SKRYPT

Kurs spawania stali elektrodami otulonymi

wg wytycznych Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach nr W-07/IS-01

grudzień 2009

Spis treści **str.**

1. Podstawowe pojęcia z elektrotechniki 5

2. Przegląd metod spajania 7
2.1. Klasyfikacja metod spajania 7
2.2. Charakterystyka wybranych metod spawania elektrycznego 8
2.3. Oznaczenia numeryczne metod spawania 10

3. Elektryczny łuk spawalniczy 11
3.1. Własności łuku spawalniczego 11
3.2. Ugięcie i elastyczność łuku 11

4. Urządzenia do spawania elektrycznego 12
4.1. Jednostanowiskowe źródła prądu do spawania elektrodami otulonymi 12
4.1.1. Transformatory spawalnicze 15
4.1.2. Prostowniki spawalnicze 19
4.1.3. Przetwornice spawalnicze 24
4.1.4. Prostowniki inwertorowe 25
4.2. Wielostanowiskowe źródła prądu do spawania elektrodami otulonymi 29
4.3. Sprzęt pomocniczy i przewody 30

5. Materiały podstawowe – stale 32
5.1. Charakterystyka żelaza 32
5.2. Charakterystyka stali niestopowych (węglowych) 32
5.3. Wpływ węgla i pierwiastków stopowych na własności stali 34
5.4. Znakowanie stali niestopowych i niskostopowych 35
5.5. Spawalność stali 37
5.6. Strefa wpływu ciepła 38

6. Materiały dodatkowe do spawania 39
6.1. Wiadomości ogólne 39
6.2. Charakterystyka elektrod otulonych 39
6.3. Znakowanie elektrod otulonych 41

7. Technika spawania elektrodą otuloną 43
7.1. Historia spawania łukowego 43
7.2. Charakterystyka spawania ręcznego elektrodą otuloną 43
7.3. Stanowisko do spawania ręcznego elektrodą otuloną 44
7.4. Parametry spawania 45
7.4.1. Rodzaj prądu spawania 45
7.4.2. Natężenie prądu spawania 46
7.4.3. Napięcie łuku 47
7.4.4. Prędkość spawania 47
7.4.5. Średnica elektrody 47
7.4.6. Pochylenie elektrody 48
7.5. Naprężenia i odkształcenia spawalnicze 49
7.6. Przygotowanie materiałów do spawania i zasady doboru elektrody 50
7.7. Sczepianie przed spawaniem 51
7.8. Podgrzewanie przed spawaniem 53
7.9. Technika spawania 54
7.10. Charakterystyka wybranych elektrod otulonych 56
7.11. Obróbka cieplna złączy spawanych 57

8. Oznaczanie spoin i pozycji spawania 59
8.1. Rodzaje złączy i spoin 59
8.2. Oznaczanie spoin na rysunkach technicznych 61
8.3. Pozycje spawania 62

9. Cięcie termiczne 63
9.1. Zasada i technika cięcia tlenowego 63
9.2. Zasada i technika cięcia plazmowego 65

10. Wady i niezgodności spoin oraz metody badań złączy spawanych 68
10.1. Klasyfikacja niezgodności spawalniczych 69
10.2. Poziomy jakości złączy spawanych 69
10.3. Rodzaje badań złączy spawanych i ich zastosowanie 70

11. System szkolenia i egzaminowania spawaczy 70
11.1. Klasyfikacja zakładów przemysłowych 70
11.2. Zharmonizowany system szkolenia spawaczy 72

12. Warunki bhp oraz ochrona ppoż. przy pracach spawalniczych 79

13. Pytania testowe 89

1. PODSTAWOWE POJĘCIA Z ELEKTROTECHNIKI

Prąd elektryczny jest to uporządkowany (skierowany) ruch ładunków elektrycznych.

Nośnikami prądu elektrycznego mogą być *elektrony*, *jony* bądź *dziury*, czyli puste miejsca po elektronach. W metalach swobodnie przemieszczają się jedynie elektrony, dlatego prąd elektryczny w metalach jest ruchem elektronów przewodnictwa. W półprzewodnikach nośnikami prądu są elektrony i dziury. W rozrzedzonych gazach nośnikami ładunku elektrycznego są elektrony i jony.

Natężenie prądu elektrycznego I definiuje się jako stosunek ładunku elektrycznego q, który przepływa przez poprzeczny przekrój przewodnika, do czasu t przepływu tego ładunku:

$$I = \frac{q}{t} \ [A]$$

Jednostką natężenia prądu elektrycznego w układzie SI jest amper [A], a symbolem I.

Napięcie elektryczne jest to różnica potencjałów elektrycznych między dwoma punktami. Napięcie elektryczne określa pracę, jaką wykona ładunek jednostkowy przechodząc między punktami, między którymi określa się napięcie. W przypadku źródła napięcia jest jego najważniejszym parametrem i określa zdolności źródła energii elektrycznej do wykonania pracy.

Jednostką napięcia w układzie SI jest wolt [V], a symbolem napięcia jest U.

Zależność między napięciem a natężeniem prądu przedstawia *prawo Ohma*, które brzmi:

Natężenie prądu płynącego w obwodzie jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia i odwrotnie proporcjonalne do oporu przewodnika, czyli

$$I = \frac{U}{R} \ [V]$$

gdzie: I-natężenie prądu [A], U-napięcie [V], R – rezystancja [Ω]

Rezystancja jest miarą oporu, z jakim element przeciwstawia się przepływowi prądu elektrycznego.

Zwyczajowo rezystancję oznacza się symbolem *R*.

Jednostką rezystancji w układzie SI jest om (Ω).

Rezystywność (rezystancja właściwa) jest to oporność przewodu elektrycznego o długości 1m i przekroju 1 mm^2 . Zazwyczaj oznaczana jest jako ρ (mała grecka litera rho). *Jednostką rezystywności* w układzie SI jest om*metr (1 Ωm). Rezystywność materiału ρ wyznaczyć można znając wymiary geometryczne i rezystancję danego materiału wg wzoru:

$$\rho = \frac{RS}{l} \ [\Omega m]$$

gdzie: R - rezystancja, S - pole przekroju poprzecznego elementu, l - długość elementu.

Wszystkie substancje dzielimy na *przewodniki* (te, które mają elektrony swobodne) i *izolatory*, (których wszystkie elektrony związane są z macierzystym jądrem, czyli brak elektronów swobodnych).

Aby w przewodniku popłynął prąd, musimy na jego końcach wytworzyć *różnicę potencjałów* np. połączyć z biegunami baterii. *Rzeczywisty kierunek przepływu prądu jest od" –„ do" +", umowny od" +" do" –„.*

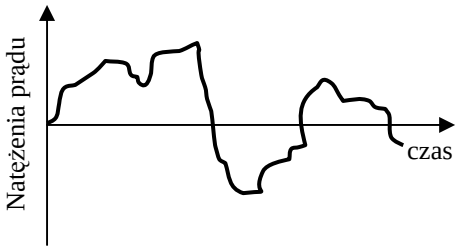
Prąd płynie tylko w obwodach zamkniętych, najprostszy, czyli elementarny obwód elektryczny składa się ze źródła napięcia, które jest różnicą potencjału elektrostatycznego pomiędzy dwoma punktami obwodu elektrycznego lub pola elektrycznego.

Prąd zmienny (AC) to taki, który nie jest stały co do wartości jego natężenia, które zmienia się w czasie (rys. 1).

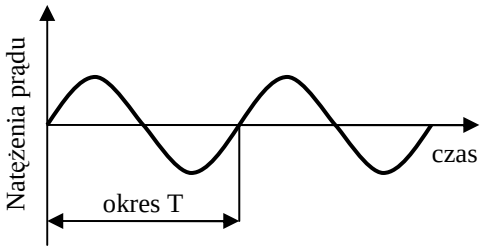
Prąd przemienny jest szczególnym przypadkiem prądu zmiennego (rys. 2). Dla przebiegu prądu przemiennego można wyznaczyć, co nie jest możliwe dla prądu zmiennego, jego okres T. Okres czyli taki fragment jego zmian w czasie, które z pewną częstotliwością powtarzają się. Dla prądu przemiennego każdy z okresów:

- musi być taki sam pod względem zmian wartości natężenia w czasie,

- wartości natężenia muszą być symetryczne względem wartości 0 (taki sam przebieg "pod" jak i "nad" osią 0), czyli wartość średnia za okres musi być równa 0.

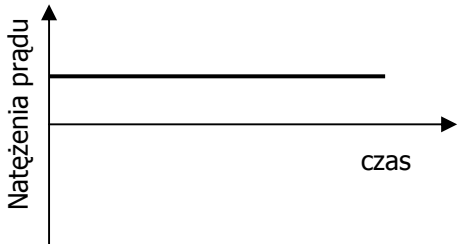


Rys. 1. Wykres prądu zmiennego



Rys. 2. Wykres prądu przemiennego

Prąd stały (DC) w odróżnieniu od prądu zmiennego i przemiennego charakteryzuje się stałą wartością napięcia oraz kierunku przepływu (rys. 3).



Rys. 3. Wykres prądu stałego

Natężenie prądu zmiennego bez przerwy ulega zmianie, między minimum a maksimum, przechodząc przez zero. Niewygodnie jest jednak obliczać cały zakres wartości w amperach, wprowadzono więc pojęcie natężenia skutecznego. Podobnie jak prąd stały, prąd przemienny podczas przechodzenia przez przewodnik również wydziela energię, zwykle na sposób ciepła.

Natężenie skuteczne prądu zmiennego jest więc równe natężeniu prądu stałego które powoduje wydzielenie takiej samej ilości energii. Innymi słowy, natężenie skuteczne 1 ampera prądu przemiennego wytwarza tyle samo ciepła co natężenie 1 ampera prądu stałego, przepływającego przez ten sam przewodnik. Równocześnie napięcie prądu przemiennego traktuje się w kategoriach napięcia skutecznego.

Praca W oraz moc P prądu elektrycznego wynosi:

a) dla prądu stałego:

$$W = q\,U = U\,I\,t\ [kWh]$$
$$P = W / t = U\,I\ [W]$$

b) dla prądu przemiennego jednofazowego:

$$W = q\,U = U\,I\,t\,\cos\varphi\ [kWh]$$
$$P = W / t = U\,I\,\cos\varphi\ [W]$$

c) dla prądu przemiennego trójfazowego:

$$W = q\,U = \sqrt{3}\,U\,I\,t\,\cos\varphi\ [kWh]$$
$$P = W / t = \sqrt{3}\,U\,I\,\cos\varphi\ [W]$$

gdzie:

U – napięcie prądu [V],
I – natężenie prądu [A],
t – czas [s]
cosφ – kąt przesunięcia fazowego (np. dla transformatorów wynosi ok. 0,6)

Moc podawana w urządzeniach elektrycznych nazywa się mocą znamionową. Powyższe wzory są wzorami na pracę i moc użyteczną prądu (bez uwzględniania strat)

Prąd przemienny posiada wiele cech czyniących go bardziej atrakcyjnym źródłem energii elektrycznej dla celów produkcyjnych, jak i w domu w odróżnieniu od prądu stałego. Najważniejszą cechą jest to, że napięcie lub natężenie mogą być zmieniane do jakiejkolwiek wybranej wartości, za pomocą prostego urządzenia elektromagnetycznego, zwanego *transformatorem.*

2. PRZEGLĄD METOD SPAJANIA

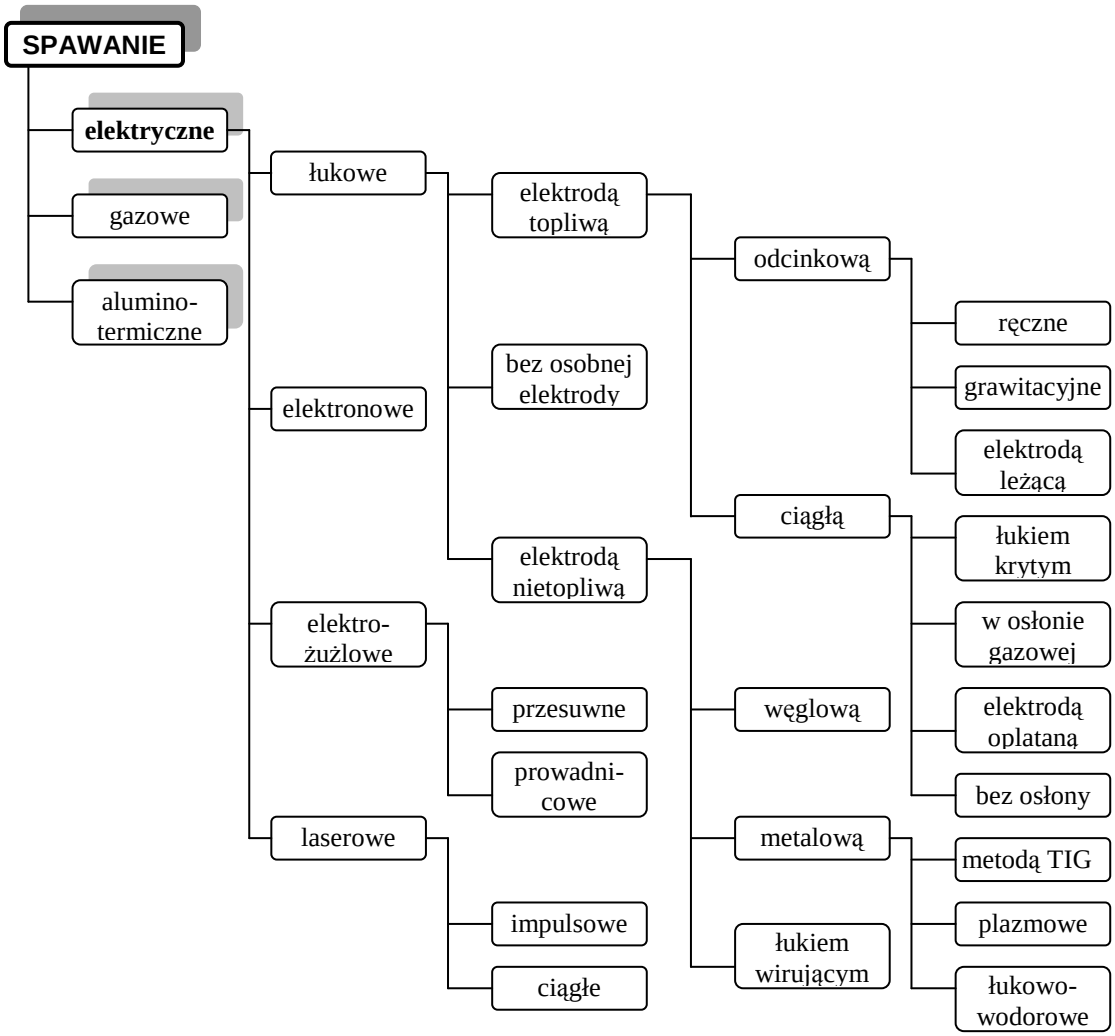
2.1. Klasyfikacja metod spajania

Spawalnictwo jest jednym z ważniejszych działów w technologii metali, obejmujących procesy trwałego łączenia przez doprowadzenie ciepła do miejsca, w którym ma powstać połączenie. Zależnie od przeznaczenia rozróżnia się następujące procesy stosowane do łączenia metali:

- *spajanie*, polegające na uzyskaniu ciągłości i jednostajności materiałowej w złączu,
- *nakładanie* (napawanie i natapianie), polegające na utworzeniu powłoki na powierzchni przedmiotu z zastosowaniem procesu spajania,
- *pokrewne spajaniu*, w którym stosuje się te same źródła ciepła oraz te same lub podobne urządzenia i przyrządy co w spawaniu, lecz dla celów specjalnych.

Procesy spajania dzielą się na trzy zasadnicze grupy:

- procesy spawania,
- procesy zgrzewania,
- procesy lutowania.



Rys. 4. Klasyfikacja metod spawania metali

Przy *spawaniu* materiał rodzimy ulega stopieniu w miejscu łączenia. Spawanie może być wykonywane z dodawaniem lub bez dodawania spoiwa. Jako spoiwa używa się zwykle takiego samego metalu co metal spawany. Przy spawaniu nie stosuje się docisku.

Zgrzewanie to sposób łączenia metali polegający na tym, że części metalowe w miejscu łączenia doprowadza się przez nagrzewanie do stanu plastycznego (ciastowatego) lub do nadtopienia powierzchni łączonych przekrojów (zgrzewanie iskrowe) i następnie łączy się je z zasto-

sowaniem odpowiedniej siły, np. przez kucie, prasowanie lub zgniatanie, bez używania metalu dodatkowego, tj. spoiwa. Zależnie od źródła ciepła, rozróżniamy następujące zasadnicze rodzaje zgrzewania: elektryczne oporowe, tarciowe, zgniotowe i wybuchowe.

Lutowanie jest procesem technologicznym polegającym na łączeniu części metalowych za pomocą specjalnych stopów, zwanych lutami, które mają niższą od lutowanych metali temperaturę topnienia. Rozróżniamy dwa rodzaje lutowania: *miękkie* (temperatura topnienia lutu do 450^0C) i *twarde* (temperatura topnienia lutu powyżej 450^0C).

Metal części łączonych nazywamy *materiałem (metalem) rodzimym*, materiał rodzimy łączy się bezpośrednio lub za pośrednictwem dodawanego do złącza metalu drutu (elektrody topliwej) zwanego *spoiwem*.

Zależnie od zastosowanego źródła ciepła rozróżnia się spawanie:

- *gazowe* - źródłem ciepła jest płomień gazowy,
- *elektryczne* - źródłem ciepła jest łuk elektryczny,
- *termitowe* - źródłem ciepła jest reakcja aluminiowo-termiczna.

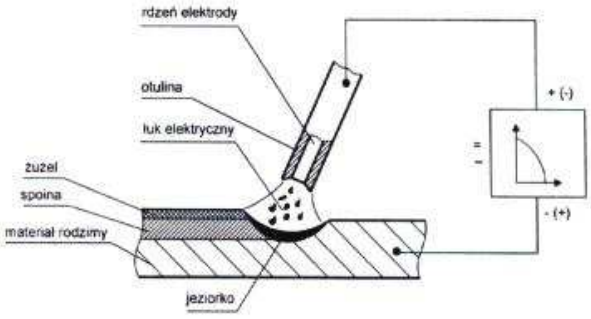
W ciągu swej historii spawanie rozwinęło się w szereg odrębnych metod (rys. 4), przy czym największym bogactwem odmian charakteryzuje się spawanie elektryczne.

Powstały metody spawania elektrycznego umożliwiającego mechanizację. Do najważniejszych z nich należy: spawanie łukiem krytym, spawanie elektrożużlowe oraz cały zespół metod, w których stopiony metal jest chroniony osłonami gazowymi, spawanie elektronowe w próżni, spawanie laserowe, spawanie plazmowe itp.

2.2. Charakterystyka wybranych metod spawania elektrycznego

Spawanie elektrodami otulonymi

Spawanie elektrodami otulonymi (MMA — Manual Metal Arc Welding) to najstarsza i najbardziej uniwersalna metoda spawania łukowego. Łuk elektryczny jarzy się między końcem pokrytej otuliną metalowej elektrody a spawanym materiałem (rys. 5). Krople stopionego metalu elektrody, przenoszone poprzez łuk do płynnego jeziorka spawanego metalu, są chronione przed wpływem atmosfery przez gazy wydzielające się wskutek rozkładu otuliny elektrody. Topiąca się otulina tworzy żużel, który chroni krzepnący metal spoiny przed wpływem atmosfery.

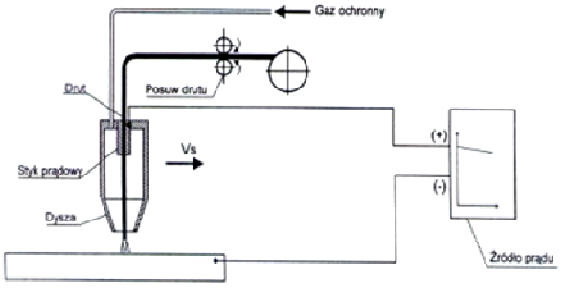


Rys. 5. Schemat spawania metodą MMA

Do podstawowych parametrów spawania elektrodą otuloną to: średnica elektrody (2-6 mm), natężenie prądu spawania (40-360 A), prędkość spawania (0,12-0,60 m/min).

Spawanie MIG/MAG

Zasada działania - łuk jarzy się między końcem elektrody a metalem rodzimym w linii złącza (rys. 6). Elektroda jest przesuwana ze stałą prędkością za pomocą silnika o nastawnej prędkości obrotowej. Prąd zależy od prędkości podawania elektrody.



Rys. 6. Schemat spawania metodą MIG/MAG

Spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonach gazowych (*MIG - spawanie w osłonach gazów obojętnych, MAG - spawanie w osłonach gazów aktywnych*), jest obecnie jedną z najpowszechniej stosowanych metod spawania konstrukcji.

Spawanie MIG/MAG polega na stapianiu materiału spawanego i materiału elektrody topliwej ciepłem łuku elektrycznego jarzącego się

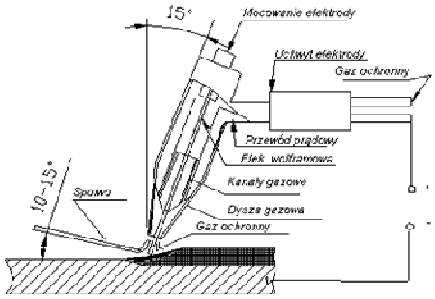
pomiędzy elektrodą topliwą i spawanym przedmiotem, w osłonie gazu obojętnego lub aktywnego. Metal spoiny formowany jest z metalu stapiającego się drutu elektrodowego i nadtopionych brzegów materiału spawanego.

Podstawowe gazy ochronne stosowane do spawania MIG/MAG to gazy obojętne argon, hel oraz gazy aktywne; CO_2, H_2, O_2, N_2, i NO, stosowane oddzielnie lub tylko jako dodatki do argonu czy helu. Elektroda topliwa w postaci drutu pełnego, zwykle o średnicy od 0,8 - 1,6 mm, podawana jest w sposób ciągły przez specjalny system podający, z prędkością w zakresie od 2,5 - 50 m/min. Palnik chłodzony może być wodą lub powietrzem.

Spawanie MIG/MAG prowadzone może być prądem stałym lub przemiennym we wszystkich pozycjach. Obecnie prawie wyłącznie stosuje się spawanie MIG/MAG prądem stałym z biegunowością dodatnią.

Spawanie TIG

Zasada działania - łuk jarzy się między końcem elektrody wolframowej a metalem rodzimym złącza (rys. 7). Elektroda się nie stapia, ,a spawacz utrzymuje stałą długość łuku. Wartość natężenia prądu jest nastawiana na źródle prądu. Spoiwo zwykle jest dostępne w postaci drutu. Doprowadza się je w miarę potrzeby do przedniego brzegu jeziorka. Jeziorko jest osłaniane przez gaz obojętny wypierający powietrze z obszaru łuku. Jako gaz ochronny najczęściej stosowany jest argon.



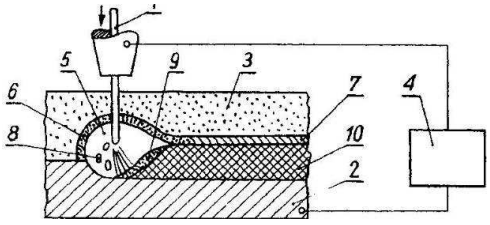
Rys. 7. Schemat spawania metodą TIG

Zajarzenie łuku odbywa się przez krótkotrwałe zwarcie elektrody nietopliwej z przedmiotem lub specjalną płytką startową i szybkie jej cofnięcie.

Drugim sposobem jest zastosowanie łuku pomocniczego między elektrodą a spawanym przedmiotem, utworzonego w wyniku przepływu prądu o małym natężeniu i wysokiej częstotliwości oraz wysokim napięciu. Gazy ochronne do spawania TIG, to gazy obojętne Ar i He lub ich mieszanki.

Spawanie łukiem krytym

Metoda spawania łukiem krytym (rys. 8), polega na wykorzystaniu ciepła wytworzonego w łuku elektrycznym, utrzymującym się między elektrodą i spawanym przedmiotem w przestrzeni odizolowanej od otaczającej atmosfery warstwą topnika.



Rys.8 Schemat spawania łukiem krytym

1 - drut elektrodowy,
2 - materiał podstawowy,
3 - warstwa topnika,
4 - źródło prądu spawania,
5 - komora gazowa,
6 - żużel ciekły,
7 - żużel skrzepnięty,
8 - krople spoiwa,
9 - jeziorko ciekłego metalu,
10 - ścieg spoiny (napoiny)

Topnik częściowo się stapia pod wpływem ciepła łuku i tworzy się ciekły żużel, częściowo zaś pozostaje w stanie nie zmienionym. Drut stanowiący elektrodę przesuwany jest za pomocą podajnika w miarę stapiania. Jeden biegun źródła prądu zasilającego łuk elektryczny podłączony jest do ślizgu, za pomocą którego następuje kontakt prądowy z elektrodą, drugi zaś ze spawanym przedmiotem.

Metoda spawania łukiem krytym ma wiele zalet, z których najważniejszymi są:

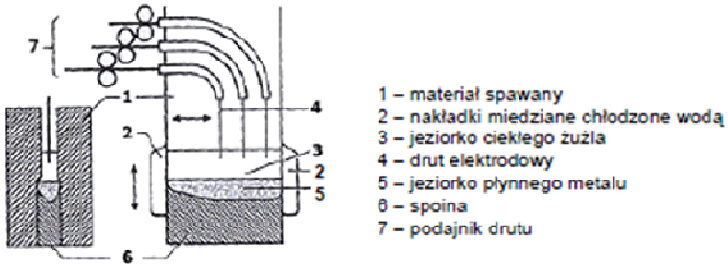
- duża prędkość spawania,

- możliwość stapiania dużej ilości stopiwa (istotne dla napawania),
- duża głębokość wtopienia,
- małe zużycie spoiwa ze względu na spawanie blach znacznej grubości bez ukosowania oraz stosowania rowków o małym przekroju przy ukosowaniu,
- dobra jakość wykonanej spoiny,
- mały rozprysk metalu podczas spawania,
- korzystne warunki pracy, ponieważ łuk jest niewidoczny i nie oślepia obsługi, a ilość wydzielających się gazów podczas spawania jest mała.

Spawanie łukiem krytym nie wymaga od operatorów umiejętności manualnych, jak przy spawaniu ręcznym.

Spawanie elektrożużlowe

W pierwszej fazie procesu spawania elektrożużlowego (ESW — Electroslag Welding) jest zajarzany łuk elektryczny między elektrodą i spawanym materiałem. Topnik przykrywający obszar złącza zaczyna się topić i powstaje jeziorko płynnego żużla, którego głębokość się powiększa. Gdy temperatura żużla wzrośnie i tym samym zwiększy się jego przewodność elektryczna, łuk zgaśnie, a prąd elektryczny będzie przepływał przez płynny żużel. Ponieważ płynny żużel posiada pewną rezystancję, w wyniku przepływu prądu powstaje energia cieplna niezbędna do prowadzenia procesu spawania (rys. 9).



Rys. 9. Zasada spawania elektrożużlowego

Spoina powstaje w przestrzeni ograniczonej stałymi lub ruchomymi, chłodzonymi wodą, miedzianymi nakładkami oraz powierzchniami złącza spawanych materiałów. W trakcie procesu głowica spawalnicza przemieszcza się pionowo w górę. W zależności od grubości spawanych materiałów może być stosowana jedna lub więcej topliwych elektrod. Jeżeli materiał jest bardzo gruby elektroda może być prowadzona ruchem wahadłowym.

Zalety metody:

- wysoka wydajność,
- niski koszt przygotowania złącza,
- wykonywanie złącza w jednym przejściu, bez względu na grubość spawanych materiałów,
- brak kątowych odkształceń złączy czołowych,
- niewielkie naprężenia poprzeczne,
- zminimalizowane ryzyko powstawania pęknięć wodorowych.

Słabą stroną tej metody jest to, że używane w niej duże ilości energii przyczyniają się do powolnego stygnięcia złącza, w wyniku czego w strefie wpływu ciepła występuje duży rozrost ziarna. Udarność materiału w strefie wpływu ciepła jest niewystarczająca, aby spełnić wymagania stawiane konstrukcjom spawanym z gwarantowaną odpornością na pęknięcia w niskich temperaturach, czyli z odpornością na pęknięcia kruche.

2.3. Oznaczenia numeryczne metod spawania

Oznaczenia numeryczne oraz nazwy metod spawania, zgrzewania i lutowania ustala norma PN-EN 24063:1993. Oznaczenia te są stosowane głównie do umownego przedstawiania w/w połączeń na rysunkach.

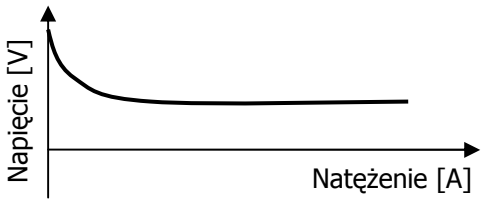
111 – spawanie łukowe elektrodą otuloną,
114 – spawanie łukowe drutem elektrodowym proszkowym samoosłonowym,
121 – spawanie łukiem krytym drutem elektrodowym,

131 – spawanie łukowe w osłonie gazu obojętnego elektrodą topliwą (spawanie metodą MIG),
135 – spawanie łukowe w osłonie gazu aktywnego elektrodą topliwą (spawanie metodą MAG),
136 – spawanie łukowe drutem elektrodowym proszkowym w atmosferze gazu aktywnego,
137 – spawanie łukowe drutem elektrodowym proszkowym w atmosferze gazu obojętnego,
141 – spawanie łukowe elektrodą wolframową (spawanie metodą TIG),
151 – spawanie plazmowe w osłonie gazu obojętnego,
311 – spawanie acetylenowo-tlenowe,
912 – lutowanie twarde płomieniowe,
942 – lutowanie miękkie płomieniowe,
971 – lutospawanie płomieniowe.

3. ELEKTRYCZNY ŁUK SPAWALNICZY

3.1. Własności łuku spawalniczego

Łuk spawalniczy jest wyładowaniem elektrycznym w atmosferze mieszaniny gazów i par metali przy dużej gęstości prądu i niskim napięciu pomiędzy elektrodami. Jest to zwykle wyładowanie niestabilne, zakłócone przez krople roztopionego metalu przenoszone z elektrody do jeziorka spoiny. Przewodność łuku zależy od stopnia zjonizowania gazu, tj. ilości elektronów i jonów powstających w wyniku jonizacji termicznej. Utworzona w wyniku jonizacji mieszanina atomów, elektronów i jonów jest nazywana plazmą.



Rys. 10. Charakterystyka statyczna łuku

Jonizacja przestrzeni łukowej następuje dzięki składnikom jonizującym zawartych w otulinie elektrody lub w wyniku działania wysokiej temperatury. Składnikami jonizującymi zawartymi w otulinie są: związki wapnia, potasu, sodu i tytanu.

Łuk spawalniczy jest nieliniowym elementem elektrycznego obwodu spawalniczego, a jego charakterystykę statyczną, tj. zależność napięcia w funkcji prądu w warunkach ustalonych przedstawiono na rys. 10. Temperatura w łuku elektrycznym jest uzależniona od rodzaju prądu i jego biegunowości. Przy prądzie stałym temperatura na biegunie dodatnim (anodzie) wynosi ok. 2600^0C, a na biegunie ujemnym (katodzie) 2100^0C.

Przy prądzie przemiennym temperatura na obu biegunach ma wartość jednakową i wynosi 2200-2300^0C.

3.2. Ugięcie i elastyczność łuku

Prąd elektryczny płynący w przewodnikach wytwarza wokół nich pole magnetyczne. W procesie spawania prąd płynie w przewodach spawalniczych, przedmiocie spawanym, łuku elektrycznym i elektrodzie. Wszystkie te elementy są przewodnikami, wokół których wytwarza się pole magnetyczne.

Jarzący się łuk elektryczny dąży do zachowania kierunku zgodnie z osią elektrody, czyli jest przedłużeniem elektrody. Przy spawaniu prądem stałym w pewnych warunkach następuje *ugięcie łuku spawalniczego*. Przyczyną tego ugięcia jest nierównomierny rozkład sił pola magnetycznego wokół łuku - łuk ugnie się w kierunku rozrzedzenia sił pola magnetycznego (rys. 11).

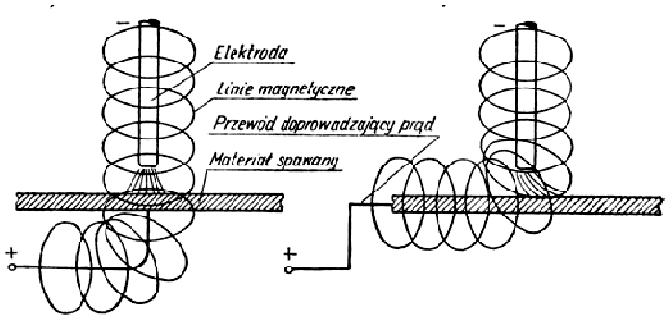
Im większe będzie natężenie prądu spawania tym większe ugięcie łuku, bowiem pole magnetyczne wokół łuku jest silniejsze.

Na zaburzenia pola magnetycznego, a tym samym na łuk elektryczny wpływają: kształt przedmiotu spawanego, występujące w przedmiocie spawanym nieciągłości (rowek pod spoiną) oraz masywne części stalowe znajdujące się w pobliżu łuku. Ugięcie łuku lub nawet zgaszenie może również spowodować silny podmuch powietrza.

Przy prądzie stałym wielkość ugięcia wzrasta ze wzrostem natężenia prądu. Przy spawaniu prądem przemiennym ugięcie łuku jest słabe, ponieważ przemienne pole magnetyczne wytwarza prądy wirowe, które przeciwdziałają ugięciu łuku.

Aby zapobiec ugięciu łuku elektrycznego należy:

- spawać możliwie krótkim łukiem,
- odpowiednio przemieszczać masę prądu spawalniczego,
- prowadzić elektrodę pod odpowiednim kątem,
- zachować ciągłość prądową materiału spawanego przez sczepianie.



Rys.11. Ugięcie łuku pod wpływem pól magnetycznych w procesie spawania

Łuk elektryczny w procesie spawania oprócz ugięcia posiada jeszcze tzw. elastyczność. *Elastyczność łuku elektrycznego jest to zdolność wydłużania się łuku bez zgaśnięcia*. Zjawisko to jest szczególnie istotne przy wykonywaniu przetopów w złączach spawanych. Małą elastyczność łuku dają elektrody węglowe, goły drut oraz elektrody otulone zasadowe bez składników jonizujących. Elektrody otulone posiadające w otulinie składniki jonizujące dają dużą elastyczność łuku.

Elastyczność łuku elektrycznego zależy od napięcia, natężenia, rodzaju otuliny na elektrodzie oraz od przewodności cieplnej i elektrycznej materiału:

- im większe jest napięcie biegu jałowego, tym większa jest elastyczność łuku,
- im wyższe natężenie prądu spawania, tym większa jest elastyczność łuku,
- im więcej składników jonizujących w otulinie elektrody i im grubsza otulina, tym większa jest elastyczność łuku,
- ze wzrostem przewodności cieplnej i elektrycznej materiału spawanego elastyczność łuku maleje.

4. URZĄDZENIA DO SPAWANIA ELEKTRYCZNEGO

Urządzenie do spawania elektrodami otulonymi składa się z zasilacza energii elektrycznej, przewodów prądu spawania oraz uchwytu elektrody. Głównym elementem spawalniczego obwodu elektrycznego jest zasilacz energii elektrycznej o tak dobranych charakterystykach statycznych i dynamicznych, aby we współpracy z odbiornikiem nieliniowym, jakim jest łuk spawalniczy, powstawał system stabilny pod względem energetycznym - niezbędny do prowadzenia prawidłowego procesu spawania.

Do zasilania łuku spawalniczego przy spawaniu elektrodami otulonymi w zależności od wymaganej technologii spawania *są stosowane zasilacze prądu przemiennego - transformatory lub prądu stałego:*

- *prostowniki spawalnicze,*
- *przetwornice spawalnicze - elektromechaniczne,*
- *prostowniki spawalnicze z wewnętrzną przemianą częstotliwości - inwersyjne*.

Odbiornikiem energii z tych źródeł jest łuk elektryczny o nieliniowej charakterystyce statycznej (rys. 10). W łuku elektrycznym następuje przetworzenie energii elektrycznej w energię cieplną, a powstający strumień ciepła służy do nagrzewania i topienia metalu w miejscu spawania.

4.1. Jednostanowiskowe źródła prądu do spawania elektrodami otulonymi

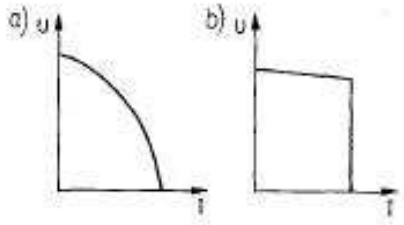
Źródła prądu do spawania służą do przemiany energii elektrycznej o parametrach sieci zasilającej na energię elektryczną o parametrach niezbędnych do długotrwałego i stabilnego

przebiegu procesu spawalniczego. Rodzaj prądu spawania, zastosowany system przekształcania parametrów strumienia energii oraz rodzaj charakterystyki statycznej zależą od zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego zasilacza.

Najważniejsze *parametry zasilaczy łuku spawalniczego* to:

1. Rodzaj charakterystyki zewnętrznej (statycznej); jednym z warunków stabilności procesu spawania elektrodami otulonymi jest opadająca lub stałoprądowa charakterystyka zewnętrzna zasilacza (rys. 12).

Według normy PN-EN 60974-1:1990 charakterystyka zewnętrzna jest uznawana za opadającą, jeżeli w określonym zakresie spawania przy wzroście natężenia prądu napięcie obniża się bardziej niż 7 V/100 A.



Rys. 12. Charakterystyki zewnętrzne (statyczne) zasilaczy: a) opadająca, b) stałoprądowa

2. *Umowne napięcie w stanie obciążenia* jest to napięcie na zaciskach wyjściowych zasilacza podczas przepływu prądu, o wartościach przyjmowanych dla różnych metod spawania zgodnie z tabelą 1.

Tabela 1. Umowne napięcie w stanie obciążenia

Metoda spawania	**Prąd obciążenia**	**Umowne napięcie w stanie obciążenia**
	[A]	**[V]**
Spawanie elektrodami otulonymi	**do 600 powyżej 600**	**$U_2 = 20 + 0{,}04I_2$ 44**
Spawanie metodą TIG	do 600 powyżej 600	$U_2 = 10 + 0{,}04I_2$ 34
Spawanie metodą MIG/MAG	do 600 powyżej 600	$U_2 = 14 + 0{,}05I_2$ 44
Spawanie łukiem krytym przy charakterystyce opadającej	do 600 powyżej 600	$U_2 = 20 + 0{,}04I_2$ 44
Spawanie łukiem krytym przy charakterystyce płaskiej	do 600 powyżej 600	$U_2 = 14 + 0{,}05I_2$ 44

3. *Napięcie w stanie jałowym* jest to napięcie na zaciskach wyjściowych zasilacza przy otwartym obwodzie spawania, tzn. gdy prąd spawania jest równy zeru.

4. *Znamionowy prąd spawania* - jest to największy prąd przepływający w obwodzie spawalniczym, jaki może dostarczyć zasilacz przy umownym napięciu roboczym, znamionowym współczynniku obciążenia i przy zachowaniu dopuszczalnych przyrostów temperatury podstawowych elementów.

5. *Znamionowy cykl pracy*, współczynnik obciążenia. Proces spawalniczy ma charakter nieciągły, przerywany z uwagi na konieczność wymiany elektrod, odbijanie żużla, ocenę wykonanego połączenia itp. Z tego względu zasilacze łuku są projektowane pod względem termicznym, tj. przyrostów temperatur głównych elementów obwodu spawalniczego, na pracę przerywaną. Najczęściej stosowany współczynnik obciążenia w zasilaczach większej mocy wynosi 60% przy 10-minutowym cyklu pracy, tzn. 6 min spawania i 4 min przerwy. W zasilaczach mniejszej mocy stosuje się 20% współczynnik obciążenia, też przy cyklu 10-

minutowym, tj. 2 min spawania i 8 min przerwy. W ostatnim czasie wiele firm stosuje 35% współczynnik obciążenia również przy cyklu 10-minutowym. Współczynnik obciążenia jest określany zależnością:

$$X = \frac{t_r}{t_r + t_p} 100 \ [\%]$$

gdzie: t_r - czas przepływu prądu spawania, t_p - czas przerwy.

6. *Maksymalny prąd spawania* - jest to prąd, jaki może dostarczyć zasilacz przy maksymalnym wysterowaniu, umownym napięciu w stanie obciążenia i zachowaniu dopuszczalnych przyrostów temperatury przy założonym dla tego prądu cyklu pracy.

7. *Cykl pracy, współczynnik obciążenia przy maksymalnym prądzie spawania*. W granicach nastawiania maksymalnego prądu spawania, współczynnik obciążenia nie powinien być mniejszy od wartości podanych w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki obciążenia przy maksymalnym prądzie spawania

Znamionowy przerywany prąd spawania [A]	Współczynnik obciążenia przy maksymalnym prądzie spawania [%]
do 160	10
od161 do 250	20
od 251 do 500	35
powyżej 500	50

8. *Współczynnik obciążenia* dopuszczalny dla dowolnej wartości prądu zawartej w przedziale od obciążenia ciągłego do maksymalnego prądu spawania jest określany zależnością

$$X_x = X_N \frac{I_N}{I_x}$$

gdzie: X_x - poszukiwany współczynnik obciążenia przy obciążeniu prądem I_x,
X_N - znamionowy współczynnik obciążenia,
I_N - znamionowy prąd spawania.

9: *Zakres nastawiania prądu spawania*. Prąd spawania może być nastawiany w sposób ciągły, skokowy lub mieszany. Przy skokowym i mieszanym nastawieniu prądu prąd minimalny stopnia wyższego nie może być większy o więcej niż 7,5% od prądu maksymalnego stopnia poprzedzającego. Zakres nastawiania prądu spawania nie powinien być mniejszy niż wynika to z tabeli 3. Sposób wyznaczania zakresu nastawiania prądu spawania jest pokazany na rys. 13.

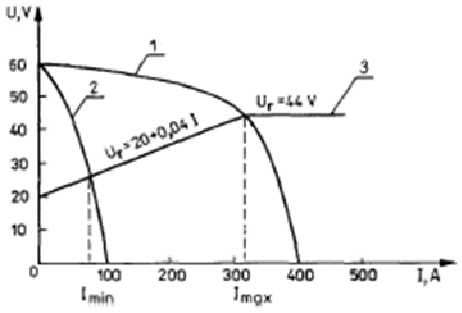
Tabela 3. Wymagane zakresy nastawiania prądu spawania

Prąd spawania [A]	Stosunek znamionowego prądu spawania do minimalnego prądu spawania
do 160	4
powyżej 160	5

10. *Współczynniki energetyczne*. Należy do nich sprawność i współczynnik mocy określany jako cosφ, tj. cosinus kąta przesunięcia między napięciem zasilającym i prądem pobieranym przez zasilacz z sieci energetycznej dla pierwszej harmonicznej. Współczynniki energetyczne decydują o zużyci energii wewnątrz urządzenia i o kosztach eksploatacyjnych. Z tego względu urzędy energetyczne w poszczególnych krajach określają minimalne wskaźnik energetyczne, z jakimi urządzenia energetyczne mogą być dopuszczane na rynek do obrotu i eksploatacji. Konstruktorzy urządzeń stoją przed dylematem: wysoka sprawność i większa masa urządzenia czy mniejsza sprawność i mniej zużytych materiałów. I odwrotnie, przy stosowaniu małego znamionowego współczynnika obciążenia pracy przerywanej oraz izolacji wysokiej klas występują

duże gęstości prądów w uzwojeniach transformatorów i dławików a więc mniejsze przekroje tych uzwojeń, mniejsza masa, ale niższa sprawność.

Zasilacze spawalnicze są dla sieci zasilającej odbiornikami energii główni o charakterze indukcyjnym, pobierającymi moc bierną, której wartość zależy o cosinusa przesunięcia fazowego pierwszej harmonicznej między napięcie zasilającym a prądem pobieranym przez zasilacz. Wartość pobieranej moc biernej może być zmniejszona przez zastosowanie kompensacji za pomoc baterii kondensatorów, indywidualnie w każdym urządzeniu bądź ogólnie dl całego zakładu przemysłowego stosującego urządzenia elektroenergetyczne, w tym i spawalnicze.

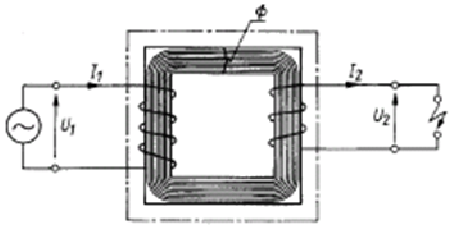


Rys. 13. Sposób wyznaczania zakresu prądu spawania: 1-charakterystyka zewnętrzna przy maksymalnym wysterowaniu, 2 - charakterystyka zewnętrzna pyry minimalnym wysterowaniu, 3 - linia umowna napięcia w stanie obciążenia przy spawaniu elektrodami otulonymi

Zagadnienia związane z wyborem sprawności i współczynnika mocy dotyczą głównie zasilaczy konwencjonalnych zawierających transformatory zasilane napięciem o częstotliwości 60 Hz. Przy konstruowaniu zasilaczy z wewnętrzną przemianą częstotliwości, gdzie zużycie materiałów jest niewielkie i zmniejsza się w funkcji wzrostu częstotliwości, a sprawność jest duża z uwagi na występowanie niewielkich strat energii, nie ma tych problemów.

4.1.1. Transformatory spawalnicze

Najprostszymi zasilaczami łuku spawalniczego do spawania elektroda otulonymi prądem przemiennym są transformatory spawalnicze o opadając charakterystyce zewnętrznej. Ze względu na swoją prostotę i niezawodność w eksploatacji i stanowią one pokaźną grupę urządzeń spawalniczych. Zasadniczą właściwością transformatora spawalniczego jest możliwość zmiany napięcia i prądu w obwodzie prądu przemiennego, tzn. możliwość dopasowania parametrów sieci zasilającej do wymagań łuku spawalniczego. Ogólna zasada działania transformatora jest pokazana na rys. 14.



Rys. 14. Zasada działania transformatora; U_1 - napięcie na zaciskach strony pierwotnej, U_2 - napięcie na zaciskach strony wtórnej, I_1 - prąd strony pierwotnej, I_2 - prąd strony wtórnej, Ø- strumień magnetyczny w magnetowodzie transformatora

Transformator składa się z uzwojeń: pierwotnego i wtórnego, umieszczonych na rdzeniu magnetycznym złożonym z blach krzemowych, nazywanym magnetowodem. Uzwojenia znajdują się na rdzeniu w różnych konfiguracjach umożliwiających uzyskanie rozproszenia strumienia magnetycznego o nastawianej wartości. Konstrukcja transformatora spawalniczego musi bowiem zapewniać uzyskanie rodziny opadających charakterystyk zewnętrznych dla założonego zakresu nastawiania prądu spawania. Charakterystyki opadające są uzyskiwane najczęściej przez wprowadzenie do obwodu prądu spawania reaktancji o nastawianej wartości. Jest to przeważnie reaktancja wynikająca z rozproszenia strumienia magnetycznego, wspomagana niekiedy przez reaktancję dodatkowych dławików o nastawianej indukcyjności.

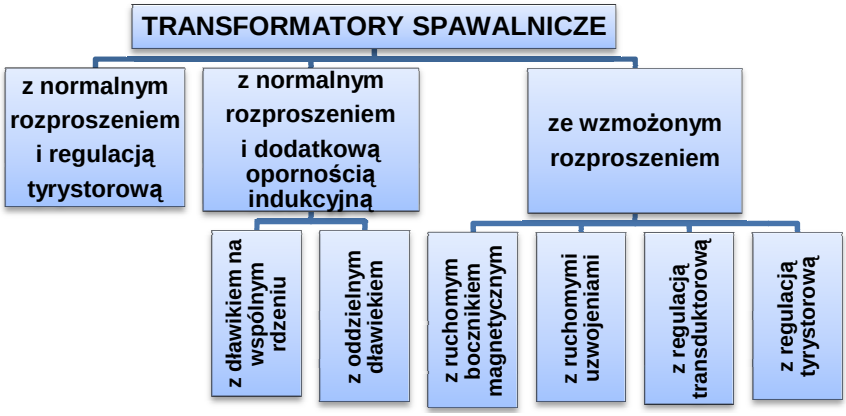
Niekiedy zamiast dodatkowej zmiennej indukcyjności jest stosowana zmiana zaczepów uzwojenia pierwotnego, szczególnie w transformatorach małej mocy. Pojawiają się także konstrukcje transformatorów, szczególnie dużej mocy, wyposażone w sterowniki tyrystorowe.

Stosunek liczby zwojów (i napięcia) w uzwojeniu pierwotnym nazywamy *przekładnią transformatora* i oznaczamy literą δ (delta), czyli:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \delta$$

gdzie: U_1 – napięcie w uzwojeniu pierwotnym, I_1 – prąd w uzwojeniu pierwotnym, U_2 – napięcie w uzwojeniu wtórnym, I_2 – prąd w uzwojeniu wtórnym, Z_1 – liczba zwojów w uzwojeniu pierwotnym, Z_2 – liczba zwojów w uzwojeniu wtórnym.

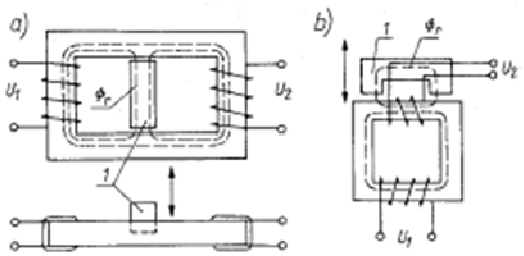
Stosowane dotychczas konstrukcje transformatorów spawalniczych można sklasyfikować według schematu pokazanego na rys. 15. Wiele z tych rozwiązań konstrukcyjnych już nie jest stosowane i należy je traktować jako rozwiązania historyczne. Obecnie do najczęściej produkowanych transformatorów spawalniczych należą transformatory o ruchomym boczniku strumienia magnetycznego oraz rzadko, o ruchomych cewkach uzwojeń.



Rys. 15. Klasyfikacja budowy transformatorów spawalniczych

Transformatory o ruchomym boczniku strumienia magnetycznego

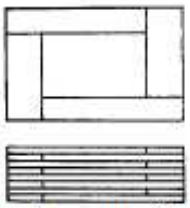
W transformatorach o ruchomym boczniku strumienia magnetycznego są stosowane magnetowody typu rdzeniowego. Uzwojenia pierwotne i wtórne są umieszczone na przeciwległych kolumnach. Stosuje się dwa rodzaje bocznika strumienia magnetycznego pokazane na rys. 16a, b. Nastawianie wymaganej wartości prądu spawania odbywa się przez zmianę położenia bocznika względem rdzenia i uzwojeń transformatora. Skrajne charakterystyki zewnętrzne są uzyskiwane przy skrajnych położeniach bocznika strumienia magnetycznego. Maksymalny prąd spawania występuje przy wysuniętym boczniku, a minimalny przy boczniku całkowicie wsuniętym, gdyż strumień magnetyczny rozproszenia jest wówczas największy. Przez płynną zmianę położenia bocznika za pomocą śruby pociągowej uzyskuje się płynne nastawianie prądu spawania. Transformatory z bocznikiem magnetycznym są budowane na małe i średnie prądy spawania, jako przenośne lub przewoźne.



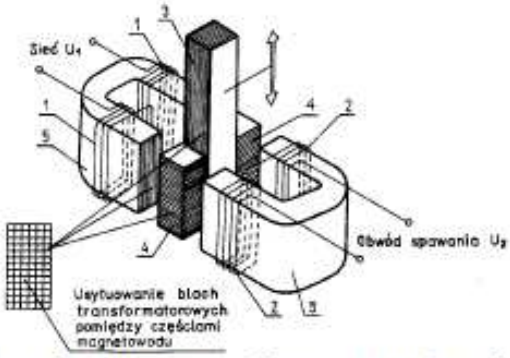
vych konstrukcji kiem magnetycz- : bocznikiem w ı w okno magne- z bocznikiem w jącym uzwojenie tyczny, Φ_r, - stru-

Przy konstruowaniu transformatora spawalniczego należy zwrócić uwagę, aby w magnetowodzie nie występowały nasycenia prowadzące do odkształceń przebiegu prądu spawania, powodujących pogorszenie stabilności łuku.

W transformatorach spawalniczych są stosowane magnetowody o konstrukcji zaplatanej wykonywanej z blachy transformatorowej (rys. 17). Najnowszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest zastosowanie na magnetowody transformatorów spawalniczych rdzeni zwijanych z taśmy anizopermowej. Rdzenie te są przecinane i w miejscu położenia bocznika strumienia magnetycznego są umieszczane wstawki wykonane z blaszek obróconych o 90° w stosunku do położenia blach w pozostałej części rdzenia. Takie usytuowanie wstawek powoduje, że strumień magnetyczny przenikając z rdzenia do bocznika przepływa równolegle do powierzchni blach, a nie prostopadle (rys. 18), nie powoduje więc powstawania prądów wirowych i nagrzewania rdzenia. Rozwiązanie to zastosowano po raz pierwszy w Polsce w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach i opatentowano w niektórych najbardziej rozwiniętych przemysłowo krajach, jak np. w Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Szwecji. Na rysunku 19 pokazano transformator spawalniczy, w którym prąd spawania jest nastawiany za pomocą bocznika strumienia magnetycznego.



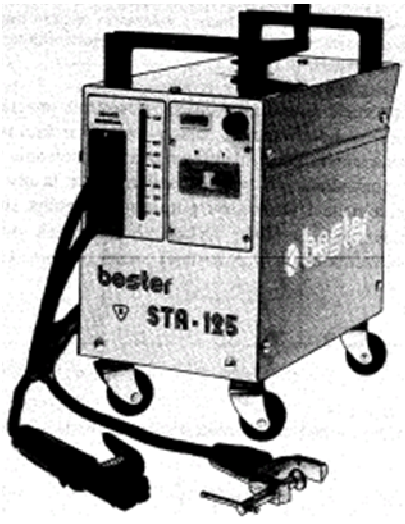
Rys. 17. Magnetowód transformatora składany z blaszek



Rys. 18. Transformator spawalniczy z magnetowodem zwijanym z taśmy anizopermowej; 1 - uzwojenie pierwotne, 2 - uzwojenie wtórne, 3 - bocznik strumienia magnetycznego, 4 - wkładki rdzenia, 5 - magnetowód przecinany

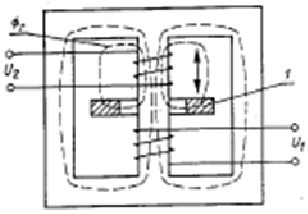
Transformatory z ruchomymi uzwojeniami

W transformatorach spawalniczych tego typu zmiana sprzężenia magnetycznego jest uzyskiwana przez zmianę wzajemnego położenia uzwojeń: pierwotnego i wtórnego (rys. 20). Zwiększenie odległości pomiędzy uzwojeniami powoduje wzrost strumienia rozproszenia i związany z tym wzrost reaktancji X. W związku z tym następuje zwiększanie nachylenia charakterystyki zewnętrznej transformatora, co wiąże się ze zmniejszeniem prądu zwarcia oraz prądu spawania. W celu zwiększenia strumienia rozproszenia i zmniejszenia wartości minimalnego prądu spawania, jaki można uzyskać z transformatora, między uzwojeniami jest niekiedy umieszczony nieruchomy bocznik w formie pierścienia W transformatorach tych powstaje też magnetyczny strumień rozproszenia wychodzący przez rdzeń transformatora i zamykający się przez wszystkie części stalowe łącznie z obudową, powodujący nagrzewanie się tych części i straty energii.

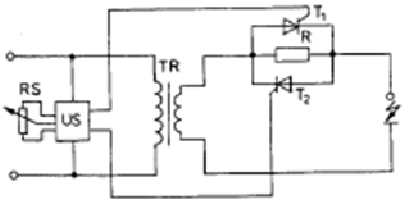


Rys. 19. Transformator spawalniczy produkowany w Zakładach Bester w Bielawie

Produkcja transformatorów z ruchomymi cewkami została opanowana głównie w byłym Związku Radzieckim. Transformatory te o prądach znamionowych 300 i 500 A charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami spawalniczymi.



Rys. 20. Schemat transformatora z ruchomymi uzwojeniami; Φ_r - strumień rozproszenia, 1 - nieruchomy bocznik magnetyczny



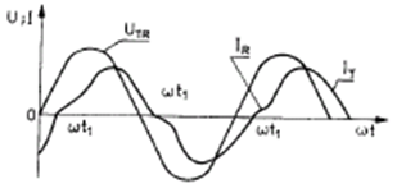
Rys. 21. Transformator z tyrystorowym układem sterowania; US - układ sterowania, RS - rezystor nastawczy, R - rezystor podtrzymujący prąd w obwodzie spawalniczym

Transformatory ze sterowaniem tyrystorowym

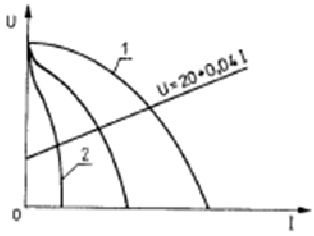
Transformatory ze sterowaniem tyrystorowym mają nowocześniejsze rozwiązania konstrukcyjne. Prąd spawania w tych urządzeniach jest załączany przez parę tyrystorów połączonych przeciwrównolegle. Schemat układu transformatora ze sterowaniem tyrystorowym jest pokazany na rys. 21. Istnieją dwa rodzaje układów sterowania prądem spawania i dwa rodzaje charakterystyk zewnętrznych.

1. Transformator ma opadającą charakterystykę zewnętrzną określoną przez stałą reaktancję rozproszenia. Przy pełnym wysterowaniu tyrystorów występuje maksymalny prąd spawania, a zmniejszanie tego prądu jest uzyskiwane przez zmianę kąta opóźnienia włączenia tyrystorów. Przebiegi napięcia i prądu przemiennego w obwodzie spawalniczym ze sterownikiem tyrystorowym są pokazane na rys. 22, a rodzina charakterystyk statycznych na rys. 23.

Charakterystyki te nieznacznie odbiegają od charakterystyk transformatorów rozproszeniowych z ruchomym bocznikiem strumienia magnetycznego.

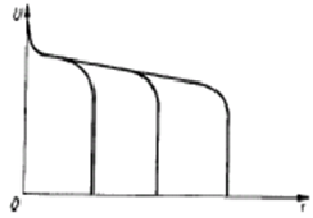


Rys. 22. Przebiegi napięcia i prądu przemiennego w obwodzie z tyrystorowym układem sterowania; U_{TR} - napięcie na uzwojeniu pierwotnym transformatora, I_R - prąd płynący



Rys. 23. Charakterystyki zewnętrzne transformatora rozproszeniowego z tyrystorowym układem sterowania; 1 - charakterystyka przy maksymalnym wysterowaniu tyrystorów, 2 - charakterystyka przy minimalnym wysterowaniu tyrystorów

2. Transformator ma normalne sprzężenie magnetyczne uzwojeń, co daje sztywną charakterystykę zewnętrzną. Opadająca charakterystyka zewnętrzna całego układu jest uzyskiwana przez zastosowanie ujemnego prądowego sprzężenia zwrotnego. Zmieniając kąt opóźnienia włączenia tyrystorów zmienia się prąd spawania, a w wyniku działania ujemnego prądowego sprzężenia zwrotnego otrzymuje się charakterystyki zewnętrzne stałoprądowe (rys. 24). Przebiegi napięcia i prądu są podobne do zamieszczonych na rys. 22, jedynie przesunięcia między napięciem i prądem są mniejsze. Maksymalny prąd spawania w tym układzie jest ograniczony tylko warunkami termicznymi za-



Rys.24. Charakterystyki zewnętrzne transformatora spawalniczego ze sterowaniem tyrystorowym i ujemnym prądowym sprzężeniem zwrotnym

stosowanych elementów, a głównie transformatora i tyrystorów. Przez rezystor włączony równolegle do tyrystorów przepływa prąd przeciwdziałający dejonizacji przestrzeni międzyelektrodowej w czasie, gdy tyrystory są zablokowane.

Zaletami transformatorów wyposażonych w tyrystorowe układy sterowania są: prostota wykonania pod względem mechanicznym, możliwość kształtowania charakterystyk oraz możliwość zdalnego sterowania prądu. Podstawową wadą jest pogorszenie właściwości spawalniczych w wyniku zastosowania fazowego sterowania prądem spawania, szczególnie przy dużych kątach opóźnienia włączenia tyrystorów, czyli przy małych prądach spawania.

Kompensacja współczynnika mocy

Transformatory spawalnicze na skutek występowania dużej indukcyjności w obwodzie spawalniczym pracują przy małym współczynniku mocy $\cos\varphi$, przez co bardzo niekorzystnie wpływają na gospodarkę energetyczną w sieci zasilającej. Indukcyjna moc bierna pobierana z sieci przez transformatory spawalnicze może być kompensowana indywidualnie, grupowo lub centralnie za pomocą kondensatorów energetycznych włączonych równolegle do transformatora od strony zasilania. Zwykle, skompensowany współczynnik mocy nie przekracza wartości 0,8-0,9.

4.1.2. Prostowniki spawalnicze

Prostowniki spawalnicze (prostownikowe zasilacze spawalnicze) są to przekształtniki prądu przemiennego na prąd wyprostowany o odpowiednio ukształtowanej charakterystyce zewnętrznej i o wymaganym zakresie nastawiania prądu spawania.

Prostownikowy zasilacz spawalniczy składa się z transformatora prostownikowego, zespołu prostownikowego, układu do nastawiania sterowania lub regulacji parametrów spawania (najczęściej prądu spawania), dławika filtrującego, zespołu wentylacji oraz elementów łączeniowych i zabezpieczeniowych.

Transformatory prostownikowe, dopasowujące parametry napięcia do wymagań zasilania łuku spawalniczego, są budowane jako jedno- lub trójfazowe w zależności od przeznaczenia i mocy prostownika. Transformatory jednofazowe są stosowane w prostownikach spawalniczych małej mocy o prądzie spawania nie przekraczającym 200 A, natomiast transformatory trójfazowe - w prostownikach niezależnie od wartości prądu spawania i są łączone najczęściej w układzie gwiazda-trójkąt.

Zespoły prostownikowe składają się z diod, diod i tyrystorów lub samych tyrystorów łączonych najczęściej w mostkowe układy prostownikowe, jedno- lub trójfazowe w zależności od zastosowanego transformatora prostownikowego. Jednofazowe układy mostkowe zawierają cztery diody lub dwie diody i dwa tyrystory. Natomiast trójfazowe mostki prostownicze w zależności od sposobu sterowania składają się z:

- sześciu diod (patrz rys. 25) - niesterowane,
- trzech diod i trzech tyrystorów (patrz rys. 27) - półsterowane,
- sześciu tyrystorów - pełnosterowane.

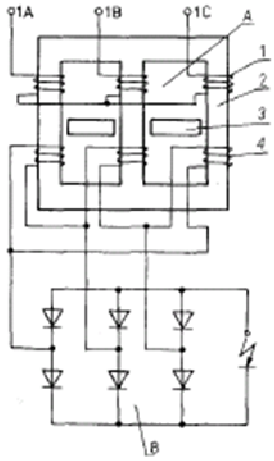
Do kształtowania charakterystyk zewnętrznych zasilacza prostownikowego, nastawiania, sterowania lub regulacji parametrów, a głównie prądu spawania są stosowane:

- *boczniki strumienia magnetycznego w jednofazowych transformatorach prostownikowych, podobnie jak w transformatorach spawalniczych oraz w transformatorach trójfazowych,*
- *systemy podmagnesowania transformatora prostownikowego,*
- *systemy elektronicznego sterowania tyrystorami w zespołach prostownikowych.*
- *Dławiki filtrujące* są stosowane głównie w prostownikach tyrystorowych, gdzie wymagana jest filtracja tętnień powstających w wyniku sterowania tyrystorów W rdzeniach dławików znajdują się szczeliny powietrzne przeciwdziałające magnetycznemu nasycaniu się tych rdzeni, wywołanemu składową stałą prądu spawania.

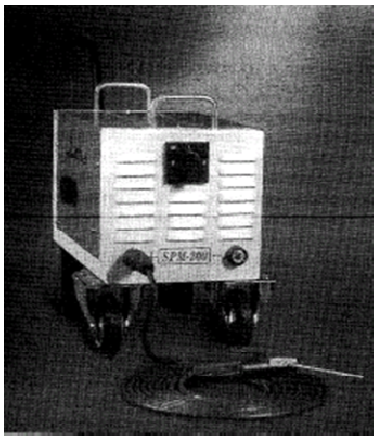
- *Układ wentylacji* służy do przewietrzania wnętrza prostownika i niedopuszczania do nadmiernego nagrzania się niektórych elementów, głównie transformatora prostowniko-wego, elementów prostownikowych oraz dławika.
- *Elementy układów załączania, sterowania i zabezpieczeń* służą do załączania i wyłączania napięcia zasilającego prostownik, obniżania napięcia w stanie jałowym prostownika w czasie krótkotrwałych przerw spawania, wyłącza zasilania prostownika z sieci w czasie dłuższych przerw spawania, zabezpieczania prostownika od zwarć i przeciążeń itp.

Prostowniki zasilane z transformatora wyposażonego w ruchome boczniki strumienia magnetycznego

Prostowniki te są rzadko produkowane z uwagi na skomplikowaną budowę mechanizmu napędu bocznika, szczególnie w transformatorach trójfazowych *Wadą* jest też brak możliwości zdalnego sterowania prądem spawani *Zaleta*, jaką jest prostota układu elektrycznego urządzenia (rys. 25) sprawiła, że prostowniki o takim rozwiązaniu konstrukcyjnym są produkowane z przeznaczeniem do spawania małymi prądami.



Rys. 25. Schemat elektryczny prostownika spawalniczego z transformatorem rozproszeniowym i diodowym trójfazowym mostkiem prostowniczym; A - transformator, B - diodowy zespół prostownikowy o układzie mostka trójfazoweg; 1 - uzwojenie pierwotne, 2 - magnetowód, 3 - bocznik strumienia magnetycznego, 4 - uzwojenie wtórne



Rys. 26. Spawarka prostownikowa SPM-200 produkcji OZAS

Przykładem jest spawarka prostownikowa SPM-200 (rys. 26), w której zastosowano transformator trójfazowy o dużym rozproszeniu strumienia magnetycznego i zmiennym sprzężeniu magnetycznym między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym, nastawianym za pomocą bocznika strumienia magnetycznego. Do prostowania prądu spawania zastosowano trójfazowy diodowy prostownikowy układ mostkowy połączony z uzwojeniami pierwotnymi transformatora (rys. 25). W tego rodzaju urządzeniach, opadająca charakterystyka zewnętrzna jest uzyskiwana w wyniku zastosowania transformatora rozproszeniowego, a zmiana prądu przez zmianę sprzężenia magnetycznego uzwojeń za pomocą bocznika strumienia magnetycznego. Nie zachodzi też potrzeba stosowania dławików filtrujących z uwagi na zastosowanie prostownika trójfazowego pełnookresowego dającego napięcie wyprostowane o małych tętnieniach nie wpływających na jakość procesu spawania.

Prostowniki tyrystorowe

Zdecydowany postęp w produkcji prostowników spawalniczych, umożliwiających realizację skomplikowanych procesów spawania, nastąpił z chwilą zastosowania sterowalnych elementów energoelektronicznych, a przede wszystkim tyrystorów i tranzystorów mocy.

Zastosowanie tyrystorów jako elementów sterowalnych w zespołach prostownikowych dało początek automatycznemu kształtowaniu charakterystyk statycznych i dynamicznych zasila-

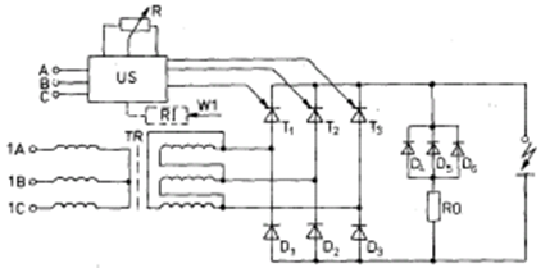
czy łuku spawalniczego oraz umożliwiło dozowanie energii do wykonywanej spoiny w zależności od założonych programów spawania. Procesy spawania realizowane za pomocą prostowników tyrystorowych są sterowane przez elektroniczne układy sterowania tyrystorów o różnym stopniu złożoności. Układy proste są stosowane jedynie do zmian kąta wysterowania tyrystorów, natomiast bardziej złożone, zawierające system mikroprocesorowe, do sterowania skomplikowanych procesów spawania.

Tyrystory umożliwiły też realizowanie tzw. funkcji pomocniczych w prostownikach, ułatwiających spawaczowi prowadzenie procesu spawania oraz zwiększających bezpieczeństwo pracy. Do takich funkcji należy np.:

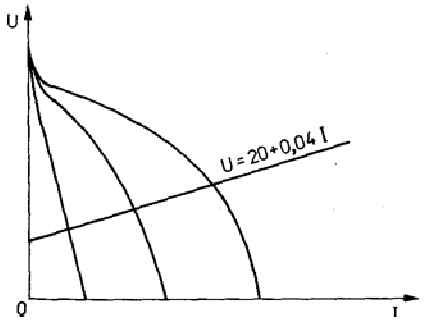
- *gorące zajarzenie łuku*, polegające na chwilowym automatyczny zwiększeniu prądu w obwodzie spawania, np. o 35% w stosunku do nastawionej wartości, w czasie rozpoczynania spawania, tzn. tuż po pojawieniu się łuku;
- *przeciwdziałanie przyklejeniu się elektrody*, polegające na automatycznym obniżeniu prądu spawania do minimalnej wartości, jeżeli w określony czasie nie nastąpi zapłonięcie łuku spawalniczego;
- *obniżenie napięcia stanu jałowego podczas krótkich przerw w płonięciu łuku*, polegające na automatycznym zablokowaniu tyrystorów tak, aby na wyjściu prostownika występowało napięcie wyprostowane o bezpiecznej wartości, a więc nie przekraczające 24 V;
- *odłączanie prostownika od sieci zasilającej przy dłuższych przerwach spawania*, polegające na wyłączeniu napięcia zasilania z uzwojenia pierwotnego transformatora. Ponowne załączenie pełnego napięcia stanu jałowego odbywa się, w przypadkach obniżania i wyłączania napięcia, przez zwarcie obwodu spawania za pomocą elektrody;
- *zdalne sterowanie*, polegające na umieszczeniu elementów przeznaczonych do nastawiania parametrów oraz do załączania i wyłączania prostownika na dodatkowym małym przenośnym pulpicie sterowniczym umożliwiającym spawaczowi nastawienie parametrów w miejscu spawania, niekiedy oddalonym od prostownika nawet o kilkadziesiąt metrów.

W prostownikach do spawania elektrodami otulonymi oraz elektrodą nietopliwą w osłonie argonu są stosowane dwa rozwiązania konstrukcyjne toru głównego prądu spawania z odpowiednimi układami sterowania umożliwiającymi uzyskanie opadających lub stałoprądowych charakterystyk zewnętrznych. Rozwiązania te mogą być stosowane zarówno w układach jednofazowych, jak i trójfazowych.

Najprostsze spotykane rozwiązanie konstrukcyjne prostownika tyrystorowego z układem półsterowanego mostka prostownikowego zasilanego z transformatora o dużym stałym rozproszeniu strumienia magnetycznego i opadającej charakterystyce U= f(I) jest pokazane na rys. 27 Rodzinę charakterystyk zewnętrznych prostownika uzyskiwanych przy zastosowaniu takiego układu zamieszczono na rys. 28. Charakterystyka dla maksymalnego prądu spawania jest jednocześnie charakterystyką naturalną otrzymaną przy pełnym wysterowaniu tyrystorów. Uzyskiwanie charakterystyk dla mniejszych prądów spawania odbywa się przez zwiększenie kąta wysterowania tyrystorów. W prostownikach tyrystorowych równocześnie ze zwiększeniem kąta opóźnienia przewodzenia tyrystorów, a więc ze zmniejszeniem prądu spawania, maleje także napięcie stanu jałowego prostownika, co wpływa bardzo niekorzystnie na stabilność procesu spawania. Aby temu zapobiec i zachować napięcie stanu jałowego na stałym poziomie, równolegle do tyrystorów włącza się diody małej mocy D4, D5, D6 (patrz rys. 27) poprzez rezystor RO ograniczający prąd do ok. 20 A. Układ sterowania tyrystorów jest prosty i składa się z przesuwnika fazowego impulsów wyzwalających tyrystory oraz z zespołów pomocniczych. Jako wyposażenie dodatkowe jest stosowany pulpit do zdalnego nastawiania prądu spawania oraz urządzenie do modulacji prądu spawania o charakterze długich impulsów nałożonych na prąd bazowy (rys. 29). Czas trwania impulsów oraz wartość prądu w impulsie mogą być nastawiane w zależności od potrzeb technologii spawania, najczęściej metodą TIG.

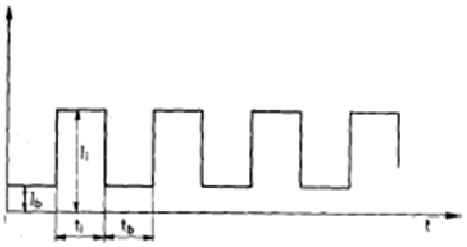


Rys.27. Schemat ideowo-blokowy prostownika tyrystorowego do spawania ręcznego; TR - transformator prostownikowy, D_1 D_2, D_3 - diody prostownika głównego, T_1, T_2, T_3 - tyrystory prostownika głównego, D_4, D_5, D_6 - diody pomocnicze, RO - rezystor ograniczający, US - układ sterowania, R - rezystor nastawczy prądu spawania, RI - regulator prądu spawania stosowany przy zasilaniu z transformatora o sztywnej charakterystyce U(I)



Rys. 28. Rodzina charakterystyk zewnętrznych prostownika tyrystorowego do spawania ręcznego z transformatorem o charakterystyce opadającej

Bardziej złożone pod względem zastosowanych systemów sterowania są prostowniki tyrystorowe do spawania ręcznego z mostkiem prostownikowym półsterowanym (patrz rys. 27), zasilanym z transformatora o sztywnej charakterystyce U = f(I). Opadająca lub stałoprądowa charakterystyka zewnętrzna prostownika jest uzyskiwana przez zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego z regulatorem prądowym typu RI (patrz rys. 27). Regulator ten utrzymuje w obwodzie spawania stały nastawiony prąd spawania, niezależny od wartości rezystancji łuku spawalniczego.



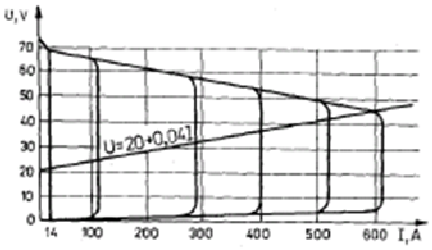
Rys. 29. Przebieg prądu przy spawaniu prądem modulowanym; I_b - prąd bazowy, I_i - prąd impulsu, t_b - czas przepływu prądu bazowego, t_i - czas przepływu prądu impulsu

Charakterystyki zewnętrzne prostownika uzyskane w wyniku zastosowania regulatora prądu spawania są pokazane na rys. 30. Są to charakterystyki prostownika PSP-631 produkowanego w OZAS. Prostownik ten przedstawiono na rys. 31, a jego schemat ideowo-blokowy na rys. 32. Na schemacie pokazano tor główny prądu spawania składający się z transformatora prostownikowego TR o lekko opadającej charakterystyce, trójfazowego zespołu prostownikowego w układzie mostka półsterowanego, złożonego z tyrystorów T_1, T_2, T_3 oraz diod D_1, D_2, D_3, prostownika pomocniczego D_4, D_5, D_6 utrzymującego napięcie stanu jałowego na wyjściu prostownika o stałej wartości niezależnie od stanu wysterowania tyrystorów. W obwodzie głównym znajduje się też dodatkowy prostownik M połączony w układzie Gretza, który razem z rezystorem RM służy do utrzymywania napięcia o wartości nie przekraczającej 20 V na zaciskach wyjściowych prostownika po wyłączeniu napięcia zasilania transformatora prostownikowego za pomocą stycznika S.

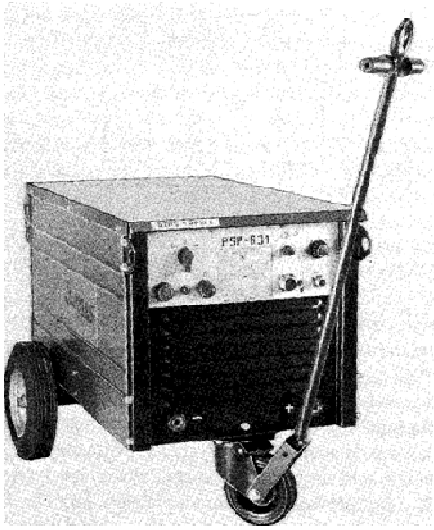
Po zwarciu przez spawacza elektrody ze spawanym materiałem, pod wpływem napięcia z prostownika M, w obwodzie głównym zaczyna płynąć prąd o niewielkiej wartości, który jest sygnałem dla układu UW załączającego automatycznie stycznik S i zasilanie obwodu głównego prostownika inicjując proces spawania. Układ UW służy do automatycznego wyłączania prostownika przy dłuższych przerwach w spawaniu (przekraczających 3 min), ograniczając zużycie energii w stanie jałowym.

W obwodzie głównym znajduje się bocznik prądowy BO, z którego jest pobierany sygnał U_I, proporcjonalny do wartości prądu spawania. Sygnał ten jest podawany do regulatora prądu spawania w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego. Do regulatora dochodzą również sygnały UZP z zadajnika prądu ZP oraz z układów wypełniających funkcje pomocnicze. Sygnał U_{HS} z układu gorącego zajarzania łuku HS jest podawany do regulatora przez nadajnik prądu

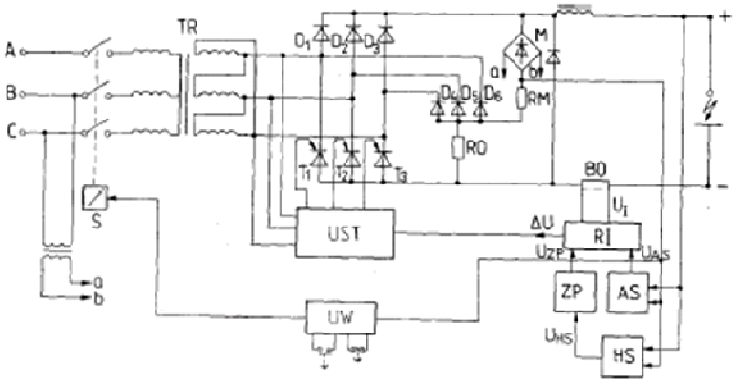
ZP, powodując zwiększenie prądu spawania o ok. 35% w stosunku do prądu nastawionego, w czasie 0,5-3 s po zajarzeniu łuku. W wyniku działania układu gorącego zajarzania następuje szybkie ustabilizowanie łuku spawalniczego. Układ antyprzyklejeniowy generuje sygnał U_{AS}, powodujący zmniejszenie prądu spawania do ok. 15 A w przypadku przedłużającego się zwarcia elektrody ze spawanym materiałem, co jest wynikiem wystąpienia trudności w zapłonie łuku. Ograniczenie prądu zwarcia do tak małej wartości przeciwdziała przyklejeniu się elektrod, szczególnie podczas rozpoczynania spawania.



Rys. 30. Rodzina charakterystyk zewnętrznych prostownika tyrystorowego z transformatorem o charakterystyce sztywnej (PSP-631)



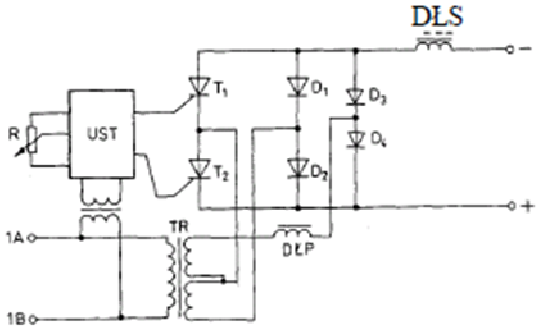
Rys. 31. Prostownik spawalniczy PSP-631 produkcji OZAS



Rys. 32. Schemat ideowo-blokowy prostownika spawalniczego PSP-631; TR - transformator prostownikowy, UST - układ sterowania i regulacji, M - prostownik zasilający obwód spawalniczy w czasie wyłączenia stycznika S, BO - bocznik prądowy, RI - regulator prądu, ZP - układ zadawania wartości prądu, AS- układ antyprzyklejeniowy, HS- układ gorącego zajarzenia, UW- układ wyłączający

Prostownik może być wyposażony w układ obniżania napięcia stanu jałowego z chwilą zgaśnięcia łuku. Obniżenie napięcia musi nastąpić w czasie nie większym niż 0,2 s, zapewniając bezpieczeństwo spawaczy pracujących w warunkach szczególnego zagrożenia porażeniem prądem elektrycznym, np. przy spawaniu kotłów, zbiorników, statków.

W małych prostownikach spawalniczych, o prądzie nie przekraczającym 200 A, mogą być stosowane układy jednofazowe zasilane napięciem 220 lub 380 V w zależności od założonej maksymalnej wartości prądu spawania. Prostowniki te zawierają specjalne układy obwodu głównego ze wspomaganiem zapewniającym ciągły przepływ prądu podtrzymującego łuk spawalniczy w czasie, gdy tyrystory są zablokowane.

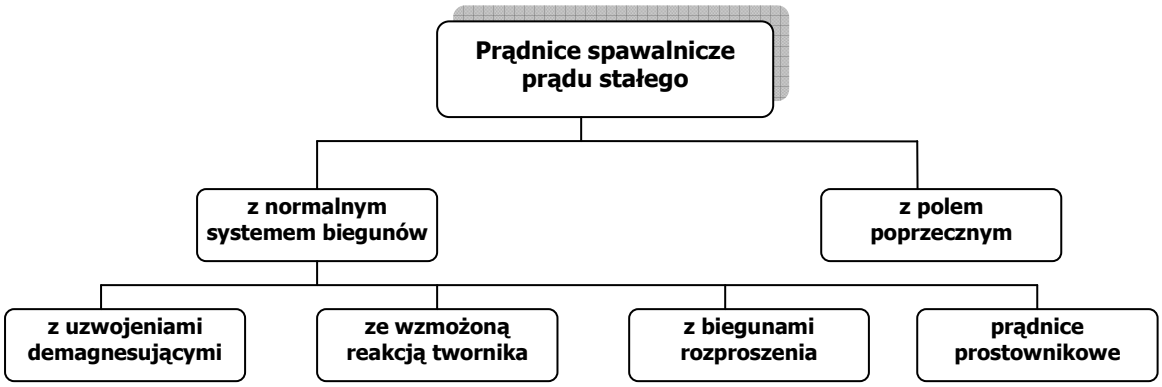


Rys. 33. Schemat ideowo-blokowy jednofazowego prostownika tyrystorowego

Przykład układu połączeń prostownika jednofazowego pokazano na rys. 33. Obwód główny prostownika jest zasilany z transformatora o dużym rozproszeniu magnetycznym, zapewniającym opadającą charakterystykę, o dwóch uzwojeniach wtórnych: głównym i pomocniczym. Uzwojenie główne zasila prostownik półsterowany w układzie Gretza składający się z tyrystorów T_1, T_2 i diod D_1, D_2. Diody pomocnicze D_3, D4 tworzą z diodami D_1, D_2 pomocniczy zespół prostownikowy niesterowany, zapewniający pełne napięcie stanu jałowego i przepływ prądu podtrzymującego łuk spawalniczy w czasie blokowania tyrystorów, o wartości ok. 20 A. Prąd z prostownika pomocniczego jest filtrowany i ograniczany przez dławik DŁP. W obwodzie głównym znajduje się również dławik DŁS ograniczający tętnienia prądu wyprostowanego i poprawiający warunki stabilnego płonięcia łuku spawalniczego.

4.1.3. Przetwornice spawalnicze

Przetwornice spawalnicze są to zespoły dwumaszynowe, składające się z silnika napędowego i prądnicy spawalniczej. Silnikiem napędowym jest najczęściej asynchroniczny trójfazowy silnik elektryczny. Spotykane są też przetwornice z silnikiem prądu stałego, stosowane najczęściej do prac spawalniczych w kopalniach. Do prac spawalniczych w terenie, tam gdzie jest brak zasilania elektrycznego, są stosowane zespoły spawalnicze składające się z prądnicy napędzanej silnikiem spalinowym benzynowym lub wysokoprężnym. Zespoły spawalnicze o dużej mocy, o prądzie spawania powyżej 300 A, są często budowane jako przyczepy samochodowe przeznaczone do prac w warunkach polowych. Mogą być też budowane jako urządzenia stacjonarne małej i dużej mocy z przeznaczeniem do warsztatów polowych. Zespoły małej mocy, o prądzie spawania do 200 A, są zwykle wyposażone w silniki benzynowe.

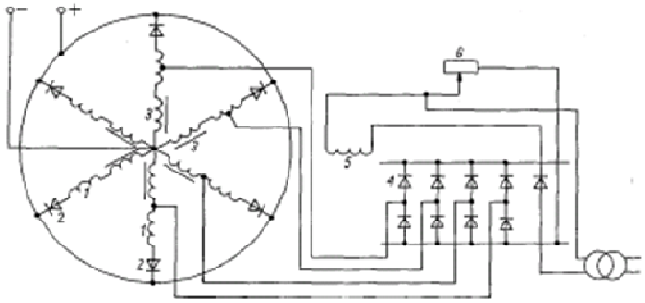


Rys. 34. Klasyfikacja prądnic spawalniczych prądu stałego

Prądnice spawalnicze są to maszyny prądu stałego lub przemiennego o zwiększonej częstotliwości. Prądnice prądu przemiennego znalazły zastosowanie w przetwornicach spawalniczych dopiero po wyposażeniu je w diodowe zespoły prostownikowe. Prądnice spawalnicze, jako najstarsze źródła energii elektrycznej stosowane do zasilania łuku spawalniczego, podlegały rozwojowi technicznemu, w wyniku którego powstawały różne układy łączenia uzwojeń twornika i wzbudzenia, a także różne konstrukcje obwodów magnetycznych Klasyfikacja prądnic spawalniczych według stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych jest podana na rys. 34. W większości są to rozwiązania o znaczenie historycznym z uwagi na duże zużycie materiałów i dużą masę, złożoności technologii produkcji oraz małą sprawność przetwarzania energii. Naj-

lepszym wskaźnikami energetycznymi charakteryzują się prądnice prostownikowe z automatycznym wzbudzeniem, w których klasyczny komutator ze szczotkami zastąpiono diodowym zespołem prostownikowym. Prądnice te są nadal produkowane i stosowane głównie do zespołów napędzanych silnikiem spalinowym.

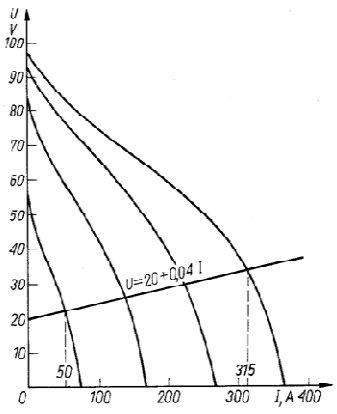
Układ połączeń prądnicy prostownikowej pokazano na rys. 35. Uzwojenia sześciofazowego twornika prądnicy są połączone z uzwojeniami sześciofazowego fazowego dławika i diodami prostownikowymi umocowanymi na wspólnym radiatorze.



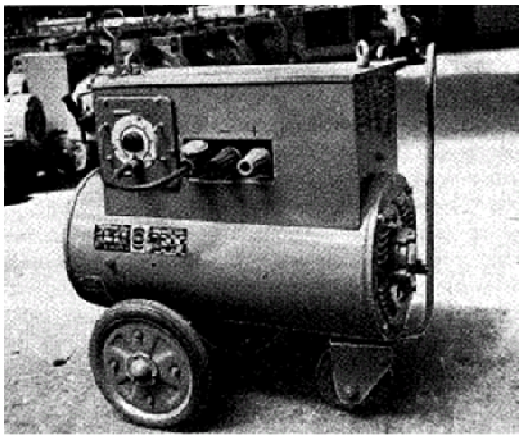
Rys. 35. Schemat prądnicy prostownikowej; 1 - uzwojenie twornika, 2 - diody, 3 – uzwojenie dławika, 4 - prostownik prądu wzbudzenia, 5 - uzwojenie wzbudzenia, 6 - rezystor nastawczy prądu spawania, 7 - przekładnik napięciowy wzbudzenia

Do zasilania układu wzbudzenia są wykorzystane napięcia pobierane z zaczepów dwóch faz twornika oraz końców dwóch innych faz dławika. Napięcie przemienne tych obwodów po wyprostowaniu zasila, przez rezystor nastawczy, uzwojenie magneśnicy. Ze względu na zbyt mały magnetyzm szczątkowy prądnicy do samowzbudzenia prądnicy jest stosowane napięcie z transformatora zasilanego z sieci energetycznej, włączone do obwodu wzbudzenia przez diodę. W zespołach o napędzie spalinowym do tego celu służy napięcie z akumulatora, stanowiącego wyposażenie silnika napędowego, włączone w obwód wzbudzenia również przez diodę. Biegun ujemny prądu stanowi punkt zerowy układu gwiazdowego, a biegun dodatni stanowi radiator diod zespołu prostownikowego. Dławik spełnia podwójną rolę: zwiększa stromość opadania charakterystyk zewnętrznych (rys. 36), które w tego rodzaj maszynach są z natury opadające, oraz ogranicza udary prądów zwarcia i przyczynia się do polepszenia właściwości spawalniczych.

Na rysunku 37 jest pokazana przetwornica EWPa-315 z prądnic prostownikową napędzaną silnikiem asynchronicznym, a na rys. 38 zespól spawalniczy AS 400 DC z prądnicą prostownikową napędzaną silnikiem spalinowym.



Rys. 36 Charakterystyka zewnętrzna prądnicy prostownikowej



Rys. 37. Przetwornica spawalnicza EWPa-315 produkcji Zakładu EMIT w Żychlinie

4.1.4. Prostowniki inwertorowe

Źródła prądu nowej generacji, do której należą prostowniki z wewnętrzną przemianą częstotliwości, zwane inwertorowymi lub inwersyjnymi, pojawiły się stosunkowo niedawno. Ich powstanie stało się możliwe po wprowadzeniu elementów energoelektronicznych (tyrystorów, tranzystorów) zdolnych do przenoszenia dużych mocy przy stosunkowo wysokim napięciu.

Rys. 38. Zespół spawalniczy AS 400 DC produkcji firmy Agregaty PEX-POOL PLUS

Zdecydowane przyspieszenie w rozwoju prostowników z wewnętrzną przemianą częstotliwości nastąpiło po zastosowaniu w falownikach wysokonapięciowych tranzystorów mocy. Tranzystory te umożliwiły uzyskanie częstotliwości powyżej 20 kHz, tj. poza pasmem akustycznym. Efektem zastosowania przemiany częstotliwości w zasilaczach do spawania łukowego jest radykalne zmniejszenie masy tych urządzeń oraz uzyskanie możliwości sterowania zjawiskami zachodzącymi w przestrzeni międzyelektrodowej w czasie spawania, a głównie przenoszeniem metalu. Sterowanie procesem spawania jest szczególnie ważne przy spawaniu zautomatyzowanym i zrobotyzowanym.

Masa prostowników tyrystorowych i diodowych zależy w głównej mierze od masy transformatora prostownikowego, który służy do dopasowania parametrów zasilacza do wymagań łuku spawalniczego. Transformatory w tych prostownikach są zasilane standardowym napięciem sieci energetycznej o częstotliwości 50 lub 60 Hz. Przekrój magnetowodu transformatora o wymaganej mocy zależy, przy określonej indukcji magnetycznej, odwrotnie proporcjonalnie od częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie pierwotne, tzn. im mniejsza częstotliwość, tym jest wymagany większy przekrój magnetowodu i tym większa masa transformatora. Z tego względu podwyższenie częstotliwości napięcia zasilania prowadzi nawet do wielokrotnego zmniejszenia masy transformatora prostownikowego, a wraz z nim całego urządzenia.

Drugim efektem wprowadzenia wewnętrznej przemiany częstotliwości jest możliwość uzyskania sterowalności zjawisk w przestrzeni międzyelektrodowej, co nastąpiło w wyniku przejścia od zasilania i sterowania analogowego do zasilania impulsowego i sterowania dyskretnego częstotliwością przemiany i szerokością impulsów. Sterując tymi dwoma parametrami można uzyskać wpływ na częstotliwość odrywania się i wielkość kropel metalu, przenoszonych z elektrody do jeziorka spoiny, tzn. sterować przepływem metalu, co przy zasilaniu analogowym nie jest możliwe.

W tabeli 4 porównano podstawowe parametry zasilaczy różnych typów o prądzie znamionowym 400 A.

Schemat blokowy, przedstawiający zasadę działania prostownika z wewnętrzną przemianą częstotliwości, jest pokazany na rys. 39. Składa się on z następujących głównych zespołów:

- prostownika napięcia sieci zasilającej jedno- lub trójfazowego,
- filtra pojemnościowego napięcia wyprostowanego,
- falownika tranzystorowego,
- transformatora podwyższonej częstotliwości,
- prostownika wtórnego podwyższonej częstotliwości,
- dławika filtrującego,
- układu sterowania, regulacji i zabezpieczeń

Napięcie zasilające z sieci energetycznej o częstotliwości 50 lub 60 Hz jest prostowane przez prostownik jedno- lub trójfazowy połączony w układzie mostkowym w zależności od sposobu zasilania. Napięcie wyprostowane, po filtrowaniu przez filtr pojemnościowy, jest prze-

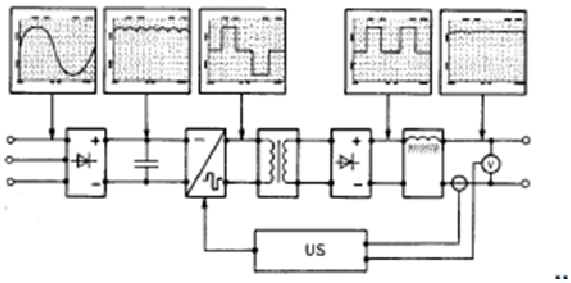
kształcane w układzie falownika łącznie z transformatorem na napięcie przemienne o częstotliwości powyżej 20 kHz.

Zastosowany w prostowniku sterownik zawiera układy regulacji i spełnia wszystkie funkcje sterowania i kontroli pracy falownika, tzn.:

- generuje impulsy o częstotliwości i szerokości wynikających z nastawionego prądu spawania lub programu zmian tego prądu,
- zamienia sygnały układu nastawiania prądu spawania na odpowiednie sygnały sterujące pracą generatora wraz z układami logiki systemu sterowania pracą falownika; kontroluje równocześnie minimalną i maksymalną szerokość impulsów,
- kontroluje prąd tranzystorów w układzie falownika,
- kontroluje temperaturę elementów podatnych na przeciążenia prądowe
- kontroluje napięcie sieci,
- wypełnia wiele innych funkcji związanych ze sterowaniem i kontrolą pracy falownika.

Tabela 4. Porównanie parametrów podstawowych różnych rodzajów zasilaczy łuku spawalniczego o prądzie znamionowym 400 A

Parametr	Jednostka	Rodzaj zasilacza				
		Przetwornica spawalnicza	Przetwornik z regulacja transduktorową	Prostownik tyrystorowy	Prostownik z wewnętrzną przemianą częstotliwości - tyrystorowy	Prostownik z wewnętrzną przemianą częstotliwości - tranzystorowy
Masa	kg	450	230	210	55	35
Sprawność		0,55	0,70	0,76	0,80	0,85
cosφ		0,86	0,60	0,65	0,99	0,99
stała czasowa	ms	200	200	100	0,1	0,01



Rys. 39. Schemat blokowy prostownika z wewnętrzną przemianą częstotliwości; US - układ sterowania, regulacji i zabezpieczeń

Rys. 40 Konstrukcja transformatora o magnetowodzie z kształtek ferrytowych

Zastosowany w układzie sterowania regulator spełnia wszystkie funkcje związane z nastawianiem, regulacją i sterowaniem pracą prostownika i proce spawania, tzn.:

- nastawia wartość zadaną,
- optymalizuje wartości prądu spawania,
- optymalizuje charakterystyki przy starcie falownika,
- przełącza parametry spawania,
- wytwarza impulsy modulujące prąd spawania (przy spawaniu prądu pulsującym),
- diagnozuje i wyłącza awaryjnie obwody,
- kontroluje obieg wody chłodzącej przy spawaniu uchwytem chłodzonym wodą,
- nastawia wstępne parametry spawania,
- załącza układy pomiarowe oraz wypełnia wiele innych funkcji.

Transformatory stosowane w układach prostowników pracują przy zwiększonej częstotliwości i z tego względu ich magnetowody są wykonywane z prasowanych kształtek ferrytowych ograniczających straty spowodowane prądami wirowymi (rys. 40). Uzwojenia transformatorów są wykonywane z folii miedzianej lub plecionki miedzianej w wyniku czego jest ograniczany wpływ efektu naskórkowości, wywoływanego przepływem prądu o podwyższonej częstotliwości. Dławiki filtrujące są wykonywane z takich samych materiałów.

Rys. 41. Spawarka inwertorowa MAX 201C firmy ASPA

Prostowniki z wewnętrzną przemianą częstotliwości są urządzeniami uniwersalnymi i mogą być stosowane we wszystkich znanych metodach spawania ręcznego i zautomatyzowanego. Przeznaczenie prostownika, tzn. do jakiej metody może być stosowany, zależy od układu sterowania i regulacji, w który został on wyposażony. Układy sterowania w tych prostownikach są wyposażone w systemy mikrokomputerowe umożliwiające wszechstronne wykorzystanie urządzenia, łącznie z wybieraniem w sposób zautomatyzowany wcześniej wprowadzonych do pamięci programów spawania.

Spawarka typu MAX 201C (rys. 41) jest przenośnym inwertorowym źródłem prądu o dobrej dynamice, wygładzonym i stabilnym łuku przeznaczona do spawania wszystkimi rodzajami elektrod otulonych (metoda MMA), szczególnie elektrodami celulozowymi oraz elektrodą wolframową w atmosferze gazu obojętnego (metoda TIG). Spawarka umożliwia spawanie metodą TIG stali i jej stopów oraz miedzi i jej stopów. Zajarzenie łuku odbywa się metodą dotykową. Uchwyt TIG powinien być wyposażony w zawór gazowy umieszczony w rękojeści uchwytu. Dane techniczne spawarki MAX 201C zestawiono w tabeli 5. Spawarka posiada następujące funkcje:

- Arc-Force (nastawiana) dla metody MMA,
- sygnalizacja gotowości spawarki do pracy,
- sygnalizacja zadziałania zabezpieczenia termicznego,
- zdalne sterowanie.

Tabela 5. Dane techniczne spawarki inwertorowej MAX 201C

Parametry	Jednostki	MAX 201C 230V/1F	MAX 201C 400V/3F
Napięcie zasilania	V	220/230	380/400
Prąd pobierany z sieci P35%	A	45	13
Prąd pobierany z sieci P60%	A	33	12
Prąd pobierany z sieci P100%	A	28	11
Moc zasilania P35%	kVA	10	9
Moc zasilania P60%	kVA	7,2	8,3
Moc zasilania P100%	kVA	6,1	7,6
Współczynnik mocy	cosφ	0,8	0,8
Napięcie stanu jałowego	V	90	90
Napięcie łuku	V	20-28	20-27,6
Prąd spawania P35%	A	200	190
Prąd spawania P60%	A	155	170
Prąd spawania P100%	A	135	160
Przekrój przewodu zasilającego	mm^2	3x4	4x4
Zabezpieczenie	A	16	16
Ciężar	kg	13	13
Zgodność wykonania z normą		PN-EN 60974-1	PN-EN 60974-1

4.2. Wielostanowiskowe źródła prądu do spawania elektrodami otulonymi

W zakładach przemysłowych, w których procesy produkcyjne wymagają stosowania większej liczby stanowisk spawalniczych, np. produkujących tabor kolejowy, konstrukcje stalowe, w stoczniach, w zakładach samochodowych, uzasadnione jest stosowanie zasilaczy do spawania na wielu stanowiskach równocześnie.

Sieci spawalnicze wielostanowiskowe mogą być zasilane z transformatorów spawalniczych, przetwornic spawalniczych lub prostowników spawalniczych. Współcześnie, do zasilania sieci wielostanowiskowych są stosowane jedynie prostowniki. Z a l e t ą układów wielostanowiskowych jest mniejszy koszt inwestycyjny, a w a d ą duże zużycie energii na rezystorach ograniczających prąd spawania na każdym stanowisku spawalniczym

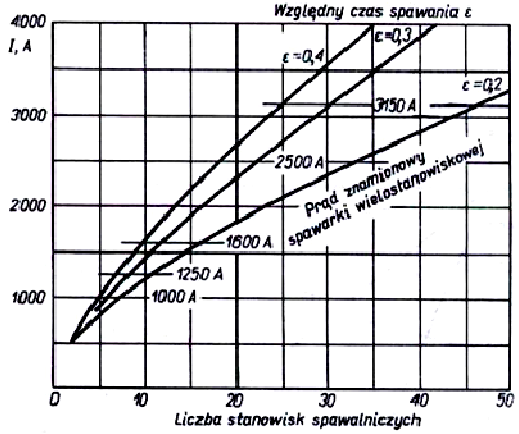
$$\eta = \frac{U_l I_s}{U_p I_s} = \frac{U_l}{U_p}$$

gdzie: η - sprawność, I_s - prąd spawania na stanowisku, U_p - napięcie na wyjściu prostownika, U_l, - napięcie łuku elektrycznego.

Napięcie w stanie jałowym prostownika nie przekracza wartości 65 V. Wielostanowiskowe prostowniki spawalnicze są to zespoły prostowników dużej mocy o sztywnych charakterystykach zewnętrznych zasilane z trójfazwego transformatora prostownikowego. W nowoczesnych prostownikach wielostanowiskowych są stosowane układy automatycznej kompensacji wpływów zmian napięcia sieci zasilającej. Liczba stanowisk spawalniczych, jaka może być zasilana z prostownika, jest wyliczana z zależności:

$$n = \frac{I_{sn}}{I_s k}$$

gdzie: I_{sn} - prąd znamionowy prostownika, I_s - prąd spawania na pojedynczy stanowisku, k - współczynnik jednoczesności spawania (w praktyce k wynosi 0,1-0,5).



Rys. 42. Prąd wypadkowy pobierany z prostownika wielostanowiskowego w funkcji liczb stanowisk przy określonym względnym czasie spawania i przy przeciętnym prądzie spawani 200 A

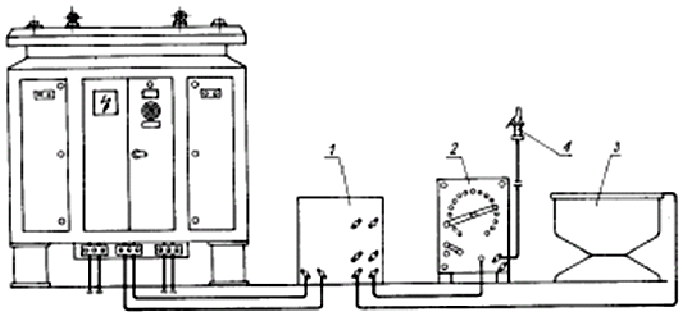
Przy wyznaczaniu liczby stanowisk można używać również pojęcia względnego czasu spawania, oznaczonego symbolem ε. W tym przypadku można posłużyć się wykresami przedstawiającymi zależność prądu obciążenia prostownika w funkcji ilości podłączonych stanowisk spawalniczych, przy założony. względnym czasie spawania ε traktowanym jako parametr oraz przy określony prądzie spawania na poszczególnych stanowiskach (rys. 42). Sztywne charakterystyki zewnętrzne prostowników zapobiegają wzajemnemu oddziaływaniu prądów spawania na poszczególnych stanowiskach, co znaczy, że nastawiony prąd spawania na określonym stanowisku nie powinien się zmieniać przy załączaniu lub wyłączaniu następnych stanowisk. Jednakże do spawania elektrodami otulonymi są wymagane źródła zasilania o opadających charakterystykach statycznych z możliwością nastawiania prądu spawania.

Obie te właściwości są uzyskiwane przez stosowanie rezystorów spawalniczych na każdym stanowisku zasilanym z prostownika wielostanowiskowego (rys. 43).

Zmiana nachylenia charakterystyki statycznej oraz wartości prądu spawania następuje pod wpływem zmiany rezystancji włączonej szeregowo w obwód spawania (rys. 44). Wartość prądu spawania wynosi:

$$I_s = \frac{U - 20}{R + 0{,}04}$$

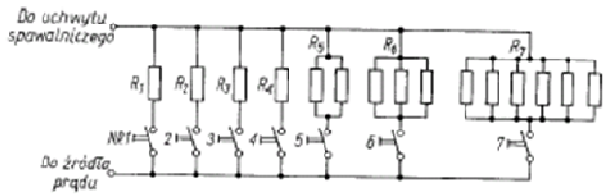
gdzie: U-napięcie zasilania stanowiska, I_s - prąd spawania, R - rezystancja.



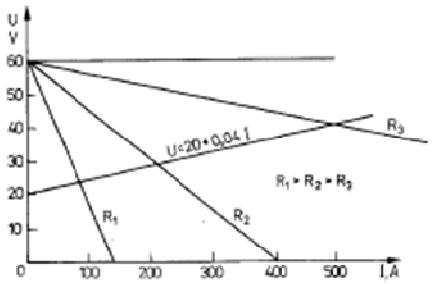
Rys. 43. Przykład połączenia stanowiska spawalniczego z prostownikiem wielostanowiskowym; 1 - rozdzielnia lub szyny zbiorcze, 2 - rezystor spawalniczy, 3 - stół spawalniczy, 4 - uchwyt spawalniczy

Rezystancja ta zależy od liczby włączonych równolegle niezależnych gałęzi rezystorów za pomocą łączników nożowych (rys. 45). Najczęściej spotykane rezystory spawalnicze składają się z kilku niezależnych gałęzi o różnej rezystancji, łączonych równolegle w zależności od wymaganego prądu spawania.

W konstrukcji tych rezystorów stosowana jest zasada, że każda następna gałąź ma rezystancję o połowę mniejszą niż poprzednia.



Rys. 45. Schemat połączeń rezystora spawalniczego; R_1-R_7 - rezystory niezależne, NR1-7 - nożowe łączniki rezystorów



Rys. 44. Charakterystyki statyczne uzyskane za pomocą rezystora przy zasilaniu z prostownika wielostanowiskowego

Umożliwia to zmianę wartości prądu w szerokim zakresie i bez przerywania obwodu spawalniczego, tzn. podczas spawania. Rezystory spawalnicze umożliwiają zmianę prądu spawania w granicach 90-500 A. W a d ą przedstawionego sposobu zmiany prądu spawania jest brak możliwości zdalnego nastawiania.

Do nastawiania prądu spawania mogą być stosowane zespoły wyposażone w falowniki tranzystorowe przekształcające prąd stały na prąd przemienny o powiększonej nastawianej częstotliwości, następnie prostowany podobnie jak w prostownikach z wewnętrzną przemianą częstotliwości. Są to jednak rozwiązania o wiele droższe od rezystorów spawalniczych i nie znalazły dotychczas szerszego zastosowania.

Zespoły prostownika wielostanowiskowego są wyposażone w zabezpieczenia przed skutkami zwarć oraz wzrostu temperatury ponad dopuszczalne wartości, szczególnie zespołów prostownikowych i transformatora prostownikowego. Przykład połączenia stanowiska spawalniczego z prostownikiem wielostanowiskowym jest pokazany na rys. 43. Prostowniki wielostanowiskowe zasilają sieci spawalnicze, do których są podłączane poszczególne stanowiska. Sieci spawalnicze wykonuje się z szynoprzewodów lub przewodów spawalniczych, zależnie od prądów znamionowych zasilających je prostowników.

4.3. Sprzęt pomocniczy i przewody

Każda spawarka do spawania ręcznego składa się z zasilacza energii, przewodów spawalniczych, uchwytu na elektrodę oraz zacisku śrubowego (imadła) lub magnetycznego do przyłączania przewodu spawalniczego do przedmiotu spawanego. Poza tym jest stosowane wyposażenie dodatkowe stanowiska spawalniczego stanowiące sprzęt ochronny oraz przyrządy i narzędzia pomocnicze. Przykład produkowanego w Polsce uchwytu spawalniczego pokazano na rys. 46.

Rys. 46. Uchwyty spawalnicze (produkcji Zakładu POMET we Wronkach)

Wymagania stawiane przewodom spawalniczym są określone w Polskiej Normie. Muszą one być dostatecznie giętkie, w izolacji odpornej na uszkodzenia mechaniczne, a przy specjalnych wymaganiach izolacja powinna być gumowa o oponie z gumy trudnopalnej i olejoodpornej. Warunki te spełniają specjalne przewody oznaczone symbolem OS 1 lub OS2 - miedziane oraz AOS 1 lub AOS2 - aluminiowe. Cyfra za symbolem OS oznacza, że przewód jest w oponie gumowej jedno- lub dwupowłokowej. Przewody w oponie trudnopalnej i olejoodpornej są oznaczone symbolem OnS.

Przy długościach nie przekraczających 10 m i uwzględnieniu dopuszczalnego nagrzewania przyjmuje się następujące wartości prądu spawania do najczęściej stosowanych przekrojów:

35 mm^2 do 195 A

50 mm^2 do 245 A

70 mm^2 do 300 A

95 mm^2 do 365 A

Przy większych długościach przewodów o przekroju decyduje dopuszczalny spadek napięcia, który ze względu na straty i właściwe wykorzystanie zasilaczy, nie powinien przekraczać 4 V. Przekroje przewodów spawalniczych S, przy uwzględnianiu dopuszczalnego spadku napięcia, można obliczyć z zależności:

$$S = \frac{2I_s l}{\Delta U \gamma}$$

gdzie: I_s - prąd spawania, l - długość przewodu pojedynczego, ΔU - dopuszczalny spadek napięcia, γ- przewodność właściwa przewodu.

Przekroje przewodów OS zestawione w funkcji prądu spawania i długości przewodów przy spadku napięcia 2 V są przedstawione w tabeli. 6. Przy spawaniu dużymi prądami, co wymaga stosowania większych przekrojów, uchwyty spawalnicze ze względów ergonomicznych są wyposażane w krótkie odcinki przewodów o mniejszym przekroju (tabela 7) łączone drugim końcem z przewodem o właściwym przekroju. Do przewodzenia dużych prądów spawania, np. w urządzeniach zmechanizowanych, są stosowane przewody łączone równolegle.

Tabela 6. Przekroje przewodów typu OS w mm^2 w funkcji długości przewodów i prądu przy założonym spadku napięcia ok. 2 V

Maksymalna długość pojedynczego przewodu	Dopuszczalny prąd spawania							
	105	140	175	225	280	335	400	460
	Przekroje przewodów [mm^2]							
20	16	25	35	50	70	95	120	150
30	25	35	50	70	70	95	120	150
50	50	70	75	95	120	150	185	185
75	70	95	120	150	185	240	240	300
100	95	120	185	185	240	300	-	-

Tabela 7. Przekroje przewodów typu OS stosowanych w uchwytach spawalniczych

Dopuszczalny prąd spawania [A]	Przekrój przewodu [mm^2]
225	35
335	50
460	70
650	95

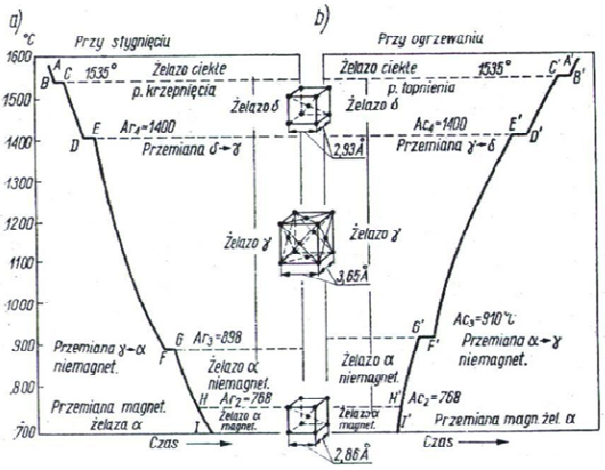
5. MATERIAŁY PODSTAWOWE – STALE

5.1. Charakterystyka żelaza

Żelazo jest pierwiastkiem metalicznym o temperaturze topnienia 1534°C i temperaturze wrzenia 3070°C.

Żelazo występuje w dwóch odmianach alotropowych: α i γ.

Żelazo α, trwałe od niskich temperatur do temperatury 910°C oraz od temperatury 1390 do 1534°C, ma strukturę krystaliczną o sieci regularnej przestrzennie centrowanej.



Rys. 47. Krzywa studzenia żelaza

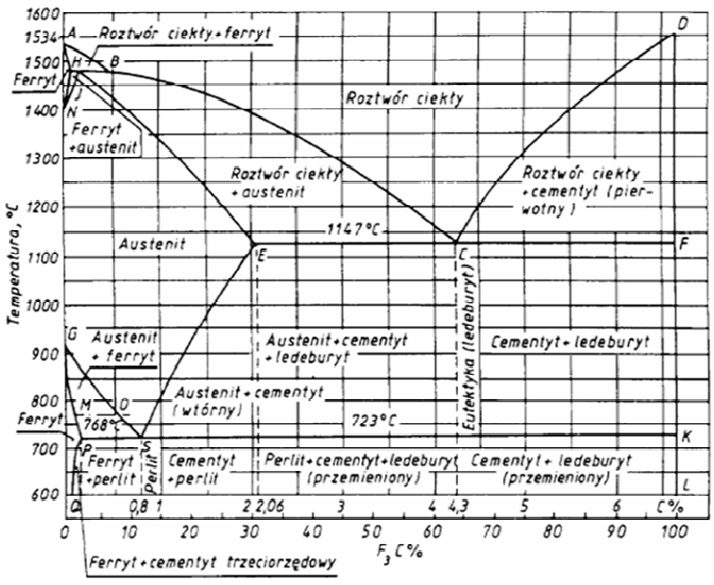
Żelazo γ, trwałe w temperaturach 910 do 1390°C, ma strukturę krystaliczną o sieci regularnej płasko centrowanej.

Gęstość żelaza α w temperaturze 20°C wynosi 7,86 g/cm3, gęstość żelaza γ w temperaturze 916°C - 8,05 g/cm3.

Przemiany zachodzące w czystym żelazie podczas jego studzenia lub ogrzewania najlepiej omówić posługując się krzywą studzenia. Jak widać na rys. 47, poza przystankiem w temperaturze 1535°C, związanym z krzepnięciem żelaza, na krzywej występują jeszcze trzy przystanki temperatury. Pierwszy z nich w temperaturze 1400°C odpowiada przemianie alotropowej żelaza δ w żelazo γ. Drugi przystanek ma miejsce w temperaturze 910°C i odpowiada przemianie alotropowej żelaza γ w żelazo α. Trzeci wreszcie, znacznie krótszy przystanek w temperaturze 768°C (punkt Curie) związany jest z przemianą magnetyczną żelaza α (poniżej tej temperatury żelazo jest ferromagnetyczne, powyżej — paramagnetyczne).

Przemiany alotropowe są związane z przebudową struktury krystalicznej, co powoduje zmianę własności fizycznych, chemicznych i mechanicznych. W efekcie powstają inne odmiany tego samego żelaza, noszące nazwę odmian alotropowych. W przeciwieństwie do tego, przy przemianie magnetycznej zmieniają się jedynie niektóre własności elektryczne, magnetyczne i cieplne, tak że jest ona szczególnym rodzajem przemiany, zupełnie różnym od alotropowej.

5.2. Charakterystyka stali niestopowych (węglowych)



Rys. 48. Wykres równowagi układu żelazo-cementyt z oznaczonymi składnikami strukturalnymi

Stal jest stop żelaza z węglem plastycznie obrobiony i plastycznie obrabialny o zawartości węgla nie przekraczającej 2,06% (rys. 48).

Stal obok żelaza i węgla zawiera zwykle również inne składniki. Do pożądanych - składniki stopowe - zalicza się głównie metale (chrom, nikiel, mangan, wolfram, miedź, molibden, tytan).

Pierwiastki takie jak tlen, azot, siarka oraz wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenków siarki, fosforu, zwane są zanieczyszczeniami.

Im większa zawartość węgla, tym większa twardość stali. W stalach stopowych wpływ węgla na twardość jest również spowodowany tendencją niektórych metali, głównie chromu, do tworzenia związków z węglem - głównie węglików o bardzo wysokiej twardości.

Do parametrów określających właściwości stali jako materiału należą charakterystyki fizyczne, mechaniczne i technologiczne.

Właściwości fizyczne stali

- gęstość $\rho = 7850$ kg/m^3
- współczynnik liniowej rozszerzalności $\alpha_T = 0{,}000012^oC\text{-}1$,
- współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 58$ W/mK,
- współczynnik Poissona $v = 0{,}30$,

Właściwości mechaniczne i technologiczne stali

Są to parametry charakteryzujące przydatność stali w gospodarce. Ich wielkość uzależniona jest od składu stopu i obróbki. Podane poniżej wartości są charakterystyczne dla stali stosowanych w budownictwie.

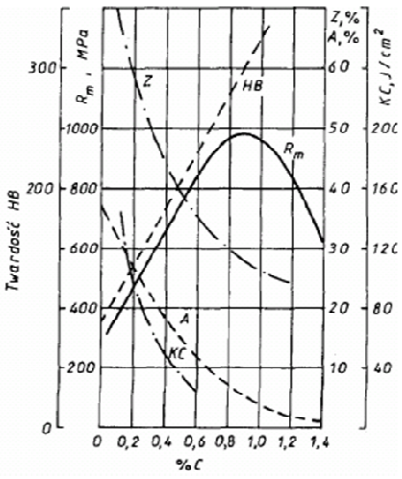
- *Wytrzymałość na rozciąganie* R_m określana wielkością naprężenia wywołanego w przekroju próbki przez siłę powodującą jej zerwanie. Badane są także inne parametry określające naprężenia w próbkach stali, takie jak wytrzymałość na ściskanie, zginanie, ścinanie i skręcenie. Podczas badania próbki stali na zerwanie określane są także:
- naprężenie rozrywające, czyli rzeczywista wartość naprężenia w miejscu przewężenia rozciąganej próbki bezpośrednio przed jej zerwaniem (jest to wartość siły powodującej zerwanie w odniesieniu do przekroju zerwanej próbki w jej najwęższym miejscu);
- wydłużenie względne, czyli procentowy przyrost długości zerwanej próbki w stosunku do jej początkowej długości,
- przewężenie względne, czyli procentowe zmniejszenie powierzchni przekroju poprzecznego zerwanej próbki w miejscu zerwania do jej przekroju pierwotnego.
- *Sprężystość* rozumiana jako zdolność materiału do odzyskiwania pierwotnej postaci po zaprzestaniu działania na niego sił powodujących odkształcenie. W zakresie naprężeń sprężystych obowiązuje prawo Hooke'a. Sprężystość materiału określa:
  - współczynnik sprężystości podłużnej (moduł Younga) E, który dla stali ma wartość w granicach od 205 do 210 GPa (Gigapaskali)
  - współczynnik sprężystości poprzecznej G (moduł Kirchhoffa), który dla stali ma wartość 80GPa
- *Plastyczność*, czyli zdolność materiału do zachowania postaci odkształconej na skutek naprężeń od obciążeń po zaprzestaniu ich działania. Są to odkształcenia trwałe, które powstają po przekroczeniu wartości tzw. granicy plastyczności, po przekroczeniu której następuje znaczny przyrost wydłużenia rozciąganej próbki, nawet bez wzrostu a często przy spadku wartości siły rozciągającej. Umownie przyjmuje się granicę plastyczności dla wartości naprężenia, przy którym trwałe wydłużenie próbki wynosi 0,2%.
- *Ciągliwość*, czyli zdolność materiału pozwalająca na zachowanie jego właściwości podczas obróbki polegającej na jego tłoczeniu, zginaniu lub prostowaniu itp. Właściwość ta wykorzystywana jest podczas produkcji wyrobów (np. blach trapezowych, ościeżnic itp.).
- *Udarowość*, czyli odporność na obciążenia dynamiczne.
- *Twardość*, czyli zdolność przeciwstawienia się materiału przy próbie wciskania przemiotów twardszych. Twardość stali związana jest z zawartością węgla, manganu, chromu itp.
- *Spawalność*, to cecha stali pozwalająca na wykonanie trwałych połączeń przez spawanie
- *Odporność na działanie środowiska*:
  - odporność na działanie podwyższonych i niskich temperatur,
  - odporność na działanie czynników powodujących korozję chemiczną i atmosferyczną.

Staliwo to stal w postaci lanej (czyli odlana w formy odlewnicze), nie poddana obróbce plastycznej.

W odmianach użytkowych zawartość węgla nie przekracza 1%, suma typowych domieszek również nie przekracza 1%. Własności mechaniczne staliwa są nieco niższe niż własności stali o takim samym składzie po obróbce plastycznej. Wynika to z charakterystycznych dla odlewów: gruboziarnistości i pustek międzykrystalicznych. Staliwo ma natomiast znacznie lepsze własności mechaniczne od żeliwa, w szczególności - jest plastycznie obrabialne, a odmiany o zawartości węgla poniżej 0,25% są również dobrze spawalne.

5.3. Wpływ węgla i pierwiastków stopowych na własności stali

Węgiel bardzo silnie wpływa na własności stali nawet przy nieznacznej zmianie jego zawartości i z tego względu jest bardzo ważnym składnikiem stali.



Rys. 49. Wpływ węgla na własności mechaniczne stali

Zwiększenie zawartości węgla powoduje, jak już poprzednio wspomniano, zmianę struktury stali. Jeżeli stal zawiera mniej niż 0,8% C, to jej struktura składa się ferrytu i perlitu. Struktura stali zawierającej 0,8% C składa się tylko z perlitu, natomiast w stali o zawartości powyżej 0,8% C oprócz perlitu występuje również cementyt wtórny. Zmiana struktury stali spowodowana różną zawartością węgla wiąże się ściśle ze zmianą własności mechanicznych. Na rysunku 49 przedstawiono wpływ węgla na własności mechaniczne stali walcowanej na gorąco.

Jak widać *zwiększenie zawartości węgla zwiększa wytrzymałość na rozciąganie Rm i zmniejsza plastyczność stali.* Maksymalną wytrzymałość osiąga stal przy zawartości ok. 0,85% węgla. Przy większej zawartości węgla wytrzymałość zmniejsza się na skutek pojawiania się coraz większej ilości cementu wtórnego, który wydziela się na granicach ziarn. *Zwiększenie zawartości węgla*, *oprócz obniżenia własności plastycznych, pogarsza również własności technologiczne stali węglowej; szczególne znaczenie ma pogorszenie spawalności.*

Mangan wprowadza się do wszystkich stali w procesie stalowniczym w celu ich odtlenienia, tj. usunięcia szkodliwego tlenku żelazawego lub związania siarki w MnS, przez co zapobiega się powstaniu FeS powodującemu powstanie kruchości stali na gorąco.

Krzem w ilościach do 0,5% jest dodawany do stali podczas jej wytapiania w celu odtlenienia. W ilościach 0,5÷1,0% jest dodawany w celu umocnienia ferrytu. W większych ilościach (0,5÷4,5%) powoduje zwiększenie oporu elektrycznego oraz zmniejszenie stratności stali magnetycznie miękkich. Zwiększa również żaroodporność stali. Krzem stabilizuje bardzo mocno ferryt, dlatego stale zawierające więcej niż 3% Si zachowują strukturę ferrytyczną od temperatury otoczenia do temperatury solidusu. Wpływ krzemu, który rozpuszcza się w ferrycie, jest podobny do wpływu manganu.

Fosfor dostaje się do stali z rud żelaza. Fosfor rozpuszczony w ferrycie (graniczna rozpuszczalność w temperaturze pokojowej wynosi ok. 1,2%) zmniejsza bardzo znacznie jego plastyczność i podwyższa temperaturę, w której stal staje się krucha, wywołując tzw. *kruchość na zimno.* Ten wpływ fosforu jest bardzo wyraźny wówczas, gdy jego zawartość w stali jest większa niż 0,1%. Jednak w stalach przeznaczonych na odpowiedzialne wyroby zawartość nawet 0,05% P jest niebezpieczna i należy jej unikać, ponieważ w czasie krystalizacji stali zachodzi silna segregacja fosforu, wskutek czego w pewnych miejscach zawartość fosforu będzie dość znaczna i będzie powodować kruchość. W zależności od przeznaczenia stali ustala się ostrzejsze wymagania dotyczące zawartości fosforu (np. max 0,025%).

Siarka podobnie jak fosfor dostaje się do stali z rud żelaza, a ponadto z gazów piecowych. W stalach wysokojakościowych zawartość siarki ogranicza się zazwyczaj do 0,02 ÷ 0,03%. W stali zwykłej jakości dopuszcza się większą zawartość siarki (do 0,05%). Siarka powoduje zja-

wisko *kruchości na gorąco* (powyżej 800^{0}C), pogarszając spawalność stali. Natomiast siarka, podobnie jak fosfor, polepsza skrawalność stali i w ilości 0,15-0,30% jest wprowadzana celowo do stali automatowych.

Wodór, azot i tlen występują w stali w niedużych ilościach, a ich zawartość zależy w dużym stopniu od sposobu wytapiania. W stali będącej w stanie stałym, gazy mogą występować w kilku postaciach:

- w stanie wolnym, skupiając się w różnych nieciągłościach wewnątrz metalu najczęściej tworząc tzw. pęcherze),
- mogą być rozpuszczone w żelazie,
- mogą tworzyć związki (azotki, tlenki) występujące w stali jako tzw. wtrącenia niemetaliczne.

Wpływ *wodoru* na własności stali jest zdecydowanie ujemny. Zmniejsza on w znacznym stopniu własności plastyczne i technologiczne stali oraz powoduje występowanie wielu wad materiałowych, jak np. tzw. płatków śnieżnych (tj. wewnętrznych pęknięć o jasnej powierzchni), odwęglania, skłonności do tworzenia pęcherzy przy trawieniu itp.

Azot powoduje zwiększenie wytrzymałości i zmniejszenie plastyczności stali, co objawiać się może jako tzw. *kruchość na niebiesko.* Niekorzystne działanie azotu przejawia się także zwiększeniem skłonności stali do starzenia, powodowanym wydzielaniem się azotków z przesyconego roztworu. W niektórych stalach stopowych azot jest stosowany jako korzystny dodatek stopowy stabilizujący austenit, zastępując drogi nikiel.

Tlen występuje w stali głównie w postaci związanej, najczęściej tlenków FeO, SiO2, Al2O3 i in. Tlen powoduje pogorszenie prawie wszystkich własności mechanicznych i dlatego dąży się przez odpowiednie prowadzenie procesu metalurgicznego do obniżenia jego zawartości w stali. Odtlenianie stali przeprowadza się za pomocą stopów krzemu, manganu i aluminium.

5.4. Znakowanie stali niestopowych i niskostopowych

W normie PN-EN 10020:2002 sklasyfikowano stale wg składu chemicznego, od którego zależy ich spawalność, na stale niestopowe i stale stopowe.

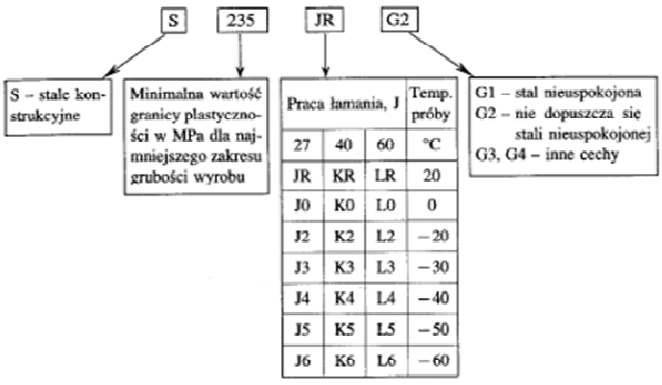
Według tej normy stalami niestopowymi są stale, w których zawartość pierwiastków, określona wg analizy wytopowej, jest mniejsza od następujących wartości granicznych: 1,65% Mn, 0,50% Si, 0,40% Cu i Pb, 0,30% Cr i Ni, 0,10% Al, Bi, Co, Se, Te, V i W, 0,08% Mo, 0,06% Nb, 0,05% La, Ti i Zr oraz 0,0008% B.

Stalami stopowymi określa się gatunki, w których zawartość przynajmniej jednego pierwiastka, wg analizy wytopowej, osiąga lub przekracza podaną wyżej wartość.

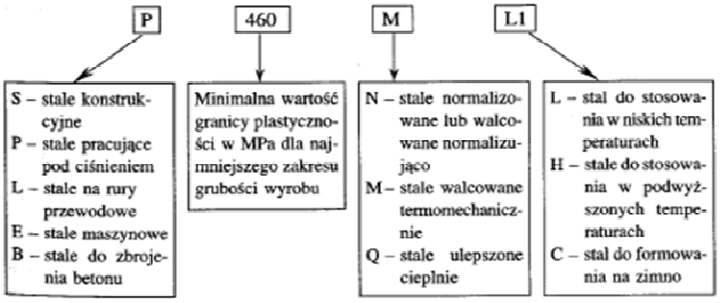
Sposób oznaczania stali podano w normie PN-EN 10027-1:1992, w której wyróżniono dwie główne grupy:

Grupa 1 - znaki stali zawierające symbole wskazujące na zastosowanie oraz mechaniczne lub fizyczne własności stali (rys. 50, 51),

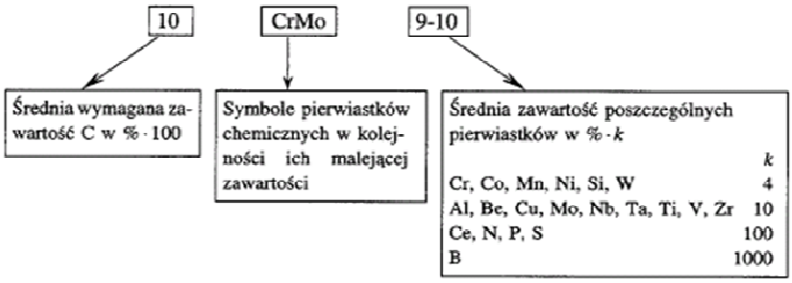
Grupa 2 - znaki stali zawierające symbole wskazujące na skład chemiczny stali (rys. 52).



Rys. 50. Sposób oznaczania stali wg grupy 1 Stale niestopowe wg PN-EN 10025:2002



Rys. 51. Stale drobnoziarniste wg norm serii: PN-EN 10028, PN-EN 10013, PN-EN 10137, PN-EN 10149



Rys. 52. Sposób oznaczania stali wg grupy 2. Stale stopowe o zawartości każdego pierwiastka stopowego <5%

Stale niestopowe charakteryzują się niezbyt dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi (R_e, R_m), dobrą spawalnością, stosunkowo wysoką odpornością na obciążenia zmienne i są stosowane najczęściej na konstrukcje spawane.

W tabelach 8 i 9 zestawiono stale niestopowe odpowiednio wg PN-88/H-84020 i wg PN-EN 10025:2002.

Tabela 8. Stale niestopowe konstrukcyjne ogólnego przeznaczenia wg PN-88/H-84020

Znak stali	Skład chemiczny, %						Właściwości wytrzymałościowe[1]		Odmiana plastyczności
	C maks.	Mn maks.	Si	P maks.	S maks.	$Al_{całk.}$ min.	R_e MPa	R_m MPa	
St0S	0,23	1,30	maks. 0,40	0,070	0,065	–	min. 185	300-540	–
St3SX	0,22	1,10	maks. 0,07	0,050	0,050	–	min. 225	360-490	–, U
St3SY			maks. 0,15			–			–, U
St3S			0,10–0,35			–			–, U
						0,020			A, M, J
St3VX	0,17	1,20	maks. 0,07	0,045	0,045	–			–, B
St3VY			maks. 0,15	0,045	0,045	–			–, B
				0,040	0,040				C
St3V			0,10–0,35	0,045	0,045	–			–, B
				0,040	0,040				C
St3W	0,17	1,20	0,10–0,35	0,035	0,035	0,020			D
St4SX	0,24	1,10	maks. 0,07	0,050	0,050	–	min. 265	420-550	–, U
St4SY			maks. 0,15			–			
St4S			0,10–0,35			–			
St4VX	0,21	1,30	maks. 0,07	0,045	0,045	–			–, B
St4VY	0,21		maks. 0,15	0,045	0,045	–			–, B
	0,18			0,040	0,040				C
St4V	0,21		0,10–0,35	0,045	0,045	–			–, B
	0,18			0,040	0,040				C
St4W	0,20	1,50	0,10–0,35	0,035	0,035	0,02			D

[1] Dla wyrobów o grubości 16–40 mm

Odmiany plastyczności: U, M – udarność KCU2 odpowiednio w temp. 20°C i –20°C, J – udarność KCU2A po sztucznym starzeniu w temp. 20°C wg wymagań normy PN-88/H-84020, A – bez wymagań udarności dla stali odtlenionych Al.

B, C, D – praca łamania KV = 27 J odpowiednio w temperaturach: 20°C, 0°C i –20°C.

Tabela 9. Stale niestopowe konstrukcyjne wg PN-EN 10025:2002[1)]

Znak stali	Rodzaj odtle-nienia	C maks. dla grubości nominalnej g			Mn maks.	Si maks.	P maks.	S maks.	N maks.
		g ≤ 16	16<g≤40	g>40					
S235JR	dowolny	0,17	0,20	-	1,40	-	0,045	0,045	0,009
S235JRG1	FU	0,17	0,20	-	1,40	-	0,045	0,045	0,007
S235JRG2	FN	0,17	0,17	0,20	1,40	-	0,045	0,045	0,009
S235J0	FN	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,040	0,040	0,009
S235J2G3	FF	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,035	0,035	-
S235J2G4	FF	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,035	0,035	-
S275JR	FN	0,21	0,21	0,22	1,50	-	0,045	0,045	0,009
S275J0	FN	0,18	0,18	0,18	1,50	-	0,040	0,040	0,009
S275J2G3	FF	0,18	0,18	0,18	1,50	-	0,035	0,035	-
S275J2G4	FF	0,18	0,18	0,18	1,50	-	0,035	0,035	-
S355JR	FN	0,24	0,24	0,24	1,60	0,55	0,045	0,045	0,009
S3555J0	FN	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,040	0,040	0,009
S3555J2G3	FF	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55'	0,035	0,035	-
S355J2G4	FF	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	-
S355K2G3	FF	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	-
S355K2G4	FF	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,035	0,035	-

[1)] Wyroby walcowane na gorąco z niestopowych stali konstrukcyjnych – Warunki techniczne dostawy. FU – stal nieuspokojona, FN – nie dopuszc za się stali nieuspokojonej, FF – stal całkowicie uspokojona, odporna na starzenie (min. 0,020% Al)

Stale niestopowe są produkowane jako:
- stale nieuspokojone (np. St3SX, St4SX, S235JRG1),
- stale półuspokojone (np. St3SY, St4SY),
- stale uspokojone (np. St3S, St4S, St36K, S235JRG2),
- stale niestarzejące się (np. St3W, St4W, S275J2G3, P235GH).

5.5. Spawalność stali

Podobnie jak przydatność do hartowania nazwano hartownością, do odlewania lejnością a przydatność do skrawania skrawalnością tak *przydatność materiału do spawania nazwano spawalnością.*

Rozróżnić można *spawalność metalurgiczną, spawalność technologiczną i spawalność konstrukcyjną.*

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

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

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

Definicja spawalności przyjęta przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO):

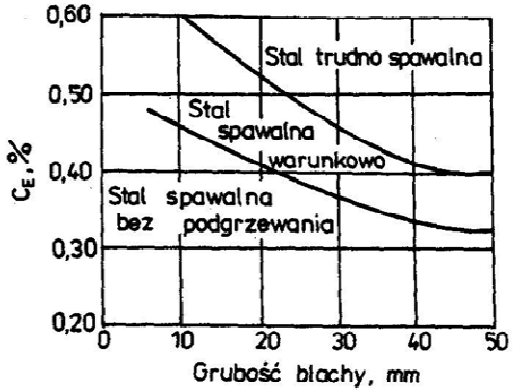
Uważa się, że materiał metaliczny jest spawalny w danym stopniu za pomocą określonej metody i dla danego rodzaju konstrukcji, jeśli nadaje się, przy zastosowaniu środków ostrożności, odpowiadających temu stopniowi - do wykonania połączeń między dwoma elementami. Połączenia te mają zapewnić ciągłość metaliczną,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

Poszczególne składniki stopowe w zasadniczy sposób decydują o spawalności stali. Wśród nich najważniejszy jest węgiel, który ma decydujący wpływ na przemiany strukturalne zachodzące w czasie spawania stali węglowych i stopowych. Z punktu widzenia zawartości węgla C stale węglowe można podzielić na:

- dobrze spawalne max. 0,25% C
- średnio spawalne 0,25 – 0,35% C
- o ograniczonej spawalności 0,35 – 0,45% C
- źle spawalne pow. 0,45% C

Równoczesny wpływ wielu składników stopowych na spawalność stali można określić opierając się na wartości *równoważnika węgla* C_e obliczonego wg wzoru:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \%$$



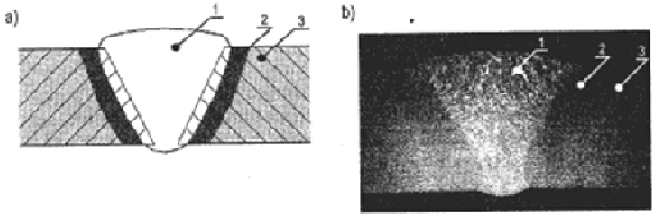
Rys. 53. Zależność spawalności stali od równoważnika węgla i grubości blachy

Za dobrze spawalne uważa się stale, dla których $C_e \leq 0{,}45\%$. Stale takie można spawać bez podgrzewania i bez końcowej obróbki cieplnej.

Spawalność stali oprócz wartości równoważnika węgla zależy również od grubości spawanego elementu (rys. 53). Powiązanie spawalności z grubością elementu jest uzasadnione skłonnością niektórych stali do hartowania w strefie wpływu ciepła spawania. Dotyczy to na przykład także obecnie produkowanych stali 18G2 i 18G2A. Skłonność do hartowania wzrasta z grubością elementu. Stal określona na podstawie wykresu z rys. 53 jako spawalna warunkowo wymaga podgrzewania połączenia podczas spawania lub doboru odpowiednio dużej średnicy elektrody.

5.6. Strefa wpływu ciepła

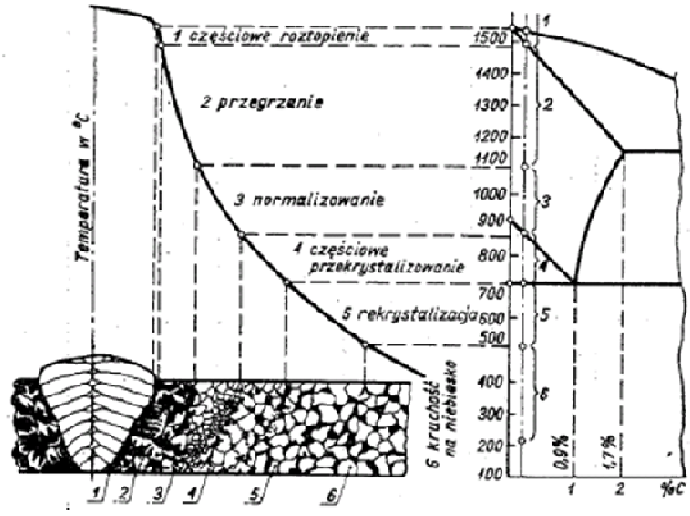
W złączu spawanym wyróżnia się trzy wyraźne obszary (rys. 54a i b): spoinę (1), strefę wpływu ciepła (2) oraz materiał spawany (3).



Rys. 54. Złącze spawane: spoina, strefa wpływu ciepła oraz materiał podstawowy: a) schemat, b) zdjęcie

W strefie wpływu ciepła występuje kilka zmian strukturalnych, różniących się budową i wielkością kryształów oraz własnościami, fizycznymi zależnie od temperatury nagrzania metalu w czasie spawania (rys. 55).

Strefa wtopienia 1 w zakresie temperatury 1500 - 1480°, w której następuje spadek temperatury z szybkością350 - 400°C/min., co jest przyczyną zwiększenia twardości i skłonności do mikropęknięć. W spawaniu gazowym (zwłaszcza metodą w prawo ze względu na większy obszar nagrzewania się metalu i zmniejszenie szybkości stygnięcia) płomieniem skierowanym na spoinę występuje znacznie mniejszy stopień podhartowania strefy wtopienia. Natomiast zwiększa się zakres strefy wpływu. ciepła i poszerzają się strefy przejściowe w materiale rodzimym.



Rys. 55. Budowa strukturalna strefy wpływu ciepła złącza spawanego i rozkład temperatur

Strefa przegrzania 2 obejmuje metal nagrzany do temperatury bliskiej temperaturze topnienia (1480 - 1100°), w której występuje struktura gruboziarnista, mająca charakter stali przegrzanej, ze względu na dość znaczną szybkość stygnięcia (250 - 300°C/min.). Powierzchnia ziarn w strefie przegrzania przy spawaniu gazowym jest około 15 razy większa od powierzchni ziarn stali wyżarzonej.
Strefa normalizacji 3 powstaje w zakresie temperatury 1100 - 870°; w której metal osiąga strukturę drobnoziarnistą stali wyżarzonej. Strefa ta nie osiąga całkowitej przemiany strukturalnej ze względu na dużą szybkość stygnięcia (170 - 200°C/min.).

Strefa częściowego przekrystalizowania 4 występuje w zakresie temperatury 870 - 700°C, w której zachodzi tylko częściowe rozdrobnienie ziarn, wskutek czego występuje większa ilość ziarn struktury pierwotnej. Przy spawaniu gazowym blach ponad 10 mm grubości strefa ta może osiągnąć szerokość 20-25 mm.

Strefa rekrystalizacji 5 występuje w zakresie temperatury 700 - 500°C i w tej temperaturze powstaje wzrost ziarn metalu rozdrobnionych przed rozpoczęciem spawania przez utwardzenie w wyniku stosowanej obróbki plastycznej na zimno (np. kucie, walcowanie itp.).

Strefa kruchości 6 występuje w zakresie temperatury 500 – 200^{0}C i wykazuje wzrost granicy wytrzymałości oraz spadek wydłużenia i udarności.

W czasie spawania w stopiwie zachodzą również pewne procesy metalurgiczne, polegające na wypalaniu i wprowadzaniu doń składników stopowych często szkodliwych, takich jak tlen. azot, wodór oraz rozpuszczaniu się gazów. Wszystkie te procesy decydują o składzie chemicznym stopiwa i o właściwościach mechanicznych spoiny. Duży wpływ na przebieg procesów metalurgicznych w spawaniu gazowym może mieć płomień acetylenowo-tlenowy (niewłaściwa regulacja) oraz składniki powietrza (utlenienie i naazotowanie spoiny).

6. MATERIAŁY DODATKOWE DO SPAWANIA ŁUKOWEGO RĘCZNEGO

6.1. Wiadomości ogólne

Materiały dodatkowe do spawania obejmują te wszystkie materiały, które stosuje się w poszczególnych procesach spawania celem uzyskania połączeń spawanych o wymaganych właściwościach i jakości.

Materiał, z którego są wykonane elementy przeznaczone do spawania nazywa się *materiałem podstawowym* (rodzimym), natomiast wszystkie pozostałe materiały, które są dodatkowo stosowane i zużywane podczas procesu spawania nazywa się *materiałami dodatkowymi*.

Oprócz materiałów dodatkowych do spawania są także stosowane inne materiały, określane jako *materiały pomocnicze* (elektrody nietopliwe, elektrody topliwe do cięcia i żłobienia, podkładki formujące, pierścienie ceramiczne)

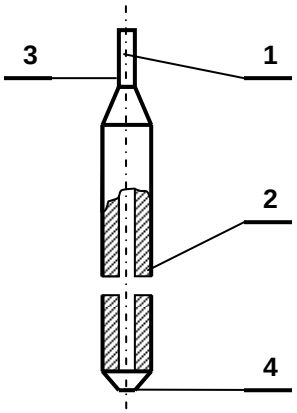
Materiały dodatkowe obejmują: spoiwa, gazy, topniki i inne materiały, które biorą bezpośredni udział w procesie spawania, napawania, cięcia termicznego i w pozostałych procesach spawalniczych.

Spoiwa spawalnicze to materiały, które w procesie spawania lub napawania ulegają stopieniu, a po skrzepnięciu tworzą spoinę lub napoinę. Materiał uzyskany przez stopienie spoiwa nosi nazwę *stopiwa*.

6.2. Charakterystyka elektrod otulonych

W procesie spawania (napawania) łukowego ręcznego jako spoiwo stosuje się *elektrodę otuloną*. Składa się o z *rdzenia metalowego* oraz *otuliny* (rys. 56).

Poprzez rdzeń elektrody jest doprowadzany prąd elektryczny do łuku spawalniczego, jarzącego się między końcem elektrody a materiałem spawanym. Natomiast rola otuliny m.in. na stabilizacji jarzenia się łuku oraz ochronie ciekłego metalu przenoszonego w łuku i przebywającego w jeziorku spawalniczym przed szkodliwym wpływem gazów z powietrza, tj. tlenu i azotu.



Rys. 56. Budowa elektrody otulonej: 1-rdzeń, 2-otulina, 3-końcówka do mocowania w uchwycie spawalniczym, końcówka z substancją ułatwiającą zajarzanie

Rdzeń elektrod otulonych jest prętem metalowym. Rodzaj oraz skład chemiczny materiału, z którego wykonuje się rdzenie elektrodowe, zależy od rodzaju i składu chemicznego materiału podstawowego. Zatem, jeśli elektrody są przeznaczone do spawania stali niestopowych lub niskostopowych, to rdzenie elektrodowe wykonuje się z niestopowego drutu spawalniczego lub odpowiedniego drutu niskostopowego.

W przypadku elektrod do napawania skład chemiczny materiału rdzenia jest przede wszystkim uzależniony od wymaganych właściwości użytkowych, a w znacznie mniejszym stopniu lub wcale od składu chemicznego materiału podstawowego.

Otulina elektrod do ręcznego spawania łukowego jest mieszaniną składników mineralnych, organicznych, żelazostopów i metali.

W zależności od roli poszczególnych składników otuliny w procesie wytwarzania elektrod oraz podczas ich stapiania się i kształtowania spoiny w procesie spawania można podzielić je na:

- składniki żużlotwórcze,
- składniki gazotwórcze,
- składniki odtleniające,
- składniki stabilizujące jarzenie się łuku,
- składniki wiążące,
- składniki stopowe,
- proszek żelaza.

Obecność proszku żelaza w otulinie ma istotny wpływ na przydatność elektrody do spawania w różnych pozycjach. Elektrody o podwyższonej wydajności, a więc zawierające duże ilości proszku żelaza, są z reguły przeznaczone do spawania wyłącznie w pozycji podolnej i nabocznej.

Właściwości spawalnicze elektrod otulonych oraz właściwości mechaniczne ich stopiwa zależą w dużym stopniu od tego, jakie i w jakim stosunku były dodane do otuliny składniki z grup wymienionych powyżej.

W zależności od składu otulin elektrody dzieli się na:

- *elektrody kwaśne (A)* – otulina z dużą zawartością tlenków żelaza, tlenków manganu, tlenków krzemu i żelazomanganu lub innych składników odtleniających. Nadają się do spawania we wszystkich pozycjach przy użyciu prądu stałego i przemiennego. Przy spawaniu elektrodami o mniejszych średnicach i stosowaniu niższych natężeń prądu jest wymagane, w przypadku spawania prądem przemiennym, stosowanie transformatorów spawalniczych o napięciu stanu jałowego powyżej 65V. Elektrody kwaśne należy suszyć przed spawaniem w temperaturze ok. 120^0C w ciągu ok. 1 godziny.
- *elektrody zasadowe (B)* – otulina z dużą zawartością węglanów wapnia i węglanów magnezu oraz fluorytu. Nadają się do spawania we wszystkich pozycjach, spawa się nimi przeważnie prądem stałym, przy załączeniu elektrod do bieguna dodatniego. Spoiny wykonane elektrodami zasadowymi mają bardzo dobre własności mechaniczne, szczególnie własności plastyczne. Udarność tych spoin jest wysoka przy temperaturze normalnej i ujemnej. Elektrody zasadowe są skłonne do tworzenia pęcherzy przy spawaniu, dlatego należy je suszyć bezpośrednio przed spawaniem w temperaturze 300-350^0C w ciągu 2-3 godzin.

- *elektrody rutylowe (R)* – zawierają w otulinie duże ilości rutylu TiO_2 (dwutlenek tytanu). Elektrody te charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami spawalniczymi, nadają się do spawania we wszystkich pozycjach (z wyjątkiem pozycji pionowej z góry na dół) przy użyciu prądu stałego i przemiennego. Elektrody rutylowe należy suszyć przed spawaniem w temperaturze ok. 120^0C w ciągu ok. 1 godziny.
- *elektrody celulozowe (C)* – zawierają dużą ilość organicznych substancji palnych, a zwłaszcza celulozę. Elektrody te nadają się szczególnie do spawania w pozycji pionowej z góry na dół.
- *elektrody o otulinie rutylowej grubootulone (RR)* – cechą tych elektrod jest duża zawartość rutylu w otulinie, dobre zajarzanie łuku po jego przerwaniu i równomierne lico o dobrej łuskowatości. W elektrodach tych stosunek średnicy otuliny do średnicy rdzenia elektrodowego jest równy lub większy od 1,6.
- *elektrody o otulinie rutylowo-celulozowej (RC)* – otulina ma skład podobny do otuliny rutylowej, zawiera jednak dużą ilość celulozy. Stosowane są do spawania w pozycji pionowej z góry na dół.
- *elektrody o otulinie rutylowo-kwaśnej (RA)* – właściwości spawalnicze tych elektrod są porównywalne z elektrodami o otulinie kwaśnej. W ich otulinie jednak znaczne ilości tlenku żelaza są zastąpione przez rutyl, dlatego elektrody te (najczęściej grubootulone) można stosować do spawania we wszystkich pozycjach, z wyjątkiem pozycji pionowej z góry na dół.
- *elektrody o otulinie rutylowo*-zasadowej *(RB)* – charakteryzują się dużą zawartością rutylu oraz podwyższonym udziałem składników zasadowych. Elektrody te, najczęściej grubootulone, zapewniają obok dobrych własności mechanicznych stopiwa, także dobre własności spawalnicze we wszystkich pozycjach spawania z wyjątkiem pozycji pionowej z góry na dół.

6.3. Znakowanie elektrod otulonych

Zasady oznaczania elektrod otulonych do spawania ręcznego łukowego podane są w normie PN-EN 499 "Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych"

Oznaczenie elektrod tego typu składa się z ośmiu członów:

1. Wyrób lub/i metoda spawania "E".
2. Własności wytrzymałościowe i wydłużenie stopiwa (symbole od 35 do 50 - tabela 10).
3. Temperatura, przy której praca łamania jest nie mniejsza od 47 J (tabela 11).
4. Skład chemiczny stopiwa podany w tabeli 12.
5. Rodzaj otuliny – oznaczenia podane poniżej:
   - **A** – otulina kwaśna,
   - **C** – otulina celulozowa,
   - **R** – otulina rutylowa,
   - **RR** – otulina rutylowa o dużej grubości,
   - **RC** – otulina rutylowo-celulozowa,
   - **RA** – otulina rutylowo-kwaśna,
   - **RB** – otulina rutylowo-zasadowa,
   - **B** – otulina zasadowa.
6. Uzysk stopiwa i rodzaj prądu spawania (tablica 13).
7. Pozycja spawania (oznaczenia 1÷5 - tabela 14).
8. Zawartość wodoru w stopiwie (tabela 15).

Oznaczenia elektrod wg normy PN-EN 499 podzielone są na dwie części:

- część obowiązkowa – obejmująca pięć pierwszych członów oznaczenia (1÷ 5) od symbolu "E" do symbolu otuliny,
- część nieobowiązkowa – pozostałe człony oznaczenia.

Tabela 10. Własności wytrzymałościowe stopiwa

Symbol	$R_e$min N/mm²	R_m N/mm²	A_5%
35	355	440÷570	22
38	380	470÷600	20
42	420	500÷640	20
46	460	530÷680	20
50	500	560÷720	18

Tabela 11. temperatura pracy łamania = 47J (^{0}C)

Symbol	Z	A	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10
temperatura pracy łamania °C	-	+20	0	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100

Tabela 12. Zawartość Mn, Mo i Ni w stopiwie

Symbol	Zawartość %			Symbol	Zawartość %		
	Mn	Mo	Ni		Mn	Mo	Ni
bez symbolu	<2	-	-	3Ni	<1,4	-	>2,6÷3,8
Mo	<1,4	0,3÷0,6	-	Mn1Ni	>1,4÷2,0	-	0,6÷1,2
MnMo	>1,4÷2,0	0,3÷0,6	-	1NiMo	<1,4	0,3÷0,6	0,6÷1,2
1Ni	<1,4	-	0,6÷1,2	Z	inne pierwiastki wg uzgodnień	inne pierwiastki wg uzgodnień	inne pierwiastki wg uzgodnień
2Ni	<1,4	-	1,8÷2,6				

Tabela 13. Symbole uzysku stopiwa i rodzaju prądu spawania

Symbol	Uzysk %	Rodzaj prądu
1	<105	przemienny i stały
2	<105	stały
3	105÷125	przemienny i stały
4	105÷125	stały
5	125÷160	przemienny i stały
6	125÷160	stały
7	>160	przemienny i stały
8	>160	stały

Tabela 14. Oznaczenie pozycji spawania

Symbol	Pozycje spawania
1	wszystkie pozycje
2	wszystkie pozycje z wyjątkiem pionowej z góry na dół
3	pozycja podolna dla spoiny czołowej, podolna i naboczna w przypadku spoiny pachwinowej
4	pozycja podolna w przypadku spoiny czołowej i pachwinowej
5	Pozycja pionowa z góry w dół oraz pozycje z pkt. 3

Tabela 15. Zawartość wodoru w stopiwie

Symbol	H5	H10	H15
Zawartość wodoru w stopiwie max. ml/100g	5	10	15

Przykładowe oznaczenia elektrody:
PN-EN E 46 3 1Ni B 5 4 H5
1 2 3 4 5 6 7 8
należy odczytać (zgodnie z symbolami podanymi w tablicach):
E – elektroda do łukowego spawania ręcznego
46 – minimalna granica plastyczności =460 N/mm^2

3 – minimalna praca łamania =47 J przy temp. -30^{0}C
1Ni – zawartość w stopiwie dodatków 1,1% Mn i 0,7% Ni
B – otulina zasadowa
5 – prąd spawania stały i przemienny, uzysk 140%
4 – spawanie doczołowe i pachwinowe w pozycji podolnej
H5 – zawartość wodoru w stopiwie 5 ml/100 g

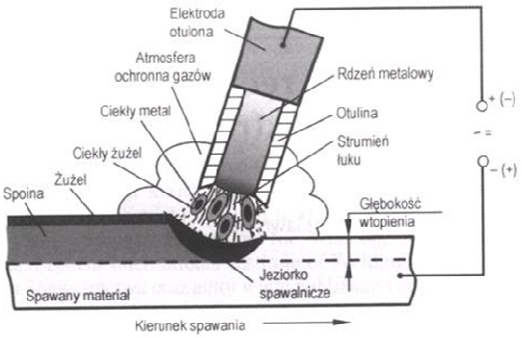
7. TECHNIKA SPAWANIA ELEKTRODĄ OTULONĄ

7.1. Historia spawania łukowego

Spawanie elektrodą otuloną jest jedną z najstarszych i najczęściej stosowanych metod spawania łukowego. Historia spawania łukowego, a zwłaszcza spawania elektrodami prętowymi, sięga 1885 roku, kiedy to Rosjanin Bernardos i Polak Olszewski opatentowali sposób spawania łukowego nietopliwą elektrodą węglową. Łuk spawalniczy, zasilany prądem stałym, stapiał łączony materiał i spoiwo wprowadzane dodatkowo do strefy łuku w postaci pręta lub sztabki. W 1890 roku Rosjanin Sławianow zastąpił nietopliwą elektrodę węglową prętem stalowym stapiającym się w łuku elektrycznym. Wadą obu tych metod spawania było jarzenie się łuku elektrycznego w powietrzu, bez dodatkowej osłony, przez co jeziorko spawalnicze było narażone na silne utlenianie i naazotowanie. Tak wykonane spoiny miały zatem znacznie obniżone właściwości w stosunku do materiału spawanego, a zwłaszcza właściwości plastyczne. Sposób na usunięcie tej niedogodności odkrył w 1907 roku Szwed Oskar Kiellberg, wynalazca elektrody prętowej otulonej. Pokrył on pręt stalowy warstwą otuliny, składającej się z substancji mineralnych. Podczas stapiania otuliny w łuku elektrycznym powstawały gazy i żużel chroniące ciekłe jeziorko przed dostępem powietrza. Od wynalazku Kiellberga rozpoczął się burzliwy rozwój spawania elektrodami otulonymi. Obecnie spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną, dzięki dużej uniwersalności technicznej i technologicznej, możliwości wykonania połączeń o wysokich właściwościach eksploatacyjnych wielu metalowych materiałów konstrukcyjnych w dowolnych pozycjach i trudno dostępnych miejscach, nadal zajmuje czołową pozycję w wykonywaniu konstrukcji spawanych.

7.2. Charakterystyka spawania ręcznego elektrodą otuloną

Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną jest procesem, w którym trwałe połączenie uzyskuje się w wyniku stopienia ciepłem łuku elektrycznego topliwej elektrody otulonej i materiału spawanego (rys. 57).

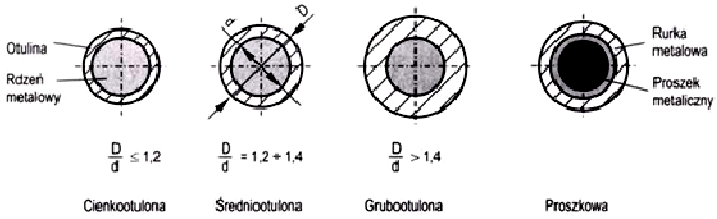


Rys. 57. Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną

Łuk elektryczny jarzy się między rdzeniem elektrody pokrytym otuliną i spawanym materiałem. Ustawiona pod odpowiednim kątem względem złącza elektroda otulona jest przesuwana ręcznie przez operatora wzdłuż linii spawania. Spoinę złącza tworzą stopione ciepłem łuku: rdzeń metaliczny elektrody, składniki metaliczne otuliny elektrody oraz nadtopione brzegi materiału spawanego (rodzimego). Udział materiału rodzimego w spoinie, w zależności od rodzaju spawanego metalu i techniki spawania, może wynosić 10-40%.

Łuk spawalniczy może być zasilany prądem przemiennym lub stałym z biegunowością ujemną lub dodatnią. Osłonę łuku stanowią gazy i ciekły żużel powstałe w wyniku rozpadu otuliny elektrody pod wpływem ciepła łuku. Skład osłony gazowej, w zależności od składu chemicznego otuliny, to: CO_2, CO, H_2O oraz produkty ich rozpadu.

Spawanie rozpoczyna się po zajarzeniu łuku między elektrodą otuloną a spawanym przedmiotem, intensywne ciepło łuku, o temperaturze dochodzącej w środku łuku do 6000 ^{0}C, stapia elektrodę, której metal jest przenoszony do jeziorka spoiny. *Przenoszenie metalu rdzenia elektrody otulonej w łuku spawalniczym, w zależności od rodzaju otuliny, może odbywać się: grubokroplowo, drobnokroplowo lub nawet natryskowo.*



ji elektrod otulonych

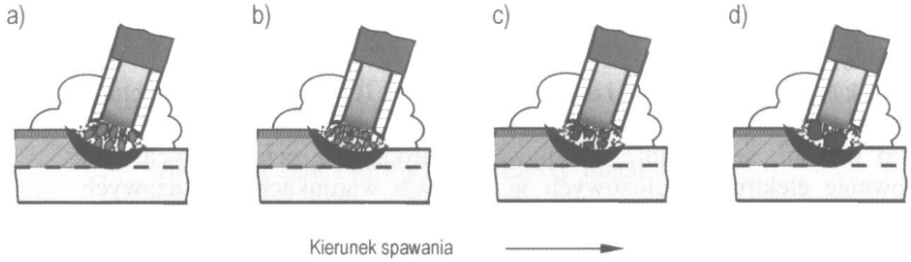
Ilość tworzącego się gazu i żużla osłaniających łuk oraz ich skład chemiczny zależą od rodzaju otuliny elektrody i jej grubości (rys. 58). Stosuje się otuliny o różnej grubości w stosunku do średnicy rdzenia, a ich nazwy: rutylowe, kwaśne, zasadowe, fluorkowe, cyrkonowe, rutylowo-zasadowe, celulozowe itd. są zależne od właściwości chemicznych składników otuliny.

Elektrody są zwykle produkowane o średnicach rdzeni 1,6-6,0 mm i długości 250-450 mm.

Zasadnicze funkcje otuliny to:

- osłona łuku przed dostępem atmosfery,
- łatwe zajarzanie łuku spawalniczego,
- stabilizacja łuku spawalniczego,
- wprowadzenie do obszaru spawania pierwiastków odtleniających, wiążących azot i rafinujących ciekły metal spoiny,
- wytworzenie żużla, wpływającego na:
  - wielkość przenoszonych kropel stopiwa,
  - zabezpieczenie kropli ciekłego metalu stopiwa i jeziorka spawalniczego przed dostępem gazów z atmosfery,
  - ochronę i formowanie krzepnącego ściegu spoiny i opóźnienie jego stygnięcia,
  - regulacja składu chemicznego spoiny.

Charakter przechodzenia ciekłego metalu w łuku w zależności od rodzaju otuliny elektrod przedstawiono na rys. 59.



Rys. 59. Charakter przechodzenia ciekłego metalu w łuku w zależności od rodzaju elektrod: a) elektroda celulozowa, b) kwaśna, c) rutylowa, d) zasadowa

7.3. Stanowisko do spawania ręcznego elektrodą otuloną

Urządzenie do spawania elektrodami otulonymi składa się z zasilacza energii elektrycznej, przewodów prądu spawania oraz uchwytu elektrody. Głównym elementem obwodu spawalniczego jest zasilacz energii elektrycznej.

Do zasilania łuku spawalniczego podczas spawania elektrodami otulonymi, w zależności od wymaganej technologii spawania, są stosowane zasilacze prądu o opadającej lub stałoprądowej charakterystyce statycznej (rys. 12) - mogą to być źródła prądu przemiennego (transformatory) lub prądu stałego:

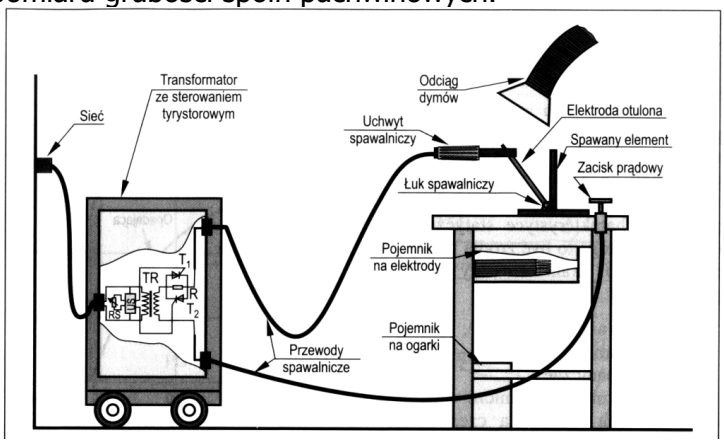
- prostowniki spawalnicze,
- przetwornice spawalnicze - elektromechaniczne,

- prostowniki spawalnicze z wewnętrzną przemianą częstotliwości - inwertorowe.

Podczas wykonywania złącza spawacz musi przesuwać elektrodę w co najmniej dwóch kierunkach: w kierunku jeziorka spoiny, w miarę stapiania elektrody, oraz wzdłuż złącza. Może także wykonywać, w zależności od zaleceń technologicznych wykonania złącza, ruchy poprzeczne. Są to warunki, w których bardzo trudno jest utrzymać stałą długość łuku, co bezpośrednio wiąże się z utrzymaniem stałego napięcia łuku podczas spawania. Dlatego też do spawania elektrodami otulonymi stosuje się źródła prądu o opadającej charakterystyce, umożliwiają one bowiem, przy znacznych zmianach napięcia (długości łuku), niewielkie zmiany natężenia prądu. Zastosowanie tyrystorowych źródeł prądu o stałoprądowej charakterystyce łuku do spawania elektrodami otulonymi umożliwia praktycznie utrzymanie stałego natężenia prądu spawania, nawet jeśli zmiany długości łuku są znaczne.

Podstawowe wyposażenie stanowiska do spawania ręcznego elektrodami otulonymi przedstawiono na rys. 60 i są to:

- zasilacz łuku spawalniczego,
- izolowany uchwyt elektrodowy,
- przewody spawalnicze z odpowiednimi złączkami i przyłączami,
- młotek spawalniczy do usuwania żużla,
- szczotka do czyszczenia brzegów łączonych elementów i rowka spoiny,
- kleszcze do obracania gorących przedmiotów,
- pojemnik do przechowywania różnych rodzajów elektrod,
- pojemnik do gromadzenia ogarków elektrod,
- termos na elektrody,
- skrobak do usuwania odprysków,
- przyrząd do pomiaru grubości spoin pachwinowych.



Rys. 60. Schemat stanowiska do spawania ręcznego elektrodą otuloną

7.4. Parametry spawania

Przebieg procesu spawania łukowego elektrodą otuloną jest uzależniony w znacznym stopniu od umiejętności i doświadczenia operatora. Ustalone w warunkach technologicznych spawania konkretnej konstrukcji parametry spawania stanowią dla spawacza dane wyjściowe, do których dostosowuje swe doświadczenie spawalnicze i zdolności manualne.

Do podstawowych parametrów spawania elektrodą otuloną zalicza się:

- rodzaj i natężenie prądu spawania,
- napięcie łuku,
- prędkość spawania,
- średnica elektrody,
- położenie (pochylenie) elektrody w stosunku do złącza.

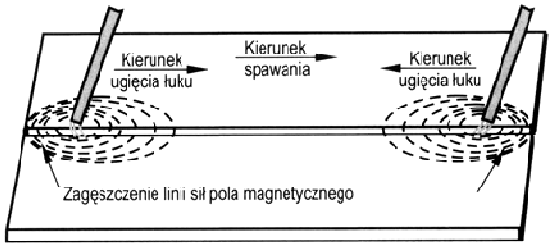
7.4.1. Rodzaj prądu spawania

Spawanie elektrodą otuloną może być prowadzone prądem stałym z *biegunowością ujemną* (biegun ujemny źródła prądu podłączony do elektrody), *biegunowością dodatnią* oraz

prądem przemiennym. Rodzaj prądu i biegunowość zależą od rodzaju elektrody i są podawane w katalogach producenta elektrod oraz na etykiecie opakowania elektrod. W przypadku spawania prądem stałym biegunowość decyduje o: prędkości stapiania elektrody, głębokości wtopienia, charakterze przenoszenia metalu w łuku oraz o rozkładzie ciepła w łuku elektrycznym.

Jeżeli spawanie przebiega z prądem stałym z biegunowością dodatnią na elektrodzie, to więcej ciepła jest generowane na elektrodzie i większa jest prędkość stapiania. Spawanie z biegunowością ujemną na elektrodzie powoduje, że więcej ciepła wydziela się w materiale rodzimym i uzyskuje się większą głębokość wtopienia.

W przypadku spawania elektrodami grubootulonymi z biegunowością dodatnią na elektrodzie wydziela się znaczna ilość gazów, które mogą zmienić rozkład ciepła w łuku tak, że więcej ciepła wydziela się w materiale rodzimym. Biegunowość dodatnią stosuje się zazwyczaj do spawania elektrodą zasadową i materiałów nieżelaznych, np. aluminium i jego stopów, brązów, stopu Monela, niklu oraz do wykonywania złączy w pozycjach przymusowych: PG, PF, PE.



Rys. 61. Zjawisko ugięcia łuku występujące na początku i na końcu złącza spawanego wywołane zagęszczeniem linii sił pola magnetycznego

Podczas spawania elektrodami otulonymi z zastosowaniem prądu stałego może dojść do niekorzystnego odchylenia łuku, tzw. zjawiska ugięcia łuku, które jest przyczyną tworzenia się rozprysków, przyklejeń i braku przetopu. Zjawisko to jest spowodowane oddziaływaniem linii sił pola magnetycznego na łuk spawalniczy, które są indukowane w wyniku przepływu prądu przez spawany materiał. Nasila się ono, jeżeli natężenie prądu będzie powyżej 250 A oraz na początku i na końcu złącza spawanego w wyniku zagęszczenia linii sił pola magnetycznego (rys. 61). Zjawisko ugięcia łuku może się również nasilać wskutek tworzenia się podczas spawania znacznej ilości żużla (nieprzewodzącego prądu elektrycznego), oddziaływania pola magnetycznego źródła prądu oraz magnetyzmu szczątkowego spawanego materiału.

Spawanie z zastosowaniem prądu przemiennego cechuje się mniejszą stabilnością jarzenia się łuku, stapianie pewnych gatunków elektrod jest utrudnione lub wręcz niemożliwe, ale zaletą jest równomierne obciążenie sieci elektrycznej oraz minimalne ugięcie łuku. Można również spawać z większym natężeniem prądu i elektrodami o większej średnicy. Wysoko wydajne elektrody rutylowe, o dużej średnicy, z proszkiem żelaza zawartym w otulinie stapiają się stabilniej, jeśli zasila się je prądem przemiennym.

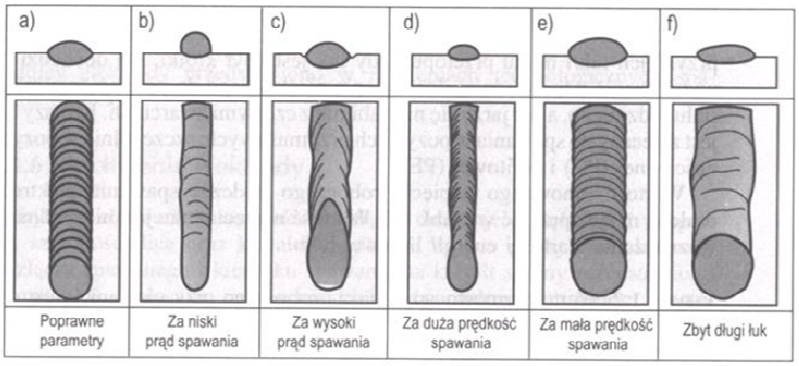
W celu ograniczenia niekorzystnego oddziaływania zjawiska ugięcia łuku należy:

- zmienić rodzaj prądu spawania na przemienny, szczególnie gdy spawa się prądem powyżej 250 A,
- utrzymywać krótki łuk podczas spawania,
- zmniejszyć natężenie prądu, co wiąże się ze zmniejszeniem prędkości spawania,
- zastosować technikę spawania krokiem wstecznym,
- zastosować na długości złącza spawanego kilka spoin sczepnych,
- zmienić kąt ustawienia elektrody względem złącza spawanego przez pochylenie elektrody w kierunku ugięcia łuku,
- wykonać odmagnesowanie przedmiotu spawanego,
- doprowadzić jednocześnie prąd w kilku miejscach.

7.4.2. Natężenie prądu spawania

Decyduje ono o głębokości wtopienia i prędkości stapiania (rys. 62). Jeżeli średnica elektrody jest stała, to wraz ze wzrostem natężenia prądu zwiększa się energia liniowa łuku, wydajność stapiania oraz głębokość, szerokość i długość jeziorka spawalniczego. Gdy natężenie prądu jest zbyt wysokie, wówczas elektroda stapia się bardzo szybko i powiększa znacznie objętość jeziorka spawalniczego, co prowadzi do tworzenia się niezgodności spawalniczych w

postaci podtopień (rys. 62c). Zbyt małe natężenie prądu jest przyczyną braku przetopu i nieregularnego kształtu spoiny (rys. 62b).



Rys. 62. Wpływ parametrów spawania elektrodą otuloną na kształt napoiny

Natężenie prądu dobiera się w zależności od rodzaju elektrody i jej średnicy, rodzaju spawanego materiału, pozycji spawania, rodzaju prądu i od techniki układania poszczególnych ściegów. Wartość natężenia prądu przyjmuje się zazwyczaj na podstawie danych katalogowych producenta elektrod lub zakresu wartości znajdujących się na etykiecie opakowania elektrod.

Natężenie prądu spawania można w przybliżeniu przyjmować wg zasady:

30-40 A na 1 mm średnicy rdzenia elektrody

lub wyznaczyć wg wzoru:

$$I = (20 + 6d)d \ [A],$$

przy czym zależność ta odnosi się do elektrod o średnicy d = 3-6 mm.

7.4.3. Napięcie łuku

Napięcie łuku jest parametrem wynikowym zależnym od długości łuku, rodzaju otuliny i natężenia prądu. Długość łuku podczas spawania elektrodą otuloną, w zależności od pozycji spawania, średnicy i rodzaju elektrody, powinien być utrzymywany w granicach *(0,5 -1,1)d* mm (średnica rdzenia elektrody).

Napięcie łuku wpływa na charakter przenoszenia metalu w łuku, prędkość spawania oraz na głębokość wtopienia (rys. 62f). Wraz ze wzrostem długości łuku zwiększa się napięcie łuku i ilość rozprysków, a łuk staje się mniej stabilny i bardziej wrażliwy na zjawisko ugięcia łuku. Ponadto stopiony metal elektrody przechodzi w postaci grubych kropel i może dojść do przyklejeń lub/i braku przetopu. Gdy łuk jest zbyt krótki, nie dochodzi do wytworzenia odpowiedniej ilości ciepła niezbędnego do przetopienia materiału rodzimego, a łuk jarzy się niestabilnie z częstymi zwarciami. Krótszy łuk jest zalecany do spawania w pozycjach przymusowych, szczególnie w pozycji naściennej (PC) i sufitowej (PE).

Wartość umownego napięcia roboczego podczas spawania elektrodą otuloną można przyjąć wg tabeli 1. Wartość napięcia łuku jest niezbędna do wyznaczania wartości energii liniowej łuku.

7.4.4. Prędkość spawania

Prędkość spawania można rozważać jako prędkość przemieszczania się końca elektrody oraz jako prędkość wykonywania jednego metra złącza i wtedy uwzględnia się wszystkie czasy pomocnicze związane m.in. z czasem wymiany elektrody, odbijania młotkiem żużla i czyszczenia każdego ściegu, np. szczotką drucianą. Parametr prędkość przemieszczania się końca elektrody jest brany pod uwagę przede wszystkim przy liniowym ruchu elektrody. Prędkość spawania zależy głównie od umiejętności spawacza, pozycji spawania, rodzaju elektrody oraz od wymaganego przetopu. Zbyt duża prędkość spawania wpływa na szybkie krzepnięcie jeziorka spawalniczego - spoina jest wąska i nieregularna (rys. 62d). Mała prędkość spawania powoduje, że spoina jest zbyt wysoka i szeroka (rys. 62e).

7.4.5. Średnica elektrody otulonej

Średnica elektrody otulonej decyduje o kształcie ściegu spoiny, głębokości wtopienia i możliwości spawania w pozycjach przymusowych. Doboru średnicy elektrody dokonuje się w zależności od grubości spawanego elementu, pozycji spawania i kolejności układania ściegów,

przy czym pozycja spawania jest najważniejszym czynnikiem decydującym o doborze średnicy elektrody.

Zasadą jest, aby średnica elektrody była mniejsza niż grubość spawanego materiału. Z ekonomicznego punktu widzenia średnica elektrody powinna być jak największa, zwłaszcza do wykonywania warstw wypełniających.

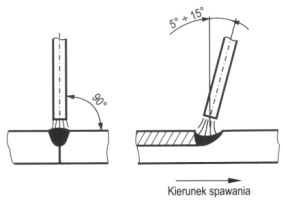
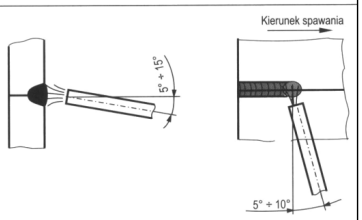
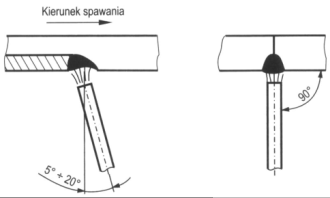
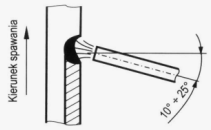
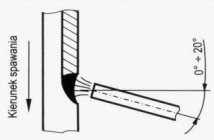
7.4.6. Pochylenie elektrody

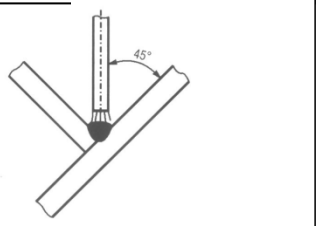
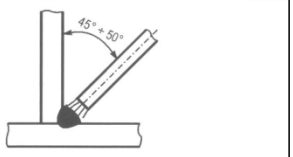
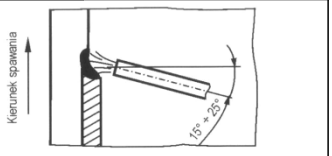
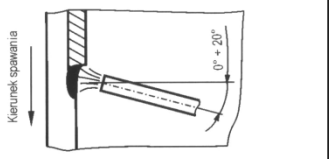
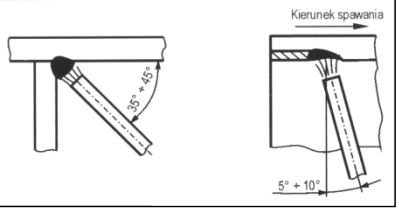
Pochylenie elektrody w stosunku do złącza decyduje o głębokości wtopienia, szerokości lica oraz kształcie nadlewu. Wpływ pochylenia elektrody do złącza spawanego i kierunku spawania na kształt spoiny przedstawiono na rys. 63. Zalecane ustawienia elektrody otulonej względem złączy doczołowych ze spoiną czołową oraz złączy teowych ze spoiną pachwinową, w zależności od pozycji spawania, przedstawiono odpowiednio w tabeli 16 i tabeli 17.

złą-

nia elektrody
ch ze spoiną
ji spawania

ustawienia elektrody
ch ze spoiną pachwi-
zycji spawania

Pozycja spawania	Zalecane ustawienia elektrody względem złącza
PA	
PC	
PE	
PF	
PG	

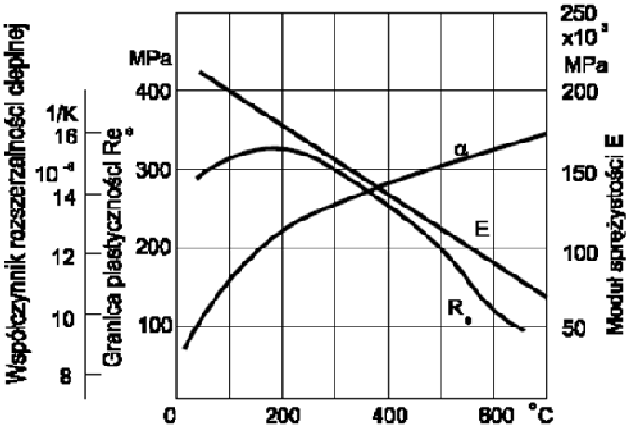
	elektrody względem złącza
PA	
PB	
PF	
PG	
PD	

7.5. Naprężenia i odkształcenia spawalnicze

Proces spawania charakteryzuje się miejscowym nagrzewaniem łączonych elementów. Materiał otaczający miejsce spawania ogranicza swobodę odkształceń w tej strefie, prowadząc do naprężeń wyrażających się wzorem

$$\sigma = Ea\Delta t$$

gdzie: E – moduł sprężystości Younga,
a – współczynnik rozszerzalności cieplnej,
Δt – różnica temperatur między nagrzaną i chłodną strefą materiału.



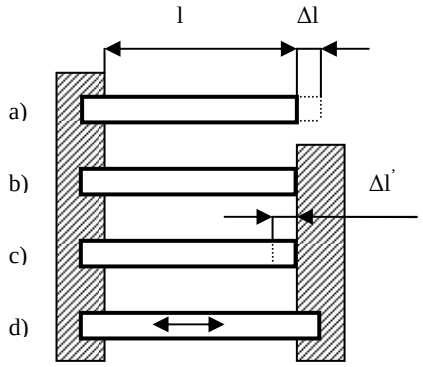
Rys. 64. Zmiany właściwości stali węglowej w funkcji zmian temperatury

Wielkości E i α , podobnie jak granica plastyczności Re i inne własności wytrzymałościowe materiału, silnie zależą od temperatury (rys. 64). Zmiany tych własności wywierają istotny wpływ na powstawanie naprężeń własnych w elementach spawanych.

Jak wynika z wykresu, własności sprężyste stali znikają w temperaturze powyżej 600^0C, jak również granica plastyczności R_e w zakresie temperatur 600-650^0C praktycznie spada do zera. Wynika stąd, że zakres temperatur istotny ze względu na powstawanie naprężeń własnych leży poniżej 600^0C (naprężenia własne praktycznie nie powstają w temperaturze powyżej 600^0C).

Mechanizm powstawania naprężeń własnych

Pręt, który ma możliwość swobodnego wydłużania się , nagrzany równomiernie na całym przekroju wydłuży się o Δl (rys. 65a). Po równomiernym ostygnięciu wróci do pierwotnej długości l, nie zmieniając przy tym swego kształtu i nie wykazując żadnych naprężeń własnych.

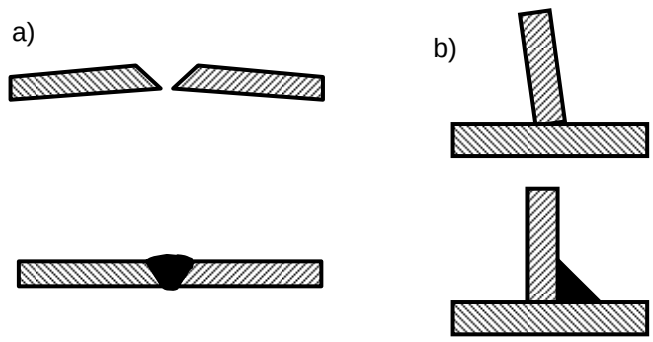


Rys. 65. Zjawiska zachodzące w pręcie równomiernie nagrzanym w zależności od sposobu jego usztywnienia

Ten sam pręt umocowany dwustronnie (rys. 65b) i nagrzewany podobnie, jak w poprzednim przypadku, nie jest w stanie się rozszerzyć i powstają w nim naprężenia ściskające. Jeżeli naprężenia te nie przekroczą granicy sprężystości, to po ostudzeniu pręt wróci do pierwotnej długości l i nie wykaże żadnych naprężeń własnych. Jeżeli natomiast naprężenia przekroczą granice sprężystości, a w pręcie nastąpią odkształcenia trwałe, to po ostudzeniu pręt będzie krótszy o wielkość Δl' (rys. 65c), lecz naprężenia własne nadal w nim się nie pojawią.

Zarówno w tym, jak i w poprzednim przypadku naprężenia w pręcie istniały tylko chwilowo, zarówno w okresie nagrzewania, jak i stygnięcia. Na rys. 66d pręt jest sztywno zamocowany na obydwóch końcach, nie mający możliwości swobodnego przesunięcia. Nagrzewamy ten pręt do takiego stopnia, że naprężenia w nim przekroczą granicę plastyczności i zajdą w nim odkształcenia trwałe (spęczenie). Stygnąc, pręt dąży do skurczenia się do pierwotnej długości l. ale ponieważ uległ spęczeniu, pojawiają się w nim *naprężenia własne – rozciągające.*

Naprężenia i odkształcenia można ograniczyć przez zastosowanie odpowiedniej technologii spawania, która powinna uwzględniać: metodę spawania, grubość materiału, rozmieszczenie spoin, pozycję spawania oraz warunki klimatyczne.



Rys. 66. Przeciwodkształcenia elementów spawanych – przykłady

Spoiny długie, ciągłe wykonuje się odcinkami, zachowując odpowiednią kolejność spawania odcinków. W innych przypadkach spoinę dzieli się np. na dwa odcinki i spawa się je zaczynając od środka na zewnątrz, zamiast od jednego końca do drugiego.

Wielkość skurczu spoiny zależy od wielkości jej przekroju, a więc od grubości materiału, odstępu pozostawionego między blachami, kąta ukosowania, wydajności palnika, metody spawania oraz techniki spawania. *Im grubszy jest materiał i im większy odstęp między blachami oraz większy kąt ukosowania, tym większy jest skurcz spoiny*.

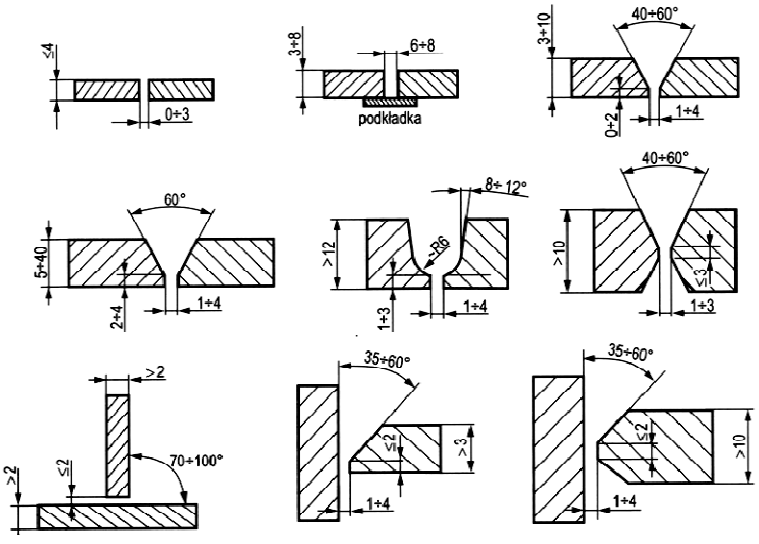
Wielkość naprężeń i stopień odkształcenia są zależne od kształtu spoiny. W spoinach symetrycznych powstają mniejsze naprężenia wewnętrzne niż w spoinach niesymetrycznych, dlatego też wielkość naprężeń jest mniejsza przy spawaniu blachy ukosowanej na X niż na V tej samej grubości.

Sposoby ograniczania i zapobiegania odkształceniom

- elementom spawanym nadaje się przed spawaniem takie położenie, że po wykonaniu spawania przyjmują położenie właściwe (rys. 66),
- elementy łączone zamocowuje się sztywno i w ten sposób uniemożliwia się ich odkształcanie; w tym przypadku powstają jednak w spoinie znaczne naprężenia, które czasem mogą powodować pęknięcia,
- stosuje się takie rodzaje spoin i kolejność ich układania, aby powstające naprężenia przeciwdziałały sobie.

7.6. Przygotowanie materiałów do spawania i zasady doboru elektrody

Przygotowanie materiału do spawania obejmuje przede wszystkim dokładne oczyszczenie brzegów łączonych metali z rdzy, farby, lakierów, tłuszczów i innych zanieczyszczeń. Poza tym brzegi spawanych blach wymagają dokładnego obcięcia i odpowiedniego wyrównania, przy zachowaniu odstępu między brzegami przed rozpoczęciem spawania.



Rys. 67. Przygotowanie brzegów do spawania elektrodami otulonymi wg PN-EN 29692

W zależności od grubości łączonych przedmiotów ich brzegi muszą być przed spawaniem odpowiednio przygotowane, aby zapewnić właściwe wykonanie połączenia z maksymalną wydajnością spawania (rys. 67). Brzegi łączonych blach należy przygotować zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 29692:1997 *Spawanie łukowe elektrodami otulonymi, spawanie łukowe w osłonach gazowych i spawanie gazowe - Przygotowanie brzegów do spawania stali*.

Wybierając typ i średnicę elektrody do spawania, należy uwzględnić następujące czynniki:

- stopiwo powinno mieć skład chemiczny zbliżony do materiału podstawowego,
- właściwości mechaniczne stopiwa muszą być podobne do właściwości materiału podstawowego,
- przydatność do spawania w pozycjach przymusowych,
- do wykonywania ściegów wypełniających stosować elektrody o możliwie dużej średnicy i uzysku.

Średnicę elektrody dobiera się przede wszystkim w zależności od grubości spawanego elementu, pozycji spawania i kolejności układania ściegów. W praktyce warsztatowej należy kierować się następującymi zaleceniami:

- ściegi graniowe należy wykonywać elektrodami:
  - Ø 3,25 mm, gdy odstęp między łączonymi blachami wynosi poniżej 2 mm,
  - Ø 4,0 mm, gdy odstęp między łączonymi blachami wynosi powyżej 2 mm,
- ściegi wypełniające i lico spoiny wykonywać elektrodami:
  - Ø 4,0 mm, gdy odległość między łączonymi blachami w miejscu układania warstwy wynosi poniżej 8 mm,
  - Ø 5,0 mm, gdy odległość między łączonymi blachami w miejscu układania warstwy wynosi powyżej 8 mm,
  - Ø 6,0 mm, gdy odległość między łączonymi blachami w miejscu układania warstwy wynosi powyżej 10 mm;
- ściegi spoin pachwinowych wykonywać elektrodami:
  - Ø 4,0 mm, gdy grubość spoiny a = 2 mm,
  - Ø 5,0 mm, gdy grubość spoiny a = 3 mm,
  - Ø 6,0 mm, gdy grubość spoiny a = 4 mm,
  - Ø 6,0 mm, gdy grubość spoiny a = 5 mm,
  - Ø 6,0 mm, gdy grubość spoiny a = 6 mm,
  - Ø 6,0 mm, gdy grubość spoiny a > 6 mm.

Głębokość wtopienia elektrod otulonych, przy nominalnym natężeniu prądu spawania, wynosi ok. 3 mm i przy tej grubości złącza można spawać jednostronnie bez ukosowania, bez i z odstępem między łączonymi brzegami blach. Ukosowanie brzegów łączonych blach wykonuje się za pomocą cięcia tlenowego i plazmowego lub obróbki mechanicznej.

7.7. Sczepianie przed spawaniem

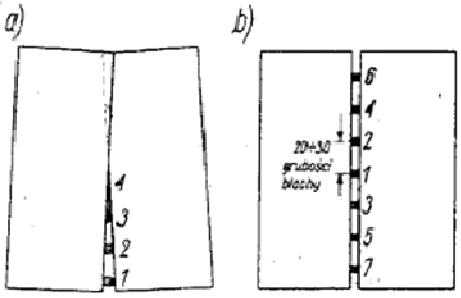
Sczepianie jest to łączenie blach przed spawaniem krótkimi spoinami, tzw. spoinami szczepnymi, w celu unieruchomienia brzegów łączonych elementów w czasie spawania. Rozmieszczenie spoin szczepnych ma ważne znaczenie w przygotowaniu materiałów do spawania, gdyż niewłaściwa kolejność wykonania spoin szczepnych może poważnie utrudnić warunki pracy.

Jeden z typowych przykładów nieprawidłowego wykonania spoin sczepnych przedstawiony jest na rys. 68a. Przy zachowaniu takiej kolejności sczepiania zachodzi systematyczny skurcz i w miarę narastania punktów sczepnych następuje stopniowe zmniejszenie się odstępu pozostawionego na przetop, a nawet: brzegi blach często zachodzą na siebie.

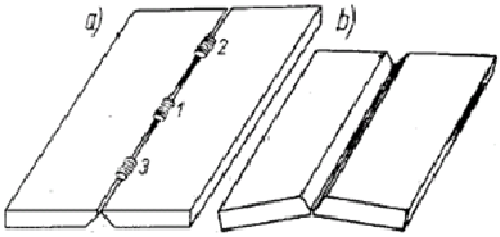
Prawidłowe sczepianie blach w układzie doczołowym niezależnie od ich długości i grubości przedstawiono na rys. 68b. Sczepianie rozpoczyna się od środka długości blach, a następnie spoiny sczepne wykonuje się raz z jednej, raz z drugiej strony w kolejności podanej na rysunku, z tym jednak, aby ostatnie spoiny sczepne (np. 6 i 7) wypadły około 30-40 mm od brzegów. Odległość między spoinami sczepnymi zależy od grubości blach i może wynosić przy blachach do 4 mm 20-krotną grubość spawanych blach, a powyżej 4 mm 30-krotną grubość.

Spoiny sczepne nie powinny być zbyt długie ani grube, żeby nie stwarzać trudności uzyskania dobrego przetopu przy przechodzeniu przez punkty szczepne w czasie spawania. Blachy przygotowane do spawania na V lepiej jest sczepiać od strony grani spoiny (rys. 69a), jeżeli tylko odwrotna strona blachy jest dostępna. Przed rozpoczęciem właściwego spawania blachy należy nieco odchylić w kierunku odwrotnym do skurczu spoiny (rys. 69b)., aby po spawaniu

otrzymać płytę płaską. Spawanie należy wykonywać o ile to możliwe bez przerwy, a szczególnie podczas spawania cienkich blach, które łatwiej się odkształcają.

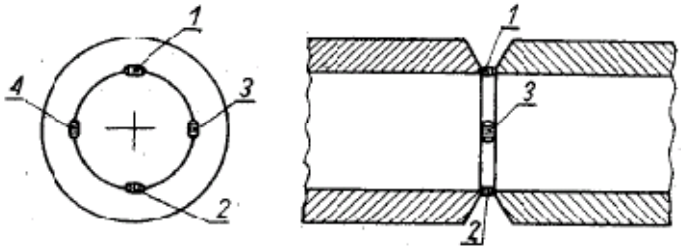


Rys. 68. Sczepianie blach przed spawaniem



Rys. 69. Sczepianie blach na V od strony grani (rys. a), odkształcanie blach przed spawaniem (rys. b)

Podczas sczepiania rur lub den zbiorników cylindrycznych należy również, zachować symetryczną kolejność sczepiania (rys. 70).



Rys. 70. Kolejność sczepiania rur przed spawaniem

W tabelach 18,19 i 20 zestawiono zalecane grubości i długości spoin sczepnych.

Tabela 18. Zalecane grubości i długości spoin szczepnych czołowych

Grubość elementów łączonych doczołowo ze spoiną czołową [mm]	Grubość spoiny szczepnej [mm]	Długość spoiny sczepnej [mm]
2	2	10-20
2-4	2-3	20-30
4-12	3-4	30-40
> 12	ok. 0,3 grubości blachy (maks. 6 mm)	40-60

Tabela 19. Zalecane grubości i długości spoin sczepnych pachwinowych

Grubość spoin pachwinowych wymiar a [mm]	Grubość spoiny szczepnej [mm]	Długość spoiny sczepnej [mm]
2	2	10-20
2-6	2-3	20-30
6-10	3-4	30-40
> 10	ok. 0,4 grubości blachy (maks. 6 mm)	40-60

Tabela 20. Zalecana długość i liczba spoin sczepnych przy spawaniu złącz doczołowych rur w zależności od średnicy rury

Średnica rury [mm]	Liczba spoin szczepnych	Długość spoiny szczepnej [mm]
50-300	4	15
300-460	5	20
≥ 500	8	25

7.8. Podgrzewanie przed spawaniem

Aby uzyskać metal spoiny wolny od pęknięć, należy odpowiednio dobrać temperaturę podgrzewania wstępnego oraz temperaturę pomiędzy kolejnymi ściegami.

Podgrzewanie wstępne zmniejsza:

- ryzyko powstawania pęknięć wodorowych,
- naprężenia skurczowe,
- twardość w strefie wpływu ciepła SWC.

Podgrzewanie wstępne jest tym bardziej konieczne, im większe są:

- zawartość węgla w spawanym materiale,
- zawartość dodatków stopowych w spawanym materiale,
- gabaryty spawanego elementu,
- prędkość spawania, średnica elektrody lub drutu oraz im niższa jest temperatura początkowa.

Aby móc dobrać właściwą temperaturę podgrzewania wstępnego, należy znać skład spawanego materiału, ponieważ na jej wysokość maja wpływ przede wszystkim dwa czynniki:

- zawartość węgla w spawanym materiale,
- zawartość dodatków stopowych w spawanym materiale.

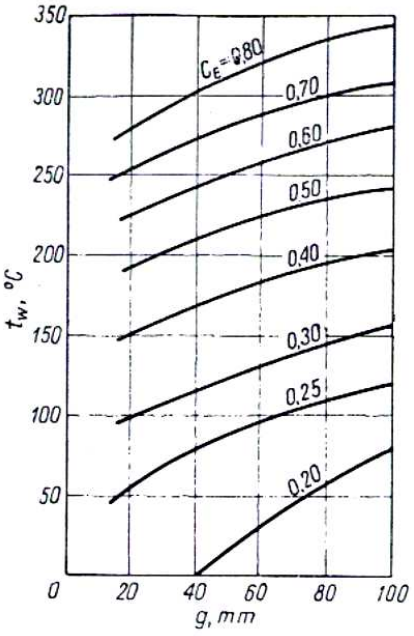
Zasadniczo, im większa zawartość węgla w materiale spawanym, tym wyższa wymagana temperatura podgrzewania wstępnego. Podobna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do zawartości dodatków stopowych, aczkolwiek mają one nieco mniejszy wpływ na wysokość temperatury wstępnego podgrzania.

Dla stali węglowych i niskostopowych wartość temperatury wstępnego podgrzania t_w, która jest niezbędna dla uniknięcia pęknięć, można określić opierając się na wartości równoważnika węgla C_E zastosowanej stali oraz grubości spawanego elementu ze wzoru:

$$t_w = 350\sqrt{C_E(1 + 0{,}005g) - 0{,}25} \quad [^0C]$$

gdzie: C_E - równoważnik węgla,
g – grubość spawanego elementu.

Powyższy wzór można stosować przy spawaniu w temperaturze otoczenia powyżej 0^0C.



Rys. 71. Temperatura wstępnego podgrzania t_w w zależności od wartości równoważnika węgla C_E oraz grubości spawanych elementów

Na rys. 71. przedstawiono graficznie wartość temperatury wstępnego podgrzania t_w w zależności od wartości równoważnika węgla C_E oraz grubości spawanego elementu g.

Po wyznaczeniu temperatury podgrzewania wstępnego trzeba do niej nagrzać spawany materiał i utrzymywać ją przez cały cykl spawania. Ważny jest także czas nagrzewania – powinien być na tyle długi, aby cały element uzyskał wymaganą temperaturę. Sam proces chłodzenia elementu powinien przebiegać powoli.

Kontrola temperatury podgrzewania może być prowadzona przy zastosowaniu np. termokredek lub, w przypadkach spawania konstrukcji szczególnie odpowiedzialnych, termopar i rejestratorów temperatury.

7.9. Technika spawania

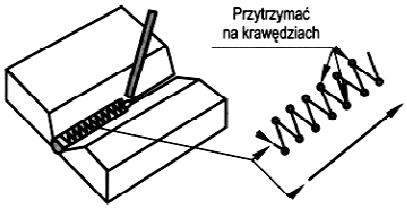
Technika spawania złącza zależy od jego grubości i sposobu przygotowania oraz od rodzaju zastosowanej elektrody otulonej.

W przypadku spawania złączy doczołowych w pozycji podolnej elektroda powinna być odchylona pod kątem 5 - 15° od pionu i skierowana w kierunku przeciwnym do kierunku spawania (tabela 16). Takie usytuowanie elektrody zapewnia równomierną ochronę obszaru spawania i zapobiega napływaniu żużla na niestopiony jeszcze materiał podstawowy przed łukiem. Wpływ pochylenia elektrody na kształt spoiny przedstawiono na rys. 63.

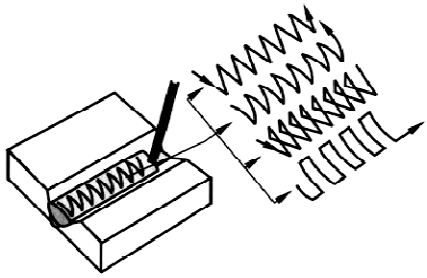
W celu uzyskania pełnego przetopu i właściwego wtopienia się w brzegi łączonych elementów stosuje się, w zależności od pozycji spawania, spawanie ściegami prostymi lub/i zakosowymi.

Warstwy przetopowe spoin czołowych w pozycjach podolnej i pionowej układa się, prowadząc koniec elektrody, jak to przedstawiono na rys. 72. Podczas układania warstw wypełniających w pozycjach podolnej, pionowej i pułapowej stosuje się zakosowe ruchy końca elektrody jak na rys. 73, przy czym szerokość ściegu jest zależna od szerokości rowka zukosowania w miejscu układania ściegu. Zalecenia te dotyczą układania spoin pachwinowych w pozycjach podolnej i pionowej.

Spoiny czołowe w pozycji naściennej oraz spoiny pachwinowe wykonywane w pozycjach nabocznej i pułapowej układa się wyłącznie ściegami prostymi (rys.74).

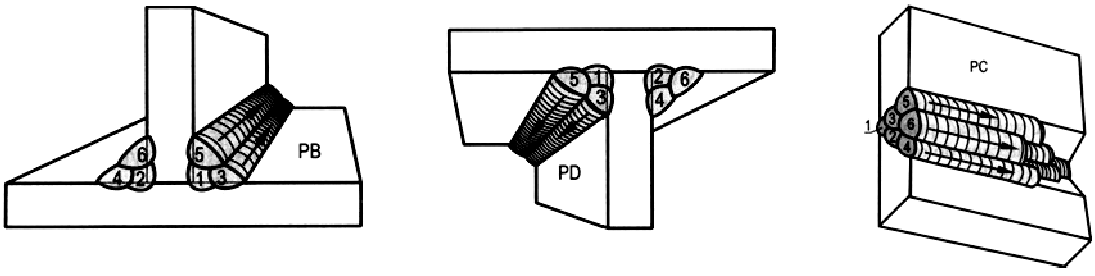


Rys. 72. Zalecane prowadzenie końca elektrody podczas układania ściegu przetopowego



Rys. 73. Zalecane prowadzenie końca elektrody podczas układania warstw wypełniających i lica spoiny w pozycji podolnej, pionowej i pułapowej

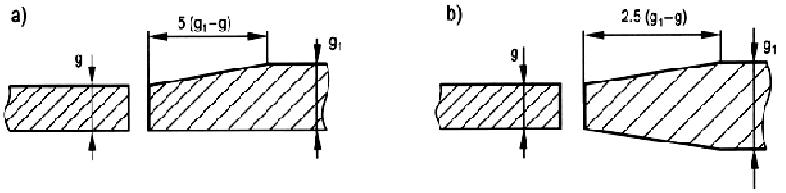
Łącząc doczołowo blachy (ścianki) o różnych grubościach, należy zapewnić łagodną zmianę przekroju. Zalecane pochylenia są różne dla różnych rodzajów konstrukcji. Zalecane sposoby przygotowania do spawania brzegów blach o różnej grubości przedstawiono na rys. 75.



Rys. 74.Zalecane wykonywanie ściegów w pozycjach nabocznej, okapowej i naściennej

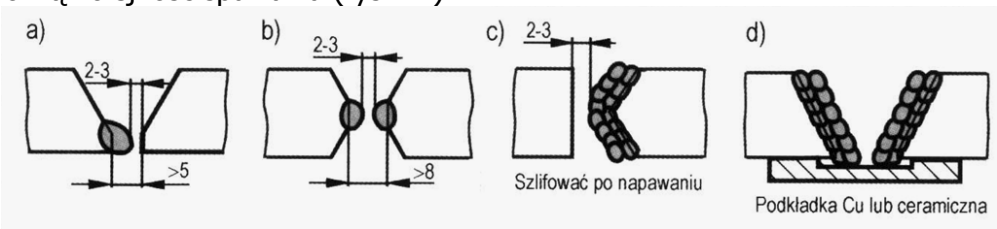
Jeśli między elementami złącza przygotowanymi do spawania występuje nadmierny odstęp uniemożliwiający wykonanie bezpośrednio poprawnej jakościowo spoiny, to można dokonać korekty, przy czym należy dążyć do utrzymania tej samej formy złącza, jaka była przewidziana w projekcie. Jeśli natomiast w spoinie czołowej jednostronnej (rys. 76a) lub dwustronnej (rys. 76b) odstęp przekracza dopuszczalną wartość, praktycznym rozwiązaniem może być napawanie ściegu w graniowej części rowka. Korektę taką dobrze jest wykonać przy rozsuniętych bla-

chach, co ułatwia operację. Sposób ten jest zalecany do rowków o małym kącie rozwarcia i znacznej grubości blach. Wskutek tego powstanie rowek zbliżony do ukosowania na U lub 2U. Gdy odstęp jest znaczny, wskazane jest napawanie jednej ze ścianek elementu złącza (rys. 76c, 76d) i sposób ten jest korzystniejszy od podanych poprzednio. Napawanie należy wykonać przed zespoleniem elementów, co nie spowoduje powstania niebezpiecznych naprężeń spawalniczych.



v blach
j (a) i

W zależności od długości złącza, grubości i rodzaju spawanego materiału, sztywności konstrukcji stosuje się różną technikę układania poszczególnych ściegów i wypełniania rowka spoiny oraz różną kolejność spawania (rys. 77).

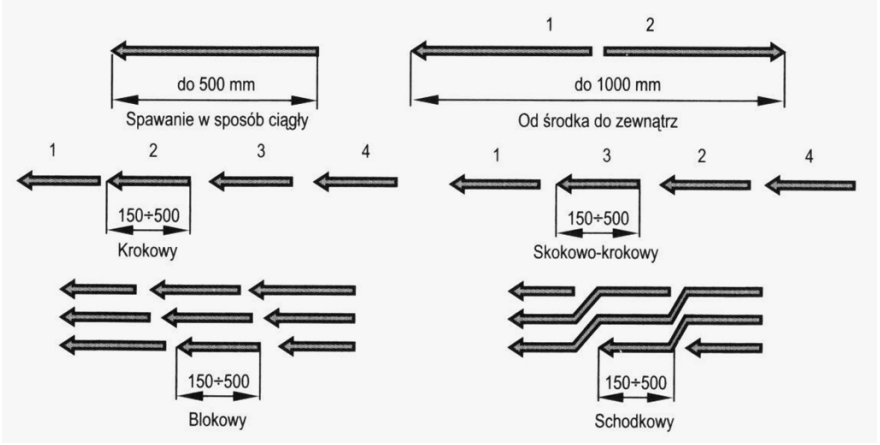


Rys. 76. Przykłady korekty nadmiernego odstępu rowka

Zalecenia te stosuje się przede wszystkim w celu zmniejszenia odkształceń i naprężeń spawalniczych oraz uzyskania odpowiednich struktur.

Spawanie ściegiem ciągłym stosuje się do złączy krótkich - do 500 mm. Złącza o długości 500 do 1000 mm zaleca się spawać od środka na zewnątrz, krokowo lub skokowo-krokowo. Spawanie konstrukcji składającej się z elementów o dużej grubości prowadzi się skokowo-krokowo, blokami lub schodkowo.

Spawanie elektrodą otuloną jest stosowane wszędzie tam, gdzie jest utrudnione technicznie lub nieuzasadnione ekonomicznie zastosowanie spawania zmechanizowanego, półautomatycznego lub automatycznego. Metoda ta dzięki swej uniwersalności technicznej i technologicznej umożliwia łączenie elementów w warunkach warsztatowych i montażowych w dowolnych pozycjach i w miejscach niedostępnych dla uchwytów spawalniczych TIG i MIG/MAG.



Rys. 77. Zalecane techniki układania ściegów przy spawaniu złączy konstrukcji o różnej długości i grubości

7.10.Charakterystyka wybranych elektrod otulonych

Tabela 21. Zastosowanie i własności wybranych elektrod firmy Esab

ER 146 PN-EN 499: E 38 0 RC 11	Średniootulona elektroda z dodatkiem celulozy w otulinie, do spawania konstrukcji narażonych na obciążenia statyczne i dynamiczne Pozycje spawania: PA, PB, PC, PD, PE, PF,PG	Materiał spawany: P235 / S235 do P355 / S355 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,08, Mn=0,5, Si=0,2 Własności mechaniczne: R_e>380 MPa, R_m=480-570 MPa, A_5>22%
ER 150 PN-EN 499: E 38 0 RC 11	Średniootulona elektroda o otulinie rutylowej z dodatkiem celulozy o bardzo dobrych własnościach spawalniczych, umożliwia spawanie prądem przemiennym przy napięciu stanu jałowego transformatora ok. 44V, stosowana jest do spawania konstrukcji stalowych narażonych na obciążenia statyczne i dynamiczne wykonanych ze stali o $R_{p0,2}$=380 MPa, R_m do 520 MPa Pozycje spawania: PA, PB, PC, PD, PE, PF,PG	Materiał spawany: P235 / S235 do P355 / S355 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,09, Mn=0,5, Si=0,3 Własności mechaniczne: R_e>400 MPa, R_m=510-580 MPa, A_5>21-25%
ER 346 PN-EN 499: E 38 0 RA 22	Grubootulona elektroda do spawania konstrukcji stalowych obciążonych statycznie i dynamicznie (kotły, zbiorniki, rurociągi) Pozycje spawania: PA, PB, PC, PD, PE, PF	Materiał spawany: P235 / S235 do P355 / S355 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,08, Mn=0,6, Si=0,1 Własności mechaniczne: R_e>390 MPa, R_m=480-560 MPa, A_5>24-30%
ERW 180 PN-EN 499: E 42 0 RR 73	Bardzo grubootulona elektroda z dodatkiem proszku żelaznego w otulinie charakteryzuje się dobrymi własnościami spawalniczymi przy spawaniu prądem stałym i przemiennym, szczególnie przydatna do wykonywania spoin pachwinowych w pozycji PB Pozycje spawania: PA, PB	Materiał spawany: P235 / S235 do P355 / S355 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,07, Mn=0,8, Si=0,3 Własności mechaniczne: R_e>420 MPa, R_m=510-560 MPa, A_5>22-27%
EB 146 PN-EN 499: E 38 3 B 42	Grubootulona elektroda do spawania konstrukcji ze stali niskowęglowych o normalnej i podwyższonej wytrzymałości, narażonych na duże obciążenia statyczne i dynamiczne Pozycje spawania: PA, PB, PC, PD, PE, PF	Materiał spawany: P235 / S235 do P355 / S355 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,07, Mn=0,8, Si=0,4 Własności mechaniczne: R_e>400 MPa, R_m=500-580 MPa, A_5>24-32%
EB 150 PN-EN 499: E 42 4 B 42	Grubootulona elektroda do spawania konstrukcji ze stali o podwyższonej wytrzymałości, narażonych na duże obciążenia statyczne i dynamiczne Pozycje spawania: PA, PB, PC, PD, PE, PF	Materiał spawany: P235 / S235 do P420 / S420 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,08, Mn=1,1, Si=0,4 Własności mechaniczne: R_e>420 MPa, R_m=550-620 MPa, A_5>22-32%
EB 155 PN-EN 499: E 46 2 B 42	Grubootulona elektroda do spawania konstrukcji stalowych obciążonych statycznie i dynamicznie, wykonanych ze stali o normalnej i podwyższonej wytrzymałości, Pozycje spawania: PA, PB, PC, PD, PE, PF	Materiał spawany: P235 / S235 do P460 / S460 i inne Skład stopiwa [%]: C=0,08, Mn=1,5, Si=0,5 Własności mechaniczne: R_e>460 MPa, R_m=560-650 MPa, A_5>22-30%

Tabela 22. Zamienniki elektrod otulonych

METALWELD-FIPROM	OERLIKON	BÖHLER	ESAB	ELGA	BAILDON
RUTILEN P	OVERCORD	FOX OHV	OK. 46	P 31	ER 146
RAPID	CITORAPID	-	OK. 50.10	Maxeta 5	ER 346
RUTILEN 12	OVERCORD G	FOX MSU	OK. 46	P 44	ER 150
RUTILEN 13	FINCORD	FOX ETi	OK. 43.43	P 46	ER 250, 446
EMONA	CITOREX	FOX SPE	OK. 50.40	-	ER 246, 346
SAVA 150	FERROCORD 150 T	FOX HL 150 Ti	-	Maxeta 10	ER 242Fe150, ER 646Fe170
SAVA 155 B	OH Blau Kb	-	OKFEMAX 38.48	Maxeta 21	EB 346Fe150
EVB 50	SUPERCITO	FOX EV50	OK. 48.04	P 51	EB 150, 450, 550
EVB 47	UNIVERS	-	-	P 48	EB 146
GALEB 50	-	FOX EV47	-	P 47 D	EB 343
EVB 60	TENACITO 60	FOX EV 63	OK. 55.00	P 62 MR	EB 155
EVB CuNi	TENCORD Kb	FOX NiCuCr	OK. 48.08	-	EB 250
EVB 2,5 Ni	TENCORD 70 B	FOX 2,5 Ni	OK. 73.68	P 48 K	EB 350Ni
EVB Mo	MOLYCORD Kb	FOX DMOKb	-	P 81 CR	ES MoB
EVB CrMo	CROMOCORD Kb	FOX DCMSKb	OK. 76.18	P 83 CR	ES CrMoB
EVB 2CrMo	CROMOCORD 2	FOX CM2Kb	OK. 76.28	P 84 CR	ES 2CrMoB
EVB 9CrMo	-	FOX CM9Kb	OK. 76.96	-	ES 9CrB
ETiMo	MOLYCORD Ti	FOX MoTi	-	-	ES MoR
ETiMoV	-	-	-	-	ES CrMoVR
ETiCrMo	CROMOCORD Ti	-	-	-	ES CrMoR
INOX B 13/4 Fe	CITOCHROM 13/4	FOX CN 13/4	OK.48.12	-	ES 13CrB
INOX B 19/9 Nb	INOX Al.-Nb	FOX SAS2	-	-	ES 18-8 NbB
INOX R 19/9 Nc	INOX A 308L	FOX EAS2-4	OK.61.30	Cromarod 308 L	ESO 18-8R
INOX R 19/12/3Nb	INOX BWL-Nb	FOX SAS4A	OK.63.80	Cromarod 318 L	ES 18-12-2NbR

7.11. Obróbka cieplna złączy spawanych

Obróbka cieplna polega na powolnym nagrzaniu metalu do określonej temperatury, wytrzymaniu w tej temperaturze przez odpowiedni czas, a następnie ochłodzeniu z określoną prędkością. Zależnie od przeprowadzonej obróbki cieplnej zmienia się budowa strukturalna, a zatem zmieniają się własności fizyczne i mechaniczne.

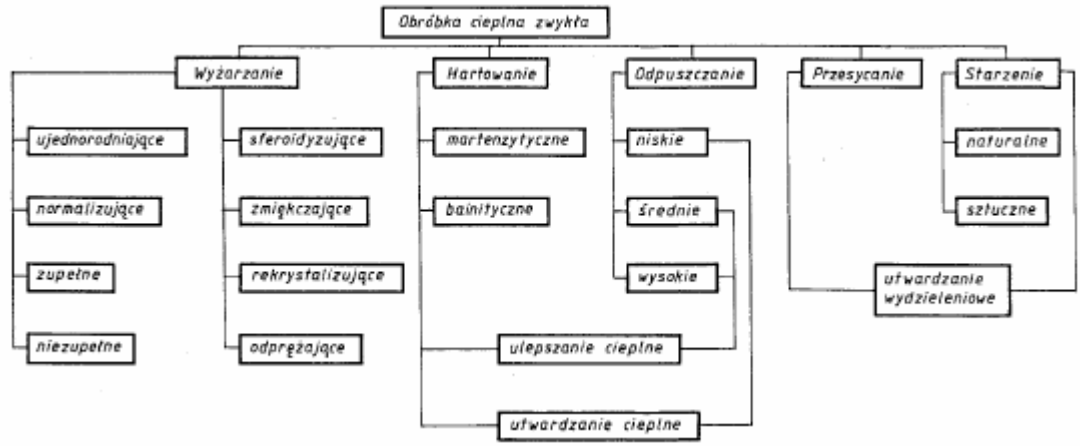
Schemat klasyfikacji podstawowych operacji obróbki cieplnej zwykłej stopów żelaza przedstawiono na rys. 78.

Do połączeń spawanych stosuje się najczęściej 3 rodzaje obróbki cieplnej:

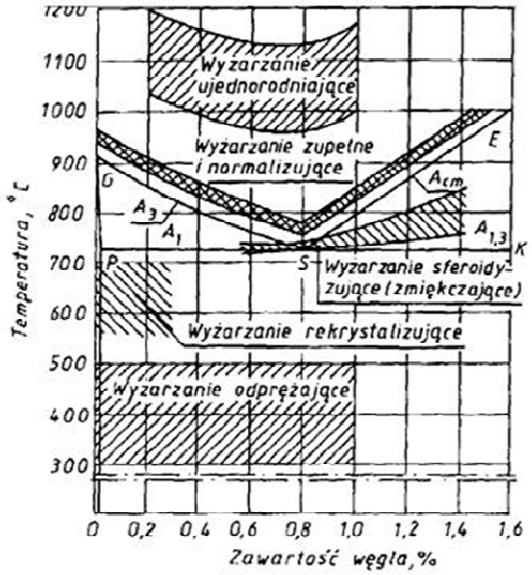
- wyżarzanie zmiękczające,
- wyżarzanie odprężające,
- wyżarzanie normalizujące.

Zakresy temperatury, w jakich przeprowadza się poszczególne, ważniejsze rodzaje operacji wyżarzania, podane są na rys. 79.

Wyżarzanie odprężające polega na usunięciu z metalu naprężeń spawalniczych, które powstały podczas spawania. Proces ten wymaga powolnego nagrzewania w specjalnych piecach. Temperatura wyżarzania odprężającego stali węglowych wynosi 600-650^{0}C. Po osiągnięciu tej temperatury przedmiot wygrzewa się przez ok. 30 minut, a następnie studzi się go wolno razem z piecem.



Rys. 78. Podstawowe operacje obróbki cieplnej zwykłej stopów żelaza



Rys. 79. Zakresy temperatury wyżarzana stali węglowych na tle wykresu żelazo-cmentyt

Wyżarzanie zmiękczające ma na celu zmniejszenie twardości metalu lub spoiny, zwłaszcza podhartowanej SWC. Obróbka tego rodzaju powoduje zwiększenie plastyczności metalu. Przedmiot nagrzewa się do temperatury 700-750^{0}C i po wytrzymaniu w tej temperaturze przez 20-30 minut chłodzi się go bardzo wolno wraz z piecem aż do zupełnego wystygnięcia.

Wyżarzanie normalizujące polega na uzyskaniu jednolitej i drobnoziarnistej struktury stali. stosuje się je przeważnie do złącz spawanych wykonanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości, w których w czasie spawania (szczególnie w warunkach niekorzystnych) powstają niebezpieczne zmiany w SWC (strefa kruchości). Temperatura wyżarzania normalizującego zależy od gatunku stali i zawiera się w granicach 880-950^{0}C. Czas wyżarzania przyjmuje się 15-30 minut, aby zapobiec rozrostowi ziarn. Po wyżarzaniu normalizującym chłodzenie przedmiotu może odbywać się na wolnym powietrzu w temperaturze ok. 10^{0}C.

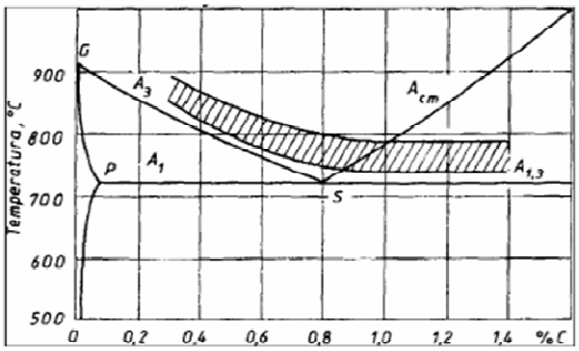
Hartowanie polega na nagrzewaniu przedmiotu do temperatury, w której następuje wytworzenie struktury austenitu, i następnie szybkim chłodzeniu w wodzie lub oleju w celu otrzymania struktury martenzytycznej. Temperatura hartowania stali wynosi ok. 750-930^{0}C (rys. 80).

Stale węglowe, zawierające 0,25-0,8%C, po nagrzaniu do temperatury ok. 800^{0}C i szybkim ochłodzeniu, otrzymują strukturę martenzytyczną o twardości około 40 HRC.

Odpuszczanie polega na nagrzaniu uprzednio zahartowanej stali do temperatury niższej od temperatury przemiany eutektoidalnej i chłodzeniu do temperatury otoczenia. Zależnie od stosowanej temperatury rozróżnia się odpuszczanie niskie, średnie i wysokie.

Odpuszczanie niskie przeprowadza się w zakresie temperatury 150-250°C celem usunięcia naprężeń hartowniczych, przy zachowaniu dużej twardości i odporności na ścieranie. Stosuje się głównie do stali narzędziowych.

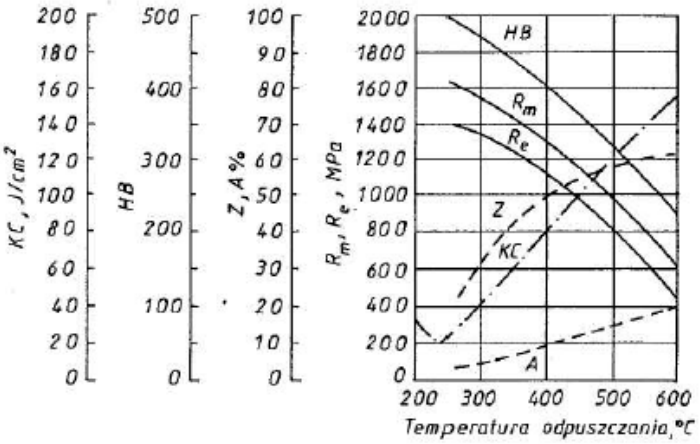
Odpuszczanie średnie przeprowadza się w zakresie temperatury 250-500°C w celu uzyskania przez stal dużej wytrzymałości i sprężystości. Twardość ulega przy tym dość znacznemu obniżeniu. Tego rodzaju odpuszczaniu poddaje się sprężyny, resory, matryce, części silników, samochodów itp.



Rys. 80. Zakres temperatury hartowania stali węglowych

Odpuszczanie wysokie przeprowadza się w zakresie temperatury powyżej 500°C i poniżej 650^{0}C. Ma ono na celu m.in. uzyskanie możliwie najwyższej udarności dla danej stali, przy jednoczesnym zwiększeniu stosunku *Re* do *Rm.* Stal konstrukcyjna odpuszczona wysoko po hartowaniu uzyskuje strukturę sorbityczną i odznacza się z reguły wyższą granicą plastyczności i wyższym wydłużeniem i przewężeniem niż ta sama stal o strukturze perlitycznej. Podczas wysokiego odpuszczania, poza zmianami strukturalnymi, zachodzi jednocześnie prawie całkowite usunięcie naprężeń powstałych podczas hartowania. Odpuszczanie wysokie stosuje się do większości stali konstrukcyjnych. Temperaturę i czas odpuszczania dobiera się w zależności od własności, jakie mają być otrzymane.

Schemat zmian własności mechanicznych stali konstrukcyjnych w zależności od temperatury odpuszczania przedstawiony jest na rys. 81.



Rys. 81. Zmiana własności mechanicznych stali konstrukcyjnej w zależności od temperatury odpuszczania

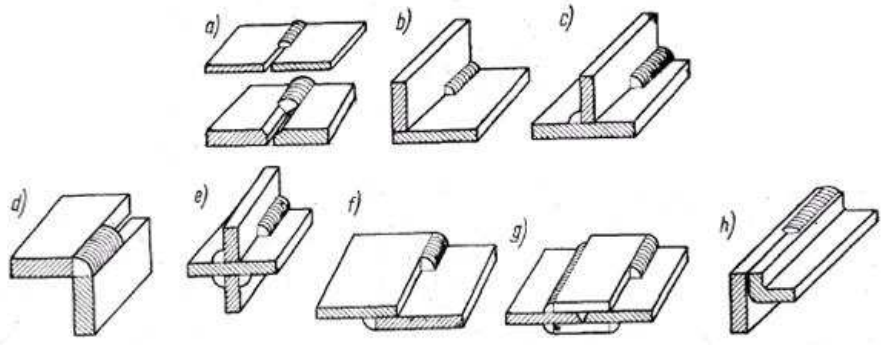
8. OZNACZANIE SPOIN I POZYCJI SPAWANIA

8.1. Rodzaje złączy i spoin

Złączem spawanym nazywamy, połączenie dwóch lub więcej części metalowych spoinami. Złącza przybierają pewien typowy kształt, zależnie od kształtu geometrycznego łączonych części lub od profilu poprzecznego, jaki tworzą elementy po wykonaniu. Rozróżnia się kilka typowych złączy spawanych, z których najczęściej stosowane są złącza: doczołowe, kątowe, teowe, narożne, krzyżowe, zakładkowe, nakładkowe, przylgowe (rys. 82).

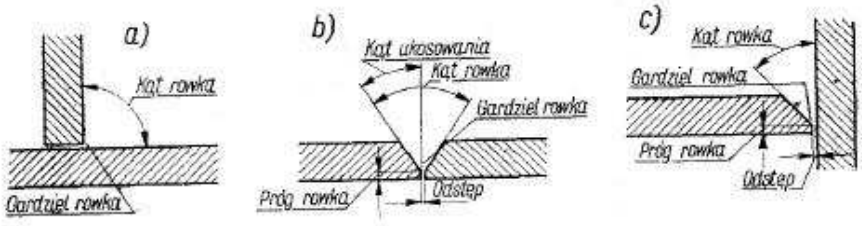
Spoina jest częścią złącza spawanego i różni się od metalu rodzimego tym, że składa się całkowicie z metalu, który w czasie spawania uległ stopieniu i zakrzepnięciu. Tworzenie się spoiny w czasie spawania jest pod względem metalurgicznym procesem zbliżonym do procesu

odlewniczego. Stopiony metal (stopiwo) tworzy spoinę, której kształt jest zależny od przygotowania elementów łączonych.



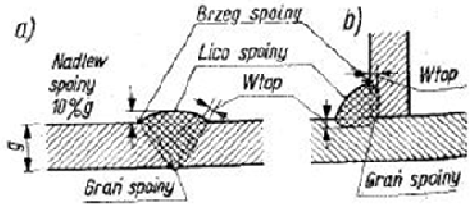
Rys 82. Rodzaje złączy spawanych: a) doczołowe na I i Y, b) kątowe; c) teowe, d) narożne, e) krzyżowe, f) zakładkowe, g) nakładkowe, h) przylgowe

Zależnie od sposobu przygotowania części do spawania i ich wzajemnego ustawienia powstają rowki, tworzone przez powierzchnie boczne łączonych części (rys. 83a), płaszczyzny ukosowania brzegów (rys. 83b), płaszczyznę ukosowania i powierzchnię boczną części (rys. 83c).

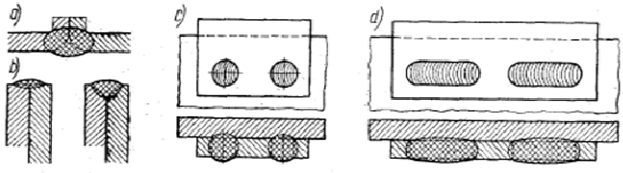


Rys. 83. Rowki łączonych części ukosowanych i nie ukosowanych oraz nazwy techniczne

W czasie spawania rowek wypełnia się stopionym metalem, który krzepnąc tworzy spoinę. Zależnie od typu złączy spawanych rozróżnia się spoiny czołowe (rys. 84a) i pachwinowe (rys. 84b). Rzadziej stosowane są spoiny brzeżne (rys. 85a), grzbietowe (rys. 85b), otworowe (kołkowe i szczelinowe) (rys. 85c i d).



Rys. 84. Zasadnicze typy spoin i ich elementy

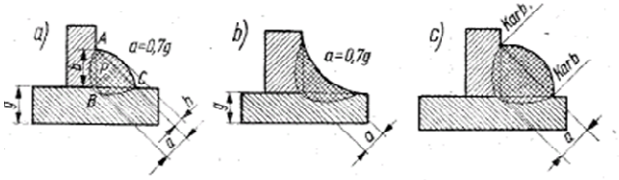


Rys. 85. Inne rodzaje spoin: a) brzeżna, b) grzbietowa, c) otworowo-kołnierzowa, d) otworowo-szczelinowa

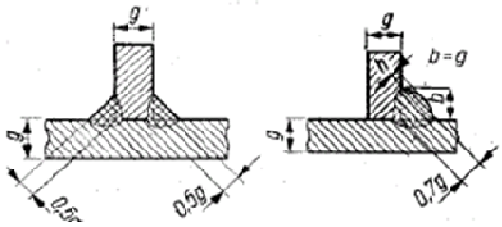
Spoiny czołowe łączą ze sobą brzegi (czoła) blach ułożonych do siebie równolegle lub prostopadle. Między czołami blach zostawia się odstęp w celu łatwiejszego wykonania spoiny i otrzymania lepszego przetopu. Spoiny czołowe mogą być stosowane do łączenia blach wszystkich grubości ukosowanych i nie ukosowanych. Zależnie od kształtu przygotowanych brzegów rowka rozróżnia się spoiny czołowe na I (kształt litery I), spoiny na V, Y X, U, 2U, K, 1/2V.

Spoiny pachwinowe w przekroju mają kształt trójkąta składającego się z jednego lub większej liczby ściegów ułożonych między prostopadłymi płaszczyznami łączonych elementów. Lico spoiny pachwinowej może być płaskie (lub z małym nadlewem - rys. 86a), wklęsłe (rys. 86b) lub wypukłe (z dużym nadlewem - rys. 86c). Spoiny o licu płaskim lub z małym nadlewem i spoiny o licu wklęsłym są prawidłowe. Spoiny o licu wypukłym są nieekonomiczne, po-

nieważ duża wypukłość lica spoin (duży nadlew) jest częścią nie pracującą, a często między spoiną a metalem spawanym tworzą się karby osłabiające złącze. Wypukłość spoiny nie zwiększa wytrzymałości złącza, gdyż wymiarem obliczeniowym spoiny pachwinowej jest jej



Rys. 86. Kształty spoin pachwinowych



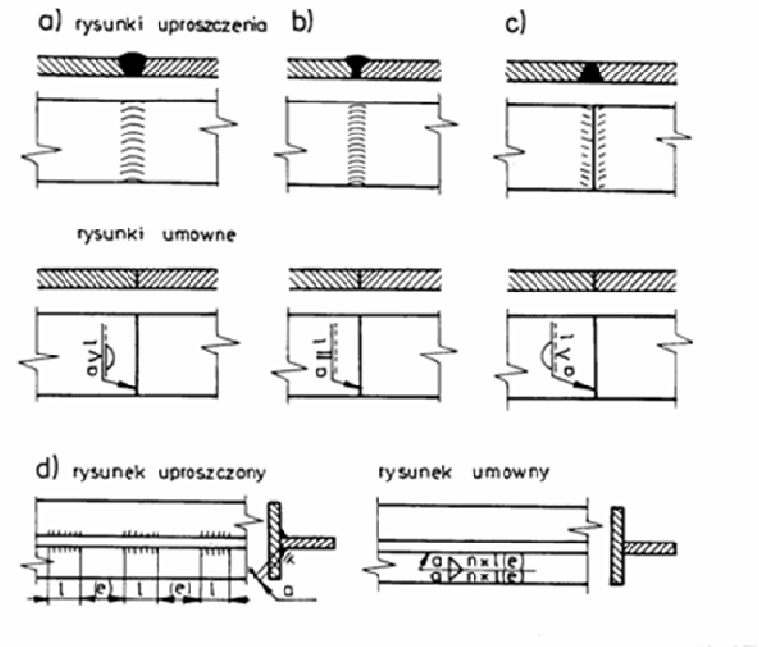
Rys. 87. Grubość spoin pachwinowych jednostronnych i dwustronnych w stosunku do grubości materiału spawanego

grubość mierzona jako wysokość wpisanego trójkąta równoramiennego (ABC rys. 86a).

Grubość obliczeniowa spoiny pachwinowej jednostronnej powinna wynosi nie więcej niż 0,7 grubości cieńszego materiału spawanego, a w spoinach dwustronnych 0,5 tej grubości (rys. 87).

8.2. Oznaczanie spoin na rysunkach technicznych

Połączenia przedstawia się na rysunkach technicznych w sposób uproszczony i umowny. W uproszczeniu zarysu zewnętrzne spoiny oraz zarys części łączonych w miejscach nie ulegających przetopieniu w przekroju poprzecznym rysuje się linię grubą (rysunek 88a). W miejscach przetopienia zarysu części łączonych rysuje się liniami ciągłymi, a przekrój się zaczernia. W widoku wzdłużnym od strony lica spoiny obszar spoiny wypełnia się liniami cienkimi łukowymi. W widoku od strony grani spoinę rysuje się łukami kreskowanymi (rysunek 88c). Na rysunku umownym zarówno widok jak o przekrój przedstawia się jedną grubą linią dzielącą dwie łączone części (rysunek 88a, b, c).



Rys. 88. Zasady oznaczania spoin

Oznaczenie spoiny powinno zawierać znak spoiny, wymiary spoiny (a, l). Oznaczenie wpisuje się nad kreską linii odnoszącej, gdy lico spoiny jest z tej samej strony co strzałka, w przeciwnym przypadku pod kreską (rysunek 88c).

W szwach pachwinowych przerywanych poza wymiarami oznacza się odstępy w rozmieszczeniu spoin. Spoiny obrabiane oznacza się symbolem przypominającym kotwicę z kreską prostą (rysunek 88d), wklęsłą lub wypukłą. Postać kreski określa zarys obrobionego lica spoiny.

Dodatkowe szczegółowe dane i wymagania odnoszące się do spoin umieszczania się w rozwidleniu na końcu linii odniesienia. Sposoby oznaczania spoin ujęte są w normach PN – EN 22553; 1997 i PN – ISO/2553; 1997 (tabela 23).

Tabela 23. Znaki elementarne spoin według ISO 2553:1997

Lp.	Nazwa spoiny	Znak spoiny	Lp.	Nazwa spoiny	Znak spoiny
1	Spoiny czołowe: Spoina brzeżna z brzegami podwiniętymi całkowicie przetopionymi		11	Spoina grzbietowa	
2	Spoina I		12	Spoina graniowa lub podporna	
3	Spoina V		13	Spoina pachwinowa	
4	Spoina ½ V		14	Spoina otworowa podłużna i okrągła	
5	Spoina V o stromych brzegach		15	Spoiny otworowe: punktowa	
6	Spoina ½ V ze stromym brzegiem		16	Spoiny otworowe: liniowa	
7	Spoina Y		17	Powierzchnia napawana	
8	Spoina ½ Y		18	Złącze doczołowe	
9	Spoina U		19	Złącze doczołowe ukośne	
10	Spoina ½ U		20	Złącze zamjane	

8.3. Pozycje spawania

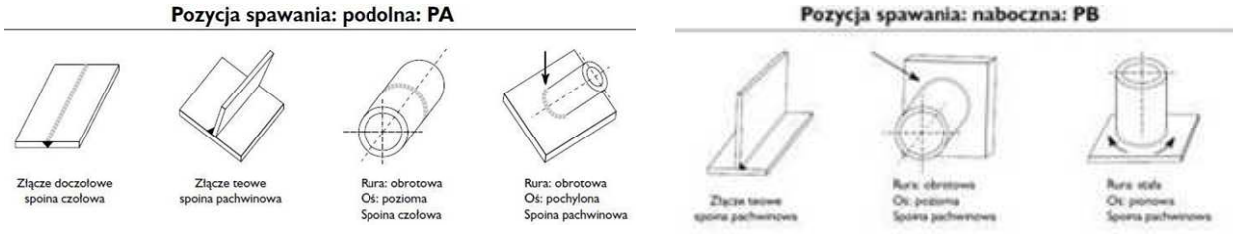
Najlepiej, jeżeli przedmiot można tak ułożyć, aby stopiony metal był utrzymany w jeziorku spawalniczym siłą grawitacji. Takie położenie nazywamy pozycją podolną, zapewnia ona spawaczowi najlepsze warunki do kontrolowania jeziorka. Podczas montażu najczęściej nie jest to możliwe i spawacz zmuszony jest do wykonania złącza w pozycji przymusowej.

Można wyróżnić trzy główne pozycje przymusowe:

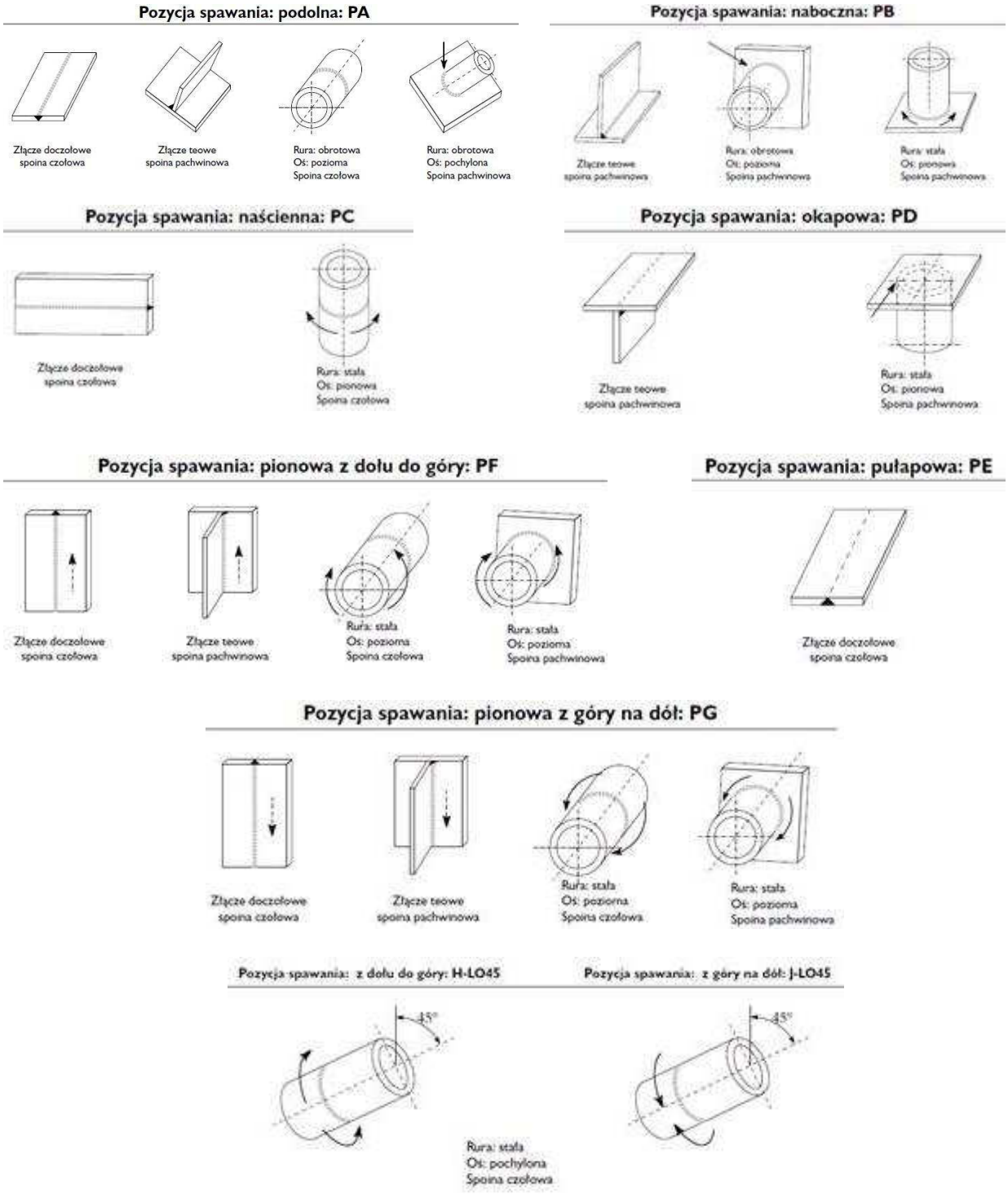
- naścienna
- pionowa
- pułapowa

W pozycji naściennej wyróżnia się pozycję zwaną naboczną, która występuje w złączach teowych, z jednym elementem ustawionym pionowo a drugim- ułożonym poziomo. We wszystkich tych pozycjach metal ma skłonność do wypływania pod wpływem grawitacji, a spawacz musi stosować odpowiednią technikę by temu zapobiec. Zmniejsza on w tym celu dopływ ciepła co powoduje, że metal krzepnie zanim zdąży wypłynąć z jeziorka. Musi on także ustawić elektrodę tak, aby uzyskać najodpowiedniejsze usytuowanie jeziorka. Siła wywierana przez łuk, również zapobiega rozlewaniu się jeziorka.

Podstawowe oznaczenia pozycji spawania pokazano na rys. 89a, b.



89a. Oznaczenia pozycji spawania wg PN SO 6947 oraz wg normy PN/M-69002



Rys. 89b. Oznaczenia pozycji spawania wg PN EN ISO 6947 oraz wg normy PN/M-69002

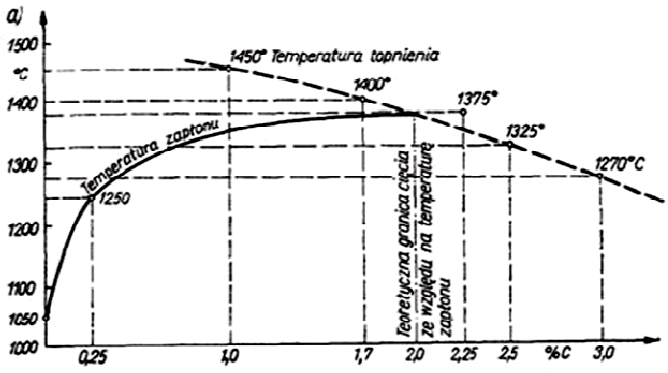
9. CIĘCIE TERMICZNE

9.1. Zasada i technika cięcia tlenowego

Istota cięcia tlenem polega na dzieleniu metalu przez miejscowe spalanie jego cząstek w strumieniu czystego tlenu przy równoczesnym podgrzaniu metalu do odpowiedniej temperatury.

Cięcie metalu jest możliwe tylko wtedy, gdy spełnione są następujące warunki:

- metal spala się w tlenie,
- temperatura zapłonu metalu w tlenie jest niższa od jego temperatury topnienia,
- temperatura topnienia tlenków, powstających w czasie cięcia, jest niższa od temperatury zapłonu przecinanego metalu,
- wytwarzany w czasie cięcia żużel jest rzadkopłynny, metal ma możliwie małą przewodność cieplną,
- ilość ciepła wytworzona w procesie cięcia w płomieniu oraz ze spalenia materiału w szczelinie utrzymuje temperaturę metalu w płaszczyźnie cięcia powyżej temperatury zapłonu tego metalu w tlenie.



Rys. 90. Możliwości cięcia tlenem stali węglowej w zależności od temperatury zapłonu stali i od zawartości węgla

Ze znanych metali i ich stopów jedynie stale węglowe oraz niskostopowe spełniają powyższe warunki i mogą być cięte tlenem. Wzrost zawartości węgla w stali, a także składników stopowych takich, jak chrom, krzem, wolfram utrudnia proces cięcia (rys. 90). Jeszcze intensywniej działają składniki stopowe wprowadzone do stali ze względu na wysokie temperatury topnienia ich tlenków (tabela 24). Dlatego do cięcia stali wysokostopowych, żeliwa, metali nieżelaznych oraz materiałów niemetalowych stosuje się inne metody cięcia termicznego.

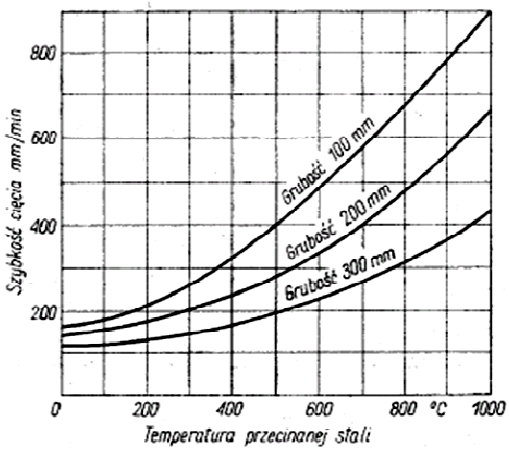
Dla ułatwienia cięcia przed jego rozpoczęciem podgrzewa się niektóre stale do temperatury 200-400°C. Podgrzewanie stali niskostopowych do temperatury 500-600°C w decydujący sposób wpływa na szybkość cięcia (rys. 91).

Wpływ temperatury i grubości stali na proces cięcia

Podczas cięcia następuje miejscowe nagrzanie powierzchni materiału. W wyniku ochładzania się materiału w warstwach metalu zachodzą pewne zmiany chemiczne i strukturalne.

Zmiany te dotyczą głównie utwardzenia powierzchni przecięcia, co jest spowodowane wzrostem zawartości węgla na tej powierzchni na skutek szybszego spalania się żelaza niż węgla podczas cięcia.

Warstewka 1, w której przecinany metal ma inny skład chemiczny i inne nieco własności mechaniczne, jest bardzo cienka i wynosi 0,1-0,3 mm (rys. 92). Strefa 2 wpływu ciepła jest znacznie szersza; bo wynosi od 1-3 mm i obejmuje różne struktury krystaliczne. Stale niskostopowe mające zwiększone ilości takich składników, jak: węgiel, mangan i chrom głębiej hartują się przy cięciu, natomiast w stalach niskowęglowych warstewka zahartowana jest minimalna.

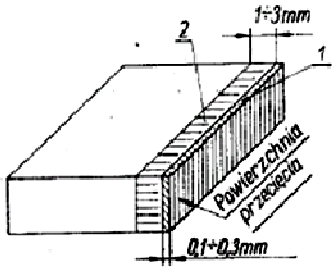


Rys. 91. Zależność szybkości cięcia od temperatury nagrzania stali przed cięciem

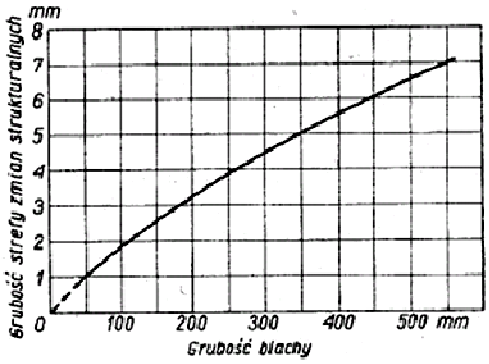
Do cięcia blach zależnie od ich grubości dobiera się odpowiednie parametry (głównie ciśnienie tlenu) oraz wymiary dysz podgrzewających i dysz tnących. Cięcie grubych materiałów jest znacznie wolniejsze i powoduje większe nagrzewanie materiału, a tym samym większy zakres zmian strukturalnych (rys. 93).

Tabela 24. Temperatura topnienia niektórych metali i ich tlenków

Rodzaj metalu	Temperatura topnienia metalu [^{0}C]	Temperatura topnienia tlenków [^{0}C]	Możliwość cięcia
Stal niskowęglowa	1480	1370	Cięcie łatwe
Żeliwo	1200	1370	Cięcie trudne zwykłym palnikiem
Miedź	1083	1235	Cięcie niemożliwe zwykłym palnikiem
Aluminium	660	2050	Cięcie niemożliwe zwykłym palnikiem
Chrom	1615	1990	Cięcie niemożliwe zwykłym palnikiem
Molibden	2620	791	Cięcie łatwe



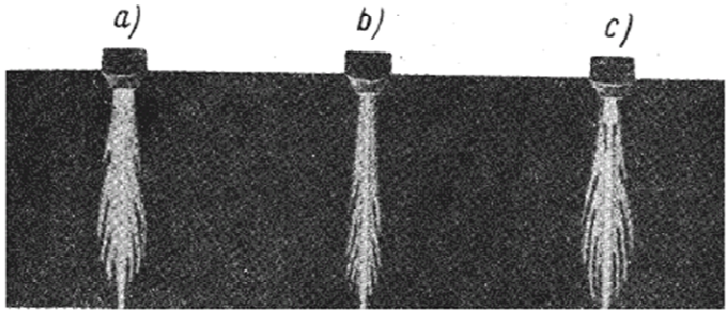
Rys. 92. Zmiany zachodzące na powierzchni przecinanej stali



Rys. 93. Wykres szerokości strefy zmian strukturalnych zależnie od grubości ciętej blachy

Zapalanie i regulacja płomienia

Po uruchomieniu stanowiska spawalniczego, tj. po przyłączeniu butli tlenowej i acetylenowej, reduktorów, a następnie po połączeniu węży gumowych z reduktorami i palnikiem oraz nastawieniu właściwego ciśnienia gazów, przystępuje się do regulacji płomienia. Najpierw otwiera się na palniku zawór tlenowy, a następnie zawór gazu palnego. Po zapaleniu mieszanki powstaje płomień podgrzewający (rys. 94a), który trzeba jednak dodatkowo wyregulować przy otwartym zaworze tlenu tnącego. Po otwarciu zaworu tnącego powstaje w płomieniu nadmiar acetylenu (94c), obniżający temperaturę płomienia nagrzewającego, sprzyjający utwardzaniu powierzchni cięcia oraz zmniejszający szybkość cięcia. W związku z tym przy otwartym zaworze tlenu tnącego należy zmniejszyć ilość acetylenu w płomieniu, przykręcając wolno zawór acetylenowy, aż jądro płomienia zostanie całkowicie wyrównane (rys. 94b). Następnie zamyka się zawór tlenu tnącego, zwracając uwagę, żeby płomień był jednorodny i można przystąpić do pracy.



Rys. 94. Regulacja płomienia do cięcia tlenem: a) płomień po zapaleniu mieszanki, b) płomień normalnie wyregulowany, c) płomień z nadmiarem acetylenu

9.2. Zasada i technika cięcia plazmowego

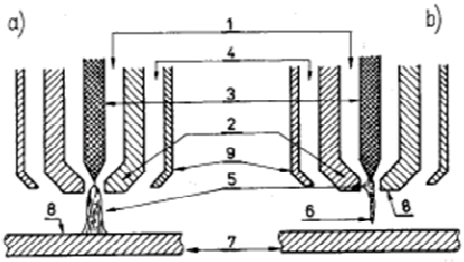
Strumieniem plazmy niskotemperaturowej wykorzystywanej do spawania, napawania lub cięcia jest nazywany łuk elektryczny o bardzo dużej koncentracji zjonizowanych cząsteczek gazu, uzyskiwanej przeważnie przez zmniejszenie promienia łuku. W plazmotronach spawalniczych (palnikach plazmowych) zwiększenie koncentracji (przewężanie łuku) następuje w wyniku przedmuchiwania łuku elektrycznego przez dyszę o określonej średnicy. W urządzeniach

plazmowych stosowane są dwie odmiany konstrukcyjne palników w zależności od sposobu jarzenia się łuku (rys. 95):

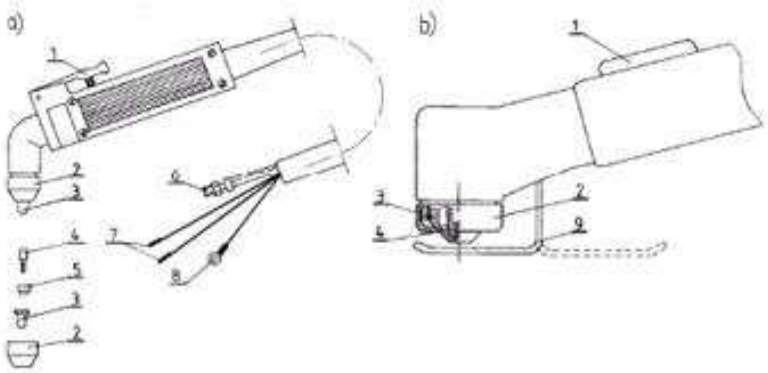
- *palniki z łukiem zależnym (pośrednim),* wytworzony między katodą palnika a nagrzewanym materiałem; wysoki stopień koncentracji zjonizowanych cząsteczek gazu uzyskuje się przez przewężenie łuku w dyszy palnika;
- *palniki z łuk niezależnym (bezpośrednim)*, tworzony pomiędzy katodą i anodą palnika; zjonizowane cząsteczki gazu są wydmuchiwane i koncentrowane przez dyszę plazmotronu w postaci strumienia plazmy.

Każde stanowisko do cięcia plazmowego, niezależnie od mocy palnika, powinno być wyposażone w skutecznie działającą wentylację, ze względu na powstawanie w procesie cięcia w wysokiej temperaturze szkodliwych dla zdrowia tlenków i azotków metali.

Przykłady konstrukcji palników do cięcia plazmowego pokazano na rys. 96.



Rys. 95. Schematyczne przekroje palników plazmowych: a) z bezpośrednim łukiem plazmowym, b) z pośrednim łukiem plazmowym; l - kanał gazu plazmowego, 2 - dysza plazmowa, 3 - elektroda (katoda), 4 - kanał gazu osłonowego, 5 - łuk plazmowy, 6 - strumień plazmy, 7 - materiał spawany, 8 - anoda, 9 - dysza gazu osłonowego



Rys. 96. Palniki do cięcia plazmowego: a) palnik PCP2-I do cięcia prądem do 20 A, b) palnik PCP2-2 do cięcia prądem do 60 A; 1 - łącznik do załączania zasilania łuku plazmowego, 2 - nakrętka, 3 - dysza, 4 - katoda, 5 - tulejka, 6 - przewód prądowy i powietrza, 7 - przewody łącznika, 8 - przewód zasilania łuku pomocniczego, 9 - płozy

Dysze plazmowe

Dysze w palnikach plazmowych są stosowane do przewężania łuku plazmowego w celu zmniejszenia jego przekroju (rys.95, 96). Dzięki temu uzyskuje się większą koncentrację zjonizowanych cząsteczek oraz wzrost stopnia jonizacji gazu, co prowadzi do wzrostu temperatury łuku.

Średnice stosowanych najczęściej dysz plazmowych w palnikach do cięcia ręcznego wahają się w granicach 1,0÷1,8 mm.

Elektrody (katody)

Katody wolframowe, powszechnie stosowane do pracy w atmosferze gazów obojętnych, w atmosferze powietrza ulegają intensywnemu spalaniu i nie nadają się do zastosowania. Wysoką odporność na działanie tlenu w palnikach plazmowych wykazała grupa metali, tzw. tytanowców. Spośród nich praktyczne zastosowanie znalazły: *cyrkon* i *hafn*. Odporność cyrkonu i

hafnu, mających stosunkowo niskie temperatury topnienia (2125 K Zr i 2495 K Hf), jest spowodowana głównie tworzeniem się trudno topliwej warstewki tlenków i azotków zabezpieczających metal przed topnieniem i parowaniem.

Katody w palnikach plazmowych z powietrzem lub tlenem jako gazem plazmowym są wykonywane z miedzi z wprasowaną pastylką cyrkonową lub hafnową i bardzo intensywnie chłodzone wodą lub powietrzem przy mniejszych mocach.

Elektrodę uważa się za zużytą i podlegającą wymianie, kiedy na wkładce z hafnu (centralna część czoła elektrody) ukaże się krater większy niż 3÷4 mm.

Zasada procesu

Spośród metod cięcia termicznego szczególną pozycję zajmuje cięcie plazmowe, zwłaszcza po zastosowaniu powietrza, a ostatnio i tlenu, jako gazu plazmowego. *Strumień plazmy dzięki dużej koncentracji energii powoduje w bardzo krótkim czasie podgrzanie materiału do temperatury topienia, a następnie wydmuchanie stopionego metalu.*

Zaletami takiego sposobu cięcia są:

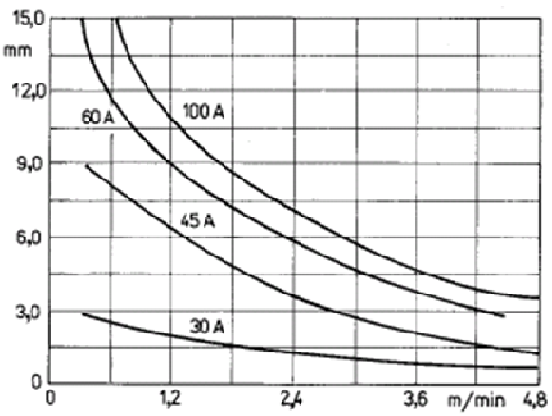
- mała strefa przegrzania materiału,
- duża prędkość cięcia,
- gładkość powierzchni,
- sprawność i ekonomiczność
- wszechstronność zastosowania i możliwość cięcia w miejscach trudno dostępnych przy cięciu mechanicznym.

W urządzeniach do cięcia plazmowego zespołem wytwarzającym strumień niskotemperaturowej, wysokociśnieniowej plazmy jest palnik (plazmotron) z łukiem bezpośrednim. Rozpowszechnienie cięcia plazmowego nastąpiło dopiero po zastosowaniu *powietrza jako gazu plazmowego*.

Dobór parametrów cięcia

Podstawowymi parametrami mającymi decydujący wpływ na jakość powierzchni są:

- zakres prądowy (moc palnika plazmowego),
- wydatek powietrza (gazu plazmotwórczego),
- średnica dyszy,
- prędkość cięcia,



Rys. 97. Zależności określające grubość ciętych blach w funkcji prądu łukowego oraz prędkości cięcia

Palniki z powietrzem jako gazem plazmowym umożliwiają cięcie blach stalowych o grubości do ok. 40 mm.. Na rys. 97 przedstawiono zakres grubości cięcia w funkcji prędkości cięcia oraz prądu łuku.

Zakresy prądowe dobierane są w zależności od grubości i rodzaju ciętego materiału przy uwzględnieniu przewidywanej prędkości cięcia lub wielkości szczeliny powstającej podczas procesu cięcia.

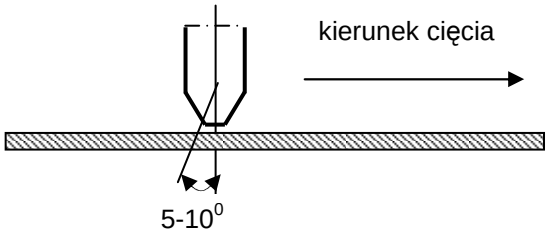
Wielkość wydatku powietrza jest określona warunkami technicznymi zastosowanego palnika, a ciśnienie zasilania palników powinno wynosić 0,55-0,60 MPa. Za małe lub za duże natężenie przepływu powietrza powoduje niestabilne jarzenie się. łuku.

Prędkość cięcia należy dobierać indywidualnie, zależnie od grubości i rodzaju ciętego materiału. Prawidłowo dobrana prędkość cięcia zapewnia prostopadłość ciętych krawędzi, bez sopli i nacieków.

Technika cięcia

Cięcie plazmowe może być zastosowane do wszystkich metali i ich stopów (w przeciwieństwie do cięcia tlenowego).

Proces cięcia należy rozpoczynać poprzez zapłon łuku pilotującego poza krawędzią przecinanego elementu, aby uniknąć rozprysku żużla w stronę palnika. W miarę zagłębiania się strumienia plazmowego w materiał, prędkość cięcia należy jednostajnie zwiększać aż do uzyskania właściwych parametrów cięcia. Prędkość cięcia należy tak dobierać, aby snop usuwanego materiału odchylał się od osi palnika o kąt 5-10^0 (rys. 98).



Rys. 98. Kąt odchylenia iskier ciętego materiału

Jeżeli żużel wyprysnął w kierunku palnika, należy natychmiast przerwać proces cięcia i ocenić stan dyszy tnącej i ewentualnie oczyścić ją z nagromadzonego materiału.

Zakończenie procesu cięcia następuje przez zwolnienie przycisku na palniku, ale sprężone powietrze będzie jeszcze jakiś czas chłodzić palnik. *Nie należy przerywać procesu chłodzenia palnika przez wyłączenie urządzenia, gdyż następuje znaczne skrócenie jego żywotności.*

Wady cięcia

Przy nieprawidłowo dobranych parametrach mogą wystąpić błędy cięcia. Najczęściej występujące błędy wraz z przyczyną ich powstawania zestawiono w tabeli 25.

Tabela 25. Przyczyny występowania błędów cięcia

Błąd cięcia	Przyczyna
Niedostateczne przenikanie	za duża prędkość cięcia
	za duży kąt nachylenia palnika
	za duża grubość ciętego materiału
	zużyte lub uszkodzone części palnika
Silne tworzenie się zacieków	za mała lub za duża prędkość cięcia
	zużyte lub uszkodzone części palnika
	nieodpowiedni zakres prądowy
Tnący łuk elektryczny zrywa się	za mała prędkość cięcia
	za duża odległość palnika od ciętego materiału
	za dużą grubość ciętego materiału
	zużyta elektroda

10. WADY I NIEZGODNOŚCI SPOIN ORAZ METODY BADAŃ ZŁĄCZY SPAWANYCH

Współczesne technologie spawalnicze nadal nie są w stanie zapewnić wykonania połączenia doskonałego, czyli złącza bez jakichkolwiek wad. *Niezgodnością spawalnicza określa się tę niedoskonałość złącza, która odbiega od idealnej jakości złącza pod względem budowy i kształtu i może stanowić lub też stanowi zagrożenie pogorszenia właściwości eksploatacyjnych konstrukcji. Niezgodność spawalnicza może być niezgodnością dopuszczalną, gdy wymiar niezgodności nie przekracza wymiaru granicznego wg obowiązującej normy lub przepisu.*

Pod względem *przyczyn powstawania* niezgodności spawalniczych można zakwalifikować je do trzech grup:

1. *Niezgodności spawalnicze wynikające z niewłaściwego przebiegu procesu spawalniczego lub niewłaściwych warunków technologicznych:*
   - niezgodności kształtu i powierzchni,
   - niezgodności przetopu,

- przyklejenia,
- wtrącenia stałe niemetaliczne lub metalowe.

2. Niezgodności pochodzenia metalurgicznego:
- pęknięcia lub mikropęknięcia,
- pustki gazowe,
- pustki wskutek skurczu,
- segregacja składu chemicznego,
- niekorzystne zmiany strukturalne w strefie wpływu ciepła (SWC).

3. Niezgodności spawalnicze wynikające z błędów projektowych konstrukcji:
- nadmierna koncentracja naprężeń, np. w wyniku nagromadzenia spoin w silnie obciążonych węzłach konstrukcji,
- niewłaściwy rodzaj złącza, np. zamiast spoiny czołowej w złączu teowym spoiny pachwinowe.

Niezgodności spawalnicze złączy wywierają wpływ na zdolność przenoszenia naprężeń przez zmniejszenie przekroju złącza, podwyższając proporcjonalnie naprężenia lub działając jako koncentratory naprężeń. W obszarze wierzchołka karbu utworzonego przez niezgodność spawalniczą występuje znaczna koncentracja naprężeń rozciągających, prostopadłych do kierunku niezgodności, oraz naprężeń tnących, równoległych do kierunku niezgodności. Przy szczególnie dużej koncentracji naprężeń w złączu niezgodność spawalnicza może prowadzić do zapoczątkowania pęknięć eksploatacyjnych, kruchych, zmęczeniowych i korozyjnych. Można więc niezgodności spawalnicze podzielić na:

- *niezgodności spawalnicze przestrzenne*, trójwymiarowe, jak np. pustki gazowe i wtrącenia stałe, które nie tworzą karbu i tylko obniżają przekrój czynny złącza,
- *niezgodności spawalnicze płaskie*, jak np. pęknięcia, przyklejenia czy brak przetopu, które tworzą ostry karb inicjujący pęknięcia konstrukcji.

10.1. Klasyfikacja niezgodności spawalniczych

Niezgodnością spawalniczą wg PN-EN ISO 6520-1:2002 nazywamy każde odchylenie od idealnego złącza spawanego, natomiast wadą nazywamy niedopuszczalną niezgodność spawalniczą.

Podstawą systemu numeracji jest klasyfikacja niezgodności spawalniczych w 6 grupach:

1) pęknięcia,
2) pustki,
3) wtrącenia stałe,
4) przyklejenia i brak przetopu,
5) niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu i wymiarów,
6) niezgodności spawalnicze różne.

10.2. Poziomy jakości złączy spawanych

W normie PN-EN ISO 5817 określono trzy poziomy jakości oznaczone dużymi literami B, C, i D, przy czym:

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

Wymagany poziom jakości powinien być ustalony w normach wyrobu. Może być również uzgodniony pomiędzy projektantem a wytwórcą, projektantem a użytkownikiem ewentualnie innymi zainteresowanymi stronami. Wymagany poziom jakości należy określić przed rozpoczęciem produkcji, najlepiej przy wystawianiu oferty lub zamówienia. Dla pojedynczego złącza spawanego ustala się, z reguły, jeden poziom jakości któremu odpowiadają określone wymiary graniczne niezgodności spawalniczych. W niektórych jednak przypadkach (np. dla określonego gatunku stali, obciążenia zmęczeniowego wyrobu, konieczności zachowania szczelności itp.)

może być niezbędne ustalenie w tym samym złączu, dla określonych niezgodności spawalniczych, różnych poziomów jakości.

Podczas wyboru poziomu jakości należy uwzględnić rodzaj projektowanego wyrobu, jego obróbkę mechaniczną i cieplną, rodzaj działającego na wyrób obciążenia (np. statyczne, dynamiczne), warunki eksploatacji (np. temperatura otoczenia, środowisko) i konsekwencje awarii. Ważny element wyboru stanowią również czynniki ekonomiczne, które należy rozpatrywać zarówno z punktu widzenia kosztów spawania jak i kosztów kontroli i naprawy wyrobu.

Ocena jakości złącza spawanego polega na jego przyporządkowaniu do jednego z trzech poziomów jakości w zależności od wykrytych niezgodności spawalniczych. Porównanie następnie tego poziomu z poziomem wymaganym umożliwia podjęcie decyzji o odbiorze wykonanych połączeń lub ich naprawie.

10.3. Rodzaje badań złączy spawanych

Spośród znanych i powszechnie stosowanych *metod badawczych z grupy nieniszczących* stosuje się badania pozwalające na wykrycie nieciągłości, uszkodzeń powierzchni, ubytków materiałowych itp. Są to:

- badania wizualne, które pozwalają ocenić stan ogólny urządzenia, zlokalizować i wskazać miejsca wątpliwe, wymagające dalszych badań i identyfikacji ewentualnych uszkodzeń,
- próby szczelności i próby ciśnieniowe,
- badania powierzchniowe penetracyjne i magnetyczno - proszkowe,
- ultradźwiękowy pomiar grubości ścianki materiału,
- defektoskopowe badania ultradźwiękowe,
- badania radiograficzne.

Stosowane są także metody nieniszczące, które pozwalają ocenić stan materiału, do których zalicza się:

- badanie mikrostruktury na powierzchni przy użyciu przenośnego mikroskopu optycznego o powiększeniu do 400x,
- pomiary twardości twardościomierzem ultradźwiękowym,
- analiza składu chemicznego przewoźnym spektrometrem emisyjnym,

Rysunek 99 przedstawia *rodzaje stosowanych badań nieniszczących*.

Wśród *badań niszczących* wymienić można badania:

- mechaniczne i technologiczne - próby rozciągania, udarności, twardości, zginania itp.
- metalograficzne - makro- i mikroskopowe,
- analizę składu chemicznego metodami chemicznymi.

Rysunek 100 przedstawia stosowane badania niszczące.

Wszystkie wymienione metody badawcze wykorzystywane są do badania zarówno materiałów jak i złączy spawanych.

11. SYSTEM SZKOLENIA I EGZAMINOWANIA SPAWACZY

11.1. Klasyfikacja zakładów przemysłowych

W normie PN-M-69008 konstrukcje spawane i zgrzewane podzielono na trzy klasy (od 1 do 3), w zależności od charakteru obciążeń, jakim te konstrukcje są poddawane oraz skutków ich ewentualnej awarii (straty materialne i zagrożenie życia ludzkiego). Spawacze, zgrzewacze i operatorzy zmechanizowanych urządzeń spawalniczych po ukończeniu szkoleń uzyskiwali, zdając egzaminy według odpowiedniego arkusza normy PN-M-69900, uprawnienia do spawania konstrukcji klasy 3 (uprawnienia podstawowe) bądź do spawania odpowiedzialnych konstrukcji klasy 1,2 (uprawnienia ponadpodstawowe).

W normie PN-M-69009 podzielono zakłady stosujące procesy spawalnicze na grupy, w zależności od wielkości zakładu i wyposażenia technicznego (spawalniczego, pomocniczego i pomiarowo-kontrolnego), stosowanych sprawdzonych i uznanych technologii spawalniczych i dysponowanych służb spawalniczych (personelu spawalniczego i personelu badań nieniszczących):

- grupa I, obejmująca zakłady uprawnione do wykonywania konstrukcji klasy 1, 2 i 3,
- grupa II, obejmująca zakłady uprawnione do wykonywania konstrukcji klasy 2 i 3,
- grupa III, obejmująca zakłady uprawnione do wykonywania konstrukcji klasy 3.

Rys. 99. Rodzaje stosowanych badań nieniszczących.

Rys. 100. Stosowane badania niszczące

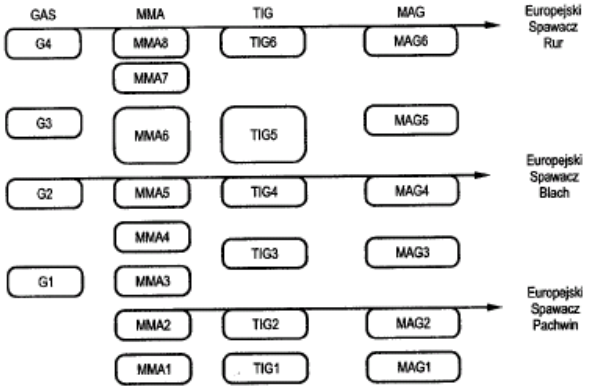
W normie dzieli się ponadto zakłady na duże i małe, w zależności od tzw. *ekwiwalentnej liczby zatrudnionych spawaczy, operatorów i zgrzewaczy*. Klasyfikowanym zakładom stawia się wymagania co do posiadanych urządzeń produkcyjnych, urządzeń do kontroli jakości, posiadania odpowiednich komórek organizacyjnych i wykwalifikowanych służb spawalniczych. Zakłady grupy I i II wytwarzające konstrukcje spawane klasy 1 lub 2 powinny dysponować wystarczającą ilością spawaczy, operatorów lub zgrzewaczy o uprawnieniach ponadpodstawowych wg PN-M-69900 (od 1 stycznia 2002 roku wyłącznie spawaczy o uprawnieniach wg PN-EN 287 i operatorów o uprawnieniach wg PN-EN 1418). Duże znaczenie mają również osoby nadzoru spawalniczego i osoby odpowiedzialne za badania nieniszczące konstrukcji spawanych i ich jakość. Przez odpowiednie ich usytuowanie w strukturze organizacyjnej zakładu osoby te powinny mieć zapewnioną możliwość oddziaływania na przebieg procesu produkcyjnego i kontrolnego. Osobą odpowiedzialną za całokształt prac spawalniczych, w zależności od wielkości i grupy zakładu, zgodnie z normą może być inżynier lub technik o wykształceniu spawalniczym. Dopuszcza się również inżynierów lub techników innej specjalizacji, ale po przeszkoleniu spawalniczym i z odpowiednim stażem z zakresu spawalnictwa. Podobne wymagania są stawiane

osobom odpowiedzialnym za kontrolę robót spawalniczych z tym, że osoby te powinny być dodatkowo przeszkolone na kursach kontroli robót spawalniczych.

11.2. Zharmonizowany system szkolenia spawaczy EW

Zharmonizowany system szkolenia spawaczy EWF obejmuje modułowe szkolenie spawaczy o trzech poziomach kwalifikacji zawodowych (rys.101):

- Europejski Spawacz Pachwin (European Fillet Welder) EFW,
- Europejski Spawacz Blach (European Plate Welder) EPW,
- Europejski Spawacz Rur (European Tube Welder) ETW.



Rys 101. System szkolenia na EW

Kolejne szkolenia na poszczególnych modułach mają za zadanie przygotowanie spawacza do coraz trudniejszych zadań i uzyskanie uprawnień wymaganych normą EN 287. Uzyskiwane w toku szkolenia uprawnienia umożliwiają spawaczowi znalezienie pracy w szerokim zakresie robót spawalniczych. Poszczególne moduły szkoleniowe pokazane na następnych rysunkach składają się z kombinacji zajęć teoretycznych i praktycznych oraz testów i egzaminów. Uzyskiwane w toku szkolenia dyplomy Europejskiego Spawacza wydane przez EWF są ważne przez całe zawodowe życie spawacza i potwierdzają odbyte szkolenia i posiadane kwalifikacje zawodowe. Jednocześnie *absolwent kursu otrzymuje jedno lub więcej Świadectw Egzaminu Spawacza wg EN 287, które świadczą o jego umiejętnościach oraz uprawnieniach i są ważne przez dwa lata.*

Kandydat do zawodu spawacza rozpoczynając szkolenie na pierwszym module, powinien ukończyć co najmniej podstawową szkołę oraz mieć typowe zdolności fizyczne, psychiczne oraz zdrowotne.

Wskazane jest, aby ukończył wcześniej szkolenie w zakresie obróbki metali. Dalszy przebieg szkolenia jest uwarunkowany pozytywnym ukończeniem szkoleń na poszczególnych modułach oraz zdaniem końcowych testów i egzaminów. Rozpoczęcie szkolenia w poszczególnych modułach jest możliwe tylko po spełnieniu wymaganych warunków wejściowych (przykład szkolenia Europejskiego Spawacza Elektrodami Otulonymi (rys. 102).

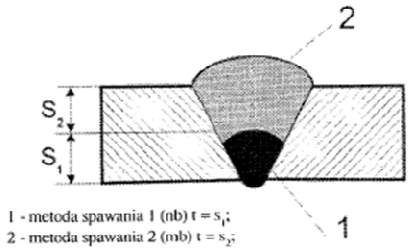
Końcowe egzaminy związane z uzyskaniem dyplomów europejskiego spawacza powinny być przeprowadzone przez komisję egzaminacyjną, powołaną przez tzw. Authorized National Body - ANB (Autoryzowaną Organizację Krajową). Końcowe egzaminy po modułach pośrednich (testy) mogą być przeprowadzane przez komisję egzaminacyjną powołaną przez ośrodek szkoleniowy.

Obecnie w Polsce egzaminowanie spawaczy przeprowadza się w oparciu o znowelizowaną normę PN EN 287-1:2005.

Symbole i skróty zastosowane w w/w normie

BW spoina czołowa,
FW spoina pachwinowa,
P blacha,
T rura,
D średnica zewnętrzna rury,

t grubość blachy lub ścianki rury,
s_1 grubość spoiny czołowej dla metody spawania 1 (rys. 103),
s_2 grubość spoiny czołowej dla metody spawania 2 (rys. 103),
a nominalna grubość spoiny pachwinowej,
z długość przyprostokątnej spoiny pachwinowej,
ss spawanie jednostronne:
mb spawanie na podkładce,
nb spawanie bez podkładki,
bs spawanie dwustronne,
lw spawanie w lewo (tylko dla metody spawania gazowego 311),
rw spawanie w prawo (tylko dla metody spawania gazowego 311),
sl spawanie jednościegowe (tylko dla spoin pachwinowych),
ml spawanie wielościegowe (tylko dla spoin pachwinowych),
nm bez materiału dodatkowego,
wm z materiałem dodatkowym,
111 spawanie łukowe elektrodą otuloną,
131 spawanie metodą MIG,
135 spawanie metodą MAG,
141 spawanie metodą TIG,
311 spawanie gazowe acetylenowo-tlenowe.



Rys. 103. Grubości spoin wykonywanych dwiema metodami spawania

Aby zmniejszyć liczbę technicznie podobnych egzaminów, dla potrzeb egzaminowania spawaczy materiały podstawowe o podobnych metalurgicznych i spawalniczych własnościach podzielono na grupy, które zestawiono w tabeli 26.

W zależności od gatunku materiału użytego do wykonania egzaminacyjnych złącz próbnych spawacz uzyskuje uprawnienia wg tabeli 27.

Tabela 26. Podział stali na grupy

Grupy materiałowe wg PN-CR ISO 15608		
Grupa	**Podgrupa**	**Typ stali**
1		Stale o granicy plastyczności $R_{eH} \leq 460$ N/mm^2 i zawartości pierwiastków w %: C ≤ 0,25; Si ≤ 0,60; Mn ≤ 1,8; Mo ≤ 0,70; S ≤ 0,045; P ≤ 0,045; Ni ≤ 0,5; Cu ≤ 0,40; Cr ≤ 0,3 (0,4 dla staliw); Nb ≤ 0,06; V ≤ 0,10, Ti ≤ 000,05
	1.1	Stale o granicy plastyczności $R_{eH} \leq 275$ N/mm^2
	1.2	Stale o granicy plastyczności 275 N/mm^2 < $R_{eH} \leq 360$ N/mm^2
	1.3	Stale drobnoziarniste normalizowane o granicy plastyczności $R_{eH} > 360$ N/mm^2
	1.4	Stale trudnordzewiejące o dopuszczalnej zawartości pierwiastków jak dla grupy 1
2		Stale obrabiane termomechanicznie, drobnoziarniste i staliwa o granicy plastyczności R_{eH} >360 N/mm^2
	2.1	Stale obrabiane termomechanicznie, drobnoziarniste i staliwa o granicy plastyczności 360 N/mm^2 < $R_{eH} \leq 460$ N/mm^2
	2.2	Stale obrabiane termomechanicznie, drobnoziarniste i staliwa o granicy plastyczności $R_{eH} > 460$ N/mm^2
3		Stale ulepszane cieplnie i utwardzane wydzieleniowo, z wyjątkiem stali nierdzewnych, o granicy plastyczności $R_{eH} > 360$ N/mm^2
	3.1	Stale ulepszane cieplnie o granicy plastyczności 360 N/mm^2 < $R_{eH} \leq 690$ N/mm^2
	3.2	Stale ulepszane cieplnie o granicy plastyczności $R_{eH} > 690$ N/mm^2
	3.3	Stale ulepszane wydzieleniowo, z wyjątkiem stali nierdzewnych

c.d. tabeli 26

4		Stale niskowanadowe Cr-Mo-(Ni) o zawartości Mo ≤ 0,7% i V ≤ 0,1%
	4.1	Stale o zawartości Cr ≤ 0,3% i Ni ≤ 0,7%
	4.2	Stale o zawartości Cr ≤ 0,3% i Ni ≤ 1,5%
5		Stale Cr-Mo bez wanadu o zawartości C ≤ 0,35%
	5.1	Stale o zawartości 0,75% ≤ Cr ≤ 1,5% i Mo ≤ 0,7%
	5.2	Stale o zawartości 1,5% < Cr ≤ 3,5% i 0,7 < Mo ≤ 1,2%
	5.3	Stale o zawartości 3,5% < Cr ≤ 7,0% i 0,4 < Mo ≤0,7%
	5.4	Stale o zawartości 7,0% < Cr ≤ 10,0% i 0,7 < Mo ≤1,2%
6		Stale Cr-Mo-(Ni) o wysokiej zawartości wanadu
	6.1	Stale o zawartości 0,3% ≤ Cr ≤ 0,75%; Mo ≤ 0,7% i V ≤ 0,35%
	6.2	Stale o zawartości 0,75% < Cr ≤ 3,5%; 0,7 < Mo ≤ 1,2% i V ≤ 0,35%
	6.3	Stale o zawartości 3,5% < Cr ≤ 7,0%;Mo ≤0,7% i 0,45% ≤ V ≤ 0,55%
	6.4	Stale o zawartości 7,0% < Cr ≤ 12,5%; 0,7 < Mo ≤1,2% i V ≤ 0,35%
7		Stale ferrytyczne, martenzytyczne lub utwardzane wydzieleniowo o zawartości C ≤ 0,35% i 10,5% ≤ Cr ≤ 30%;
	7.1	Stale ferrytyczne nierdzewne
	7.2	Stale martenzytyczne nierdzewne
	7.3	Stale utwardzane wydzieleniowo
8		Stale austenityczne nierdzewne
	8.1	Stale austenityczne nierdzewne o zawartości Cr ≤ 19%
	8.2	Stale austenityczne nierdzewne o zawartości Cr > 19%
	8.3	Nierdzewne stale austenityczne manganowe o zawartości 4,0% < Mn ≤ 12%;
9		Stale niklowe o zawartości Ni ≤ 10,0%
	9.1	Stale niklowe o zawartości Ni ≤ 3,0%
	9.2	Stale niklowe o zawartości 3,0% < Ni ≤ 8,0%;
	9.3	Stale niklowe o zawartości 8,0% < Ni ≤ 10,0%;
10		Stale austenityczne ferrytyczne (duplex)
	10.1	Stale austenityczne ferrytyczne o zawartości Cr ≤ 24%
	10.2	Stale austenityczne ferrytyczne o zawartości Cr > 24%
11		Stale zaliczone do grupy I, z wyjątkiem stali 0,25% < C ≤ 0,5%;
	11.1	Stale zaliczone do grupy II o zawartości 0,25% < C ≤ 0,35%;
	11.2	Stale zaliczone do grupy II o zawartości 0,35% < C ≤ 0,50%;

Tabela 27. Zakres uprawnień wg PN EN 287-1:2005 związany z materiałem podstawowym złącza egzaminacyjnego.

Grupa materiałów złącza egzamina-cyjnego	Zakres uprawnień												
	1.1 1.2 1.4	1.3	2	3	4	5	6	7	8	9		10	11
										9.1	9.2+9.3		
1.1, 1.2, 1.4	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.3	×	×	×	×	—	—	—	—	—	×	—	—	×
2	×	×	×	×	—	—	—	—	—	×	—	—	×
3	×	×	×	×	—	—	—	—	—	×	—	—	×
4	×	×	×	×	×	×	×	×	—	×	—	—	×
5	×	×	×	×	×	×	×	×	—	×	—	—	×
6	×	×	×	×	×	×	×	×	—	×	—	—	×
7	×	×	×	×	×	×	×	×	—	×	—	—	×
8	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	×	×	—
9 9.1	×	×	×	×	—	—	—	—	—	×	—	—	×
9 9.2+9.3	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	×	×	—
11	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×

Oznaczenia:
x uprawnienie spawacza do spawania grup materiałowych,
- brak uprawnienia spawacza do spawania wymienionych grup materiałowych

Materiały dodatkowe do spawania

W normie EN 287-1:1992 egzaminowanie i uprawnianie do spawania drutami proszkowymi było niezbyt precyzyjnie określone. Norma nie uwzględniała bowiem rodzaju drutu proszkowego stosowanego do wykonania złącza egzaminacyjnego. Te nieścisłości usuwa norma EN 287-1:2004 wprowadzając symbole drutów proszkowych i związane z nimi uprawnienia wynikające ze zdanego egzaminu. W tablicy 28 podano oznaczenia materiałów dodatkowych ujęte w normy EN 287-1:2004, a w tablicy 29 zakresy uprawnień wynikające z ich zastosowania do wykonania złącza egzaminacyjnego.

Tabela 28 Oznaczenia materiałów dodatkowych w normie EN 287-1:2004

Oznaczenie	Nazwa
nm	bez materiału dodatkowego
Druty i pręty	
S	Drut lity / pręt
Druty proszkowe – typ mieszanki proszkowej	
B	zasadowa
M	proszek metalowy
P	rutylowa, żużel szybko krzepnący
R	rutylowa, żużel wolno krzepnący
V	rutylowa lub zasadowa / fluorki
W	zasadowa / fluorki, żużel wolno krzepnący
Y	zasadowa / fluorki, żużel szybko krzepnący
Z	inne rodzaje mieszanek
Elektrody otulone – typ otuliny	
A	kwaśna
B	zasadowa
C	celulozowa
R	rutylowa
RA	rutylowo-kwaśna
RB	rutylowo-zasadowa
RC	rutylowo-celulozowa
RR	rutylowa, gruba

Tabela 29. Zakresy uprawnień uwzględniające materiał dodatkowy w normie EN 287-1:2004

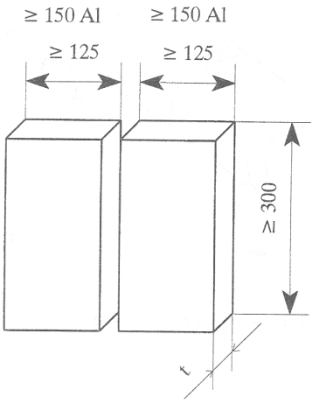
Metoda spawania	Materiał dodatkowy stosowany podczas egzaminu [a]	Zakresy uprawnień			
		A, RA, RB, RC, RR, R		B	C
111	A, RA, RB, RC, RR, R	×		—	—
	B	×		×	—
	C	—		—	×
—	—	Drut lity (S)	Drut proszkowy (M)	Drut proszkowy (B)	druty proszkowe (R, P, V, W, Y, Z)
131 135 136 141	drut lity (S)	×	×	—	—
	drut proszkowy (M)	×	×	—	—
136	drut proszkowy (B)	—	—	×	×
114 136	druty proszkowe (R, P, V, W, Y, Z)	—	—	—	×

[a] Typ materiału dodatkowego stosowany podczas egzaminu do wykonania warstwy graniowej spoiny bez podkładki (ss nb) dopuszczony zostaje do wykonywania warstw graniowych w produkcji.

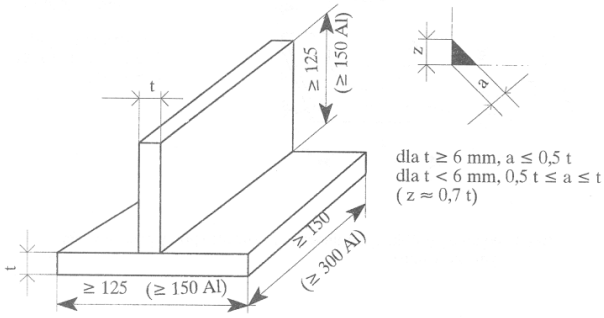
Oznaczenia: x uprawnienie spawacza do spawania materiałami dodatkowymi z podanych grup,
- brak uprawnienia spawacza do spawania materiałami dodatkowymi z podanych grup.

Wymiary złączy egzaminacyjnych

Kształty i wymiary złączy egzaminacyjnych przedstawiono na rys. 103-104, natomiast w tabelach 30-32 podano zakresy uprawnień związane z grubością złącza egzaminacyjnego.



Rys. 103. Wymiary próbki egzaminacyjnej z blach dla spoin czołowych



Rys. 104. Wymiary próbki egzaminacyjnej z blach dla spoin pachwinowych

Tabela 30. Złącze egzaminacyjne (blacha lub rura) i zakresy uprawnień dla spoin czołowych (BW)

Grubość t [mm]	Zakres uprawnień
t < 3	od t do 2t [1)]
3 ≤ t ≤ 12	od 3 mm do 2t [2)]
t > 12	≥ 5 mm

[1)] w przypadku spawania acetylenowo-tlenowego (311): od t do 1,5t

[2)] w przypadku spawania acetylenowo-tlenowego (311): od 3 mm do 1,5t

Tabela 31. Złącze egzaminacyjne (blacha lub rura) i zakresy uprawnień dla spoin pachwinowych (FW)

Grubość t [mm]	Zakres uprawnień
t < 3	t do 3 mm
t ≥ 3	≥ 3 mm

Tabela 32. Średnica zewnętrzna złącza egzaminacyjnego i zakresy uprawnień

Zewnętrzna średnica złącza egzaminacyjnego D [1)] [mm]	Zakres uprawnień
D ≤ 25	D do 2D
D > 25	≥ 0,5D (min. 25 mm)

Pozycje spawania

Zakresy uprawnień związane z pozycją spawania złącza egzaminacyjnego przedstawiono w tabeli 33.

Sposoby wykonania złączy egzaminacyjnych oraz zakresy uprawnień

Znowelizowana norma EN 287-1:2004 uzależnia zakresy nadawanych uprawnień od sposobu wykonywania złączy egzaminacyjnych, i tak:

- wykonanie złącza egzaminacyjnego rurowego o średnicy D > 25 mm uprawnia do spawania blach;
- wykonanie złącza egzaminacyjnego z blach w odpowiedniej pozycji spawania uprawnia do spawania rur:
  - o zewnętrznej średnicy D ≥ 150 mm, w pozycjach spawania PA, PB i PC;
  - o zewnętrznej średnicy D ≥ 500 mm, we wszystkich pozycjach;
- wykonanie rurowych złączy egzaminacyjnych w pozycjach spawania J-L045 i H-L045 uprawnia do spawania rur nachylonych pod dowolnymi kątami;

- wykonanie dwóch rurowych złączy egzaminacyjnych o tej samej średnicy zewnętrznej, jednego w pozycji PF a drugiego w pozycji PC, uprawnia do spawania w takim samym zakresie jak po wykonaniu złącza egzaminacyjnego w pozycji H-L045;
- wykonanie dwóch rurowych złączy egzaminacyjnych o tej samej średnicy zewnętrznej, jednego w pozycji PG a drugiego w pozycji PC, uprawnia do spawania w takim samym zakresie jak po wykonaniu złącza egzaminacyjnego w pozycji J-L045;
- wykonanie złącza egzaminacyjnego dowolną metodą spawania uprawnia do spawania tylko tą metodą. Wyjątek stanowią złącza egzaminacyjne wykonane metodą spawania 135, które uprawniają również do spawania metodą 136, ale tylko drutami proszkowymi o rdzeniu metalowym, i odwrotnie:
- wykonanie złącza egzaminacyjnego metodami 141, 15 i 311 z dodatkiem spoiwa uprawnia do spawania tymi metodami bez dodatku spoiwa, lecz nie odwrotnie;
- wykonanie złączy egzaminacyjnych ze spoinami czołowymi uprawnia do wykonania spoin czołowych w dowolnych złączach, za wyjątkiem rozgałęzień rurociągów;
- w przypadkach gdy w produkcji przeważa wykonywanie spoin pachwinowych, spawacz powinien zdawać egzamin z użyciem złączy egzaminacyjnych ze spoinami pachwinowymi. W przypadkach gdy w produkcji przeważa wykonywanie spoin czołowych, spawacz powinien zdawać egzamin z zastosowaniem złączy egzaminacyjnych ze spoinami czołowymi, uzyskując również uprawnienia do wykonywania spoin pachwinowych;
- rurowe złącza egzaminacyjne o zewnętrznej średnicy D ≥ 150 rnm można wykonywać w dwóch pozycjach spawania (PF lub PG - 2/3 obwodu, PC - 1/3 obwodu) wykorzystując tylko jedno złącze;
- wykonując złącza egzaminacyjne ze spoinami pachwinowymi, uzyskuje się uprawnienia zależne od sposobu wykonywania spoin (tabela 34).

Tabela 33. Zakres uprawnień do spawania stali w określonych pozycjach wg EN 287-1:2004

Pozycja spawania złącza próbnego	Zakres kwalifikowania [a]										
	PA	PB [b]	PC	PD [b]	PE	PF (blacha)	PF (rura)	PG (blacha)	PG (rura)	H-L045	J-L045
PA	X	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PB [b]	X	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PC	X	X	X	–	–	–	–	–	–	–	–
PD [b]	X	X	X	X	X	X	–	–	–	–	–
PE	X	X	X	X	X	X	–	–	–	–	–
PF (blacha)	X	X	–	–	–	X	–	–	–	–	–
PF (rura)	X	X	–	X	X	X	X	–	–	–	–
PG (blacha)	–	–	–	–	–	–	–	X	–	–	–
PG (rura)	X	X	–	X	X	–	–	X	X	–	–
H-L045	X	X	X	X	X	X	X	–	–	X	–
J-L045	X	X	X	X	X	–	–	X	X	–	X

[a] Dodatkowo powinny być przestrzegane wymagania 5.3 i 5.4.

[b] Pozycje spawania PB i PD stosowane są tylko dla spoin pachwinowych (patrz 5.4 b)) i mogą tylko kwalifikować do wykonywania spoin pachwinowych w innych pozycjach spawania.

Opis

X wskazuje pozycje spawania, do spawania których spawacz jest kwalifikowany.

– wskazuje pozycje spawania, do spawania których spawacz nie jest kwalifikowany.

Tabela 34. Zakres uprawnień dla spoin pachwinowych zależny od techniki wykonywania złączy egzaminacyjnych ze spoinami pachwinowymi

Rodzaj złącza egzaminacyjnego	Zakres uprawnień	
	jednościegowe (sl)	wielościegowe (ml)
jednościegowe (sl)	x	-
wielościegowe (ml)	x	x

Metody badania złączy egzaminacyjnych

Zgodnie z normą EN 287-1:2004 złącza egzaminacyjne podlegać powinny badaniom. Od złączy egzaminacyjnych wymaga się poziomu jakości B, a dla niektórych niezgodności zewnętrznych poziomu jakości C wg normy EN ISO 5817. Złącza egzaminacyjne zaakceptowane badaniami wizualnymi powinny być poddane dalszym badaniom ujętym w tabeli 35.

Jeżeli stosowane są badania radiograficzne dla złączy doczołowych wykonanych metodami spawania 131, 135, 136 (tylko dla drutów proszkowych o rdzeniu metalowym) i 311, muszą być one uzupełnione próbami łamania lub próbami zginania. Dla doczołowych złączy z blach próby te obejmują badanie dwóch próbek, zginanych lub łamanych, po jednej od strony lica i grani spoin.

Dla doczołowych złączy z rur próby te obejmują badanie dwóch próbek (dla złączy wykonywanych w pozycjach spawania PA i PC) lub czterech próbek (dla złączy wykonywanych w pozycjach spawania PF, PG, H-L045 i J-L045W) zginanych lub łamanych z rozciąganiem lica i grani spoin.

Do egzaminu końcowego mogą być dopuszczeni uczestnicy szkolenia, którzy przeszli cykl szkolenia teoretycznego i praktycznego i wzięli udział co najmniej w 90% zajęć szkolenia teoretycznego i praktycznego.

Podczas egzaminowania końcowego, egzaminowany powinien wykonywać złącza egzaminacyjne według danych zawartych w instrukcjach technologicznych spawania WPS (rys. 105).

Po zdanym egzaminie spawacz otrzymuje Świadectwo Egzaminu Spawacza według wzoru pokazanego na rys. 106 wydane w jednym z trzech oficjalnych języków CEN (angielskim, francuskim, niemieckim).

Tabela 35. Metody badań złączy egzaminacyjnych

Metoda badań	Spoina czołowa (blach i rur)	Spoina pachwinowa
Badania wizualne zgodnie z EN 970	obowiązujące	obowiązujące
Badania radiograficzne zgodnie z EN 1435	obowiązujące [a b d]	nie obowiązujące
Próba zginania zgodnie z EN 910	obowiązująca [a b f]	nie stosowana
Próba łamania zgodnie z EN 1320	obowiązująca [a b f]	obowiązująca [c e]

[a] należy przeprowadzić badania radiograficzne lub zamiennie próbę zginania lub próbę łamania.

[b] jeżeli zostaną przeprowadzone badania radiograficzne, dla metod spawania 131, 135, 136 (tylko dla drutów proszkowych metalowych) i 311 wymagana jest próba zginania lub próba łamania.

[c] próbę łamania można zastąpić badaniami co najmniej 2 zgładów makro zgodnie z EN 1321, z których jeden zgład należy pobrać z tego miejsca złącza egzaminacyjnego, w którym spawacz przerwał spawanie.

[d] badania radiograficzne jedynie w przypadku stali ferrytycznych o grubości ≥ 8 mm zastąpić można badaniami ultradźwiękowymi, zgodnie z EN l714.

[e] próba łamania na rurach może być zastąpiona badaniami radiograficznymi.

[f] dla złączy rurowych o średnicy zewnętrznej D ≤ 25 mm, próba zginania lub próba łamania może być zastąpiona próbą zrywania kompletnego złącza z karbami.

Przykłady oznaczeń egzaminów spawaczy stali według normy EN 287-1:2007 oraz wynikający zakres uprawnień przedstawiono w tabeli 36.

Oznaczenie: EN 287-1 111 P BW 2 B t13 PA ss nb
EN 287-1 111 P FW 2 B t13 PB ml

Tabela 36. Oznaczenia egzaminu oraz zakresy uprawnień

Zakres egzaminu			Zakres uprawnień
111	Metoda spawania	Spawanie elektrodami otulonymi	111
P	Blacha	-	P T: D ≥ 150 mm
BW FW	Spoina czołowa Spoina pachwinowa	- -	BW, FW FW
2	Grupa materiałowa 2 według CR ISO 15608	Materiał grupy 2: stal obrabiana termomechanicznie R_{eH} > 360 N/mm^2	1, 2, 3, 9.1, 11
B	Elektroda otulona	Otulina zasadowa	Wszystkie z wyjątkiem C
t13	Grubość	Grubość materiału: 13 mm	≥ 5 dla BW ≥ 3 dla FW
PA PB	Pozycja spawania	Spoina czołowa: podolna Spoina pachwinowa: naboczna	PA, PB
ss nb ml	Szczegóły spawania	Spawanie jednostronne Spawanie bez podkładki Spawanie wielościegowe	ss nb, ss mb, bs dla BW sl, ml dla FW

Uprawnienia spawacza po kursie podstawowym i ponadpodstawowym wpisane w Świadectwie Egzaminu Spawacza ważne jest 2 lata, licząc od daty egzaminu pod warunkiem, że spawacz zatrudniony jest w sposób możliwie ciągły przy wykonywaniu prac spawalniczych w zakresie swoich uprawnień, co na Świadectwie Egzaminu Spawacza powinna potwierdzić osoba nadzoru spawalniczego lub odpowiedzialna osoba pracodawcy co 6 miesięcy.

12. WARUNKI BHP ORAZ OCHRONA PPOŻ. PRZY PRACACH SPAWALNICZYCH

Kandydatami na kurs spawania gazowego stali mogą być osoby, które:

- ukończyły co najmniej szkołę podstawową,
- ukończyły 18 rok życia,
- posiadają stan zdrowia umożliwiający wykonywanie cięcia plazmowego potwierdzony zaświadczeniem lekarskim lub
- posiadające książkę spawacza i chcą rozszerzyć posiadane uprawnienia spawalnicze.

Prace spawalnicze stwarzają wiele zagrożeń dla wykonujących je pracowników. Stwarzają one bowiem ryzyko zaprószenia ognia i spowodowania poparzeń. Dlatego przy ich prowadzeniu należy zadbać o właściwą organizację pracy i stosowanie odpowiedniego sprzętu.

Podstawowym aktem prawnym określającym zasady prowadzenia robót spawalniczych jest rozporządzenie ministra gospodarki z dnia 27 kwietnia 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach spawalniczych (Dz.U. nr 40, poz. 470). Reguluje ono wykonywanie spawania, napawania, lutowania, zgrzewania, cięcia termicznego metali i tworzyw termoplastycznych, czyli zmieniających kształt pod wpływem temperatury.

Organizacja prac spawalniczych

W miejscach, w których wykonywane są wymienione roboty, nie można przechowywać materiałów łatwopalnych. Pracownicy powinni mieć zapewnioną możliwość szybkiego i bezpiecznego opuszczenia stanowisk pracy. W związku z tym sprzęt i przedmioty znajdujące się na stanowiskach należy rozmieścić tak, aby nie tarasowały przejść. Na każde stanowisko pracy przy tych robotach musi przypadać minimum 2 m^2 powierzchni podłogi. Wielkość ta ma obejmować tylko obszar wolny, który nie jest zajęty przez jakiekolwiek urządzenia czy sprzęty. Podłoga na stanowiskach spawalniczych powinna być zrobiona z niepalnego materiału.

Jeżeli prace spawalnicze prowadzone są na otwartej przestrzeni, to miejsca ich wykonywania należy zabezpieczyć przed działaniem czynników atmosferycznych, np. przed deszczem. Otoczenie powinno być zaś chronione przed promieniowaniem wywołanym przez płomień lub łuk elektryczny.

INSTRUKCJA SPAWALNICZA PRODUCENTA (WPS)

Instrukcja technologiczna spawania: **złączy czołowych blach**
Nr instrukcji: **WPS 111-xxxx**

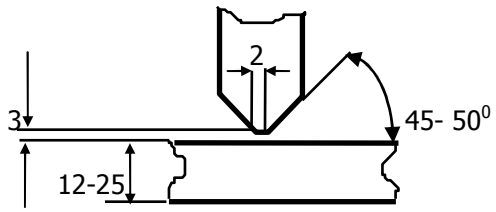
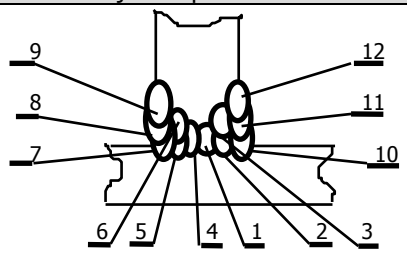
Wytwórca:

Data spawania:

Uprawnienia spawacza:
spawanie 111, pozycja PC, grubość pow. 12 mm
grupa mater. 1.2, złącze doczołowe, elektr. zasadowa
Metoda spawania: **111**
Rodzaj spoiny: **BW**

Sposób przygotowania i czyszczenia: **mech.**
Specyfikacja materiału podstawowego: **S355J2**
(dołączyć atesty materiałowe) *
Grubość materiału [mm]: **12-25**
Średnica zewnętrzna rury [mm]:
Złącze próbne / Pozycja spawania : **PC**

SZCZEGÓŁY PRZYGOTOWANIA DO SPAWANIA (szkic)*

Rysunek złącza	Kolejność spawania
	

SZCZEGÓŁY DOTYCZĄCE SPAWANIA

Ścieg	Metoda	Wymiar spoiwa	Natężenie [A]	Napięcie [V]	Rodzaj prądu biegunowość	Szybkość podawania drutu Prędkość przesuwu *	Ilość wprowadzonego ciepła
1	111	3.25	110	21	DC +	-	-
2-3	111	4.0	150	23	DC +	-	-
4	111	3.25	110	21	DC +	-	-
5-6	111	4.0	150	23	DC +	-	-
7-12	111	4.0	150	23	DC +	-	-

Spoiwo: **E 424 B 42 wg PN-EN 499**

Rodzaj spoiwa, oznaczenie wytwórcy: **EB 150** (Esab**)**
Specjalne zalecenia wypalania
lub suszenia: **300^{0}C/2h**

Gaz / Topnik: **-**
Natężenie przepływu gazu: **-**
- osłonowy **-**
- formujący **-**

Rodzaj elektrody wolframowej / średnica: **-**
Żłobienie (szlifowanie grani): **tak**
Temperatura podgrzewania wstępnego: **100^{0}C**
Temperatura międzyściegowa: **-**

OBRÓBKA CIEPLNA PO SPAWANIU
Metoda, temperatura, czas: **-**
Szybkość grzania i chłodzenia * : **-**

Informacje dodatkowe *:

1. Po wykonaniu ściegów 1-3 wykonać podpawanie grani spoiny.

Nazwisko, podpis:

mgr inż. Jan Kowalski (EWE)

Jednostka egzaminująca:

* jeśli wymagane

Rys. 105. Instrukcja Spawalnicza Producenta WPS – przykład

INSTYTUT SPAWALNICTWA - POLSKA
INSTITUTE OF WELDING - POLAND
OŚRODEK CERTYFIKACJI
CERTIFICATION CENTRE - ANB
Jednostka akredytowana przez Polskie Centrum Akredytacji według wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17024
Uznana organizacja trzeciej strony zgodnie z Artykułem 13 Dyrektywy Europejskiej 97/23/WE, Nr 1405

1 **Schweißer-Prüfungsbescheinigung**
Świadectwo Egzaminu Spawacza

2 *Bezeichnung(en):* EN 287-1 111 P FW 1.2 B t10 PF ml
Oznaczenie(a)

3 *Bescheinigung-Nr:*
Nr świadectwa

4 *WPS* WPS
Instrukcja technologiczna spawania

5 *Beleg-Nr:* WPS-111-03/07
Nr instrukcji

6 *Name des Schweißers:*
Nazwisko spawacza

7 *Legitimation:*
Nr dokumentu tożsamości

8 *Art der Legitimation:*
Rodzaj dokumentu tożsamości

9 *Geburtsdatum und -ort:*
Data i miejsce urodzenia

10 *Arbeitsgeber:*
Miejsce pracy

11 *Vorschrift/Prufnorm:* PN-EN 287-1:2007
Nr normy / przepisy

12 *Fachkunde:* bestanden
Egzamin teoretyczny

13	*Prüfstück* Złącze egzaminacyjne	*Geltungsbereich* Zakres uprawnień
14 *Schweißprozess(e)* Metoda(y) spawania	111	111
15 *Blech oder Rohr* Blacha lub rura	P	P
16 *Nahtart* Rodzaj spoiny	FW	FW
17 *Werkstoffgruppe(n)* Grupa(y) materiałowa(e)	1.2	1.1, 1.2, 1.4
18 *Schweißzusätze / Bezeichnung* Spoiwo / oznaczenie	B	A, RA, RB, RC, RR, R, B
19 *Schutzgas* Gaz osłonowy	-	-
20 *Hilfswerkstoffe* Materiały pomocnicze	-	-
21 *Werkstoffdicke (mm)* Grubość materiału (mm)	10	>= 3
22 *Rohraußendurchmesser (mm)* Średnica zewnętrzna rury (mm)	-	-
23 *Schweißposition* Pozycja spawania	PF	PA, PB, PF(P)
24 *Schweißnahteinzelheiten* Szczegóły wykonania spoiny	ml	sl, ml

25 *Prüfungsart* Rodzaj badań	26 *Ausgeführt und bestanden* Wykonane i zaliczone	27 *Nicht geprüft* Nie wymagane
28 *Sichtprüfung* Badania wizualne	☑	☐
29 *Durchstrahlungsprufung* Badania radiograficzne	☐	☑
30 *Bruchprüfung* Próba łamania	☑	☐
31 *Biegeprüfung* Próba zginania	☐	☑
32 *Kerbzugprüfung* Próba rozciągania z karbem	☐	☑
33 *Makroskopische Untersuchungen* Badania makroskopowe	☐	☑

PCA POLSKIE CENTRUM AKREDYTACJI
AC 054

34 *Name und Unterschrift des Prüfers:*
Nazwisko i podpis egzaminatora

Prüfstelle:
Jednostka egzaminująca
Instytut Spawalnictwa, Gliwice

Datum des Schweißens:
Data egzaminu
14.06.2007

Gültigkeitsdauer bis:
Uprawnienie ważne do dnia
14.06.2009

Rys.106a. Świadectwo Egzaminu Spawacza – str. 1

Begriffe der Schweißer-Prüfungsbescheinigung in Englisch und Französisch

deutsch (D)	english (GB)	français (F)
1 Schweißer-Prüfungsbescheinigung	1 Welder Approval Test Certificate	1 Certificat de qualification du soudeur
2 Bezeichnung(en)	2 Designation(s)	2 Désignation(s)
3 Bescheinigungs-Nr	3 Certificate No	3 Certificat No
4 WPS	4 WPS	4 DMOS
5 Beleg-Nr	5 Reference No	5 Référence No
6 Name des Schweißers	6 Welder's Name	6 Nom du soudeur
7 Legitimation	7 Identification	7 Identification
8 Art der Legitimation	8 Method of identification	8 Méthode d'identification
9 Geburtsdatum und - ort	9 Date and place of birth	9 Date et lieu de naissance
10 Arbeitsgeber	10 Employer	10 Employeur
11 Vorschrift / Prüfnorm	11 Code / Testing Standard	11 Code / norme de qualification
12 Fachkunde (bestanden / nicht geprüft)	12 Job knowledge (Acceptable / Not tested)	12 Connaissances professionnelles (acceptées / non vérifiées)
13 Prüfstück - Geltungsbereich	13 Weld test details - Range of approval	13 Assemblage de qualification - Domaine de validité
14 Schweißprozess	14 Welding process	14 Procédé(s) de soudage
15 Blech oder Rohr	15 Plate or pipe	15 Tôle ou tube
16 Nahtart	16 Joint type	16 Type de joint
17 Werkstoffgruppe(n)	17 Material group(s)	17 Groupe(s) de matériaux
18 Schweißzusätze / Bezeichnung	18 Welding consumables / Designation	18 Produits consommables de soudage / Désignation
19 Schutzgas	19 Shielding gas	19 Gaz de protection
20 Hilfswerkstoffe	20 Auxiliaries	20 Auxiliaires de soudage
21 Werkstoffdicke	21 Material thickness	21 Épaisseur de matériau
22 Rohraußendurchmesser	22 Outside pipe diameter	22 Diamètre extérieur du tube
23 Schweißposition	23 Welding position	23 Position de soudage
24 Schweißnahteinzelheiten	24 Weld details	24 Détails concernant le soudage
25 Prüfungsart	25 Type of tests	25 Type de contrôle
26 ausgeführt und bestanden	26 Performed and accepted	26 Effectué et accepté
27 nicht gepruft	27 Not tested	27 Non vérifié
28 Sichtprufung	28 Visual testing	28 Contrôle visuel
29 Durchstrahlungsprüfung	29 Radiographic testing	29 Contrôle par radiographie
30 Bruchprüfung	30 Fracture testing	30 Essai de texture
31 Biegeprüfung	31 Bend test	31 Essai de pliage
32 Kerbzungrüfung	32 Notch tensile test	32 Essai de traction avec entaille
33 Makroskopische Untersuchungen	33 Macroscopic examination	33 Examen macroscopique
34 Name und Unterschrift des Prüfers Prüfstelle Datum des Schweißens Gültigkeitsdauer bis:	34 Name and signature of examiner Examining body Date of welding Validity of approval until:	34 Nom de l'examinateur et signature de l'organisme d'examen Date du soudage Validité de la qualification jusqu'au.
35 Verlängerung der Qualifizierung durch den Prüfer oder die Prüfstelle für die nächsten 2 Jahre / Bestätigung der Gütigkeit durch den Arbeitsgeber / die Schweißaufsichtsperson für die folgende 6 Monate	35 Prolongation for approval by examiner or examining body for the following 2 years / Prolongation for approval by employer / coordinator for the following 6 month	35 Confirmation de la qualification par l'examinateur ou l'organisme d'examen pour les 2 années suivantes / Confirmation de la validité par l'employeur / coordonnateur en soudage pour les 6 mois suivants
36 Datum / Unterschrift / Dienstellung oder Titel	36 Date / Signature / Position or title	36 Date / Signature / Fonction ou titre

35 Verlängerung der Prüfung durch den Prüfer oder die Prüfstelle für die nächsten 2 Jahre Przedłużenie ważności uprawnień przez egzaminatora lub jednostkę egzaminacyjną na następne 2 lata			**Bestätigung der Gültigkeit durch den Arbeitsgeber / die Schweißausichtsperson für die folgende 6 Monate** Przedłużenie ważności uprawnień przez pracodawcę / nadzór spawalniczy na następne 6 miesięcy		
36 Datum Data	**Unterschrift** Podpis	**Dienstellung oder Titel** Funkcja lub tytuł	**Datum** Data	**Unterschrift** Podpis	**Dienstellung oder Titel** Funkcja lub tytuł

Rys.106b. Świadectwo Egzaminu Spawacza – str. 2

Organizacja prac spawalniczych

W miejscach, w których wykonywane są wymienione roboty, nie można przechowywać materiałów łatwopalnych. Pracownicy powinni mieć zapewnioną możliwość szybkiego i bezpiecznego opuszczenia stanowisk pracy. W związku z tym sprzęt i przedmioty znajdujące się na stanowiskach należy rozmieścić tak, aby nie tarasowały przejść. Na każde stanowisko pracy przy tych robotach musi przypadać minimum 2 m^2 powierzchni podłogi. Wielkość ta ma obejmować tylko obszar wolny, który nie jest zajęty przez jakiekolwiek urządzenia czy sprzęty. Podłoga na stanowiskach spawalniczych powinna być zrobiona z niepalnego materiału.

Jeżeli prace spawalnicze prowadzone są na otwartej przestrzeni, to miejsca ich wykonywania należy zabezpieczyć przed działaniem czynników atmosferycznych, np. przed deszczem. Otoczenie powinno być zaś chronione przed promieniowaniem wywołanym przez płomień lub łuk elektryczny.

Wykonawca prac spawalniczych nie może rozpocząć wykonywania prac spawalniczych bez zgody właściciela, zarządcy lub użytkownika.

Przy pracach spawalniczych wykonywanych wewnątrz pomieszczeń, przy wykorzystaniu urządzeń elektrycznych, np. spawarek, zgrzewarek i przecinarek plazmowych powodujących ryzyko porażenia prądem, trzeba stosować środki ochronne w postaci chodnika i mat izolacyjnych itp. Źródło energii powinno być wówczas usytuowane na zewnątrz pomieszczenia.

Dodatkowe wymogi muszą spełniać spawalnie, czyli pomieszczenia bądź części pomieszczeń, w których znajdują się stałe stanowiska spawalnicze (przeznaczone do wielokrotnego wykonywania prac spawalniczych, na których na stałe umieszczone są potrzebne urządzenia). W spawalniach na każdą zatrudnioną w nich osobę ma przypadać minimum 15 m^3 wolnej objętości pomieszczenia. Muszą być one wyposażone w wentylację zapewniającą usuwanie zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia.

Wymagania techniczne spawalni

Wysokość pomieszczeń spawalni nie może być mniejsza od 3,75 m. Ścianki bądź parawany kabin spawalniczych powinny być wykonane z materiału niepalnego lub przynajmniej trudnopalnego i jednocześnie nieprzepuszczającego szkodliwego promieniowania świetlnego. Muszą mieć one wysokość co najmniej 2 m. Stałe stanowiska spawalnicze powinny też posiadać sprzęt umożliwiający bezpieczne wykonywanie prac, np. odpowiednie stoły.

Przepisy przeciwpożarowe i postępowanie w razie pożaru

Zgodnie z *Ustawą o ochronie przeciwpożarowej z 21.08.1991 r.* (Dz.U. 1991 nr 81 poz. 351 z późniejszymi zmianami) ochrona przeciwpożarowa polega na realizacji przedsięwzięć mających na celu ochronę życia, zdrowia, mienia lub środowiska przed pożarem, klęską żywiołową lub innym miejscowym zagrożeniem poprzez:

1) zapobieganie powstawaniu i rozprzestrzenianiu się pożaru, klęski żywiołowej lub innego miejscowego zagrożenia,
2) zapewnienie sił i środków do zwalczania pożaru, klęski żywiołowej lub innego miejscowego zagrożenia,
3) prowadzenie działań ratowniczych.

Zastosowanie gaśnic

Ze względu na rodzaj użytego środka gaśniczego gaśnice dzielimy na:

- P - proszkowa
- WP - wodno-pianowa
- S - śniegowa
- H - halonowa
- W - wodna (obecnie gaśnice z symbolem "W" są gaśnicami pianowymi)

Uzupełnienie symbolu gaśnicy stanowi informacja o ilości zastosowanego środka gaśniczego oraz informacja o grupach pożarowych materiałów palnych, które można gasić danym środkiem gaśniczym:

- A - ciała stałe
- B – ciecze
- C – gazy
- D – metale

Gaśnica proszkowa:

W zależności od typu (BC,ABC, inne) gaszenie rozlanych cieczy palnych, urządzeń i maszyn elektrycznych pod napięciem, silników spalinowych i pojazdów mechanicznych, ciał stałych, np. tkaniny, drewno,... Ze względu na możliwość gaszenia urządzeń elektrycznych pod napięciem, dysza powinna być wykonana z materiałów nie przewodzących prądu. Skuteczna w gaszeniu, ale w procesie gaszenia może powstać HCl, bardzo szkodliwy dla urządzeń i kabli elektrycznych.

Gaśnica pianowa:

gaszenie cieczy palnych, z mniejszą skutecznością ciał stałych, np. tkanin, drewna,... Starego typu gaśnica pianowa (wyposażona w zbijak) stopniowo wycofywana jest z użycia. Jej zasadniczą wadą jest brak możliwości zatrzymania wypływu środka gaśniczego, brak wskaźnika oraz niewygodne użycie. Zastępowana jest przez nowsze gaśnice pianowe z kierowanym strumieniem piany lub inne typy gaśnic. **Nie wolno** nimi gasić urządzeń elektrycznych - woda będzie przewodzić prąd i powodować porażenie, jeśli nawet nie samej osoby gaszącej, która może trzymać gumowy wąż i być odizolowana od strumienia, to osób towarzyszących, gdyż rozlewa się po ziemi.

Gaśnica halonowa:

bardzo skuteczna w gaszeniu urządzeń i maszyn elektrycznych pod napięciem, bez szkodliwych dla nich następstw (ale szkodliwa dla środowiska, w związku z tym stopniowo wycofywane. Ten typ gaśnic stosuje się często do ochrony kosztownego sprzętu elektrycznego.

Agregaty gaśnicze to z kolei duże gaśnice zamontowane na kółkach, ze względu na swój ciężar np. 2 x 25 kg. Występują zarówno proszkowe, jaki i śniegowe i pianowe agregaty.

Istotne jest oczywiście, aby gaśnice były w każdej chwili dostępne (nie pozamykane w schowku, bądź zastawione paletą z towarem), aby pracownicy byli odpowiednio przeszkoleni w użyciu sprzętu gaśniczego.

Podstawowe zagrożenia i ich wpływ na organizm

Podstawowe zagrożenia, jakie występują podczas wykonywania prac spawalniczych to:

- zagrożenia pyłowe i gazowe,
- promieniowanie łuku spawalniczego,
- hałas,
- pole elektromagnetyczne

Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe wytwarzane w trakcie procesu spawania oraz cięcia termicznego są szkodliwymi związkami dla zdrowia wykonującego prace spawalnicze. Powstający w procesach spawalniczych dym spawalniczy jest mieszaniną drobnodyspersyjnych cząstek stałych (pyłów spawalniczych) oraz gazów.

W tabeli 37 zestawiono wykaz czynników chemicznych wiodących w ocenie ryzyka dla zdrowia przy wybranych procesach spawalniczych, natomiast w tabeli 38 *najwyższe dopuszczalne stężenia NDS* oraz wpływ na organizm człowieka niektórych składników występujących w dymach spawalniczych.

Promieniowanie łuku spawalniczego stanowi poważne zagrożenie zdrowia spawaczy oraz osób pracujących w pobliżu stanowisk spawalniczych. W wysokiej temperaturze plazmy łuku spawalniczego jest emitowane bardzo intensywne promieniowanie nadfioletowe, widzialne oraz termiczne.

Zawodowe choroby oczu spawaczy mogą być spowodowane brakiem dostatecznego zabezpieczenia oczu podczas zajarzania łuku lub promieniowania łuku z sąsiednich stanowisk spa-

walniczych. Ograniczenie tych chorób można uzyskać przez stosowanie właściwych ochron osobistych i parawanów.

Tabela 37. Zestawienie czynników chemicznie wiodących w ocenie ryzyka dla zdrowia w procesach spawalniczych

Proces technologiczny	Materiał podstawowy	Czynnik chemicznie wiodący
Spawanie gazowe	Stale niestopowe i niskostopowe	Tlenek azotu
Spawanie ręczne elektrodą otuloną	Stale niestopowe i niskostopowe	Pył całkowity
MAG w osłonie mieszanek gazowych	Stale niestopowe i niskostopowe	Pył całkowity, tlenek węgla
Cięcie termiczne-tlenowe	Stale niestopowe i niskostopowe	Pył całkowity, dwutlenek azotu
Cięcie plazmowe	Stale niestopowe i niskostopowe	Pył całkowity, dwutlenek azotu
	aluminium	Pył całkowity, ozon

Tabela 38. Oddziaływanie toksyczne niektórych składników występujących w dymach spawalniczych oraz normatywy higieniczne

Pierwiastek	Wpływ na organizm człowieka	NDS [mg/m^3]
Tlenki azotu (NO_x)	Tlenki azotu działają drażniąco i dusząco na układ oddechowy, w zatruciach ostrych wywołują obrzęk płuc, przy zatruciach przewlekłych powodują spadek ciśnienia tętniczego, zmiany patologiczne krwi oraz rozedmę płuc	5
Tlenek węgla (CO)	Tlenek węgla powoduje ostre zatrucia przez drogi oddechowe. W pomieszczeniach zamkniętych i przy dużej ilości CO w powietrzu już po kilku głębokich oddechach może nastąpić śmierć wskutek ostrej niewydolności krążenia, tzw. zatrucie błyskawiczne	30
Ozon (O_3)	Ozon należy do najbardziej toksycznych gazów. W stężeniu powyżej 0,2 mg/m^3 działa w sposób silnie drażniący układ oddechowy, wywołuje kaszel, obrzęki gardła oraz dotkliwe bóle w klatce piersiowej. Powtarzająca się ekspozycja na wyższe stężenie ozonu prowadzi do zmian w płucach łącznie z obrzękiem płuc, silnego bólu głowy, spadku ciśnienia krwi.	0,15

Hałas jest najczęściej spotykanym w środowisku pracy czynnikiem fizycznym działającym na człowieka, jest zjawiskiem negatywnym, definiowanym jako *każdy niepożądany i przeszkadzający dźwięk otoczenia.*

Hałas towarzyszy procesom spawania i cięcia termicznego metali i jego głównym źródłem jest strumień gazu wypływający z dyszy palnika spawalniczego, gazowego lub plazmowego, urządzenie spawalnicze oraz sam proces spawania lub cięcia. Intensywność hałasu w procesach spawania w osłonie gazów rośnie z natężeniem prądu spawania. Poziom ekspozycji na hałas na stanowiskach cięcia termicznego z reguły przekracza wartość 100 dB(A). W przypadku cięcia tlenowego natężenie hałasu rośnie z natężeniem przepływu gazów tnących i grubością ciętego materiału. *Występujący podczas cięcia plazmowego hałas zależy od wielkości palnika, natężenia prądu, ilości i rodzaju gazu plazmowego, grubości ciętego materiału oraz stosowanej techniki cięcia. Zastosowanie cięcia pod lustrem wody umożliwia ograniczenie hałasu do poziomu wartości dopuszczalnych.*

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy nie powinien przekraczać wartości 85 dB.

Pole elektromagnetyczne Spawacze są jedną z grup pracowników, którzy są narażeni na najwyższą intensywność pola elektromagnetycznego, a w szczególności pola magnetycznego. Spawanie łukowe niejednokrotnie wymaga stosowania dużych prądów. Sprzęt i wyposażenie spawalnicze, szczególnie przewody, znajdują się często w bezpośrednim kontakcie z ciałem spawacza. Duża część procesów spawalniczych jest wykonywana prądem stałym, który w

mniejszym stopniu wpływa na ryzyko zagrożenia. Obecnie coraz większe znaczenie w procesach spawalniczych mają metody, w których wykorzystuje się prądy przemienne i stałe pulsacyjne, kształtowane przez urządzenia z wewnętrzną przemianą częstotliwości. Pojawiają się wtedy pola impulsowe oraz zagadnienia elektromagnetyczne związane ze stanami przejściowymi (dynamicznymi). Na silne pole magnetyczne oprócz spawaczy są narażeni pracownicy, którzy znajdują się w pobliżu stanowisk spawalniczych. Pola magnetyczne powstające w czasie pracy zgrzewarek oporowych są polami zmiennymi o charakterze impulsowym, o dużych wartościach natężeń.

Zasady ochrony przed zagrożeniami
Ochrona przed pyłami i gazami spawalniczymi:

a) wentylacja miejscowa (urządzenia filtrowentylacyjne),
b) wentylacja ogólna (nawiewno-wywiewna).

Ochrona przed promieniowaniem łuku spawalniczego:

a) stosowanie środków ochrony oczu i twarzy (rys. 108)
   - okulary ochronne,
   - gogle spawalnicze,
   - tarcze spawalnicze,
   - przyłbice spawalnicze

   wraz z elementami przeziernymi (optycznymi filtrami i szybkami ochronnymi).

Rys.108. Środki ochrony oczu

Przy spawaniu łukiem elektrycznym lub elektrożłobieniu, cięciu tlenem lub strumieniem plazmy używa się przede wszystkim przyłbic spawalniczych, tarcz spawalniczych, a w niektórych przypadkach kapturów spawalniczych (zwanych również okularowymi osłonami spawalniczymi).

Zasady doboru filtrów spawalniczych przedstawiono w tabeli 39, 40 i 41.

b) odzież ochronna
   - ubrania robocze,
   - kombinezony,
   - fartuchy,
   - rękawice
   - buty

Ochrona przed hałasem

W celu ochrony człowieka przed szkodliwym działaniem hałasu w miejscu pracy należy stosować *techniczne środki zmniejszające poziom natężenia hałasu* oraz podjąć *działania organizacyjne zmierzające do ograniczenia narażenia pracowników na hałas*.

Do najczęściej stosowanych rozwiązań technicznych należą:

- modyfikacja stosowanych technologii lub zastosowanie cichszych technologii, np. zastosowanie cięcia plazmowego pod lustrem wody, zmiana gazu plazmowego,
- stosowanie obudowy stanowisk lub ekranów dźwiękochłonnych,

- adaptacja akustyczna przez wykładanie ścian i sufitów hal przemysłowych materiałami tłumiącymi,
- stosowanie tłumików hałasu, w instalacjach wentylacyjnych,
- likwidacja zbędnych źródeł hałasu.

Tabela 39. Dobór filtrów do spawania łukiem elektrycznym i spawania mikroplazmowego oraz elektrożłobienia i cięcia strumieniem plazmy przy użyciu łuku

Proces spawania lub technik pokrewnych	Natężenie prądu [A] - stopień ochrony filtru
Elektrody otulone	(20-40)- 9; (40-80) - 10; (80-175) - 11; (175-300) - 12; (300-500) - 13; (>500) - 14
MIG metali ciężkich	(80-100) - 10; (100-175) - 11; (175-300) - 12; (300-500) - 13; (>500) - 14
MIG stopów lekkich	(80-100) - 10; (100-175) - 11; (175-250) - 12; (250-350) - 13; (350-500) - 14 (>500) - 15
TIG wszystkich metali i stopów	(2-20) - 9; (20-40) - 10; (40-100) - 11; (100-175) - 12; (175-250) - 13; (250-400) - 14
MAG	(40-80) - 10; (80-125) - 11; (125-175) - 12; (175-300) - 13; (300-450) - 14; (>450) - 16
Żłobienie elektropowietrzne	(125-175) - 10; (175-225) - 11; (225-275) - 12; (275-350) - 13; (350-450) - 14; (>450) - 15
Cięcie strumieniem plazmy	(60-150) - 11; (150-250) - 12; (250-400) - 13
Spawanie mikroplazmowe	(0,1-0,4) - 3; (0,4-0,6) - 4; (0,6-1) - 5; (1-2,5) - 6; (2,5-5) - 7; (5-10) - 8; (10-15) - 9; (15-30) - 10; (30-60) - 11; (60-125) - 12; (125-225) - 13; (225-450) - 14; (>450) - 15

Tabela 40. Oznaczenia filtrów stosowanych podczas spawania gazowego i lutowania

Proces	Strumień objętości acetylenu q [l/h]			
	q ≤ 70	70 < q ≤ 200	200 < q ≤ 800	q > 800
Spawanie gazowe Lutowanie metali ciężkich	4	5	6	7
Spawanie z użyciem emitujących topników (szczególnie stopów metali lekkich)	4a	5a	6a	7a

Tabela 41. Oznaczenia filtrów stosowanych przy cięciu tlenowym

Proces	Strumień objętości acetylenu q [l/h]		
	900 < q ≤ 2000	2000 < q ≤ 4000	4000 < q ≤ 8000
Cięcie tlenowe	5	6	7

Do grupy działań organizacyjnych należy zaliczyć:

- skracanie czasu narażenia pracownika na hałas,
- rozlokowanie źródeł hałasu i stanowisk pracy,
- tworzenie stref ciszy przez wyizolowanie ich ściankami dźwiękochłonnymi,
- stosowanie ochronników słuchu,
- oznakowanie stref hali i stanowisk pracy zagrożonych hałasem.

Pole elektromagnetyczne

Metody ograniczania wpływu pól elektromagnetycznych na zdrowie pracowników

A) organizacja pracy i stanowisk pracy:

- w strefie zagrożenia należy ograniczać czas ekspozycji przez stosowanie rotacji pracowników lub skracanie czasu pracy,
- tak projektować rozmieszczenie źródeł pola, by nie wpływały one na pracowników wykonujących pracę nie związaną z eksploatacją tych źródeł,
- stosować ekrany i osłony,
- efektywnie i możliwie krótko korzystać z pełnej mocy wyjściowej urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne.

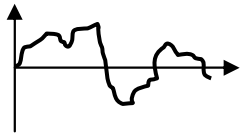
B) dobór odpowiednich urządzeń:

- ekranować części urządzeń wytwarzających pola, a nie wymagające bezpośredniego dostępu pracowników w trakcie trwania procesu technologicznego,
- wyposażać urządzenia wytwarzające pola w odpowiednie zautomatyzowane sterowanie, pulpity sterownicze znajdujące się w strefie bezpiecznej,
- producenci powinni dostarczać wraz z urządzeniami wyniki pomiarów natężeń pól oraz stref ochronnych wynikających z typowych zastosowań tych urządzeń, ułatwi to właściwe rozmieszczenie źródeł pól.

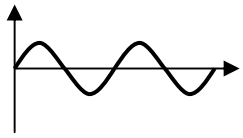
13. PYTANIA TESTOWE

1. Prawo Ohma to zależność:
   a) I=U/R, U=IxR, R=U/I,
   b) I=UxR, U=I/R, R=I/U,
   c) I=R/U, U=R/I, R=IxR.

2. Na rysunku poniżej przedstawiono
   a) wykres prądu zmiennego,
   b) wykres prądu przemiennego,
   c) wykres prądu stałego.



3. Na rysunku poniżej przedstawiono
   a) wykres prądu zmiennego,
   b) wykres prądu przemiennego,
   c) wykres prądu stałego.



4. Moc prądu przemiennego wynosi:
   a) P=U I cosφ,
   b) P= $\sqrt{3}$ U I cosφ,
   c) P=U I.

5. W procesie spawania:
   a) materiał rodzimy ulega stopieniu,
   b) nie stosowany jest docisk,
   c) można stosować spoiwa.

6. Metal części łączonych w procesie spawania nazywamy:
   a) materiałem dodatkowym,
   b) spoiwem,
   c) materiałem rodzimym.

7. Spawanie MAG polega na:
   a) łączeniu metalu za pomocą elektrody topliwej,
   b) ochronie jeziorka gazami obojętnymi,
   c) ochronie jeziorka gazami aktywnymi.

8. Spawanie TIG polega na:
   a) łączeniu metalu za pomocą elektrody nietopliwej,
   b) łączeniu metalu za pomocą elektrody topliwej,
   c) ochronie jeziorka gazami obojętnymi.

9. Oznaczenie numeryczne 111 oznacza:
   a) spawanie łukowe elektrodą nietopliwą,
   b) spawanie łukiem krytym,
   c) spawanie łukowe elektrodą otuloną.

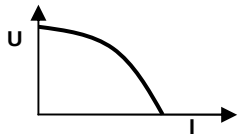
10. Oznaczenie numeryczne 135 oznacza:
    a) spawanie w osłonie gazu obojętnego elektrodą topliwą,
    b) spawanie w osłonie gazu aktywnego elektrodą topliwą,
    c) spawanie łukowe elektrodą otuloną.

11. Charakterystyka statyczna łuku spawalniczego to:
    a) zależność napięcia łuku w czasie,
    b) zależność natężenia prądu w czasie,
    c) zależność napięcia w funkcji natężenia prądu.

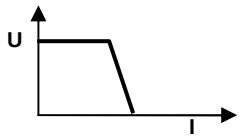
12. Ugięcie łuku spawalniczego:
    a) występuje podczas spawania prądem stałym,
    b) jest niezależne od natężenia prądu spawania,
    c) zależy od natężenia prądu spawania.

13. Elastyczność łuku spawalniczego:
    a) jest zjawiskiem niekorzystnym,
    b) to zdolność wydłużania się bez obawy zgaśnięcia,
    c) nie zależy od rodzaju otuliny

14. Na rysunku poniżej przedstawiono charakterystykę źródła prądu:
    a) statyczną opadającą,
    b) zewnętrzną stałoprądową,
    c) statyczną wznoszącą się.



15. Na rysunku poniżej przedstawiono charakterystykę źródła prądu:
    a) statyczną opadającą,
    b) zewnętrzną stałoprądową,
    c) statyczną wznoszącą się.



16. Napięcie biegu jałowego źródła prądu to:
    a) napięcie przy otwartym obwodzie spawania,
    b) napięcie, gdy prąd spawania ma wartość zerową,
    c) napięcie na zaciskach wejściowych źródła.

17. Transformator spawalniczy:
    a) obniża napięcie i podwyższa natężenia prądu,
    b) podwyższa napięcie i obniża natężenia prądu,
    c) obniża napięcie i natężenie prądu.

18. Przekładnię transformatora spawalniczego określa wzór:
    a) U_1/U_2,
    b) Z_1/Z_2,
    c) U_1/Z_1.

19. Prostowniki spawalnicze służą do spawania:
    a) prądem stałym,
    b) prądem przemiennym,
    c) prądem stałym i przemiennym.

20. Funkcja gorącego zajarzania łuku w źródłach prądu:
    a) obniża automatycznie napięcie w chwili zajarzania,
    b) podwyższa automatycznie prąd w obwodzie spawania,
    c) zwiększa automatycznie prędkość spawania.

21. Funkcja przeciwdziałająca przyklejaniu się elektrody w źródłach prądu:
    a) obniża automatycznie prąd w obwodzie spawania,
    b) podwyższa automatycznie prąd w obwodzie spawania,
    c) zwiększa automatycznie prędkość spawania.

22. Funkcja automatycznego wyłączenia zasilania źródła prądu powinna zadziałać:
    a) przy przerwach w spawaniu dłuższych niż 8 min.,
    b) przy przerwach w spawaniu dłuższych niż 1 min.,
    c) przy przerwach w spawaniu dłuższych niż 3 min.,

23. Przetwornice spawalnicze składają się z:
   a) silnika napędowego i prądnicy spawalniczej,
   b) silnika prądu stałego i transformatora spawalniczego,
   c) silnika i transformatora spawalniczego.

24. Prostowniki inwertorowe:
   a) wykorzystują wewnętrzną przemianę częstotliwości,
   b) są znacznie lżejsze od źródeł tradycyjnych,
   c) pozwalają na spawanie prądem stałym.

25. Regulacja prądu spawania na stanowisku spawalniczym w prostownikach wielostanowiskowych odbywa się:
   a) za pomocą rezystorów spawalniczych
   b) za pomocą uchwytu spawalniczego,
   c) w rozdzielni elektrycznej.

26. Żelazo to:
   a) stop z węglem poniżej 2,06%
   b) pierwiastek metaliczny,
   c) stop z węglem powyżej 2,06%

27. Stal to:
   a) stop żelaza z węglem po obróbce plastycznej o zawartości C powyżej 2,06%,
   b) stop żelaza z węglem po obróbce plastycznej o zawartości C poniżej 2,06%,
   c) stop z węglem powyżej 2,06%.

28. Staliwo to:
   a) stop żelaza z węglem o zawartości C poniżej 2,06%,
   b) stop żelaza z węglem po obróbce plastycznej o zawartości C poniżej 2,06%,
   c) stop żelaza z węglem o zawartości C powyżej 2,06%.

29. Zawartość węgla w stali:
   a) nie wpływa na jej własności,
   b) zwiększa wytrzymałość na rozciąganie R_m,
   c) obniża spawalność stali.

30. Dobrze spawalne stale zawierające:
   a) poniżej 0,25%C,
   b) poniżej0,35%C,
   c) powyżej 0,25%C.

31. Równoważnik węgla C_e określa:
   a) wpływ dodatków stopowych na spawalność stali,
   b) wpływ dodatków stopowych na plastyczność stali,
   c) wpływ dodatków stopowych na wytrzymałość stali.

32. Na spawalność stali wpływa:
   a) zawartość składników stopowych,
   b) zawartość węgla,
   c) grubość spawanych elementów.

33. Symbol S235J2 oznacza:
   a) stal konstrukcyjną o R_e min. 235 MPa,
   b) stal konstrukcyjną o R_m min. 235 MPa,
   c) stal konstrukcyjną o R_e max. 235 MPa.

34. Stal St3S to stal:
   a) niestopowa,
   b) stopowa,
   c) wysokostopowa.

35. Złącze spawane obejmuje:
   a) spoinę, strefę wpływu ciepła i materiał rodzimy,
   b) strefę wpływu ciepła i materiał rodzimy,
   c) spoinę i materiał rodzimy.

36. W strefie wpływu ciepła występuje:
   a) zwiększenie twardości,
   b) wypalanie się składników stopowych,
   c) nie występują żadne zmiany.

37. Symbol ER 146 oznacza elektrodę:
   a) zasadową o R_m min. 460 MPa,
   b) rutylową o R_m min. 460 MPa
   c) rutylową o R_e min. 460 MPa

38. Symbol EB 146 oznacza elektrodę:
   a) zasadową o R_m min. 460 MPa,
   b) rutylową o R_m min. 460 MPa,
   c) zasadową o R_m max. 460 MPa.

39. Elektrody rutylowe przed spawaniem należy:
   a) suszyć przed spawaniem w tem. 120^0C/1h
   b) suszyć przed spawaniem w tem. 300^0C/1h
   c) suszyć przed spawaniem w tem. 300^0C/2h

40. Elektrody zasadowe przed spawaniem należy:
   a) suszyć przed spawaniem w tem. 120^0C/1h,
   b) suszyć przed spawaniem w tem. 300^0C/1h,
   c) suszyć przed spawaniem w tem. 300^0C/2-3h.

41. Otuliny elektrod:
   a) ułatwiają zajarzanie łuku,
   b) wprowadzają do spoiny dodatki stopowe,
   c) tworzą żużel chroniący spoinę przed dostępem powietrza.

42. Do parametrów spawania zaliczamy:
   a) rodzaj i natężenia prądu spawania,
   b) napięcie łuku,
   c) granicę plastyczności stali.

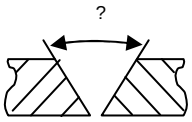
43. Natężenie prądu spawania:
   a) wpływa na głębokość wtopienia,
   b) nie ma wpływu na głębokość wtopienia,
   c) wpływa na prędkość stapiania.

44. Natężenie prądu spawania:
   a) dobiera się w zależności od średnicy elektrody,
   b) zależy od pozycji spawania,
   c) zależy od grubości spawanych elementów.

45. W pozycjach przymusowych należy:
   a) zmniejszyć natężenie prądu spawania,
   b) zwiększyć natężenie prądu spawania,
   c) należy spawać parametram, jak w pozycji podolnej.

46. Odkształcenia spawalnicze ogranicza się, stosując:
   a) przeciwodkształcenia przed spawaniem,
   b) sztywne mocowanie w przyrządach,
   c) odpowiednią kolejność spawania.

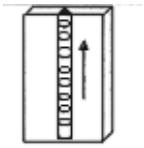
47. Kąt zaznaczony na rysunku to?
   a) kąt ukosowania,
   b) kąt rowka,
   c) gardziel rowka.



48. Wyżarzanie odprężające polega na :
   a) usuwaniu naprężeń spawalniczych w temp. $600\text{-}650^0$C,
   b) usuwaniu naprężeń spawalniczych w temp. 750^0C,
   c) usuwaniu naprężeń spawalniczych w temp. $800\text{-}850^0$C,

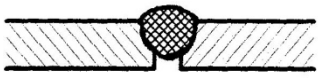
49. Do pokazania i zwymiarowania czego na rysunku technicznym stosuje się oznaczenie a ◺nxl?
   a) spoiny otworowej,
   b) spoiny czołowej odcinkowej,
   c) spoiny pachwinowej odcinkowej.

50. Jakie jest oznaczenie spoiny na rysunku?
   a) PB,
   b) PF,
   c) PC.



51. Jak często przeprowadzane są kontrole sprzętu spawalniczego w KWB „Bełchatów"?
   a) raz w roku,
   b) raz na 6 miesięcy,
   c) wystarczy kontrola przez spawacza.

52. Określ rodzaj wady:
   a) brak przetopu spoiny jednostronnej,
   b) wyciek grani spoiny,
   c) nadmierny nadlew lica.

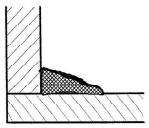


53. Jak długo ważne są uprawnienia spawacza uzyskane przez zdany egzamin spawacza wg EN 287?
   a) 1 rok,
   b) 2 lata,
   c) dożywotnio.

54. Normy europejskie EN przewidują następujące poziomy jakości spoin:
   a) A,B,C,D,E,
   b) B, C, D,
   c) C, D, E.

55. Jaka powinna być charakterystyka źródeł prądu do spawania metodą 111?
   a) płaska,
   b) stromo opadająca,
   c) sztywna.

56. Jaką wadę ilustruje rysunek?
   a) brak przetopu,
   b) nierównomierność spoiny pachwinowej,
   c) wypukłość spoiny pachwinowej.



57. Powyżej jakiej granicy natężenia dźwięku konieczne jest używanie ochronników słuchu?
   a) 75dB,
   b) 95dB,
   c) 85dB.

58. Z jakich stali wykonane są elektrody do spawania stali niskowęglowych?
   a) z dowolnego materiału,
   b) ze stali wysokostopowych,
   c) ze stali niskostopowych.

59. Która z wymienionych metod badań jest metodą niszczącą?
   a) ultradźwiękowa,
   b) penetracyjna,
   c) metalograficzna.

60. Czym można gasić urządzenia elektryczne?
   a) wodą,
   b) dwutlenkiem węgla (gaśnica śniegowa),
   c) pianą (gaśnica pianowa).

61. Podgrzewanie wstępne przed spawaniem stosuje się w celu:
   a) zwiększenia twardości w SWC,
   b) zmniejszenia ryzyka występowania pęknięć wodorowych,
   c) obniżenia naprężeń wewnętrznych.

62. Temperatura podgrzewania wstępnego zależy od:
   a) zawartości węgla w spawanym materiale,
   b) grubości spawanych elementów,
   c) rodzaju otuliny zastosowanej elektrody.

63. Dla stali niskowęglowych temperatura podgrzewania wstępnego wynosi:
   a) 100 – 200^{0}C,
   b) 200 – 350^{0}C,
   c) 600 – 650^{0}C,