazwie firmowej Nocolok, oparty na solach z układu KF - AlF_3 . Pozostałości po procesie lutowania, w postaci żużla potopnikowego, są zwykle trudne i kłopotliwe do usunięcia. W celu uniknięcia problemów z usuwaniem żużli potopnikowych, szczególnie w metodzie lutowania płomieniowego, stosuje się topniki lotne, które są łatwo zmywalne wodą. Umożliwiają one zarówno dobrą osłonę powstającego złącza lutowanego, jak i całego obszaru lutowanego. Są one aktywne w zakresie temperatur lutowania twardego 750-950 °C, ze względu na składnik aktywny tj. boran trimetylu. Nie ma opracowanych topników lotnych do lutowania miękkiego. Lotny topnik jest doprowadzany do obszaru lutowania za pośrednictwem płomienia gazowego (rys. 7.7), co stanowi znaczne ułatwienie procesu lutowania. Istotną wadą topników lotnych, w porównaniu z tradycyjną postacią topników nanoszonych przed nagrzewaniem na powierzchnie lutowane, jest ograniczone oddziaływanie kapilarne lutu w szczelinie lutowniczej.



Rys. 7.7. Strefy płomienia acetylenowo-tlenowego z doprowadzonym topnikiem lotnym

Lutowanie w osłonie gazów osłonowych, w porównaniu z lutowaniem pod osłoną topnika, charakteryzuje się uzyskiwaniem połączeń lutowanych o większej jakości, lutowin lepiej odgazowanych i o większej czystości, z powodu braku wtrąceń żużli potopnikowych. Przeprowadza się je zwykle w wysoko wydajnych tunelowych piecach przelotowych z rusztem wędrownym oraz w piecach o budowie komorowej.

Lutowanie próżniowe stanowi najbardziej zaawansowaną metodę beztopnikowego lutowania piecowego. Osłona próżniowa redukuje istniejące tlenki i chroni powierzchnię łączonych materiałów przed ponownym utlenieniem. Lutowanie próżniowe jest procesem charakteryzującym się uzyskiwaniem połączeń lutowanych o największej jakości i najlepiej odgazowanych lutowinach [3-6].

7.5. RODZAJE LUTÓW

7.5.1. LUTY MIĘKKIE

Luty miękkie znajdują swoje podstawowe zastosowanie w elektronice, elektrotechnice, w budownictwie i w instalacjach sanitarnych. Jeszcze do niedawna, szczególnie w elektronice, stosowane były powszechnie luty cynowo – ołowiowe, a w tym najczęściej stosowane luty na osnowie cyny o oznaczeniu LC60 (60% Sn, reszta Pb) i luty eutektyczne LC63 (o temperaturze topnienia 183 °C). Ze względu na rosnące zagrożenie ekosystemu ołowiem Unia Europejska wprowadziła od 1 lipca 2006 roku dyrektywy ROHS (on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment), zabraniające stosowania lutów z ołowiem, kadmem, rtęcią, 6-wartościowym chromem oraz innymi toksycznymi i niebezpiecznymi składnikami lutów, groźnymi dla zdrowia człowieka i środowiska naturalnego. W związku z tym opracowano nowe luty bezołowiowe na bazie cyny, z dodatkami miedzi, srebra, antymonu i indu. Mają one jednakże wyższą temperaturę topnienia od lutów cynowo-ołowiowych o około 30–50 °C, większe napięcie powierzchniowe i gorszą od nich lutowność. Spowodowało to określone skutki w zakresie wzrostu mocy urządzeń grzewczych stosowanych przy lutowaniu i wprowadzenie zabezpieczeń przed agresywnym oddziaływaniem lutów cynowych na elementy maszyn pracujących w kąpielach lutowniczych. Nie wszędzie jednak udało się zastąpić luty i materiały z dodatkiem ołowiu, np. w stopach lutowniczych o zawartości co najmniej 85% wag. Pb i w zabezpieczeniach przeciwpożarowych.

Luty miękkie do lutowania miedzi i jej stopów są klasyfikowane według PN - EN 29453:2000. Skład chemiczny najczęściej stosowanych lutów cynowych, ich temperatura topnienia oraz zastosowanie zamieszczono w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Skład chemiczny lutów cynowych, ich temperatura topnienia i zastosowanie

Lp.	Oznaczenie wg PN - EN 29453	Skład chemiczny [% wag.]			Temperatura topnienia [°C]	Zastosowanie, materiały lutowane
		Sn	Cu	Ag		
1	S-Sn97Cu1	99	1	-	230-240	Cu i jej stopy, lutowanie w elektronice
2	S-Sn96Ag4	96	-	4	221 (eutektyka)	
3	S-Sn96Ag3Cu04	96,4	0,4	3,2	217 (eutektyka)	
4	S-Sn97Cu3	97	3	-	230 - 250	Miedziane instalacje sanitarne

Kolejną grupę, często stosowanych lutów miękkich, stanowią luty cynkowe przeznaczone do lutowania miękkiego aluminium i jego stopów. Mogą być one również stosowane do wykonywania połączeń różnoimiennych, np. typu Al-Cu i Al-stal ocynkowana. Skład chemiczny najczęściej stosowanych lutów cynkowych zamieszczono w tabeli 7.2.

Tab. 7.2. Skład chemiczny lutów cynkowych, ich temperatury topnienia i zastosowanie

Lp.	Oznaczenie wg PN - EN ISO 3677	Skład chemiczny [% wag.]		Temperatura topnienia [°C]	Zastosowanie, materiały lutowane
		Zn	Al		
1	S-Zn98Al2	98	2	382-407	Al i jego stopy, lutowanie wymienników ciepła
2	S-Zn96Al4	96	4	382-387	
3	S-Zn85Al15	85	15	382-450	

7.5.2. LUTY TWARDE

Spoiwa do lutowania twardego są przedmiotem normy PN-EN ISO 17672:2010 (wcześniej PN-EN 1044:2002}, w której podzielono je pod względem składu chemicznego na osiem klas: klasa Al (spoiwa aluminiowe i magnezowe), klasa Ag (spoiwa srebrne), klasa CuP (spoiwa miedziano – fosforowe), klasa Cu (spoiwa miedziane i mosiężne), klasa Ni (spoiwa niklowe i kobaltowe), klasa Pd (spoiwa zawierające pallad) oraz klasa Au (spoiwa zawierające złoto). Ze spoiw aluminiowych do lutowania twardego aluminium i jego stopów największe zastosowanie ma lut siluminowy Al 112, zawierający w % wag.: 88 % Al i 12 % Si, o temperaturze

topnienia 575-585 °C. Najczęściej stosowane luty na osnowie srebra zestawiono w tabeli 7.3.

Tab. 7.3. Skład chemiczny lutów srebrnych, temperatura topnienia i zastosowanie

Lp.	Oznaczenie wg PN-EN ISO 17672 (wg starej PN)	Skład chemiczny [% wag.]						Temperatura topnienia [°C]	Zastosowanie, materiały lutowane
		Ag	Cu	Zn	Mn	Ni	Inne		
1	Ag 156 (LS 56Sn)	56	22	17	-	-	5 Sn	620-655	Miedź i jej stopy, stale wysokostopowe
2	Ag 145 (LS 45Sn)	45		25,5	-	-	2,5 Sn	620-635	
3	Ag 244 (LS45)	44	30	26	-	-	-	675-735	
4	Ag 340 (LS40K)	40	19	21	-	-	20 Cd	595-630	Stale szybkotnące, węgliki spiekane, segmenty diamentowe
5	Ag 272 (LS72)	72	28	-	-	-	-	780	Lutowanie próżniowe
6	Ag 449 (LS49MN)	49	16	23	7,5	4,5	-	680-705	Węgliki spiekane
7	Przekładka LAg49MN/Cu	49	27,5	20,5	2,5	0,5	-	670-690	

Spoiva miedziano-fosforowe są szeroko stosowane do lutowania beztopnikowego miedzi. Rolę topnika spełnia fosfor, stanowiący podstawowy składnik lutu. Luty klasy CuP mogą służyć również do lutowania stopów miedzi, ale w tym przypadku muszą być stosowane z topnikiem. Luty miedziano-fosforowe nie mogą być stosowane do lutowania stali i niklu, ze względu na powstawanie kruchych fosforków żelaza i niklu. Skład chemiczny najczęściej stosowanych lutów miedziano-fosforowych zamieszczono w tabeli 7.4.

Do lutów miedzianych, klasy Cu, zaliczane są luty mosiężne. Są one najczęściej stosowane, spośród lutów twardych, do lutowania twardego stali niestopowych. Oprócz podstawowych składników, miedzi i cynku, zawierają one dodatki krzemu, cyny i srebra poprawiające właściwości lutownicze spoiw i właściwości mechaniczne połączeń lutowanych. Do lutowania węglików spiekanych, stosowanych do zbrojenia narzędzi, najczęściej używane są luty mosiężne, zawierające mangan i nikiel dla

poprawienia zwilżalności i zwiększenia właściwości wytrzymałościowych połączeń lutowanych. Skład chemiczny najczęściej stosowanych lutów miedzianych zamieszczono w tabeli 7.5.

Tab. 7.4. Skład chemiczny lutów miedziano-fosforowych, temperatura topnienia i zastosowanie

Lp.	Oznaczenie wg PN-EN ISO 17672 (wg starej PN)	Skład chemiczny [% wag.]				Temperatura topnienia [°C]	Zastosowanie, materiały lutowane
		Ag	Cu	P	Sn		
1	CuP 284 (LS15F)	15	80	5	-	645-800	Miedź i jej stopy, wymienniki ciepła Instalacje sanitarne, Instalacje gazowe, (nie wolno lutować stali oraz niklu i jego stopów!)
2	CuP 281 (LS5F)	5	89	6	-	645-815	
3	CuP 279 (LS2F)	2	91,7	6,3	-	645-825	
4	CuP 182 (LMF8)	-	92	8	-	710 - 770	
5	CuP 180	-	93	7	-	710-820	
6	CuP 386	-	86,2	6,8	7	650-700	

Tab. 7.5. Skład chemiczny lutów na osnowie miedzi, temperatura topnienia i zastosowanie

Lp.	Oznaczenie wg PN-EN ISO 17672 (wg starej PN)	Skład chemiczny [% wag.]						Temperatura topnienia [°C]	Zastosowanie, materiały lutowane
		Cu	Zn	Si	Mn	Ni	Inne		
1	Cu 110	100	-	-	-	-	-	1083	Lutowanie próżniowe, stale niestopowe, węgliki spiekane
2	Cu 470 (LM60K)	60	reszta	0,3	-	-	0,1 Sn	875-895	Stale niestopowe
3	Cu 773	48	reszta	0,3	0,1	10	-	890-920	Stale niestopowe, węgliki spiekane
4	SMKM	reszta	-	0,3	0,3	-	-	1060	Stale niestopowe, lutowanie w osłonie gazowej
5	CuSi	reszta	-	3	1	-	-	965-1035	Lutospawanie, stale ocynkowane
6	LMN3M	63	reszta	0,3	2	3	-	890-920	Węgliki spiekane
7	Cu 595	reszta	-	-	14	2	-	965-1000	

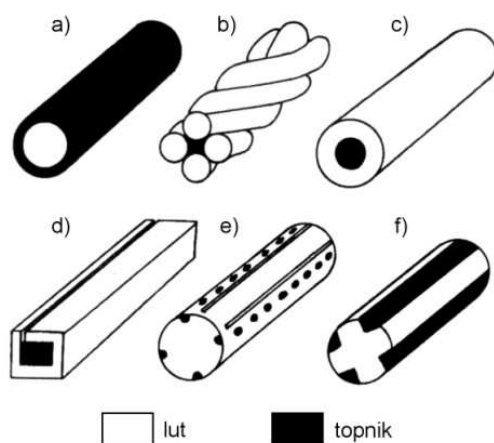
7.6. POSTACIE LUTÓW

Najczęściej stosowane luty w tradycyjnej postaci, tj. drutów, prętów i taśm oraz wykonanych z nich kształtek, pokazano na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Standardowe postacie lutów i przykładowe kształtki

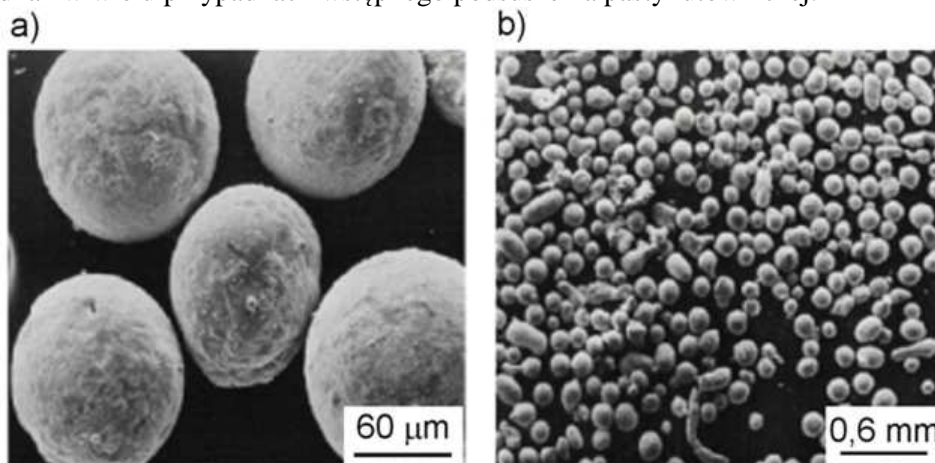
Do lutowania stosuje się również spoiwa zespolone z topnikiem, pokazane na rys. 7.9. Ułatwia to dozowanie topnika, szczególnie w trudnych warunkach montażowych.



Rys. 7.9. Różne postacie lutów zespolonych z topnikiem: otulone (a), Drilldraht (b), proszkowe (c,d), z częściowym wypełnieniem (e,f)

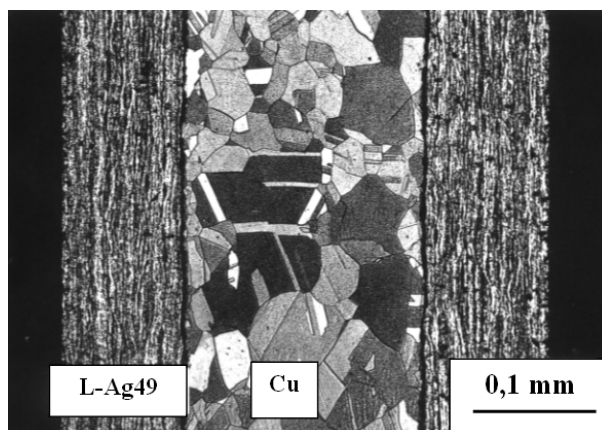
W wielu przypadkach stosowane są pasty lutownicze, które ułatwiają lutowanie, szczególnie przy łączeniu drobnych i precyzyjnych elementów oraz w miejscach trudnodostępnych. Po ich nałożeniu w obszar lutowania, należy je tylko odpowiednio podgrzewać do temperatury lutowania. Pasta lutownicza stanowi mieszaninę

sproszkowanego lutu z topnikiem, połączoną składnikami wiążącymi. Na rysunku 7.10 pokazano przykładowo ziarna lutu miedzianego L-CuNiB (w % wag.: 3% Ni, 0,05% B, reszta Cu) w postaci sferoidalnej, najbardziej nadających się do past dozowanych automatycznie. Luty w postaci past lutowniczych stosuje się szczególnie często przy lutowaniu gazowym ze względu na małą koncentrację płomienia gazowego i możliwość spokojnego odparowania składników lotnych. Nie wyklucza to również stosowania past lutowniczych w innych metodach lutowania, np. w lutowaniu indukcyjnym, czy też lutowaniu w próżni. Wymaga to jednak w wielu przypadkach wstępnego podsuszenia pasty lutowniczej.



Rys. 7.10. Kształt ziaren lutu miedzianego L-CuNiB (a,b) [6]

W lutowaniu materiałów o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych zachodzi konieczność stosowania lutów przekładkowych, w celu kompensacji naprężeń skurczowych powstających podczas studzenia połączenia lutowanego. Dotyczy to np. lutowania kształtek z węglików spiekanych ze stalowym korpusem narzędzia. Do tego celu służy lut trzywarstwowy, pokazany na rys. 7.11. Warstwę środkową stanowi taśma miedziana platerowana z obu stron warstwą lutu srebrnego L-Ag49MN. Miedź nie ulega ona stopieniu podczas lutowania, kompensując naprężenia wynikające ze zróżnicowanego skurczu łączonych materiałów.



Rys. 7.11. Srebrny lut przekładkowy L-Ag49MN/Cu, o grubości 0,4 mm [6]

7.7. METODY LutowANIA MIĘKKIEGO I TWARDEGO

7.7.1. METODY LutowANIA MIĘKKIEGO

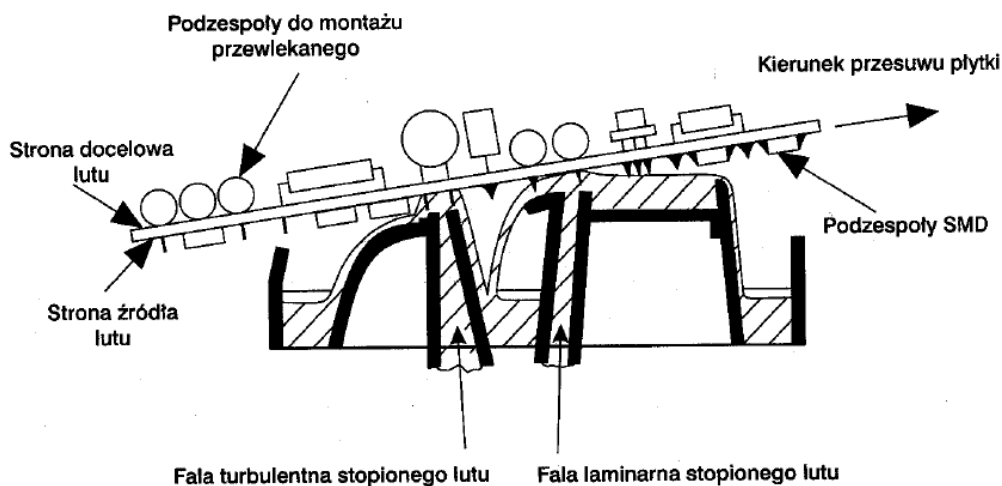
W zależności od stosowanego źródła ciepła lutowanie miękkie może być przeprowadzone następującymi sposobami:

- kolbą miedzianą,
- lutownicą transformatorową,
- kąpielowe (zanurzeniowe),
- w stopionych solach,
- ultradźwiękowe,
- płomieniowe.

Lutowanie kolbą miedzianą charakteryzuje się niewielkim, miejscowym doprowadzeniem ciepła do elementów lutowanych, stąd występuje tu nieznaczne odkształcenie połączeń lutowanych. Kolby mogą być nagrzewane różnymi sposobami, najczęściej oporowo lub płomieniowo.

Lutowanie lutownicą transformatorową stosowane jest do lutowania ręcznego w procesie montażu elektronicznego. Stosowane jest wszędzie tam, gdzie z różnych przyczyn nie może być stosowane lutowanie zmechanizowane.

Lutowanie kąpielowe (zanurzeniowe) polega na lutowaniu elementów zanurzonych do ciekłego lutu, pokrytego warstwą topnika. Stosowane jest przy lutowaniu w przemyśle elektronicznym i elektrotechnicznym, wymienników ciepła (chłodnic samochodowych) i drobnej galanterii. Odmianą lutowania kąpielowego jest lutowanie metodą fali stojącej (rys. 7.12). Ciekły lut jest tłoczony pompą do wąskiej szczeliny, tworząc stojącą falę. Metoda ta stosowana jest przede wszystkim do lutowania obwodów drukowanych w elektronice.



Rys. 7.12. Schemat procesu lutowania miękkiego na podwójnej fali [12], podzespoły SMD (ang. Surface Mount Device) – elementy elektroniczne przystosowane do montażu powierzchniowego

Lutowanie w stopionych solach jest odmianą lutowania kąpielowego. Może być stosowane zarówno w lutowaniu miękkim jak i twardym. Elementy lutowane zanurza

się w ciekłych solach, stanowiących źródło ciepła i osłonę topnikową. Lut nakładany jest w miejscu mającym stanowić połączenie lutowane. Metoda ta ma duże znaczenie w lutowaniu aluminium i jego stopów.

Lutowanie ultradźwiękowe polega na zastosowaniu fal ultradźwiękowych (drgań mechanicznych) o dużej częstotliwości, najczęściej w zakresie 18-60 kHz. W metodzie tej występuje zjawisko kawitacji, w wyniku którego następuje rozbicie i usunięcie warstwy tlenków poprzez oddziaływanie sonotrody lutownicy ultradźwiękowej. Lutowanie ultradźwiękowe może odbywać się również w wannach wyposażonych w magnetostrykcyjne generatory ultradźwięków. Stosowane jest najczęściej do lutowania metali lekkich, przede wszystkim aluminium oraz magnezu i ich stopów, w elektrotechnice, elektronice, telekomunikacji, w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i kosmicznym.

Lutowanie płomieniowe przeprowadzane jest zwykle przy użyciu płomieni gazowych, o niewielkiej mocy, głównie stosując palniki na propan, przy pobieraniu powietrza z atmosfery oraz na propan-tlen. W przemyśle stosowane są często stanowiska ze zmechanizowanym procesem lutowania płomieniowego.

7.7.2. METODY LUTOWANIA TWARDEGO

Spośród metod lutowania twardego, z uwagi na źródło nagrzewania i doprowadzenie ciepła, stosuje się najczęściej lutowanie:

- płomieniowe,
- indukcyjne,
- oporowe,
- lutozgrzewanie,
- w osłonach gazowych,
- próżniowe.

Należy również zaznaczyć, że w ostatnim okresie nastąpił znaczny rozwój lutowania z zastosowaniem źródeł ciepła, które wcześniej nie były wykorzystywane w lutowaniu, tj.: łuku elektrycznego i promienia lasera.

W lutowaniu płomieniowym mogą być stosowane następujące mieszaniny gazowe:

- propan – powietrze,
- propan – tlen,
- gaz ziemny – tlen,
- acetylen – powietrze,
- acetylen – tlen,
- wodór – tlen.

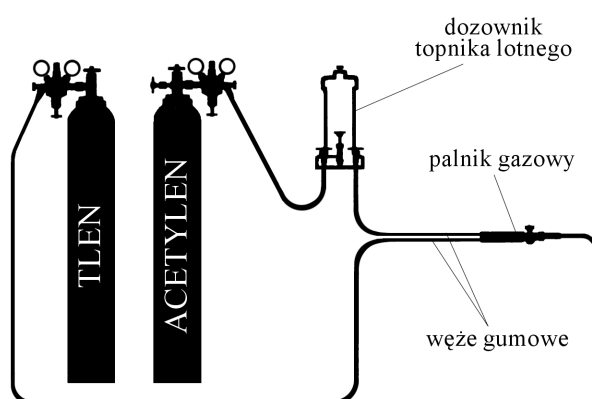
Mieszaniny gazów, stosowane w procesach lutowania miękkiego i twardego, charakteryzuje maksymalna temperatura występująca w płomieniu. W zależności od składu gazów w mieszaninie, temperatura płomienia gazowego może wynosić w zakresie 1880-3150 °C (tab. 7.6).

Tab. 7.6. Maksymalna temperatura występująca w płomieniach gazowych, uszeregowana od wartości maksymalnej

Lp.	Mieszanka gazów	Maksymalna temperatura płomienia [°C]
1	acetylen – tlen	3150
2	propan – tlen	2800
3	metan – tlen	2765
4	acetylen – powietrze	2325
5	propan – powietrze	1925
6	metan – powietrze	1880

Spośród gazów palnych do lutowania płomieniowego węglików spiekanych ze stałą najczęściej stosowany jest acetylen. Acetylen jest jedynym gazem palnym ze strefą redukującą tlen w płomieniu. Inne gazy palne pobierają w pierwotnym spalaniu więcej tlenu z otaczającego powietrza, aniżeli potrzebują do pełnego spalania.

Stanowisko do lutowania lotnym topnikiem pokazano na rys. 7.13. Gaz palny (acetylen, propan) jest doprowadzany do dozownika z cieczą lotnego topnika, gdzie nasycany jest jego parami. Następnie lotny topnik jest przekazywany do płomienia gazowego, zabarwiając go na charakterystyczny kolor zielony.

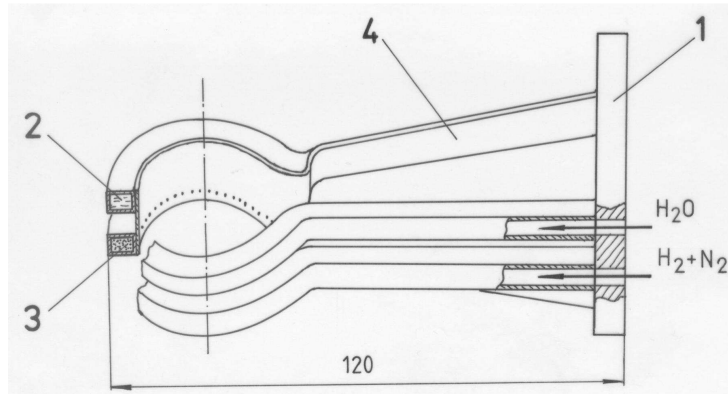


Rys. 7.13. Stanowisko do lutowania płomieniowego, wyposażone w dozownik topnika lotnego

Lutowanie indukcyjne materiałów zachodzi przez indukowanie prądów wirowych w nagrzewanych elementach i wytworzenie ciepła, zgodnie z prawem Joulea – Lenza. Głębokość wnikania prądów wirowych w materiał lutowany zależy od właściwości materiału i częstotliwości nagrzewania indukcyjnego. Może być ono przeprowadzone przez nagrzewanie prądami o średniej i wysokiej częstotliwości. Prądy średniej częstotliwości, w zakresie 8-15 kHz są bardziej przydatne w procesach lutowania, szczególnie elementów o większych przekrojach, a to ze względu na głębsze wnikanie prądów wirowych w nagrzewane elementy i większą prędkość nagrzewania.

Lutowanie indukcyjne najczęściej przeprowadza się na otwartym powietrzu, pod osłoną topnika. Coraz częściej znajduje zastosowanie lutowanie indukcyjne w osłonie

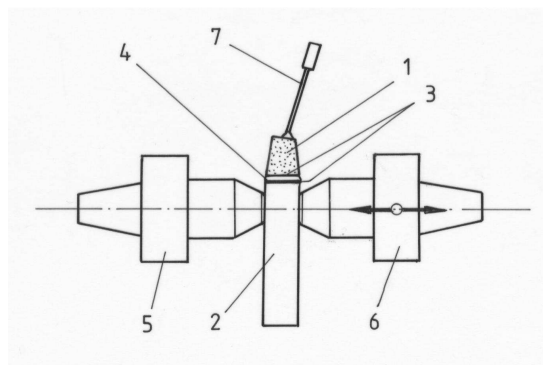
gazów obojętnych lub redukujących. Na rysunku 7.14 pokazano konstrukcję specjalnie wykonanego wzbudnika do lutowania w osłonie gazowej, który składa się z dwóch pierścieni. Jeden pierścień służy do konwencjonalnego obiegu wody chłodzącej, a drugi doprowadza gaz osłonowy.



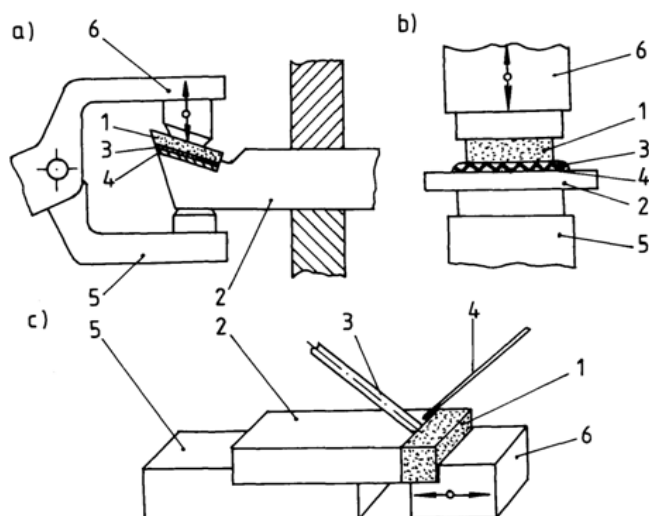
Rys. 7.14. Konstrukcja wzbudnika pierścieniowego z doprowadzeniem gazu osłonowego [6]:
podstawa mocująca (1), pierścień miedziany z chłodzeniem wodnym (2),
pierścień doprowadzający gaz osłonowy (3), płaszcz miedziany (4)

W lutowaniu oporowym złącze lutowane powstaje w wyniku przepływu prądu elektrycznego między łączonymi materiałami i wydzielania się dużej ilości ciepła na powierzchni styku. Proces lutowania oporowego najczęściej jest wykonywany przy użyciu zgrzewarek doczołowo-zwarciovych (rys. 7.15).

Lutozgrzewanie jest procesem stanowiącym modyfikację lutowania oporowego, wykonywanym na urządzeniach do zgrzewania, przy wykorzystaniu ich zdolności do wywierania docisku na łączone elementy [6]. Może być wykonywane na zgrzewarkach kleszczowych, punktowych, garbowych i doczołowo-zwarciovych (rys. 7.16a-c).

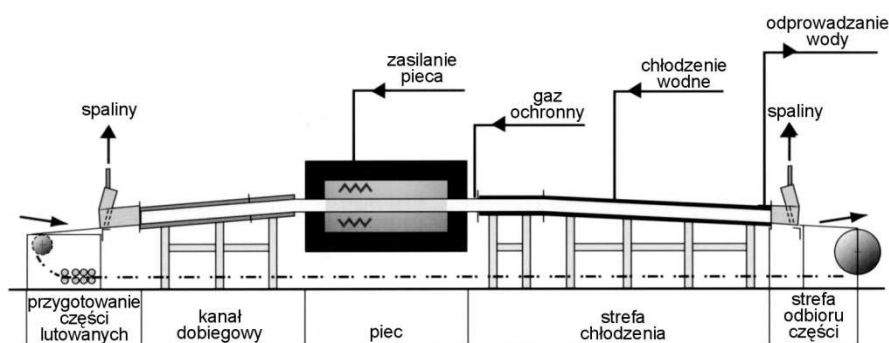


Rys. 7.15. Lutowanie oporowe narzędzia: płytka węglikowa (1), korpus stalowy (2), warstwa topnika (3), kształtka lutownicza (4), elektroda nieruchoma (5), elektroda ruchoma (6), dociskacz ręczny (7)



Rys. 7.16. Lutozgrzewanie stali z węglnikami spiekanyymi za pomocą: zgrzewarki kleszczowej (a), zgrzewarki punktowej (b), zgrzewarki doczołowo-zwarciowej (c): płytka węglkowa (1), korpus stalowy (2), topnik (3), lut (4), elektroda stała (5), elektroda ruchoma (6)

Lutowanie twarde pod osłoną topnika, zwłaszcza w temperaturze lutowania powyżej 1000 °C, nie stanowi już tak skutecznej ochrony powstającego złącza lutowanego jak w niższej temperaturze. Szczególnie dotyczy to obszaru, obok złącza lutowanego, nagrzewanego do wysokiej temperatury, i niechronionego przed intensywnym utlenianiem. Aby tego uniknąć stosowane są technologie piecowe lutowania w osłonie gazowej. Używane są do tego celu piece komorowe i piece tunelowe z rusztem wędrownym, nazywane też piecami taśmowymi. Schemat pieca tunelowego, z jego charakterystycznymi strefami, pokazano na rys. 7.17.



Rys. 7.17. Schemat pieca tunelowego z rusztem wędrownym

Lutowanie w próżni, przeprowadzane jest, bez potrzeby stosowania topników, zwykle w piecach o konstrukcji jedno – lub dwukomorowej (rys. 7.18). Piece próżniowe mają możliwość uzyskiwania próżni w zakresie 10^{-1} - 10^{-7} mbar i temperatury roboczej do 1600 °C. Luty przeznaczone do lutowania próżniowego nie mogą zawierać składników łatwo parujących, takich jak: cynk, kadm, fosfor, czy też mangan. Nowoczesne piece próżniowe umożliwiają również, obok procesu lutowania,

obróbkę cieplną stali narzędziowych, poprzez dużą prędkość schłodzenia azotem, argonem, helem lub gazem formującym wprowadzonym do komory roboczej.



Rys. 7.18. Piec próżniowy jednokomorowy

7.8. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Omówienie zagrożeń i obowiązujących warunków bezpiecznej pracy.
2. Przedstawienie stanowisk do lutowania miękkiego i twardego.
3. Przygotowanie i omówienie materiałów podstawowych i dodatkowych do lutowania. Przedstawienie sposobów oczyszczania powierzchni elementów łączonych.
4. Pokaz lutowania miękkiego rurek miedzianych pastą lutowniczą S-Sn97Cu3, przy użyciu płomienia na propan-powietrze.
5. Pokaz lutowania twardego lutem siluminowym AlSi12 blaszek aluminiowych dla uzyskania złącza kąтового, przy użyciu płomienia na propan-powietrze.
6. Pokaz zwilżania beztopnikowego lutem twardym miedziano-fosforowym blaszki miedzianej, przy użyciu płomienia acetylenowo-tlenowego.
7. Pokaz lutowania twardego lutem mosiężnym elementów stalowych, przy użyciu płomienia acetylenowo-tlenowego.
8. Ocena i omówienie uzyskanych połączeń lutowanych.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy podać:

- schemat stanowiska do lutowania metodami zaprezentowanymi podczas zajęć laboratoryjnych,
- sposoby przygotowania elementów do lutowania,
- technologię lutowania (rodzaj lutu, sposób nagrzewania, topnik),
- ocena wykonanych złączy lutowanych,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] LISON R., *Lutowanie i jego miejsce wśród metod spajania*, Przegląd Spawalnictwa, nr 8-10/2002.
- [2] PETER H.-J., *Prastara technika łączenia-lutowanie*, Przegląd Spawalnictwa, nr 4/2006.
- [3] RADOMSKI T., CISZEWSKI A., *Lutowanie*, WNT, Warszawa 1985.
- [4] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 2, WNT, Warszawa 2005.
- [5] WŁOSIŃSKI W., *Podstawy technologii spajania materiałów zaawansowanych*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [6] MIRSKI Z., *Sterowanie szerokością szczeliny lutowniczej w procesach spajania materiałów różnorodnych*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, nr 73, seria: Monografie nr 22, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [7] TASAK E., *Obróbka ubytkowa i spajanie*, Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2001.
- [8] NOWACKI J., CHUDZIŃSKI M., ZMITROWICZ P., *Lutowanie w budowie maszyn*, WNT, Warszawa 2008.
- [9] SOBIESZCZAŃSKI J., *Spajanie*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [10] SENKARA J., WINDYGA A., *Podstawy teorii procesów spajania*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [11] CZUCHRYJ J., PAPPALA H., WINIOWSKI A., *Niezgodności w złączach spajanych*, Wyd. Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2005.
- [12] BUKAT K., HACKIEWICZ K., *Lutowanie bezolowiowe*, Wyd. BTC, Warszawa 2007.

WYKAZ NORM

- PN-EN 29453:2000. Luty miękkie. Skład chemiczny i postać.
- PN-EN 29454:2000. Topniki do lutowania miękkiego. Oznaczenia i wymagania.
- PN-EN 1044:2002. Lutowanie twarde. Spoiwa (już nieaktualna).
- PN-EN ISO 17672:2010. Lutowanie twarde. Spoiwa.
- PN-EN 1045:2001. Lutowanie twarde. Topniki do lutowania twardego. Techniczne warunki dostawy.
- PN-EN ISO 3677:2001. Spoiwa do lutowania miękkiego, twardego i lutospawania. Oznaczenie.

8. KLEJENIE MATERIAŁÓW

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie studentów z:

- podstawowymi zjawiskami fizykochemicznymi występującymi w klejeniu materiałów,
- czynnikami wpływającymi na powstanie połączeń klejowych,
- podstawowymi kryteriami podziału klejów,
- metodami przygotowania powierzchni elementów łączonych do klejenia,
- zasadami projektowania i wykonywania połączeń klejowych,
- procedurami przeprowadzania badań wytrzymałościowych połączeń klejowych,
- zaletami i wadami technologii klejenia w porównaniu z innymi metodami łączenia.

8.1. WPROWADZENIE

Klejenie materiałów uważane jest na podstawie odkryć archeologicznych za najstarszą technikę spajania. Jej początki, sięgające czasów prehistorycznych, datowane są nawet na 80 tys. lat p.n.e.

Dzisiaj klejenie materiałów jest nowoczesną technologią łączenia. Jej problematyka łączy w wielu aspektach elementy z różnych dziedzin naukowych: mechaniki, fizyki, termodynamiki i chemii. Stosowana jest szczególnie w przypadku łączenia materiałów różniamiennych, których spajanie stwarza problemy wynikające z ich zróżnicowanych właściwości fizykochemicznych oraz mechanicznych. Polska norma PN-EN 923:2008, definiuje klejenie jako technikę łączenia materiałów przy użyciu substancji niemetalicznej – kleju, przez zespolenie ich powierzchni (adhezja), przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości wewnętrznej złącza (kohezja).

Odkrycie na początku XX wieku makromolekularnej budowy substancji spowodowało dynamiczny rozwój klejów syntetycznych na bazie żywic sztucznych, które wyparły spoiwa oparte na bazie składników pochodzenia naturalnego. Umożliwiło to otrzymywanie połączeń spajanych, jednak nakładem mniejszych kosztów i pracy. Klejenie stało się realną alternatywą tych technik, oferującą szereg zalet, niemożliwych do uzyskania metodami spawania, lutowania czy zgrzewania. Duża różnorodność spoiw przeznaczonych do klejenia oraz wynikająca z niej możliwość uzyskiwania pełnej gamy właściwości w zależności od potrzeb, stawia tą technologię w czołowie najbardziej przyszłościowych metod spajania. Połączenia klejowe, obok swojej podstawowej roli łączenia elementów, często pełnią też funkcje wspomagające takie jak uszczelnianie, mocowanie czy zabezpieczanie, mogą być również stosowane jako hybrydowe, łączone z innymi technikami spajania.

8.2. ZALETY I WADY TECHNIKI KLEJENIA

Inżynierskie podejście do problemu klejenia wymaga szczegółowego poznania wszelkich zagadnień związanych z tą techniką jeszcze przed rozpoczęciem wstępnych czynności wykonywania połączeń. Gruntowne opanowanie problematyki klejenia, ze szczególnym zwróceniem uwagi na jej zalety oraz wady, pozwala na projektowanie funkcjonalnych złączy przy względnie małych nakładach finansowych.

Poprawnie zaprojektowane i wykonane połączenia klejowe wykazują wiele zalet. W wielu przypadkach technologia ta oferuje nam złącza o właściwościach o wiele przewyższających możliwości konwencjonalnych technologii. Zastosowanie jej nie tylko zmniejsza do minimum naprężenia i odkształcenia w połączeniach, ale także je uszczelnia oraz chroni przed wnikaniem wilgoci i powstawaniem korozji. Równomiernie obciążone złącze klejowe nie wykazuje strefy wpływu ciepła, a dzięki dużej elastyczności kleju może przejmować niekorzystne zmiany współczynnika rozszerzalności liniowej spajanych materiałów. Istotną cechą klejenia jest możliwość łączenia materiałów o bardzo zróżnicowanych właściwościach, dzięki czemu, możliwe jest m.in. uzyskiwanie lekkich konstrukcji. Bardzo ważną zaletą tej techniki jest łatwość automatyzacji oraz eliminacja dodatkowych obróbek powierzchniowych po procesie klejenia. Dodatkowo stosunkowo łatwo jest przyuczyć pracowników do operacji związanych z klejeniem.

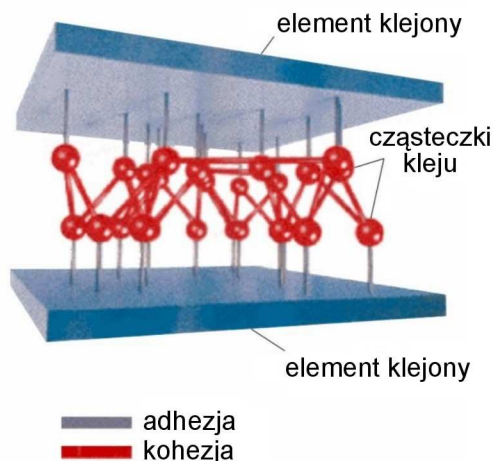
Podstawowe wady klejenia to głównie ograniczona odporność na działanie wysokiej temperatury, szczególnie powyżej 150 °C, mała wytrzymałość mechaniczna połączeń, zazwyczaj nie przekraczająca 35 MPa. Połączenia klejowe zwykle nie wykazują bezpośrednio po klejeniu 100% wytrzymałości mechanicznej, a czas skądowania klejów jest ograniczony. Dodatkowo wykazują one skłonność do żelowania, rozwarstwiania i sedymentacji. Podczas procesu klejenia bezwzględnie należy przestrzegać przepisów BHP, gdyż składniki klejów często zawierają związki niebezpieczne dla zdrowia użytkowników.

Jak wynika z analizy literatury [1-4], autorzy wielokrotnie próbowali dokonać syntezy porównawczej podstawowych technik łączenia. W wielu przypadkach technologia klejenia wykazuje przewagę zalet, w porównaniu z lutowaniem, spawaniem, zgrzewaniem czy łączeniem mechanicznym. Nie oznacza to jednak, że klejenie jest w stanie zastąpić konwencjonalne techniki łączenia w ich aktualnych zastosowaniach. Ewentualne wdrożenia tej techniki dotyczą jedynie wybranych elementów czy konstrukcji i tylko wówczas, gdy będzie to uzasadnione ekonomicznie i będzie spełniało wymogi eksploatacyjne.

8.3. ZJAWISKA FIZYKOCHEMICZNE WYSTĘPUJĄCE W KLEJENIU MATERIAŁÓW

Możliwość uzyskania trwałego i funkcjonalnego połączenia klejowego wymaga spełnienia dwóch podstawowych warunków: odpowiedniego związania spoiny klejowej z powierzchnią materiału łączonego (adhezja) oraz osiągnięcia odpowiedniej

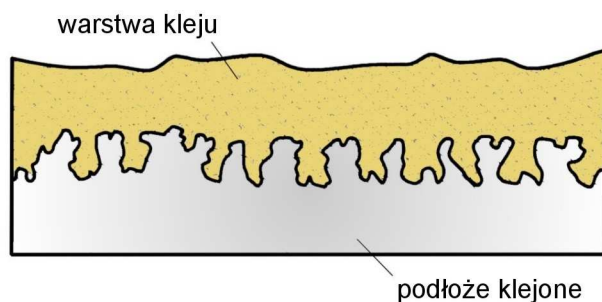
wytrzymałości w samej spoinie klejowej (kohezja). W prawidłowo zaprojektowanym i wykonanym połączeniu klejowym siły adhezji powinny być w przybliżeniu równe co do wartości siłom kohezji. Zjawiska odpowiedzialne za powstanie połączeń klejowych pokazano na rys. 8.1 [1,2,4,5].



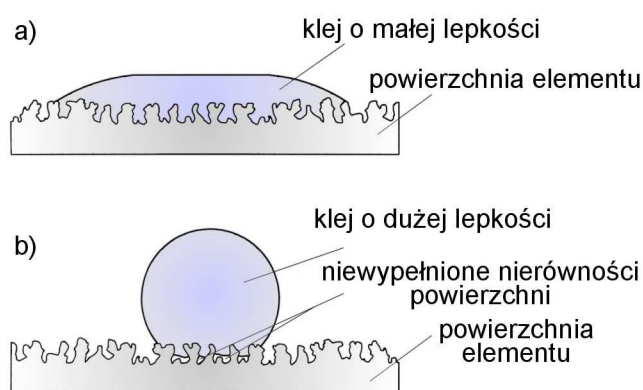
Rys. 8.1. Oddziaływania adhezyjne i kohezyjne w połączeniu klejowym [1,2,4,5]

Adhezja (łac. *adhesio* – szepianie, przyleganie) jest zjawiskiem powierzchniowego wiązania się warstw wierzchnich dwóch ciał, zazwyczaj cieczy i ciała stałego. Wyodrębnia się podział adhezji na właściwą i mechaniczną [1-8]. Istnieje wiele teorii próbujących wyjaśnić zjawisko adhezji właściwej, a także określić warunki, w jakich można uzyskać dużą wytrzymałość złączy adhezyjnych: teoria oddziaływań cząsteczkowych (fizyczno – chemiczna), teoria elektrostatyczna, teoria dyfuzyjna, teoria chemiczna i pozostałe teorie [1,2,4,8,9].

W przypadku adhezji mechanicznej o wytrzymałości złącza decyduje wytrzymałość kleju lub łączonych materiałów, a nie zjawiska zachodzące na granicy obu tych faz. Rzadkopłynny klej o małej lepkości penetruje nierówności powierzchni, zakotwiczając się mocno we wgłębieniach materiału mającego chropowatą powierzchnię i jest absorbowany przez porowate podłoże podczas nanoszenia (rys. 8.2) [1,2,4,6,7]. Stopień penetracji zależy głównie od lepkości kleju, temperatury, ciśnienia, czasu wnikania, a także od przekroju i głębokości wgłębień [1,2,8]. Istotne z punktu widzenia funkcjonalności połączeń są oddziaływania w skali mikro [1,2,10]. Kleje o dużej lepkości, np. w postaci pasty, nie wykazują zdolności zarówno do zwilżania, jak i rozplływania się na powierzchni klejonej, co prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości połączeń w wyniku niedokładnego wniknięcia masy klejowej w nierówności [1,11]. Podstawowe różnice w zwilżaniu powierzchni przez kleje o małej i dużej lepkości pokazano na rys. 8.3a i b [1,2,4,6,7].



Rys. 8.2. Adhezja mechaniczna [1,2,4,6,7]



Rys. 8.3. Zwilżanie powierzchni klejami o małej lepkości (a) i dużej lepkości (b) [1,2,4,6,7]

Kohezja (łac. *cohaesio* – spójność) definiowana jest jako stan ciał fizycznych, w którym oddziaływania międzycząsteczkowe przeciwstawiają się rozdzielaniu ich na części [1,2,8]. Miarą kohezji jest praca potrzebna do rozdzielania określonego ciała na części, podzielona przez powierzchnię powstałą wskutek tego rozdzielania.

Analiza właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej wymaga uwzględnienia również aspektów energetycznych. Zgodnie z normą PN-EN 923:2008 **zwilżalność** jest to zdolność cieczy (kleju) do rozplływania się na powierzchni ciała stałego. Zwilżanie jest zjawiskiem fizycznym, które polega na rozplływaniu się osadzonej kropli cieczy i przyjmowaniu przez nią kształtów równowagowych na powierzchni granicy fazy stałej i gazowej lub rozprzestrzeniania się cieczy wzdłuż granic fazy stałej. W pierwszym przypadku, stopień zwilżania powierzchni można wyznaczyć na podstawie kąta zwilżania, będącego bardzo istotną wielkością charakteryzującą oddziaływania na granicy faz ciało stałe – ciecz. Jest to kąt zawarty między styczną do powierzchni cieczy w punkcie zetknięcia faz: ciało stałe – ciecz – powietrze, a powierzchnią ciała stałego. Dla uzyskania jednoznaczności interpretacji otrzymanych wyników, do wyznaczania kąta zwilżania stosuje się ciecze, z uwagi na ich tendencje do przyjmowania kształtów odpowiadających najmniejszej objętości. Podczas zwilżania fazy stałej przez fazę ciekłą nie powinny zachodzić żadne reakcje chemiczne ani wzajemna rozpuszczalność faz.

Podstawą metod obliczania właściwości energetycznych warstwy wierzchniej jest sformułowane w 1805 roku równanie Younga:

$$\sigma_{SV} = \sigma_{SL} + \sigma_{LV} \cdot \cos\theta \quad (8.1)$$

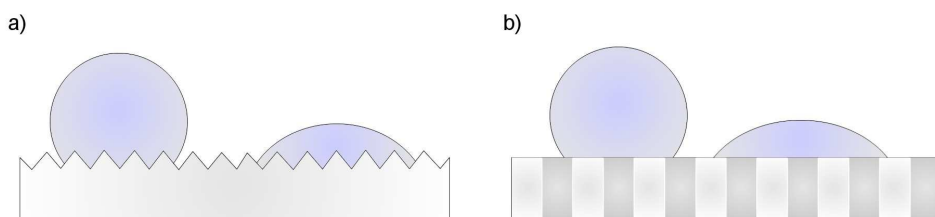
gdzie:

- σ_{SV} – napięcie powierzchniowe ciała stałego,
- σ_{SL} – międzyfazowe napięcie powierzchniowe ciała stałego i cieczy,
- σ_{LV} – napięcie powierzchniowe cieczy,
- θ - równowagowy kąt zwilżania.

Graficzną interpretację równania Younga pokazano w rozdziale 7 *Lutowanie* na rys. 7.1. Dobra zwilżalność w klejeniu występuje, gdy kąt zwilżania, określany między styczną do zarysu kropli kleju, a podłożem klejonym, wynosi poniżej 30° [1-7,11]. Poszczególne przypadki oddziaływania zwilżającego kleju na klejonej powierzchni (analogiczne jak w przypadku lutowania) pokazano w rozdziale 7 *Lutowanie* na rys. 7.2 [1,2,4-7,11].

Teoretycznie, w przypadku wartości kąta zwilżania $\theta = 180^\circ$ ciecz charakteryzuje się nieskończenie dużą pracą kohezji i zerową pracą adhezji do powierzchni stałej. W rzeczywistości najczęściej spotyka się stany pośrednie, zatem przyjęto umownie, że jeśli kąt zwilżania ma wartość większą od 90° uważa się, że ciecz nie zwilża ciała stałego.

Zwilżalność oraz zdolność do rozplątliwości na powierzchni ciała stałego zależą nie tylko od średniego napięcia powierzchniowego całej warstwy wierzchniej, ale również od układu cząsteczek znajdujących się najbliżej cieczy zwilżającej [1,2]. Bezpośredni wpływ na wartość kąta zwilżania ma stereometria powierzchni, głównie jej chropowatość (rys. 8.4a) oraz homogeniczność podłoża (rys. 8.4b) na granicy trzech faz [1,2].



Rys. 8.4 Zależność kąta zwilżania od topografii (a) oraz homogeniczności (b) podłoża na granicy trzech faz [1,2]

8.4. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA POWSTANIE POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Uzyskanie poprawnego połączenia klejowego wymaga uwzględnienia czynników materiałowych, technologicznych, konstrukcyjnych oraz warunków eksploatacyjnych

pracy złączy [1,2,4,9,12]. Wpływ poszczególnych czynników na uzyskanie poprawnego połączenia klejowego pokazano na rys. 8.5 [1,2].



Rys. 8.5. Wpływ poszczególnych czynników na uzyskanie poprawnego połączenia klejowego [1,2]

Spośród czynników technologicznych szczególnie ważnym problemem, decydującym o funkcjonalności złącza, jest odpowiedni dobór kleju [1,2,4,12]. Zależy od niego przede wszystkim wytrzymałość mechaniczna połączenia, ale także odporność na działanie wysokiej temperatury, zdolność do odkształceń sprężystych, możliwość pracy w niekorzystnych warunkach środowiskowych (wilgoć, promieniowanie słoneczne, bezpośredni kontakt z substancjami chemicznymi). Coraz większa różnorodność klejów dostępnych na rynku sprawia, że dobór właściwego spoiwa staje się prawdziwym wyzwaniem. Podstawową czynnością, poprzedzającą ten wybór, jest zdefiniowanie wartości i sposobu działania obciążeń oraz właściwości łączonych materiałów. Następnie określa się ograniczenia związane z metodami i warunkami przygotowania powierzchni oraz utwardzania kleju, wymiarami i geometrycznym ukształtowaniem elementów łączonych, warunkami atmosferycznymi i mechanicznymi pracy złącza. Szczególnie istotne jest uwzględnienie obciążeń dynamicznych, potrafiących obniżyć wytrzymałość połączeń klejowych 2-5 – krotnie w porównaniu z obciążeniami statycznymi [1,4]. Dodatkowym kryterium jest wymagana elastyczność złącza oraz jego trwałość.

Dla klejów dwuskładnikowych istotne jest odpowiednie przygotowanie mieszaniny klejowej. Należy bezwzględnie przestrzegać zaleceń producenta dotyczących wagowego lub objętościowego stosunku mieszania poszczególnych składników. Niedopuszczalne są wszelkie odstępstwa z uwagi na stechiometrię reakcji – nadmiar utwardzacza pozostaje nieprzereagowany, natomiast jego niedobór prowadzi do niewłaściwego usieciowania kleju. Przygotowanie masy klejowej przeprowadza się ręcznie lub w specjalnych mieszalnikach mechanicznych albo głowicach przepływowych [1,2]. Proces ten jest ściśle związany z tzw. „czasem życia” mieszaniny klejowej (*żywołność, czas roboczy*), czyli czasem od momentu dodania do żywicy utwardzacza, do chwili osiągnięcia przez mieszaninę tak dużej lepkości,

która uniemożliwia jej nanoszenie na powierzchnie klejone i ich zwilżenie (wg PN-EN 14022:2010). Podczas sporządzania masy klejowej należy wyeliminować lub ograniczyć do minimum wprowadzanie pęcherzy powietrza, które mogą zmniejszyć wytrzymałość połączenia o 5-15% [1,2].

Kolejnym ważnym etapem jest nanoszenie kleju, które może być wykonywane ręcznie lub w procesie zautomatyzowanym. Ważne jest, aby warstwa kleju wykazywała odpowiednią grubość i była równomiernie rozłożona na powierzchni. Sposób nanoszenia klejów zależy od ich właściwości, przede wszystkim od lepkości i związanej z nią konsystencji, a także od czasu życia mieszaniny klejowej. W zależności od rodzaju spoiwa istnieje możliwość nanoszenia go na jedną lub obie powierzchnie elementów łączonych, które składa się bezpośrednio po naniesieniu kleju lub po określonym czasie (kleje wymagające odparowania rozpuszczalnika). Kleje, w zależności od zastosowania, mogą być наносzone punktowo, liniowo, specjalnymi ściegami lub powierzchniowo.

Utwardzanie, w zależności od rodzaju kleju, może być efektem procesu fizycznego, reakcji chemicznej, oddziaływania podwyższonej temperatury, promieniowania ultrafioletowego lub reakcji anaerobowej [1,2,4]. Głównymi parametrami utwardzania są czas, temperatura i docisk. Ważnym jest, aby bezpośrednio po złożeniu elementów łączonych odpowiednio je ustalić, zapewniając niezmienność położenia podczas utwardzania [1,2,4].

8.5. PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI ELEMENTÓW ŁĄCZONYCH DO KLEJENIA

Właściwy proces technologiczny klejenia rozpoczyna się od przygotowania powierzchni materiałów łączonych. Etap ten w znacznym stopniu decyduje o prawidłowej pracy złącza. Zgodnie z PN-EN 13887:2005, przygotowanie warstwy wierzchniej wymaga użycia odpowiednich metod, zarówno czyszczenia, jak i modyfikacji powierzchni elementów, za pomocą powłok organicznych, nieorganicznych lub ich kombinacji.

Warstwa wierzchnia jest zewnętrzną warstwą materiału ograniczoną rzeczywistą powierzchnią, wykazującą zmienione cechy fizyczne i niekiedy chemiczne w stosunku do cech materiału rdzenia (wg PN-M-04250:1987). Jej właściwości zależą od składu i budowy chemicznej, struktury geometrycznej oraz rodzaju wiązań atomowych, które są wynikiem oddziaływań sił i temperatury występujących w procesach obróbki. Zdolności adhezyjne warstwy wierzchniej znacząco wzrastają przez usunięcie organicznych i nieorganicznych zanieczyszczeń w postaci osadów, pyłów, tlenków, spolaryzowanych molekuł (tłuszczów, smarów i olejów), zaadsorbowanej wody i gazów oraz warstw reakcyjnych [1,2,4].

Metody przygotowania powierzchni elementów do procesu klejenia powinny zapewniać osiągnięcie najkorzystniejszych właściwości połączeń adhezyjnych, uwzględniając rodzaj materiałów łączonych i stosowanych klejów. W przypadku lutowania czy spawania przygotowanie powierzchni łączenia nie odgrywa tak

szczególnej roli jak przy klejeniu. W technologiach tych stosowane są topniki, ochrona gazowa oraz próżnia, które osłaniają obszar łączenia oraz pomagają we właściwym zwilżaniu lub też stapianiu łączonych materiałów. Pomińnięcie oczyszczenia powierzchni w klejeniu prowadzi do wielokrotnego zmniejszenia i tak stosunkowo małej jednostkowej wytrzymałości mechanicznej.

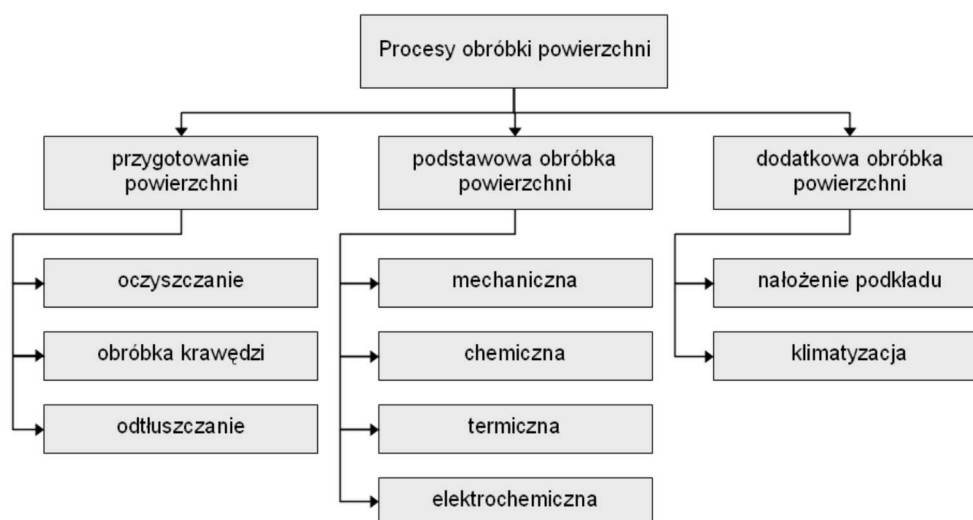
Istotną kwestią, poza trwałością warstwy wierzchniej, jest jej powtarzalność. Przez uzyskanie maksymalnych sił adhezji na granicy klej – materiał łączony, można nawet 4 – krotnie zwiększyć wytrzymałość mechaniczną połączeń klejowych [1,2,4]. Prawdłowo przygotowana do procesu klejenia powierzchnia powinna charakteryzować się [1,2]:

- brakiem zanieczyszczeń redukujących adhezję,
- dobrą zwilżalnością klejem,
- zdolnością do wytwarzania wiązań międzyfazowych,
- stabilnością dla założonych warunków i czasu eksploatacji złącza,
- powtarzalnością uzyskiwanych właściwości,
- obecnością podkładów lub aktywatorów (jeśli są wymagane).

Przygotowanie powierzchni materiałów klejonych ma zasadniczy wpływ na właściwości mechaniczne połączeń, a przez to na niezawodność ich pracy. W praktyce, w zależności od właściwości łączonych elementów oraz wymagań przyczepności klejów, stosuje się różne metody przygotowania powierzchni, w celu jej rozwinięcia oraz zapewnienia spójności i zwilżalności, takie jak: mechaniczne, chemiczne, termiczne (lub łączenie tych metod: chemiczno-termiczne) oraz elektrochemiczne [1,2,4]. Przygotowanie powierzchni elementów łączonych do procesu klejenia powinno obejmować trzy podstawowe etapy [1,2,8,11]:

- oczyszczanie i odfuszczenie powierzchni z zanieczyszczeń,
- modyfikacja warstwy wierzchniej różnymi metodami mechanicznymi, termicznymi, chemicznymi lub elektrochemicznymi,
- czynności bezpośrednio poprzedzające utworzenie złącza (np. naniesienie podkładów, aktywatorów).

Czynniki wpływające na proces obróbki powierzchni elementów klejonych pokazano schematycznie na rys. 8.6 [1,2,4]. Obejmują one zasadniczo przygotowanie powierzchni oraz podstawową i dodatkową jej obróbkę.



Rys. 8.6. Sposoby obróbki powierzchni elementów klejonych [1,2,4]

Metody przygotowania powierzchni elementów łączonych do klejenia, z punktu widzenia ingerencji w strukturę materiału rodzimego, dzieli się na pasywne i aktywne [1,11]. Metody pasywne mają na celu jedynie usunięcie większości zanieczyszczeń (organicznych i nieorganicznych) oraz zewnętrznych słabych warstw granicznych, pozostawiając czystą i chemicznie aktywną powierzchnię. Aktywne formy przygotowania warstwy wierzchniej do procesu klejenia, oprócz wymienionych zabiegów, powoduje również częściową ingerencję w strukturę materiału rodzimego. Pozwala to na poprawienie zwilżalności, chropowatości powierzchni (w mikroskali) oraz zdolności adhezyjnych warstw bezpośrednio odpowiedzialnych za powstanie połączeń. W efekcie prowadzi to do zwiększenia wytrzymałości mechanicznej oraz trwałości złączy klejowych. W niektórych przypadkach aktywne metody przygotowania elementów przeznaczonych do klejenia polegają na uzyskaniu nowej powierzchni, korzystnej z punktu widzenia właściwości adhezyjnych.

Zazwyczaj pierwszym i końcowym etapem przygotowania powierzchni jest jej odtłuszczenie, zwykle za pomocą rozpuszczalników organicznych lub roztworów substancji powierzchniowo czynnych. Nie zaleca się stosowania benzyny ekstrakcyjnej oraz wodnych środków myjących na bazie zasadowej lub kwaśnej, ponieważ zawierają odpowiednio kilka procent frakcji tłuszczowych oraz dodatki antykorozyjne, np. niewielkie ilości silikonów, niekorzystnie wpływających na siły adhezji w połączeniach klejowych [1-4]. Dobre rezultaty oczyszczania można uzyskać stosując środki zalecane przez producentów klejów, dobranych odpowiednio do właściwości spoiwa. Najskuteczniejsze odtłuszczenie, umożliwiające uzyskanie dużej aktywności fizykochemicznej powierzchni dla stosowanego kleju, przeprowadza się w parach rozpuszczalników, myjkach elektrolitycznych, ultradźwiękowych i komorowych oraz natryskowo [1,2,4]. Elementy szczególnie zanieczyszczone można wstępnie poddać ekspozycji w rozpuszczalniku, a następnie oczyścić wspomagając się innymi metodami. Dla powierzchni chropowatych szczególnie uzasadnione wydaje się wykorzystanie ultradźwięków, które w wyniku zjawiska kawitacji, tworzą

w roztworze mikroskopijne pęcherzyki powietrza o oczyszczającym ładunku energetycznym [1,2]. Należy pamiętać, że odtłuszczenie warstwy wierzchniej jest warunkiem koniecznym, ale często niewystarczającym do uzyskania dużej wytrzymałości połączenia klejowego [1,12]. Dodatkowo powinno się je poprzedzać rozwijającymi i aktywującymi obróbkami powierzchniowymi. Bardzo istotnym etapem jest ostateczne płukanie wodą lub rozpuszczalnikami w celu usunięcia z powierzchni pozostałości środków chemicznych, zakończone dokładnym suszeniem.

Metody mechaniczne usuwają większość zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych, zmieniając dodatkowo topografię powierzchni oraz jej reaktywność. W zależności od rodzaju łączonych materiałów realizuje się je najczęściej poprzez szlifowanie, obróbkę strumieniowo – ścierną, chropowacenie materiałami ściernymi (papier, włókna, wełna metalowa), szczotkowanie, młotkowanie, śrutowanie, kulkowanie czy skrobanie [1,2,11]. Metody te przyczyniają się do rozwinięcia powierzchni rzeczywistej materiałów łączonych, co zwiększa powierzchnię styku cząsteczek kleju z podłożem i jest przyczyną większych oddziaływań międzycząsteczkowych, a przez to wzrostu właściwości adhezyjnych.

Metody mechaniczne umożliwiają ukonstytuowanie struktury geometrycznej warstwy wierzchniej, zapewniając maksymalne jej rozwinięcie, lecz nie gwarantują dobrego uaktywnienia powierzchni, stąd powinny być połączone z późniejszą obróbką chemiczną. Należy zwrócić uwagę, aby podczas obróbki mechanicznej nie wprowadzić w warstwę wierzchnią elementów łączonych nadmiernych naprężeń własnych ściskających, powodujących jej odkształcenia. Mogą one być przyczyną niekorzystnych naprężeń oddzierających, zmniejszających wytrzymałość połączeń klejowych nawet o 10-50% [1,2].

Obróbka chemiczna polega na poddawaniu powierzchni elementów klejonych oddziaływaniu kąpeli o odpowiednim składzie oraz temperaturze [1,2,11,12]. Najczęściej stosowane metody chemiczne to: trawienie roztworami kwasów, trawienie alkaliczne, utlenianie, anodowanie, fosforowanie [1,11]. Umożliwiają one uzyskanie wymaganego rozwinięcia powierzchni, ale również zapewniają dużą aktywność fizykochemiczną oraz odporność korozyjną. Oprócz usuwania zanieczyszczeń organicznych znacznie redukują grubość warstw tlenkowych oraz zmieniają ich morfologię. Prawidłowy wybór kąpeli może zwiększyć wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych nawet o 40% [1,9].

Termiczne metody przygotowania powierzchni do procesu klejenia stosuje się stosunkowo rzadko, głównie do tworzyw sztucznych. Wykorzystuje się oczyszczanie płomieniowe przy użyciu palników gazowych, jonowych lub plazmowych albo długotrwałe wygrzewanie, często w próżni.

Elektrochemiczne metody przygotowania powierzchni elementów łączonych do klejenia, mimo iż zapewniają bardzo korzystne właściwości adhezyjne, z uwagi na długotrwały i skomplikowany proces, stosowane są jedynie w przypadku bardzo dużych wymagań wytrzymałościowych. Obróbka elektrochemiczna polega na roztwarzaniu anodowym powierzchni materiału klejonego w warunkach elektrolizy [1,2,13]. Reakcje chemiczne zachodzące podczas obróbki są odwrotne do tych, które

występują w galwanotechnice, przy pokrywaniu wyrobów warstwami metalu. Roztworzenie umożliwia ciecz przewodząca prąd elektryczny – elektrolit. Proces polega na przechodzeniu roztwarzanych jonów do elektrolitu i wydzielaniu się produktów reakcji w elektrolicie [1,2].

Dla zwiększenia przyczepności kleju i wytrzymałości połączenia, po ostatecznym odtłuszczeniu powierzchni elementów klejonych można je poddać gruntowaniu podkładem [1,2,4]. Podkłady (primery, promotory adhezji, środki sprzęgające) to materiały chemicznie podobne do klejów, bazujące na rozpuszczalnikach organicznych, roztworach polimerów i reaktywnych monomerów, z niewielkim (do 10%) udziałem ciał stałych, zawierające chemicznie czynne grupy funkcyjne [1,2,4,12]. Mogą być rozpylane lub nanoszone wałkiem bądź pędzlem na powierzchnię elementów łączonych, pozostawiając warstwę nie większą niż 5 g/m². Nośnik odparowuje pozostawiając na powierzchni składniki aktywne, które wchodzi w reakcję z warstwą wierzchnią, jednocześnie oddziałując z klejem [1,5]. Stanowią one swoiste mostki między warstwą kleju a powierzchnią, poprawiając adhezję oraz trwałość połączeń, a niekiedy przyczyniając się do poprawy właściwości mechanicznych [1,2,12]. Dodatkowo zwiększają również odporność połączeń na oddziaływanie wilgoci i korozji [1,4]. Nakładanie podkładu powinno nastąpić bezpośrednio po zakończeniu przygotowania powierzchni materiałów łączonych, co pozwala zapobiec zmianom stanu warstwy wierzchniej spowodowanym oddziaływaniem środowiska, zwłaszcza tlenu, oraz przypadkowemu zabrudzeniu powierzchni [1,12].

Aktywatory (przyspieszacze) są substancjami przyspieszającymi, a niekiedy niezbędnymi do utwardzenia klejów. W przeciwieństwie do podkładów nie wpływają one na adhezję, poprawiając jedynie siły spójności kleju i gwarantując prawidłowy proces wiązania [1,2].

8.6. PODZIAŁ KLEJÓW

Podstawowymi składnikami klejów są substancje wiążące (spoiwo, lepiszcze), rozpuszczalniki, środki zwiększające przylepność (plastyfikatory, koalescenty), środki sieciujące, modyfikatory i stabilizatory. Istnieje wiele kryteriów podziału klejów uwzględniających ich właściwości i przeznaczenie, z czego zasadniczego podziału dokonuje się według ich bazy chemicznej oraz sposobu utwardzania. W praktyce najczęściej stosowane kryteria podziału klejów dotyczą [1,2,4,11]:

- postaci (konsystencji),
- prędkości wiązania,
- metody i dziedziny zastosowania,
- właściwości złączy,
- ilości składników,
- właściwości cieplnych warstwy klejowej.

Ważną grupę klejów utwardzających się chemicznie stanowią kleje reaktywne, dzielące się według sposobu utwardzania przez: poliaddycję, polimeryzację, polikondensację.

8.6.1. KLEJE REAKTYWNE (UTWARDZAJĄCE SIĘ CHEMICZNIE)

Kleje na bazie żywic epoksydowych – żywice epoksydowe należą do grupy żywic chemoutwardzalnych. Kleje na bazie żywic epoksydowych to klasyczne kleje do łączenia metali [1,4]. Kleje te mogą występować jako jedno- i dwuskładnikowe. Kleje jednoskładnikowe utwardzane są pod wpływem temperatury, zwykle powyżej 120 °C. W przypadku klejów 2-składnikowych miesza się dwa monomery żywicę i utwardzacz. W klejach dwuskładnikowych, utwardzających się przez poliaddycję, wiązanie następuje w zależności od utwardzacza po kilku, kilkunastu minutach lub 2 godzinach (dla dużych powierzchni). Elementy klejone powinny być jednoznacznie ustalone względem siebie, dociśnięte i zabezpieczone przed zmianą położenia. W przypadku klejów dwuskładnikowych, wygodne jest używanie klejów o jednakowym udziale objętościowym składników A i B. Niewłaściwa proporcja obydwu składników ma wpływ na zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej połączenia klejowego. Często pełną wytrzymałość mechaniczną połączenia klejowe uzyskują nawet dopiero po siedmiu dniach. Dla skrócenia tego czasu stosuje się dogrzewanie złączy w zakresie temperatur 60-180 °C. Wzrost temperatury umożliwia skrócenie czasu utwardzania kleju. Wyższa temperatura utwardzania kleju sprzyja również uzyskiwaniu większej wytrzymałości na ścinanie połączenia klejowego, nawet 2,5 krotnie w odniesieniu do złączy utwardzanych w temperaturze pokojowej. Zbyt wysoka temperatura utwardzania kleju, powyżej 180 °C, powoduje zbyt dużą gęstość sieciowania co prowadzi do uzyskania dużej wytrzymałości mechanicznej złącza, ale o zmniejszonej elastyczności i udarność. Natomiast przyspieszenie wiązania klejów na bazie żywic epoksydowych przez aktywatory chemiczne znajdujące się zwykle w utwardzaczu prowadzi do obniżenia wytrzymałości mechanicznej złączy. Utwardzone spoiny klejowe są odporne na działanie wody, benzyny, olejów mineralnych, wodnych roztworów soli i kwasów. Nie są odporne natomiast na działanie substancji utleniających i takich rozpuszczalników jak: ketony, estry, roztwory chloropochodne.

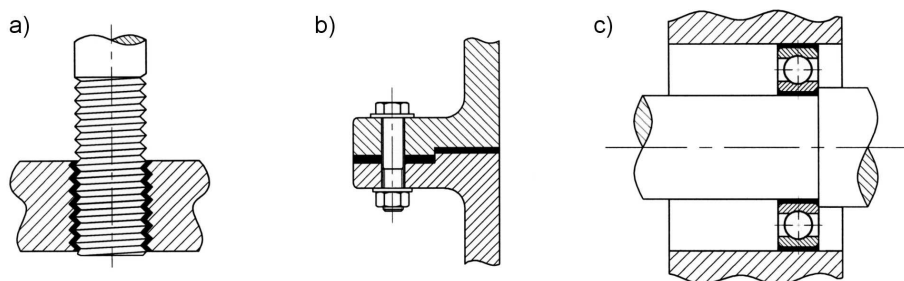
Kleje poliuretanowe – mogą występować jako kleje jedno – i dwuskładnikowe, bez rozpuszczalnika lub z rozpuszczalnikiem. Dla klejów jednoskładnikowych bez rozpuszczalnika decydującą rolę przy utwardzaniu odgrywa woda, która zwykle znajduje się w wystarczającej ilości w otaczającym powietrzu. W określonych przypadkach dla przyspieszenia utwardzania kleju można zastosować natrysk wodny. Są one stosowane tam gdzie elementy muszą być szybko sklezione, uszczelnione i polakierowane. Kleje dwuskładnikowe bez rozpuszczalnika składają się z niskomolekularnego poliizocyanianu i niskomolekularnego polioliu [1,4]. Wymieszanie obydwu składników w temperaturze pokojowej rozpoczyna reakcję

utwardzania. Kleje jednoskładnikowe z rozpuszczalnikiem zawierają już usieciowane makromolekuły poliuretanowo – hydroksylowe, które są rozpuszczone w rozpuszczalnikach organicznych. Przed sklejeniem rozpuszczalnik powinien całkowicie lub w przeważającej części odparować. Kleje dwuskładnikowe z rozpuszczalnikiem składają się ze składnika A stanowiącego rozpuszczony poliuretan – hydroksyl i składnika B stanowiącego poliizocyjanian. Kleje te wykazują większe siły kohezji w porównaniu do klejów jednoskładnikowych. Kleje poliuretanowe dyspersyjne stanowią wysokomolekularne poliuretany – hydroksyle, które są zdyspergowane w wodzie. Występują jako jedno – lub dwuskładnikowe. Kleje te znajdują zastosowanie w przemyśle opakowań i przemyśle samochodowym. Nie nadają się do klejenia miękkiego polichloru winylu (PCV).

Kleje metakrylowe – bazą tych klejów jest żywica metakrylowa, z której wytwarzany jest polimetakrylan metylu (plexi) [1,4,5]. Do żywicy dodawany jest w fazie produkcyjnej również katalizator (przyspieszacz reakcji). Jako utwardzacze stosowane są nadtlenki o właściwościach nadtlenku wodoru, wody utlenionej. Utwardzacz może być dodawany do żywicy w różnej postaci: proszku, pasty lub lakieru. Lakier nanoszony jest na jedną z powierzchni łączonych. Po wyschnięciu lakieru elementy te mogą być magazynowane i następnie klejone po naniesieniu żywicy na powierzchnie elementów. Proszek dodawany jest zwykle w ilości 1-3% wag., a pasta w ilości 3-5% wag. Kleje oparte na żywicach metakrylowych wykazują dużą wytrzymałość na ścinanie, dochodzącą do 40 MPa. Złącza klejowe mogą pracować w zakresie temperatur -40 do 130 °C. Kleje metakrylowe nadają się do klejenia metali, duroplastów (tworzyw termoutwardzalnych), ceramiki i szkła.

Kleje cyjanoakrylowe – wytwarzane są bez rozpuszczalnika. Znane są pod nazwą klejów „sekundowych”, ponieważ utwardzają się w ciągu kilku, kilkunastu sekund. Z tego względu nadają się tylko do klejenia małych powierzchni, nie przekraczających 1 cm². Pobierają przy utwardzaniu chemicznym wilgoć z powietrza, co doprowadza do ich polimeryzacji. Zwykle wystarcza do tego powietrze o wilgotności względnej w granicach 40-60 %. Klej nanosi się na jeden z elementów łączonych. Zetknięcie obydwu elementów, zaraz po naniesieniu kleju, musi przebiegać ostrożnie, ponieważ przy wadliwym usytuowaniu elementów klejonych pierwotnie wykonane połączenie wymaga zniszczenia. Są produkowane od konsystencji ciekłej o małej lepkości do konsystencji żelu. Służą do klejenia metali, wielu tworzyw sztucznych (ABS, twardy polichlorek winylu PCV, polistyren PS), szkła, skóry i drewna. Połączenia klejowe osiągają wytrzymałość na ścinanie w zakresie 7-20 MPa i są zwykle nieodporne na działanie wody [1,4]. Szybka reakcja kleju z wilgocią powoduje, iż kleje powinny być przechowywane w zamkniętym pojemniku, w chłodziarce. Należy wykazać dużą ostrożność podczas klejenia, gdyż łatwo można skleić palce rąk. W takim przypadku należy szybko zanurzyć ręce w gorącej wodzie z mydłem i ostrożnie rozwierać palce rąk. Przy kontakcie z oczami, które są naturalnie wilgotne, dostanie się kropli kleju powoduje jego błyskawiczne utwardzenie. Z tych względów należy pracować w okularach i rękawicach ochronnych.

Kleje anaerobowe – nazwa kleju pochodzi z greckiego słowa „anaeroby” tj. organizmów mogących żyć bez dostępu tlenu [1,4]. Są to kleje jednoskładnikowe o różnym stopniu lepkości. Nie ulegają polimeryzacji dopóki mają kontakt z tlenem z otaczającego powietrza. Dopiero po odcięciu dostępu tlenu z powietrza oraz w kontakcie z metalową powierzchnią łączonych elementów dochodzi do ich utwardzania. Jony metalu w obecności kleju działają katalizująco. Stosuje się je do klejenia stali niestopowych oraz miedzi i jej stopów, bez dodatkowych aktywatorów. Do materiałów pasywnych, które nieznacznie lub wcale nie działają katalizująco zalicza się: stale wysokostopowe, aluminium, nikiel, złoto, srebro, cynę, cynk, tworzywa sztuczne, ceramikę, a także warstwy tlenkowe, powłoki chromianowe i anodowe. Aby kleić materiały pasywne, należy przed nałożeniem kleju, nanieść na jedną lub dwie klejone powierzchnie ciekłe aktywatory. Dla przyspieszenia wiązania kleju, zaleca się również dotwardzanie spoiny klejowej przez nagrzanie jej do temperatury 120 °C i wytrzymanie w tej temperaturze ok. 30 minut. Złącza klejowe uzyskują wytrzymałość na ścinanie w zakresie 10-35 MPa i mogą pracować w zakresie temperatur od -60 do 150 °C (niektóre nawet do 220 °C). Po przekroczeniu górnej wartości temperatury wytrzymałość złączy zmniejsza się przynajmniej 2 – krotnie. Maksymalna szczelina przy klejeniu nie powinna przekraczać 0,15 mm, dla niektórych klejów 0,25 mm. Stosowane są powszechnie do klejenia połączeń gwintowych, kołkowych i wielowypustowych, typu piasta – wał lub osadzania łożysk. Spełniają funkcję uszczelnienia połączeń, eliminują podkładki sprężyste zapobiegając przed luzowaniem i odkręcaniem się śrub. W zależności od rodzaju kleju uzyskuje się połączenia rozłączne lub nierozłączne. Podstawowe funkcje klejów anaerobowych pokazano na rys. 8.7 [1,3,4,6,7].



Rys. 8.7. Podstawowe zadania klejów anaerobowych: zabezpieczenie przed odkręcaniem (a), uszczelnianie (b), mocowanie (c) [1,4,6,7]

Polimery MS – stanowią grupę od niedawna stosowanych jednoskładnikowych materiałów uszczelniających o zdolnościach klejenia elastycznego [1,4,14]. Są modyfikowane silanami (krzemowodorem) i nie zawierają rozpuszczalników, szkodliwych izocyjanianów oraz polichloru winylu. Utwardzają się przez pobieranie wilgoci z powietrza i nie mają zapachu. Łączą one zalety silikonów i poliuretanów. Polimery MS charakteryzują się doskonałą adhezją, bez konieczności użycia gruntu (primeru), do metali, szkła i tworzyw sztucznych. Służą do klejenia materiałów o różnych właściwościach fizykochemicznych jak np.: metal – szkło, metal – drewno. Mają właściwości wypełnienia szczelin niekapilarnych i odstępów dochodzących

do 40 mm. Wytrzymałość na ścinanie i rozciąganie złączy klejowych jest niewielka i nie przekracza 2 MPa. Stąd wskazane jest tu klejenie dużych powierzchni. Polimery MS dają połączenia odporne na drgania i wibrację, ograniczają skutki hałasu, wykazują bardzo dobrą odporność na promieniowanie ultrafioletowe i starzenie, można je malować i lakierować. Polimery MS znalazły szerokie zastosowanie w budowie pojazdów samochodowych, w uszczelnianiu połączeń kołnierzowych, nitowanych, śrubowych i zgrzewanych punktowo.

Kleje utwardzane przez promieniowanie UV – istotą ich stosowania jest wykorzystanie promieniowania ultrafioletowego. Szybkość utwardzania klejów zależy od natężenia i długości fali promieni UV. Głębokie utwardzanie kleju powodują fale świetlne o długości 300 – 400 nm. Kleje te charakteryzują się bardzo krótkimi czasami utwardzania (do kilku sekund) dla uzyskania pełnego połączenia. Proces klejenia wymaga, aby przynajmniej przez jeden element klejony przechodziło promieniowanie świetlne. Stąd zastosowanie tych klejów do łączenia takich par materiałowych jak: szkło – szkło, szkło – metal, pleksi – metal. Kleje te mają duże znaczenie przy wytwarzaniu taśm samoprzylepnych. Z powodu dużej czułości na oddziaływanie światła, szczególnie słonecznego, kleje utwardzane przez promieniowanie powinny być przechowywane w ciemnych pomieszczeniach, w szczelnych opakowaniach.

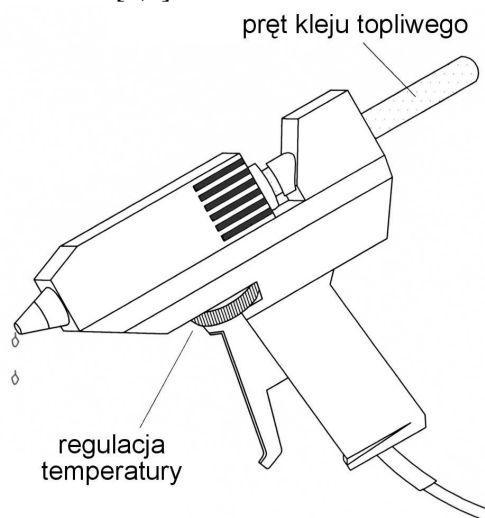
Kleje na bazie żywic fenolowych – w klejach tych centralna molekula – formaldehyd reaguje z innymi molekułami np. fenolu, melaminy, mocznika, a powstająca w wyniku kondensacji woda prowadzi do utwardzenia kleju. Kleje oparte na żywicach fenolowych używane są przeważnie do klejenia drewna i materiałów warstwowych na bazie drewna, ponieważ są one w stanie wchłonąć wodę powstałą w wyniku reakcji polikondensacji. Kleje te używane są także do łączenia materiałów nieporowatych jak np. blach ze stopów aluminium w budowie samolotów. Z tego względu są one utwardzane w autoklawach w wysokiej temperaturze i pod dużym ciśnieniem, aby uniknąć wzrostu objętości warstwy kleju przez tworzenie pęcherzy gazowych.

Silikony – znajdują przede wszystkim zastosowanie w masach uszczelniających. Są to kleje jednoskładnikowe, które utwardzają się przez pobieranie wilgoci z otaczającego powietrza. W reakcji polikondensacji wydziela się kwas octowy, rozpoznawalny po charakterystycznym zapachu. Przy utwardzaniu powstaje stosunkowo szybko naskórek, a dalsze utwardzanie przebiega przez powolne pobieranie wilgoci. Silikony wykazują bardzo dużą elastyczność, nawet w niskiej temperaturze, do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale są czułe na działanie karbu. Są odporne na oddziaływanie czynników atmosferycznych i znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, przy uszczelnianiu obiektów sanitarnych oraz do klejenia szkła. Szczególną rolę odgrywają silikony odporne na temperaturę do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, zwykle o kolorze czerwonym lub szarym. Używane są wtedy do uszczelniania grzałek w czajnikach, w suszarniach, w budowie pieców oraz w przemyśle samochodowym. Silikony nie wykazują zdolności zwilżania ich farbami i lakierami, stąd produkowane są w szerokiej gamie kolorów. Są powszechnie dostarczane w opakowaniach (tubach, kartuszach) lub w foliowych

opakowaniach elastycznych. Pozwala to na ich łatwe wyciskanie i dozowanie przy użyciu pistoletów ręcznych lub pneumatycznych.

8.6.2. KLEJE UTWARDZAJĄCE SIĘ NA DRODZE PROCESÓW FIZYCZNYCH

Kleje topliwe – nazywane są klejami termoplastycznymi, które po doprowadzeniu ciepła, występują w postaci ciekłej i tak są наносzone na elementy łączone. Po naniesieniu stygną i osiągają natychmiast swoją wytrzymałość mechaniczną. Czas utwardzania klejów w wyniku ochłodzenia jest krótki i zależy od przewodności cieplnej łączonych materiałów. Dla uzyskania ciekłego stanu klejów temperatura ich nagrzewania wynosi zwykle 120-240 °C. Zależy to od rodzaju i budowy kleju (żywicy poliamidowej, poliestru nasyconego, kopolimerów etylenu – octanu winylu EVA). Są to kleje jednoskładnikowe nie zawierające rozpuszczalników. Do ich produkcji, głównie w celu obniżenia ceny, używa się wosków syntetycznych, najczęściej parafinowego i mikrokrystalicznego. Do dozowania stopionych klejów służą m. in. ręczne pistolety nagrzewane elektrycznie (rys. 8.8). Kleje te dobrze nadają się do dozowania automatycznego, przy klejeniu tekstyliów. Główne zastosowanie to klejenie wszelkiego rodzaju opakowań, grzbietów książek, w przemyśle meblowym i obuwniczym oraz w elektronice [1,4].



Rys. 8.8. Pistolet do dozowania kleju topliwego [1,4]

Kleje rozpuszczalnikowe – rozpuszczalnik w tych klejach służy jedynie jako środek pomocniczy do regulacji konsystencji i właściwości kleju i po jego naniesieniu powinien odparować. Rozpuszczalniki, pochodzenia organicznego, są łatwopalne, dlatego należy zwrócić uwagę na zagrożenie pożarowe i zastosowanie wyciągów. Kleje rozpuszczalnikowe nadają się szczególnie do klejenia materiałów porowatych takich jak: skóra, tekstylia, papier, drewno, korek, twardy polichlorek winylu (winidur) lub tworzywa piankowe. Klej należy nałożyć cienką warstwą na obydwie powierzchnie łączonych elementów i dopiero po odparowaniu rozpuszczalnika można

je docisnąć. Nie powinno się zmieniać początkowego położenia elementów względem siebie, ponieważ złącze w bardzo krótkim czasie zyskuje ok. 70% całkowitej wytrzymałości mechanicznej [1,4].

Kleje kontaktowe – są szczególną postacią klejów rozpuszczalnikowych. Kleje kontaktowe występują jako jedno – i dwuskładnikowe. Te drugie składają się z naturalnego lub sztucznego kauczuku oraz utwardzacza. Szczególnie nadają się do klejenia gumy, skóry, tkanin i drewna. Kleje kontaktowe nanoszone są na obydwie powierzchnie elementów klejonych. Po pozornym wyschnięciu i zastosowaniu silnego, ale krótkotrwałego docisku powstaje natychmiast mocne połączenie.

Kleje dyspersyjne – w których cząstki polimerowe (akrylany, kauczuki, poliuretany, polichloropreny) są zdyspergowane w wodzie. Mechanizm utwardzania kleju polega na odparowaniu lub wniknięciu wody w łączone elementy. Odparowanie wody można przyspieszyć przed oddziaływanie ciepła i nadmuchu powietrza. Najczęściej występują w kolorze białym, po utwardzeniu są przezroczyste. Elementy klejone, po naniesieniu kleju, łączy się ze sobą na mokro. Ustalanie elementów względem siebie występuje pod dociskiem, a do ich pozycjonowania często używane są prasy. Są to kleje ekologiczne, nie zawierające rozpuszczalników organicznych. Kleje dyspersyjne nadają się szczególnie do klejenia materiałów porowatych. Służą do klejenia skóry, papieru, drewna i materiałów drewnopodobnych.

Kleje samoprzylepne – naniesione jako warstwa polimeru na nośnik elastyczny (tkanina, folia, papier) wykazują bardzo długą żywotność klejenia. W ciekłej formie są nanoszone przez walce na podłoże i poddawane promieniowaniu ultrafioletowemu. To doprowadza w ciągu kilku sekund do utwardzenia warstwy polimerowej.

Taśmy i folie klejące – w taśmach klejących klej naniesiony jest na nośnik elastyczny. Uaktywnienie kleju następuje przez doprowadzenie wody lub ciepła. Podstawą dla folii klejących są dwuskładnikowe kleje reaktywne. Są one nałożone na nośnik nieprzyczepny (antyadhezyjny). Przed użyciem nośnik (papier transferowy) jest usuwany, a folie klejące są umieszczane między materiałami klejonymi i utwardzane przez docisk i doprowadzenie ciepła [1,4].

8.7. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

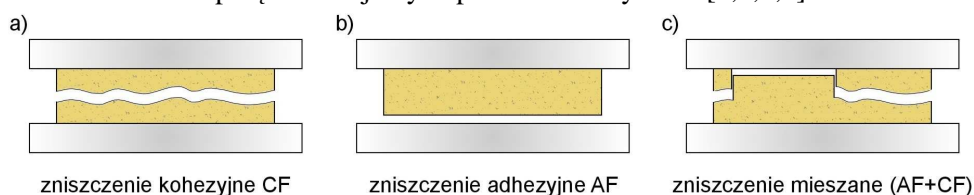
Istnieje wiele metod określania wytrzymałości mechanicznej połączeń klejowych. Podstawową próbą jest oznaczenie wytrzymałości na ścinanie. Do pozostałych metod oceny wytrzymałości złączy klejowych należą: statyczne próby wytrzymałości na odrywanie, oddzieranie oraz zginanie ze ścinaniem, próby niszczenia klinem, jak również metody badań właściwości zmęczeniowych klejów dla połączeń konstrukcyjnych przy ścinaniu przez rozciąganie próbek.

Prawidłowo zaprojektowane połączenia klejowe powinny przenosić głównie naprężenia styczne, czyli pracować na ścinanie w różnych postaciach konstrukcyjnych połączeń zakładkowych [1,2,4,12]. Z zależności opisującej rozkład naprężeń stycznych w spoinie klejowej połączenia zakładkowego wynika jednoznacznie,

że występuje w nim nierównomierny rozkład naprężeń stycznych, charakteryzujący się występowaniem maksymalnych naprężeń na brzegach spoiny [1,12]. Gdy przekroczą one wartość naprężeń niszczących spoina klejowa ulega zniszczeniu.

W celu poprawy wytrzymałości mechanicznej oraz wybranych właściwości połączeń klejowych należy zwiększyć zasięg i siłę oddziaływań adhezyjnych na granicy materiał łączony – klej, jak również oddziaływań kohezyjnych w kleju. Wytrzymałość zakładkowego połączenia klejowego nie zależy jednak jedynie od właściwości mechanicznych kleju, ale również od temperatury, wymiarów połączenia: szerokości, długości i grubości spoiny klejowej, grubości elementów klejonych ich modułu sprężystości wzdłużnej [12]. Nie jest ona natomiast proporcjonalna do długości zakładki, a więc i do pola powierzchni spoiny. Istnieje tzw. graniczna długość zakładki spoiny klejowej, której przekroczenie nie powoduje wzrostu wytrzymałości połączenia [12]. Niekorzystnym czynnikiem jest mimośrodowość działania obciążenia, powodująca zginanie elementów łączonych [12]. Zginanie to powoduje powstawanie naprężeń normalnych, które istotnie wpływają na stopień wyężenia spoin, stąd występuje zależność wytrzymałości połączeń od sztywności łączonych elementów [1,9,12].

Obok wytrzymałości na rozciąganie złączy klejowych należy również określić rodzaj zniszczenia (charakter złomu) dla każdej z badanych próbek. Rodzaje zniszczenia połączeń klejowych określone są w normie PN-EN ISO 10365:1998, a podstawowe z nich połączeń klejowych pokazano na rys. 8.9 [1,2,4,6].



Rys. 8.9. Podstawowe rodzaje zniszczeń połączeń klejowych [1,2,4,6]

8.8. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Omówienie obowiązujących warunków bezpiecznej pracy.
2. Zapoznanie się z kartą technologiczną i instrukcją prawidłowego użytkowania wybranych klejów.
3. Przygotowanie elementów łączonych do klejenia metodami mechanicznymi i chemicznymi.
4. Przygotowanie mieszaniny klejowej i wybór metody nanoszenia kleju.
5. Wykonanie połączeń klejowych.
6. Badania właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych, określenie charakteru zniszczeń złączy.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy podać:

- sposób przygotowania elementów łączonych do klejenia,

- sposób przygotowania i nanoszenia masy klejowej,
- sposób ustalania szczeliny klejowej,
- technologię klejenia,
- sposób utwardzania spoiny klejowej,
- parametry wykonywanych badań i prób wytrzymałościowych,
- ocenę charakteru zniszczenia wykonanych złączy klejowych,
- wnioski własne.

LITERATURA

- [1] Mirski Z., Piwowarczyk T., *Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości*. Przegląd Spawalnictwa, nr 8/2008.
- [2] Piwowarczyk T., *Zwiększanie oddziaływań adhezyjnych i kohezyjnych w połączeniach klejowych węglików spiekanych ze stalą C45*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2008.
- [3] Mirski Z., Piwowarczyk T., *Klejenie metali*, Przegląd Spawalnictwa, nr 6/2003.
- [4] Pilarczyk J., *Procesy spajania, Poradnik Inżyniera Spawalnika*, tom II, WNT, Mirski Z.: *Klejenie materiałów*, Warszawa 2005.
- [5] Grundmüller P., *Loctite Worldwide Design Handbook*, Wyd. Loctite Europa Group, München 1998.
- [6] Habenicht G., *Kleben. Leitfaden für die praktische Anwendung und Ausbildung*, Vieweg Verlag, Wiesbaden 1995.
- [7] Brandenburg A., *Kleben metallischer Werkstoffe*, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 144, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2001.
- [8] Żenkiewicz M., *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*, WNT, Warszawa 2000.
- [9] Kuczmazewski J., *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
- [10] Packham D. E., *Handbook of Adhesion*, Second Edition, John Wiley and Sons Ltd., West Sussex 2005.
- [11] Petrie E., M., *Handbook of adhesives and sealants*, McGraw-Hill, New York 2000.
- [12] Godzimirski J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, WNT, Fundacja „Książka Naukowo – Techniczna”, Warszawa 2002.
- [13] Nowacki J., Chudziński M., Zmitrowicz P., *Lutowanie w budowie maszyn*, WNT, Warszawa 2007.
- [14] Teroson – Henkel GmbH, *MS – Dichtstoffe von Teroson zum Dichten und Kleben*, Heidelberg 1995.

WYKAZ NORM

- PN-EN 923+A1:2008 *Kleje. Terminy i definicje*.
- PN-EN 14022:2010 *Kleje do połączeń konstrukcyjnych. Oznaczanie żywotności (czasu roboczego) klejów wieloskładnikowych*.
- PN-EN 13887:2005 *Kleje do połączeń konstrukcyjnych. Wytyczne przygotowania powierzchni metali i tworzyw sztucznych przed klejeniem*.
- PN-M-04250:1987 *Warstwa wierzchnia – Terminologia*.
- PN-EN ISO 10365:1998 *Kleje. Oznaczenie głównych wzorców zniszczenia połączeń klejowych*.

9. CIĘCIE TERMICZNE

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z:

- wybranymi urządzeniami do cięcia termicznego,
- przebiegiem cięcia,
- wynikami cięcia, czyli stanem i jakością krawędzi materiałów ciętych różnymi metodami.

9.1. WPROWADZENIE

Cięcie termiczne to rozdzielanie materiału za pomocą strumienia ciepła. W zależności od metody, proces rozdzielania jest albo skutkiem spalania w tlenie metalu w szczelinie cięcia i wydmuchnięcia tlenków, albo stopienia, ewentualnie odparowania metalu, a następnie usunięcia frakcji ciekłej i gazowej przez strumień gazu.

Wszystkie metale, poza szlachetnymi, relatywnie łatwo ulegają utlenianiu. Szczególnie szybko proces ten przebiega w obecności czystego tlenu i w podwyższonej temperaturze. Intensywne utlenianie, będące wynikiem reakcji egzotermicznej, czyli przebiegającej z wydzielaniem ciepła, to spalanie. Zjawisko to dotyczy szeregu metali i te można ciąć poprzez lokalne spalanie.

Aby cięcie przez spalanie, nazywane często cięciem tlenem, było możliwe, metal musi spełnić dwa warunki:

- temperatura zapłonu metalu w tlenie musi być niższa od jego temperatury topnienia,
- temperatura topnienia powstających tlenków musi być niższa od temperatury zapłonu.

Pożądanym jest, aby były spełnione dwa kolejne warunki:

- reakcja spalania powinna być silnie egzotermiczna,
- przewodność cieplna metalu powinna być jak najniższa.

Spośród wszystkich metali technicznych warunki te spełniają: żelazo, tytan i wolfram. Reakcja egzotermiczna spalania żelaza w tlenie daje ciepło ok. 270 kJ/mol, tytanu – aż 900 kJ/mol. Większość dodatków stopowych wprowadzanych do metali utrudnia cięcie, w przypadku stali od pewnego poziomu ich zawartości cięcie staje się niemożliwe. Utrudnienia te są głównie skutkiem wzrostu gęstości stopionego metalu i żużla, ograniczenia wymiany ciepła w materiale oraz spadku aktywności utleniania.

Jedynym typowym dodatkiem stopowym, który ułatwia cięcie stali przez lokalne spalanie, jest mangan, jego duża zawartość kompensuje niekorzystny wpływ innych dodatków stopowych. Nikiel nie ma zdecydowanie negatywnego wpływu aż do zawartości 35%, wolfram – do 15%. Maksymalna zawartość chromu i krzemu, przy której możliwe jest cięcie, to ok. 4%, Mo i V – ok. 5%, a węgla – do 1,6%. Bardziej

szczególne dane zestawiono w tab. 9.1. Negatywny wpływ dodatków ma charakter łączny, czyli w praktyce zawartość węgla musi być znacząco mniejsza od dopuszczalnej, gdyż w stalach zawsze występują inne dodatki stopowe. Sposobem na cięcie stali o nieco większej od granicznej zawartości dodatków stopowych jest wstępne podgrzanie (tab. 9.2). Do określania równoważnika węgla przy cięciu bywa stosowany wzór ogólny (9.1). Do obliczania temperatury wstępnego podgrzewania stali wykorzystywana jest bardziej dokładna zależność (9.2). Temperatura podgrzania określana jest wzorem (9.3).

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad [\%] \quad (9.1)$$

$$C_e = C + 0,155(Cr + Mo) + 0,14(Mn + V) + 0,11Si + 0,045(Ni + Cu) \quad [\%] \quad (9.2)$$

$$T_p = 500 \times [C_e \times (1 + 0,0002g) - 0,45]^{0,5} \quad [^\circ\text{C}] \quad (9.3)$$

gdzie: g – grubość materiału [mm].

Znaczący wpływ na wydajność cięcia ma także czystość tlenu stosowanego do cięcia. Jeśli przyjąć, że użycie tlenu o czystości 99,5% jest normą, to obniżenie czystości do 98,5% wymaga zwiększenia ciśnienia o 25%, wydatku gazu o 20%, a prędkość cięcia spada o 20%. Tlen o czystości 97,5% wymaga wzrostu ciśnienia i wydatku tlenu o 50%, a prędkość cięcia spada o połowę. Dane dotyczą stali o grubości ok. 30mm, dla większej grubości różnice są bardziej znaczące, a stali o grubości 300 mm i większej tlen o czystości 97,5% nie przecina w ogóle.

Tab. 9.1. Wpływ dodatków stopowych na możliwość cięcia stali przez lokalne spalanie

pierwiastek	zawartość [% wag.]	
	brak wpływu	utrudnia cięcie
węgiel	do 0,45	0,45 – 1,6
krzem	do 0,5	0,5 – 4,0
aluminium	do 0,5	0,5 – 10,0
molibden	do 2,0	2,0 – 5,0
chrom	do 2,0	2,0 – 4,0
wolfram	do 2,0	2,0 – 15,0
nikiel	do 15,0	15,0 – 35,0

Wielkości podane w tablicy 9.1. należy traktować orientacyjnie, źródła istotnie je różnicują, maksymalne zawartości w ostatniej kolumnie dotyczą zwykle możliwości cięcia po znacznym podgrzaniu.

Tab. 9.2. Zalecenia dotyczące obróbki cieplnej przy cięciu stali z różną zawartością składników stopowych

Zawartość składników stopowych C _e [% wag.]	Zalecenia
do 0,54	Bez ograniczeń
0,54 – 0,7*	Podgrzać wstępnie do 150 – 250 °C
0,7 – 0,94*	Podgrzać wstępnie do 250 – 350 °C, po cięciu powoli chłodzić
Ponad 0,94*	Podgrzać wstępnie powyżej 350 °C po cięciu chłodzić powoli z piecem
* brak podgrzania spowoduje zahartowanie SWC i ewentualne pęknięcia	

Gazy palne, stosowane do podgrzewania metalu przy cięciu przez spalanie, to zwykle acetylen lub propan, rzadziej wodór, gaz ziemny lub koksowniczy. W przypadku cięcia w bardzo niskich temperaturach otoczenia bywają stosowane paliwa płynne, np. benzyna. Acetylen zapewnia szybkie i silne nagrzanie materiału, przez co proces cięcia może rozpocząć się szybko, co zapewnia oszczędność gazu. Jest to szczególnie istotne w przypadku potrzeby dokonywania krótkich cięć (wielokrotnego rozpoczynania procesu). Propan korzystnie wpływa na jakość krawędzi cięcia, ale nagrzanie materiału do temperatury zapłonu wymaga niemal trzykrotnie więcej czasu w porównaniu z acetylenem, przez co ten gaz bywa używany do wykonywania długich cięć. Właściwości wymienionych gazów palnych zestawiono w tab. 9.3.

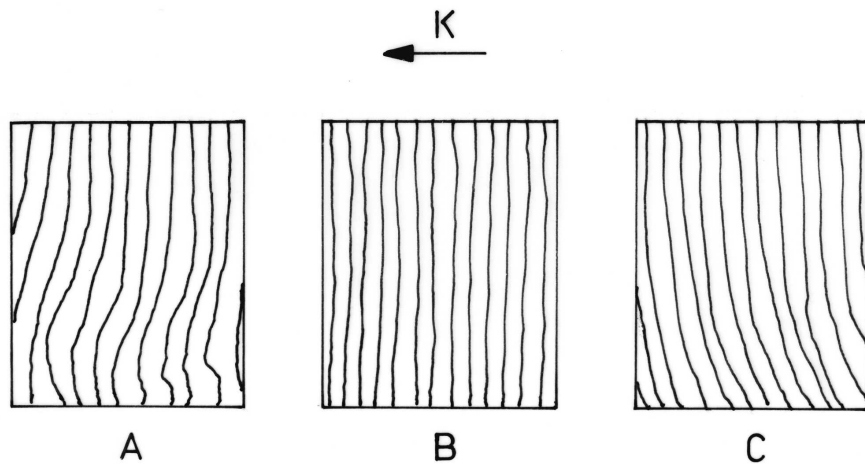
Tab. 10.3. Właściwości gazów palnych

Gaz	Temperatura płomienia ¹ [°C]	Ciepło spalania [kJ/m ³]	Wydatek tlenu	Współczynnik efektywności ²
acetylen	3350	53000	1,1	1
wodór	2100	11000	0,4	5,2
propan	2600	87000	3,6	0,6
gaz ziemny	2100	34000	1,0	1,6
gaz koksowniczy	2000	17000	0,6	3,0
Uwagi : 1 – podczas spalania w tlenie, 2 – czyli ilość gazu potrzebna do wykonania tego samego zadania w porównaniu do acetyleny, wszystkie wielkości przybliżone				

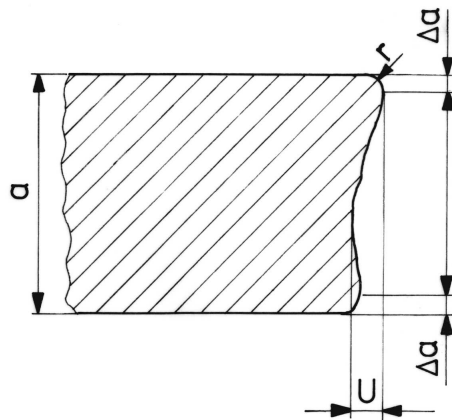
Cięcie termiczne powoduje charakterystyczne odchylenia rzeczywistego kształtu krawędzi ciętej od teoretycznego. Od strony, z której działa źródło ciepła, wzdłuż krawędzi pojawia się zaokrąglenie, a głębiej w materiale następuje stopniowe rozprężanie strumienia gazu, przez co szczelina się rozszerza. Linia cięcia jest także falista na swej długości. Na powierzchni cięcia pojawiają się charakterystyczne wżery, które są w przybliżeniu prostopadłe do krawędzi przy optymalnej prędkości cięcia, odchylają się w głębi materiału do tyłu przy zbyt szybkim cięciu, albo do przodu przy cięciu zbyt powolnym (rys. 9.1).

W celu określenia jakości powierzchni ciętej lub sprecyzowania wymagań wobec niej, stosuje się następujące wskaźniki (rys. 9.2):

- odchyłka prostopadłości i pochylenia „ U ”, czyli maksymalne odchylenie rzeczywistej krawędzi cięcia od teoretycznej, mierzone na grubości materiału
- średnia wysokość chropowatości R_z mierzona na pięciu odcinkach pomiarowych na długości linii cięcia,
- promień nadtopienia górnej krawędzi cięcia „ r ”,
- próg cięcia „ n ”, występujący wyraźnie przy nadmiernej prędkości cięcia,
- wżery na powierzchni cięcia.



Rys. 9.1. Wżery na powierzchni ciętego materiału; A – zbyt mała prędkość cięcia, B – prawidłowa prędkość cięcia, C - zbyt duża prędkość cięcia, K – kierunek cięcia



Rys. 9.2. Rzeczywista geometria krawędzi cięcia (przekrój poprzeczny do kierunku cięcia):
 a - grubość materiału, U – odchyłka prostopadłości, r – promień zaokrąglenia krawędzi, Δa – obszar przy powierzchniach pomijany w ocenie.

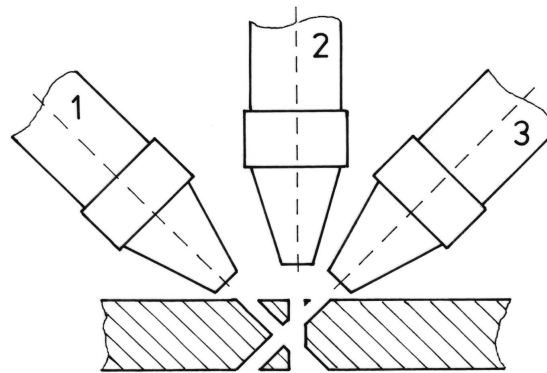
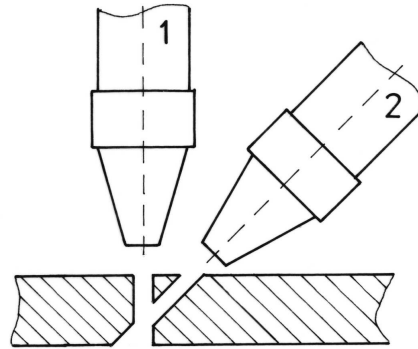
W normie PN-EN ISO 9013:2003 zostało pominięte zagadnienie falistości linii cięcia, czyli rozbieżności między teoretycznym, a praktycznym jej przebiegiem na długości cięcia, chociaż podano dwie klasy tolerancji wymiarów wycinanych elementów w odniesieniu do wymiarów nominalnych.

Z praktycznego punktu widzenia istotną rolę odgrywa także szerokość linii cięcia, gdyż w przypadku wycinania wielu elementów, np. z arkusza blachy, ich wzajemna odległość musi być co najmniej równa szerokości linii cięcia. Dla dużej liczby elementów o małych wymiarach może to być wielkość znacząca – przekraczająca istotnie 10% powierzchni materiału. Dlatego dąży się do stosowania technologii, w których szczelina cięcia jest jak najwęższa, a jakość obu krawędzi identyczna, co pozwala na zastosowanie wspólnej linii cięcia dla dwóch sąsiednich elementów na arkuszu.

Zwykle minimalna szerokość linii cięcia wynosi ok. 1,5 średnicy dyszy tlenu tnącego, jest znacznie większa przy cięciu plazmowym i mniejsza przy cięciu laserowym. Istnieją sposoby dalszego jej zmniejszenia, co zostanie omówione niżej.

Podczas cięcia pojawia się strefa wpływu ciepła (SWC), ale jej znaczenie jest mniejsze, niż podczas spawania, gdyż rozdzielanie materiału sprzyja uwolnieniu części naprężeń. Mimo tego przy cięciu precyzyjnym planuje się jego przebieg w taki sposób, aby naprężenia i odkształcenia skupiły się w tych częściach materiału, które stanowią odpady. Zmiany strukturalne w SWC mogą stanowić problem, gdyż w przypadku stali skłonnych do hartowania może nastąpić utwardzenie krawędzi cięcia, co utrudnia jej późniejszą obróbkę mechaniczną. Zmiany składu chemicznego materiału występują zwykle w jeszcze mniejszej objętości – na powierzchni cięcia, gdzie metal został nadtopiony. Mogą one obejmować częściowe wypalenie niektórych składników, oraz, w przypadku niektórych technologii cięcia, nasycenie innymi pierwiastkami – węglem z gazu palnego, azotem z gazu tnącego itd. Może to również prowadzić do utwardzenia materiału lub zmian jego właściwości korozyjnych. W SWC zdarzają się także mikropęknięcia, podobne do pęknięć hartowniczych, które mogą stać się ogniskami korozji oraz karbami, koncentrującymi naprężenia.

Ze względu na występowanie SWC oraz odchyłeń geometrycznych na krawędziach cięcia często zaleca się ich finalną obróbkę mechaniczną przez skrawanie lub szlifowanie. Operacje takie podnoszą koszt wykonania, ale nawet łączny koszt cięcia termicznego i wykańczającej obróbki mechanicznej jest niemal zawsze znacznie niższy od cięcia mechanicznego (które też nierzadko wymaga obróbki wykańczającej). W przypadku przygotowywania elementów do spawania zwykle nie przewiduje się obróbki mechanicznej po cięciu. Szczególnym przypadkiem jest ukosowanie do spawania. Gdy wymagane jest ukosowanie jednostronne, stosuje się często dwa palniki, gdy dwustronne – trzy (rys. 9.3). Przyjmuje się przy tym zasadę najmniejszej powierzchni pojedynczego cięcia, a więc najpierw dzieli materiał, a później odcina naroża (chyba, że dwustronne ukosowanie dotyczy dwóch elementów o wspólnej krawędzi cięcia). Połączenie cięcia i ukosowania ma przyczyny ekonomiczne – drugie cięcie odbywa się po podgrzaniu materiału przez pierwszy palnik tnący, a więc z mniejszym wydatkiem gazu palnego.



Rys. 9.3. Ukosowanie blach do spawania z użyciem dwu lub trzech głowic tnących;
1, 2, 3 – kolejność ustawienia głowic wzdłuż linii cięcia

9.2. ODMIANY CIĘCIA TERMICZNEGO

Cięcie termiczne ma wiele odmian, dzięki temu można wybrać optymalną metodę dla konkretnej aplikacji. Ogólna tendencja polega na zwiększaniu wydajności cięcia (prędkości i grubości rozdzielanego materiału) oraz dokładności (precyzji odwzorowania linii cięcia i geometrii krawędzi). Znaczącą rolę odgrywa aspekt ekonomiczny i tam, gdzie nie jest konieczna wysoka jakość, stosuje się metody najwydajniejsze, często nie najnowocześniejsze.

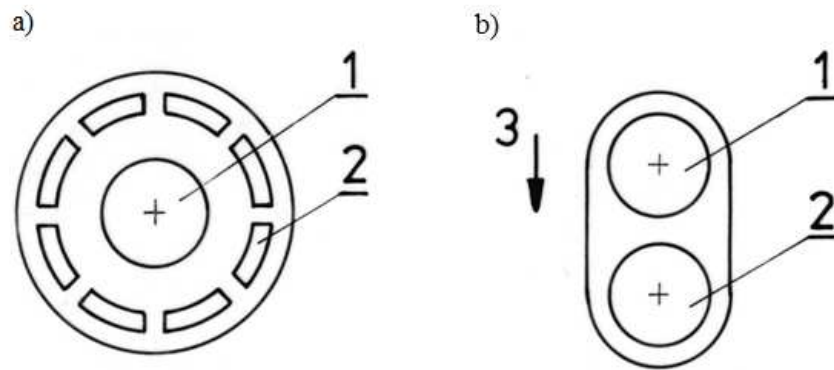
Metody cięcia termicznego można podzielić na dwie grupy:

1. Cięcie przez spalanie, które wymaga zastosowania w procesie strumienia czystego tlenu i jest ograniczone do metali, które spełniają określone warunki (patrz rozdz. 9.1). Ponieważ jednak obecnie ponad 80% konstrukcji metalowych wykonuje się ze stali, a spośród nich ok. 80% stanowią stale niestopowe, to zakres zastosowania cięcia tlenem obejmuje potencjalnie ponad połowę możliwych aplikacji. Wyróżnić tu można:
 - a) cięcie tlenem,
 - b) cięcie tlenowo – proszkowe,

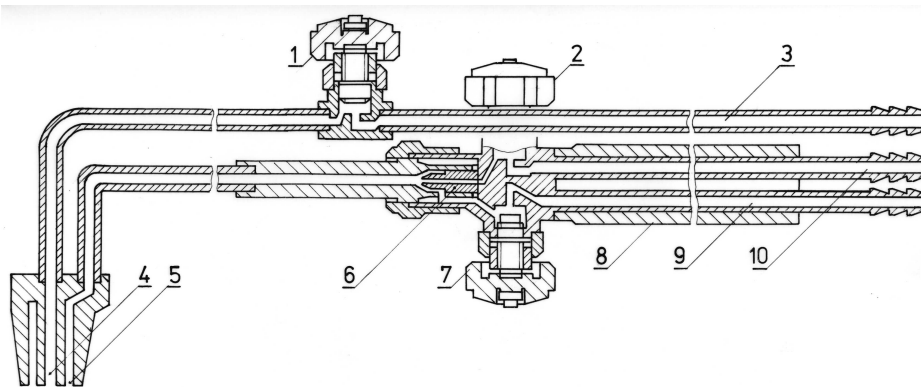
- c) cięcie lancą,
 - d) cięcie łukowe,
 - e) cięcie elementów grubościennych,
 - f) cięcie o podwyższonej wydajności.
2. Cięcie przez topienie, stosowane w przypadku metali, które nie spełniają wymagań umożliwiających cięcie tlenem. Wówczas zamiast spalania metalu w tlenie należy go podgrzać do temperatury topnienia lub odparować i usunąć stopiony metal oraz jego pary ze szczeliny cięcia. Konieczna jest do tego nadzwyczaj wysoka koncentracja ciepła, niemożliwa do osiągnięcia przy zastosowaniu klasycznych palników, spalających mieszanki gazowe. Do tej grupy zaliczyć można:
- a) cięcie plazmowe,
 - b) cięcie laserowe,
 - c) drążenie wiązką elektronów.

9.2.1. CIĘCIE TLENEM

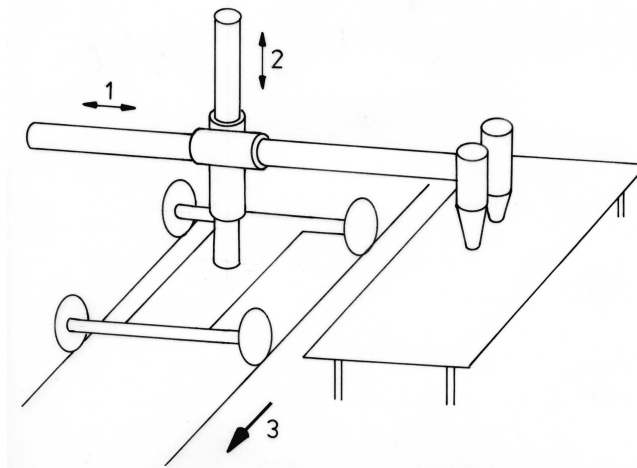
Do cięcia tlenem stosuje się zarówno palniki koncentryczne, jak i posobne (tandemowe) – rys. 9.4. Te pierwsze są stosowane zwykle do cięcia ręcznego oraz kształtowego, te drugie do cięcia zmechanizowanego, prostoliniowego. Jako gaz podgrzewający do cięcia ręcznego najczęściej stosuje się acetylen, do cięcia zmechanizowanego – propan. Korzystny wpływ na jakość cięcia ma optymalnie dobrana i niezmienna odległość wylotu dyszy palnika od powierzchni ciętego materiału. Dlatego palniki ręczne (rys. 9.5) często zaopatruje się w proste rolki prowadzące. Innym czynnikiem, korzystnie wpływającym na jakość cięcia, jest utrzymywanie stałej, optymalnej prędkości palnika. Dlatego zastosowanie cięcia zmechanizowanego (rys. 9.6), w którym można precyzyjnie ustalić zarówno odległość dyszy od materiału, jak i prędkość posuwu, prowadzi do znacznego wzrostu jakości krawędzi ciętej, np. dokładność odwzorowania, w porównaniu z cięciem ręcznym, zwiększa się nawet ponad dziesięciokrotnie. Dalszy wzrost jakości uzyskuje się po zastosowaniu precyzyjnych układów sterowania głowicą w dwóch, a nawet trzech osiach. Do sterowania dwuosiowego były stosowane początkowo układy nadążne z metalowymi wzorcami i rolkami magnetycznymi (rys. 9.7), później układy optyczne, śledzące kontrastowe linie specjalnych rysunków. Obecnie powszechnie stosuje się metody programowania cyfrowego, umożliwiające także zmianę prędkości ruchu palnika podczas cięcia. Zastosowanie termicznych i optycznych czujników umożliwia kontrolę procesu cięcia w czasie rzeczywistym. Tak wyposażone stanowiska do cięcia tlenem umożliwiają uzyskiwanie jakości i dokładności wykonania porównywalnej z cięciem plazmowym.



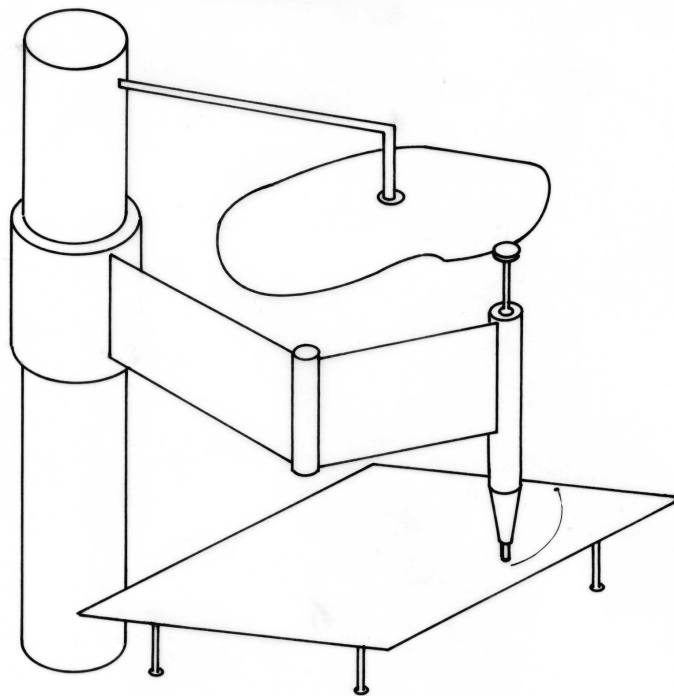
Rys. 9.4. Widok od czoła na głowice Wissa (a) i Jottranda (b); 1 – dysza tlenu tnącego, 2 – dysza mieszanki podgrzewającej, 3 – kierunek cięcia palnikiem z głowicą b



Rys. 9.5. Ręczny palnik do cięcia płomieniowego; 1 – zawór tlenu tnącego, 2 – zawór tlenu mieszanki podgrzewającej (widok), 3 – doprowadzenie tlenu tnącego, 4 – dysza tlenu tnącego, 5 – dysza mieszanki podgrzewającej, 6 – inżektor, 7 – zawór acetylenu, 8 – rękojeść, 9 – doprowadzenie acetylenu, 10 – doprowadzenie tlenu mieszanki podgrzewającej



Rys. 9.6. Zmechanizowana głowica do cięcia płomieniowego z palnikiem posobnym; 1,2 – ruchy dostawcze, 3 – kierunek cięcia



Rys. 9.7. Palnik do cięcia z kopiałem rolkowym (rolką magnetyczną)

9.2.2. CIĘCIE TLENOWO-PROSZKOWE

Pierwszym sposobem na zwiększenie wydajności cięcia stali o większej zawartości składników stopowych stało się zastosowanie dodatkowo proszku czystego żelaza, wdmuchiwanego przez specjalną dyszę do strefy cięcia. Metodę zastosowano po raz pierwszy w USA w 1944 r. Żelazo spalające się w tlenie wytwarza dodatkowe ciepło oraz zwiększa nieco rzadkość żuźla. Zamiast proszku do strefy cięcia może być także podawany cienki drut żelazny.

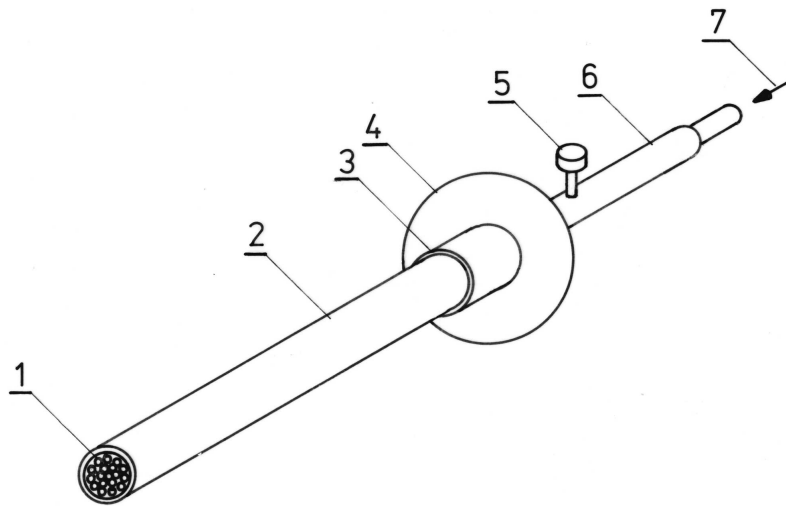
Odmianą cięcia tlenowo-proszkowego jest cięcie z zastosowaniem sproszkowanych topników. Zwykle są one mieszane z proszkiem żelaznym, a ich zadaniem jest wiązanie składników stopowych ciętej stali (głównie chromu) w związku o niższej temperaturze topnienia niż proste tlenki.

Dzięki zastosowaniu proszku żelaznego można zwiększyć wydajność cięcia oraz ciąć stale o nieco większej zawartości składników stopowych. Zastosowanie topników pozwala jeszcze bardziej przesunąć granicę dopuszczalnej zawartości niektórych pierwiastków w stali przeznaczonej do cięcia.

9.2.3. CIĘCIE LANCĄ

W sytuacjach, gdy nie jest wymagana duża dokładność cięcia elementów wielkowymiarowych i grubościennych można stosować lance tlenowe, których koncepcja została opatentowana w USA w 1922 r. Lanca, to cienkościenna rurka ze stali niskowęglowej, zwykle o średnicy od 15 do 30 mm i długości ok. 3 m,

mocowana w uchwycie z tarczą ochronną. Wewnątrz rurki znajdują się pręty żelazne o średnicy 3-4 mm, zajmujące najczęściej ok. 60% jej przekroju (rys. 9.8). Aby rozpocząć cięcie, koniec lancy nagrzewa się za pomocą palnika acetylenowo-tlenowego do temperatury białego żaru, a następnie od strony uchwytu przepuszcza strumień tlenu pod ciśnieniem 0,6-1,4 MPa. Następuje wtedy zapłon rozgrzanego żelaza w tlenie, palnik podgrzewający zostaje wyłączony i proces spalania odbywa się wyłącznie za sprawą silnej reakcji egzotermicznej. Lancą można ciąć nie tylko metale z żeliwem włącznie, ale i materiały niemetalowe, np. skały. Ogromnie efektywne jest użycie lanc do cięcia zbrojonego betonu, np. po katastrofach budowlanych.



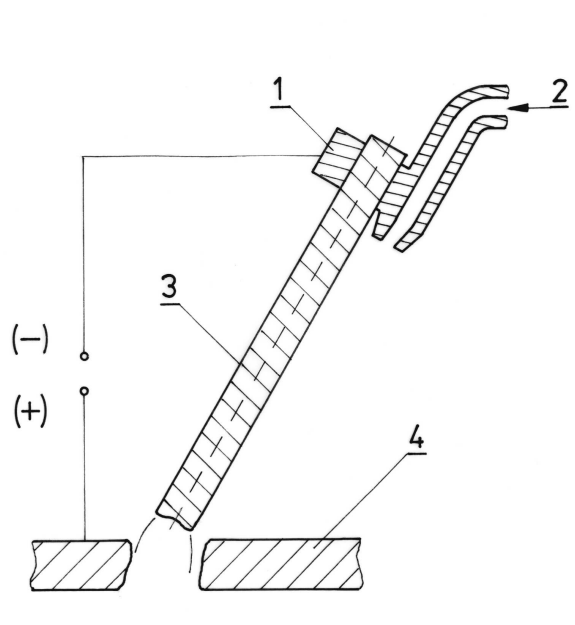
Rys. 9.8. Lanca tlenowa; 1 – pręty żelazne, 2 – rurka stalowa, 3 – zacisk do mocowania rurki, 4 – tarcza ochronna, 5 – zawór tlenu, 6 – rękojeść, 7 – tlen z butli

Dla zwiększenia wydajności stosuje się czasem lance wypełnione prętami tytanowymi. Odmianą lancy tlenowej jest rurka stalowa, do której jest podawany strumień proszku żelaznego i tlenu. Stapianie lancy jest wtedy wolniejsze. Czasami stosuje się w takim procesie mieszaninę proszku żelaznego i aluminium.

9.2.4. CIĘCIE ŁUKOWE

Łuk elektryczny wytwarza znaczne ilości ciepła i pozwala na utrzymanie temperatury przekraczającej 6000 °C, czyli dwukrotnie większej niż płomień acetylenowo-tlenowy. Ciśnienie łuku może także przyczyniać się do usuwania stopionego materiału ze szczeliny cięcia. W praktyce jest jednak konieczne dodatkowe oddziaływanie medium gazowego na stopiony metal i żużel.

Najprostszym sposobem wykorzystania ciepła łuku do cięcia jest zastosowanie specjalnych elektrod otulonych, w których otulinie znajduje się dużo składników gazotwórczych. Jest to metoda ręczna, niedokładna, mało wydajna i tworząca bardzo szeroką szczelinę cięcia.



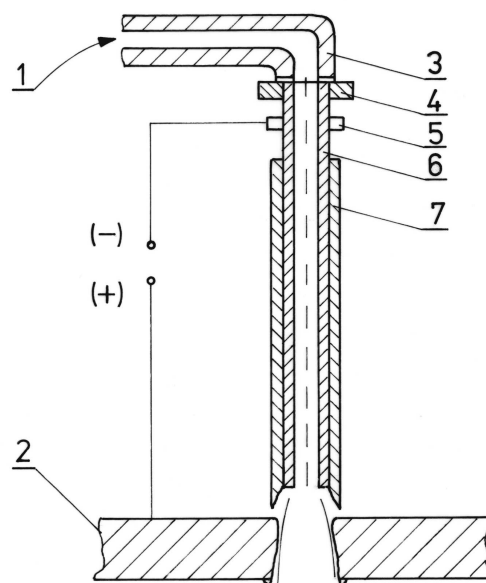
Rys. 9.9. Przebieg cięcia łukowo-powietrznego; 1 – uchwyt elektrody, 2 – doprowadzenie sprężonego powietrza, 3 – elektroda grafitowa, 4 – cięty materiał

Lepsze wyniki daje zastosowanie litej elektrody grafitowej o średnicy od 3 do 20 mm, umieszczonej w specjalnym uchwycie do którego jest doprowadzone powietrze pod ciśnieniem 0,5-0,7 MPa. Dysza znajduje się w uchwycie pod elektrodą (rys. 9.9). Dla zwiększenia trwałości elektrod pokrywa się je często cienką warstwą miedzi. Taka metoda jest nazywana cięciem łukowo-powietrznym.

Jeszcze lepsze wyniki daje zastosowanie elektrod rurkowych, przez które przepuszcza się tlen (cięcie łukowo-tlenowe, zastosowane po raz pierwszy przez Colemana w 1900 r.). Początkowo były to rurki grafitowe, ale z racji ich wielkiej łamliwości zastąpiono je rurkowymi, stalowymi elektrodami otulonymi (rys. 9.10). Zwykle stosuje się otulinę rutyłową (patrz rozdz. 2. Spawanie elektrodami otulonymi). Średnica elektrod wynosi od 5 do 8 mm, a najmniejsza średnica kanału tlenowego – 1,6 mm. Stosuje się je do cięcia stali o grubości nie przekraczającej 75 mm i metali kolorowych – do 15 mm.

Rzadko stosowaną w praktyce technologią jest cięcie metodą GTA (inaczej TIG, patrz rozdz. 3. Spawanie w osłonach gazowych). W porównaniu ze spawaniem stosuje się większe natężenia przepływu gazu ochronnego i dysze o zmodyfikowanej geometrii.

Procesy łukowe z użyciem elektrody grafitowej są często stosowane do złobienia, czyli wykonywania w materiale rowków o głębokości od kilku do kilkudziesięciu mm. Jest to często praktykowane w celu usuwania wad powierzchniowych odlewów oraz niezgodności spawalniczych (brak przetopu grani, podtopienie lica itd.). W takim przypadku elektrody są ustawiane nad materiałem nie pionowo, jak do cięcia, a pod kątem ok. 35°.



Rys. 9.10. Przebieg cięcia łukowo-tlenowego; 1 – tlen tnący, 2 – cięty materiał, 3 – uchwyt, 4 – zacisk mocujący z uszczelką, 5 – styk prądowy, 6 – rdzeń elektrody (rurka stalowa), 7 – otulina

9.2.5. CIĘCIE ELEMENTÓW GRUBOŚCIENNYCH

Możliwość cięcia elementów grubościennych (dla stali – ponad 300 mm) to szczególny atut cięcia termicznego i jedyna praktyczna możliwość cięcia elementów o grubości ponad 500 mm. Na dodatek wydajność cięcia niewiele ustępuje wielkościom osiąganym dla materiałów o mniejszej grubości, a relacja między szerokością szczeliny i grubością ciętego materiału jest tym bardziej korzystna, im jest on grubszy.

Cięcie elementów grubościennych wymaga specjalnego podejścia, np. ze wzrostem grubości stali obniża się ciśnienie tlenu (tab. 9.4). Pod przedmiotem musi być wolna przestrzeń dla nieograniczonego wyrzutu żużla równa co najmniej 60% grubości cięcia. Przy cięciu stali o grubości ponad 1000 mm stosuje się drugą dyszę gazu podgrzewającego, przemieszczającą się za dyszą tnącą, przy grubości materiału ponad 2000 mm przechodzi przez nią nawet 65% gazu palnego. Ze względu na wielkie ilości wydzielanego ciepła konieczna jest lepsza ochrona elementów konstrukcji palnika, znacząco zwiększa się np. z tego powodu odległość między dyszą tnącą a materiałem.

Tab. 9.4. Przykładowe parametry cięcia elementów grubościennych ze stali niestopowych

Grubość	mm	300	2500
Ciśnienie tlenu	MPa	0,3	0,09
Wydatek tlenu	m ³ /h	30	500
Wydatek propanu	m ³ /h	3	80
Prędkość cięcia	m/h	9	0,9
Odległość dyszy	mm	30	100

9.2.6. CIĘCIE O PODWYŻSZONEJ WYDAJNOŚCI

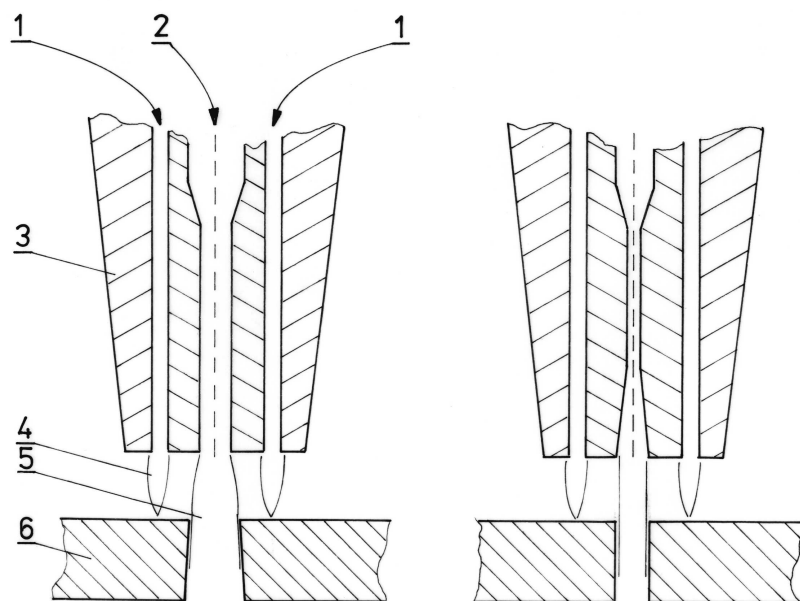
Zwiększenie wydajności cięcia służy przede wszystkim poprawie wskaźników ekonomicznych, często pod tym pojęciem rozumie się łączne nakłady na przygotowanie elementu, a więc cięcie o podwyższonej dokładności, dzięki któremu nie ma konieczności końcowej obróbki mechanicznej krawędzi, również znacząco zwiększa wydajność procesu.

Oczywistymi sposobami podwyższenia wydajności jest zwiększanie koncentracji ciepła na materiale ciętym, ale znaczące wyniki w tym obszarze zapewniło dopiero stosowanie metod cięcia przez topienie. W przypadku cięcia przez spalanie można zwiększyć wydajność zmniejszając szerokość szczeliny cięcia. Uzyskuje się to stosując tzw. dysze stożkowe o specjalnej geometrii (rys. 9.11) oraz zwiększając ciśnienie tlenu ponad 0,7 MPa. Przykładowo cięcie tym sposobem płyty stalowej o grubości 100 mm tlenem pod ciśnieniem 4,2 MPa zapewnia prędkość ponad 15 m/h i szerokość szczeliny cięcia 2,1 mm.

Spore efekty daje zastosowanie dysz z wymuszonym zawirowaniem tlenu tnącego. Otóż stwierdzono, że w procesie spalania metalu uczestniczy tylko wierzchnia warstwa strumienia tlenu i znaczna część tego gazu przechodzi na drugą stronę materiału w stanie niezmienionym. Po zawirowaniu wykorzystanie tlenu rośnie nawet o 50%. Także zastąpienie pojedynczej dyszy tnącej dwiema, z których druga jest przesunięta o ok. 10 mm do tyłu i ok. 1 mm w bok, zwiększa wydajność cięcia przy nie zmienionym wydatku tlenu i minimalnie szerszej szczelinie cięcia.

W przypadku cięcia blach cienkich celowe jest zastosowanie palników posobnych, w których dysza tlenowa znajduje się bliżej materiału, niż dysza mieszanki podgrzewającej. Maleje przez to nieco przegrzanie materiału i skłonność do rozlewania się żuźla po jego spodniej powierzchni. W układach trzydyszowych jest stosowana druga dysza tlenowa, która służy do oczyszczania powierzchni szczeliny cięcia.

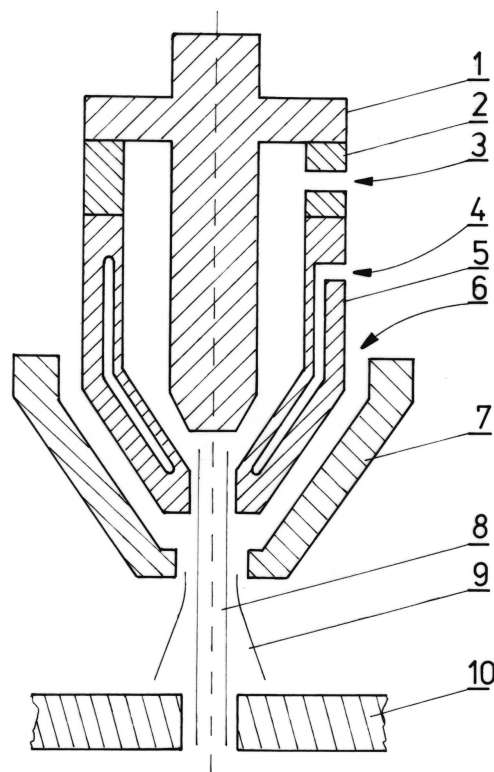
Doskonałe efekty zapewnia pakietowanie blach cienkich, dzięki czemu równocześnie wycina się kilka identycznych elementów. Łączna grubość pakietów nie przekracza zwykle 60 mm, a grubość pojedynczych blach – 12 mm. Zaletą takiego rozwiązania jest tworzenie zaokrąglonej krawędzi cięcia tylko na najwyższej blasze. Aby i tego uniknąć stosuje się technologię „cięcia pakietowego z blachą złomową”. Górna blacha jest w niej przeznaczona na złom i bywa, że jest to rzeczywiście materiał wcześniej wybrakowany. Zastosowanie takiej wierzchniej blachy ze stali niskowęglowej umożliwia także cięcie pakietu blach stopowych, wierzchnia blacha działa wtedy jak proszek czy drut żelazny stosowane w opisanych wyżej metodach.



Rys. 9.11. Schemat głowicy do cięcia z dyszą klasyczną (z lewej) i stożkową (z prawej);
 1 – mieszanka palna, 2 – tlen tnący, 3 – korpus dyszy, 4 – płomień podgrzewający,
 5 – strumień tlenu tnącego, 6 – materiał cięty

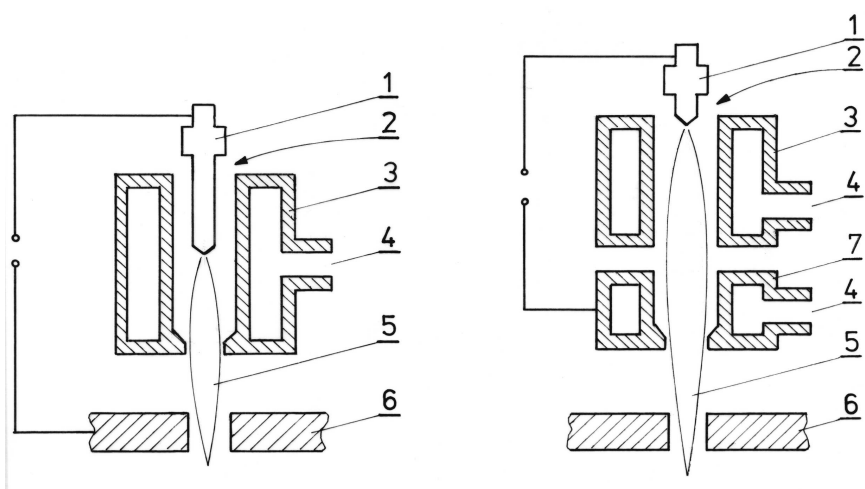
9.2.7. CIĘCIE PLAZMOWE

W przypadku cięcia plazmowego źródłem ciepła oddziaływującego na materiał jest kontrolowany strumień plazmy. Plazma, to częściowo lub całkowicie zjonizowany gaz. Stan ten bywa osiągany w wysokiej temperaturze, wynoszącej w przypadku częściowej jonizacji kilkanaście do kilkudziesięciu tysięcy °C. Taką temperaturę osiąga się oddziałując na gaz ciepłem łuku elektrycznego, a jednocześnie gwałtownie sprężając go np. w dyszy o odpowiedniej geometrii. Plazma dla potrzeb cięcia jest generowana w specjalnych głowicach (rys. 9.12), które konstrukcyjnie bardzo przypominają głowice do spawania metodą GTA (patrz rozdz. 3). Zasadnicza różnica, to konstrukcja dyszy gazowej, która dla potrzeb tworzenia plazmy musi powodować gwałtowny wzrost ciśnienia przepływającego gazu. Dysza bardzo silnie się nagrzewa, toteż wykonuje się ją z miedzi jako konstrukcję masywną, chłodzoną przez wbudowany obieg wodny. Klasyczne elektrody (dla gazów obojętnych) są wykonywane najczęściej z wolframu z dodatkiem toru lub lantanu i mają trwałość do 20 h pracy. Ich średnica wynosi 2-5 mm, a średnica otworu dyszy od 1,2 do 7 mm. Cięcie prowadzi się prądem stałym o normalnej polaryzacji (minus na elektrodzie, dzięki czemu wydziela się na niej tylko 30% ciepła łuku). Napięcie łuku wynosi 50–200 V, natężenie 1000 A i więcej. Przepływ gazu plazmotwórczego może być znaczący i wynosić nawet ponad 100 dm³/min. Podczas cięcia, w celu optymalizacji przebiegu procesu, zmieniane bywają trzy parametry: natężenie prądu, prędkość ruchu głowicy oraz odległość wylotu dyszy od materiału.



Rys. 9.12. Schemat głowicy do cięcia plazmą z dodatkową osłoną gazową; 1 – katoda, 2 – pierścień izolujący, 3 – gaz plazmotwórczy, 4 – medium chłodzące, 5 – metalowa dysza plazmowa, 6 – gaz ochronny, 7 – ceramiczna dysza gazu ochronnego, 8 – strumień plazmy, 9 – gaz ochronny, 10 – materiał cięty

Istnieją dwie podstawowe odmiany cięcia plazmowego: łukiem zależnym, który jarzy się między elektrodą, a ciętym materiałem oraz łukiem niezależnym, nazywanym też wewnętrznym, jarzącym się między elektrodą, a dyszą (rys. 9.13). Pierwsza z odmian jest znacznie popularniejsza, gdyż zapewnia dodatkowe podgrzewanie materiału ciętego ciepłem łuku. Ciąć można w ten sposób tylko materiały przewodzące prąd. Łuk niezależny jest stosowany do cięcia materiałów nieprzewodzących, a czasem także do precyzyjnego cięcia materiałów metalicznych o małej grubości. Wadą tej metody jest przyspieszone zużycie dysz. Łuk wewnętrzny jest też często stosowany podczas rozpoczynania procesu cięcia łukiem zależnym i służy do wstępnej jonizacji gazu plazmotwórczego. Do jego krótkotrwałego zajarzenia służą specjalne bloki zasilacza, nazywane jonizatorami.



Rys. 9.13. Schemat głowicy z łukiem zależnym (z lewej) i niezależnym (z prawej); 1 – katoda, 2 – gaz plazmotwórczy, 3 – dysza, 4 – medium chłodzące, 5 – strumień plazmy, 6 – cięty materiał, 7 – anoda

Wyższa temperatura procesu cięcia, niż w przypadku cięcia płomieniowego i łukowego, umożliwia topienie i odparowanie praktycznie wszystkich metali technicznych, a strumień gazu o wysokim ciśnieniu i dużej prędkości przepływu ułatwia usuwanie stopionego metalu ze szczeliny cięcia. Także koncentracja ciepła jest wysoka, wynosi od 10^7 do 10^8 W/cm² dla łuku wewnętrznego i 10^8 – 10^9 W/cm² dla łuku zewnętrznego.

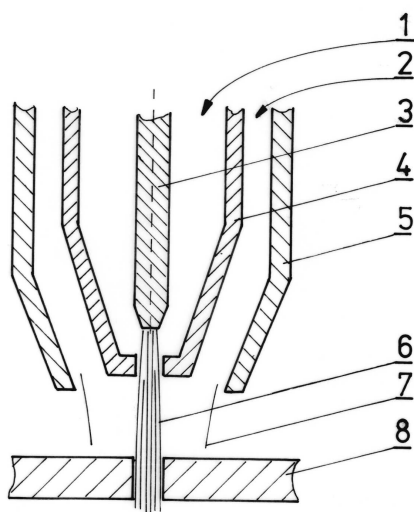
W porównaniu z cięciem tlenowym, cięcie plazmowe powoduje powstanie szerszej szczeliny, natomiast SWC jest zwykle węższa. Dodatkowy problem stwarza hałas przekraczający 110 dB, powodowany przez osiagający prędkość naddźwiękową strumień gazu. Oznacza to konieczność otaczania stanowisk do cięcia plazmowego ekranami akustycznymi. Korzystne jest zastosowanie głowic z dodatkową zewnętrzną koncentryczną dyszą, doprowadzającą strumień wody, pełniący funkcję kurtyny (rys. 9.14). Zawęża ona strumień gazu ochronnego, chłodzi materiał rodzimy i obniża poziom hałasu do 95 dB. Znaczne obniżenie poziomu hałasu, do mniej niż 75 dB, można uzyskać prowadząc cięcie plazmowe pod wodą, w specjalnie skonstruowanych basenach. Rozwiązuje to także inny problem, a mianowicie intensywnego pylenia, towarzyszącego cięciu plazmowemu. Pyły – to ziarenka stopionego i powtórnie zestalonego metalu, często częściowo lub całkowicie utlenione. W przypadku cięcia pod wodą są one zatrzymywane i tworzą zawiesinę, a następnie osad, który musi być systematycznie usuwany ze zbiornika. Zastosowanie kurtyny wodnej lub cięcia pod wodą radykalnie rozwiązuje problem intensywnej emisji promieniowania ultrafioletowego, które może być groźne dla pracowników obsługi.

Gazy plazmotwórcze to: argon, azot, wodór i, coraz częściej, powietrze. Powietrze jest najtańszym z nich, a zawarty w nim tlen częściowo spala podgrzany metal, zwiększając wydajność procesu. Powietrze powoduje jednak przyspieszone zużycie elektrod i dysz. Argon stosuje się do cięcia stali stopowych, stopów aluminium

i miedzi, azot – do cięcia cienkich blach, powietrze – do stali niestopowych, dodatek tlenu korzystnie wpływa na jakość krawędzi cięcia.

W przypadku zastosowania gazów aktywnych konieczne jest zastąpienie katod wolframowych z dodatkiem toru i lantanu elektrodami cyrkonowymi lub hafnowymi. Ich trwałość pozostaje jednak niewielka, rzędu 5 h pracy.

Zwiększenie efektywności cięcia plazmowego osiągnięto dzięki zastosowaniu w latach 90-tych ubiegłego wieku mieszanek bogatych w tlen i skonstruowaniu dysz, zapewniających stworzenie zawirowanego strumienia gazu, podobnie jak przy cięciu płomieniowym. Do zawirowania strumienia służy dysza o specjalnej konstrukcji (metoda hydefinition) lub pole magnetyczne (fineplasma).



Rys. 9.14. Schemat głowicy do cięcia plazmowego z kurtyną wodną. 1- gaz plazmotwórczy, 2 – woda, 3 – katoda, 4 -metalowa dysza gazowa, 5 – ceramiczna dysza wodna, 6 – strumień plazmy, 7 – pierścieniowy strumień wody, 8 – cięty materiał

9.2.8. CIĘCIE LASEROWE

Lasery (rys. 9.15) służą do generowania koherentnej wiązki światła, dzięki wzbudzeniu określonego medium (ciała stałego, gazu) za pomocą doprowadzonej z zewnątrz energii. Najistotniejszą cechą lasera jest możliwość koncentrowania energii na bardzo niewielkiej powierzchni, nawet do gęstości 10^{10} W/cm². Największą wadą jest natomiast nadzwyczaj niekorzystna relacja między mocą, niezbędną do zasilania urządzenia, a mocą generowaną – początkowo nie przekraczała ona 1 procenta!

W zależności od przeznaczenia w technice stosuje się różnorodne lasery, ich konstrukcja i specyfika są następujące:

1. Lasery rubinowe – ośrodek czynny, to rubin. Wzbudzony, generuje wiązkę o długości fali 0,6943 μ m. Lasery te mają małą sprawność i niewielką moc.
2. Lasery neodymowe Nd:YAG – ośrodkiem czynnym jest granat itrowo-aluminiowy z domieszką neodymu. Emituje promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni. Granat ma niski próg wzbudzenia, co ułatwia ciągłą

emisję promieniowania. Lasery tego typu mają sprawność do 2%. Dopiero domieszkowanie granatu holmem powoduje wzrost sprawności do 5%.

3. Lasery neodymowe Nd-glass, w których ośrodkiem czynnym są pręty ze szkła optycznego z domieszką Nd_2O_3 . Emitują wiązkę o takiej samej długości jak Nd-YAG. Ośrodek czynny jest tańszy i łatwiej wykonywać z niego elementy o dużych wymiarach. Zasadnicza wada, to małe przewodnictwo cieplne pręta i konieczność jego intensywnego chłodzenia.
4. Lasery diodowe – HDPL wykorzystują zjawisko emisji promieniowania przez diody świecące, głównie z GaAs domieszkowanego Al, In lub P, emitujące fale długości 900-990 nm. Dioda emituje światło o mocy kilku mW - łączy się je w pręty, a te w pakiety. Moc laserów HDPL nie przekracza 4 kW, ale ich sprawność jest rekordowo wysoka – do 50%. Lasery tego typu umożliwiają obecnie tworzenie ognisk o gęstości mocy mniejszej niż 10^5 W/cm^2 i praktycznie nie nadają się do cięcia termicznego.
5. Lasery pompowane diodowo – lasery Nd:YAG pompowane laserami diodowymi. Daje to wzrost sprawności energetycznej nawet o 35%. Wszystkie wyżej wymienione typy laserów mogą używać światłowodów (nawet o długości 100 m) do przekazywania wiązki od generatora do głowicy.
6. Lasery CO_2 (molekularne) wykorzystują jako ośrodek czynny mieszanek $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ w proporcjach 3:3:20, pod ciśnieniem kilku do kilkudziesięciu kPa (lasery małej mocy) lub do 5 MPa (lasery dużej mocy), przepływającą przez rurę wyładowczą. Emitowane promieniowanie mieści się w zakresie średniej podczerwieni z dominującą linią fali $10 \mu\text{m}$. Sprawność energetyczna dochodzi do 14%. Produkowane są lasery:
 - z podłużnym przepływem medium – gaz jest chłodzony na zewnątrz rury wyładowczej, co pozwala na osiągnięcie mocy do 7 kW,
 - z przepływem poprzecznym o dużym natężeniu. Gdy ciśnienie wynosi kilka MPa, a elektrody są zabezpieczone przed wyładowaniem łukowym, osiągalna jest moc do 45 kW,
 - bezprzepływowe – SLAB. Wyładowanie zachodzi w szczelinie między dwiema płaskimi elektrodami, ośrodek jest wzbudzany przez generator wysokiej częstotliwości. Osiągają moc do 5 kW, ale wyróżniają się małymi wymiarami i minimalnym zużyciem medium czynnego – jedna butla wystarcza na rok pracy.

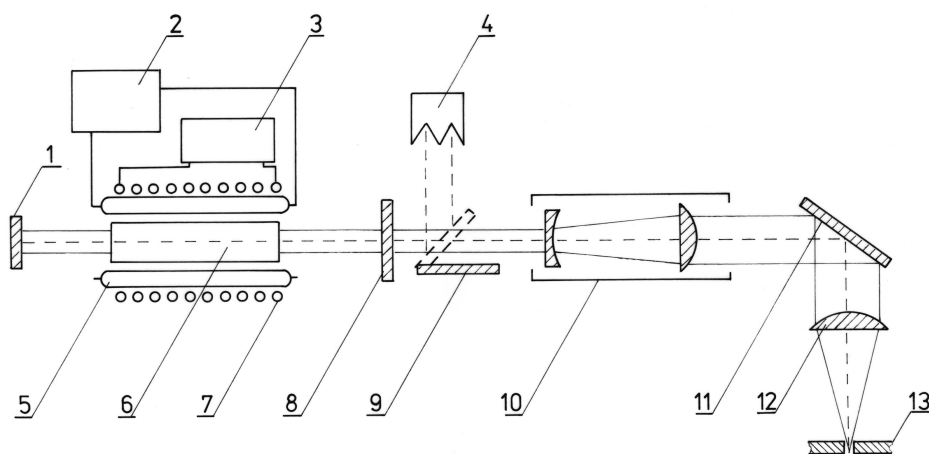
7. Lasery ekscymerowe, działają i są skonstruowane podobnie do laserów CO_2 , lecz ośrodkiem aktywnym jest mieszanka gazów $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He} + \text{O}_2 + \text{CO} + \text{Xe}$.

Istnieją trzy typy konstrukcji układu optycznego: nieruchoma głowica sprzężona mechanicznie z laserem i ruchomy stół z przedmiotem obrabianym, głowica z laserem umieszczona na ruchomym ramieniu i nieruchomy stół oraz nieruchomy laser i stół, a ruchoma głowica (tzw. latająca optyka). Ostatnie z tych rozwiązań jest stosowane najczęściej.

W przypadku cięcia laserowego znajdują zastosowanie trzy mechanizmy cięcia. Przy największej koncentracji energii proces odbywa się przez odparowanie materiału,

przy mniejszej gęstości następuje cięcie przez topienie i wydmuchiwanie stopionego metalu strumieniem gazu. Do metali spełniających warunki cięcia termicznego tlenem (głównie stale niskostopowe) stosuje się cięcie przez wypalanie, w którym metal wzdłuż linii cięcia jest spalany w strumieniu czystego tlenu. Dodatkowym medium w pierwszej metodzie jest gaz obojętny (argon, azot), w drugiej azot lub powietrze, w trzeciej tlen o dużej czystości.

Cięcie przez odparowanie jest stosunkowo mało wydajne, cięcie przez topienie zapewnia większą wydajność, ale jest mniej dokładne. Największe prędkości cięcia, bo nawet trzykrotnie większe, niż przy cięciu przez topienie, osiąga się przy cięciu przez wypalanie, ale linia cięcia jest szersza i występuje ryzyko utlenienia krawędzi ciętego materiału. Do wykonywania otworów stosuje się najczęściej lasery z generatorem stałym (rubinowe), a ostatnio lasery ekscymerowe.



Rys. 9.15. Schemat precyzyjnego cięcia laserowego; 1 – zwierciadło tylne, 2 – zasilacz, 3 – pompa medium chłodzącego 4 – układ tłumienia wiązki, 5 – lampa pompująca, 6 – pręt laserowy, 7 – układ chłodzenia, 8 – zwierciadło przednie (półprzepuszczalne), 9 – zwierciadło ruchome, 10 – teleskop (poszerza wiązkę), 11 – zwierciadło, 12 – soczewka ogniskująca, 13 – materiał cięty

Przebieg cięcia laserowego determinuje szereg czynników, związanych z konstrukcją urządzenia, parametrami lasera, wybranymi parametrami procesu, rodzajem materiału ciętego, geometrią i rozmieszczeniem przestrzennym wycinanych elementów.

Pierwszym czynnikiem jest moc urządzeń. Wraz ze wzrostem mocy zwiększa się maksymalna możliwa grubość ciętego materiału i maksymalna prędkość cięcia. Najbardziej masowo produkowane lasery do cięcia mają moc nie przekraczającą 5 kW. Wraz ze wzrostem mocy narastają trudności z uzyskaniem wiązki wysokiej jakości, rośnie także koszt urządzenia.

Drugim czynnikiem jest rozkład energii w wiązce, wynikający z jej drgań poprzecznych. Rozkład energii wiązki na jej przekroju poprzecznym określa się skrótem TEM (Transverse Electromagnetic Mode – poprzeczna fala elektromagnetyczna). Największe skupienie wiązki i najmniejszą rozbieżność zapewnia rozkład jednomodowy, podstawowy - TEM₀₀. Charakteryzuje ją gaussowski rozkład natężenia promieniowania i amplitudy pola elektrycznego. Wymuszanie pracy

lasera w modzie podstawowym wiąże się jednak ze znacznym zmniejszeniem energii promieniowania, od 2 razy w laserach CO₂ do 5-6 razy w laserach ciała stałego, w porównaniu z wiązką wielomodową. Zastosowanie wiązki wielomodowej wiąże się z mniejszymi stratami energii, ale możliwość jej ogniskowania jest bardziej ograniczona, lasery generujące takie wiązki lepiej nadają się do spawania, niż do cięcia.

Średnica ogniska jest kolejnym czynnikiem, wpływającym na proces cięcia. Dla zapewnienia możliwości znacznego skupienia wiązki przez soczewki pożądane jest tworzenie wiązki pierwotnej o maksymalnie dużej średnicy, co zapewnia zastosowanie w układzie optycznym tzw. teleskopu. Potem średnica wiązki zależy tylko od ogniskowej soczewki lub zwierciadła. Im jest ona mniejsza, tym silniejsze skupienie. Dlatego do wiercenia zaleca się krótkie ogniskowe, pozwalające na stworzenie plamki o średnicy od 0,0025 do 1,5 mm, co zapewnia moc powyżej 10⁹ W/cm². Do cięcia wystarczy wiązka o średnicy ogniska od 0,5 do 1,5 mm, zapewniająca moc 10⁶-10⁷ W/cm². Dla laserów CO₂ zaleca się ogniskową 125 mm i ognisko o średnicy 0,25 mm (głębokość ogniska – 0,5 mm).

O jakości cięcia decyduje także położenie ogniska wiązki. Położenie ogniska jest określane względem górnej powierzchni materiału. Gdy ognisko znajduje się dokładnie na jego powierzchni, przyjmuje się, że $f = 0$, gdy jest poniżej, to $f < 0$, gdy znajduje się ponad materiałem – $f > 0$.

Kolejnym czynnikiem jest dobór gazu towarzyszącego i sposobu jego doprowadzenia. Używa się w tym celu: azotu, argonu, tlenu i sprężonego powietrza. Zastosowanie powietrza może być uzasadnione tylko jego niską ceną, gdyż jakość powierzchni ciętych jest wtedy najgorsza. Tlen zapewnia wysoką wydajność procesu w przypadku cięcia metali spalających się w tlenie z wydzielaniem ciepła. Jakość powierzchni ciętych jest wtedy wysoka (przede wszystkim niewielka chropowatość). Zastosowanie azotu jest szczególnie uzasadnione do cięcia stali wysokostopowych, aluminium i innych metali nieżelaznych, ogranicza jednak prędkość cięcia oraz wymusza bardzo precyzyjną regulację parametrów cięcia. Powierzchnie cięte z zastosowaniem azotu są również utwardzone. Argon, zalecany do cięcia niobu, tantalu, molibdenu i wanadu, wymaga zastosowania wiązki większej mocy ze względu na straty energetyczne powodowane jego niskim potencjałem jonizacji.

Ciśnienie gazu towarzyszącego waha się w bardzo szerokich granicach – od kilku do 800 kPa. Co ciekawe, przy cięciu cienkich blach tlenem jego ciśnienie musi być znacznie większe, niż w przypadku przecinania znacznie grubszych blach o analogicznym składzie.

Pożądana jest minimalizacja szerokości szczeliny, powstającej podczas cięcia. W zależności od grubości materiału wynosi ona od 0,1-1,0 mm. Zmniejszeniu jej szerokości sprzyja zastosowanie dysz gazowych małej średnicy i precyzyjne regulowanie odległości dyszy od ciętego materiału, która powinna być zbliżona do średnicy dyszy gazowej - czyli wynosić 0,5-2,0 mm. Ważne jest, aby dysza była dokładnie współosiowa z wiązką lasera i zapewniała laminarny wypływ gazu. Dopuszczalny błąd współosiowości wynosi $\pm 0,05$ mm.

Prędkość cięcia zależy nie tylko od mocy lasera i możliwości układu napędowego głowicy, musi być ona ściśle dobrana do składu chemicznego i stanu materiału ciętego.

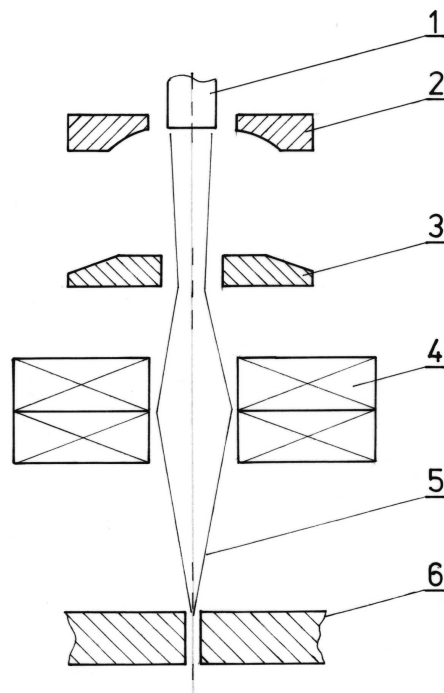
Dla danej mocy wiązki (tu: laser CO₂ moc 3 kW) i rodzaju ciętego materiału prędkość cięcia jest odwrotnie proporcjonalna do grubości, np. dla stali niskostopowej grubości 1 mm prędkość cięcia wynosi 10 m/min, dla grubości 5 mm – 3 m/min, grubości 10 mm – 1,6 m/min, a 20 mm – 0,7 m/min. Dla tego samego lasera prędkość cięcia aluminium zmienia się od 11 m/min dla grubości 1 mm, przez 2,4 m/min dla grubości 3 mm, do 0,9 m/min dla grubości 6 mm. Przyjmuje się przy tym zwykle, że maksymalna prędkość cięcia, osiągalna w danych warunkach, zapewnia najlepszą jakość powierzchni ciętych.

Duży wpływ na cięcie ma skład chemiczny i stan materiału ciętego. Nawet niewielkie zmiany składu wywołują konieczność dokonywania zmian w parametrach cięcia. W krajach wysoko rozwiniętych pojawiły się ostatnio stale „przyjazne obróbce laserowej” („laser friendly”). W przypadku metali nieżelaznych wyraźnie trudniej jest ciąć metale czyste niż stopy. Inaczej, niż w przypadku klasycznych metod cięcia termicznego, ogromny wpływ na proces cięcia ma stan powierzchni materiału, nawet niewielkie zabrudzenia mogą doprowadzić do niepełnego przetopu.

Cięcie laserowe bywa rozpatrywane jako alternatywa dla cięcia plazmowego. Bezdyskusyjna jest przewaga urządzeń laserowych, jeśli chodzi o dokładność odwzorowania wycinanych kształtów – może być lepsza niż $\pm 0,1$ mm, gdy dla cięcia plazmowego wynosi co najwyżej $\pm 0,15$ mm. Także szerokość linii cięcia plazmowego jest znacznie większa – np. dla stali grubości 6 mm wynosi odpowiednio 3,2 i 0,3 mm. Strefa wpływu ciepła przy cięciu laserowym jest co najmniej dwukrotnie węższa, niż przy cięciu plazmowym (w praktyce różnica może być nawet pięciokrotna). Także utwardzenie powierzchni ciętych jest w przypadku cięcia laserowego mniejsze niż przy cięciu plazmowym.

9.2.9. DRAŻENIE WIĄZKĄ ELEKTRONÓW

Wiązka elektronów została po raz pierwszy wykorzystana do topienia metalu w 1910 r. Stwierdzono, że w przypadku zastosowania bardzo dużego napięcia przyspieszającego można nadać elektronom niemal nieograniczoną energię kinetyczną. Same elektrony są natomiast tak małe, że uderzając w dowolną przeszkodę oddają jej energię na bardzo małej powierzchni, nagrzewając ją błyskawicznie. Na dodatek sterowanie wiązką jest relatywnie proste dzięki zastosowaniu soczewek magnetycznych (rys. 9.16).



Rys. 9.16. Schemat drążarki elektronowej; 1 – katoda, 2 – elektroda sterująca, 3 – anoda, 4 – soczewki elektromagnetyczne (ogniskujące i sterujące), 5 – wiązka elektronów, 6 – materiał cięty

Generowana wiązka ma jako narzędzie dwie wady: elektrony oddają energię każdej napotkanej przeszkodzie, np. atomom gazu, jakie napotyka na swej drodze. Dlatego wiązka elektronów zachowuje swą energię jedynie w próżni i cięcie z jej użyciem powinno odbywać się w komorach próżniowych. Po drugie, hamowane elektrony wyzwalają kwanty promieniowania przenikliwego, zwanego promieniowaniem X lub rentgenowskim. Dlatego obszary obróbki wiązką należy ekranować dla ochrony personelu.

W praktyce cięcie wiązką elektronów bywa stosowane do wykonywania precyzyjnych elementów z cienkich blach, np. do produkcji elementów lamp elektronowych dużej mocy. Znacznie częściej wiązki elektronów używa się do drążenia precyzyjnych otworów o małej średnicy. Przykładowo w blachach, tworzących elementy konstrukcji turbin gazowych nowej generacji, jest takich otworów po kilka milionów.

9.3. ZASTOSOWANIA CIĘCIA TERMICZNEGO

Cięcie termiczne zastosował po raz pierwszy E. Menne w 1901 r. Do wypalania korków w otworach spustowych wielkich pieców. Gaz palny – wodór oraz tlen doprowadzano koncentrycznymi, stalowymi rurami do prostych dysz, skierowanych na korek.

W 1904 r. Niemiec E. Wiss opatentował acetylenowo-tlenowy, koncentryczny palnik do cięcia, a Belg H. Jottrand, w 1905 r. – palnik posobny. Palniki obydwu typów błyskawicznie znalazły licznych użytkowników, a cięcie zyskało powszechne

uznanie po zastosowaniu go do demontażu mostu na Elbie w Barby, co zajęło ok. 5 dni, podczas gdy zastosowanie metod klasycznych wymagałoby pięciu tygodni pracy.

Bardzo szybko skonstatowano, że za pomocą palnika Wissa można prowadzić cięcie kształtowe, trudne bądź niemożliwe do wykonania metodami mechanicznymi. Konkurencyjność cięcia termicznego wobec mechanicznego była tym większa, im grubszy materiał miał być cięty. Już w 1913 r. po raz pierwszy przecięto blok stalowy o grubości 1 m. Niemożność cięcia tlenem metali nieżelaznych i większości stali wysokostopowych nie stanowiła początkowo istotnego mankamentu, gdyż nieczęsto wykonywano z tych metali konstrukcje grubościenne, a cienkie elementy można było ciąć mechanicznie.

Zastosowanie w 1957 r. cięcia plazmowego umożliwiło także cięcie termiczne metali nie spełniających warunków cięcia przez wypalanie tlenem. Zastosowanie po 1960 r. cięcia laserowego stworzyło możliwość cięcia wszystkich materiałów z dużą dokładnością i niewielkimi stratami.

Cięcie termiczne jest uznawane za podstawowy sposób przygotowywania elementów konstrukcji metalowych o grubościach przekraczających 30 mm, a w szczególności konstrukcji spawanych. Dokładność cięcia stale zwiększa się i jest możliwe precyzyjne wycinanie elementów, które nie wymagają dalszych operacji technologicznych w odniesieniu do krawędzi cięcia, bez obróbki mechanicznej mogą nawet tworzyć pary kinematyczne.

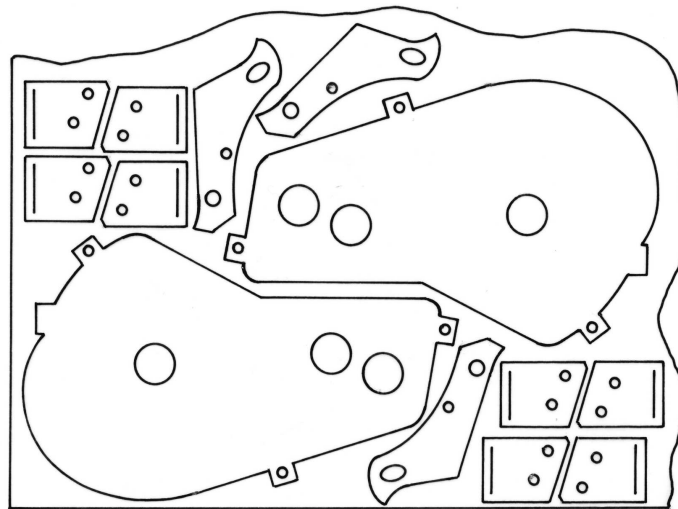
W przypadku elementów metalowych o małej grubości, czyli do 30 mm, zalety cięcia termicznego, to wysoka wydajność (prędkość cięcia blach o grubości ok. 1 mm wynosi nawet powyżej 1 m/s), dokładność i rekordowo niski koszt jednostkowy.

Na coraz szerszą skalę stosuje się cięcie termiczne materiałów niemetalowych – tworzyw sztucznych, tkanin, choć ograniczenie stanowi często ryzyko zapalenia ciętego materiału. Wdrażane są technologie cięcia materiałów kompozytowych, blach pokrywanych tworzywami sztucznymi i innych, zaawansowanych materiałów.

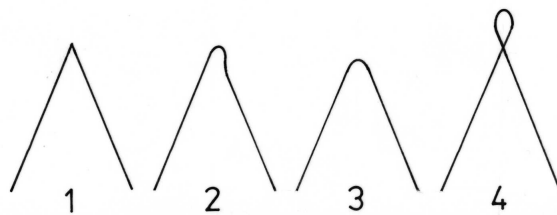
9.4. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Zapoznanie z konstrukcją i obsługą najpowszechniej stosowanych urządzeń do cięcia termicznego, metodami cięcia, jego przebiegiem oraz rezultatami cięcia w postaci wyciętych elementów, z uwzględnieniem jakości krawędzi.
2. Omówienie i przedstawienie ręcznego palnika inżektorowego z koncentryczną dyszą, zmechanizowanego palnika z układem posobnym dysz, palnika do kształtowego cięcia z wykorzystaniem wzorców i rolki magnetycznej, palnika do ręcznego cięcia plazmą powietrzną.
3. Pokaz zapalania i regulacji płomienia palników, sposób nagrzewania materiału przed rozpoczęciem cięcia oraz cięcia ręcznego tlenem i zmechanizowanego cięcia tlenem blach stalowych o grubości od 3 do 15 mm oraz blachy aluminiowej grubości 3mm plazmą powietrzną.

4. Omówienie szczególnych cech krawędzi ciętych elementów oraz porównanie ich jakości. Wyniki cięcia należy porównać z wynikami cięcia plazmowego i laserowego materiałów o podobnej grubości i składzie.
5. Prezentacja ogólnych zasad rozmieszczania elementów do cięcia na arkuszach blach (tzw. rozkrój – rys. 9.17) oraz sposobów cięcia elementów z ostrymi krawędziami (rys. 9.18).
6. Opisanie zasady przebijania materiału przed cięciem oraz omówienie typowych niezgodności i zaburzeń procesu cięcia termicznego.



Rys. 9.17. Przykładowe rozmieszczenie detali do wycięcia na arkuszu blach



Rys. 9.18. Przykładowe geometryczne ograniczenia dokładności odwzorowania konturu ciętego elementu o ostrych krawędziach (1) wynikające z bezwładności głowicy (2) i średnicy strumienia tnącego (3). Rozwiązaniem może być zastosowanie trajektorii „z pętlą” (4)

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno obejmować:

- opis prezentowanych urządzeń,
- obserwacje dotyczące przebiegu cięcia,
- porównanie jakości krawędzi ciętych w kontekście obowiązujących norm.

LITERATURA

- [1] PILARCZYK J., *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*. Tom 2, WNT, Warszawa 2005.
- [2] KLIMPEL A. *Technologia spawania i cięcia metali*, Wyd. Politechniki Śląskiej. Gliwice 1997.
- [3] POLEWOJ G. SUCHININ G. *Gazoplamennaja obrabotka metallow*, Akademia. Moskwa 2005.
- [4] JÓZWICKI R. *Technika laserowa i jej zastosowania*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009.
- [5] SCHELLHASE M. *Der Schweisslichtbogen – ein technologisches Werkzeug*, Verlag Technik. Berlin 1985.
- [6] Schweissen. G- E- MAG-Schweissen. Thermisches Trennen. Verlag Technik. Berlin 1985.

WYKAZ NORM

- PN-EN ISO 9013:2003 Cięcie termiczne – Klasyfikacja cięcia termicznego – Specyfikacja geometrii wyrobu i tolerancje jakości.
- PN EN 2820:1997 Badania odbiorcze przecinarek do cięcia tlenowego. Dokładność odwzorowania. Charakterystyki działania.
- PN-74/M-69103 Spawalnictwo. Przecinarki półautomatyczne do cięcia tlenem. Wymagania i budowa.

10. NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA SPAWALNICZE

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studenta z:

- przyczyną powstawania naprężeń podczas spajania,
- rodzajem powstających naprężeń,
- skutkami, jakie wywołują naprężenia spawalnicze w konstrukcjach spajanych,
- sposobami zapobiegania powstawania naprężeń.

10.1. WPROWADZENIE

Najbardziej niepożądanymi zjawiskami towarzyszącymi procesowi spawania są naprężenia i odkształcenia w złączach spajanych. Obydwa te zjawiska występują równocześnie i są trudne do opanowania. Odkształcenie złącza wypacza konstrukcję spawaną, naprężenia są groźne dla całości konstrukcji (mogą doprowadzić do jej zniszczenia). Podłożem obydwu zjawisk jest skurcz spoiny stygnącej od temperatury plastyczności, około 650 °C, do temperatury otoczenia, w której konstrukcja ma być używana. Procesy spawania zawsze wywołują w złączu znaczne naprężenia, które powstają na skutek nierównomiernej rozszerzalności cieplnej oraz skurczu spoiny, wywołanych miejscowym nagrzewaniem elementów łączonych. Wielkość ich sięga granicy plastyczności spawanego materiału. Naprężenia spawalnicze mogą powodować powstawanie znacznych deformacji konstrukcji, niekiedy prowadzących do ich pęknięć. Wypływa więc stąd wniosek, że materiały przeznaczone na konstrukcje spawane powinny mieć odpowiednio dużą plastyczność. Należy podkreślić, że naprężenia spawalnicze powstają nie tylko w jakiś skomplikowanych konstrukcjach, ale nawet w dwóch zespawanych, swobodnie leżących blachach. Zagadnienie naprężeń spawalniczych jest więc bardzo ważne, a zwykle nie doceniane i nie uwzględnione w obliczeniach wytrzymałościowych konstrukcji.

Naprężenia powstające w materiale w wyniku jego obróbki mechanicznej lub cieplnej, np. gięcia, odlewania, walcowania, kucia, spawania, zgrzewania, hartowania i pozostające w nim po zakończeniu procesu technologicznego, są nazywane naprężeniami własnymi lub resztkowymi.

Naprężenia własne można zdefiniować także jako naprężenia, które równoważą się wzajemnie wewnątrz pewnego obszaru bez obciążenia zewnętrznego. Oznacza to, że muszą być wtedy spełnione następujące warunki :

- a) suma rzutów wszystkich sił wewnętrznych w dowolnym przekroju elementu powinna być równa zero, tzn. $\Sigma P = 0$,
- b) suma momentów wywołanych działaniem sił wewnętrznych w dowolnym przekroju elementu powinna być równa zero, tzn. $\Sigma M = 0$.

W zależności od procesu technologicznego, który je wywołał, określa się również naprężenia własne mianem danego procesu, np.

- odlewnicze,
- hartownicze,
- spawalnicze, itp.

W zależności od obszaru oddziaływania naprężenia własne, w tym i spawalnicze, dzieli się na:

I rzędu – naprężenia te występują w dużych objętościach metalu, a więc w całej konstrukcji lub w poszczególnych elementach (węzłach, złączach). Tego rodzaju naprężenia występują m.in. w konstrukcjach spawanych. Działają one w kierunkach poprzecznych i podłużnych do wykonywanych spoin oraz wzdłuż lub w poprzek osi poszczególnych elementów konstrukcji.

II rzędu – obszar oddziaływania obejmuje jedno lub kilka ziaren metalu. Naprężenia te nie wykazują określonej orientacji w stosunku do osi elementu, w którym występują.

III rzędu – obszar oddziaływania obejmuje sieć krystalograficzną metalu, a więc występują między elementami w objętości sieci przestrzennej metalu.

W zależności od liczby występujących składowych naprężenia I rzędu określa się jako:

- jednoosiowe (występujące w prętach),
- dwuosiowe (stan płaski, występują w cienkich blachach),
- trójosiowe (stan przestrzenny, występują w grubych płytach, mają praktyczne znaczenie przy grubościach powyżej 20 mm).

Dla połączeń spawanych istotne są przede wszystkim naprężenia pierwszego rodzaju, a przy spawaniu stali stopowych, gdzie przemiany zachodzą w temperaturach znacznie niższych w porównaniu ze stalami niskostopowymi, również naprężenia drugiego rodzaju.

Ze względu na kierunek działania względem spoiny, naprężenia dzieli się na:

- wzdłużne (σ_x) względem osi x spoiny,
- poprzeczne (σ_y) do osi y spoiny,
- prostopadłe (σ_z) do powierzchni łączonych elementów.

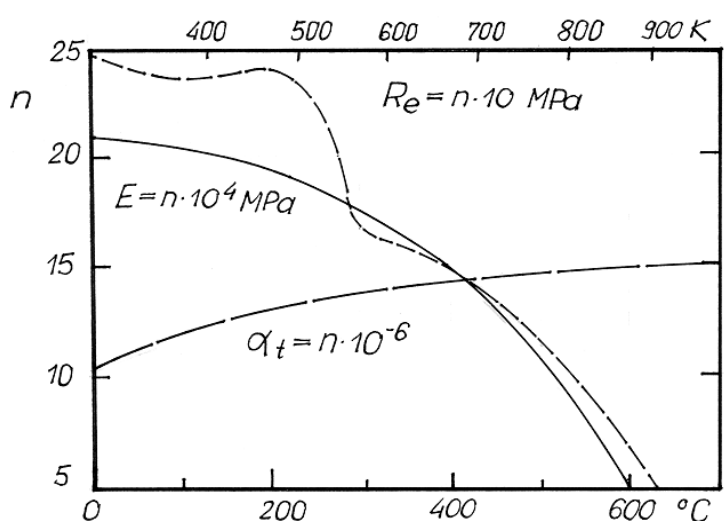
Podział naprężeń ze względu na czas w jakim działają:

- naprężenia chwilowe, których wielkość i kierunek zależą od chwilowego rozkładu temperatury (zmieniają się w czasie trwającego cyklu),
- naprężenia ostateczne (własne, resztkowe), powstające w poszczególnych elementach lub w całej konstrukcji po ukończeniu danego zabiegu technologicznego i ostygnięciu przedmiotu.

10.2. ISTOTA POWSTAWANIA NAPRĘŻEŃ SPAWALNICZYCH

10.2.1. WPŁYW TEMPERATURY NA ZMIANY NIEKTÓRYCH WŁASNOŚCI FIZYCZNYCH STALI

Ze zmianą temperatury zmieniają się własności wytrzymałościowe stali, przy czym przebieg tych zmian jest różny dla różnych gatunków w poszczególnych zakresach temperatur. Zmiany niektórych własności stali niskowęglowych: modułu sprężystości E (modułu Younga), granicy plastyczności R_e oraz współczynnika rozszerzalności liniowej α podano na rys. 10.1. oraz w tabeli 10.1.



Rys. 10.1. Zmiana modułu sprężystości E , granicy plastyczności R_e i współczynnika rozszerzalności α dla stali niskowęglowej w zależności od temperatury

Tab. 10.1. Zmiany niektórych własności stali niskowęglowych w zależności od temperatury

Temperatura [°C]	$E \cdot 10^2$ [GPa]	R_e [MPa]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [1/K]
0	2,10	240	11,5
100	1,96	222	11,9
200	1,88	226	12,5
300	1,75	165	13,0
400	1,59	152	13,6
500	1,20	125	14,2
600	0,60	63	14,8

Zmiany tych własności wywierają istotny wpływ na powstawanie naprężeń własnych w elementach spawanych. Jak wynika z wykresu i z tabeli, własności sprężyste stali zanikają w temperaturze nieco powyżej 600-650 °C praktycznie do zera, a zatem w zakresie temperatur powyżej 600 °C naprężenia własne nie mogą

już powstawać. Zakres temperatur, istotny ze względu na powstawanie naprężeń własnych, znajduje się poniżej tej temperatury.

Dla uproszczenia obliczeń procesu powstawania naprężeń własnych można przyjąć, że współczynnik rozszerzalności cieplnej α oraz moduł sprężystości E są stałe, a zmienia się tylko naprężenie plastyczne σ_{pl} . Przyjmując, że w zakresie temperatur 20-500 °C,

$$E = 210 \text{ GPa},$$

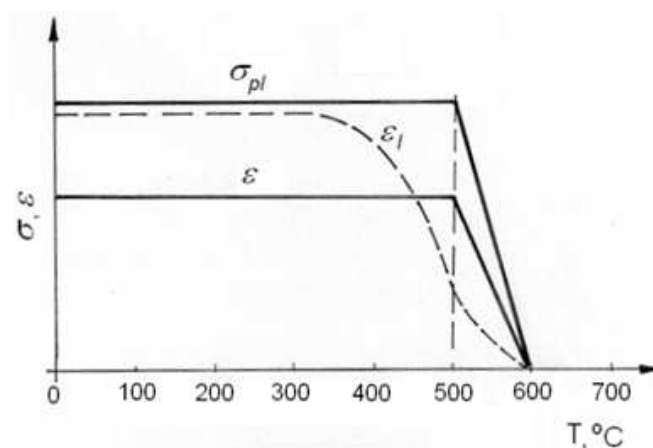
$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K},$$

$$\sigma_{pl} = 240 \text{ MPa},$$

można obliczyć jednostkowe wydłużenie sprężyste, przy którym osiąga się naprężenie plastyczne według zależności:

$$\varepsilon_l = \sigma/E = \alpha(T_1 - T_0) \quad (10.1)$$

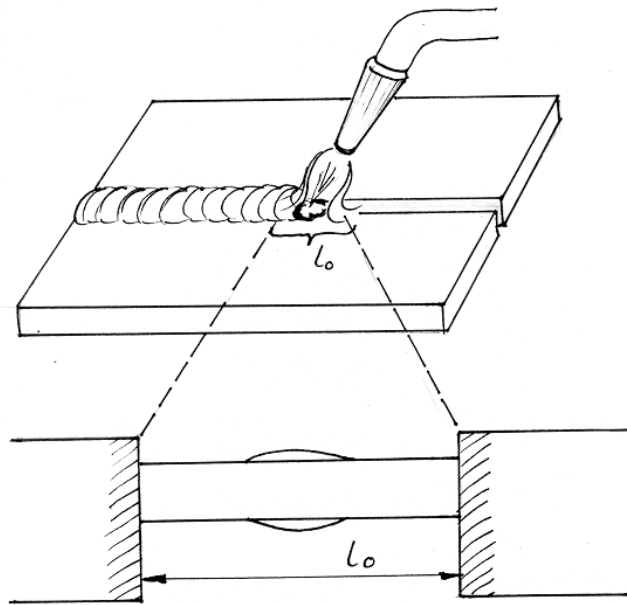
W temperaturze 600 °C zanikają prawie zupełnie odkształcenia sprężyste, w zakresie zaś temperatur 500-600 °C, w celu uproszczenia, przyjmuje się liniowy spadek naprężenia plastycznego zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. 10.2.



Rys. 10.2. Uproszczony wykres zależności σ_{pl} i ε od temperatury

10.2.2. POWSTAWANIE NAPRĘŻEŃ W WYNIKU ODDZIAŁYWANIA TERMICZNEGO

Aby łatwiej zrozumieć powstawanie naprężeń spawalniczych można przyjąć, z dużym uproszczeniem, że nagrzewane w danej chwili miejsce złącza spawanego stanowi belkę obustronnie utwierdzoną o początkowej długości l_0 (rys. 10.3) Założenie takie można uczynić, ponieważ w rzeczywistości proces spawania polega na miejscowym nagrzewaniu niewielkiego odcinka złącza, który na skutek grzania usiłuje rozszerzyć się, a sąsiadujące z nim zimniejsze partie materiału przeciwdziałają temu procesowi, tworząc jak gdyby sztywne utwierdzenia.



Rys. 11.3. Wycinek nagrzewanego złącza jako belka dwustronnie utwierdzona

Wartość naprężeń powstających w takiej belce na skutek nagrzewania można obliczyć w przybliżeniu z zależności (10.2).

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot E \quad (10.2)$$

Z tego równania można określić temperaturę, do jakiej należy ogrzać belkę utwierdzoną obustronnie, aby wywołać w niej odkształcenie plastyczne σ_{pl} . Wykorzystując zależności (10.3) i (10.4) można wyznaczyć temperaturę (10.5):

$$\Delta l = l_0 \alpha_t \Delta T \quad (10.3)$$

$$\sigma_{pl} = \alpha_t \Delta T E \quad (10.4)$$

$$\Delta T = \frac{\sigma_{pl}}{\alpha_t \cdot E} = \frac{R_e}{\alpha_t \cdot E} \quad (10.5)$$

gdzie:

α_t – współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K],

l_0 – odległość między łączonymi brzegami elementów [mm],

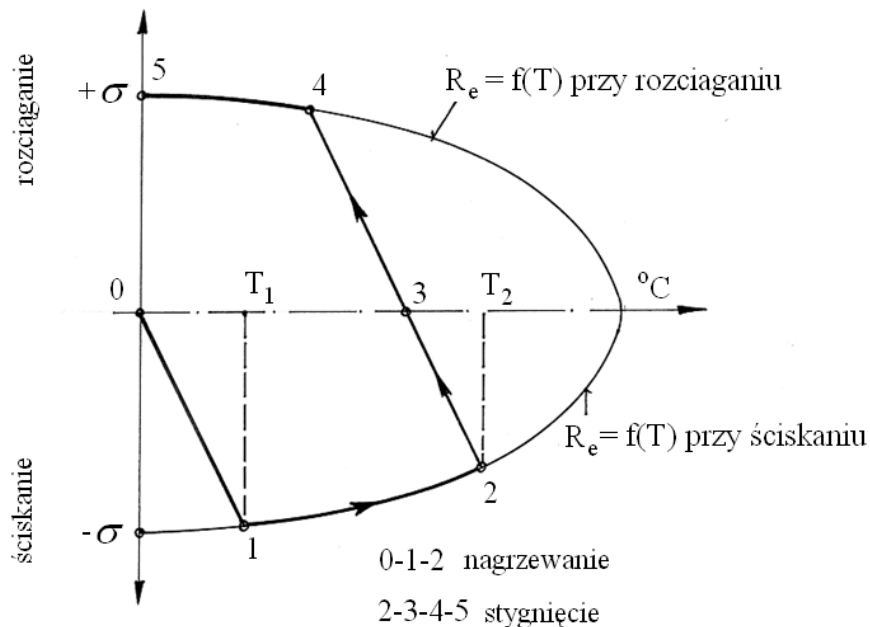
Δl – zmiana odległości między łączonymi brzegami elementów [mm].

Podstawiając do wzoru odpowiednie wartości liczbowe, zaczerpnięte z tab. 10.1. otrzymuje się wynik przedstawiony równaniem:

$$\Delta T = 100 \text{ K} \quad (10.6)$$

Wynika z powyższego, że już niewielki wzrost temperatury, o 100 °C, powoduje powstanie naprężeń plastycznych w belce dwustronnie utwierdzonej wykonanej

ze stali miękkiej. Dalsze nagrzewanie do wyższej temperatury będzie powodować jedynie wzrost odkształceń plastycznych, naprężenia natomiast nie będą wzrastały, a nawet zaczną maleć, ponieważ zgodnie z wykresem (rys. 10.1.) w miarę wzrostu temperatury maleje granica plastyczności R_e . Przebieg zmian naprężeń, zależnie od temperatury, w dwustronnie utwierdzonym pręcie pokazano na rys. 10.4. Podczas nagrzewania pręta dwustronnie utwierdzonego pojawiają się w nim naprężenia ściskające, wzrastające liniowo, aż do osiągnięcia granicy plastyczności w temperaturze T_1 . Przebieg tych naprężeń przedstawia prosta 0-1. Dalszy wzrost temperatury powoduje spęcznienie materiału i zmniejszenie naprężeń w pręcie na skutek zmniejszania się wartości granicy plastyczności R_e , zgodnie z jego przebiegiem na odcinku 1-2. W punkcie 2 przerywano nagrzewanie. Odkształcenie, jakie występuje w pręcie w tym punkcie, jest sumą odkształcenia plastycznego i sprężystego, z tym że długość pręta, na skutek utwierdzenia, jest ciągle równa l_0 . Z chwilą rozpoczęcia chłodzenia odkształcenie sprężyste zacznie zmniejszać się, zaczną więc także maleć naprężenia według prostej 2-3. W punkcie 3 zarówno odkształcenie, jak i naprężenie osiągną wartość zerową, ponieważ pręt nie ostygł jeszcze całkowicie dlatego w miarę spadku temperatury będzie dążył do dalszego skracania się, czemu przeciwdziała jego utwierdzenie. W wyniku tego w początkowej fazie pojawią się naprężenia sprężyste rozciągające, rosnące według prostej 3-4, które w punkcie 4 osiągają granicę plastyczności. Dalszy spadek temperatury wywoła pojawienie się naprężeń plastycznych, które będą rosły zgodnie z przebiegiem $R_e = f(t)$ na odcinku 4-5.



Rys. 10.4. Przebieg naprężeń powstających w czasie grzania i stygnięcia belki obustronnie utwierdzonej

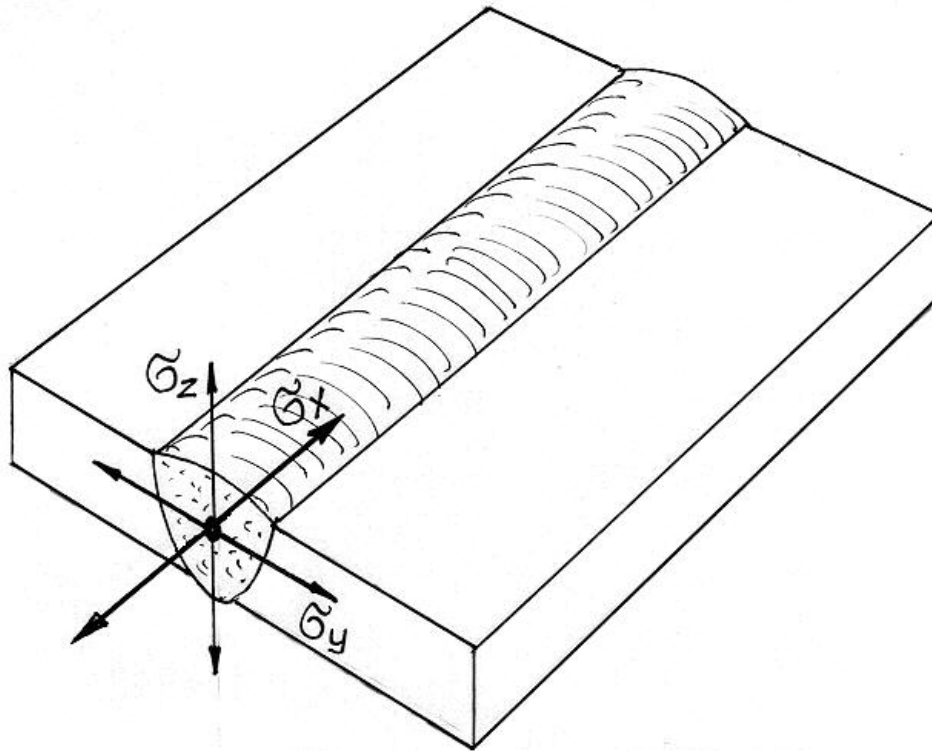
Widać więc, że w punkcie 5, odpowiadającemu pełnemu ostygnięciu pręta, pozostaną w nim naprężenia rozciągające równe granicy plastyczności. Podobny

przebieg mają naprężenia wywołane nagrzewaniem w procesach spawania, z tym że w przypadku spawania, gdzie następuje nadtopienie materiału, przebieg naprężeń jest w całym zakresie zgodny z przebiegiem funkcji $Re = f(T)$, stąd też w spoinie, podobnie jak w belce (rys. 10.4), po ostygnięciu pojawiają się naprężenia rozciągające równe granicy plastyczności.

10.3. ODKSZTAŁCENIA SPAWALNICZE

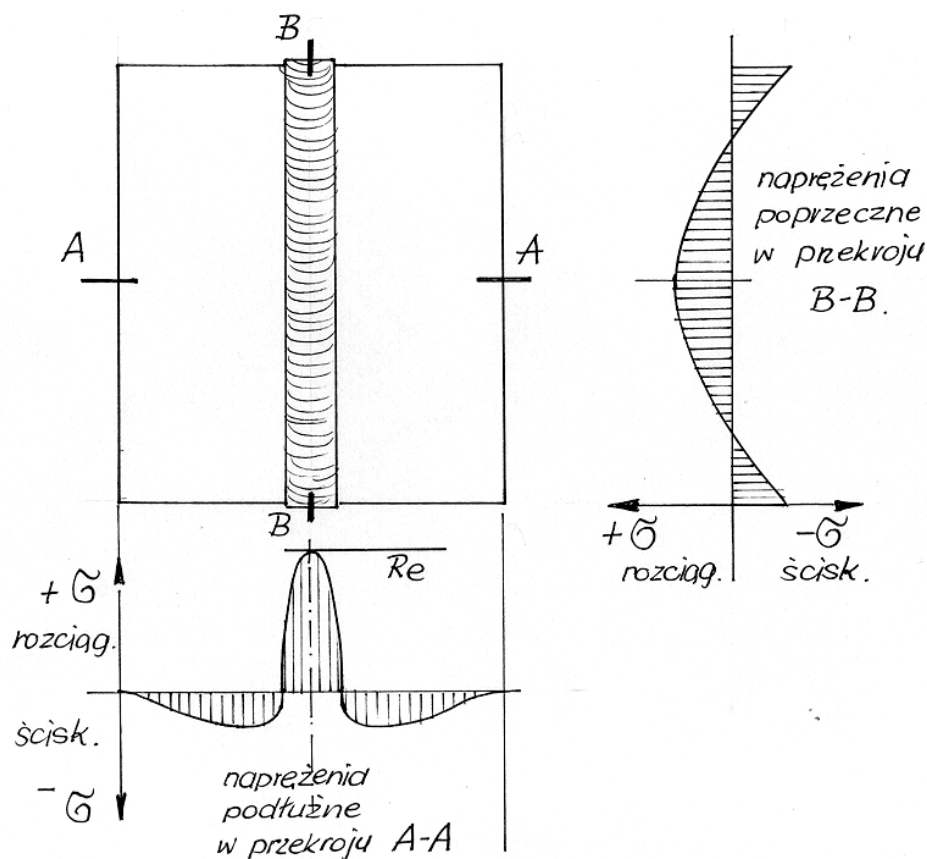
Odształcenia spawalnicze zachodzące we wszystkich kierunkach na skutek oddziaływania trójosiowego stanu naprężeń, jaki panuje podczas wykonywania połączenia, można sklasyfikować następująco:

- a) odkształcenia wzdłużne w kierunku osi X,
- b) odkształcenia poprzeczne w kierunku osi Y,
- c) odkształcenia normalne (grubości blachy) w kierunku osi Z.



Rys. 10.5. Kierunki działania naprężeń w spoinie σ_x - naprężenia wzdłużne, σ_y - naprężenia poprzeczne, σ_z - naprężenia normalne

Wielkość działających naprężeń, a zarazem możliwych odkształceń w danym punkcie można określić analitycznie – na podstawie rozchodzenia się ciepła w elementach spawanych lub też doświadczalnie (tensometria oporowa). Typowy przebieg naprężeń spawalniczych, a co za tym idzie możliwy przebieg odkształceń, występujący w dwu zespawanych swobodnie leżących blachach, pokazano na rys. 10.6.



Rys. 10.6. Schemat przebiegu spawalniczych naprężeń podłużnych i poprzecznych w złączu spawanym

Na rysunku 10.6. nie umieszczono przebiegu naprężeń normalnych, ponieważ są one zwykle niewielkie i pomijalne w rozważaniach dotyczących cienkich blach. Jak wynika z rysunku, największe proporcjonalnie wartości osiągają naprężenia podłużne w obszarze spoiny. One to właśnie są najgroźniejsze dla konstrukcji spawanej.

10.3.1. KLASYFIKACJA ODKSZTAŁCENÍ SPAWALNICZYCH

Istnieje podział odkształceń ze względu na przyczyny ich powstawania i kierunki ich działania względem spoiny. Odkształcenia mogą być wywołane :

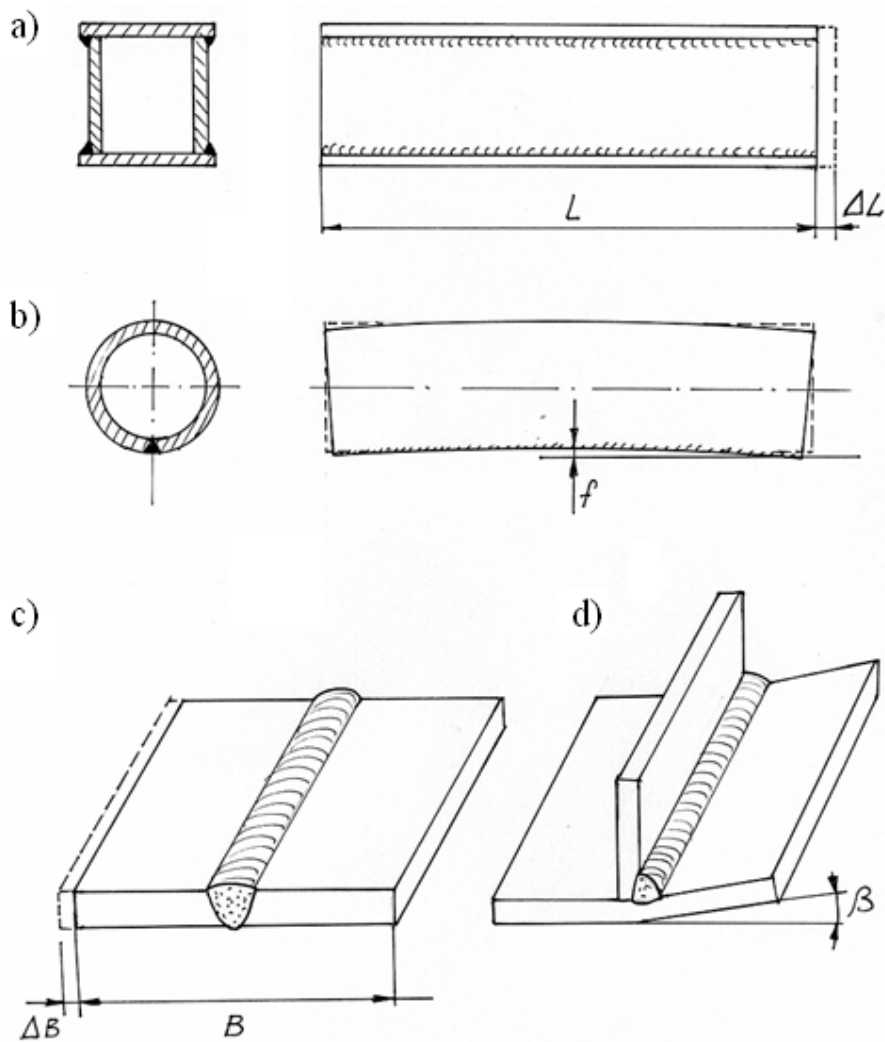
- odkształceniem spoiny i przyległego do niej materiału w kierunku zgodnym z osią spoiny (skurczem wzdłużnym),
- odkształceniem spoiny i przyległego do niej materiału w kierunku prostopadłym do długości spoiny (skurczem poprzecznym).

Odkształcenie wzdłużne może spowodować wygięcie elementu, a odkształcenie prostopadłe do osi spoiny prowadzi do odkształcenia poprzecznego i kąowego. Postacie odkształceń spawalniczych można zdefiniować następująco:

- odkształcenie wzdłużne – jest to zmiana wymiarów liniowych w elementach leżących w płaszczyźnie elementu, mierzona wzdłuż osi spoiny.

- wygięcie – jest to zmiana kształtu elementu, wywołana odkształceniem wzdłużnym i poprzecznym, zachodząca w płaszczyźnie równoważnej elementu. Miarą wygięcia może być promień krzywizny, strzałka ugięcia lub kąt.
- odkształcenie poprzeczne – jest to zmiana wymiarów liniowych elementów w kierunku poprzecznym do osi spoiny, zachodząca w płaszczyźnie elementu (blachy).
- odkształcenia kątowe – jest to zmiana kształtu elementu wywołana odkształceniem poprzecznym, deformującym jego powierzchnię. Miarą odkształcenia kąтового jest kąt odchylenia rozważanych płaszczyzn.
- utrata stateczności (faliście, zwichrzenie) – jest to odkształcenie elementów powłokowych o małej sztywności poprzecznej, zachodzące w kierunku prostopadłym do ich powierzchni.
- skręcenie – jest zmianą kształtu długich elementów, z prostych na spiralne wywołane spoinami wzdłużnymi. Miarą skręcenia jest kąt obrotu względem siebie dwóch przekrojów poprzecznych.

W konstrukcjach spawanych występuje kilka odkształceń jednocześnie. Przykłady odkształceń spawalniczych przedstawiono na rys. 10.7 a-d.



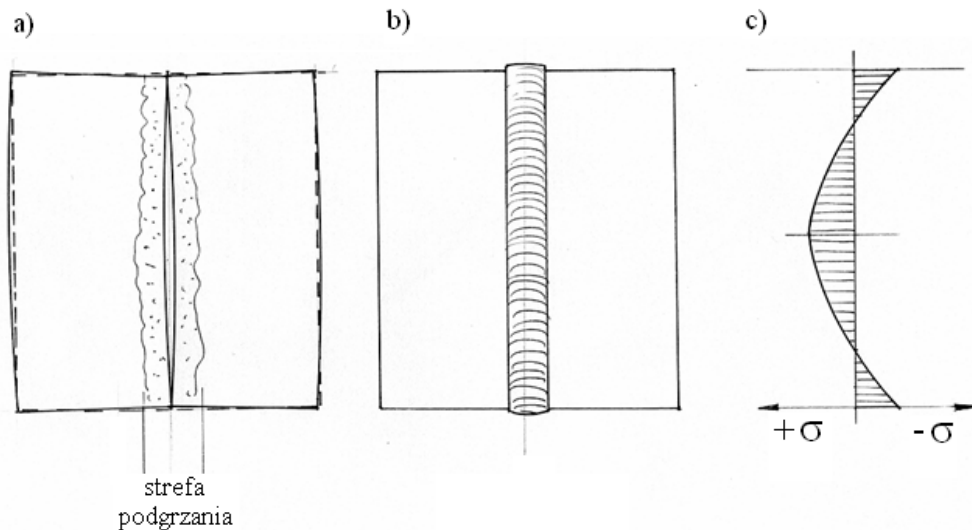
Rys. 10.7. Odształcenia spawalnicze: a) wzdłużne, b) wygięcie, c) poprzeczne, d) kątowe

10.3.2. ODSZTAŁCENIA POPRZECZNE

Przyczyna powstania odkształcenia poprzecznego jest nierównomierny, zmieniający się w czasie spawania rozkład temperatury w spawanych elementach. Strefa o wysokiej temperaturze, otoczona przez zimne partie materiału, doznaje znacznego odkształcenia plastycznego (spęczenia), ponieważ w pewnej odległości za źródłem ciepła elementy są już ze sobą połączone i temperatura jest na tyle niska, że powstałe złącze hamuje swobodny skurcz poprzeczny, więc zaistniałe spęczenie w niewielkim stopniu zostaje zmniejszone.

Odształcenie poprzeczne występuje nie tylko w elementach spawanych z odstępem, lecz także bez odstępów i w elementach z napoiną. Mechanizm jego powstawania jest zawsze taki sam, różne tylko będą wartości odkształcenia. Gdyby spoina była wykonana na całej długości jednocześnie wówczas odkształcenie poprzeczne też by wystąpiło, lecz jego wartości wynikałyby głównie ze skurczu pochodzącego z krzepnięcia i stygnięcia spoiny. W normalnych warunkach

spawania udział skurczu spoiny wynosi ok. 20%, a reszta przypada na strefę przyspoinową.



Rys. 10.8. Schemat powstawania naprężeń poprzecznych w złączy spawanym: a) wygięcie blach nagranych na krawędzi, b) odkształcenie blach zespawanych, c) obraz naprężeń poprzecznych w blachach zespawanych

Obraz naprężeń poprzecznych, przedstawiony na rys. 10.8, można wyjaśnić w następujący sposób: gdyby spawane blachy zostały nieco odsunięte od siebie, tak aby po przejściu źródła ciepła nie nastąpiło połączenie, wówczas przy odpowiedniej ich smukłości wygięłyby się jak na rys. 10.8a. Powodem takiego wygięcia jest skurcz wewnętrznych krawędzi blach, wywołany pojawieniem się w nich naprężeń poprzecznych. W rzeczywistości jednak zespawane blachy nie mogą się tak odkształcać, ponieważ są połączone szwem spawalniczym. Spoina więc doznaje naprężeń ściskających w miejscach, gdzie blachy zachodziły na siebie oraz naprężeń rozciągających w środku blach, gdzie spoina jakby ściąga odkształcające się blachy. Na charakter rozkładu i wartość odkształceń wpływają następujące czynniki:

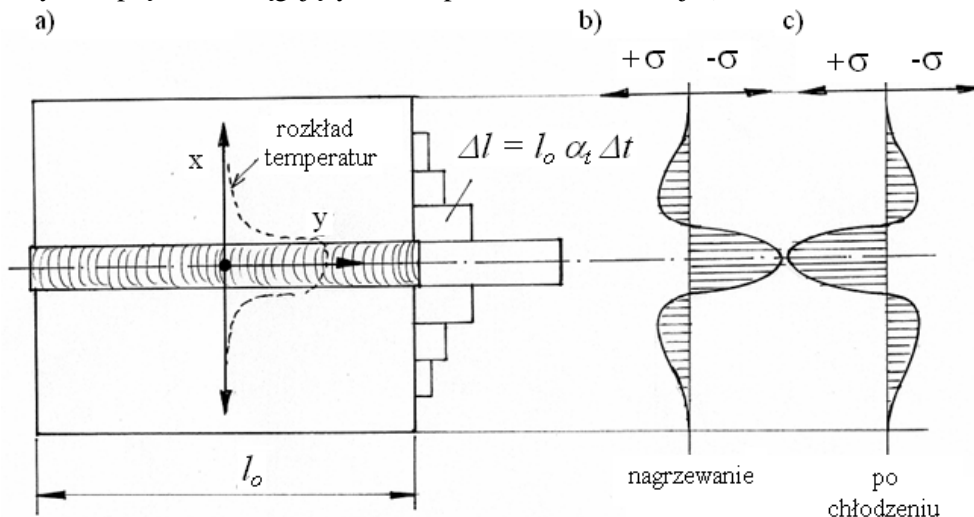
- sztywność spawanych elementów,
- niejednoczesność nagrzewania i chłodzenia na długości blach,
- energia liniowa odniesiona do grubości spawanych blach,
- właściwości fizyczne materiału,
- usztywnienie elementów w czasie spawania, głównie spoinami szczepnymi.

10.3.3. ODKSZTAŁCENIA WZDŁUŻNE

Przy spawaniu dwu szerokich płaskowników rozkład temperatury w spawanym złączy, w kierunku prostopadłym do spoiny, jest nierównomierny (rys. 10.9a). Największa temperatura występuje w środku złącza spawanego i jest wyższa od temperatury topnienia metalu, w miarę oddalania się od osi spoiny temperatura gwałtownie spada, a w przypadku dużej szerokości blach temperatura na krawędziach

może zmniejszyć się do temperatury otoczenia. Jeżeli spawane blachy składałyby się z warstwek metalu ułożonych równoległe do osi spoiny i mających możliwość swobodnego przemieszczania się po sobie, to każda z nich wydłużyłaby się o wartość Δl zgodnie z zależnością (10.3).

Wydłużenie każdej warstewki byłoby więc proporcjonalne do temperatury jej nagrzania (rys. 10.9a). Nie jest to możliwe ponieważ w rzeczywistości spawane blachy stanowią lity materiał, w którym poszczególne warstwy metalu oddziałują na siebie. Skutkiem tego, warstwy mniej nagrzane hamują rozszerzanie się warstw nagrzanych do wyższej temperatury. Oznacza to, że spoina i SWC nie mogą się swobodnie rozszerzać, doznają naprężeń ściskających (rys. 10.9b), a pozostały materiał jest rozciągany. Pod wpływem naprężeń ściskających obszary te ulegają spęczeniu. Jest ono formą wyzwolenia naprężeń, stąd też po stopieniu materiału, w spoinie naprężenia osiągają wartość zerową. W czasie chłodzenia złącza następuje skurcz materiału i występuje sytuacja odwrotna, skutkiem czego jest powstanie dużych naprężeń rozciągających oraz powstanie deformacji (odkształcenie wzdłużne).



Rys. 10.9. Rozkład temperatury i naprężeń podłużnych w złączu spawanym: a), b) podczas grzania, c) po ostygnięciu

10.3.4. ODKSZTAŁCENIA KĄTOWE

Odkształcenia kątowe wywołane są poprzecznym skurczem spoiny. Zależą one od wielu czynników. Szczególną rolę jednak odgrywa tu kształt rowka zukosowania. Zukosowanie brzegów blach na kształt litery X lub 2U pozwala na znaczące zmniejszenie, a nawet na całkowite wyeliminowanie odkształcenia kątowego, gdy układanie poszczególnych warstw i ściegów przeprowadzane jest według odpowiedniej kolejności. O wiele większe odkształcenie kątowe wykazują złącza wykonane spoinami na kształt litery V. Duże odkształcenie kątowe obserwuje się w przypadku spoin pachwinowych, znaczny wpływ na wielkość kąta odkształcenia ma ilość ściegów spoiny pachwinowej.

10.3.5. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA WARTOŚĆ NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCENI SPAWALNICZYCH

Odkształcenia spawalnicze zależą od wielu czynników, z których najważniejszymi są:

- metoda spawania ,
- natężenie prądu,
- prędkość spawania,
- rodzaj elektrod i ich średnica,
- kształt rowka,
- sposób układania ściegów,
- wykończenie spoiny,
- pozycja spawania.

Wartość naprężeń pojawiających się w konstrukcji spawanej zależy od:

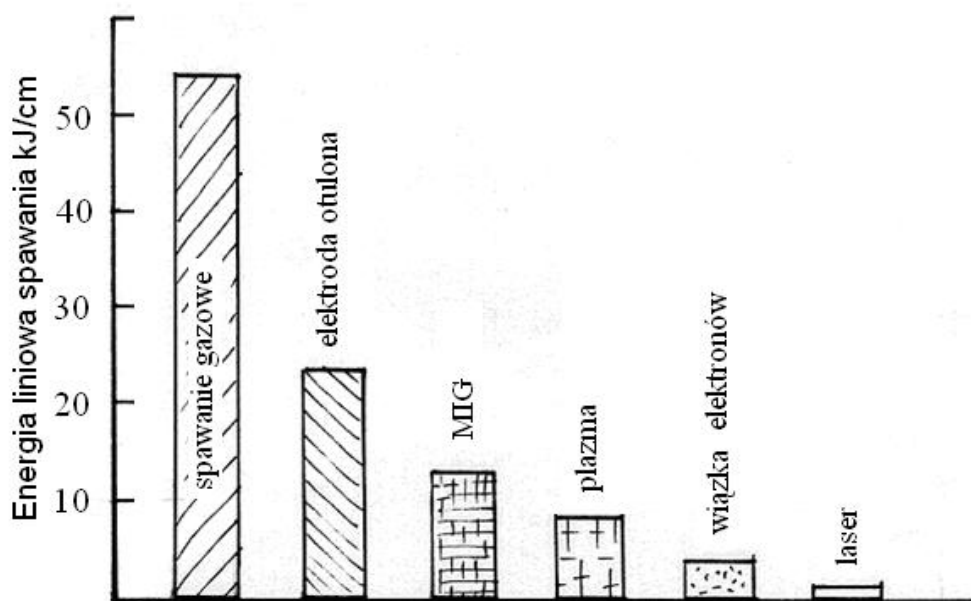
- a) własności fizycznych spawanego materiału, tj. jego współczynnika rozszerzalności liniowej, skurczu i wartości granicy plastyczności,
- b) sztywności konstrukcji,
- c) technologii spawania (sposób układania spoin, liczba warstw, temperatura wstępnego podgrzania).

Przy większych wartościach współczynnika rozszerzalności, większym skurczu i większej granicy plastyczności występują większe naprężenia spawalnicze. Zwiększenie sztywności konstrukcji powoduje również zwiększenie naprężeń. Podgrzanie materiału, zwiększenie liczby warstw oraz zastosowanie specjalnego sposobu ich układania prowadzi natomiast do zmniejszenia naprężeń spawalniczych.

Pole działania naprężeń zależy od wielkości SWC (Strefa Wpływu Ciepła). Jak to wykazano wcześniej istnieje związek między wartością naprężeń, a miejscowym nagraniem materiału. Dla prostych spoin pole działania naprężeń jest określone długością spoiny i szerokością SWC. Ponieważ długość spoiny jest z góry zadana, zatem pole działania naprężeń związane jest z szerokością tej strefy, która zależy od:

- koncentracji mocy źródła ciepła,
- przewodności cieplnej materiału,
- prędkości przesuwania się źródła ciepła, czyli prędkości spawania.

W materiałach o dużej przewodności cieplnej, SWC jest szersza. Zmniejsza się ona natomiast w miarę wzrostu prędkości spawania. Prędkość spawania zależy od koncentracji źródła ciepła, itp. i jest inna w przypadku spawania gazowego, w porównaniu ze spawaniem skoncentrowanym promieniem lasera. Przy małej prędkości spawania szerokość SWC jest duża i proporcjonalnie do niej występuje duże pole działania naprężeń. W rezultacie, pole naprężeń zależy od ilości ciepła wprowadzonego na jednostkę długości złącza, czyli na wartość tzw. energii liniowej spawania. Tak więc to źródło ciepła umożliwia spawanie z mniejszą energią liniową, które przy tej samej mocy pozwala osiągnąć większe prędkości spawania. Na rysunku 11.10. przedstawiono porównanie energii liniowej dla różnych metod spawania podczas łączenia blachy, o grubości 4 mm.



Rys. 10.10. Porównanie energii liniowej różnych metod spawania blachy stalowej o grubości 4mm

Największa energia liniowa występuje podczas spawania gazowego, o przeszło połowę jest mniejsza energia liniowa podczas spawania elektrodami otulonymi. Spawając metodą MIG osiąga się czterokrotnie mniejszą energię liniową niż podczas spawania gazowego. Jeszcze mniejszą wartość osiąga się w przypadku spawania plazmą, wiązką elektronów lub laserowo. Energia liniowa tych metod jest od około 7 do przeszło 100 razy mniejsza, dzięki czemu pole naprężeń jest najmniejsze.

Naprężenia spawalnicze powstałe podczas spawania deformują całą konstrukcję lub też wywołują miejscowe odkształcenie materiału w obrębie spoiny. Deformacja zachodzi w przypadku spawania konstrukcji o małej sztywności. Podczas spawania konstrukcji bardziej sztywnych dochodzi do miejscowego odkształcenia materiału w obrębie spoiny, w postaci odkształcenia plastycznego lub pęknięć. Pęknięcie występuje podczas spawania materiałów o niedostatecznej plastyczności. Ze względu na możliwość wystąpienia pęknięć w wyniku działania naprężeń spawalniczych, materiały takie jak stale o większej zawartości węgla, lub żeliwo, są uważane za trudno spawalne.

10.3.6. MOŻLIWOŚCI ZAPOBIEGANIA ZNIEKSZTAŁCENIOM KONSTRUKCJI SPAWANYCH

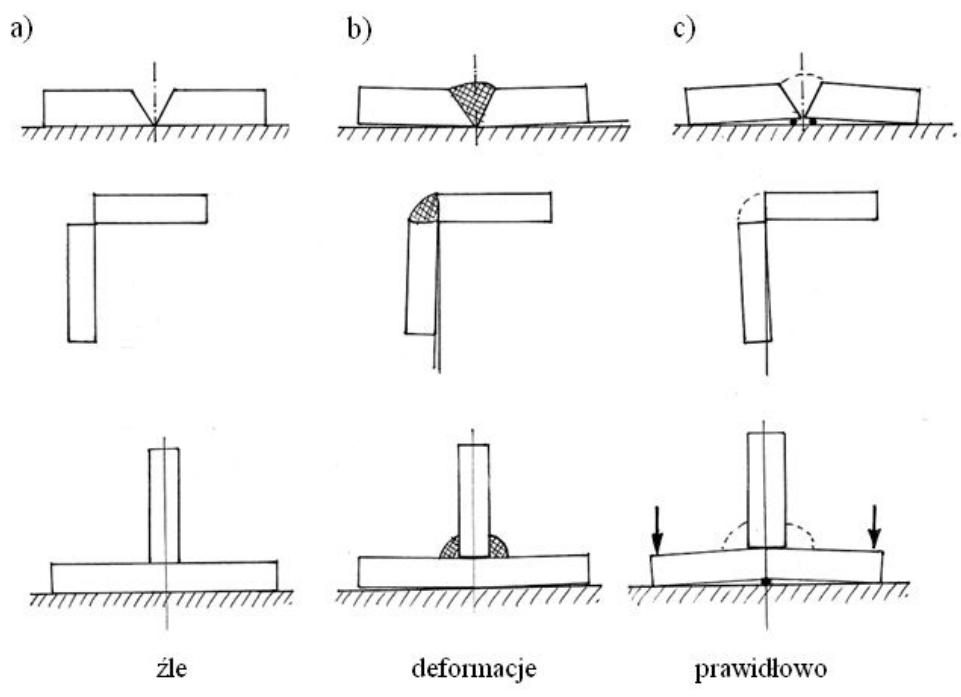
Zmniejszenie odkształceń spawalniczych możliwe jest przy uwzględnieniu następujących zaleceń, wskazówek, czynników i sposobów postępowania:

- należy wykonywać spoiny o wymiarach nie większych od przewidywanych w dokumentacji technicznej,
- konieczne jest dobre składowanie i dopasowanie części łączonych,
- należy wykonywać spoiny przerywane,
- najmniejsze dopuszczalne spoiny pachwinowe,

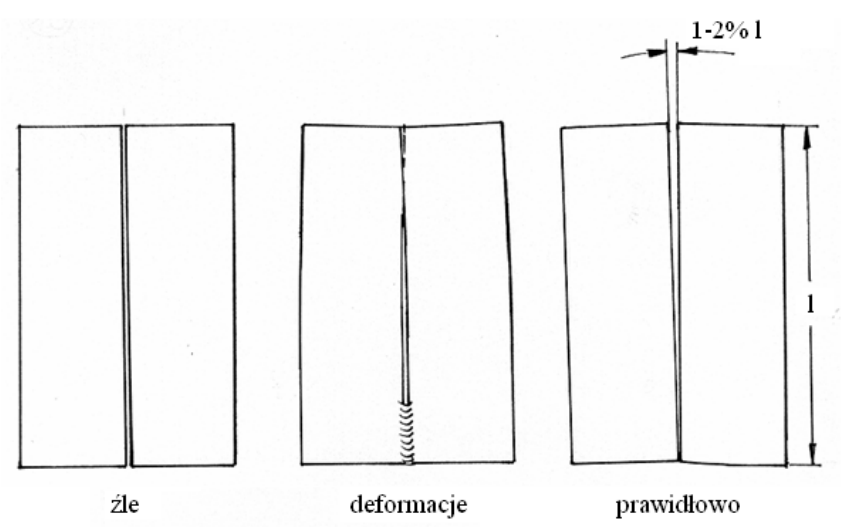
- minimalne odstępstwa w grani, minimalne kąty ukosowania rowka i małe nadlewy lica,
- kształty rowka wymagające jak najmniejszej ilości spoiwa, itp. X, 2U,
- spawanie na przemian z obu stron osi obojętnej przekroju, jeżeli możliwe za pomocą spoin wielowarstwowych,
- spawanie ściegami o małych przekrojach,
- metody spawania o dużej wydajności stapiania,
- metody spawania o dużych prędkościach spawania,
- metody z głębokim wtopieniem,
- zrównoważenie rozmieszczeń spoin wokół osi obojętnej spawanego przekroju,
- zrównoważone rozmieszczenie ciepła spawania przez odpowiedni dobór kolejności spawania,
- stosowanie zacisków, mocowań i podkładek dla zagwarantowania dopasowania i przylegania,
- spawanie w kierunku nie utwierdzonej części zespołu,
- wygięcie wstępne lub odchylenie zespołu w celu doprowadzenia ich przez skurcz do pożądanego kształtu,
- wykonywanie złączy w pierwszej kolejności wykazujących największe skrócenia,
- spawanie najmniej sztywnych sekcji w pierwszej kolejności, jeżeli zachodzi potrzeba można je wyprostować przed dalszym składaniem i spawaniem,
- taka kolejność składania podzespołów i zespołów, aby siły skurczu od wykonanych spoin ciągle się równoważyły wokół osi obojętnej przekroju sekcji.

Odkształcenia wybranych typów złączy, występujące w wyniku działania naprężeń spawalniczych i sposoby zabezpieczania się przed nimi, pokazano na rys. 10.11-10.13.

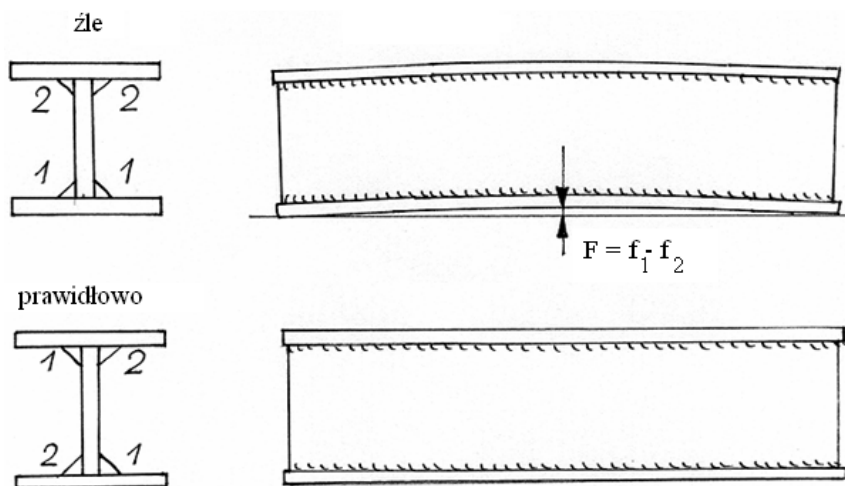
W celu zmniejszenia odkształcenia kąтового złączy przygotowanych na X, K oraz 2U należy, w miarę możliwości, spawać jednocześnie z dwóch stron z taką samą prędkością. Przy długich szwach wygięcie można zmniejszyć przez podział spoiny na odcinki przy pomocy spoin szepnych, a następnie spawać ściegiem krokowym, skokowym, krokowo-skokowym lub skokowo-krokowym. Ogólna zasada tych sposobów polega na tym, aby spawać kolejne odcinki po ostygnięciu sąsiednich (rys. 10.14).



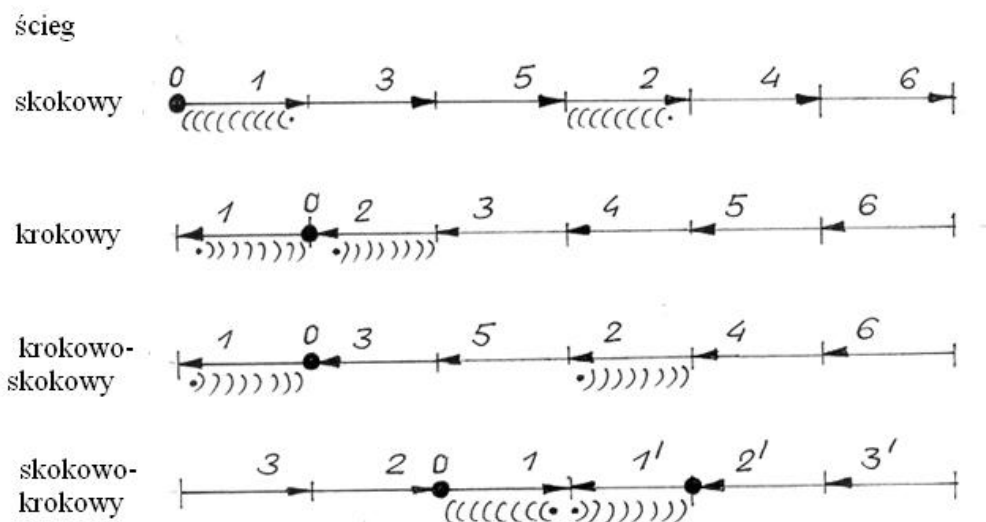
Rys. 10.11. Kątowa deformacja wybranych typów złączy oraz sposoby ułożenia zapobiegające deformacji



Rys. 10.12. Zachodzenie blach na siebie oraz sposób ustawienia blach zapobiegający takiej deformacji

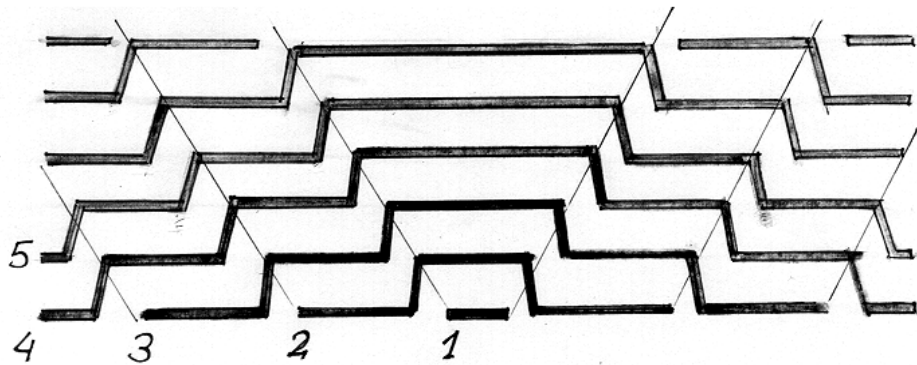


Rys. 10.13. Wpływ kolejności układania ściegów na odkształcenia złącza



Rys. 10.14. Rodzaje ściegów zmniejszających odkształcenia złączy spawanych

Podczas wykonywania spoin wielowarstwowych układanie każdej następnej warstwy powoduje wyżarzenie, a tym samym odprężenie warstwy poprzedniej. Najbardziej skuteczne w takich przypadkach jest układanie kolejnych warstw ściegiem schodkowym (rys. 10.15).



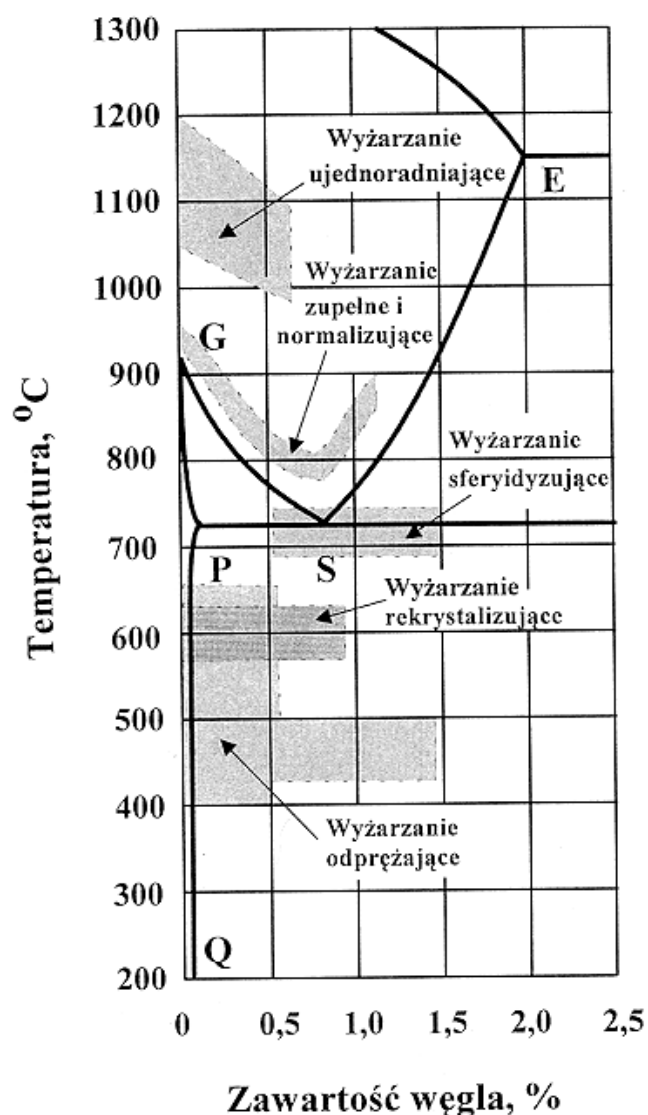
Rys. 10.15. Ścieg schodkowy, zmniejszający naprężenia spawalnicze podczas spawania wielowarstwowego

10.3.7. SPOSOBY USUWANIA NAPRĘŻEŃ SPAWALNICZYCH

Powstałe w wyniku spawania naprężenia spawalnicze można usunąć całkowicie jedynie przez obróbkę cieplną spawanych elementów (rys. 10.16). Można to osiągnąć przez wyżarzanie odprężające lub normalizujące.

Wyżarzanie odprężające powoduje usunięcie naprężeń bez zmian strukturalnych. W celu odprężenia konstrukcji nagrzewa się ją powoli do temperatury wyżarzania odprężającego, wytrzyma się w tej temperaturze, a następnie powoli studzi, najczęściej razem z piecem. Dla stali i żeliwa temperatura ta wynosi 650-660 °C. W tej temperaturze granica plastyczności stali jest tak niska (poniżej 60 MPa), że naprężenia wewnętrzne spowodują odkształcenie materiału i ulegną relaksacji.

Wyżarzanie normalizujące konstrukcji stalowych przeprowadza się w temperaturze nieco wyższej niż 910 °C. W procesie tym, oprócz relaksacji naprężeń następuje ujednoczenie i rozdrobnienie struktury. Normalizowanie jest wskazane dla grubych spoin jednowarstwowych.



Rys. 10.16. Zakres temperatur poszczególnych rodzajów wyżarzania naniesionych na układ żelazo-węgiel

W spoinach wielowarstwowych występuje samoistne wyżarzanie poprzednich warstw przez ich nagrzewanie podczas układania następnego ściegu.

Skutecznym sposobem zmniejszania naprężeń spawalniczych jest wstępne podgrzewanie konstrukcji. W złączach wstępnie podgrzewanych powstają znacznie mniejsze naprężenia spawalnicze, ponieważ po spawaniu razem ze spoiną kurczy się również cała konstrukcja. Temperatura wstępnego nagrzania dla stali waha się w granicach 200-370 °C. W przypadkach, w których ze względu na wielkość spawanej konstrukcji nie jest możliwe podgrzanie jej w całości, wystarczy ją podgrzać jedynie w wybranych miejscach. Przy ich wyborze należy posługiwać się tzw. „metodą klina”. Metoda ta polega na tym, że grzeje się te miejsca konstrukcji, które uległyby pęknięciu przy wbijaniu klina w miejscu spawania. Przedmiot podgrzany

w odpowiednich oznaczonych miejscach, stygnąc kurczy się w takim samym kierunku jak spoina, co powoduje zmniejszenie naprężeń spawalniczych.

Innym sposobem zmniejszania naprężeń spawalniczych w obszarze spoiny jest tzw. odprężanie niskotemperaturowe nazywane inaczej wyżarzaniem miejscowym. W procesie tym wykorzystywane jest zjawisko nakładania naprężeń spawalniczych z naprężeniami wywołanymi dodatkowym podgrzewaniem konstrukcji. Proces ten, mimo zmniejszania naprężeń w spoinie, ogólnie wpływa na zwiększenie sił wewnętrznych w złączu spawanym. Może to prowadzić do wzrostu ogólnych odkształceń konstrukcji, w przypadku spawania bardziej elastycznych konstrukcji. Odprężenie niskotemperaturowe stosowane jest w przypadku konstrukcji spawanych o dużych wymiarach, takich jak zbiorniki, poszycia kadłubów itp.

Oprócz obróbki cieplnej do odprężenia konstrukcji spawanych jest stosowane odprężanie mechaniczne. W metodzie tej stosuje się zjawisko sumowania się naprężeń zewnętrznych σ_z i naprężeń spawalniczych σ_s , których suma nie może osiągnąć w żadnym miejscu konstrukcji większych wartości od granicy plastyczności R_e :

$$\sigma_z + \sigma_s < R_e \quad (10.7)$$

W granicznym przypadku można przyjąć zależność (10.8), a po obciążeniu konstrukcji obowiązuje zależność (10.9).

$$\sigma_z + \sigma_s = R_e \quad (10.8)$$

$$\sigma_s = R_e - \sigma_z \quad (10.9)$$

Zakładając, że naprężenie zewnętrzne σ_z osiąga wartość R_e , otrzymuje się po odciążeniu konstrukcji $\sigma_s=0$. Zupełne usunięcie naprężeń spawalniczych za pomocą odprężenia mechanicznego nie jest możliwe ze względu na jednorodność własności plastycznych spawanego materiału w SWC oraz nierównomierny rozkład naprężeń. Ten sposób odprężania nadaje się zwłaszcza do zbiorników i rurociągów. Praktycznie realizuje się go w ten sposób, że zbiorniki lub rurociągi napełnia się wodą, a następnie podnosi ciśnienie do wartości bliskich granicy plastyczności i wytrzymuje przez krótki czas.

Pewną odmianą odprężenia mechanicznego jest odprężanie wibracyjne, polegające na wprowadzeniu konstrukcji w drgania o częstotliwości 60-100 Hz przy użyciu przymocowanego do niej wibratora. W czasie drgań wibratora w materiale konstrukcji pojawiają się niewielkie odkształcenia, w wyniku których następuje stabilizacja wymiarów. Proces stabilizacji wibracyjnej polega więc na „sprowokowaniu” pojawienia się odkształceń w konstrukcji obciążonej siłami zmiennymi, tj. po wprowadzeniu jej w drgania. Podobne zjawiska, tzn. samoistne odkształcenie, obserwuje się w czasie sezonowania naturalnego. Można więc stabilizację wibracyjną nazwać „szybkim sezonowaniem”. Obróbka ta nie powinna być stosowana w przypadkach, gdy jest wymagany znaczny stopień relaksacji naprężeń. W porównaniu z klasycznym i bardzo skutecznym odprężaniem cieplnym jest to metoda o wiele tańsza i mniej skomplikowana technicznie. Jednak, ze względu

na niski poziom naprężeń wywołanych wibrowaniem (do ok. 50 MPa), nie jest ona tak skuteczna w usuwaniu naprężeń jak metody cieplne.

Poprzez obróbkę cieplną lub mechaniczną można się jedynie pozbyć się naprężeń spawalniczych. Nieumiejętne jej przeprowadzenie natomiast może doprowadzić nie tylko do powiększenia naprężeń spawalniczych, ale również, w drastycznych przypadkach, spowodować powstanie dodatkowych odkształceń.

10.4. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

W ramach ćwiczenia będą zaprezentowane następujące próby:

- Podgrzanie kątownika wzdłuż linii prostopadłej do jego długości, zamocowanego jednostronnie w imadle i odczyt wychylenia na swobodnym końcu, w zależności od miejsca przyłożenia naprężenia. Należy zwrócić uwagę na zmianę kierunku wyginania kątownika po przekroczeniu przez palnik osi obojętnej.
- Spawanie czołowe dwóch płaskich próbek bez szepiania i ze szepianiem. Obserwacja zmian położenia krawędzi blach.
- Napawanie punktowe w środku kwadratowej próbki o grubości 3-4 mm, a po jej ostygnięciu przecinanie piłką ręczną od krawędzi do centrum nagrzania. Obserwacje wielkości szczeliny przy różnej odległości od punktu nagrzania.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy:

- naszkicować przebieg poszczególnych eksperymentów,
- wyjaśnić przebieg odkształcenia,
- opracować wnioski,

LITERATURA

- [1] PILARCZYK J., *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 1, WNT, Warszawa 2003.
- [2] KACZMAR W., *Techniki Wytwarzania. Spawalnictwo*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.
- [3] FERENC K., FERENC J., *Konstrukcje spawane – połączenia*, WNT, Warszawa 2006.
- [4] FERENC K., *Spawalnictwo*, WNT, Warszawa 2010.
- [5] MISTUR L., *Spawanie łukowe w osłonach gazowych według wytycznych krajowych i międzynarodowych*, Wydawnictwo KaBe, Krosno 2010.

11. BADANIA NIENISZCZĄCE ZŁĄCZY SPAJANYCH

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z:

- podstawowymi metodami badań nieniszczących złączy spawanych,
- stosowanymi urządzeniami,
- zakresem zastosowania.

11.1. WPROWADZENIE

Badania nieniszczące prowadzone są na różnych etapach wykonywania złączy spawanych: przed procesem spawania, bezpośrednio po procesie, jak również cyklicznie, podczas eksploatacji. Badania nieniszczące nie powodują pogorszenia własności materiałowych, użytkowych i funkcjonalnych badanego złącza spawanego.

Do podstawowych metod badań nieniszczących należą metody: wizualna, penetracyjna, magnetyczna (w tym magnetyczno-proszkowa), prądów wirowych, ultradźwiękowa i radiograficzna. W tabeli 11.1. przedstawiono symbole metod badań nieniszczących stosowane w nomenklaturze technicznej. Poszczególne metody badań pozwalają na wykrywanie różnych niezgodności, dlatego często do oceny złączy spawanych stosowana jest więcej niż jedna z metod. Badania nieniszczące muszą być prowadzone przez wykwalifikowany, poddany procedurze certyfikacji i posiadający aktualne uprawnienia personel.

Niezgodność spawalnicza to nieciągłość w spoinie lub odchylenie od zamierzonej geometrii, natomiast wada to niedopuszczalna niezgodność spawalnicza, która z punktu widzenia jakości dyskwalifikuje złącze spawane.

Tab. 11.1. Symbole metod badań nieniszczących wg PN-EN ISO 17635:2010

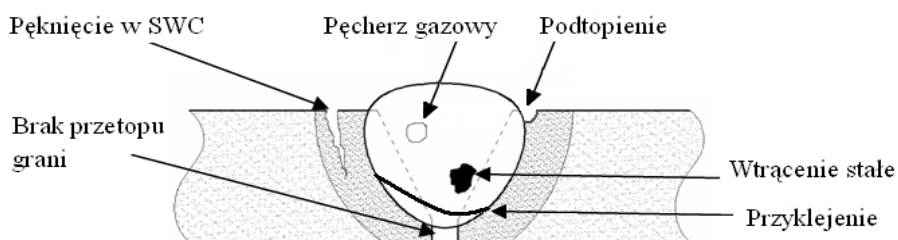
Metoda badań	Symbol
Badania prądami wirowymi	ET
Badania magnetyczno-proszkowe	MT
Badania penetracyjne	PT
Badania radiograficzne	RT
Badania ultradźwiękowe	UT
Badania wizualne	VT

W celu wybrania optymalnych dla określonego przypadku metod badań nieniszczących należy uwzględnić następujące czynniki:

- metodę spawania,
- materiał podstawowy (stan jego obróbki) i materiał dodatkowy,
- rodzaj złącza i jego wymiary,
- dostępność i stan powierzchni badanego elementu,
- poziomy jakości połączenia,

- rodzaje spodziewanych niezgodności spawalniczych i ich usytuowanie.

Wszystkie niezgodności można ogólnie podzielić na niezgodności powierzchniowe i wewnętrzne. Norma PN-EN ISO 6520:2009 klasyfikuje niezgodności w złączach spawanych na 6 grup: pęknięcia, pustki, wtrącenia stałe, przyklejenia i braki przetopu, niezgodności kształtu i wymiaru oraz niezgodności spawalnicze różnorodne (rys. 11.1).



Rys. 11.1. Przykłady niezgodności złączy spawanych

W tabeli 11.2 zamieszczono metody badania złączy spawanych do wykrywania powierzchniowych niezgodności spawalniczych, natomiast w tabeli 11.3 metody objętościowe do wykrywania niezgodności wewnętrznych.

Tab. 11.2. Ogólnie przyjęte metody wykrywania dostępnych powierzchniowych niezgodności spawalniczych (wg PN-EN ISO 17635:2010)

Materiał	Metoda badania
Stale ferrytyczne	VT VT oraz MT VT oraz PT VT oraz ET*
Stale austenityczne, aluminium, nikiel, miedź, tytan	VT VT oraz PT VT oraz ET*
* metoda stosowana w ograniczonym zakresie	

Dla złączy z częściowym przetopem i spoin pachwinowych nieprzetopiona grań może utrudnić zastosowanie metody objętościowej tj. metody ultradźwiękowej lub badań radiologicznych (tab. 11.3). W takim przypadku jakość wykonanej spoiny należy zapewnić poprzez kontrolę procesu spawania.

Tab. 11.3. Przyjęte metody wykrywania wewnętrznych niezgodności spawalniczych (wg PN-EN ISO 17635:2010)

Rodzaj materiału i złącza	Grubość [mm]		
	$T \leq 8$	$8 < T \leq 40$	$T > 40$
Złącza doczołowe ze stali ferrytycznej	RT lub UT*	RT lub UT	UT lub RT*
Złącza teowe ze stali ferrytycznej	UT* lub RT*	UT lub RT*	UT lub RT*
Złącza doczołowe ze stali austenitycznej	RT	RT lub UT*	RT lub UT*
Złącza teowe ze stali austenitycznej	UT* lub RT*	UT* i / lub RT*	UT* lub RT*
Złącza doczołowe z aluminium	RT	UT lub RT	RT lub UT
Złącza teowe z aluminium	UT* lub RT*	UT lub RT*	UT lub RT*
Złącza doczołowe ze stopów niklu i miedzi	RT	RT lub UT*	RT lub UT*
Złącza teowe ze stopów niklu i miedzi	UT* lub RT*	UT* lub RT*	UT* lub RT*
Złącza doczołowe z tytanu	RT	RT lub UT*	
Złącza teowe z tytanu	UT* lub RT*	UT lub RT*	

* metoda stosowana w ograniczonym zakresie

Klasyfikacja wskazań wyników badania uzależniona jest od wielkości wskazania, od którego z kolei zależy poziom badania i działania przeprowadzającego badanie.

Zależności pomiędzy wielkością wskazania, poziomem badania i konkretnym działaniem przedstawione na rys. 11.2, są określone przez normę PN-EN ISO 17635:2010, przy czym poziom badania odpowiada różnemu prawdopodobieństwu wykrycia niezgodności.

Wielkość wskazania	POZIOM BADANIA	DZIAŁANIA
↑	Poziom akceptacji (przydatność do stosowania)	Odrzucenie lub naprawa
	Poziom akceptacji (zapewnienie jakości)	Odrzucenie lub naprawa Dalsza ocena oparta na kryteriach przydatności
	Poziom rejestracji	Do stosowania
	Poziom oceny	Rejestracja wskazań
		Ocena wskazań pod względem wymiaru, rodzaju i innych danych charakterystycznych
		Nie wymaga się działań

Rys. 11.2. Klasyfikacja wskazań w badaniach nieniszczących (wg PN-EN ISO 17635:2010)

11.2. BADANIA WIZUALNE

Badania wizualne, ze względu na zastosowanie stosunkowo mało skomplikowanego wyposażenia dodatkowego, są podstawową metodą oceny połączeń spawanych. Istnieje nieformalny podział badań wizualnych na bezpośrednie i pośrednie. Badania bezpośrednie polegają na wzrokowej ocenie okiem nieuzbrojonym lub za pomocą przyrządów optycznych o powiększeniu nieprzekraczającym 20x, czy badane złącza spełniają określone normą wymagania.

Powierzchnie poddawane badaniom wizualnym powinny być wolne od zanieczyszczeń, tj.: produktów korozji, smarów, olejów, pozostałości żużla po procesie spawania. Oczyszczenie miejsca badania może odbywać się w sposób mechaniczny (szczotkowanie, szlifowanie tarczą lub papierem ściernym) lub chemicznie poprzez użycie rozpuszczalników. Badania te mogą zostać przeprowadzone na różnych etapach procesu spawania.

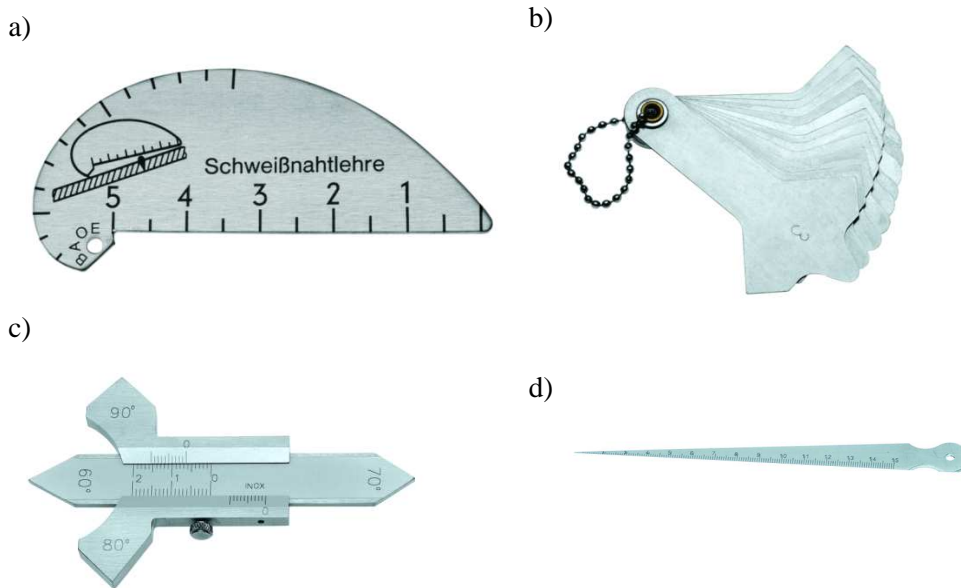
Oświetlenie badanej powierzchni powinno zapewnić dostateczną luminację i kontrast tła. Natężenie oświetlenia powinno wynosić minimalnie 350 lx (zalecane 500 lx).

W celu zapewnienia odpowiedniego kontrastu wiązka światła powinna być skierowana na badany obiekt pod kątem od 45° do 85°. Obserwacja badanego obiektu powinna być przeprowadzona z odległości nieprzekraczającej 600 mm.

Badania wizualne pozwalają na wykrywanie niezgodności zewnętrznych takich jak: pęknięcia, pęcherze powierzchniowe, braki przetopu, nadlewy lica, podtopienia, niedostateczne wypełnienie rowka spawalniczego, nadmierne rozpryski. Umożliwiają one pomiary geometryczne spoin: kąta rozwarcia w spoinach pachwinowych, wysokości nadlewu lica, szerokości rowka spawalniczego.

Podstawowymi przyrządami, mającymi zastosowanie podczas badań wizualnych spoin, są: sprawdziany, spoinomierze, lusterka typu dentystycznego, lupy, szkła powiększające.

Na rysunku 11.3 przedstawiono wyposażenie do wizualnych badań bezpośrednich tj. spoinomierz prosty o dokładności 0.5 mm do pomiaru grubości spoin pachwinowych (a), zestaw spoinomierzy składający się z zestawu 12 blaszek do pomiaru złączy pachwinowych o grubościach od 3 do 15 mm (b), spoinomierz spawalniczy z noniusem (c) do pomiaru nadlewu lica złączy doczołowych, spoin pachwinowych i kąta rozwarcia spoin pachwinowych oraz szczelinomierz do pomiaru odstępu rowka spawalniczego (d).



Rys. 11.3. Podstawowe wyposażenie do badań wizualnych spoin (za zgodą producenta Firmy Horex), wg PN-EN 970:1999

Ponadto, podczas wykonywania badań wizualnych stosuje się materiały dodatkowe w postaci luster, przyrządów do pomiaru promienia, materiału plastycznego do sporządzania odcisku spoiny i innych.

W przypadku badania połączeń niedostępnych (np. spoiny w rurociągach) znajdują zastosowanie badania pośrednie z wykorzystaniem endoskopów: fiberoskopów (z sondą elastyczną), boroskopów (z sondą sztywną) oraz kamer telewizyjnych.

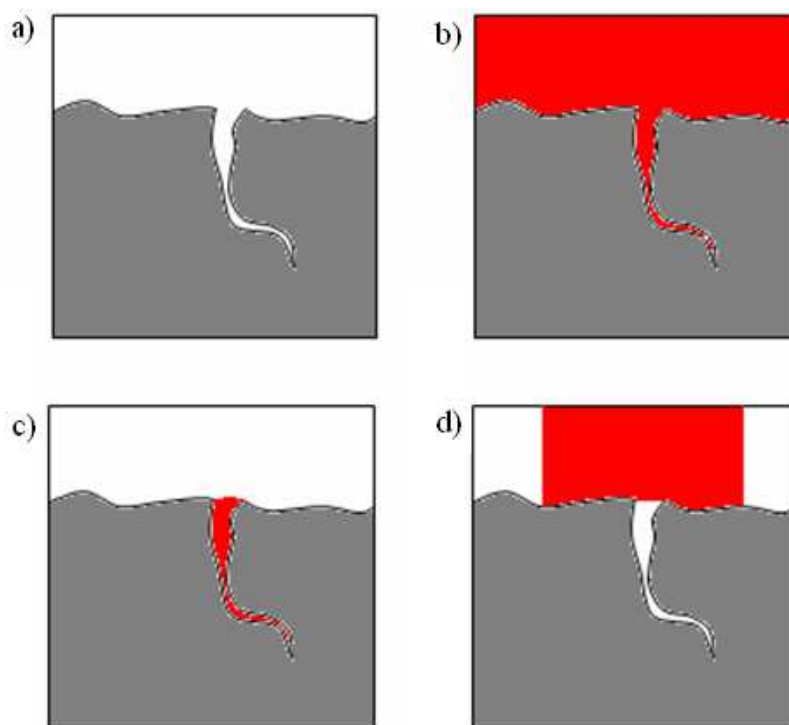
Badania wizualne spoin mają na celu sprawdzenie wymiarów geometrycznych spoin i stwierdzenia czy:

- dla spoin czołowych ewentualne wycieki, wklęsnięcia grani, przepalenia lub podtopienia grani mieszczą się w granicach ustalonych w normie,
- wszelkie podtopienia mieszczą się w granicach ustalonych w normie,
- wszelkie wady spawalnicze, takie jak pęknięcia, porowatości, które zostały wykryte, na powierzchni spoiny czy w strefie wpływu ciepła mieszczą w zakresie ustalonych kryteriów odbiorczych,

- ewentualne elementy mocujące (będące elementami oprzyrządowania lub płyty rozbiegowe, dobiegowe) nie spowodowały pęknięć w miejscach, w których były przytwierdzone.

11.3. BADANIA PENETRACYJNE

Badania penetracyjne umożliwiają wykrycie zewnętrznych niezgodności powierzchniowych spoin takich jak pęknięcia, przyklejenia i porowatości. W przeciwieństwie do metody magnetyczno-proszkowej badany obiekt może być wykonany z materiału nie będącego ferromagnetykiem. Metoda ta stosuje wnikanie penetrantu (barwnej cieczy o bardzo małym napięciu powierzchniowym i małej lepkości) w wąskie niezgodności powierzchniowe (rys. 11.4). Stosunkowo małe koszty materiałów do badań (penetranty, zmywacze oraz wywoływacze) oraz możliwość badania wielu materiałów metalicznych sprawiają, że metoda ta jest chętnie stosowana w praktyce.



Rys. 11.4. Schemat badania metodą penetracyjną: a) powierzchnia obiektu po oczyszczeniu, b) nasycenie penetrantem, c) obiekt po usunięciu nadmiaru penetrantu, d) wskazanie nieciągłości po naniesieniu wywoływacza

Penetranty mogą być barwne (czerwone lub niebieskie) lub fluorescencyjne (widoczne pod światłem UV). Ze względu na sposób usuwania nadmiaru penetrantu, dzielą się one na: zmywalne wodą (samoemulgujące), zmywalne emulgatorem (hydrofilowe – na bazie wody i lipofidowe na bazie oleju) oraz zmywalne rozpuszczalnikiem.

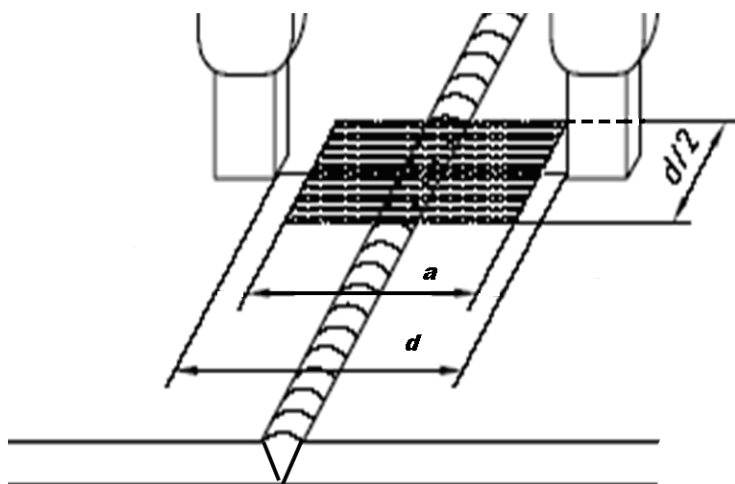
Niezgodności spawalnicze wykrywane metodą penetracyjną dzielą się na liniowe, dla których długość wskazania jest co najmniej trzy razy większa niż jego szerokość i nieliniowe gdy jest ona równa lub mniejsza.

Badana powierzchnia złącza spawanego powinna uwzględniać szerokość spoiny oraz po minimum 10 mm obszaru z każdej jej strony.

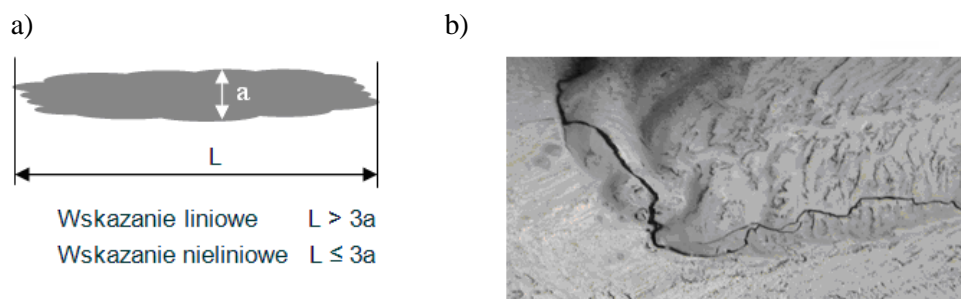
11.4. BADANIA MAGNETYCZNO – PROSZKOWE

Schemat badania pokazano na rys. 11.5. Badana powierzchnia powinna obejmować spoinę i przylegający materiał podstawowy (10 mm obustronnie). Uzyskane defektogramy proszkowe określa się jako wskazania liniowe i nieliniowe (rys. 11.6).

Badania magnetyczno – proszkowe pozwalają na wykrywanie niezgodności powierzchniowych w materiałach ferromagnetycznych. Jest to szybka i wiarygodna metoda wykrywania oraz bezpośredniej wizualizacji np. pęknięć czy przyklejeń spawalniczych. W trakcie badań należy pamiętać, że wykrywalność nieciągłości zależy od ich położenia względem kierunku linii sił pola magnetycznego.



Rys. 11.5. Schemat badania złącza spawanych metodą magnetyczno-proszkową z wykorzystaniem elektromagnesu lub magnesu stałego; d – odległość między biegunami elektromagnesu, a – szerokość badanego obszaru, $d/2$ – skok przesuwu elektromagnesu,



Wskazanie liniowe $L > 3a$
 Wskazanie nieliniowe $L \leq 3a$

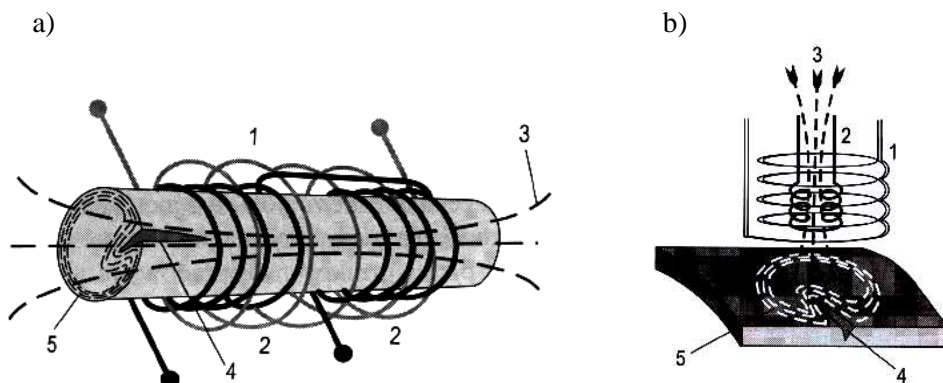
Rys. 11.6. Określenie defektogramu proszkowego (a) oraz defektogram proszkowy pęknięcia spoiny (b)

11.5. METODA PRĄDÓW WIROWYCH

Podstawą badań metodą prądów wirowych jest zjawisko indukowania prądu elektrycznego, który powstaje w wyniku zjawiska indukcji magnetycznej w materiale przewodzącym (rys. 11.7). W obiekcie znajdującym się w zewnętrznym, zmiennym polu magnetycznym powstają prądy wirowe, które równocześnie oddziałują na przetwornik wiroprądowy (zjawisko indukcji wzajemnej). Parametrami, mającymi wpływ na wykrywanie niezgodności, są: przewodność elektryczna materiału, jego przenikalność magnetyczna, wielkość i geometria badanego wyrobu oraz położenie przetwornika wiroprądowego (sondy) względem badanej spoiny. W praktyce głębokość wnikania prądów wirowych generowanych przez defektoskopy wiroprądowe nie przekracza 6 mm.

Przetwornik wiroprądowy zasilany jest przez przepływający przez niego prąd przemienny i równocześnie wytwarza prądy wirowe w badanej spoinie, które dzięki zjawisku indukcji wzajemnej oddziałują na pierwotne pole magnetyczne cewki zasilającej przetwornik, zmieniając jej charakterystykę impedancyjną. Niezgodności powierzchniowe i podpowierzchniowe takie jak pęknięcia, rozwarstwienia, pęcherze zmieniają lokalną rezystancję materiału i rozkład przepływających przez niego prądów wirowych. Podczas badania materiałów metodą prądów wirowych dokonywany jest pomiar impedancji cewki (amplitudy i kąta przesunięcia fazowego) w stosunku do pierwotnej impedancji cewki (którą mierzy się podczas operacji wzorcowania).

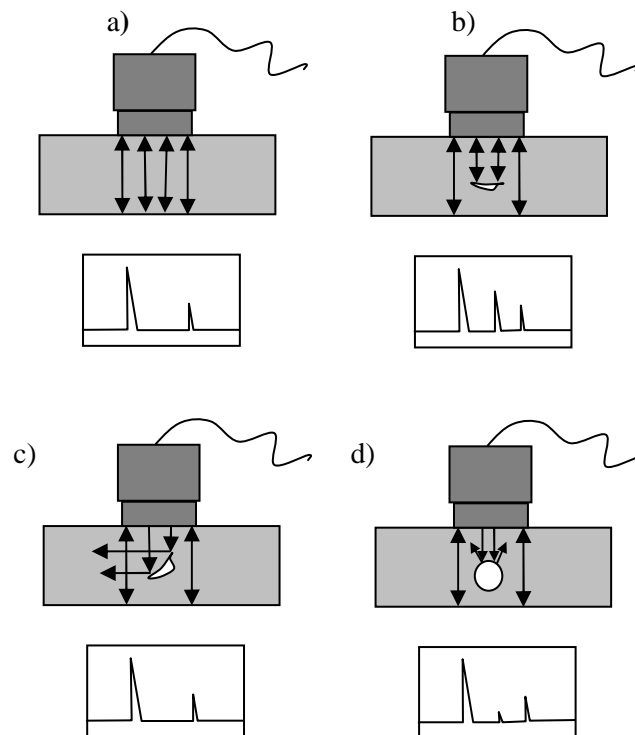
W zależności od przeznaczenia przetwornika wiroprądowego wyróżnia się przetworniki przelotowe (np. do badania rur i prętów – rys. 11.7a) i przetworniki stykowe, (do badania pęknięć w obiektach płaskich – rys. 11.7b). Inne konstrukcje przetworników, np. siodełkowe i widełkowe, przeznaczone są do kontroli wybranych części obiektów (np. spoin szyn kolejowych). Typowy przyrząd do wykonywania badań posiada ekran z rejestratorem fazy i amplitudy i powinien pracować w zakresie częstotliwości od 1-1000 kHz, przy czym dla typowych warunków pomiarowych częstotliwość sondy wynosi 100 kHz.



Rys. 11.7. Schemat przetworników wiroprądowych, a) przelotowy, b) stykowy (1 – uzwojenie wejściowe, 2 – uzwojenia wyjściowe, 3 – linie sił pola magnetycznego, 4 – nieciągłość w obiekcie, 5 – ścieżki przepływu prądów wirowych) [1]

11.6. BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE

Badania ultradźwiękowe coraz częściej stanowią podstawową technikę kontroli jakości wykonanych połączeń spawanych. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych możemy przeprowadzić zgodnie z normami lub też, w szczególnych przypadkach, według sporządzonych procedur badawczych, uwzględniających specyfikę kontrolowanych połączeń (materiał, kształt złącza i rodzaj spoin, grubość elementów, możliwość dostępu). Przystępując do badania należy również zwrócić uwagę na rodzaj niezgodności, które mogą wystąpić w badanym złączu oraz możliwości ich wykrycia z zastosowaniem wybranej metody. Przykłady wpływu geometrii i usytuowania niezgodności w materiale badanym na wskazania defektoskopu pokazano na rysunku 11.8.

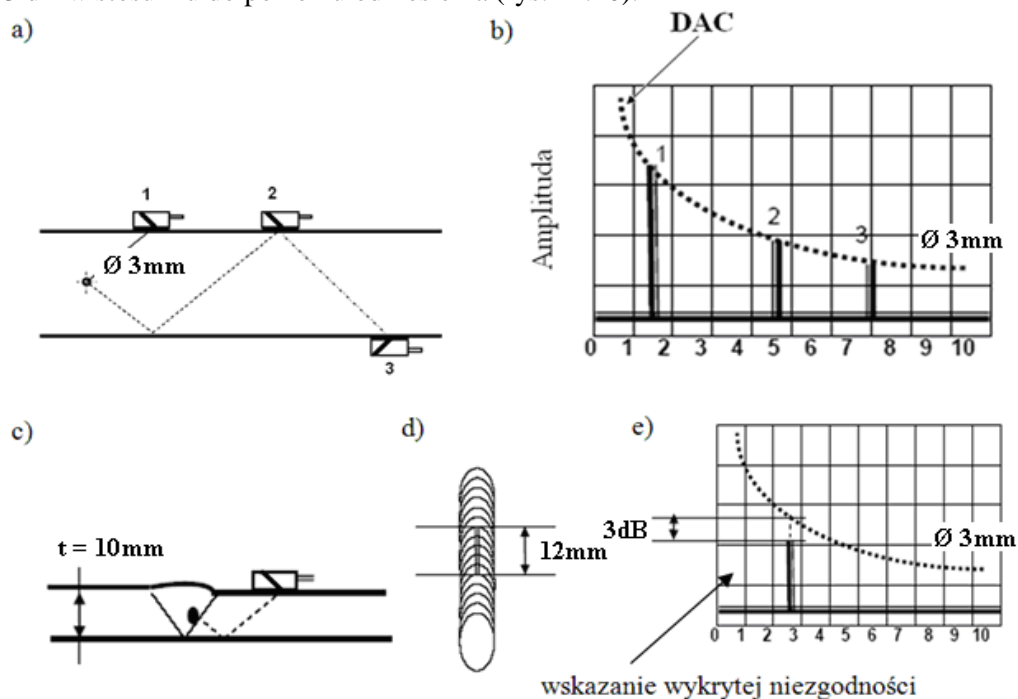


Rys. 11.8. Przykładowe obrazy defektoskopowe otrzymywane w badaniu materiałów metodą echa:
a) brak niezgodności, b) niezgodność prostopadła do kierunku propagacji fali,
c) niezgodność ułożona pod kątem 45° do kierunku propagacji fali, d) pustka/pęcherz

Badana objętość złącza obejmuje spoinę i materiał podstawowy po obu stronach spoiny, na szerokości co najmniej 10 mm lub na szerokości strefy wpływu ciepła – należy przyjąć szerokość większą. Należy zaznaczyć, że w badaniach ultradźwiękowych spoin najczęściej stosuje się głowice skośne, w których przetwornica jest usytuowana pod kątem np. 70° do badanej powierzchni, co umożliwia penetrację wewnętrznych obszarów spoiny (rys. 11.9a,c).

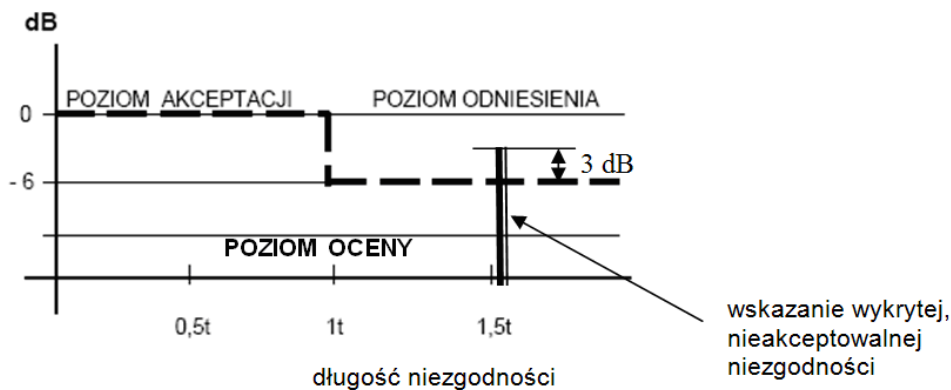
Przy ocenie wskazań dla celów akceptacji bierze się pod uwagę przede wszystkim długość wskazań i ich wysokość lub ocenę opartą na charakterystyce wskazań

i określeniu ich wielkości za pomocą obwiedni, na przykład założenie, że poziom odniesienia jest krzywą "odległość-amplituda" (krzywa DAC – z ang. Distance Amplitude Curve) dla otworu poprzecznego o średnicy 3 mm (rys. 11.9). Na rysunku 11.9c-e pokazano przykład oceny wykrytej niezgodności zgodnie z metodą DAC w doczołowym złączu spawanym blach o grubości $t = 10$ mm. Po wyznaczeniu krzywej poziomu odniesienia (impulsy ultradźwiękowe odbite od tworzącej otworu przelotowego o średnicy 3 mm, obserwowane z różnych odległości) zbadano złącze i wykryto niezgodność o długości 12 mm oraz maksymalnej wysokości wskazania 3 dB w stosunku do poziomu odniesienia (rys. 11.10).



Rys. 11.9. Skalowanie (a, b) i określenie wykrytej niezgodności (c, d, e) metodą DAC zgodnie z PN EN 1714:2002 oraz PN EN 1712:2001 (opis w tekście)

Wykorzystując diagram (rys. 11.10) z normy PN EN 1712:2001 stwierdzono, że wykryta niezgodność jest nieakceptowalna, ponieważ jej wskazanie o 3 dB przekracza poziom akceptacji przewidziany dla wyznaczonej długości niezgodności.

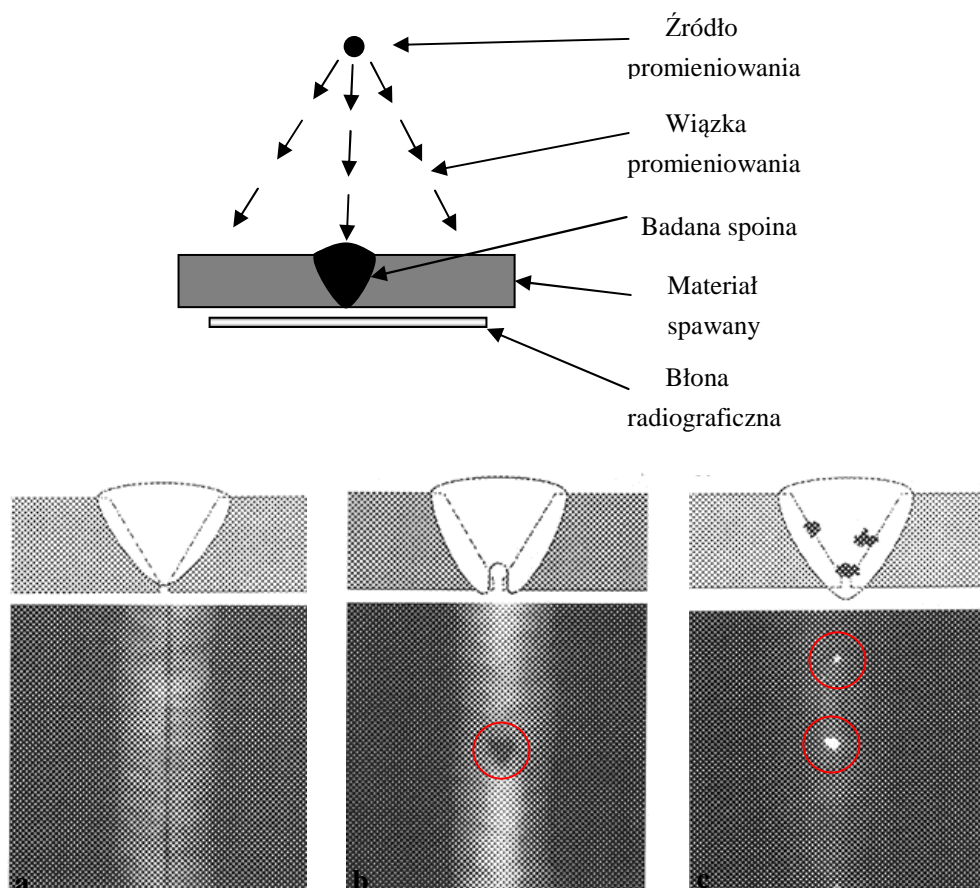


Rys. 11.10. Ocena wskazania wykrytej niezgodności z metodą DAC zgodnie z PN EN 1712:2001

11.7. BADANIA RADIOLOGICZNE

Badania radiologiczne należą do najbardziej rozpowszechnionych oraz wiarygodnych metod badań nieniszczących złączy spawanych. Metoda ta pozwala na uzyskanie informacji o stanie rzeczywistym obiektu (rys. 11.11).

Źródłem promieniowania, które przechodzi przez badany materiał mogą być lampy rentgenowskie (promieniowanie X) lub izotopy promieniotwórcze (promieniowanie γ).



Rys. 11.11. Schemat stanowiska oraz przykłady radiogramów,
a) spoina bez przetopionej grani, b) miejscowy brak przetopu, c) wtrącenia o dużej gęstości [1]

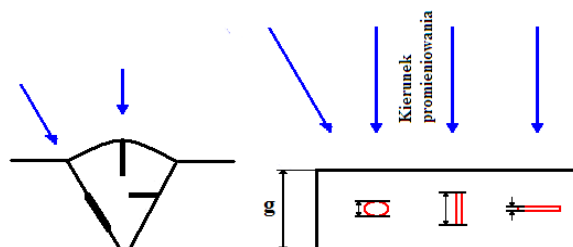
Jako detektory promieniowania stosowane są najczęściej błony radiograficzne, ekrany fluoryzujące, liczniki scyntylicyjne, komory jonizujące, kryształy półprzewodzące itp.

W zależności od zaplanowanego celu kontroli, grubości materiału oraz wymaganej czułości badania dobiera się odpowiednie źródło promieniowania.

Sama ocena wykrytych niezgodności spawalniczych polega na analizie obrazu uzyskanego na radiogramie w postaci miejsc o różnym stopniu zaciemnienia. Stopień zaciemnienia jest wynikiem zmiany natężenia promieniowania, który został w zależności od grubości nieciągłości pochłonięty przez materiał. Silniejsze zaciemnienie radiogramu wskazuje na ubytek grubości materiału prześwietlanego

i odwrotnie, oraz dodatkowo zawiera informację o wysokości nieciągłości w płaszczyźnie równoległej do kierunku rozchodzenia się promieniowania.

Omawiana metoda badań nieniszczących obejmuje szeroki zakres grubości łączonych elementów, począwszy od 1 mm wzwyż, przy czym na możliwość wykrycia wady ma wpływ jej usytuowanie względem kierunku promieniowania (rys. 11.12).



Rys. 11.12. Wpływ kierunku promieniowania na możliwość wykrycia wady

Metoda radiograficzna, z powodu szerokiego zastosowania w wykrywaniu niezgodności spawalniczych, została opisana w różnego rodzaju przepisach i normach europejskich dotyczących techniki wykonania badań, oceny badanych złączy spawanych, nazewnictwa jak i oprzyrządowania.

Wybór techniki badania zależy od kształtu badanych obiektów (płaskie, zakrzywione), grubości ścianki, jak i dostępu do złącza. Możliwość wykonania badań określoną metodą zależy także od posiadanej aparatury.

11.8. TECHNIKI RADIOGRAFICZNE W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU ZŁĄCZA

Techniki radiograficzne wg PN-EN 1435:2001 i PN-EN 444:1998 dzielą się na dwie klasy:

- a) klasę A – techniki podstawowe (o normalnej czułości),
- b) klasę B – techniki ulepszone (o podwyższonej czułości).

Techniki klasy B są stosowane wtedy, gdy niewystarczająca jest czułość techniki klasy A (np. przy badaniu bardzo odpowiedzialnych konstrukcji). Klasa badania jest ściśle związana z rodzajem konstrukcji oraz warunkami, w jakich jest eksploatowana. Niektóre badane konstrukcje, jak np. zbiorniki ciśnieniowe mają z góry ustaloną klasę badania.

W normie EN 5817:2007 określono trzy poziomy jakości złączy spawanych, według których dokonuje się oceny jakości złącza (tab. 11.4). Sama ocena złącza spawanego opiera się na zaklasyfikowaniu do jednego z trzech poziomów jakości badanego złącza oraz porównaniu tego poziomu z poziomem wymaganym. Dzięki takiemu porównaniu jest możliwe podjęcie decyzji o poprawności wykonania danego złącza lub też o konieczności jego naprawy.

Tab. 11.4. Poziomy jakości złączy spawanych

Oznaczenie	Poziom jakości
D	Wymagania łagodne
C	Wymagania średnie
B	Wymagania ostre

Spośród badań nieniszczących metoda radiograficzna zajmuje czołową pozycję przy ocenie złączy spawanych. Do zalet badania metodą radiograficzną możemy zaliczyć:

- a) brak ingerencji w materiał (podobnie jak i przy użyciu metody ultradźwiękowej),
- b) możliwość kontroli obiektów o różnorodnych kształtach, o nieskomplikowanej i dość skomplikowanej geometrii, od małych i cienkich do stosunkowo dużych (grubych), w szczególności odlewów o skomplikowanym kształcie, o różnych grubościach, w różnych miejscach,
- c) możliwość przyspieszenia procesu badań poprzez wprowadzenie automatyzacji procedur dokumentowania i analizy wyników badań przy użyciu systemu radiografii czasu rzeczywistego,
- d) jednoznaczną i pewną interpretację wyników badań,
- e) uzyskanie trwałego obrazu jakości złącza na błonie fotograficznej z badania, który może podlegać ponownej ocenie.

Do wad badań metodą radiograficzną należą:

- a) wysoki koszt badań. Jest on najwyższy ze wszystkich badań nieniszczących ze względu na wysoką cenę sprzętu wykorzystywanego do tych badań (np. aparatu rentgenowskiego), jak i samych materiałów pomocniczych (np. okładek wzmacniających, środków chemicznych),
- b) trudności w jednoznacznej interpretacji uzyskanych wyników przy pomiarach materiałów o nieregularnych kształtach jak i zróżnicowanej grubości,
- c) znaczna masa i wymiary aparatu rentgenowskiego,
- d) szkodliwy wpływ oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm ludzki – działanie mutagenne. Skutkiem tego jest wprowadzenie systemu ochrony radiologicznej, który zmusza do przestrzegania przepisów dotyczących ochrony radiologicznej w nawiązaniu do personelu wykonywającego badania radiograficzne, postępowania podczas przeprowadzania badań, transportu, pomieszczeń, w których są wykonywane prześwietlenia, przechowywania aparatury, jak i gromadzenia odpadów radiograficznych.

11.9. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

W ramach ćwiczenia, po zapoznaniu się z procedurą prowadzenia badań, będą zaprezentowane następujące próby:

- wizualne – wykonanie analizy wybranego złącza spawanego (doczołowego lub kąтового) w zakresie występowania niezgodności powierzchniowych oraz sporządzenie wniosków z przeprowadzonych obserwacji,
- penetracyjne – analiza wskazań defektografów uzyskanych dla próbek niemagnetycznych, posiadających niezgodności powierzchniowe oraz opis wyników badań,
- magnetyczno-proszkowe – wykonanie badania dla próbki po obróbce cieplnej (wykazującej pęknięcia hartownicze), określenie wpływu kierunku linii pola magnetycznego na wykrywalność szukanych niezgodności,
- prądów wirowych – przeprowadzenie badań wybranych złączy spawanych dla wybranych materiałów metodą wiroprądową, opis wyników pomiarów,
- ultradźwiękowe – zapoznanie się z wykorzystaniem wzorców oraz kalibracja urządzenia dla materiału o określonej prędkości rozchodzenia się dźwięku (np. stal lub aluminium), badanie obecności oraz głębokości występowania sztucznych niezgodności (np. otworów) w próbkach wzorcowych, analiza wskazań defektoskopu oraz ich interpretacja, badanie jakości zgrzein punktowych za pomocą nowoczesnego systemu pomiarowego (RSWA),
- radiograficzne – analiza radiogramów dla wybranych przypadków niezgodności spoin, ocena wykrywalności niezgodności pod kątem ich rodzaju i geometrii.

UWAGI DO SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy:

- opracować raport zawierający cel, zakres badań,
- opisać wykonane badania,
- przedstawić wyniki,
- opracować wnioski.

LITERATURA

- [1] LEWIŃSKA-ROMICKA A., *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*, WNT, Warszawa 2001.
[2] CZUCHRYJ J., DĘBSKI E., *Badania złączy spawanych według norm europejskich. Kontrola radiograficzna*, Wydawnictwo Biuro Gamma, Warszawa 2000.

WYKAZ NORM

- PN-EN ISO 6520:2009 Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach.
PN-EN ISO 17635:2010 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Zasady ogólne dotyczące metali.

PN-EN ISO 5817:2007 Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.

PN-EN 970:1999 Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne.

PN-EN 571-1:1999 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Zasady ogólne.

PN-EN ISO 3059:2005 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe. Warunki obserwacji.

PN-EN ISO 23277:2010. Badanie nieniszczące spoin. Badanie penetracyjne spoin. Poziomy akceptacji.

PN-EN ISO 17638:2010 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania magnetyczno-proszkowe złączy spawanych.

PN-EN 1712:2001 Badanie nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Poziomy akceptacji.

PN-EN 1714:2002 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badanie ultradźwiękowe złączy spawanych.

PN-EN 1435:2001 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania radiograficzne złączy spawanych.

PN-EN 444:1998 Badania nieniszczące - Ogólne zasady radiograficznych badań materiałów metalowych za pomocą promieniowania X i gamma.