

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
Wydział Nowych Technologii i Chemii
KATEDRA ZAAWANSOWANYCH MATERIAŁÓW I TECHNOLOGII

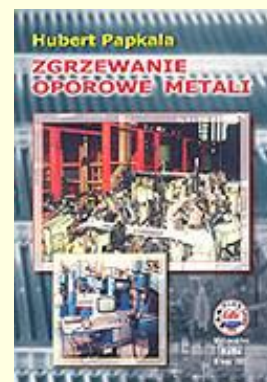
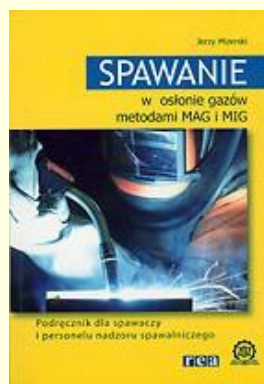
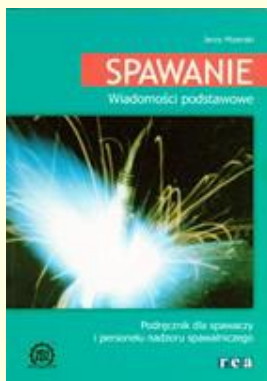
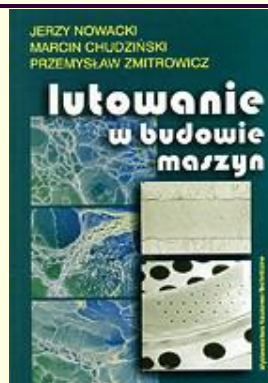
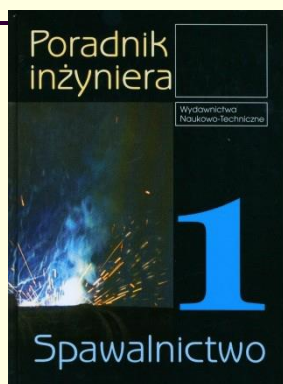
Metody termicznego spajania metali - spawanie, lutowanie i zgrzewanie

W 5:

- Podstawy teoretyczne procesu spajania
- Metody spajania metali
- Technologia spajania

Opracował: *dr inż. Radosław Łyszkowski*

Literatura



- J. Sobieszkański, Spajanie, OW PW, 2004, W-wa,
- K. Ferenc i in. Spawalnictwo, OW PW, Warszawa, 1999

Procesy spajania

Spajanie polega na trwałym łączeniu oddzielnych elementów w jedną monolityczną całość. Rozdzielenie tak połączonych części nie jest możliwe bez ich zniszczenia. Trwałe połączenie zostanie osiągnięte, jeżeli powstaną wiązania atomowo-molekularne między łączonymi elementami.

W praktyce rozróżnia się następujące grupy procesów spajania:

Spawanie – doprowadzona energia cieplna powoduje nadtopienie materiału rodzimego i topienie spoiwa (za wyjątkiem spawania laserowego i TIG),

Zgrzewanie – połączenie następuje najczęściej pod wpływem siły docisku i energii cieplnej,

Lutowanie – wprowadza się stopione spoiwo (lut) między łączone elementy (powierzchnie), przy czym materiał rodzimy łączonych elementów nie jest nadtapiany,

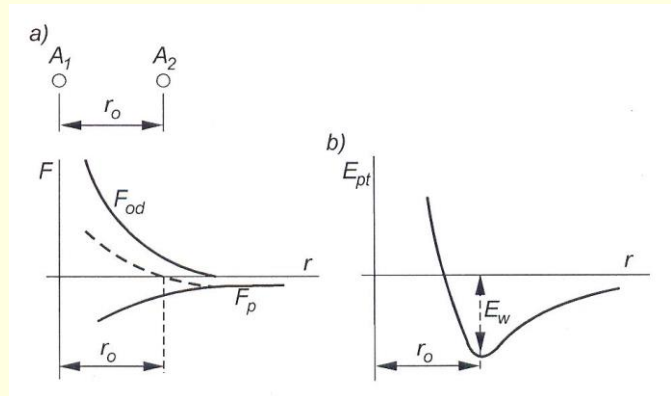
Klejenie – wprowadza się między łączone powierzchnie warstwę kleju, mającego duże zdolności do tworzenia wiązań adhezyjnych w temperaturze otoczenia.



Podstawy fizyczne

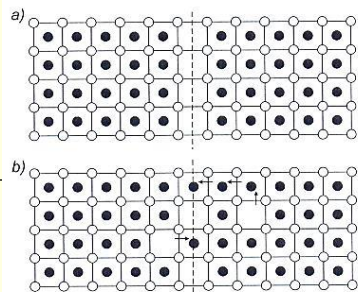
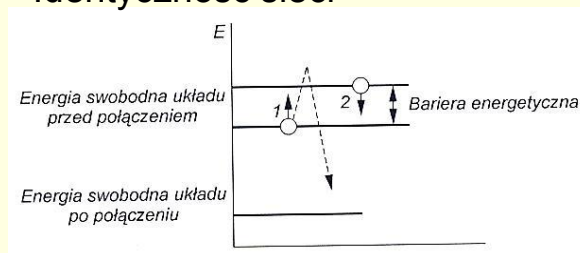
Stan skupienia ciał stałych utrzymywany jest przez wiązania międzyatomowe (metaliczne, jonowe, kowalencyjne, molekularne). Zależność sił działających na atom i energii potencjalnej atomu od odległości międzyatomowej

Aby uzyskać trwałe połączenie oddalonych od siebie atomów A_1 i A_2 nie zawsze wystarczy odpowiednio zbliżyć je do siebie. Atomy muszą mieć zdolność do stworzenia wiązań międzyatomowych.

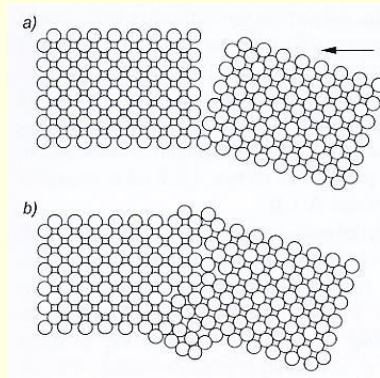


Przykłady trwałego połączenia dwu kryształów

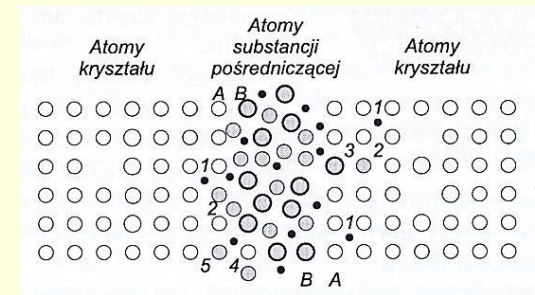
Identyczność sieci



Dyfuzja



Pod wpływem siły nacisku



Poprzez ciało pośredniczące

SPAWANIE

W budowie maszyn efektywne sposoby łączenia rozwinęły się w IX i XX wieku.

Wcześniej sławę zdobyły zaawansowane sposoby zgrzewania stali, jak stal damasceńska, czy też miecze japońskie.

Dla rozwoju spajania ważne były, m.in. takie odkrycia jak:

- otrzymywanie tlenu i wodoru,
- wynalezienie palnika wodorowo-tlenowego (1802),
- odkrycie acetylenu i później palnika acetylenowo-tlenowego (1901)
- odkrycie łuku elektrycznego przez Rosjanina i polskiego inżyniera S.Olszewskiego w 1882r.
- opracowanie przez Kleiberga (Szwecja) w 1908r. spawania elektrodą otuloną
- 1929r. prof. S. Bryła zaprojektował pierwszy w Europie most drogowy spawany elektrycznie na rzece Słudwi

Koniec XX w. To bardzo burzliwy rozwój nowych metod spawania i zgrzewania (laserowe, elektronowe itd.)



Spawalnictwo

SPAWALNICTWO – otrzymywanie metodami termicznymi połączeń nierozłącznych, trwale zespolonych, stanowiących jedną całość dwóch lub więcej elementów.

Techniki termicznego procesu spajania wynikają z rodzaju i charakteru źródła ciepła i wiążą się głównie z rozwojem spawalnictwa:

- 1900r. - Francuzi Picard i Fouche zapalają palnik acetylenowo-tlenowy
- 1905r. - Fouche wprowadza metodę spawania płomieniowego)

Rozwój i nazwa technologii spawalnictwa, wiąże się z rodzajem i charakterem stosowanych źródeł energii cieplnej:

- **płomień gazowy** (spawanie gazowe)
- **łuk elektryczny** (łukowe lub elektryczne)
- **strumień plazmy** (plazmowe)
- **strumień elektronów** (elektronowe)
- **strumień fotonów** (laserowe)

W zakres technologii spajania wchodzi również:

- **zgrzewanie**
- **łutowanie**
- lutospawanie
- napawanie
- cięcie termiczne
- metalizowanie
- napylanie



Spawalność

Spawalność jest to zbiór cech materiałowych, konstrukcyjnych i technologicznych, określających zdolność do formowania połączeń spawanych

Uwarunkowania

- konstrukcyjne (typ i wielkość konstrukcji)
- technologiczne (metoda, spoiwo, moc, szybkość spawania)
- metalurgiczne (skład chemiczny, metoda wytopu, zanieczyszczenie, struktura)

Stal i staliwo

Największy wpływ na spawalność stali i staliw ma procentowa zawartość węgla. Również inne pierwiastki mogą wywierać niekorzystny wpływ. Dlatego wyznacza się tzw. **ekwiwalentną zawartość węgla**:

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Stale dzielimy na:

- łatwo spawalne ($<0.2\%$ C i $C_e < 0.4$ – nie wymagają żadnych zabiegów;
- średnio spawalne ($0.2 \div 0.35\%$ C i $C_e < 0.5$ - wymagają podgrzewania i późniejszego odprężania;
- trudno spawalne ($\sim 0.4 \div 0.6\%$ C i $C_e < 0.7\%$ - wymagają podgrzewanie $\sim 400^\circ\text{C}$ + wyżarzanie normalizujące
- niespawalne ($>0.6\%$ C i $C_e > 0.7\%$).

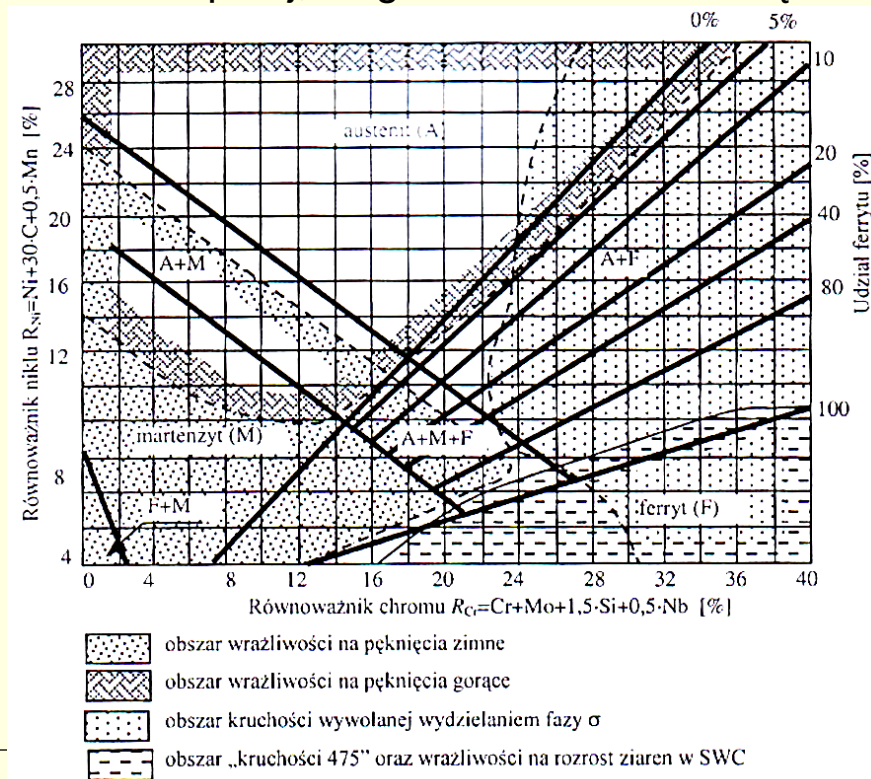
Spawalność różnych stali

Stale niestopowe konstrukcyjne ogólnego przeznaczenia (0.17-0.24 %C) są dobrze spawalne wszystkimi metodami.

Stale niestopowe do utwardzania powierzchniowego i **ulepszania** cieplnego (0.1-0.65 %C) zawierają Mn Si i konieczna jest analiza **Ce** uwzględniająca grubości blachy; stale 10-25 uważane są za dobrze spawalne, 30-40 wymagają wstępnego podgrzewania i dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej, a gatunki 45-65 nie są przeznaczone do spawania.

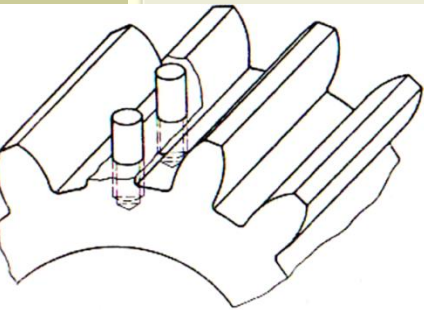
Stale niestopowe o podwyższonej wytrzymałości wymagają podgrzewania max. 100 °C, uwaga na wodór.

Stale konstrukcyjne stopowe do ulepszania cieplnego – są to stale stosowane na odpowiedzialne części maszyn; zawierają dodatki Cr, Ni, Mo i V (podnoszą one hartowność); spawamy je tylko w konieczności; stale te muszą być podgrzewane do 500 °C; spawa się głównie łukiem elektrodą otuloną zasadową lub austenityczną.



Spawalność stopów nieżelaznych

Stale wysokostopowe (0.12-0.2 %C) – stale austenityczne są dobrze spawalne, stale ferrytyczne i martenzytyczne mają ograniczoną spawalność i wymagają podgrzewania przed spawaniem i wyżarzania po spawaniu.



Żeliwa – trudno spawalne ze względu na: obecność grafitu, temperaturę topnienia, niskie przewodnictwo cieplne, dużą rzadkość, kruchość, wysoki równoważnik węgla. Stosowane głównie jako metoda naprawy pęknięć. Spawane elementy należy podgrzewać do 650-700 °C i spawać gazowo lub łukiem spoiwem żeliwnym.

Aluminium i jego stopy – materiały te uznawane są spawalne, mimo: dużego powinowactwa ciekłego Al do tlenu (tworzy trudno topliwe tlenki Al_2O_3), wysokiej przewodności cieplnej, dużego współczynnika rozszerzalności cieplnej i dużego skurczu. Spawamy metodą MIG lub TIG. Elementy podgrzewa się do 150-300 °C.

Miedź i jej stopy – uważane są za trudno spawalne ze względu na: duże przewodnictwo cieplne, dużą rozszerzalność cieplną i duży skurcz, duże powinowactwo do tlenu i wodoru w podwyższonej temperaturze. Spawamy metodą gazową, łukiem elektrodą otuloną, **TIG**, **MIG** oraz wiązką elektronową. Spawamy prądem stałym z biegunowością normalną lub odwrotną.

Brązy są łatwiej spawalne niż sama miedź. Spawamy je elektrodą otuloną, TIG, MIG.

Mosiądze są stopami bardzo trudno spawalnymi ze względu na zawartość cynku.

Pękanie na gorąco złączy spawanych

Pękanie połączeń spawanych zachodzi, jeżeli w złączy występują **naprężenia** oraz czynniki zmniejszające zdolności materiału do przenoszenia naprężeń.



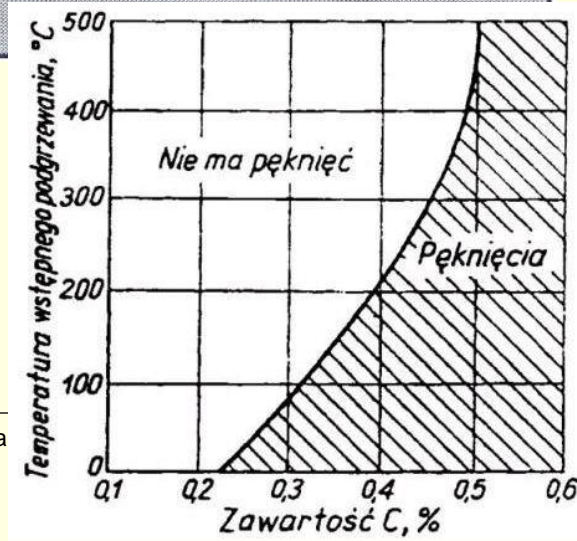
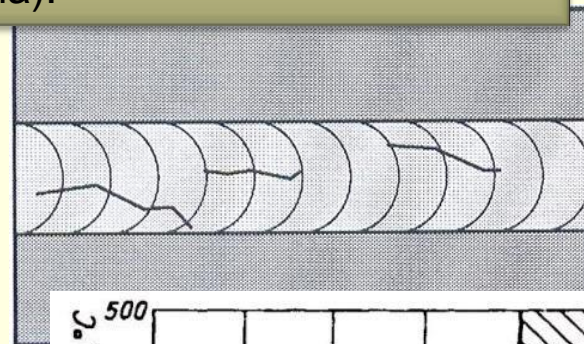
Pękanie na gorąco zachodzi w temperaturze solidusu, w warunkach krystalizacji spoiny przy współistnieniu fazy stałej i ciekłej. Przebiega ono między ziarnami, najczęściej w pobliżu osi spoiny i równoległe do niej (prostopadle do kierunku odprowadzenia ciepła).

Czynniki sprzyjające pękaniu na gorąco:

- Obecność szkodliwych domieszek – S, P, Pb, Sn i B
- Długi czas krzepnięcia
- Niewłaściwy kształt spoiny

Przeciwdziałanie pękaniu na gorąco:

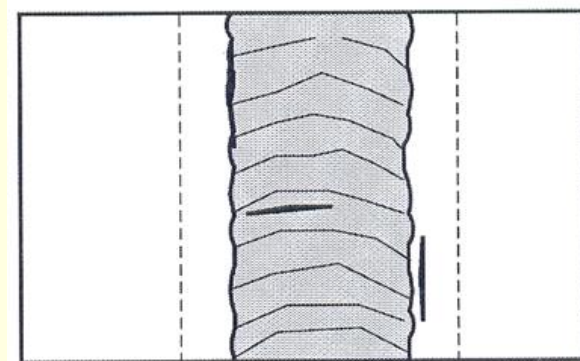
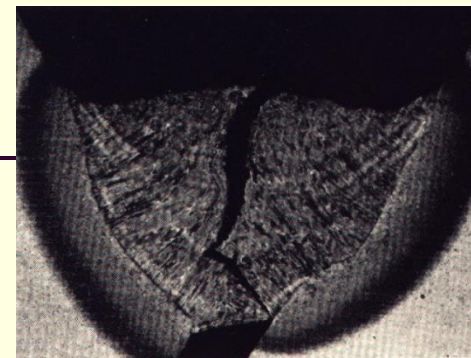
- Stosowanie stali i stopiwa o maksymalnym ograniczeniu szkodliwych domieszek
- Stosowanie stopiwa zawierającego pierwiastki wiążące siarkę, np. Mn
- Zachowanie odpowiedniego kształtu
- Unikanie sztywnego zamocowania części spawanych



Pękanie na zimno

Pękanie na zimno spowodowane są przez przemianę austenitu w martenzyt oraz jego reakcją z wodorem (w obu przypadkach kruchość martenzytu) w stalach skłonnych do hartowania ($\uparrow C\%$). Występuje poniżej temperatury początku przemiany martenzytycznej, tj. około 200 °C.

Pęknięcia lokalizują się w strefie wpływu ciepła (SWC) lub w spoinie. Są prostopadłe lub równoległe do osi spoiny, przebiegają przez ziarna i mają długość od kilku mikrometrów do kilkudziesięciu milimetrów.



Ocenę zagrożenia można dokonać przez wyznaczenie ekwiwalentnej zawartości węgla (spawalność). Przyjmuje się, że przy **Ce > 0.5** materiał ma **skłonność do pęknięć na zimno**.

Przeciwdziałanie pękaniu na zimno:

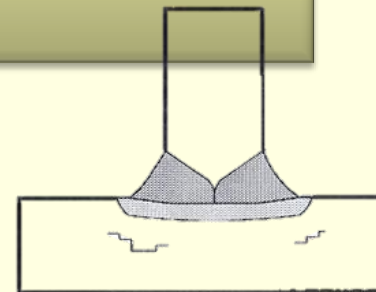
- Zmniejszenie szybkości studzenia – np. podgrzanie złącza przed spawaniem,
- Wykonanie obróbki cieplnej przed i po spawaniu – np. wyżarzanie odprężające,
- Stosowanie elektrod niskowodorowych – np. zasadowych, suszyć elektrody,
- Stosowanie metod ograniczających przenikanie wodoru – spawać MAG, MIG i TIG
- Luźne usytuowanie elementów i odpowiednia kolejność spawania – unikać naprężeń rozciągających

Pękanie złączy spawanych

Pękanie lamelarne objawia się w postaci tarasowo-schodkowego rozwarstwienia w materiale rodzimym łączonych części, najczęściej w SWC. Spowodowane jest składem i właściwościami materiału oraz niewłaściwą technologią.

Przeciwdziałanie występowaniu pęknięć lamelarnych:

- Stosowanie spoiwa o obniżonej wytrzymałości i dużej plastyczności,
- Wykonywanie warstw buforowych,
- Naprzemienne układanie spoin.



Pękanie kruche występuje, gdy materiał nie ma zdolności do odkształceń plastycznych, np. pod wpływem naprężeń rozciągających własnych w złączu lub obciążeń zewnętrznych, a także w miejscach gdzie są karby geometryczne i wady spoiny.



Pękanie zmęczeniowe jest spowodowane zmiennym w czasie obciążeniem konstrukcji. Ponieważ wytrzymałość zmęczeniowa połączenia spawanego jest zazwyczaj niższa niż materiału rodzimego, pęknięcia występują najczęściej w obszarze krawędzi nadlewu spoiny lub w samej spoinie.

Pękanie relaksacyjne jest spowodowane powtórным wygrzewaniem stali Cr-Mo-V, Cr-Ni oraz stopów niklu.

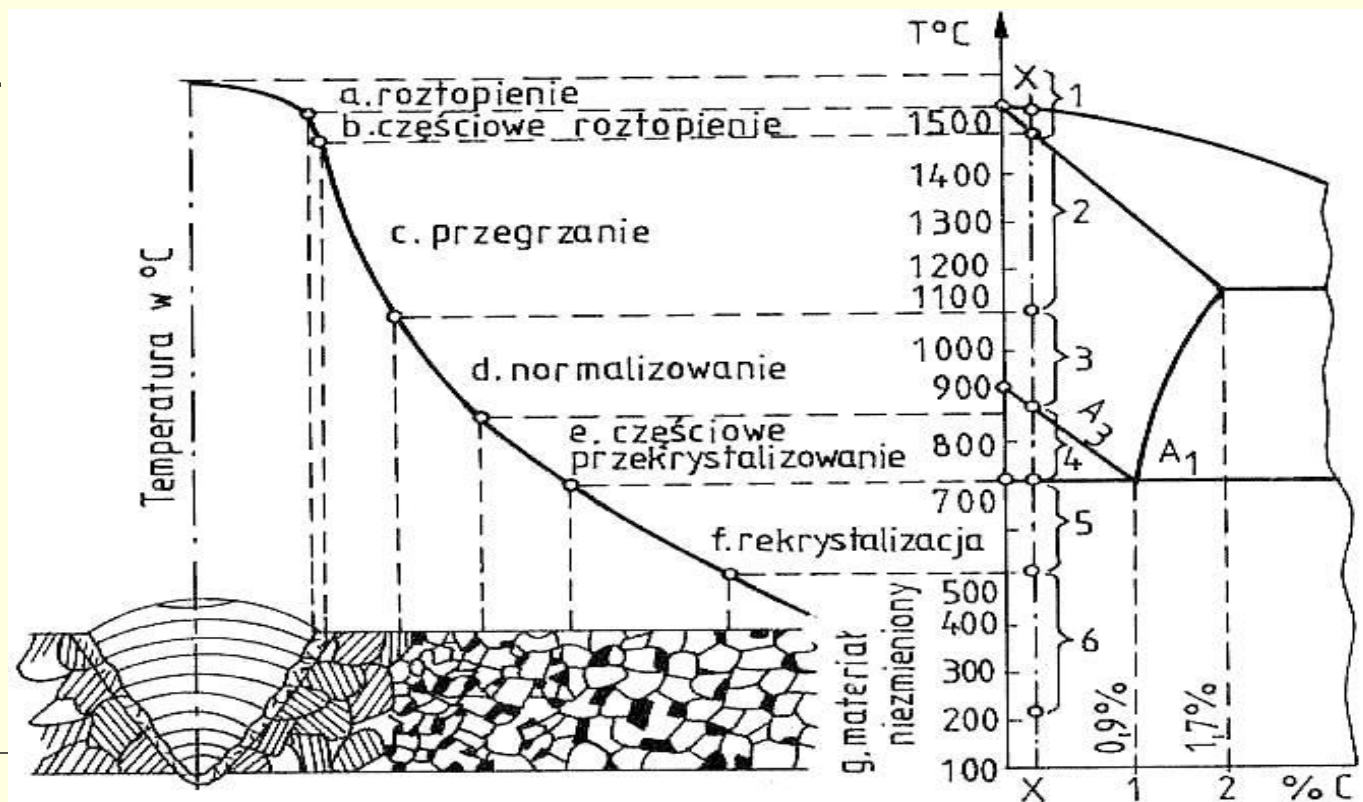
Pękanie zwłoczne charakteryzuje się tym, że występuje po jakimś czasie po ukończeniu spawania. Wodór dyfundując do rejonów o dużych naprężeniach hydrostatycznych powoduje zwiększenie kruchości i możliwość pęknięć.

Krystalizacja złącz spawanych

Krystalizacja pierwotna (powstawanie zarodków i ich wzrost) – w celu rozdrobnienia gruboziarnistej struktury słupkowej spoiny do jeziorka wprowadza się modyfikatory (B, Ti, Ce, Zr) lub pierwiastki tworzące wydzielenia drugiej fazy oraz oddziałują one się drganiami.

Krystalizacja wtórna (przemiany w strefie oddziaływania ciepła)

- wydzielania wtórne
- poligonizacja
- Rekrytalizacja.



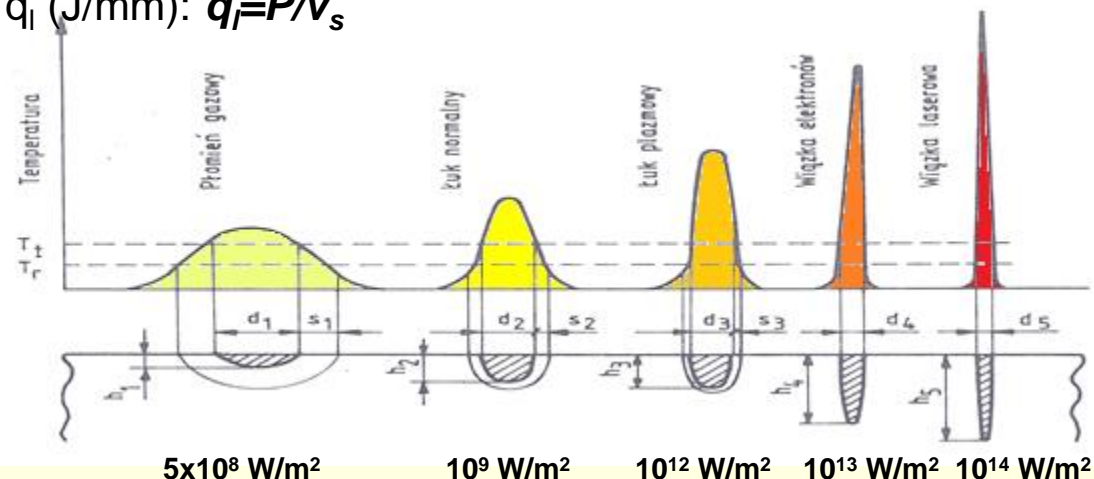
Spawanie

SPAWANIE to proces cieplny polegający na uzyskaniu **stanu ciekłego** metalu na **krawędziach elementów** łączonych (z wykorzystaniem określonego źródła ciepła), dodaniu materiału dodatkowego – **spoiwa** (lub bez niego), a następnie **skrzepnięciu** metalu – w wyniku czego po ostygnięciu tworzy się trwałe połączenie – **SPOINA**

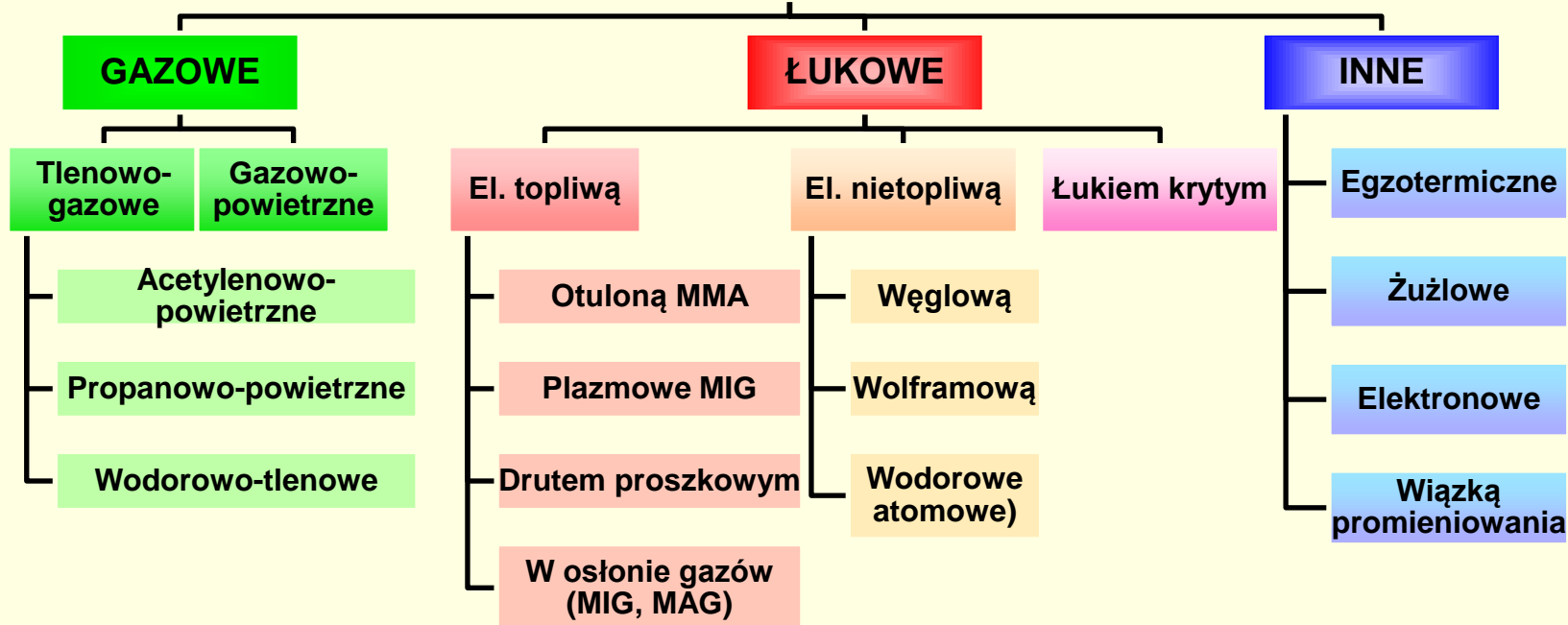
Uzyskanie połączenia spawanego wymaga dostarczenia energii cieplnej (Q) niezbędnej do uformowania spoiny o pożądanych właściwościach. Zależy ona od właściwości cieplnych materiału, charakterystyki źródła ciepła, parametrów procesu i czynników zewnętrznych oraz wymiarów spoiny.

Spoina powstaje przeważnie w wyniku przesuwania się punkтового źródła ciepła wzdłuż osi spoiny, wówczas odniesienie mocy P do prędkości spawania v_s nazywa się **liniową energią spawania** q_l (J/mm): $q_l = P/v_s$

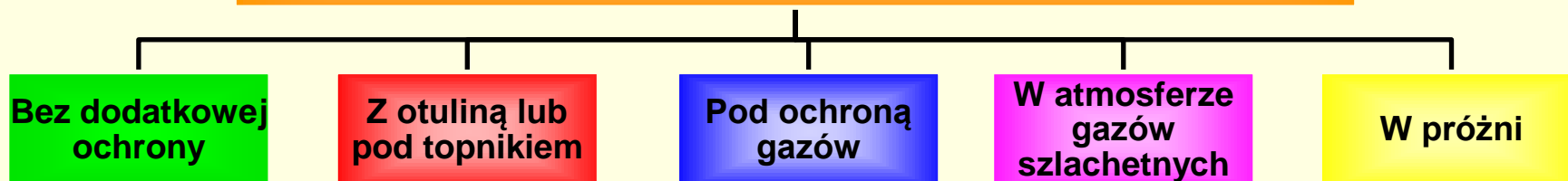
Charakterystyka źródła ciepła przez odniesienie mocy P do pola powierzchni przekroju strumienia ciepła.



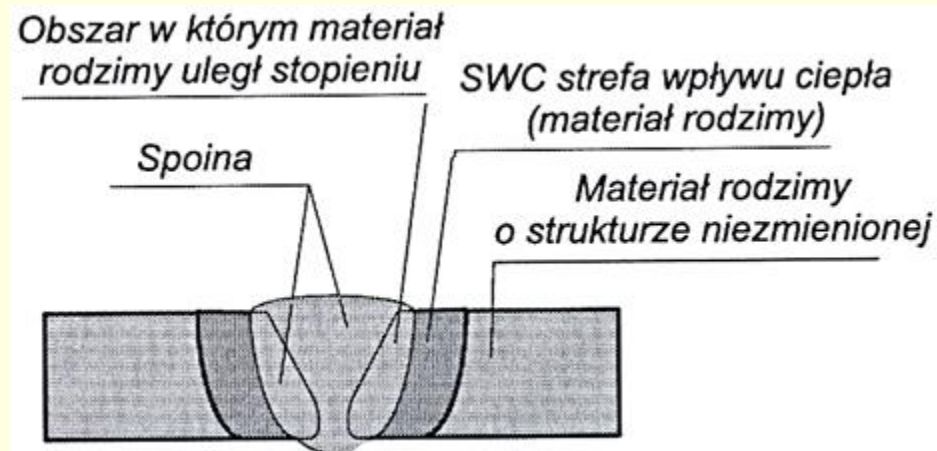
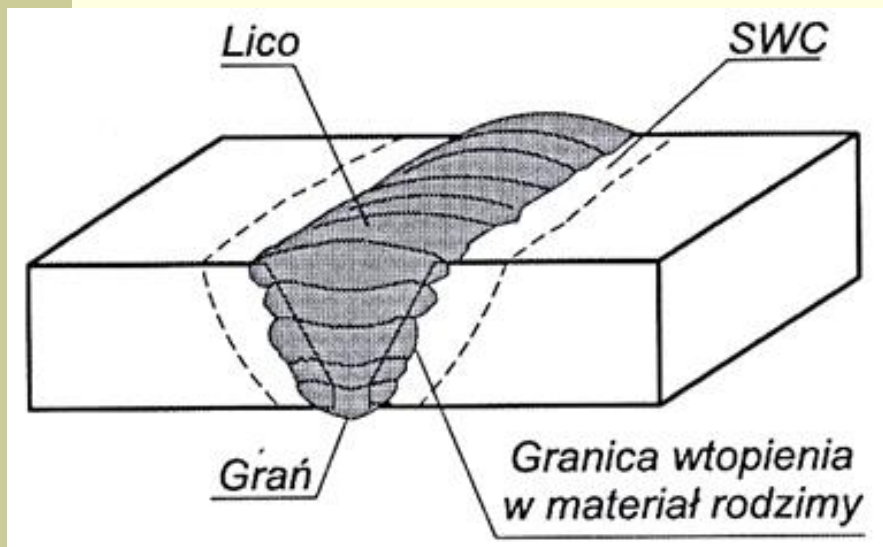
METODY SPAWANIA ze względu na źródło ciepła



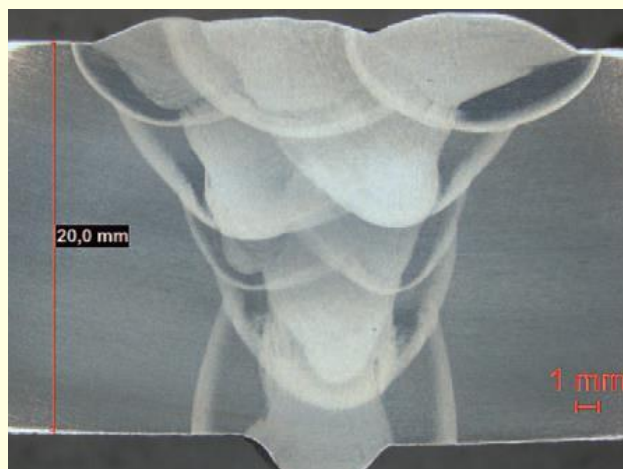
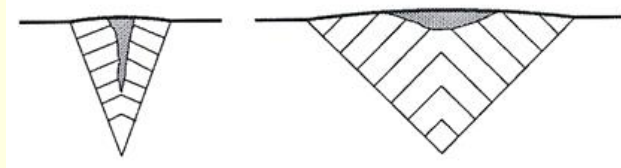
METODY SPAWANIA ze względu na sposób ochrony spoiny



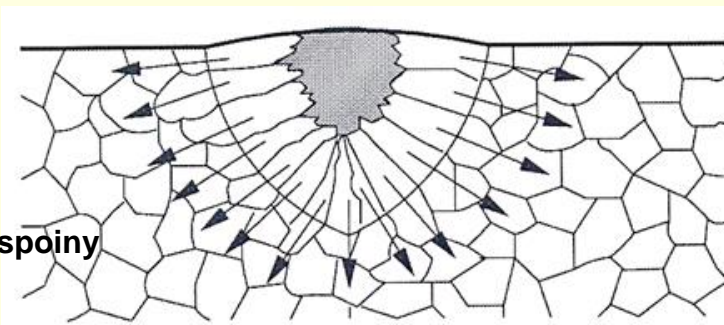
Budowa złącza spawanego



Rozkład zanieczyszczeń w spoinie

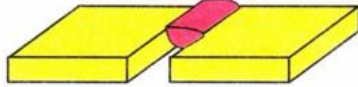


Krystalizacja spoiny

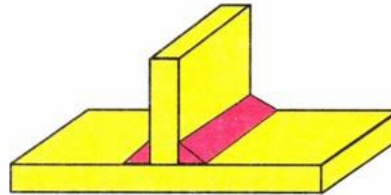


RODZAJE ZŁĄCZ I SPOIN

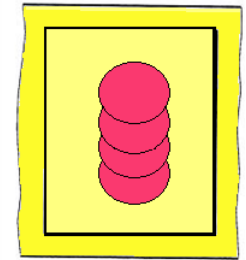
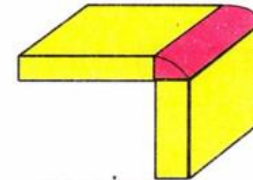
doczołowe



teowe



narożne

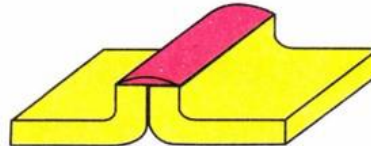


Spoina otworowa

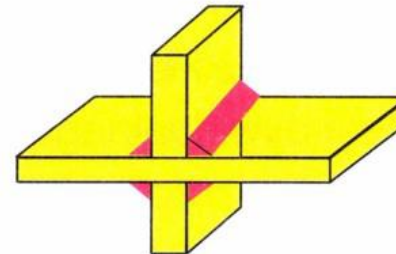
doczołowe



przylgowe

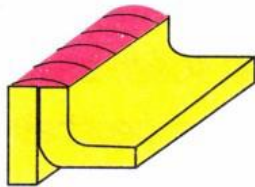


krzyżowe

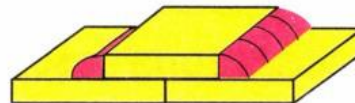


Spoiny wielowarstwowe

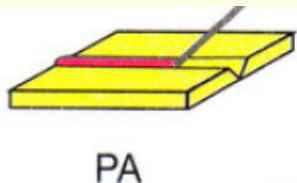
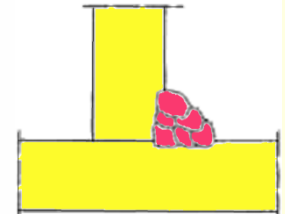
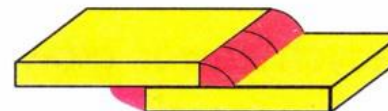
przylgowe



nakładkowe

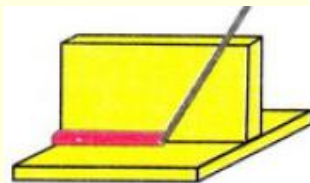


zakładkowe



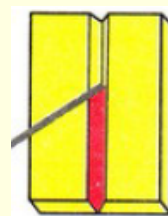
PA

Pozycja podolna



PB

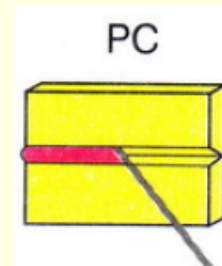
Pozycja naboczna



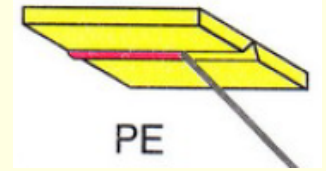
PF

Pozycja pionowa do góry

PC



Pozycja naścienna



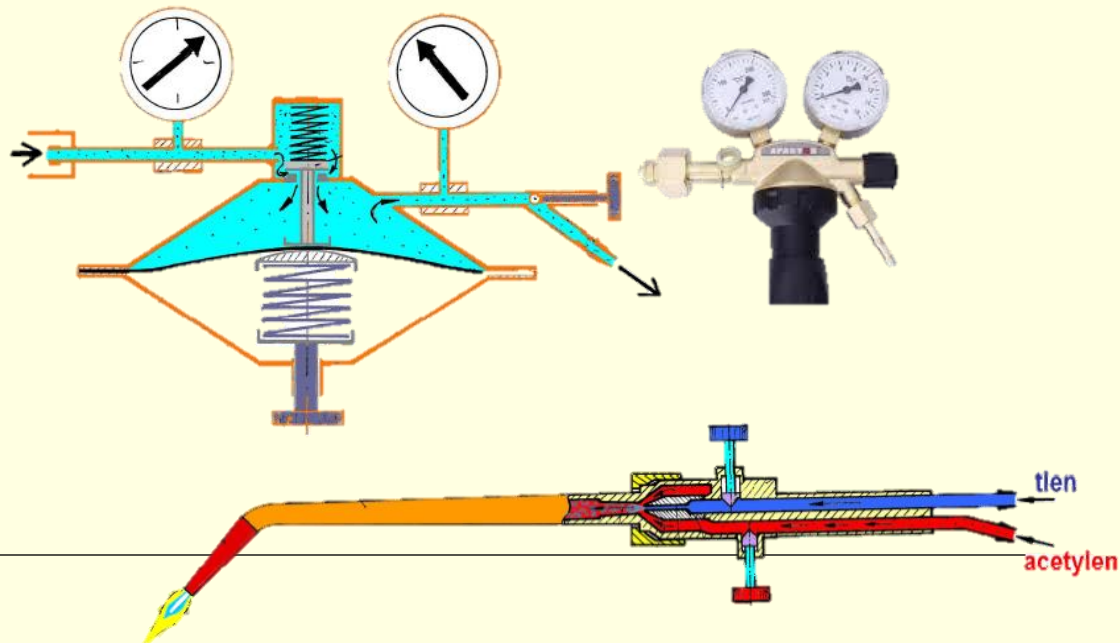
PE

Pozycja pułapowa

Spawanie gazowe

Spawanie acetylenowo-tlenowe jest procesem łączenia metali, polegającym na stapianiu brzegów łączonych elementów i dodawanego w postaci pręta spoiwa. Źródłem ciepła jest płomień gazu (najczęściej acetylenu C_2H_2) spalającego się w atmosferze tlenu lub tlenu zawartego w powietrzu. Acetylen ma dużą wartość opałową (59 MJ/mol) co pozwala osiągnąć **3200 °C**.

Acetylen w butli (**czzerwona**) jest rozpuszczony w acetonie i sprężony pod ciśnieniem 1.8 MPa. W butlach z tlenem (**błękitne**) tlen jest pod ciśnieniem 15 MPa.

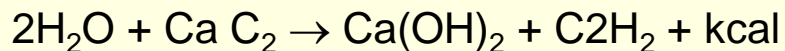


Acetylen

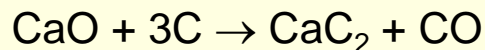
Acetylen charakteryzuje się:

- dużą wartością opałową
- dużą szybkością spalania
- wysoką temperaturą spalania w tlenie (3150°C)
- redukcyjnym działaniem płomienia

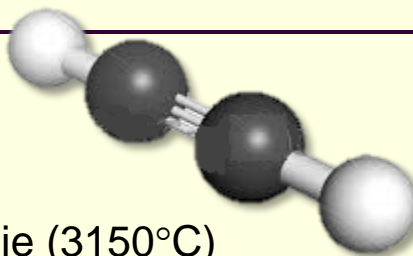
Powstaje: w reakcji **karbidu z wodą**



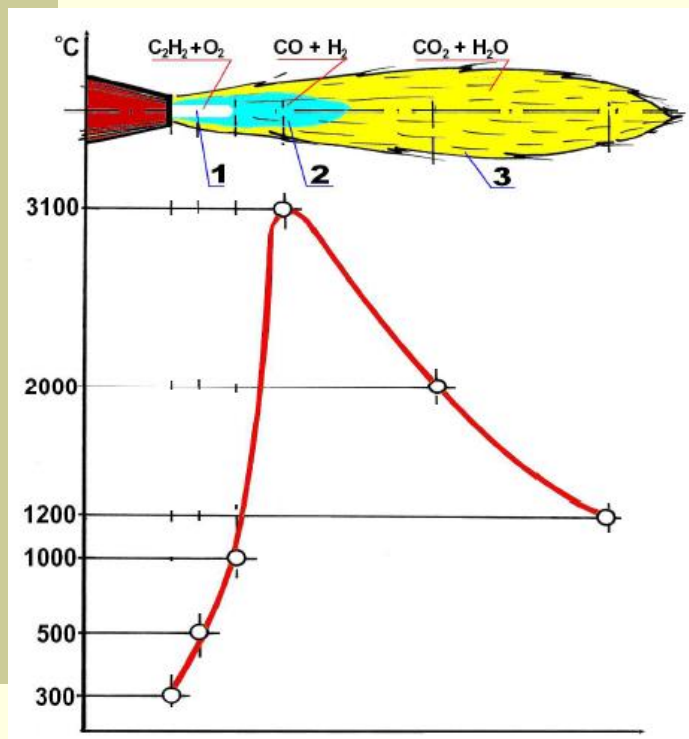
Karbid otrzymujemy przez prażenie wapna palonego i koksu w temperaturze 2300°C



- Acetylen jest gazem bezbarwnym i bezwonny, lżejszym od powietrza (1.1791 kg/m³).
- W warunkach normalnych 24l acetyleny rozpuszcza się w 1l acetonu.
- Nie należy go sprężać powyżej 1.5 at, gdyż łatwo się rozkłada z reakcją samowychodu.
- Aby temu zapobiec, butle wypełnia się **masą porowatą**, która umożliwia sprężenie acetyleny do 15 at (300l C₂H₂ / 1l acetonu)



Płomień acetylenowo-tlenowy



Acetylen spala się dwuetapowo z wydzielaniem tlenku węgla i wodoru (gazy silnie redukujące).

1. **Strefa mieszania** – jądro (rozpad acetyleny na C i H_2)
2. **Strefa redukcyjna** ($C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$)
3. **Kita** ($CO + O_2 = CO_2 + \text{para wodna}$)

Spawamy strefą drugą.

Rodzaje płomienia

nawęglający (O_2/C_2H_2 0.8÷0.9 objętościowo - nadmiar acetyleny) - stosowany do spawania stopów Al, stali wysokostopowych do napawania,
normalny (1.0÷1.2) - stosowany do spawania stali niskowęglowych, stopowych, stopów Cu i żeliwa,
utleniający (1.2÷1.5 - niedobór acetyleny) - stosowany do spawania miedzi oraz do cięcia i żłobienia metali.

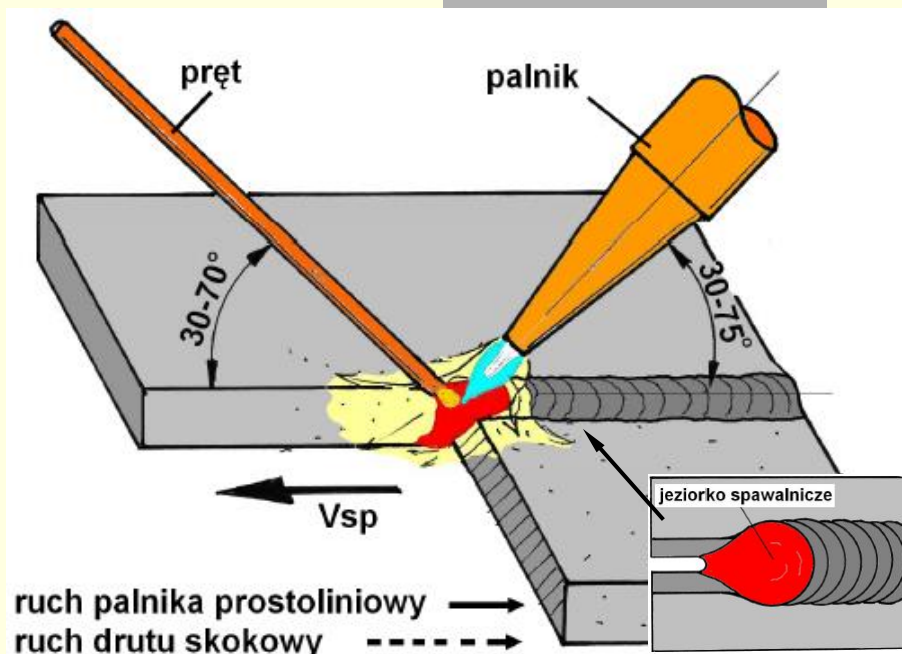


Metody spawania gazowego

W lewo - płomień skierowany jest w kierunku spawania na krawędzie jeszcze nie przetopione.

Metoda stosowana do spawania spoin czołowych, jednowarstwowych w pozycji podolnej (głównie dla stali niskowęglowych) oraz do spawania blach o grubości do 4 mm.

Zastosowanie - stosowana do połączeń o wymaganiach wytrzymałościowych i dużej estetyce.



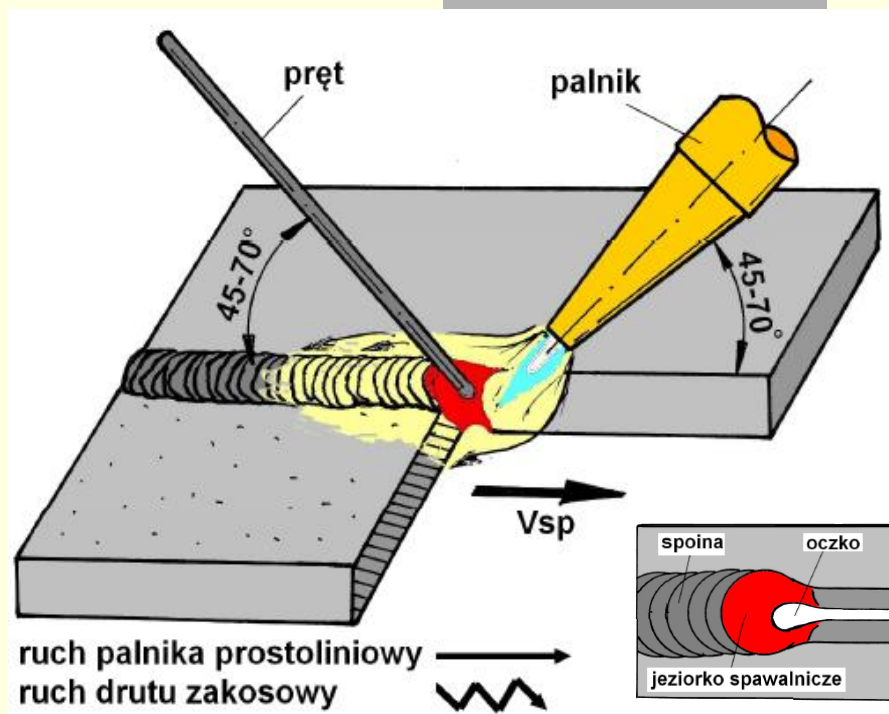
Zalety – łatwość wykonania, ładne lico, nadaje się do spawania wszystkich rodzajów materiałów, do spawania cienkich przedmiotów, metoda szybka i oszczędna w zużyciu gazów.

Wady – nierównomierny przetop, możliwość utlenienia spoiny, zagazowanie i porowatość, duże naprężenia termiczne z powodu szybkiego krzepnięcia spoiny, duża szerokość spoiny.

Metody spawania gazowego

W prawo - palnik jest zwrócony w kierunku wykonanej już spoiny. Przesuwa się od strony lewej ku prawej, stapiając brzegi łączonych blach i tworząc charakterystyczne jezioro stopionego metalu z tzw. oczkiem.

Zastosowanie – metoda stosowana zwykle do połączeń odpowiedzialnych, a także do łączenia blach o grubości większej niż 4 mm, wymagających ukosowania brzegów oraz do łączenia rur niezależnie od ich grubości.



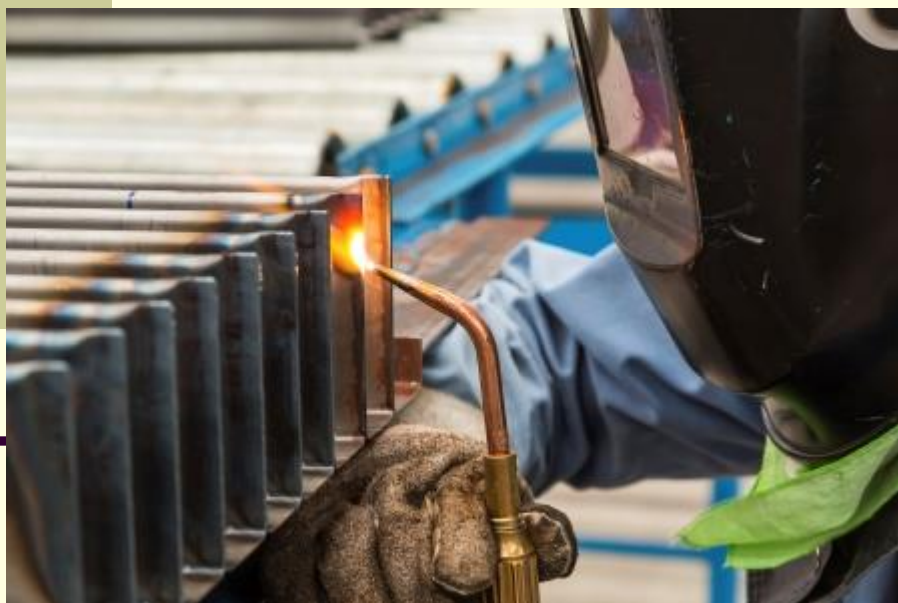
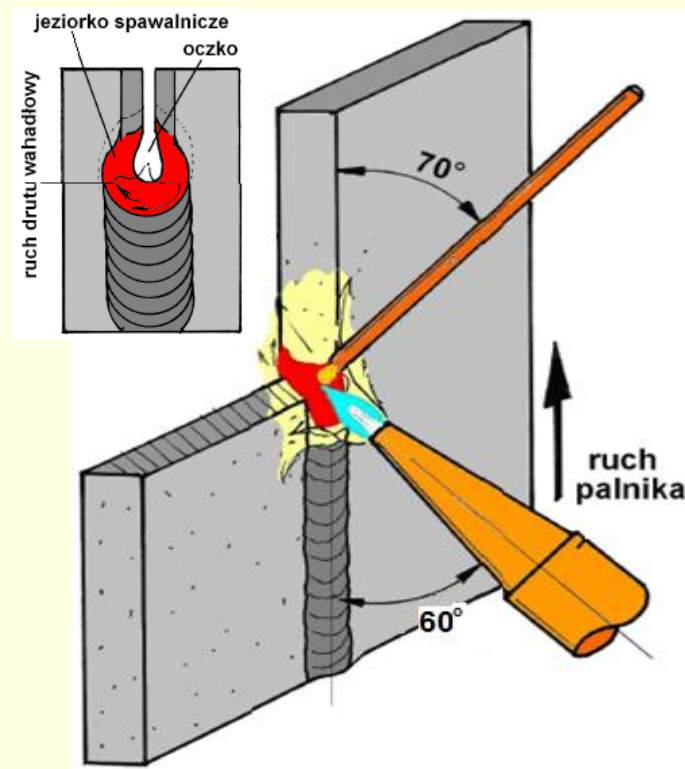
Zalety – pełen przetop spoiny, mniejsze utlenienie i naazotowanie spoiny, lepsze odgazowanie, zmniejszone naprężenia spawalnicze, wąska spoina.

Wady – brzydki wygląd spoiny, trudność utrzymania oczka przetopu.



Metody spawania gazowego

W górę - spoina układana jest w położeniu pionowym od dołu do góry. Palnik przesuwany się ruchem prostoliniowym, natomiast koniec drutu wykonuje małe ruchy wahadłowe. Metoda charakteryzuje się najlepszymi i najekonomiczniejszymi wynikami.



Zalety – łatwość utrzymania oczka przetopu, 2x mniejsze zużycie gazów, możliwość spawania przedmiotów do 6 mm grubości bez konieczności ukosowania krawędzi.

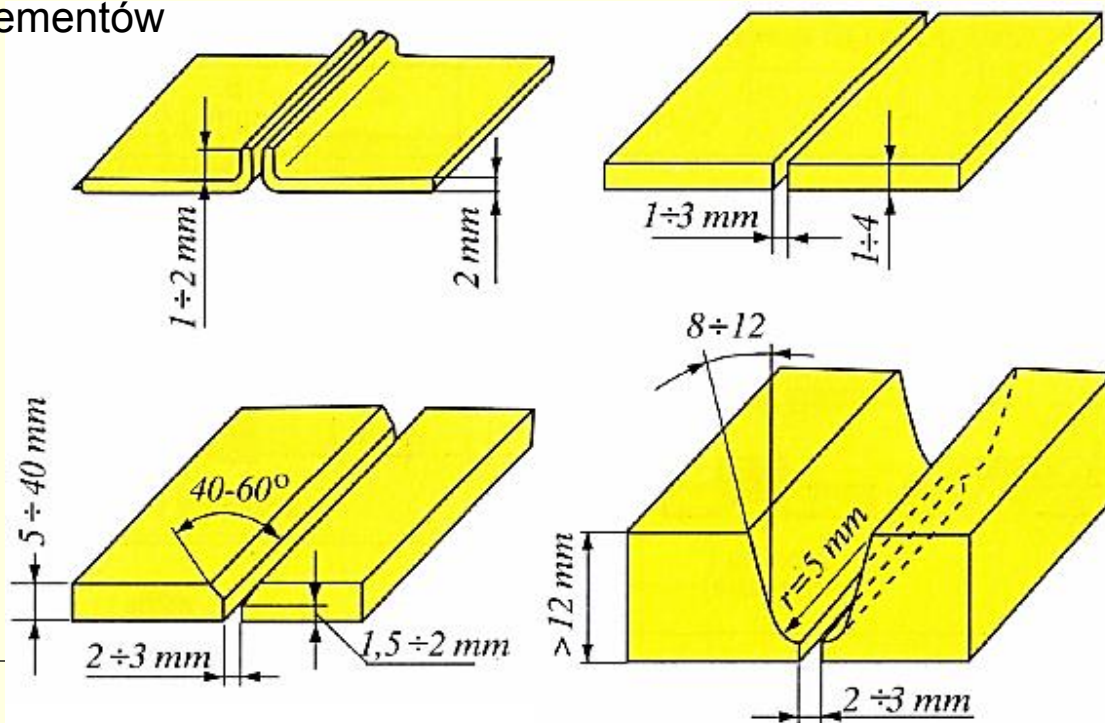
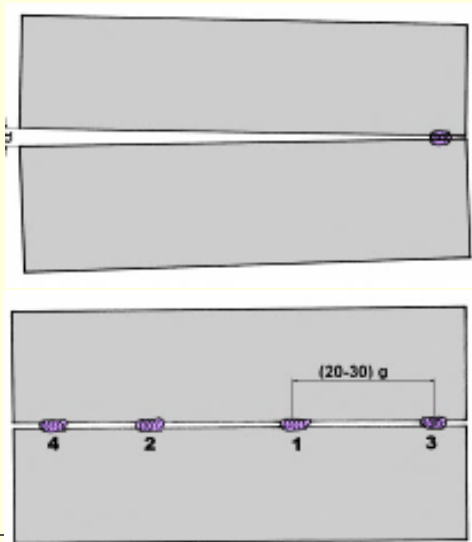
Wady – pionowe ustawienie spawanych przedmiotów.

Przygotowanie materiału do spawania

Spoiva - druty \varnothing 0.6-10 mm o składzie dobieranym zależnie do rodzaju spawanego materiału.

Topniki – kwaśne (kwas borowy, boraks)
– zasadowe (soda, węglan potasowy)

- ✓ **oczyszczenie** brzegów (mechaniczne, chemiczne)
- ✓ **zukosowanie** krawędzi (V, Y, X)
- ✓ **ustawienie** spawanych elementów względem siebie i ich zamocowanie
- ✓ **szczepianie** łączonych elementów
- ✓ **podgrzanie** wstępne



Spawanie elektryczne

Spawanie elektryczne jest procesem spawania, w którym źródłem ciepła jest ciepło przetworzonego prądu elektrycznego, co pozwala osiągnąć nawet ponad **10 000 °C**.

- 1) Łukowe
 - ręczne
 - pod topikiem
 - łukiem krytym elektrodą topliwą (np. drut proszkowy)
 - w osłonie gazów:
 - obojętnych (MIG – argon, hel lub mieszanina tych gazów)
 - aktywnych (MAG – CO_2 , H, inne)
 - elektrodą nietopliwą wolframową w osłonie gazów:
 - obojętnych (TIG – argon, hel lub mieszanina tych gazów)
 - aktywnych (TAG – CO_2 , H, inne)
- 2) Atomowe
- 3) Plazmowe
- 4) Elektronowe
- 5) Elektrożuźłowe
- 6) Laserowe
- 7) Termitowe (nie elektryczne)



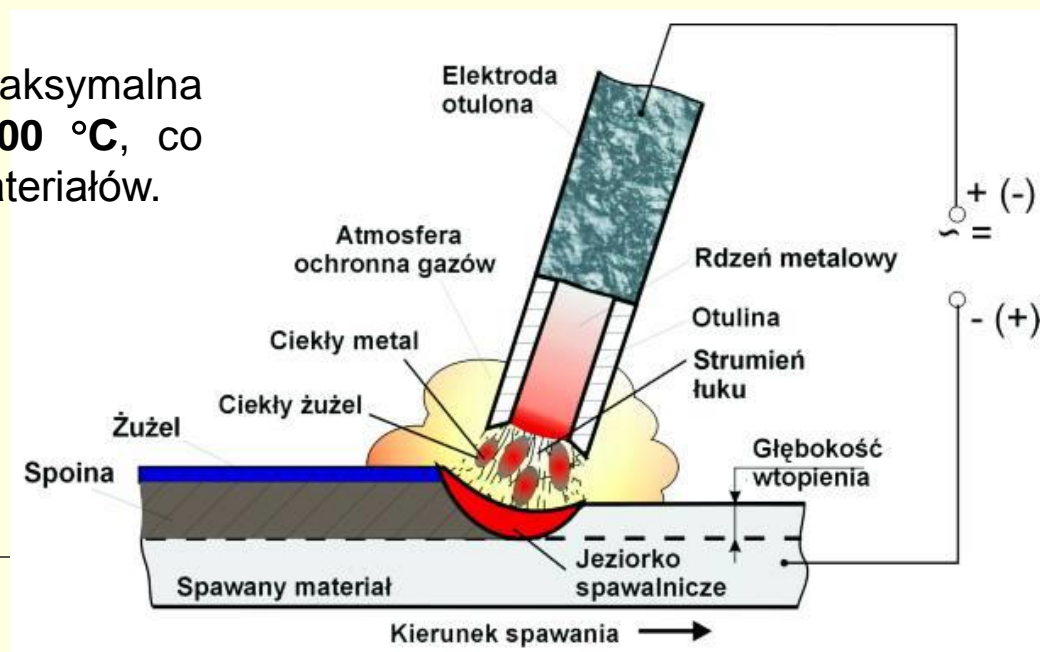
Spawanie elektryczne łukowe MMA

Podczas **spawania elektrycznego łukowego** źródłem ciepła jest łuk elektryczny, jarzący się między elektrodą a spawanym elementem. **MMA** jest **metodą spawania ręcznego**, powszechnie stosowaną w pracach montażowych. Wykorzystywana jest do spawania stali węglowych, niskostopowych i stopowych, staliwa, żeliwa, miedź i jej stopów, niklu i jego stopów oraz miękkich stopów aluminium. Metoda zapewnia dobrą jakość spoin, jest jednak mało wydajna.

Łuk elektryczny jest to ciągłe wyładowanie elektryczne w gazach, tworzące strumień zjonizowanych cząstek (plazmy). W metodzie MMA jarzy się on pomiędzy elektrodą i elementem spawanym. Temperatura w łuku zależy od natężenia prądu i od rodzaju gazu tworzącego plazmę.

Przy spawaniu elektrodą topliwą maksymalna temperatura nie przekracza **6000 °C**, co umożliwia topienie większości materiałów.

Długość łuku elektrycznego jest proporcjonalna do U i odwrotnie do I prądu, a jego temperatura w powietrzu jest prawie niezależna od natężenia prądu spawania i wynosi (5000-7000) K.



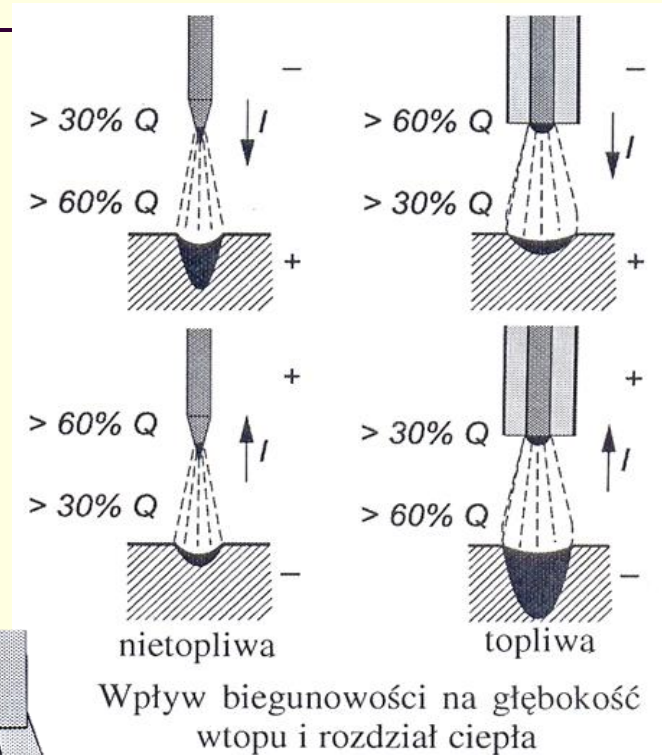
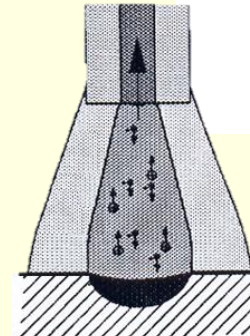
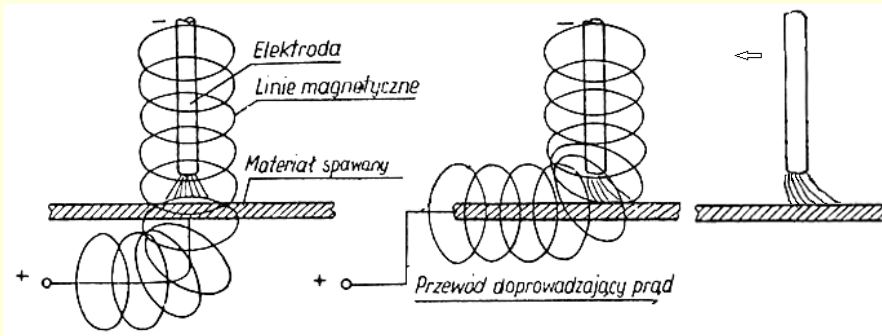
Łuk elektryczny a spawanie

Energia łuku – liniowa energia spawania

$$Q_l = P/v = U \cdot I / v$$

Podczas spawania ręcznego elektrodą otuloną **napięcie łuku** jest wielkością **proporcjonalną do długości łuku**. Jego długość powinna wynosić około 0.5-1 średnicy elektrody d .

Przy zasilaniu prądem stałym, biegunowość ma wpływ na głębokość wtopu. Przez jej zmianę można wpływać na intensywność topnienia. Przy zasilaniu prądem zmiennym, rozdział ciepła jest równomierny.



Mankamentem przy spawaniu prądem stałym jest ugięcie łuku. Występuje ono pod wpływem nierównomiernego zagęszczenia linii sił pola magnetycznego wokół przewodnika, które odchyła go w kierunku przeciwnym do zagęszczenia linii pola.

Elektrody spawalnicze



Wolframowe - do spawania w atmosferach ochronnych

Węglowe - do s. cienkich blach, Cu, Al oraz żłobienia i cięcia

Nieotulone - do spawania w osłonie gazów i pod topnikiem

Rdzeniowe - do automatów spawalniczych

Otulone

Do spawania ręcznego stosuje się **elektrody otulone** – ich rdzeń stanowi **spoiwo** (drut lub proszek), a warstwę zewnętrzną - **otulina**. Przeznaczeniem otuliny jest ochrona łuku i spoiny przed powietrzem. Dodatkowo służy do regulacji składu chemicznego spoiny i jej struktury. Średnica elektrod wynosi 1.6-6 mm.

Dążymy do tego aby skład spoiny (rdzenia) był taki sam jak materiału rodzimego.

Elektrody dzieli się w zależności od:

składu chemicznego otuliny

kwaśne - A [-/~],

rutylowe - R [-/~]

zasadowe - B [-]

utleniające - O [-/~]

celulozowe - C [-/~]

specjalne (V)

przeznaczenia

- **połączeniowe**

(← wszystkie rodzaje),

- do spawania stali

niskostopowych i wysokostopowych (ES),

- do **napawania** (EN),

- do spawania **żeliwa** (EŻ),

- do spawania **metali nieżelaznych**.



Oznaczenia elektrod

Symbol elektrody otulonej wg PN-EN ISO 14341:

E - elektroda

S, N, Ż - przeznaczenie elektrody

10-99 - wytrzymałość stopiwa R_e [0.1MPa]

Z, A, 0-6 - symbole określające pracę łamania stopiwa

Mo, Mn ... - skład chemiczny stopiwa

A, R, B, O, C, V - rodzaj otuliny

1-8 - uzysk stopiwa i rodzaj prądu spawania

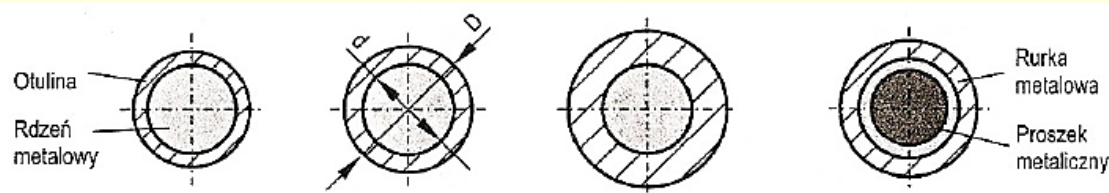
1-5 - pozycje spawania

H5, 10, 15 - zawartość wodoru w stopiwie

E 46 6 (2Ni) B 3 1 H5 - el. otulona do ręcznego spawania łukowego: $R_e > 460$ MPa, minimalna praca łamania 47 J w temperaturze > -60 °C, z dodatkiem 2% Ni i 1.4% Mn, otulina zasadowa, uzysk spoiwa 105-125%, wszystkie pozycje, do 5% wodoru w ml/100 g stopiwa.

ER 246		Dopuszczenia: Approvals:	Klasyfikacja: Code:	Prąd spawania Welding current	
Grubo otulona elektroda rutylowa o uzysku ok. 100% do spawania stali niskowęglowych o granicy plastyczności do 380 N/mm ² .		ABS BV DNV GL LRS PRS RINA TUV UDT DB-U-10.058.01	PN-EN 499 - E 38 2 RB 12 AWS A5.1 - E 7014 GOST 9467 - E 46		
Heavy coated rutile electrode with 100% recovery for welding mild steel with yield strength up to 380 N/mm ² .				\varnothing mm	Amper
				2	40 - 80
				2,5	60 - 110
				3,25	90 - 150
				4	130 - 190
				5	180 - 250
				6	230 - 300

EB 146		300-350°C/2h		0035
40 x 450 mm	ok. 83 szt.	6.0 kg	Wyrób: 5650404P00	ESAB AB 5 SE 402 77 Gátes 0035-CPO EN 15615 - EN
130 - 190 A			Nr prod.: PN703265	EN 15615 - EN
PN-EN ISO 2560-A AWS A5.1 GOST 9467	E 38 3 B 42 E 7018 E 46A		ABS BV DNV GL	RINA TUV/PN UDT DB-10.058.03/PN



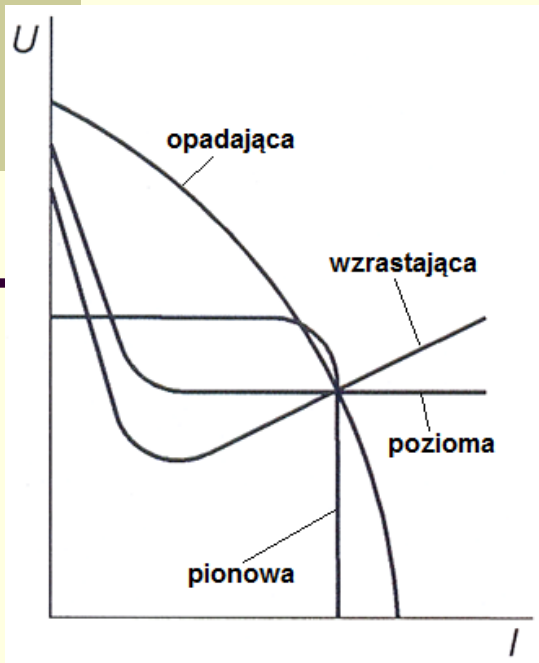
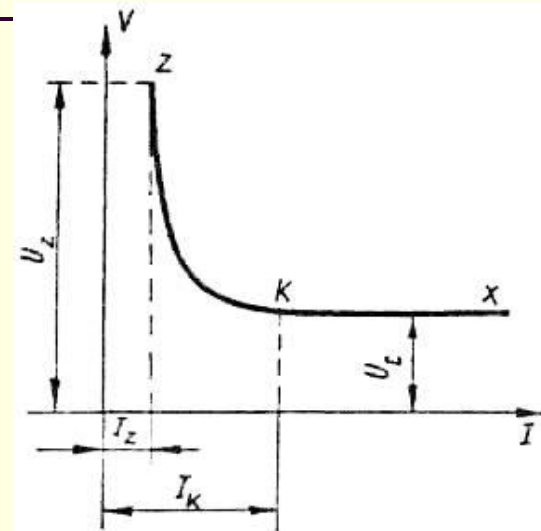
Parametry spawania łukowego MMA

Podstawowym parametrem spawania jest **natężenie prądu**.

Jego wartość dobiera się w zależności od: średnicy elektrody, pozycji spawania, grubości przedmiotu spawanego, rodzaju materiału oraz rodzaju spoiny.

Przyjmuje się, że natężenie prądu powinno wynosić:

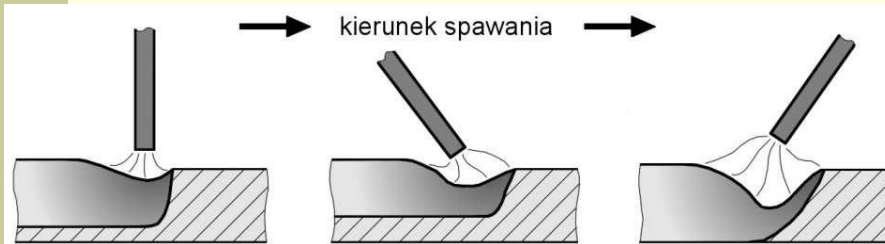
- do elektrod o średnicy 2 mm - 25÷30 A / 1 mm średnicy,
- do elektrod o średnicy 2÷4 mm - 30÷40 A / 1 mm średnicy,
- do elektrod o średnicy 4÷6 mm — 40÷60 A / 1 mm średnicy.



Podczas spawania **natężenie prądu** powinno utrzymywać stałą, stabilną wartość, niezależnie od długości łuku el. Dlatego zalecana jest stromo opadająca charakterystyka statyczna źródła prądu, która zapewnia utrzymanie **stałej wartości prądu w funkcji napięcia**. Im bardziej stroma charakterystyka $I-U$ tym mniej są zmiany natężenia prądu przy zmieniającej się długości łuku elektrycznego (zmienia się tylko napięcie).

Do spawania w pozycjach wymuszonych dopuszcza się użycie źródeł o łagodnie opadającej charakterystyce w celu regulacji natężenia prądu długością łuku.

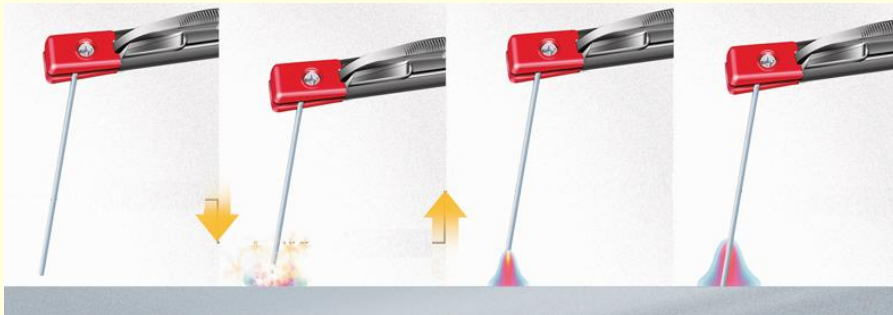
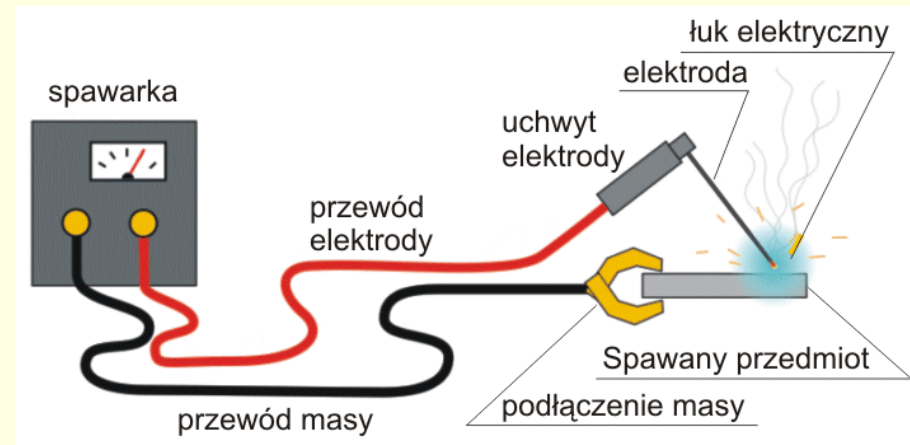
Spawarki elektryczne



Transformatory spawalnicze – prąd zmienny, tanie, łatwe w obsłudze, spawanie prądem o napięciu 45-70V i natężeniu 250 A; stosowane w produkcji jednostkowej i pracach remontowych.

Prostowniki spawalnicze – prąd stały; szeroki zakres regulacji prądu od 10-800A; stosuje się je do spawania elektrodą otuloną, łukiem krytym i w osłonie gazów ochronnych; produkowane są jako prostowniki wielostanowiskowe.

Przetwornice spawalnicze – składają się z silnika asynchronicznego i prądnicy, służą do zamiany prądu zmiennego na stały; w Polsce rzadko stosowane.

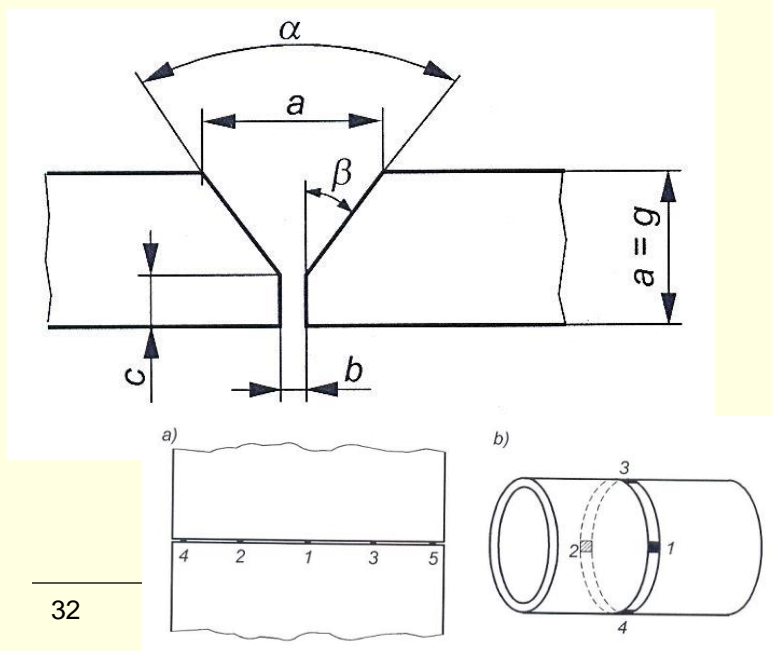


Agregaty spawalnicze – składają się z silnika spalinowego, prądnicy prądu stałego lub zmiennego i systemu regulacji prądu; nawet do 500A; często jako zestaw kołowy do pracy w warunkach polowych.

Przygotowanie elementów do spawania

Ręczne spawanie elektrodą otuloną można podzielić na następujące etapy:

1. Przygotowanie – ukosowanie, oczyszczanie, mocowanie lub/i sczepianie,
2. Dobór elektrod – gatunku, średnicy, suszenie,
3. Dobór parametrów spawania – rodzaju, napięcia i natężenia prądu, prędkości spawania i pochylenia elektrody,
4. Spawanie – zajarzenie łuku, kontrola przetopu i głębokości wtopienia,
5. Zakończenie - odbijanie żużla i oczyszczanie spoiny.



Symbol	Sposób ukosowania	Zalecane wymiary
I		$g \leq 3 \text{ mm}, \quad b = 0 \div 2 \text{ mm}$ $g = 2 \div 8 \text{ mm}, \quad b = 1 \div 3 \text{ mm}$
V lub Y		$g = 3 \div 20 \text{ mm}, \quad b = 0 \div 3 \text{ mm}, \quad c = 0 \div 3 \text{ mm}$
X		$g > 10 \text{ mm}, \quad b = 2 \div 3 \text{ mm}, \quad c = 1,5 \div 3 \text{ mm}$
U		$g > 12 \text{ mm}, \quad b = 2 \div 3 \text{ mm}$
2U		$g > 30 \text{ mm}$

Spawanie łukiem krytym SAW



W metodzie **SAW** łuk elektryczny pali się "**ukryty**" **pod proszkiem**, który pełni funkcję otuliny elektrody, chroniąc jeziorko spawalnicze przed dostępem powietrza i wprowadzając dodatki spawalnicze. Elektrode drutową i proszek podaje się automatycznie, nadmiar proszku odsysa się. Metoda w pełni zautomatyzowana.

Poza pozycją podolną, inne są również możliwe, jeżeli proszek jest utrzymywany przez odpowiednie urządzenia - bardzo kosztowne.

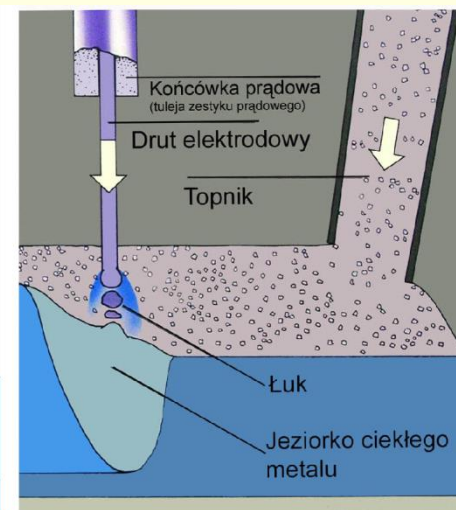
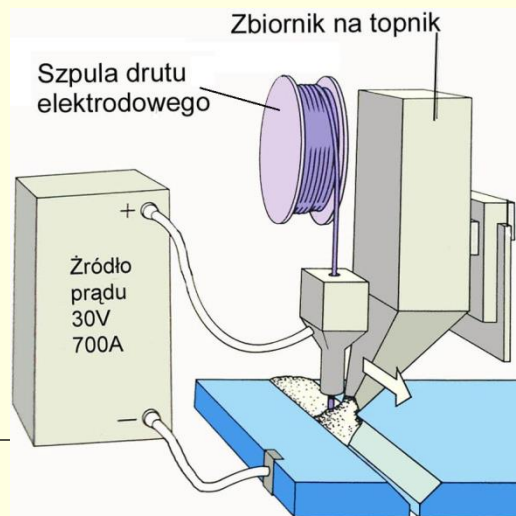
Spawanie automatyczne elektrodą topliwą ciągłą daje spoinę wysokiej jakości i jest wykorzystywane w produkcji wielkoseryjnej zarówno stali niestopowych jak i wysokostopowych.

Zalety

- wysoka jakość spoiny
- bardzo duża wydajność
- oszczędność topnika (otuliny)
- brak naświetleń hali

Wady

- ograniczenia pozycji spawania
- metoda stosowana wyłącznie w halach produkcyjnych



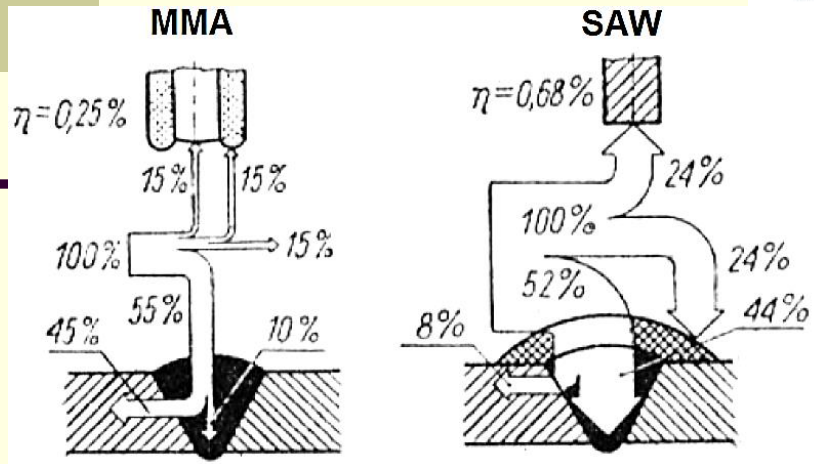
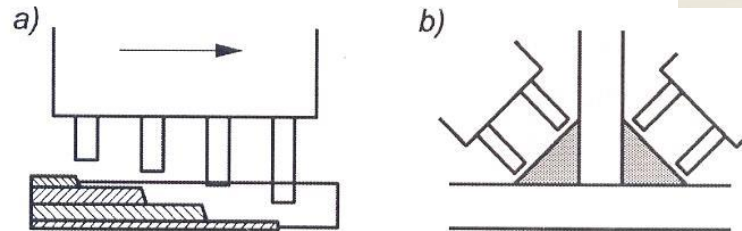
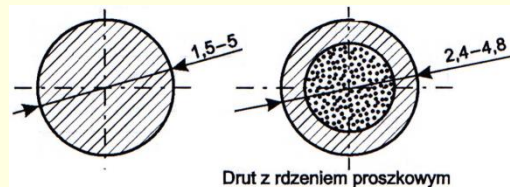
Spawanie łukiem krytym SAW

Elektroda jest topliwa i jest nią drut pełny lub proszkowy (1-6mm)

Parametry: natężenie od 300-1200A, napięcie 20-40V, prędkość spawania 10-120m/h

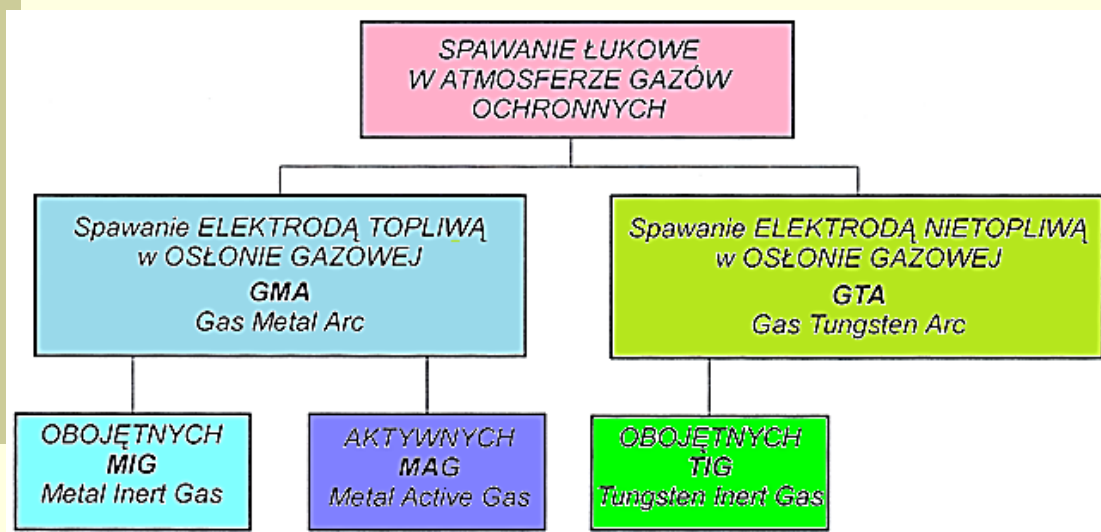
Można spawać kilkoma elektrodami jednocześnie.

Metoda zautomatyzowana, szczególnie stosowana do spawania grubych blach w przemyśle okrętowym, do budowy zbiorników i rur (rurociągów).



Spawanie łukowe w osłonie gazowej

W **spawaniu w osłonie gazowej** proszek i otulinę zastąpiono przez **gaz**. **Chroni** on spoinę i ciekłe jezioro przed dostępem powietrza i wchodzi w połączenie ze stopiwem. Wpływa też na stabilność łuku i sposób przenoszenia metalu, kształt spoiny i głębokość wtopu oraz prędkość spawania.



Stosowane rodzaje gazów:

- ochronne: **Ar, He**
- utleniające: **CO₂, O₂**
- redukujące: **H₂**
- reaktywne: **N**
- mieszanki gazów

Największe zastosowanie ma CO₂ - tani, po dysocjacji tlen tworzy trwałe tlenki z metalami i niemetalami (C, Si, S, P) aby uniknąć utleniania do spoiwa dodaje się Mn lub Si.

MIG – Metal Inert Gas (GMA)

W metodzie **MIG** i **MAG** łuk jarzy się pomiędzy materiałem rodzimym a drutem spawalniczym automatycznie podawanym przez podajnik drutu. Łuk i spawany materiał są osłaniane, dobranym odpowiednio do rodzaju spawanego metalu gazem. Oba sposoby należą do półautomatycznych metod spawania, dzięki czemu osiąga się wysoką wydajność pracy.

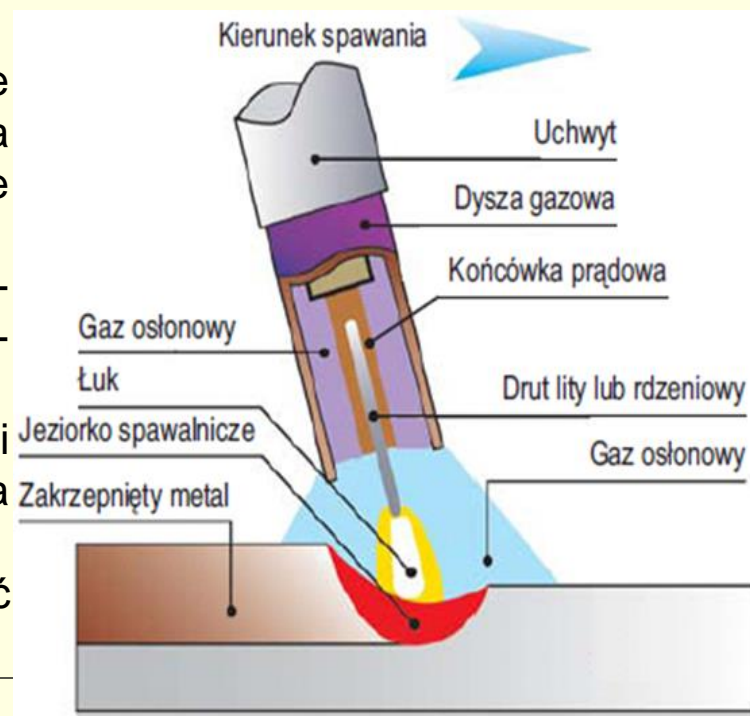
Spawanie **elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych MIG** stosowane jest do spawania odpowiedzialnych konstrukcji, głównie z materiałów odpornych na korozję (stopy Al i Cu).

Gazem osłonowym jest obojętny chemicznie **argon**, natomiast dla polepszenia wtopienia i zwiększenia prędkości spawania stosuje się czysty **hel** lub w mieszance.

Parametry: elektroda 0.6-2.2mm, prąd 60-400A, napięcie 15-35V, prędkość 0.1-0.6m/min. Najczęściej prąd stały (+).

Zalety - wysoka wydajność dzięki automatyzacji oraz wysoka jakość spoiny

Wady - wiatr może zdmuchiwać osłonę gazową.



MAG – Metal Active Gas (GMA)



Spawanie **elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych** Ar, CO₂ stosowane jest do spawania materiałów mniej wymagających. Metoda charakteryzuje się podobnymi cechami jak MIG, lecz uzyskuje się nieco gorszą jakość spoiny.

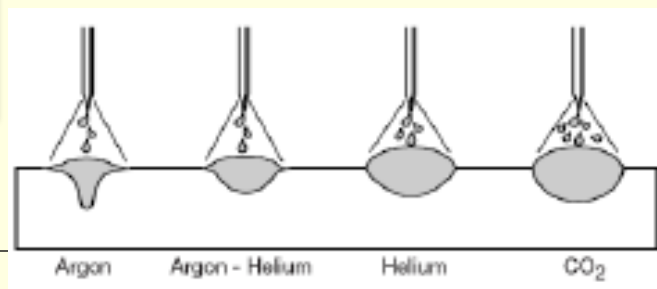
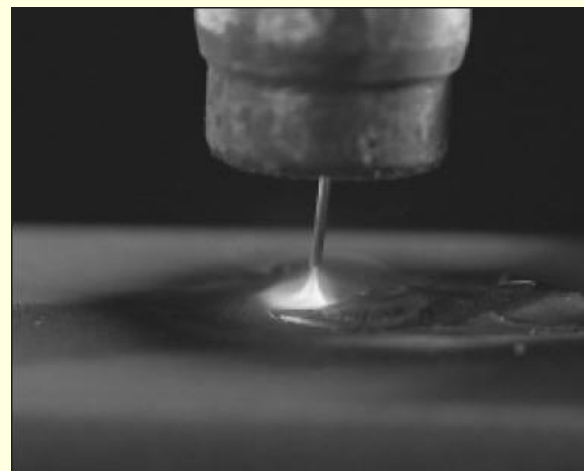
Głównym składnikiem większości gazów osłonowych do spawania metodą MAG jest **argon**. Stosuje się go w mieszance ze składnikami utleniającymi, jak CO₂ lub O₂.

Sam **dwutlenek węgla** jako gaz osłonowy jest rzadziej stosowany ze względu na wielkość i ilości odprysków oraz niższe prędkości spawania i gorsze właściwości mechaniczne połączenia.

Do blach o gr. 2 mm – drut Ø0.8 mm,
2-20 mm - 1.2 mm
10-30 mm - 1.6 mm



Blachy cienkie (2 mm) spawamy napięciem < 26V, natomiast grube – 30-45V.



TIG - spawanie elektrodą nietopliwą (GMA)



W metodzie **TIG** łuk jarzy się między materiałem rodzimym, a **nietopliwą elektrodą wolframową**. Spawanie możliwe z materiałem dodatkowym lub bez niego. Temperatury występujące w

łuku w metodzie TIG są rzędu 6000 °C, a kolumna łuku ma kształt stożka.

Gaz osłonowy to **argon** lub **hel** albo ich mieszanina. Dodatkowo dodaje się tlenku azotu NO w celu stabilizacji łuku elektrycznego. Przy spawaniu stali austenitycznych stosuje się wodór.

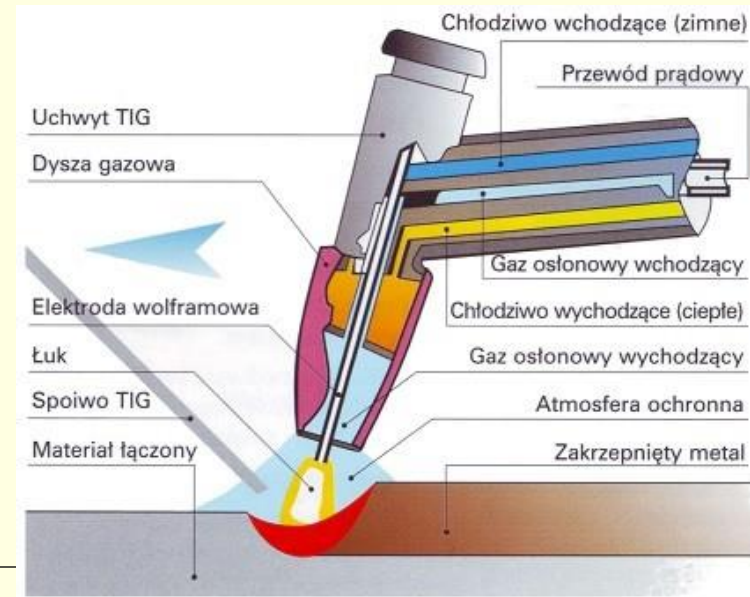
Zalety

- **najwyższa jakość spoin** w stalach niestopowych, nisko i wysoko stopowych, nierdzewnych oraz takich materiałach, jak Al, Cu, Ti, Ni i ich stopach,
- złącza najwyższej jakości i niezwykle czyste (nie powstaje żużel).

Wady: - niska wydajność,

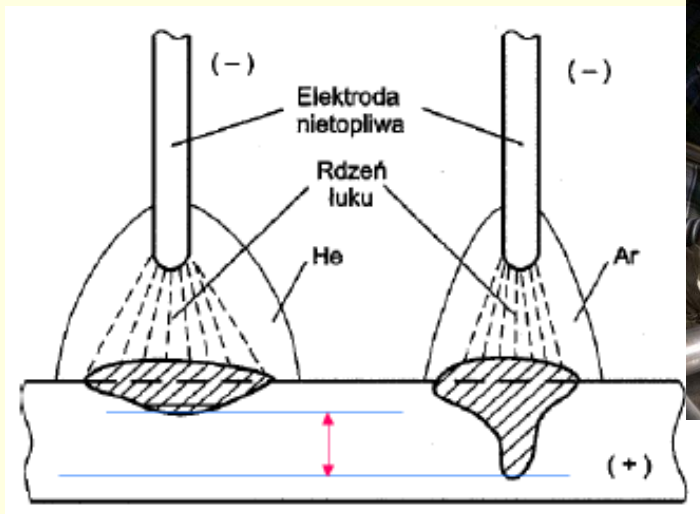
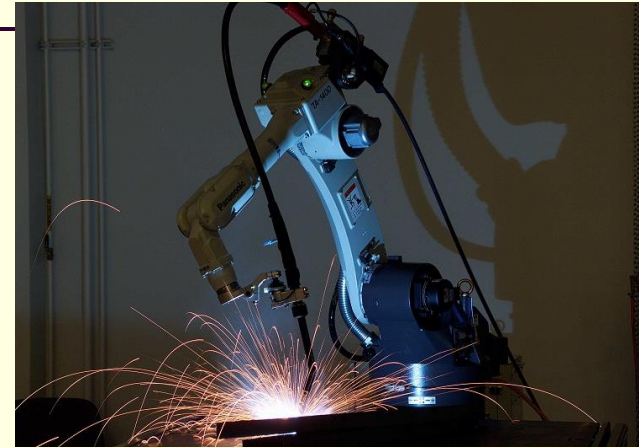
- wysokie kwalifikacje pracownika

Zastosowanie: przemysł nuklearny, lotniczy, chemiczny, spożywczy.



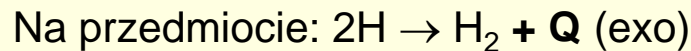
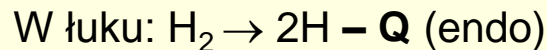
TIG - technologia

- ✓ Nietopliwa elektroda wolframowa $\varnothing 1 - 10$ mm,
- ✓ Natężenie 10-800 A; prędkość spawania 4 -40 cm/min, przepływ gazu 5-20 l/min,
- ✓ Można spawać we wszystkich pozycjach
- ✓ Zazwyczaj spawa się prądem stałym z biegunowością ujemną (oszczędza się elektrodę),
- ✓ Do aluminium można stosować prąd przemienny,
- ✓ Zazwyczaj spawa się ręcznie ale można spotkać automaty lub roboty TIG,
- ✓ Może być stosowane w produkcji jednostkowej lub seryjnej,
- ✓ Można spawać elementy o grubości od dziesiątych części milimetra do kilkudziesięciu mm.



Spawanie atomowe (wodorowe)

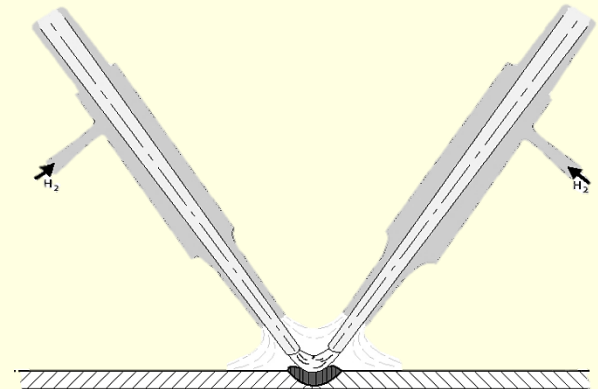
Spawanie atomowe jest zwane wodorowym, gdyż odbywa się w atmosferze wodoru. Dwie elektrody wolframowe umieszczone są w rurkach, przez które dopływa wodór. Podczas przejścia przez łuk elektryczny cząsteczki wodoru rozszczepiają się na atomy, pochłaniając ciepło. W zetknięciu zaś z chłodniejszym metalem łączą się, oddając ciepło i wytwarzając, wysoką temperaturę w miejscu spawania.



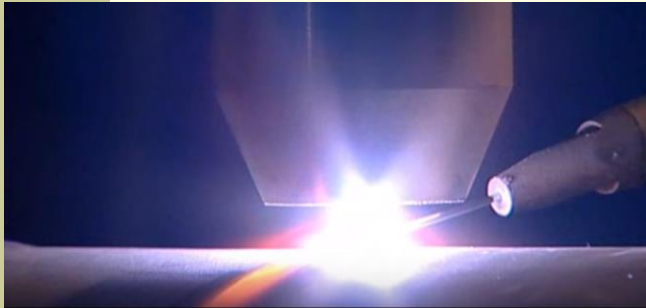
Zadania wodoru (H):

- jest nośnikiem ciepła z łuku do spawanego materiału,
- chroni przed dostępem atmosfery,
- zapobiega wypalaniu się składników stopowych,
- chroni elektrody przed zbyt szybkim utlenianiem się;

Metoda ta stosowana jest do spawania stali stopowych, kwasoodpornych i żarowytrzymałych, m.in. do naprawy narzędzi skrawających, matryc. Nie spawamy Cu.



Spawanie plazmowe (GTA)

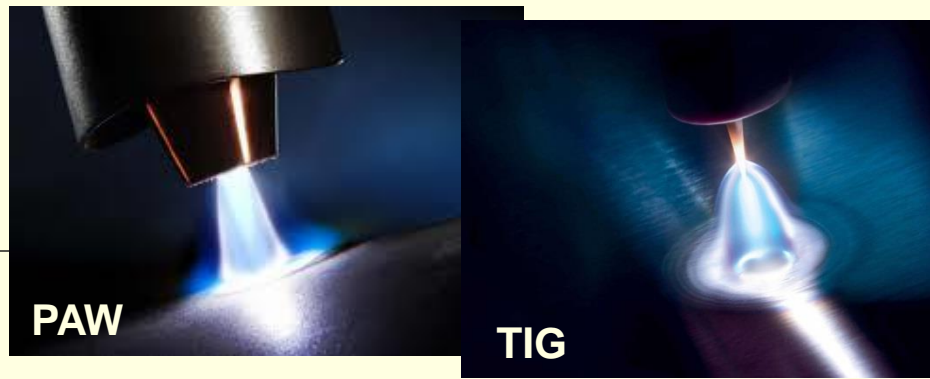
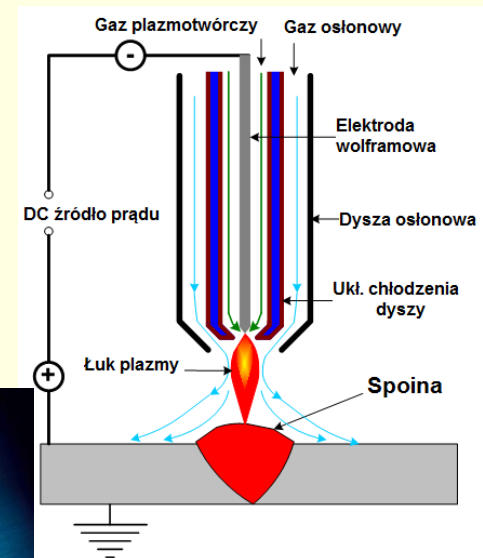


W **spawaniu plazmowym** (PAW *plasma arc welding*) źródłem ciepła jest łuk elektryczny jarzący się w **strumieniu plazmy** (zjonizowanym gazie). W skutek silnego zawężenia strumienia plazmy osiąga się **wysoką gęstość płynącego prądu** i temperatury rzędu 10000-30000 °C.

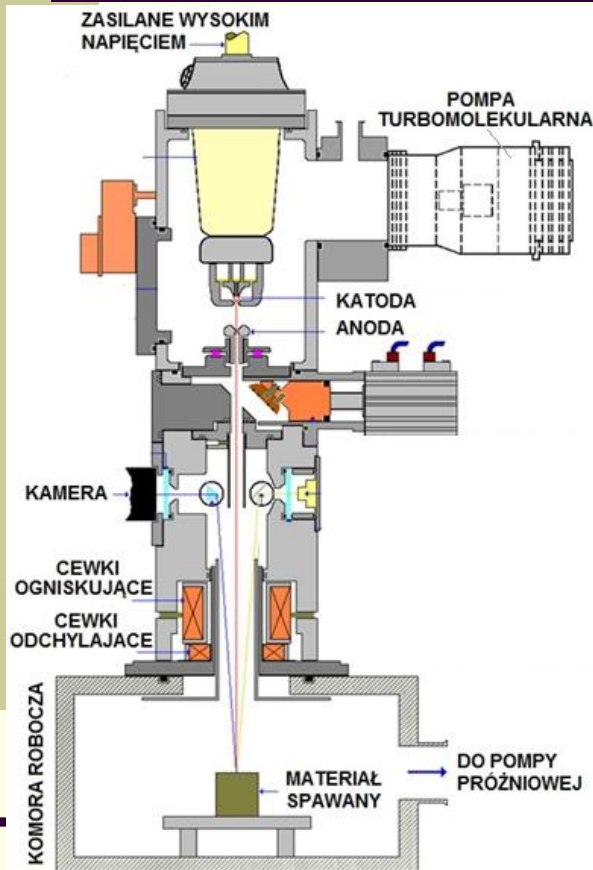
Zazwyczaj używamy elektrody nietopliwej – wolframowej. Gazem plazmowym jest Ar, He lub ich mieszanina, a ochronnym - Ar, He, N lub CO₂. Spoiwo może być dodawane lub nie. Przeważnie spawa się prądem stałym z biegunowością ujemną o natężeniu do 600A.

Skoncentrowana wiązka plazmy ma kształt zbliżonym do walca, co daje wąskie spoiny. Umożliwia również wykonanie w jednym przejściu spoiny o grubości do 15 mm. Umożliwia także uzyskiwanie prędkości spawania o 40–80 % większej niż przy metodzie TIG.

Stosowana do łączenia elementów z różnych metali lub grubości (od 0.01mm), w przemyśle lotniczym, chemicznym, spożywczym i elektronice.



Spawanie elektronowe

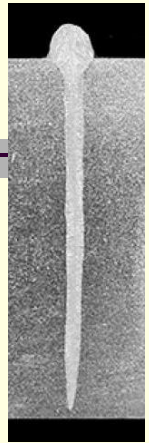


Spawanie elektronowe polega na nagrzewaniu miejsca łączenia przy pomocy wiązki elektronowej wytwarzanej przez działo elektronowej. Elektrony są przyspieszane napięciem 30-200kV. Proces spawania odbywa się w próżni rzędu 10^{-5} Tr. Spoina tworzy się przez stopienie brzegów łączonych detali.

Emitowane elektrony są przyspieszane w polu elektrycznym wysokim napięciem. System soczewek elektromagnetycznych pozwala na kształtowanie strumienia o średnicy poniżej 1mm. Prędkość spawania 0.1-10m/min, grubość łączonych elementów do 120 mm. Praktycznie brak strefy wpływu ciepła.

Technika ta pozwala łączyć metale (np. wolfram-miedź, niob-miedź), których nie daje się łączyć innymi technikami spawalniczymi. Ograniczenia ze względu na rozmiary komory.

Zastosowanie – głównie przemysł lotniczy i astronautyka, energetyka jądrowa, technika medyczna i próżniowa.



Spawanie laserowe

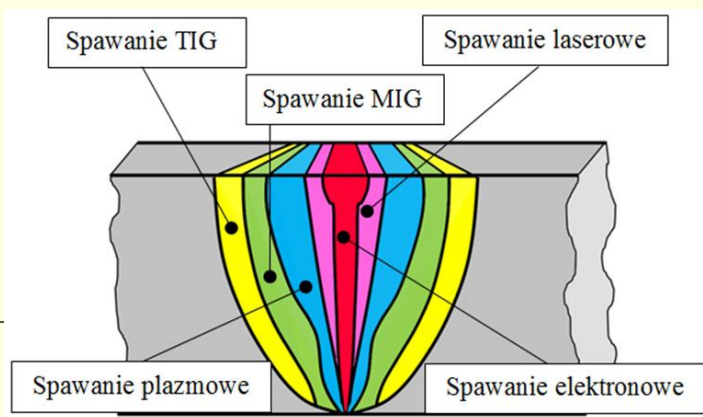


Spawanie laserowe polega na stapianiu łączonych elementów **wiązką promieni laserowych**. Prowadzone jest w osłonie gazu obojętnego lub w powietrzu i zapewnia dużą wytrzymałość spoin.

Wykorzystuje się wiązkę o dużej gęstości energii (ok. 1 MW/cm^2) czego efektem jest mała szerokość strefy wpływu ciepła i szybkie stygnięcie spoiny. Możliwa do uzyskania szerokość

spoin to 0.2–13 mm, ale praktycznie wykonywane są spoiny wąskie i głębokie. Maksymalizację przenikania wiązki uzyskuje się ustawiając ognisko wiązki nieco poniżej powierzchni łączonych materiałów.

Spawanie laserowe stosowane jest do spawania praktycznie wszystkich metali i stopów, zwłaszcza stali wysokowytrzymałych, metali trudnotopliwych i aktywnych chemicznie, aluminium i tytanu. Duże zastosowanie w przemyśle samochodowym i w budowie statków.



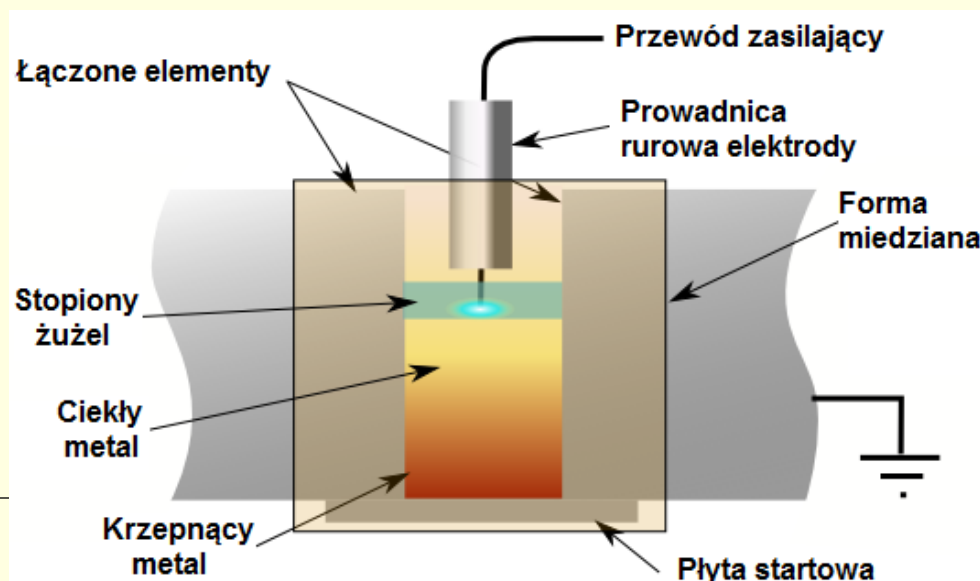
Spawanie elektrożuźłowe (ESW)

Spawanie elektrożuźłowe jest stosowane do wykonywania spoin czołowych w pozycji pionowej. Elementy o grubości powyżej 15 mm mogą być wykonywane jednym przejściem. Metoda ta jest podobna do pionowego odlewania, ponieważ stopiony metal spoiny jest zawarty pomiędzy dwoma spawanymi płytami i parą chłodzonych bocznych przykładek miedzianych.

Spawanie rozpoczyna się zapłonem łuku elektrycznego. Z chwilą pojawienia się ciekłego metalu, stopiony żużel gasi łuk, a elektrody podawane w sposób ciągły topią się dalej w procesie nagrzewania rezystancyjnego w kąpeli żuźłowej. Topi ona również przylegające brzegi spawanej płyty i chroni ciekły metal przed wpływem atmosfery. Formowanie spoiny następuje jednocześnie na całej jej długości. Temperatura kąpeli wynosi około 1.900°C .

W miarę postępu procesu spawania, całość zespołu przesuwa się w górę z prędkością ok. 30 mm/min. Technologia zalecana tylko do stali austenitycznych.

Zastosowanie – spawanie grubościennych (~400 mm) elementów zbiorników ciśnieniowych, konstrukcyjnych i kadłuby okrętów.



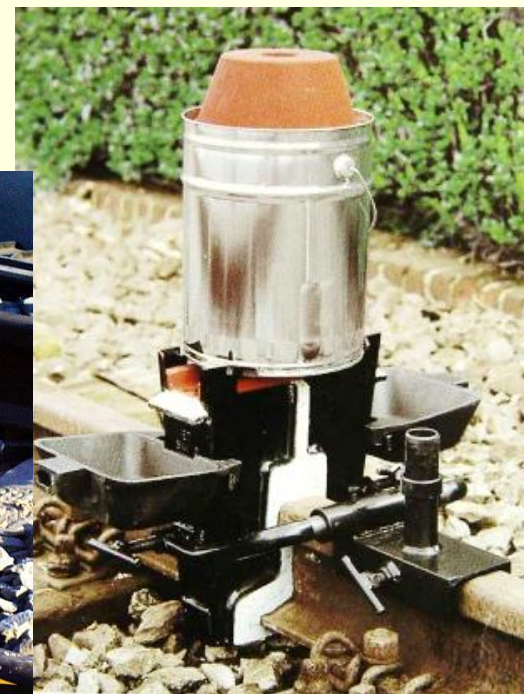
Spawanie termitowe



Jest to technika łączenia metali wykorzystująca **reakcję termitową** - silnie egzotermicznej reakcji redoks glinu i tlenków metali (żelaza), czemu towarzyszy uzyskanie temperatury ok. 3000 °C.

Produktem reakcji jest tlenek glinu (żużel) oraz płynne żelazo, które wypełnia wewnętrzne powierzchnie styku łączonych elementów. Powstałe złącze jest bardzo wytrzymałe, odporne na korozję i przewodzi dobrze prąd elektryczny.

Zastosowanie – służy do spawania grubych bloków (np. szyny kolejowe) bez potrzeby użycia ciężkiego sprzętu.



Lutowanie - wprowadzenie



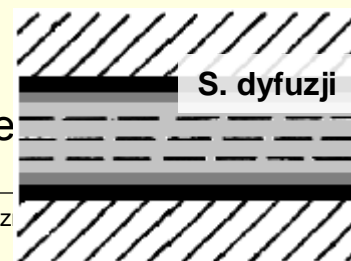
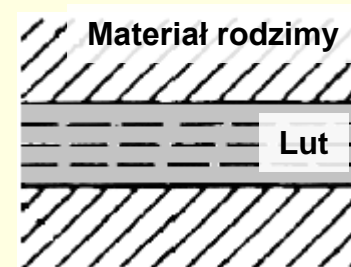
Lutowanie to proces termicznego łączenia przedmiotów (metalowych oraz ceramicznych) w stanie stałym za pomocą dodatkowego, roztopionego metalu, zwanego lutem, którego temperatura topnienia jest niższa niż temperatura topnienia łączonych tworzyw.

Mechanizm tworzenia się złącza lutowanego ma z reguły charakter adhezyjno-dyfuzyjny i można podzielić go na następujące stadia:

- 1) zwilżanie i rozplýwanie się lutu po powierzchni metalu,
- 2) kapilarne wnikanie lutu w szczeliny połączenia i mikronierówności powierzchni,
- 3) wzajemna rozpuszczalność materiału rodzimego i spoiwa,
- 4) tworzenie silnych wiązań międzatomowych na drodze dyfuzji i tworzenia roztworów stałych.

Przypadki tworzenia złącza lutowanego:

- a) ciekły lut nie oddziałuje na metal rodzimy i połączenie ma charakter zwykłego przylegania spowodowanego adsorpcją,
- b) ciekły lut rozpuszcza w sobie metal rodzimy lub jego składniki (dyfuzja i/lub tworzenie faz międzymetalicznych)
- c) ciekły lut lub jego składniki dyfundują w materiał rodzimy
- d) ciekły lut i metal tworzą na powierzchni styku fazy międzymetaliczne



Zwilżalność

Zjawisko **zwilżania** powierzchni metalu przez ciekły lut zachodzi, gdy siły **adhezji** (przyciągania między cząsteczkami lutu i WW lutowanych metali) są większe od sił kohezji (siły spójności między cząsteczkami ciekłego lutu).

Miarą zwilżania nazywamy kosinus kąta zwilżenia φ

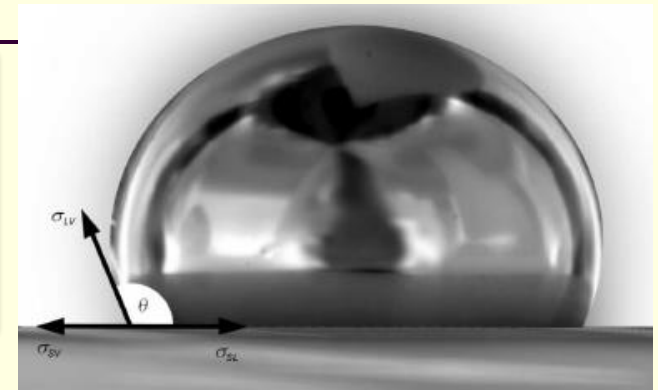
$$\cos \varphi = \frac{\delta_{SV} - \delta_{SL}}{\delta_{LV}}$$

δ_{LV} – nap. powierzchniowe na granicy fazy ciekłej i gazowej

δ_{SV} – nap. powierzchniowe na granicy fazy stałej i gazowej

δ_{SL} – nap. powierzchniowe na granicy fazy stałej i ciekłej

$\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$) – idealne zwilżanie.

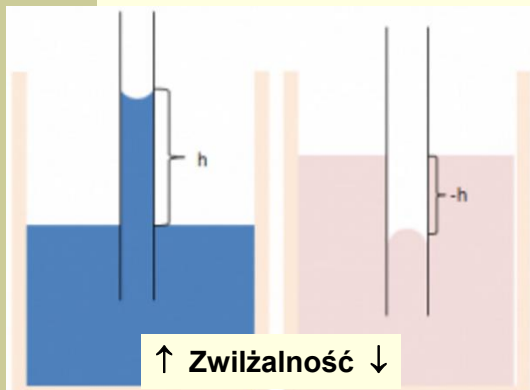


W procesie lutowania roztopione metale i stopy charakteryzują się różnymi wartościami napięcia powierzchniowego:

- zastosowanie **topników** powoduje usuwanie warstewek tlenków z powierzchni metali co skutkuje wzrostem napięcia powierzchniowego (δ_{SV}),
- wzrost **temp. lutowania** oraz wprowadzenie do lutu pierwiastków powierzchniowo-aktywnych (**Na, Bi, Pb**) zmniejsza napięcie powierzchniowe (δ_{SL}) lutów.

Najlepsze wyniki uzyskuje się, gdy lutowane powierzchnie **wykazują pewną chropowatość** (istniejące drobne nierówności, rysy i zadrapania tworzą siatkę naczyń włoskowatych ułatwiającą rozplýwanie się ciekłego lutu i sprzyjającą szybkiemu wypełnieniu szczelin między łączonymi powierzchniami).

Włoskowatość i rzadkoplłynność lutów



Zwilżalność powierzchni ściśle łączy się z zjawiskiem **włoskowatości**, czyli podciąganiem cieczy znajdującej się w wąskiej rurce, tzw. naczyniu włoskowatym, kapilarze lub szczelinie pełniącej tą samą funkcję.

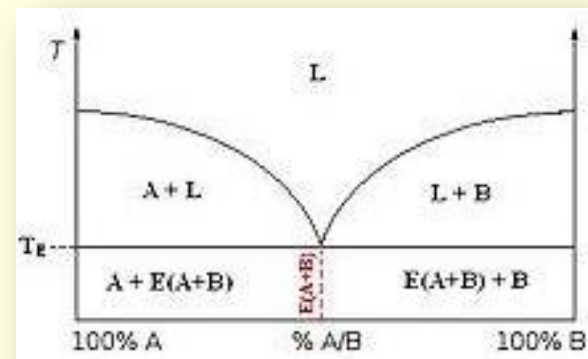
Włoskowatość w procesie lutowania powoduje **szczelne wypełnienie lutem** przestrzeni między powierzchniami lutowanymi (przy dobrej zwilżalności i właściwej wielkości szczeliny).

Lejność lutów (rzadkoplłynność) - j.t. zdolność ich do **wypełniania szczelin** między łączonymi powierzchniami pod działaniem siły ciężkości i zależy od temperatury krystalizacji (różnica między likwidusem i solidusem).

Im różnica tych temp. jest większa, tym lejność jest gorsza. Dlatego luty powinny odznaczać się małym zakresem krzepnięcia, stąd też jako luty najlepsze są czyste metale albo stopy o składzie eutektycznym.

Czynniki wpływające na budowę złącza lutowanego

- **skład chemiczny** lutu i metalu lutowanego
- temperatura procesu
- ochrona złącza przed utlenianiem
- wielkość szczeliny między łączonymi powierzchniami
- czystość łączonych powierzchni
- metoda lutowania



Własności dobrego lutu

- ✓ Temperatura topnienia T_c lutu znacznie **niższa** niż lutowanych metali;
- ✓ Dobra zwilżalność powierzchni w stanie ciekłym powierzchni lutowanych części;
- ✓ Dobre powinowactwo chemiczne do łączonych metali, pozwalające na tworzenie z nimi roztworów stałych;
- ✓ Dobra płynność w stanie roztopionym;
- ✓ Możliwie najmniejszy zakres krystalizacji;
- ✓ Odpowiednia wytrzymałość i plastyczność
- ✓ Zbliżony współczynnik rozszerzalności cieplnych do metali łączonych;
- ✓ Odporność na korozję nie gorsza niż metali łączonych;
- ✓ Znaczna odporność na utlenianie w zakresie T_c .



Podstawowy podział metod lutowania uzależniony jest od temperatury topnienia spoiwa.

Rozróżnia się lutowanie miękkie i twarde.



Rodzaje lutowania

Miękkie – temperatura topnienia spoiwa $T < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ - stosowane w celu otrzymania połączeń szczelnych, obciążonych niewielkimi siłami oraz w elektrotechnice.

Twarde – temperatura topnienia spoiwa $T > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ – stosuje się w celu otrzymania połączeń narażonych na duże obciążenia, np. do łączenia blach karoseryjnych, kształtowników, części mechanizmów i narzędzi skrawających oraz w elektrotechnice.

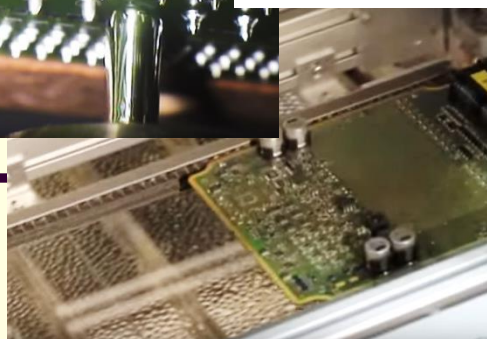
Reakcyjne (stosowane do lutowania aluminium i jego stopów)



Miedź - stal nierdzewna



Lutowanie na fali



Mosiądz - stal nierdzewna



Wyróżniamy następujące metody lutowania:

- za pomocą lutownicy,
- piecowe,
- kąpielowe,
- indukcyjne,
- płomieniowe,
- mikrofalowe
- strumieniem gorących gazów,
- elektryczne oporowe i indukcyjne.



Lutowanie termiczne

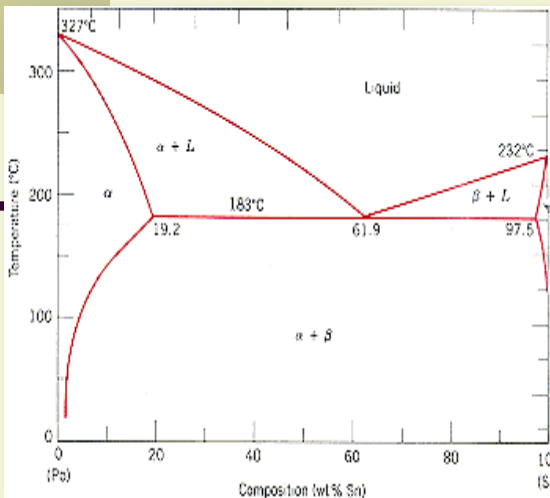
Luty miękkie

Ogólnie **luty miękkie** charakteryzują się niską temperaturą topnienia, twardością i wytrzymałością, ale za to dobrą plastycznością.



Ze względu na skład chemiczny dzielimy je na luty:

- 1) cynowo-ołowiowe** – przy 38.1% Pb tworzy się eutektyka o stałej temp. 183 °C. Ze względu na najwyższą twardość oraz wytrzymałość, praktyczne znaczenie mają luty o składzie około eutektycznym Sn(59-61)%.
Luty miękkie stosuje się do lutowania wszystkich metali oprócz aluminium i jego stopów.
- 2) kadmu** – Cd-17.7Zn (%) lut. stopów Zn z dodatkiem Al;
- 3) cynku** – stopy Zn z Al, Cd, Sn, Cu, Pb, - lut. chłodnic, kolektorów silników elektrycznych;
- 4) bizmutu** – Bi-8.2Cd-22.4Pb-10.8Sn-18In (%) o $T_c = 46.5\text{ °C}$, do lut. metali, które nie mogą być nagrzewane do wys. temp. z powodu stykania się z materiałami mogącymi ulec zniszczeniu (tworzywa sztuczne, tkaniny, drewno);
- 6) indu** - In-48Sn oraz In-3Ag (%) - stosowane w technice wysokiej próżni do łączenia części szklanych i kwarcowych z metalami;
- 7) galu** – stopy eutektyczne najniżej topliwe, np. Ga-25In-13Sn-1Zn o $T_c = 3\text{ °C}$, do lutowania części np. w automatycznych urządzeniach sygnalizacyjnych.



Luty twarde

Ogólnie **luty twarde** charakteryzują się wysoką temperaturą topnienia (400-2000) °C, tworzeniem roztworów stałych i faz międzymetalicznych oraz dużą wytrzymałością na rozciąganie 200-700 MPa.



- 1) **luty na osnowie Cu** - $T_c = 1350$ °C, dobrze zwilża łączone metale – tworząc wytrzymałe i plastyczne połączenia (również mosiądze). Do lut. stali węglowych, stopowych, szybkołądzących, żeliw i stopów żarowytrzymałych, płytek z WC.
- 2) **srebra** - Ag-28.1Cu (%) – $T_c = 779$ °C – połączenia w elektrotechnice;
- 3) **złota** - Au-Cu, Ni – lut. aparatury próżniowej lub pracujących w wys. temp., jubilerskie
- 4) **platyny** – Pt-30Ag i Pt-70Au ($T_c < 1550$ °C) – lut. części trudno spajalnych z Mo, W, Tr;
- 5) **palladu** – bardzo dobra zwilżalność większości metali i odporność na korozję, stosowane do lutowania Ni, Be, Au, Mo, Zr, W i stopów żarowytrzymałych;
- 6) **niklu** – z Cr, Si lub B – lut. elementów konstrukcyjnych pracujących w wysokich temperaturze i dużym obciążeniem (np. elementy silników lotniczych), stopy Zr;
- 7) **manganu** – z Ni – lut. stali odpornych na korozję i żarowytrzymałych stopów Ni;
- 8) **aluminium** - z Si – lut. Al i jego stopów, Al-Si + Ge, itr, ind do beztopnikowego lutowania w wysokiej próżni lub w atmosferze ochronnej;
- 9) **magnezu** - Al-Zn lub Al-Cd ($T_c < 600$ °C) - stosowane do lutowania stopów Mg;
- 10) **tytanu** - z V, Be, Cr, Cu, Ni – do lut. Nb, Ta, Ti, ceramiki i grafitu ze sobą i z metalami;
- 11) **wanadu, cyrkonu i hafnu**



Rola topników

W procesie lutowania niekorzystnym zjawiskiem jest tworzenie się trudno topliwych związków niemetalicznych (tlenków). Przeciwdziałają temu **topniki**, które rozpuszczają i usuwają te związki z powierzchni łączonych elementów i stopionego lutu. Chronią również złącze przed działaniem gazów atmosferycznych i poprawiają zwilżalności poprzez zmniejszenie napięcia powierzchniowego ciekłych lutów.

- ❑ Topniki chemicznie aktywne (korodujące) - oczyszczają powierzchnię metalu na drodze reakcji chemicznych, np. salmiak,
- ❑ Topniki chemicznie nieaktywne - nie wywołują korozji, zabezpieczają powierzchnie lutowane przed działaniem gazów atmosferycznych,
- ❑ Topniki reakcyjne - stosowane przy lutowaniu Al i jego stopów.

Topniki do lutowania miękkiego

Aktywne – roztwory wodne lub alkoholowe: **chlorki** (Zn, NH_4 , K), **kwasy** (HCl, ortofosforowy)

Nieaktywne (bezkwasowe) - oparte na kalafonii i tłuszczach zwierzęcych, najczęściej chlorek cynku (ZnCl_2), który usuwa tlenki metali (przechodzą do topnika), mogą być stosowane do lutowania prawie wszystkich metali i stopów.

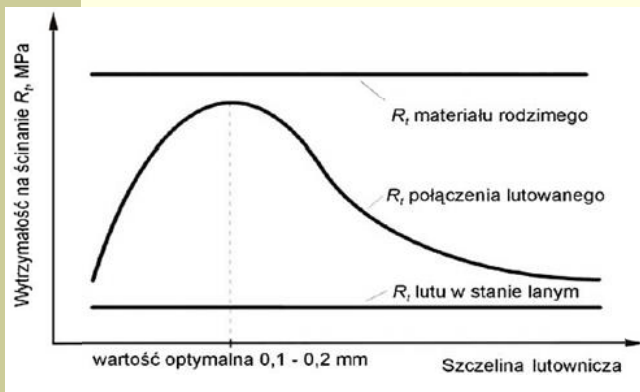
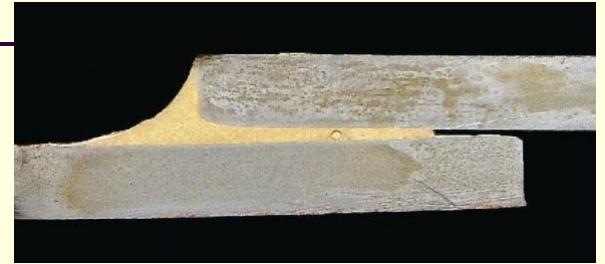
Topniki do lutowania twardego

Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$) – stosowany do lut. prawie wszystkich metali, których $T_c > 741\text{ }^\circ\text{C}$. W praktyce najczęściej stosuje się mieszaninę boraksu i kwasu borowego.

Połączenia lutowane

Wymagania stawiane złączom lutowanym

- Odpowiednia wytrzymałość mechaniczna
- Dobra przewodność elektryczna
- Szczelność

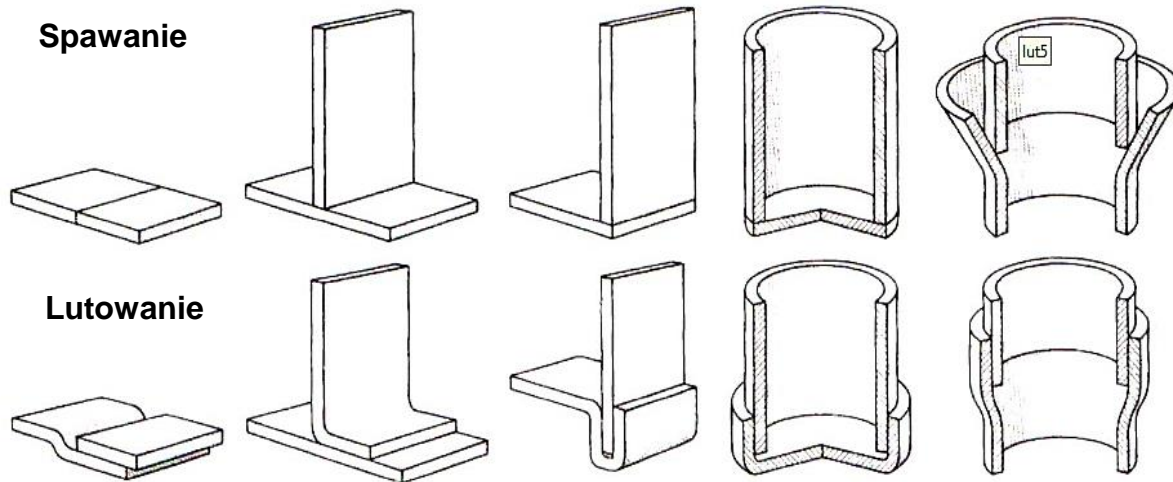


Złącza lutowane należy projektować tak, aby występowały w nich w miarę możliwości, tylko **naprężenia ścinające lub ściskające**. Natomiast połączenie klinowe stosuje się, gdy złącze ma przenosić obciążenia skręcające.

Szerokość szczeliny lutowniczej zależy od:

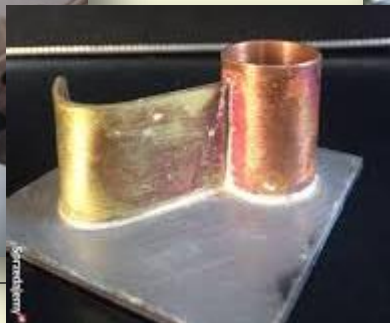
- Rodzaju lutowanych materiałów, np. miedź wymaga szerszej szczeliny, a mosiądz węższej,
- Rodzaj lutu - wzrost zawartości cyny w lucie podnosi wytrzymałość złącza.

W lut. miękkim $s = 0.07-0.3$ mm, największa wytrzymałość połączenia dla $s = 0.1-0.2$ mm.



Proces technologiczny lutowania

1. Oczyszczenie łączonych elementów z tlenków, powłok, tłuszczu, brudu itp. Wyróżniamy czyszczenie mechaniczne (skrobanie) i chemiczne (trawienie);
2. Przygotowanie niezbędnego sprzętu i środków pomocniczych;
3. Cynowanie (pobielanie) – w celu ułatwienia lutowania, łączone powierzchnie pokrywa się wstępnie cyną (np. metodą zanurzeniową lub galwanicznie), później wystarczy docisnąć oba elementy gorącą lutownicą, a topiący się lut bez problemów utworzy złącze;
4. Poprawny montaż łączonych części przed procesem lutowania jest warunkiem koniecznym do uzyskania poprawnie wykonanej konstrukcji. W tym celu często wykonuje się punktowe lutowania szczepne, tak jak przy spawaniu.
5. Lutowanie zasadnicze;
6. Oczyszczanie powierzchni lutowanych z pozostałości substancji pomocniczych;
7. Kontrola jakości złącza.

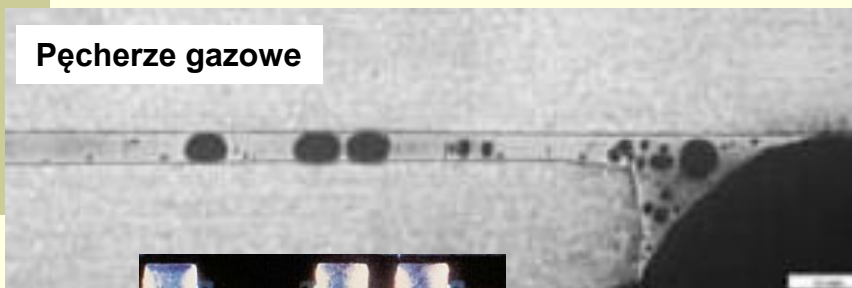


Błędy przy lutowaniu

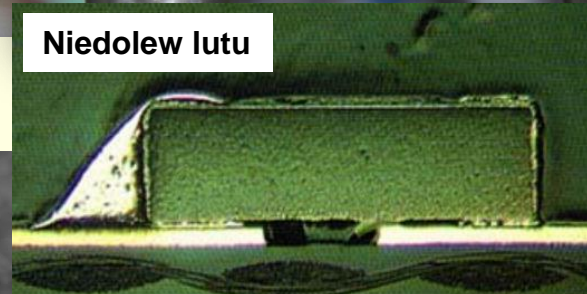
1. Porowatość lub pęcherze powietrzne pomiędzy łączonymi elementami,
2. Przesunięcia elementów,
3. Niewłaściwe wypełnienie szczeliny, nadmiar lub niedobór spoiwa
4. Pęknięcia spoiny,
5. Nieprawidłowy kształt złącza,
6. Zimne luty,
7. Zanieczyszczenie lutu,
8. Zły dobór spoiwa i metody lutowania.



Pęcherze gazowe



Niedolew lutu



Zimny lut



Brak wypełnienia szczeliny



Wojskowa

Kruche pęknięcie



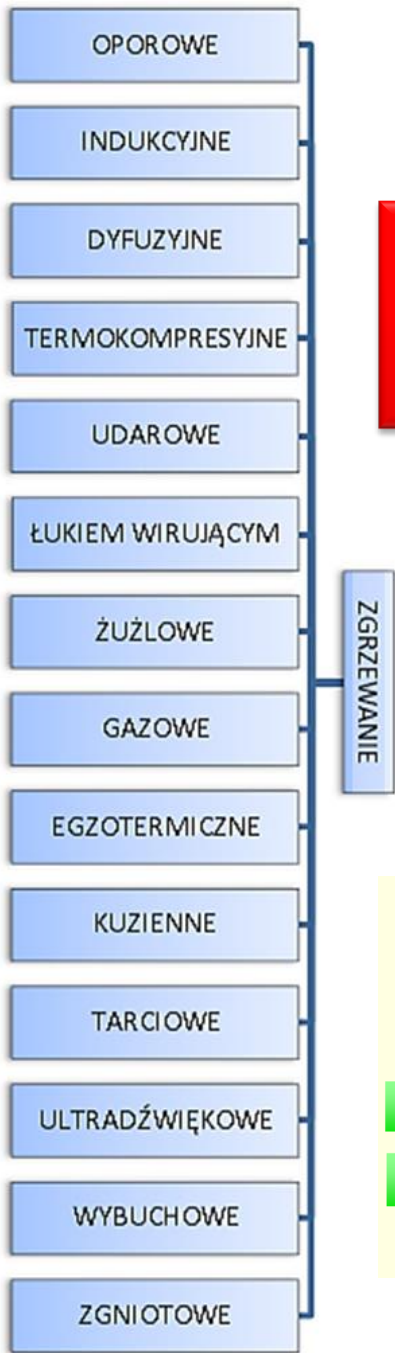
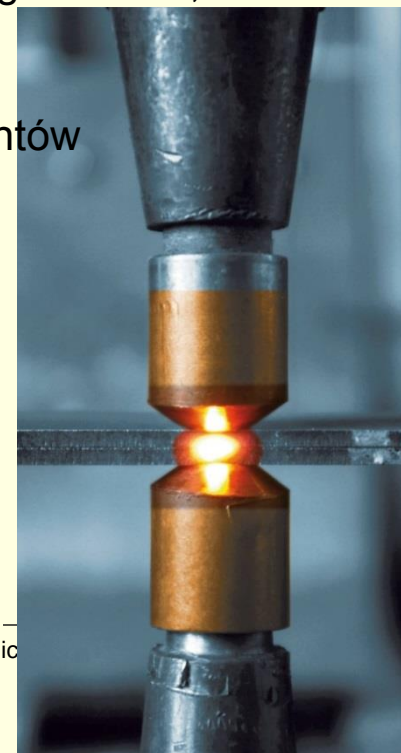
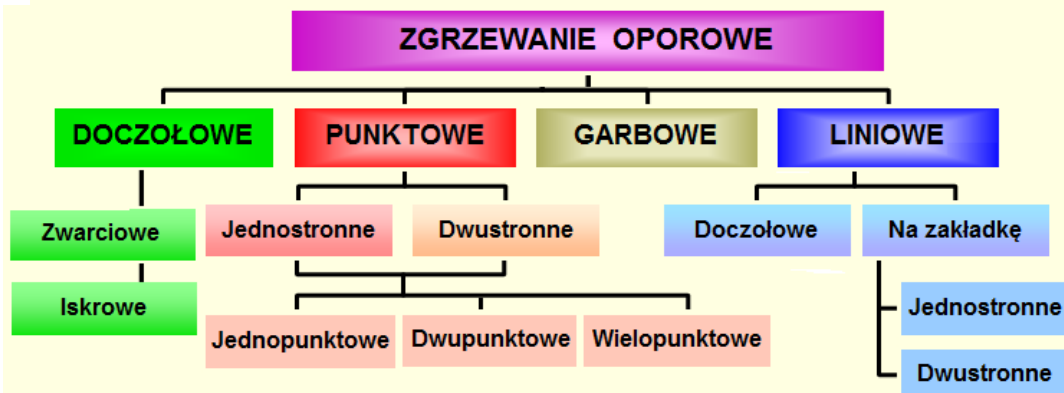
Zgrzewanie



Zgrzewanie to proces termicznego spajania metali (bez użycia materiału dodatkowego, spoiwa), polegający na nagraniu metali w miejscu ich styku do stanu plastycznego (lub nawet ciekłego) oraz wywarcia silnego docisku na łączone elementy.

W wyniku nagrzania i silnego docisku zachodzą **procesy dyfuzyjne** powodujące „zrastanie się” ziaren metalu w miejscu styku i trwałe połączenie części. Docisk jest warunkiem koniecznym dla uzyskania połączenia – niezależnie od metody zgrzewania, która zależy od:

- rodzaju energii użytej do nagrzewania
- sposobu jej doprowadzenia do m-ca styku elementów
- sposobu wywarcia docisku



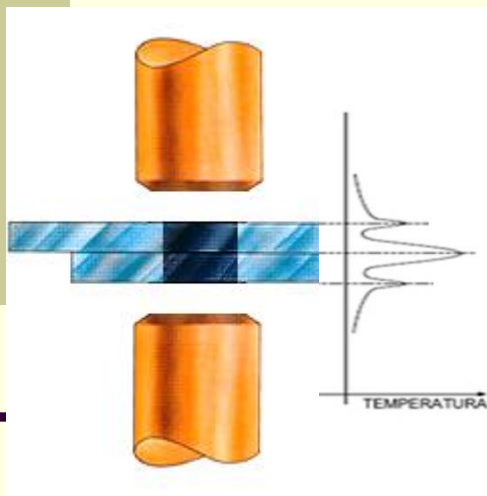
Zgrzewanie elektryczne oporowe



Przy **zgrzewaniu oporowym** zgrzewane części włączone są w obwód elektryczny. Ze względu na większą moc, przeważnie spotykane są zgrzewarki prądu przemiennego. Przepływający prąd powoduje wydzielanie się ciepła na opornościach elektrycznych obwodu zgodnie z prawem Joule'a-Lenza:

$$Q = I^2 R t$$

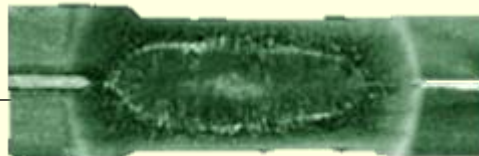
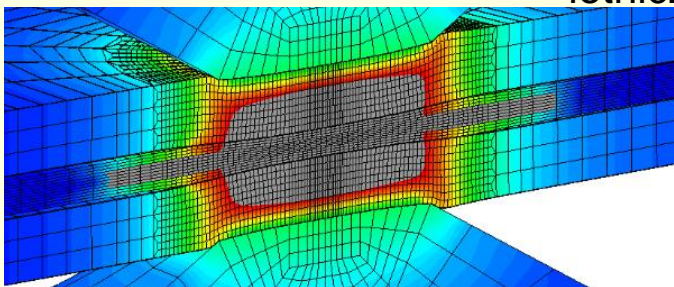
Należy dążyć do możliwie dużego natężenia prądu i krótkiego czasu jego przepływu.



Istotny wpływ na ilość generowanego ciepła ma oporność elektryczna styku łączonych elementów. Powierzchnie łączonych części powinny być starannie oczyszczone. Elektrody wykonywane są z miedzi i intensywnie chłodzi. Spoinę tworzy jedna lub więcej zgrzein, a elementy są zazwyczaj łączone na zakładkę.

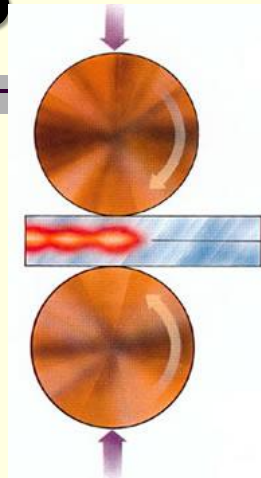
Zastosowanie do:

- większości metali i ich stopów,
- w przemyśle samochodowym i lotniczym do spajania arkuszy blach
- w elektronice.



Rodzaje zgrzewania elektr. oporowego

Zgrzewanie punktowe polega na tworzeniu miejscowych (punktowych) trwałych połączeń w wyniku przepływu prądu w ograniczonym obszarze. Występuje problem z „bocznikowaniem prądu” (pomniejszenie prądu o wartości płynące w odgałęzieniach).



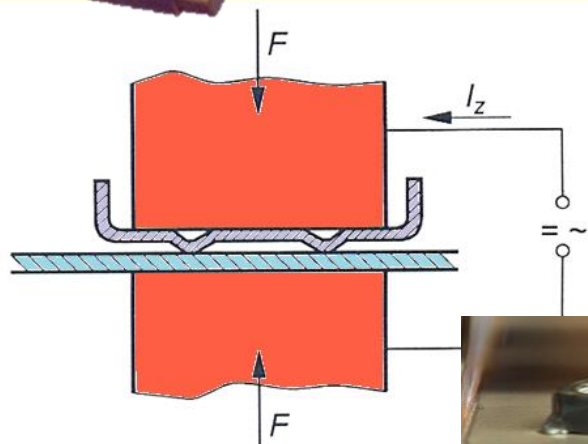
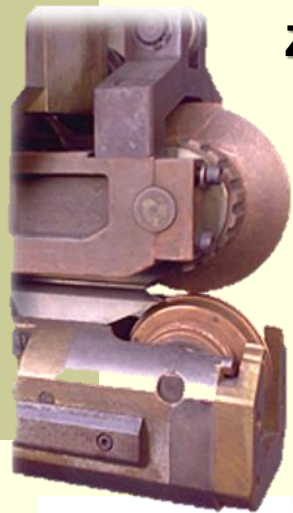
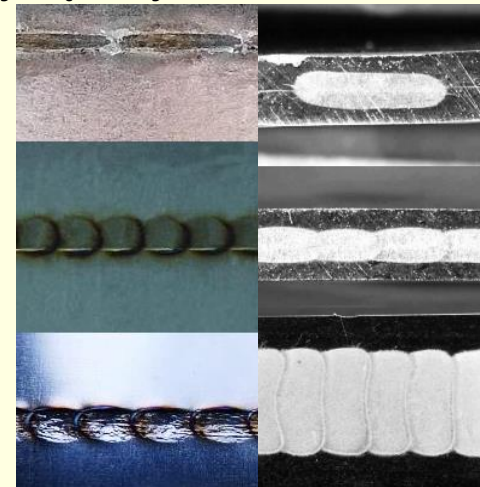
Zgrzewanie liniowe - metoda zgrzewania oporowego umożliwiającą wykonywanie szczelnych, ciągłych zgrzein za pomocą elektrod krążkowych. Zgrzewanie najczęściej realizowane jest prądem przerywanym (on/off), przy stałej sile nacisku i prędkości.

Zgrzewanie garbowe - zgrzeina powstaje w miejscu kontaktu specjalnie ukształtowanego garbu – wybrzuszenia lub występu technologicznego.

Łączenie elementów może odbywać się jednocześnie

w kilku punktach (odpowiednio duże elektrody obejmują wszystkie punkty, które mają być zgrzane w jednej operacji) – tworzone są złącza zakładkowe lub doczołowe

Zastosowanie: do zgrzewania blach z śrubami, nakrętkami, prętami, rurami, uźebrowaniem oraz krzyżowe drutów.

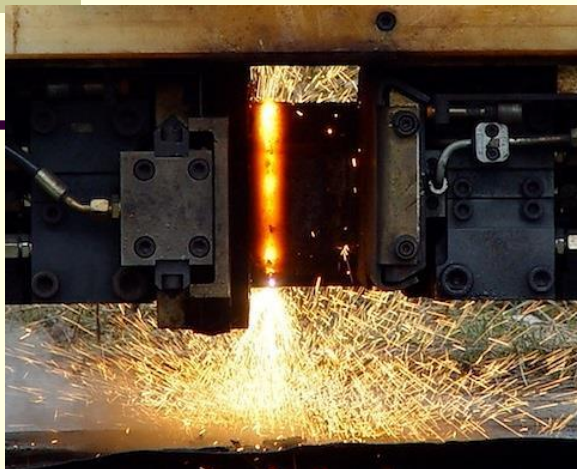


Zgrzewanie elektryczne doczołowe

Zgrzewanie doczołowe pozwala łączyć doczołowo elementy takie jak pręty, rury, taśmy, kształtowniki. Proces zgrzewania polega na dociśnięciu do siebie powierzchni czołowych elementów, a następnie nagraniu strefy styku prądem.

Zgrzewanie doczołowe oporowe - zgrzewane elementy muszą stykać się powierzchniami czołowymi. W chwili docisku włączany jest przepływ prądu – powierzchnie czołowe są nagrzewane i powstaje równomiernie spęczone złącze.

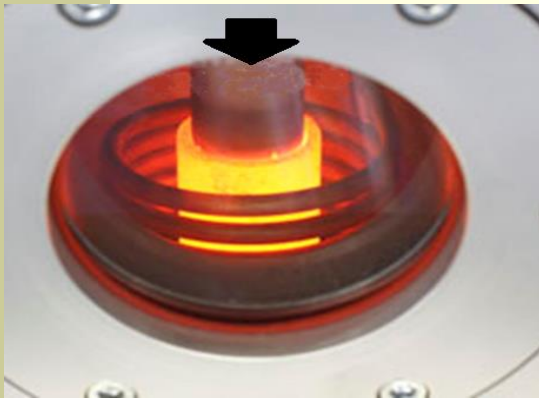
Do łączenia stali węglowych, niskostopowych, Cu i Al. Zgrzewać można blachy, rury, pręty o przekroju do 1000 mm². Wytrzymałość 70-100% wytrzymałości materiału rodzimego.



Zgrzewanie doczołowe iskrowe – połączenie uzyskuje się zbliżając i oddalając od siebie elementy łączone do których jest doprowadzone napięcie. Wyiskrzanie (wypalanie pow. złącza i uzyskanie gładkiej, czystej powierzchni) następuje w skutek dużej gęstości prądu przepływającego przez punkty styku na zbliżanych powierzchniach.

Zgrzewać można elementy o przekroju do 6000 mm², a pręty do średnicy 300mm. Znacznie szerszy zakres stosowania.

Zgrzewanie - dyfuzyjne



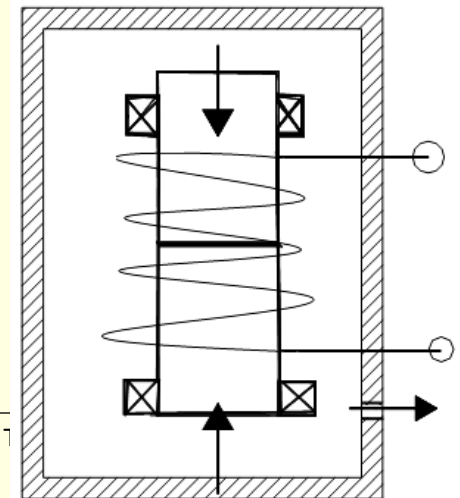
Zgrzewanie dyfuzyjne jest metodą zgrzewania w stanie stałym, w której łączenie czystych powierzchni następuje na skutek zjawisk **adhezji i dyfuzji** z wykorzystaniem materiału pośredniczącego lub bez. Dociskane elementy są nagrzewane do temperatury poniżej solidusu. Proces jest prowadzony w komorach próżniowych lub w atmosferze ochronnej.

Warunkiem **adhezji** jest zbliżenie zgrzewanych powierzchni na odległość działania sił atomowych. Wysoka temperatura i docisk umożliwiają zwiększenie rzeczywistej powierzchni styku przez odkształcenie plastyczne WW. Dochodzi do rozerwania i częściowego zniszczenia warstewek tlenków oraz odsłonięcie czystych metalicznie powierzchni. Odpowiednio wytrzymałe połączenie uzyskuje się w drugim etapie procesu, wskutek **dyfuzji**, czyli przemieszczenia atomów z jednego ciała do drugiego.

Podstawowymi parametrami procesu są:

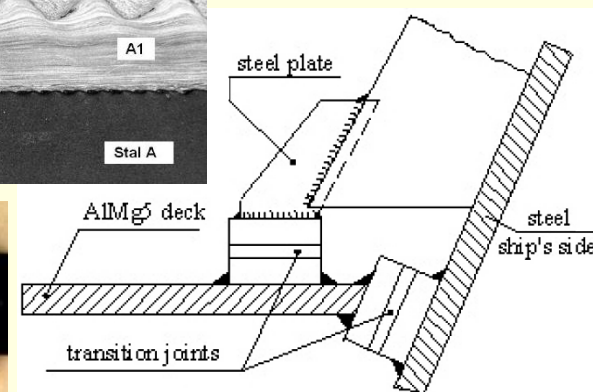
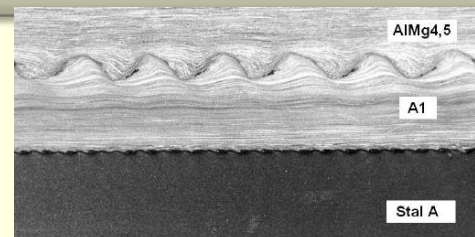
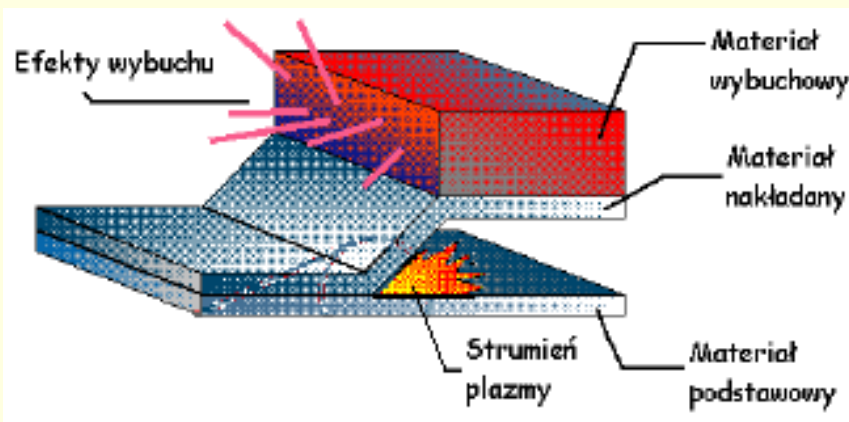
- temperatura (wywiera decydujący wpływ na proces dyfuzji),
- docisk,
- czas zgrzewania,
- stan powierzchni łączonych elementów.

Zastosowanie: do zgrzewania metali z niemetalami lub ceramiką, w elektronice, przemyśle precyzyjnym, narzędziowym i lotniczym.



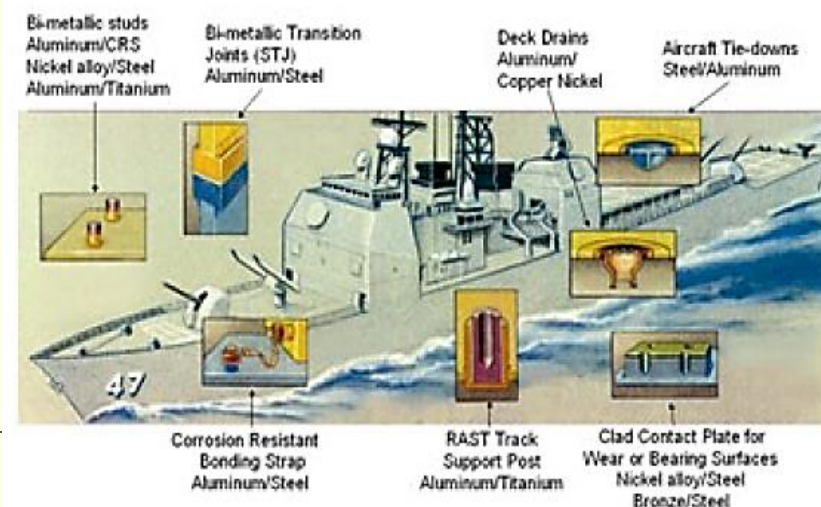
Zgrzewanie wybuchowe

Jest to rodzaj spajania, w którym połączenie następuje w wyniku dynamicznego dociskania (300-1500 m/s) dwóch lub więcej elementów, wywołanego lokalną eksplozją materiału wybuchowego.

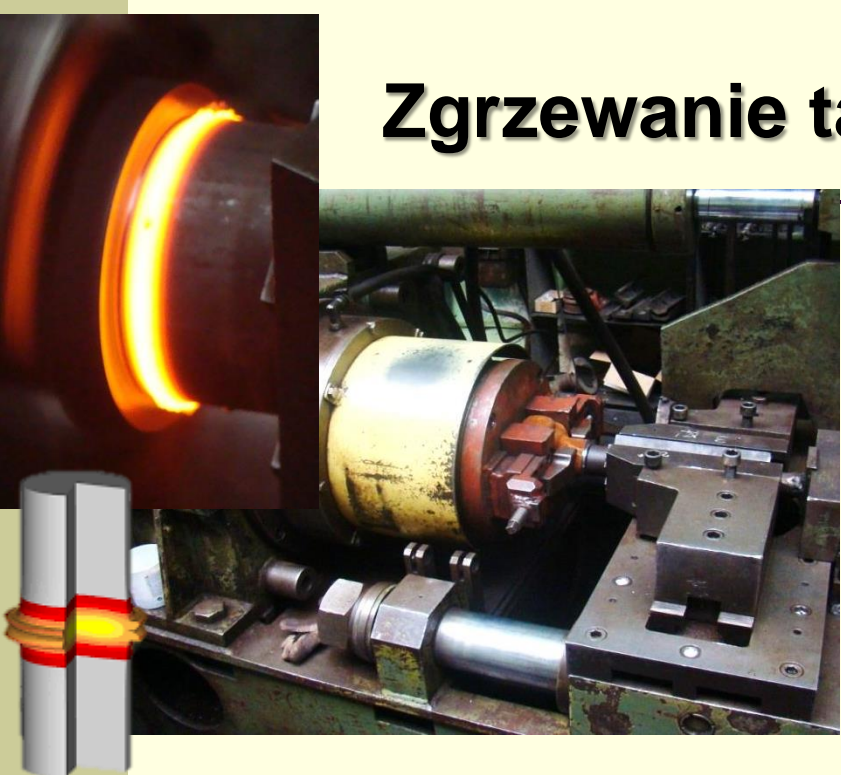


Zalety:

- Możliwość spajania metali trudnospajalnych, np. stal z Al,
- Bardzo dobre własności mechaniczne,
- Brak zmiany składu chemicznego i grubości łączonych elementów,
- Duża odporność połączeń na korozję i działanie wysokiej temperatury,
- Stosunkowo niski koszt procesu.



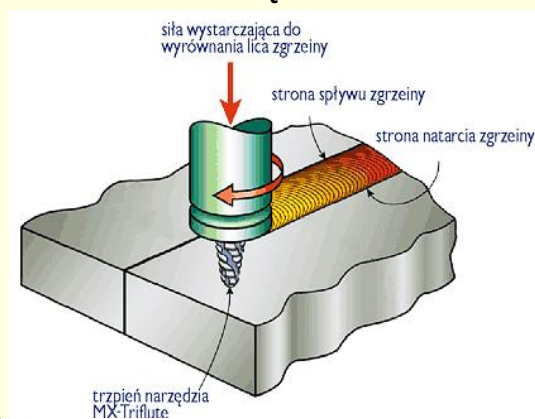
Zgrzewanie tarciove i zgniotowe



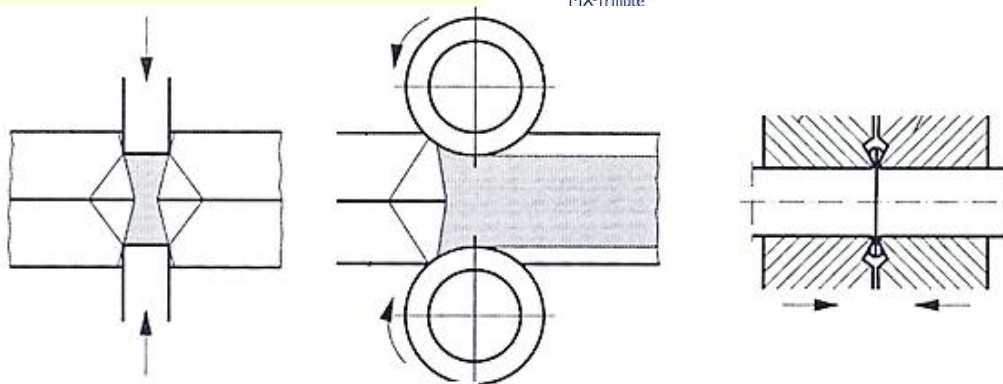
Zgrzewanie tarciove polega na nagraniu łączonych elementów ciepłem wydzielającym się w trakcie ich wzajemnego **tarcia** w obszarze styku. Proces prowadzony jest w stanie stałym poniżej temperatury solidus, a połączenie uzyskuje się dzięki zjawiskom pełzania i dyfuzji cząstek w obszarze łączenia.

Siła docisku 20-400 MPa,
400-3600 obr/min.

Zalety: duża wydajność,
niskie koszty, b. dobre
właściwości połączeń
(100% wytrzymał. MR).



Zgrzewanie przez zgniot zwane jest zgrzewaniem na zimno. Polega na uzyskaniu trwałego połączenia wyłącznie pod wpływem **silnego nacisku**, powodującego ich znaczne plastyczne odkształcenie w obszarze styku. Wartość nacisku przekracza granicę plastyczności o 20-80%.



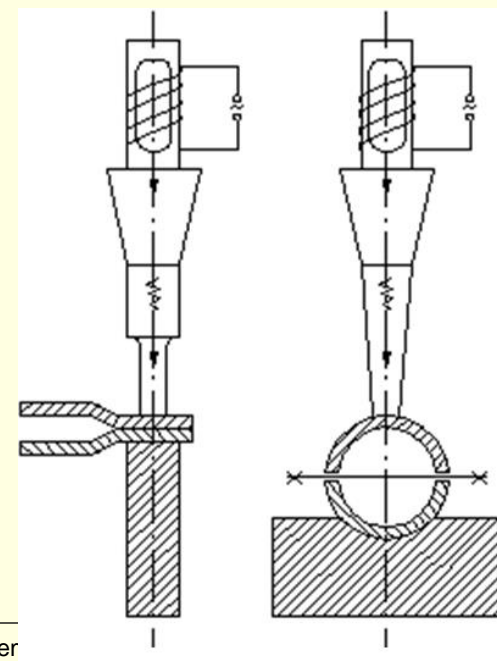
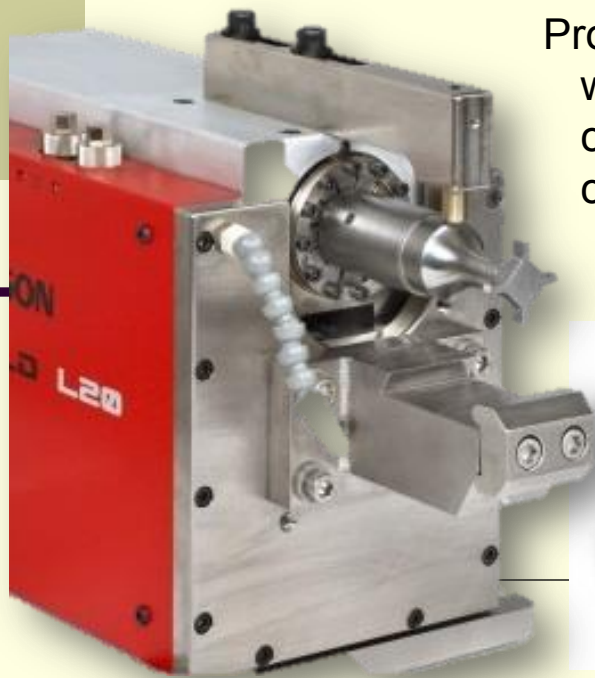
Zgrzewanie na zimno: punktowe; liniowe; doczołowe

Zgrzewanie ultradźwiękowe

Zgrzewanie ultradźwiękowe polega na wprawieniu dociśniętych do siebie elementów w drgania mechaniczne o bardzo małej amplitudzie (14-24 μm) i wysokiej częstotliwości (150-170 kHz). Pod wpływem siły nacisku i energii wyzwalanej przez drgania podwyższa się temperatura w strefie łączenia, np. dla stali do 600 °C.

Do przetwornika drgań jest doprowadzony prąd wysokiej częstotliwości. Przetwornik zmienia drgania elektryczne w mechaniczne. Z przetwornikiem jest połączony trzpień drgający (sonotroda), który przenosi drgania mechaniczne na zgrzewane materiały. Umieszczony naprzeciw sonotrody trzpień służy do przejmowania jej drgań oraz do odprowadzania wytwarzanego ciepła.

Proces zgrzewania ultradźwiękowego wykorzystuje się często do łączenia części z tworzyw polimerowych z częściami z metalu.



Następne zajęcia :

**W6 – Technologie wytwarzania warstw
dyfuzyjnych.**

**Metody gazotermicznej metalizacji
natryskowej do wytwarzania powłok
ochronnych i napoin.**

Dziękuję za uwagę!

Prowadzenie: *dr inż. Radosław Łyszkowski*