

CIENKOŚCIENNE KONSTRUKCJE METALOWE

Wykład 4: Spawanie i zgrzewanie cienkościennych elementów konstrukcyjnych

POŁĄCZENIA – INFORMACJE OGÓLNE

Projektując połączenia (styki, węzły) należy brać pod uwagę czynniki takie jak:

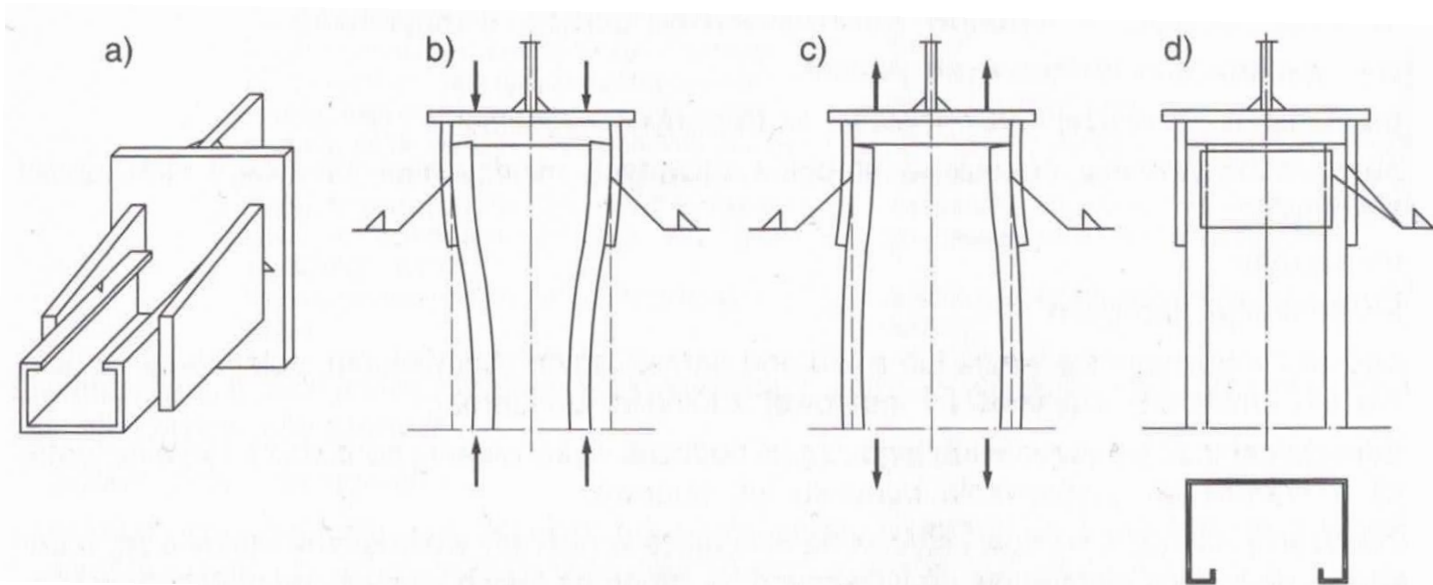
- siły przekrojowe występujące w łączonych prętach,
- przekroje najmniejszej wytrzymałości w łączonych częściach,
- nośność na ścinanie środków, stopek i zawartych między nimi części złącznych,
- mimośrodowość,
- koncentracja naprężeń,
- zachowanie węzła pod narastającym obciążeniem, polegające na ocenie chwilowej sztywności i końcowej zdolności do obrotu,
- odkształcalność połączenia podczas wykonywania i eksploatacji.

POŁĄCZENIA – INFORMACJE OGÓLNE

Dodatkowe czynniki, które należy uwzględnić przy projektowaniu połączeń:

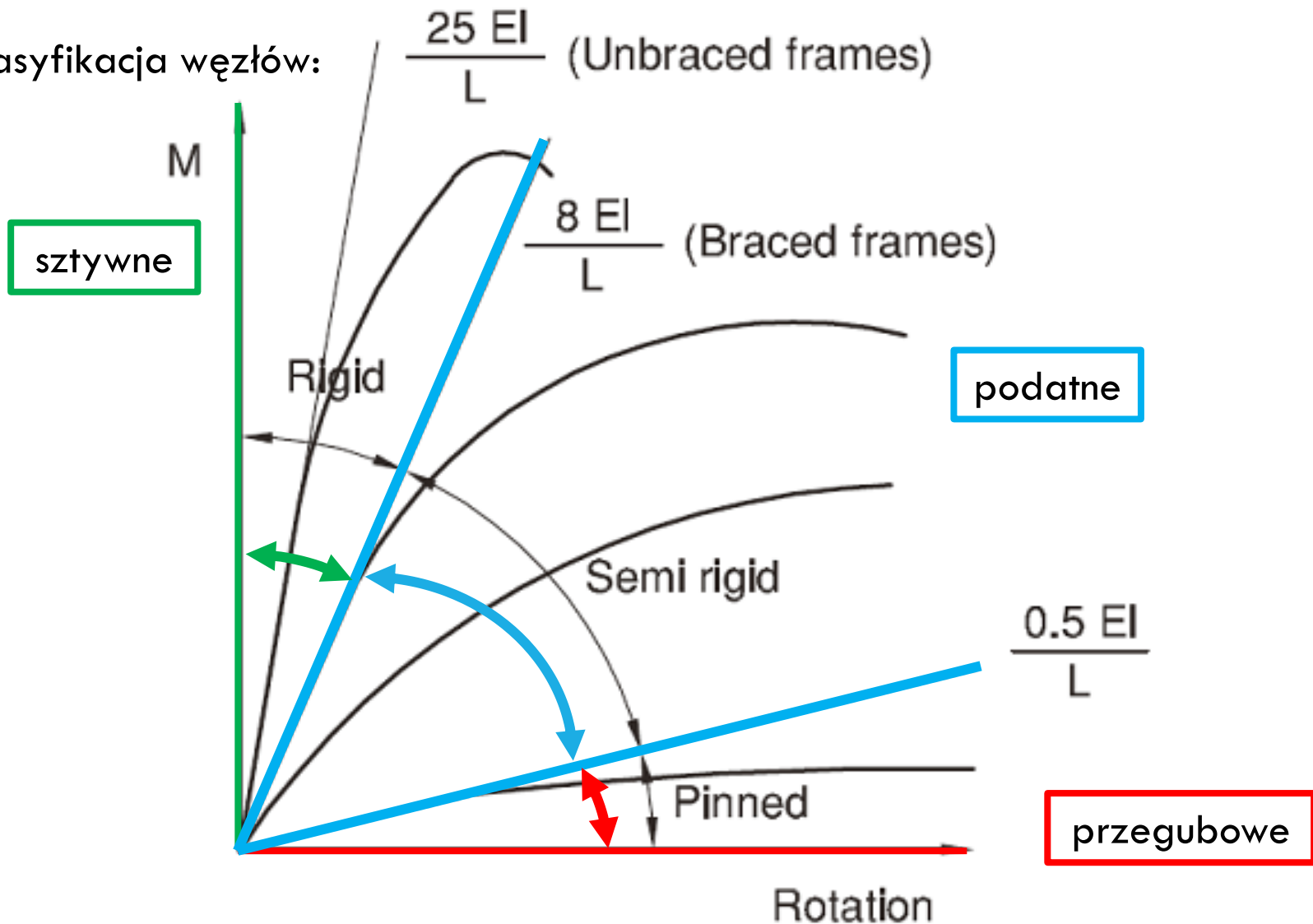
- dostęp do projektowanego styku,
- wymagania związane ze spawaniem i zakładaniem łączników mechanicznych,
- możliwość kontroli wykonania połączenia,
- możliwość wykonania powłok ochronnych i późniejszej konserwacji.

Wpływy drugorzędne w połączeniach kształtowników profilowanych na zimno:



POŁĄCZENIA – INFORMACJE OGÓLNE

Klasyfikacja węzłów:



STYKI I WĘZŁY SKRAJNE

Styki i połączenia skrajne należy wymiarować tak, aby:

- uzyskać pełną nośność przekroju elementu,
- lub by uwzględnić efekty oddziaływań wynikające z analizy wg. teorii II rzędu:

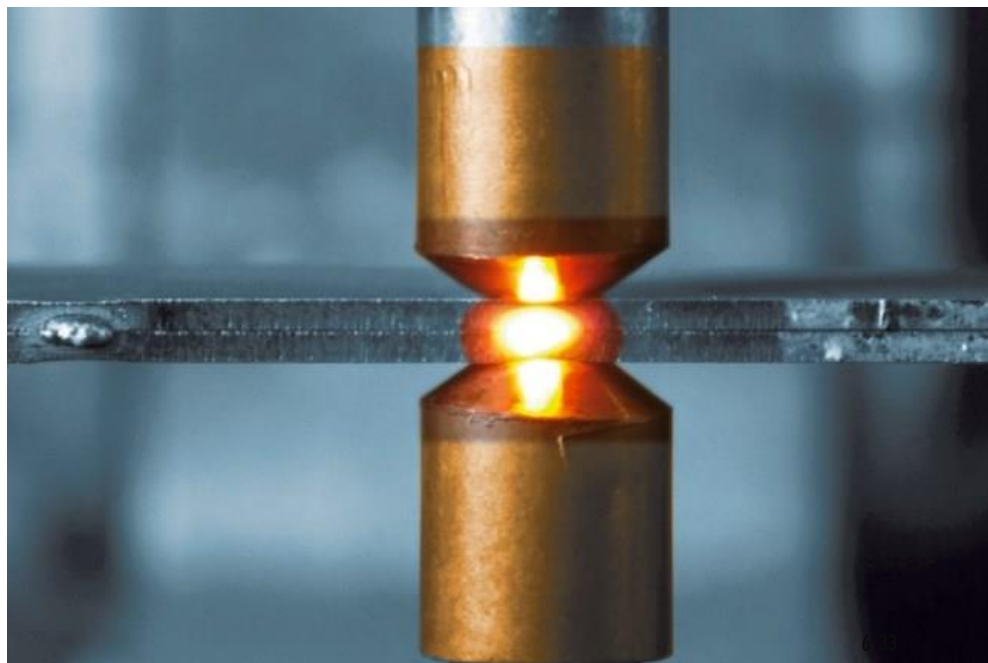
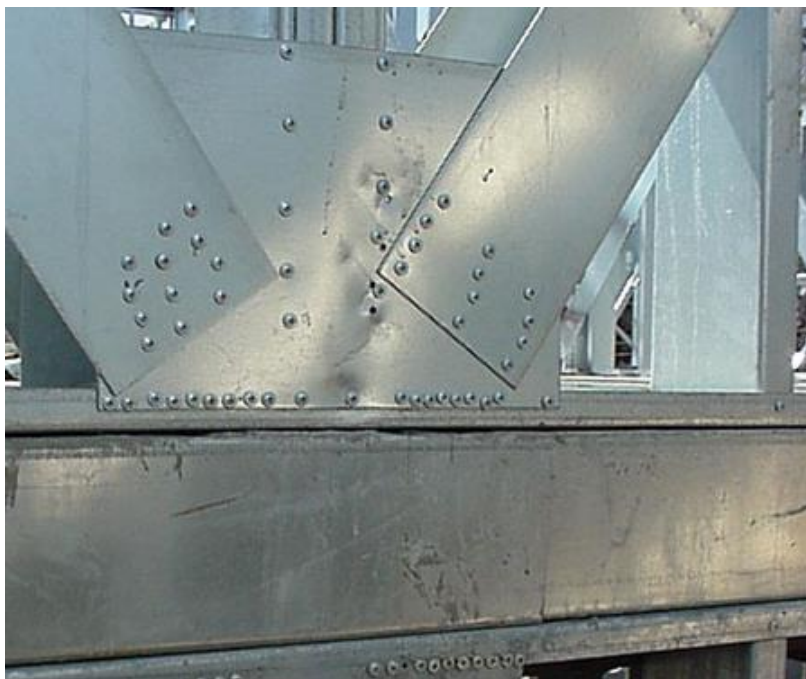
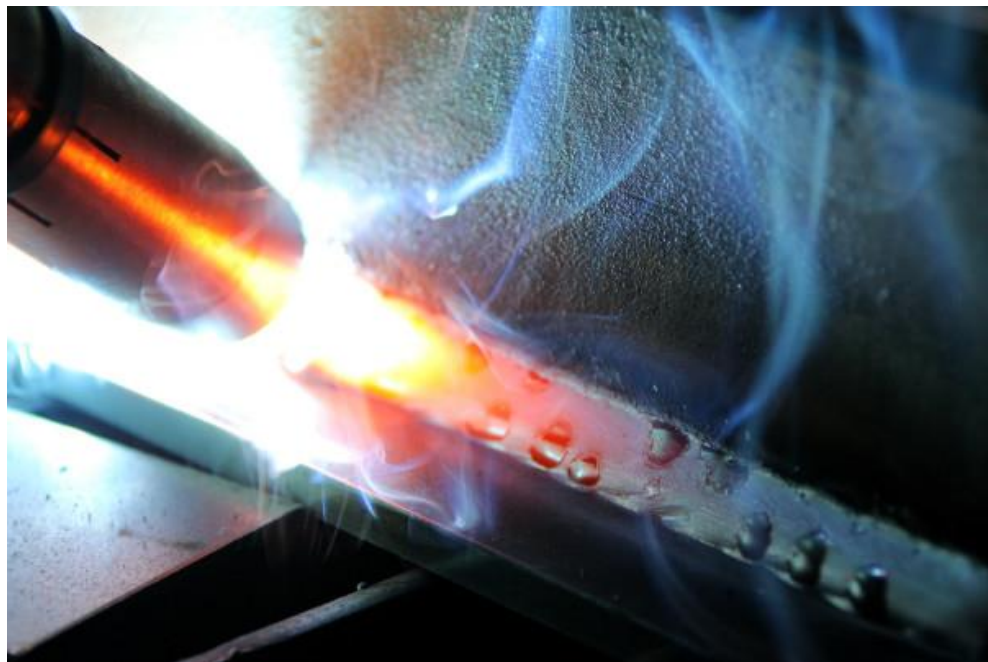
$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right) \frac{W_{eff}}{A_{eff}} \sin \frac{\pi a}{l},$$
$$\Delta V_{Ed} = \frac{\pi N_{Ed}}{l} \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right) \frac{W_{eff}}{A_{eff}},$$

- siły wewnętrzne były przekazywane do efektywnych części przekroju.
- zidentyfikować linię działania siły podłużnej w celu uwzględnienia odpowiednich mimośrodów i związanych z nim momentów zginających.

TECHNIKI ŁĄCZENIA

Najczęściej stosowane techniki łączenia:

- spawanie,
- zgrzewanie,
- łączniki mechaniczne (śruby, nity, wkręty).



SPAWANIE

Spawanie – proces fizyczny łączenia metali polegający na doprowadzeniu spoiwa (stopiwa) i brzegów części łączonych do stanu ciekłego, a następnie do ich zestalenia.

Przed przystąpieniem do spawania należy określić m.in.:

- kształt połączeń,
- wymiary i rodzaje spoin,
- metodę spawania.

Parametry spawania:

- średnica elektrody d [mm],
- napięcie prądu U [V],
- natężenie prądu i [A],
- szybkość spawania v [m/s],
- szybkość chłodzenia spoiny w [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]



METODY SPAWANIA

Spawanie gazowe

Spawanie elektryczne:

- elektrodą otuloną,
- łukiem krytym,
- w osłonie gazów:
 - MIG (Metal Inert Gas) – gaz obojętny (Ar, He, Ar+He),
 - MAG (Metal Active Gas) – gaz aktywny (CO₂, CO₂ + gaz obojętny),
 - TIG (Tungsten Inert Gas) – elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych



POŁĄCZENIA SPAWANE

Ogólna charakterystyka połączeń spawanych:

- staranne wykonanie spoiny (należy unikać porowatości, podtopieniom lub wytopeniom dziur),
- cienka spoina → mniej wad wewnętrznych (zażużlenie, nieprzetopienie), ale większa porowatość,
- efekt zgniotu → przyspieszone starzenie, zmiany w strukturze stali (przy 500°C następuje regeneracja siatki krystalograficznej, w strefie wpływu ciepła w temp. $200\text{-}300^{\circ}\text{C}$ stal traci dużą część pierwotnej ciągliwości),
- błędy produkcyjne → ryzyko kruchego pęknięcia naroży (dotyczy grubych blach $t \gg 4\text{ mm}$),

Spawanie elementów profilowanych na zimno wymaga od spawaczy wysokich kwalifikacji.

RODZAJE SPOIN

- czołowe, pachwinowe, brzeżne, otworowe, punktowe

ISO 2553:2013(E)

If clear illustration by means of symbols is not possible, cross sections of the welds may be drawn and dimensioned.

Table 1 — Elementary symbols

No.	Designation	Illustration (dashed lines show joint preparation prior to welding)	Symbol ^a
1	Square butt ^b		
2	Single-V butt ^b		
3	Single-V butt with broad root face ^b		
4	Single-bevel butt ^b		
5	Single-bevel butt with broad root face ^b		
6	Single-U butt ^b		
7	Single-J butt ^b		
8	Flare V		
9	Flare bevel		

^a The grey line is not part of the symbol. It indicates the position of the reference line.

^b Butt welds are full penetration unless otherwise indicated by dimensions on the welding symbol or by reference to other information, for example the WPS.

^c May be used for joints with more than 2 members.

ISO 2553:2013(E)

Table 1 (continued)

No.	Designation	Illustration (dashed lines show joint preparation prior to welding)	Symbol ^a
10	Fillet		
11	Plug (in slots or circular holes)		
12	Resistance spot (including projection welding in system A)		
13	Fusion spot (and projection welding in system B)		
14	Resistance seam		
15	Fusion seam		
16	Stud		
17	Steep-flanked single-V butt ^b		
18	Steep-flanked single-bevel butt ^b		

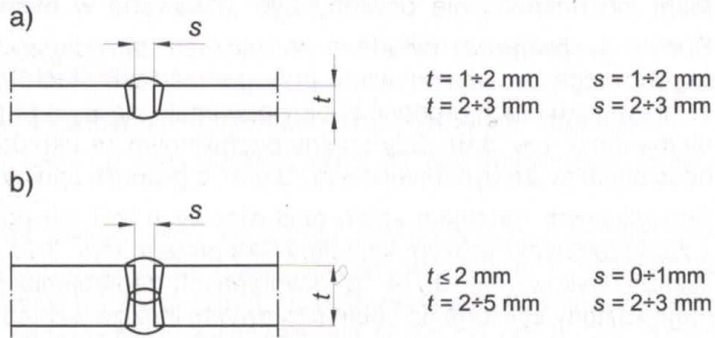
^a The grey line is not part of the symbol. It indicates the position of the reference line.

^b Butt welds are full penetration unless otherwise indicated by dimensions on the welding symbol or by reference to other information, for example the WPS.

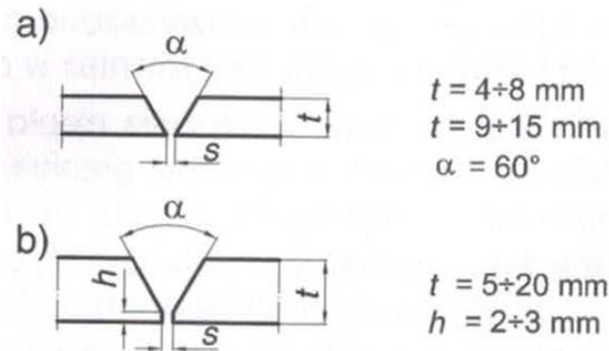
^c May be used for joints with more than 2 members.

WYMIARY SPOIN

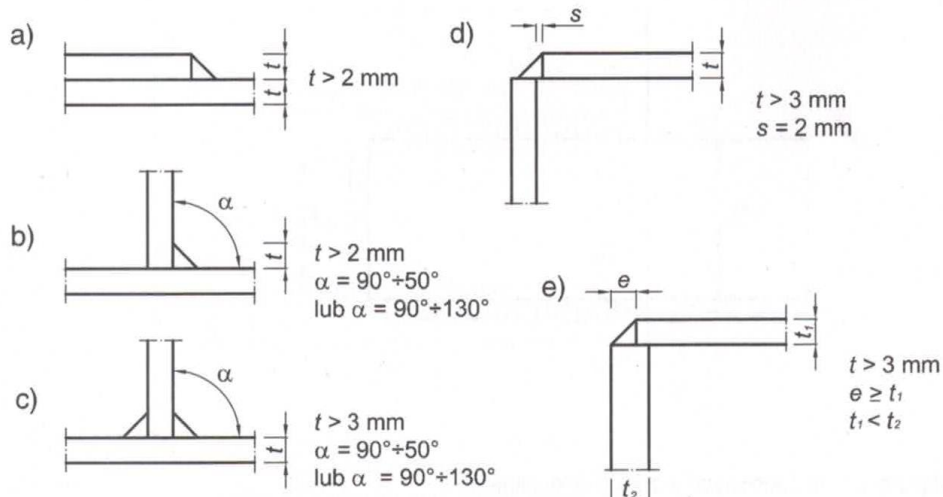
- spoiny czołowe



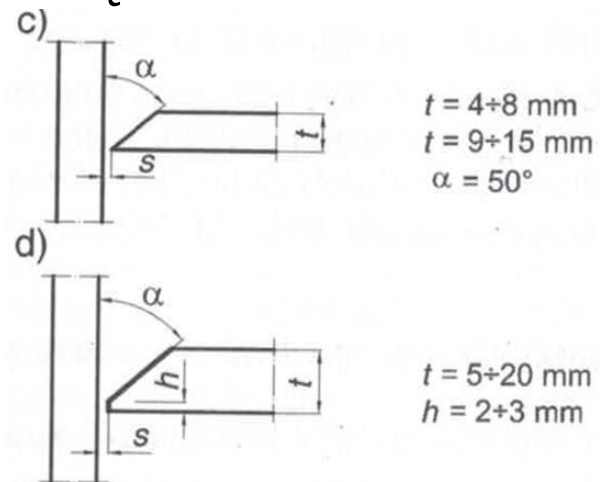
Rys. 3.3 Złącza ze spoinami czołowymi w kształcie litery I: a) przy spawaniu jednostronnym, b) przy spawaniu dwustronnym



- spoiny pachwinowe



- złącze teowe



SPAWANE ZŁĄCZA ZAKŁADKOWE

Obliczenia wg PN-EN 1993-1-3. Wymagania ogólne:

- grubość łączonego materiału nie przekracza 4 mm (inaczej stosować PN-EN 1993-1-8),
- o nośności połączenia powinna decydować grubość blachy, a nie nośność spoiny,
- jest to zapewnione, gdy grubość spoiny jest równa grubości blachy,

SPAWANE ZŁĄCZA ZAKŁADKOWE

Wg PN-EN 1993-1-3 obliczeniowa nośność $F_{w,Rd}$ spoin pachwinowych określa się następująco:

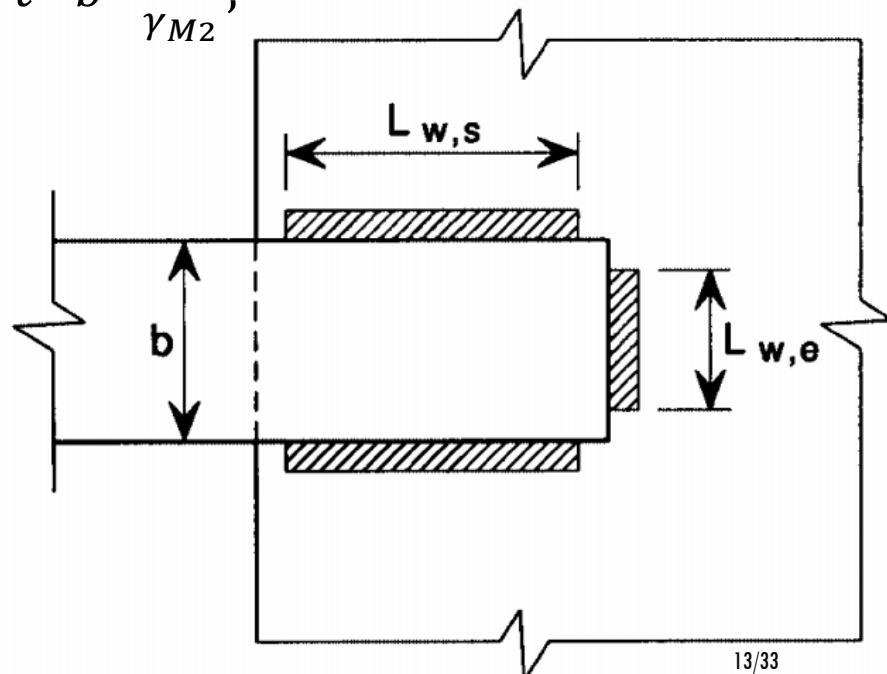
- jedna ze spoin bocznych stanowiących parę spoin:

➤ gdy $L_{w,s} \leq b$:
$$F_{w,Rd} = t \cdot L_{w,s} \left(0,9 - 0,45 \frac{L_{w,s}}{b} \right) \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

➤ gdy $L_{w,s} > b$:
$$F_{w,Rd} = 0,45 \cdot t \cdot b \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

- poprzeczna spoina pachwinowa

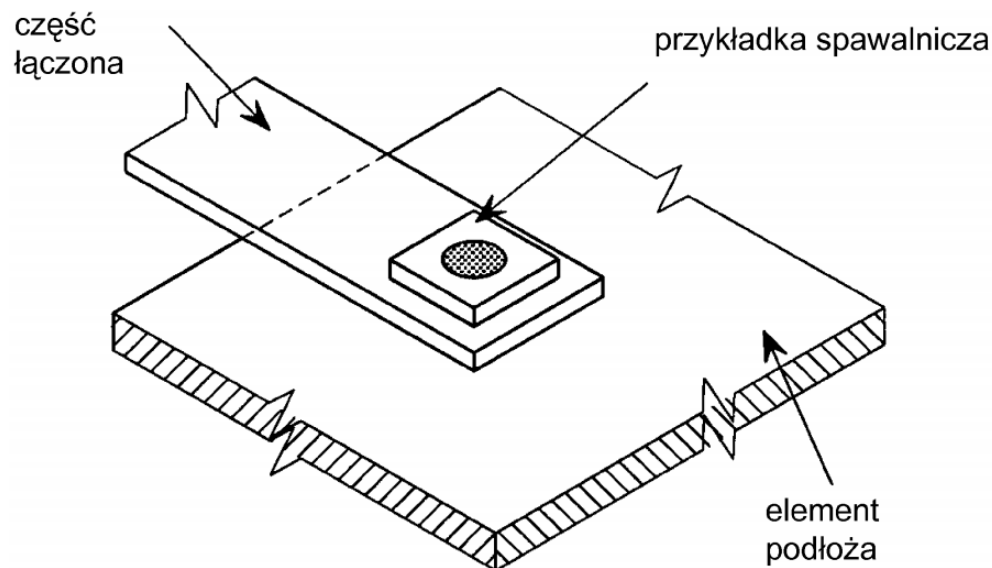
$$F_{w,Rd} = t \cdot L_{w,s} \left(1 - 0,3 \frac{L_{w,e}}{b} \right) \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$



SPOINY PUNKTOWE

Obliczenia wg PN-EN 1993-1-3. Wymagania ogólne:

- przenoszą wyłącznie siły ścinające,
- nie stosuje się spoin punktowych do łączenia blach o sumarycznej grubości większej jak 4 mm,
- średnica obliczeniowa spoiny powinna wynosić co najmniej 10 mm,
- gdy grubość łączonej części lub blachy jest mniejsza niż 0,7 mm, to stosuje się przykładkę spawalniczą,

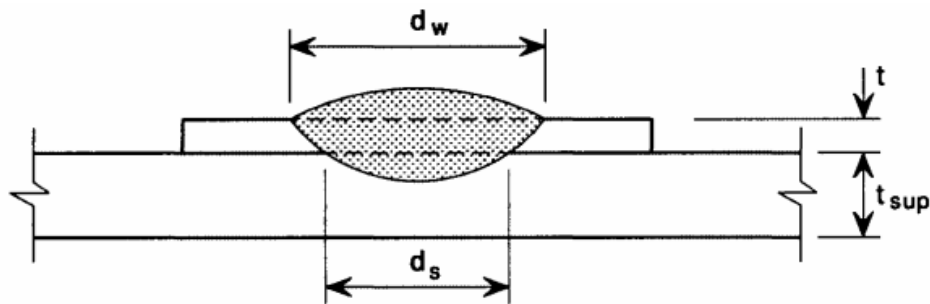


SPOINY PUNKTOWE

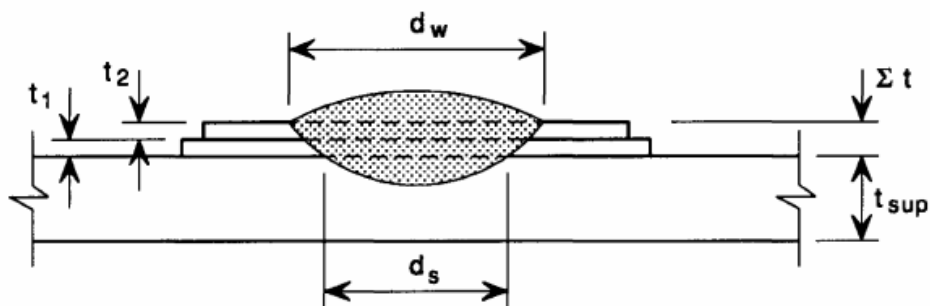
PN-EN 1993-1-3 podaje charakterystyki dotyczące spoin punktowych takich jak:

- minimalne odległości spoiny,
- średnica obliczeniowej d_s ,
- efektywna średnica obwodowej $d_{p,e}$,
- obliczeniowa nośność na ścinanie

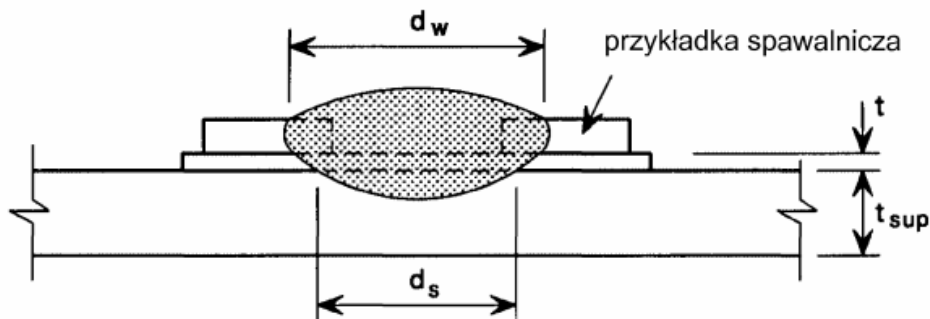
$$F_{w,Rd} = \frac{\pi}{4} d_s^2 \cdot 0,625 f_{uw} / \gamma_{M2}$$



a) złącze z jedną blachą ($\Sigma t = t$)



b) złącze z dwiema blachami ($\Sigma t = t_1 + t_2$)



c) złącze z blachą i przykładką spawalniczą

ZGRZEWANIE

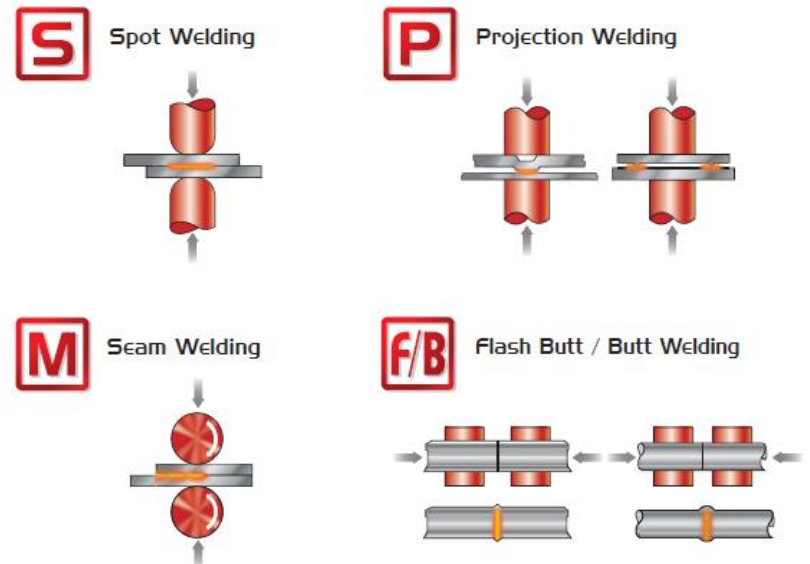
Zgrzewanie – proces spajania metali polegający na nagraniu miejsca styku do temperatury bliskiej temperaturze topności, a następnie na mechanicznym dociśnięciu. Materiał odkształca się oraz przenika tworząc po ostygnięciu trwałe i wytrzymałe połączenie.

Rodzaje zgrzewania: gazowe (acetylen, wodór), termitowe (mieszanka glinu i tlenku żelaza), kuzienne, indukcyjne, wybuchowe, wybuchowe i inne.

Najbardziej popularne – **zgrzewanie elektryczne oporowe** (electric resistance welding – ERW).

Dzieli się na:

- punktowe (jedno i dwustronne),
- doczołowe (zwarciowe, iskrowe),
- liniowe (na zakładkę, liniowo-doczołowe),
- garbowe.



ZGRZEWANIE

Zgodnie z prawem Joule'a-Lenza, ciepło wydzielane podczas zgrzewania określa się jako:

$$Q = i^2 R t,$$

gdzie:

Q – ilość ciepła [J],

i – natężenie prądu zgrzewania [A],

R – oporność strefy zgrzewania [Ω],

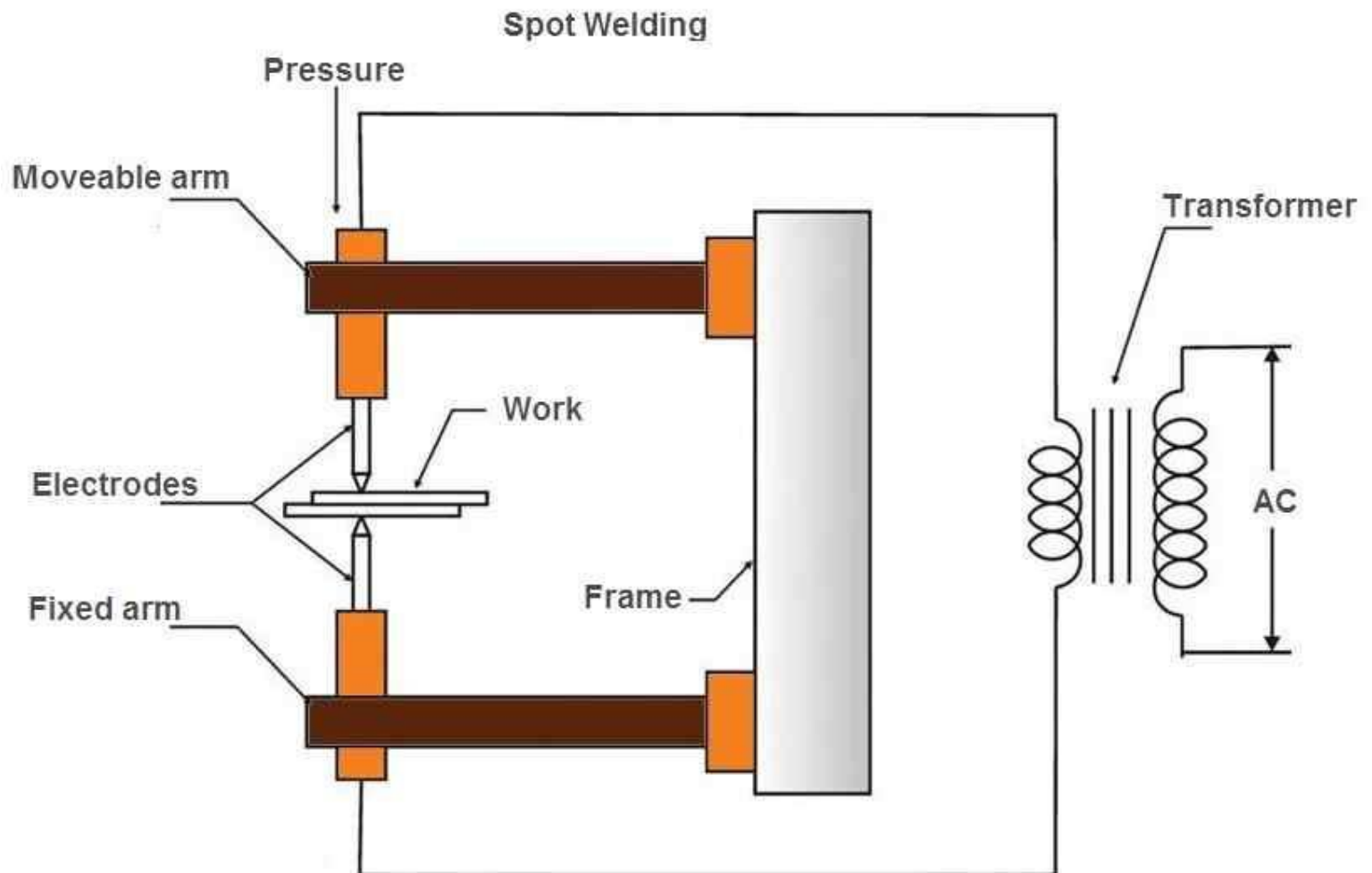
t – czas przepływu prądu zgrzewania [s].

Faza 1: docisk elektrod, zamknięcie obwodu, wydzielanie ciepła na styku elementów, powstanie jądra zgrzeiny.

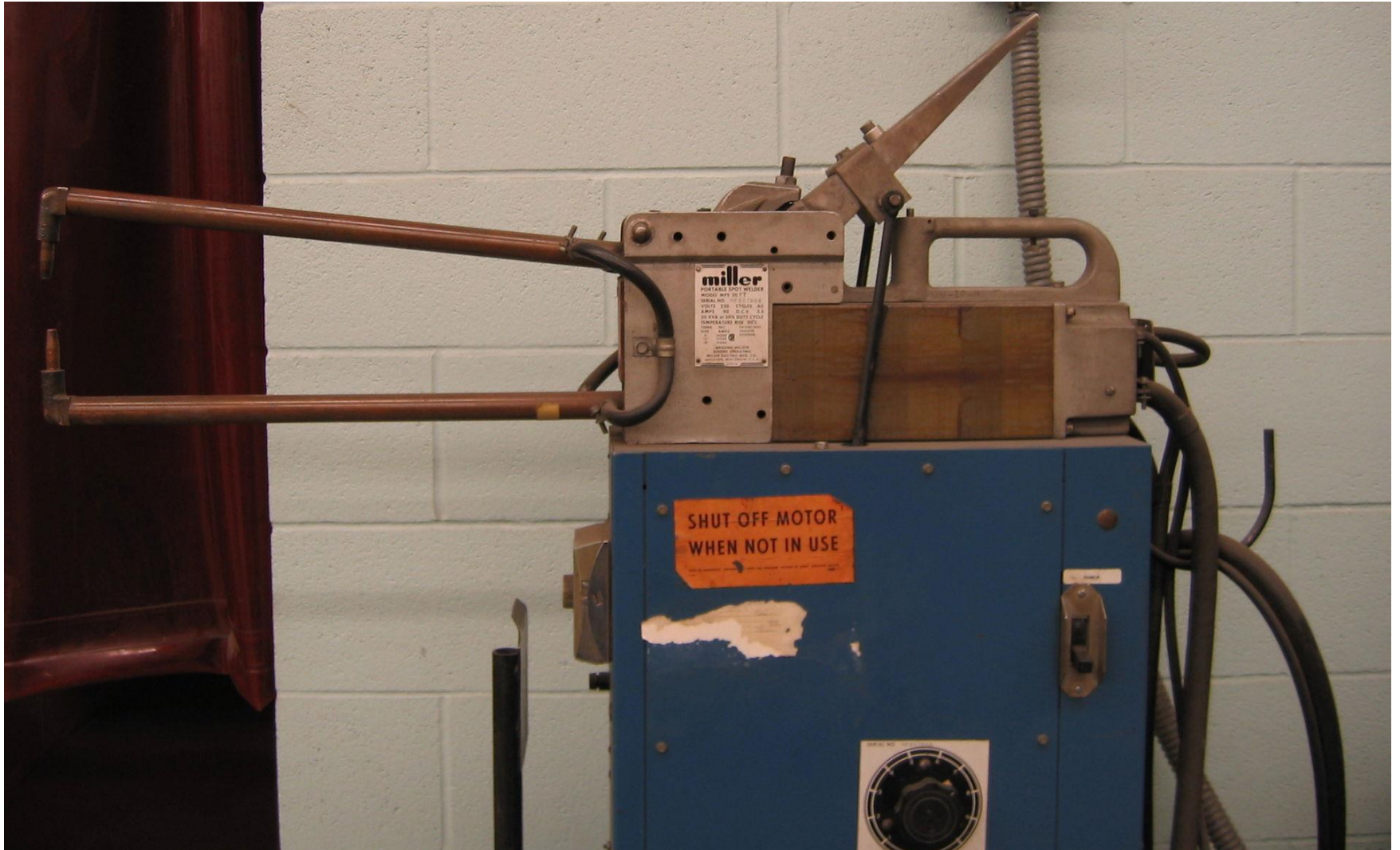
Faza 2: rozrost jądra zgrzeiny aż do wyłączenia dopływu prądu.

Faza 3: krystalizacja jądra zgrzeiny.

ZGRZEWANIE PUNKTOWE



ZGRZEWANIE PUNKTOWE



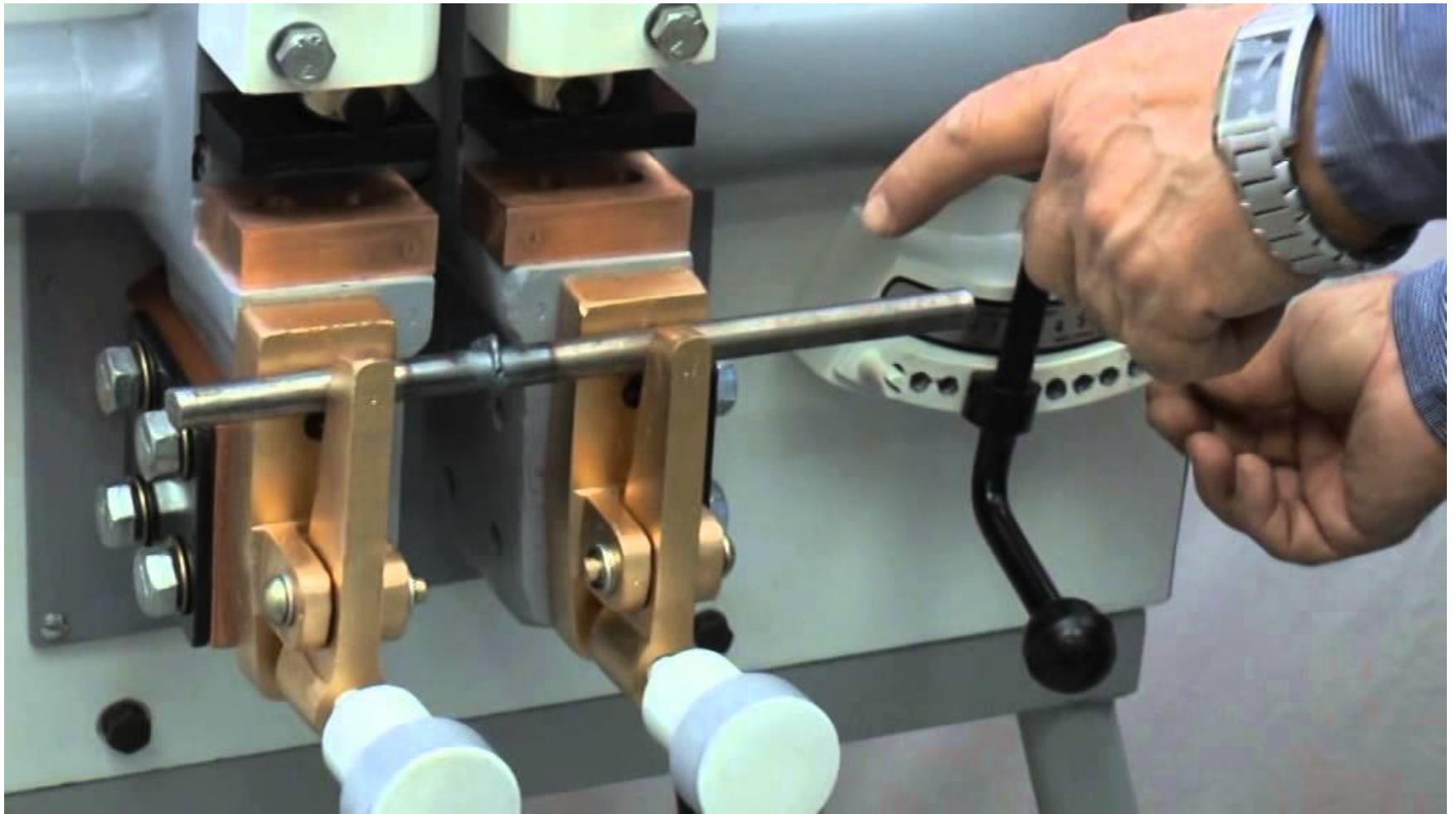
ZGRZEWANIE PUNKTOWE

Parametry zgrzewania punktowego: natężenie prądu zgrzewania i , czas przepływu prądu t , siła docisku elektrod. Parametry te dobiera się zależnie od: rodzaju metalu, grubości, kształtu i wymiarów zgrzewanych elementów i wymagań stawianych konstrukcji.

Zalecenia technologiczne:

- 1) złącza punktowe powinny być tak zaprojektowane, żeby zgorzeliny pracowały na ścinanie (należy unikać zgrzein pracujących na rozciąganie i skręcanie),
- 2) powierzchnie części zgrzewanych powinny być płaskie i równoległe (nie wolno wykonywać zgrzein w narożach i zaokrągleniach),
- 3) średnicę zgrzeiny ustala się w zależności od grubości blach,
- 4) przy większej ilości zgrzein, grupuje się je w dwóch lub kilku rzędach (nie mogą być zbyt blisko siebie ze względu na bocznikowanie prądu), stosując zalecane podziałki przy rozmieszczaniu zgrzein,
- 5) nie można zgrzewać więc niż trzech blach (jeśli są 3 blachy różnej grubości cieńszą umieszcza się w środku, gdy są 2 to cieńszą daje się na górę),
- 6) złącza powinny być tak projektowane, żeby można je było zgrzewać za pomocą zgrzewania dwustronnego jednopunktowego przy jak najmniejszym wysięgu ramion zgrzewarki.

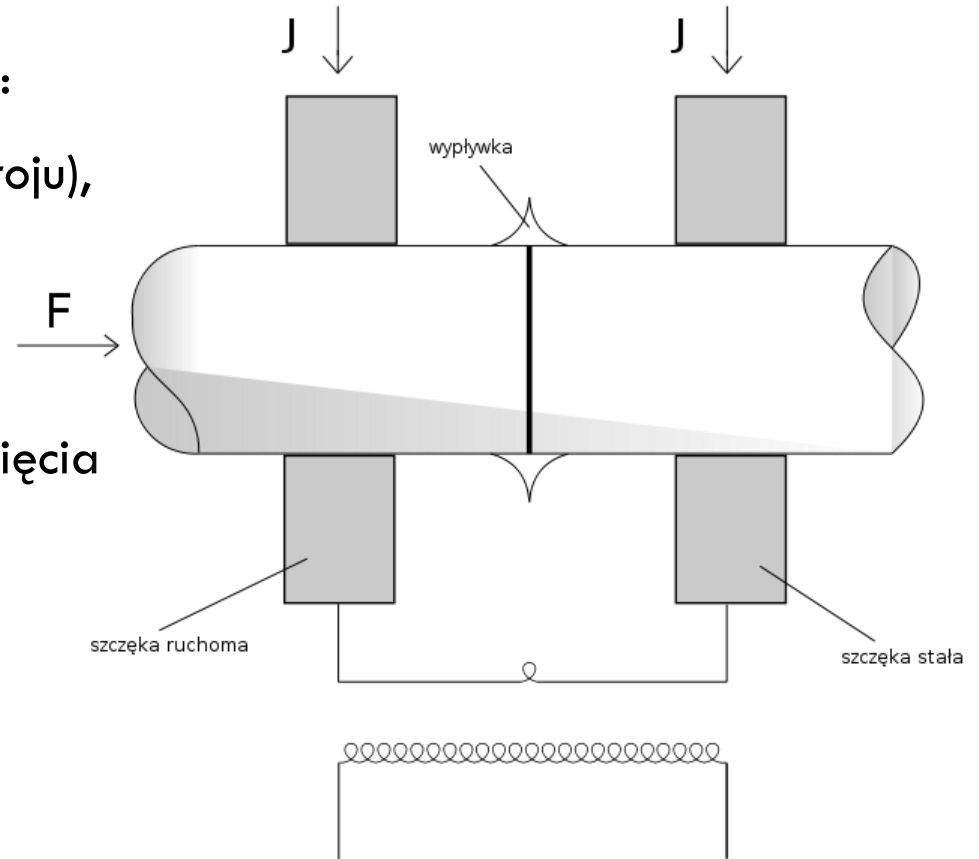
ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE – ZWARCIOWE



ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE – ZWARCIOWE

Parametry zgrzewania zwarciovego:

- moc jednostkowa (na 1 mm² przekroju),
- natężenie prądu zgrzewania,
- czas przepływu prądu,
- długość mocowania (długość wysunięcia materiału ze szczęk),
- docisk jednostkowy.



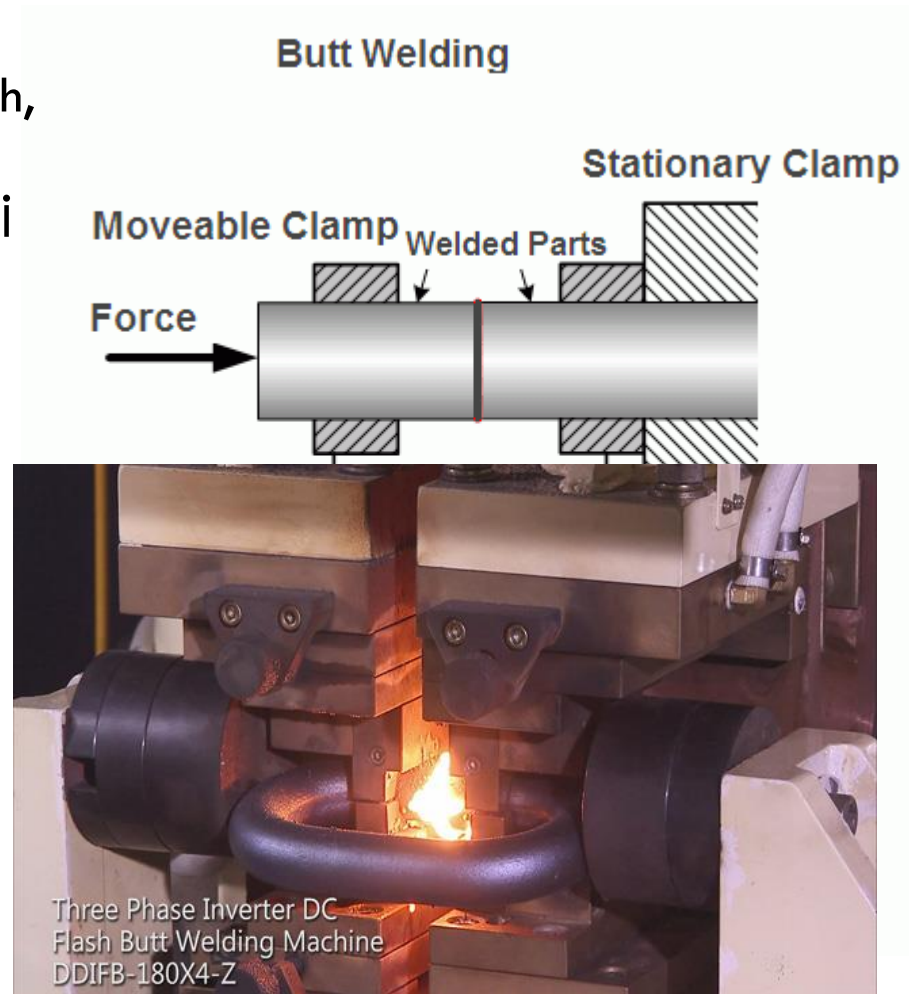
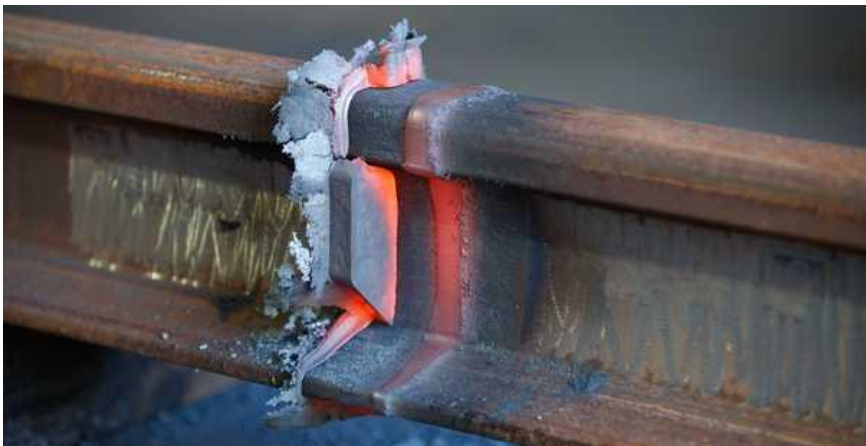
Cechy zgrzewania zwarciovego:

- zakres temperatur 1100-1500°C,
- mały docisk i duża gęstość prądu,
- materiały: stale węglowe i stopowe, miedź, aluminium i ich stopy,
- złącze osiąga 70-100% wytrzymałości zgrzewanych materiałów.

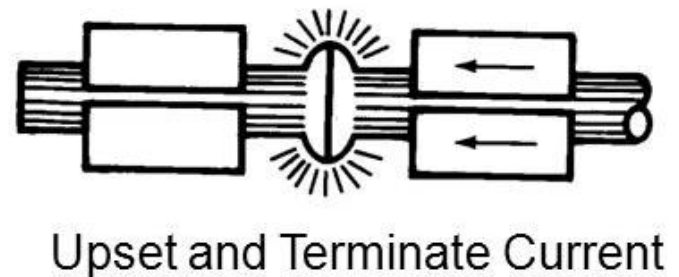
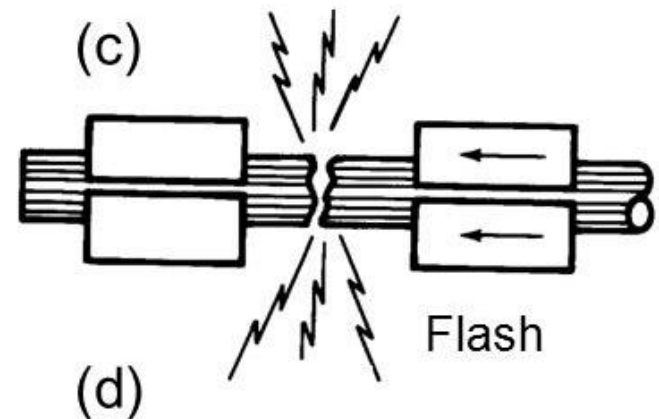
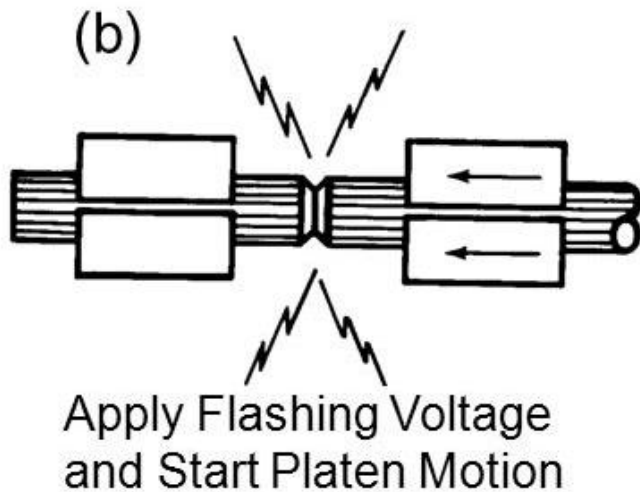
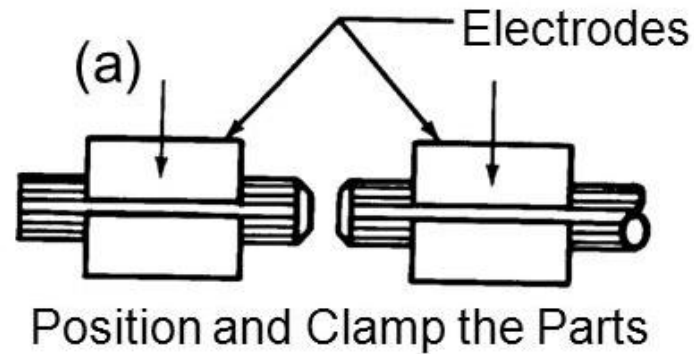
ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE – ZWARCIOWE

Zastosowanie:

- łączenie przekrojów zwartych (okrągłych, kwadratowych, i zbliżonych do nich) o powierzchni 0,05-2000 mm² (najczęściej do 200 mm²),
- łączenie rur (do średnicy 40mm),
- łączenie elementów i ogniw łańcuchów.



ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE – ISKROWE



[Reference: Welding Handbook, Volume 2, p.583, AWS]

ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE – ISKROWE

Zalety zgrzewania iskrowego:

- łatwe przygotowanie powierzchni czołowych, zgrzewanych elementów,
- mniejsze zużycie energii i większa wydajność procesu niż zgrzewanie zwarciove, bardziej wytrzymałe złącza,
- większe możliwości zgrzewania różnorodnych materiałów ze sobą.

Zgrzewanie iskrowe łączy: elementy o przekrojach zwartych, elementy kształtowe i rurowe, taśmy i blachy.

Zgrzewa się: stale węglowe i stopowe, miedź, aluminium i ich stopy, nikiel, tytan, i zeliwo. Można też zgrzewać metale różnorodne np. Cu + Al.

Bardzo wysoka temperatura podczas iskrzenia (do temp. 20 000°C).

Silne działanie pola elektromagnetycznego.

ZGRZEWANIE DOCZOŁOWE – ISKROWE



ZGRZEWANIE LINIOWE

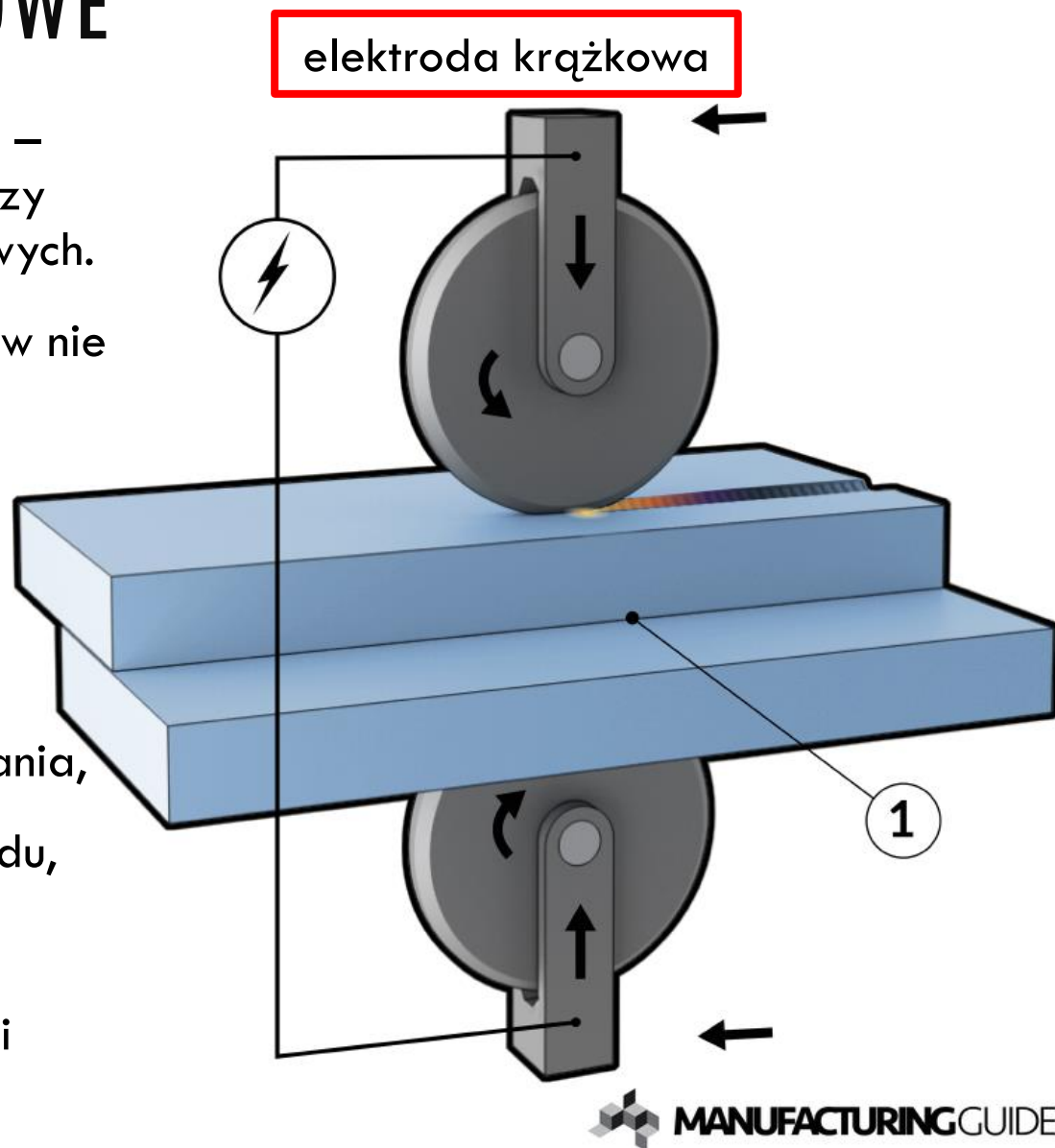
Zgrzewanie liniowe przerywane – przerywany przepływ prądu przy stałym obrocie elektrod krążkowych.

Grubość zgrzewanych elementów nie przekracza na ogół 3 mm.

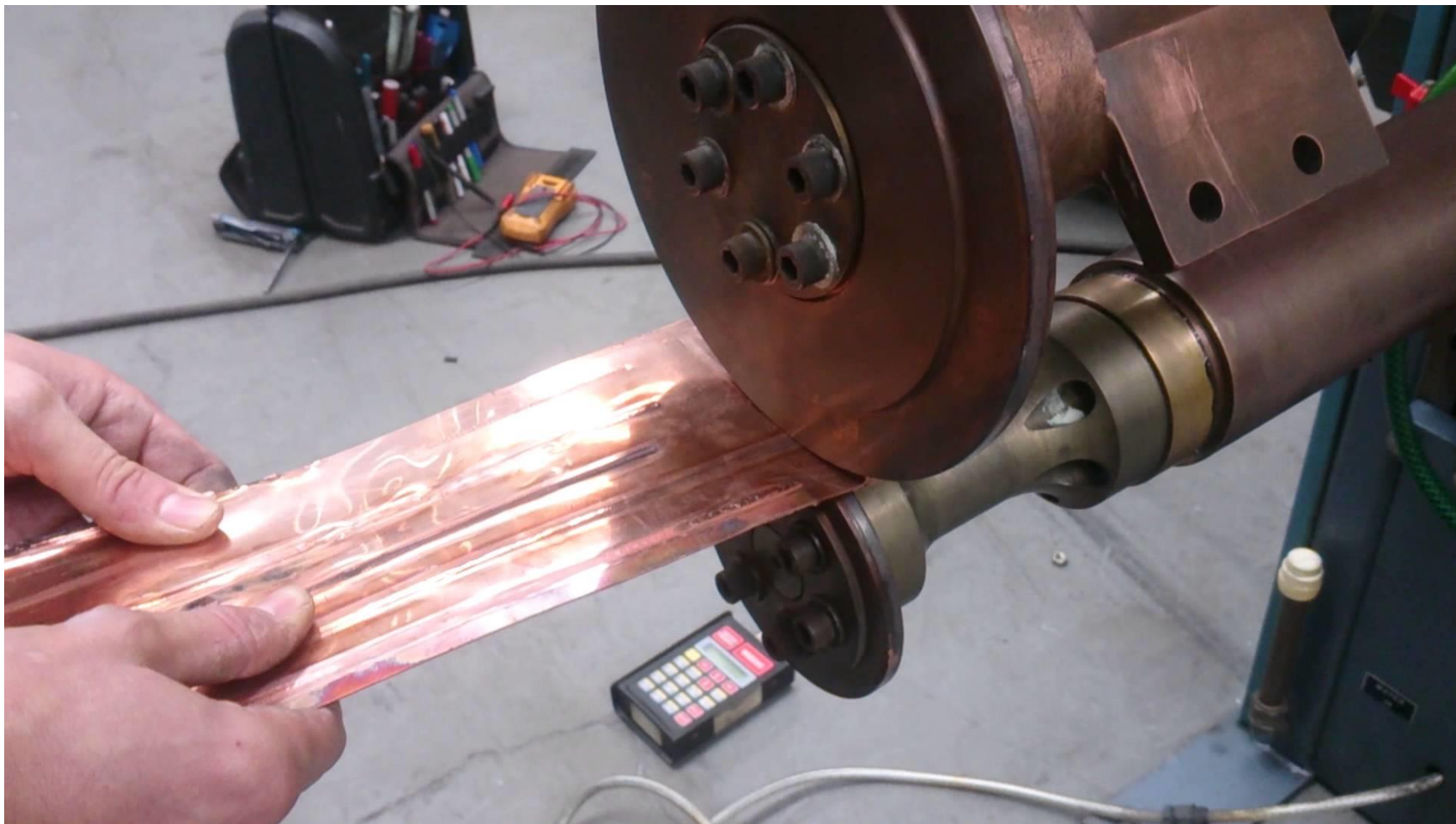
Parametry:

- siła docisku elektrod,
- natężenie prądu zgrzewania,
- czas przepływu prądu zgrzewania,
- czas przerw w przepływie prądu,
- prędkość zgrzewania.

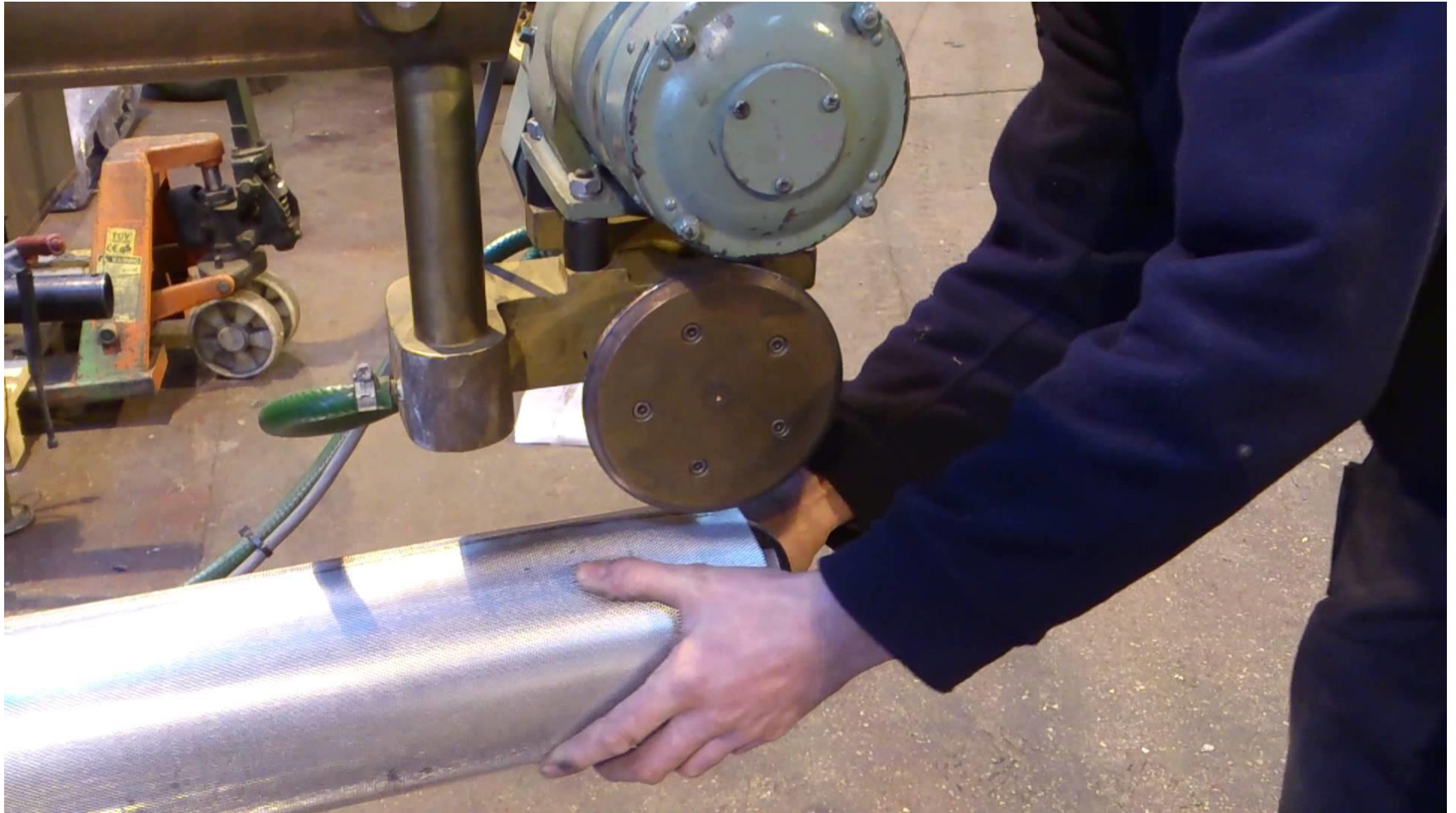
Można zgrzewać stale węglowe i stopowe oraz metale niezależne



ZGRZEWANIE LINIOWE



ZGRZEWANIE LINIOWE



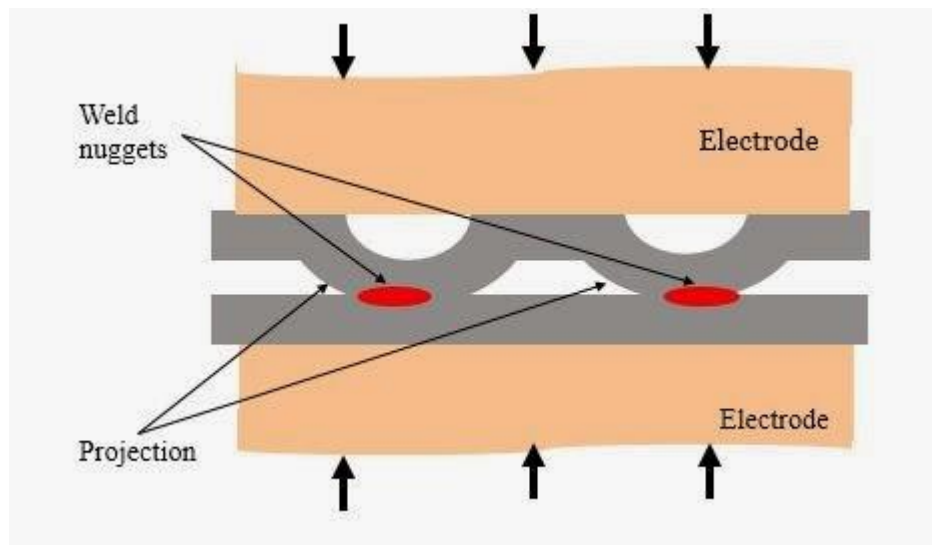
ZGRZEWANIE GARBOWE

Łączenie elementów w miejscach specjalnych występów technologicznych (garbów). Mogą to być fragmenty łączonych elementów, np. krawędź otworu.

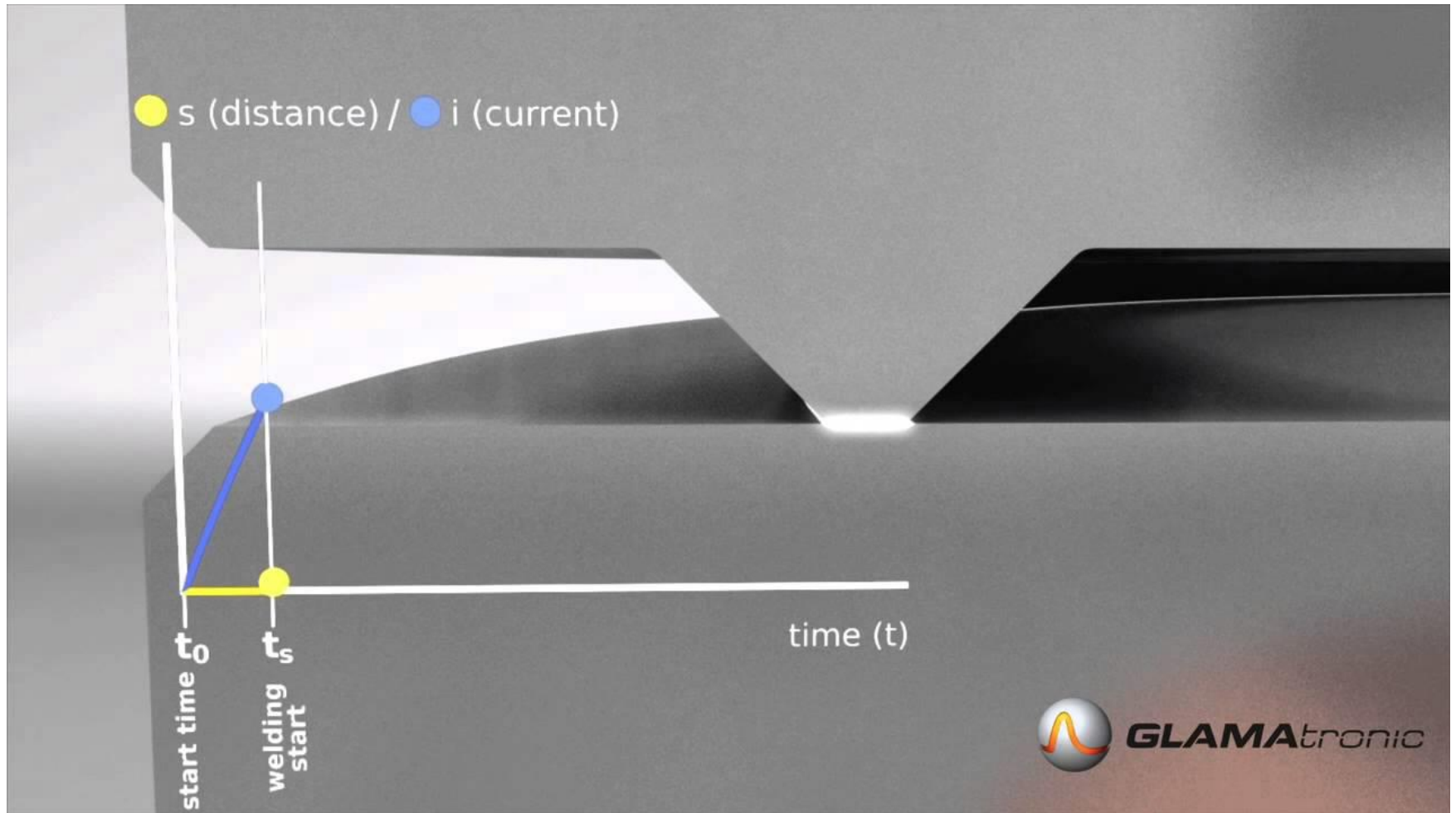
Zgrzewanie garbowe umożliwiając łączenie elementów metalowych, dla których zgrzewanie punktowe byłoby trudne lub niemożliwe.

Przepływ prądu elektrycznego powoduje stopienie „garbów” i wykonanie w tych miejscach metalicznego połączenia.

Parametry procesu: prąd, czas zgrzewania, siła docisku oraz stabilizacja prądu zgrzewania przy zmianach napięcia zasilania.



ZGRZEWANIE GARBOWE



NOŚNOŚĆ ZGRZEIN WG PN-EN 1993-1-3

Zalecenia ogólne:

- spoiny punktowe stosuje się, jeżeli materiał podłoża ma grubość nie większą niż 4 mm, a grubość cieńszej blachy nie przekracza 3 mm,
- spoina punktowa jest efektem zgrzewania oporowego lub spawania,
- odległości od krawędzi i pomiędzy spoinami przyjmować jak dla łączników mechanicznych,
- obliczeniowa średnica spoiny punktowej d_s przyjmuje się w przypadku:
 - spawania: $d_s = 0,5t + 5$ mm,
 - zgrzewania oporowego: $d_s = 5\sqrt{t}$.
- wartość obliczeniowej średnicy spoiny punktowej d_s powinna być zweryfikowana doświadczalnie zgodnie z wytycznymi w normie.

NOŚNOŚĆ ZGRZEIN WG PN-EN 1993-1-3

Nośność na rozerwanie lub docisk:

- gdy $t \leq t_1 \leq 2,5t$:
$$F_{tb,Rd} = 2,7 \cdot \sqrt{t} \cdot d_s \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

- gdy $t_1 > 2,5t$:
$$F_{tb,Rd} = 2,7 \cdot \sqrt{t} \cdot d_s \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}},$$

lecz
$$F_{tb,Rd} \leq 0,7 \cdot d_s^2 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{i} \quad F_{tb,Rd} \leq 3,1 \cdot t \cdot d_s^2 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}.$$

Nośność strefy brzegowej:
$$F_{e,Rd} = 1,4 \cdot t \cdot e_1 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}.$$

Nośność przekroju netto:
$$F_{n,Rd} = A_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}.$$

Nośność na ścinanie:
$$F_{V,Rd} = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}.$$

Warunki dodatkowe:
$$F_{V,Rd} \geq 1,25F_{tb,Rd} \quad \text{lub} \quad F_{V,Rd} \geq 1,25F_{e,Rd}$$

$$\text{lub} \quad \sum F_{V,Rd} \geq 1,25F_{n,Rd}$$