

Ruční obloukové svařování



Ruční obloukové svařování (ROS, MMA) lze charakterizovat jako metodu svařování elektrickým obloukem s kovovými odtavujícími se elektrodami, které jsou obaleny tavidlem. Pro hoření elektrického oblouku se využívá jak stejnosměrný, tak střídavý elektrický proud v závislosti na použitých elektrodách a svařovaném materiálu. Obal – tavidlo – má funkci [metalurgickou](#), funkci plynotvornou a ionizační.

Přestože ruční obloukové svařování je nejstarší metoda svařování elektrickým obloukem, je díky své univerzálnosti a možnosti svařování ve všech polohách stále hojně využívána. Protože náklady na pořízení svařovacího příslušenství mohou být velmi nízké, je snadno dostupná široké veřejnosti. Pro zajištění vysoké kvality svarů provedených metodou ručního obloukového svařování je nutností velmi dobrá zručnost svářeče. V porovnání s poloautomatickými nebo automatickými metodami svařování je výkon odtavení nízký.

Historie

Základy ke svařování elektrickým obloukem byly položeny objevem elektrického oblouku jako takového na počátku 19. století. Využití elektrického oblouku jako zdroje tepla pro svařování však poprvé použil až Francouz Auguste De Meritens v roce 1881. De Meritens svařil olověné desky akumulátorů hořením elektrického oblouku mezi svařovanými deskami a uhlíkovými elektrodami. Použitím uhlíkové elektrody při svařování vznikala atmosféra CO₂, která chránila roztavený svarový kov před nepříznivým vlivem okolního vzduchu. Na druhou stranu uhlíková elektroda způsobovala nauhličení svarového kovu a tedy i jeho zkřehnutí.

Rus Nikolaj Stavjanov v roce 1888 vyměnil uhlíkovou elektrodu za kovovou, která se při svařování odtavovala, spojil tak funkci elektrody a přídavného materiálu. Svůj vynález si nechal patentovat pod názvem *elektrické odlévání kovů*.

Oscar Kjellberg – zakladatel švédské firmy *ESAB* – v roce 1907 opatřil kovovou odtavující se elektrodu obalem z uhlíčitanů a křemičitanů, tzv. obalovaná elektroda. Druhý, Arthur Percy Strohmenger experimentoval ve Velké Británii v letech 1909 až 1912 s tlustými obaly kovových elektrod, používal širokou škálu materiálů od azbestové tkaniny až po jílu a vápenec. Výsledek své práce si nechal patentovat v USA až v roce 1928. Jeho elektrodami bylo možné provádět svary o vysoké jakosti a s vysokou mírou čistoty svarové kovu. Zpočátku byly obalované elektrody velmi drahé. Jejich vysoká cena byla způsobena nákladným technologicko-výrobním postupem. Až změna technologie výroby kovového jádra tažením a zároveň průtláčného lisování použitého při výrobě jejího obalu, zlevnilo výrobu a zvýšilo dostupnost obalovaných elektrod pro běžné svařovací práce.

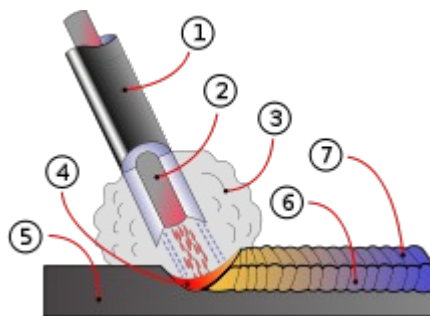


Schéma ručního obloukového svařování obalenou elektrodou:

(1) obal elektrody, (2) kovové jádro elektrody, (3) ochranná atmosféra, (4) svarová lázeň, (5) základní materiál, (6) svarový kov, (7) struska

Princip obloukového svařování

Jako u všech metod obloukového svařování se docílí roztavení základního a přídavného materiálu hořením elektrického oblouku právě mezi základním materiálem resp. svarovou lázní a taví se kovovou obalenou elektrodou. Během hoření oblouku se elektrody odtavují, kov se ukládá do svarové lázně a tím dochází k vytvoření svarového spoje.

Z obalu se tvoří během svařovacího procesu struska, která vyplave na povrch svarové lázně, na němž také ztuhne. Strusku je nutné velmi dobře odstranit, zvláště pokud bude kladena další vrstva svarových housenek. Při neodstranění nebo nedokonalé odstranění strusky dojde k zalití strusky následujícími vrstvami svarového kovu. Tím se vytvoří nepřípustné vady ve svarovém kovu, tzv. vměstky.

Ruční obloukové svařování se používá ve všech polohách, při rozsahu elektrického proudu od 10 do 2 000 A. Velikost svařovacího elektrického proudu závisí na typu obalu a průměru elektrody.

Stanovení velikosti svařovacího proudu	
druh obalu	svařovací proud
bazický	$I = (30 - 50) / d$
rutilový	$I = (40 - 55) / d$
kde d je 1 mm průměru elektrody	

Protože svarová lázeň je chráněna plyny vznikajícími při rozkladu tavidla a není tak nutná dodatečná plynová ochrana, je tento způsob vhodný i při svařování na stavbě či za nepříznivějších povětrnostních podmínek, s výhodou se používá např. při svařování betonářské výztuže.

Obalené elektrody

Jako přídavný materiál pro ruční svařování obloukem se používají tzv. obalené elektrody, které se skládají z kovového jádra a tavidla obaleného okolo jádra. Složení obalu určuje vlastnosti svarového kovu, musí vyhovovat daným základním materiálům a použitému svařovacímu proudu.



Funkce obalu elektrod

Plynotvorná funkce obalu zajišťuje tvorbu ochranné atmosféry z kouře a plynů vznikajících při hoření elektrického oblouku a spalování tavidla. Ochranná atmosféra brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku do svarové lázně a tím zajišťuje požadované plastické vlastnosti svarového kovu.

Rozkladem solí alkalických kovů v obalu dochází k lepšímu zapalování a hoření elektrického oblouku, tzv. ionizační funkce. Metalurgická funkce obalu způsobuje rafinaci (čištění) svarového kovu a dodává propalované prvky ve svařovaných materiálech.

Výroba

Elektrody se vyrábějí buď máčením, usušením a obroušením nebo častější technologií lisováním a vysušením. Průměry elektrod bývají nejčastěji od 1,6 do 8,0 mm a jejich běžné délky v intervalu od 150 do 450 mm, pro zvláštní použití délky až 1000 mm.

Skladování

Jednou z největších nevýhod obalovaných elektrod je jejich náchylnost k navlhání, které významně snižují kvalitu svaru, zejména plastických vlastností. Zvýšenou vlhkostí obalů se z nich dostává do svaru [vodík](#), který způsobuje tzv. praskání za studena. Proto je velmi nutné skladovat obalované elektrody v suchu a před přímým použitím je nutné je přesušit a uchovávat ve speciálních nádobách za zvýšené teploty. Pravidla pro přesušování elektrod většinou doporučují výrobci elektrod. Pro dosažení nejlepších plastických vlastností je maximální doporučeným množstvím difundovaného vodíku 5 ml na 100 g svarového kovu.

Druhy obalů

Přesné složení obalů elektrod je předmětem chráněných receptur výrobců. Dále uvedená složení jsou čistě informativní.

Bazický- B, rutilový- R, kyselý- A, celulosový- C, rutil- kyselý- RA, rutil- bazický RB, tlustostěnný rutilový- RR

Vlastnosti nejpoužívanějších obalů elektrod:

Bazický obal

Bazický obal obsahuje cca 45% křemice, 40% vápence, 10% oxidu křemičitého, 5 % feromanganu, rutilu, vodního skla a další. Elektrody s bazickým obalem vyžadují stejnosměrný proud a nepřímé zapojení elektrody, tj. elektroda je připojena k anodě (+). Výjimku tvoří obaly na bázi zirkonu, které lze použít i při střídavém proudu. Bazické elektrody jsou vhodné pro svařování ve všech polohách. Velmi dobře se uplatňují při požadavku na vyšší plasticitu svarového spoje, tj. nízký obsah difúzního vodíku, nižší vnesené teplo, atd. Velmi často se používají při opravách svarů provedených metodami svařování tavící se elektrodou v ochranných atmosférách .

Rutilový obal

Rutilový obal obsahuje až 90 % titanových rud, buď rutil nebo limenit a dále vápenec, oxid křemičitý, feromangan, a další. Elektrody s rutilovým obalem se používají pro střídavý proud nebo stejnosměrný proud a přímé zapojení elektrody, tj. elektroda je připojena k minusu. Velmi dobře se zapaluje elektrický oblouk, strusku lze velmi snadno odstranit. Protože závar je velmi malý nedoporučuje se používat tyto elektrody pro svařování tlustých plechů. Dosažené plastické vlastnosti jsou horší než u bazických elektrod. Rutilové elektrody způsobují menší rozstřík.

Kyselý obal

Kyselý obal obsahuje asi 50 % magnetitu, 20 % oxidu křemičitého, 20 % feromanganu, 10% vápence, rutilu, vodního skla a další. Elektrody s kyselým obalem jsou vhodné pro střídavý proud nebo stejnosměrný proud a přímé zapojení elektrody, tj. elektroda je připojena ke katodě (-). Kyselé elektrody se přednostně používají pro polohy PA nebo PB, umožňují hluboký závar a disponují vysokým výkonem. Svary jsou náchylnější na vznik tzv. krystalizačních trhlin z důvodu nedokonalé rafinace síry a fosforu. Svarový kov má nižší [pevnost](#) ale vyšší houževnatost.

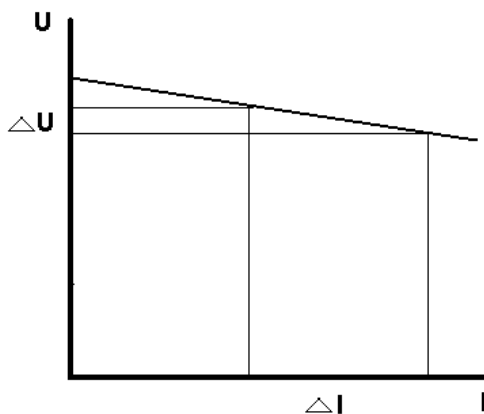


Svařovací zdroj nebo **svařovací agregát** (slangově svářečka) je elektrické zařízení, používané pro generování svařovacího proudu při svařování metodami obloukového svařování. Svařovací zdroj musí splnit celou řadu požadavků vyžadovaných pro bezproblémové svařování jako je regulace elektrického napětí a elektrického proudu, odolnost při vzniku krátkodobých zkratů zapálení a stabilní hoření elektrického oblouku, stálost výkonu a dostatečná účinnost i zatěžitelnost. Svařovací zdroje mohou dodávat stejnosměrný proud (svařovací dynama), usměrněný proud (svařovací usměrňovače a invertory), střídavý proud (svařovací transformátory).

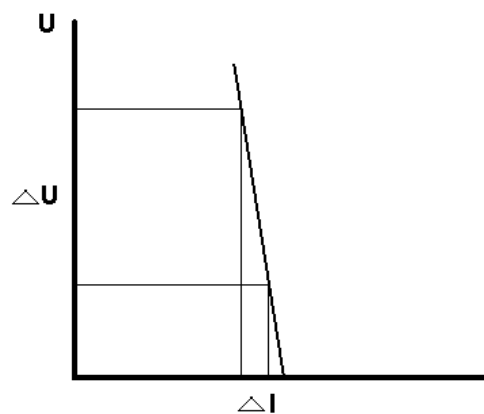
Charakteristiky svařovacího zdroje

Současné svařovací zdroje umožňují generování svařovacího proudu v hodnotách od 30 do 1 000 A pro svařování obloukovými metodami .

Plochá charakteristika MIG/MAG:



Strmá charakteristika MMA, TIG/WIG:



Zatěžovatel svařovacího zdroje

Zatěžovatel (DZ) svařovacího zdroje je jeden ze základních parametrů svařovacího zdroje, který vyjadřuje poměr maximální možné doby svařování t_{sv} k celkovému pracovnímu času t_{sm} .

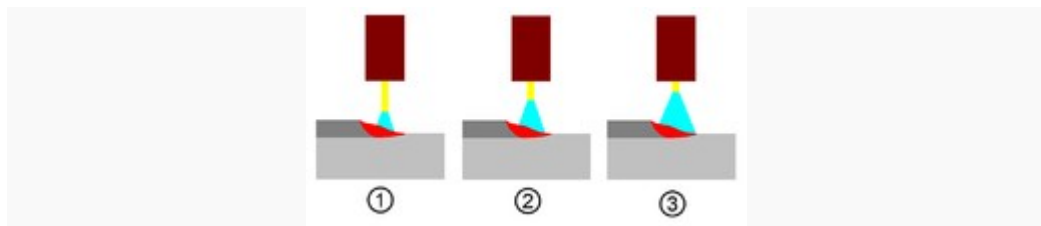
$$DZ = \frac{t_{sv}}{t_{sm}} \times 100[\%]$$

Příklad

Pokud při celkové době práce se svářečkou 10 minut, lze efektivně používat svářečku 4 minuty, potom zatěžovatel svařovacího zdroje lze vypočítat jako:

$$DZ = \frac{t_{sv}}{t_{sm}} \times 100[\%] = \frac{4}{10} \times 100 = 40\%$$

Při ručním svařování by měl DZ být minimálně 40 % u automatických metod (např. svařování pod tavidlem) 100 %.



Délka oblouku a její dopad na velikost napětí a proudu:
od nízkého napětí a vyššího proudu (1) až po vyšší napětí a nižší proud (3)

Statická charakteristika

Statickou charakteristiku zdroje, tzv. voltampérovou charakteristiku, lze vyjádřit závislostí mezi pracovním napětím a svařovacím proudem. Zdroje se strmou charakteristikou regulují hodnotu napětí v elektrickém obvodu v závislosti na celkovém odporu. Tzn., pokud se zvětšuje odpor, elektrický oblouk se prodlužuje, zvyšuje se napětí při konstantní hodnotě svařovacího proudu a naopak. Tato charakteristika je využívána pro svařování metodami ruční obloukové svařování obalenou elektrodou nebo svařování netavící se elektrodou v inertním plynu.

Zdroje s plochou charakteristikou reagují na změnu odporu, resp. prodloužení elektrického oblouku, zvýšením svařovacího proudu při zachování konstantního napětí. To je výhodné při svařování s tavící se elektrodou jak v ochranném plynu tak i při svařování pod tavidlem, kdy zdroj umožní zachovávat konstantní délku oblouku – tedy napětí – regulací

rychlosti podávání se svařovacího drátu. Rychlost odtavování svařovacího drátu je úměrná velikosti svařovacího proudu.

Dynamická charakteristika

Dynamická charakteristika zdroje popisuje schopnost zdroje vyrovnávat s náhlými krátkodobými změnami napětí při zapalování oblouku, při zkratu a jeho přerušení.

Synergický zdroj

Synergický zdroj, resp. synergický režim, označuje takový svařovací zdroj, jehož svařovací parametry jsou natolik optimalizovány, že při změně jednoho parametru – většinou rychlosti podávání svařovacího drátu – dojde k automatickému přenastavení dalších závislých parametrů, např. svařovacího proudu a napětí, průtok ochranného plynu, rychlost pojezdu, atd. Touto funkcí je vybavena většina současných profesionálních (průmyslových) svářeček.

Napětí naprázdno

Napětí naprázdno je maximální napětí, které může svařovací zdroj dodávat, pokud se s ním v danou chvíli nesvařuje. Z bezpečnostních důvodů se maximální hodnota napětí omezuje na 113 V při používání stejnosměrného proudu a 80 V při používání střídavého proudu. Uvedené hodnoty jsou platné pro vnitřní prostředí. Při používání svařovacího zdroje mimo zakryté prostory platí přísnější regule.

Svařovací dynamo

Nejstaršími zdroji jsou tzv. rotační dynamo, která generují stejnosměrný proud. Svařovací dynamo může být poháněno buď elektrickým nebo spalovacím motorem, který s dynamem tvoří jeden celek, tzv. svařovací agregát. Svařovací dynamo disponuje strmou statickou charakteristikou a je tedy vhodné pro svařování obalenou elektrodou nebo svařování TIG případně MIG/MAG. Svařovací proud se indukuje ve vodičích kotvy rotoru, které se otáčejí v elektromagnetickém poli statorového vinutí. Regulace svařovacího proudu je možná plynulá a dosahuje se změnou buzení magnetického pole statoru. Mezi nevýhody patří velká hmotnost, hlučnost, vysoká spotřeba elektrické energie a s tím spojená nízká efektivita. Naopak výhodou je vyšší hodnota zatěživatele.



Svařovací agregát se spalovacím motorem

Svařovací transformátor

Svařovací transformátor, který generuje jednofázový střídavý elektrický proud, se sestává z jádra tvořeného křemíkem legovanými ocelovými plechy ve tvaru rámu, primární a sekundární cívky. Vinutí cívek je vyrobeno z měděných nebo hliníkových vodičů. Transformátor je napájen střídavým proudem, který protéká vinutím primární cívky a indukuje střídavé elektromagnetické pole. Elektromagnetickou indukci vzniká ve vinutí sekundární cívky střídavé napětí. Po zapálení elektrického oblouku při svařování vznikne uzavřením svařovacího obvodu střídavý svařovací proud. Svařovací transformátory disponují polostrmou statickou charakteristikou a jsou vhodné pro ruční svařování obalenou elektrodou, případně pro TIG svařování, pro kterou je vhodný zdroj vysokonapěťových impulsů – vysokofrekvenční ionizátor. Svařovací transformátory mají nižší spotřebu, ale také nižší hodnotu zatěžovatele.



Svařovací usměrňovač

Svařovací usměrňovač, který generuje stejnosměrný resp. usměrněný proud, se skládá ze síťového transformátoru a usměrňovacích prvků v sekundárním obvodu transformátoru. Usměrňovacími prvky jsou polovodičové křemíkové diody nebo tyristory. Použitím transformátoru, který může být jak jednofázový tak i třífázový, lze měnit výstupní proud jak na střídavý tak i na usměrněný. Svařovací usměrňovače mají nižší spotřebu v porovnání se svařovacími dynamy, vyšší účinnost až 80 %, nižší hmotnost a hlučnost.



Svařovací invertor

Svařovací invertorové zdroje jsou moderní svařovací zdroje využívané zejména v průmyslové výrobě. Jsou to zdroje řízené výkonovými tranzistory, které pracují na základě středofrekvenčních měničů s frekvencemi od 20 do 100 kHz. Díky jejich uspořádání, které vede na vyšší pracovní frekvenci, dosahují transformátory menších rozměrů a hmotnosti. Účinnost se pohybuje okolo 90 %. Vysoká frekvence se dosahuje z usměrněného střídavého proudu. Tyto zdroje mají vlastní centrální řídicí jednotku umožňující mj. i synergický režim.



Bezpečnost při svařování

Svařovací práce jsou z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví velmi rizikové, protože dochází k souběžné existenci vícenásobných pracovních rizik. Svářeči jsou ohroženi i vyšším počtem úrazů a nemocí z povolání. S ohledem na požární bezpečnost je svařování vysoce riziková činnost, protože při ní dochází k práci za vysokých teplot a může tak dojít ke vznícení hořlavých látek na stanovišti svářeče a v jeho okolí.

Při tavném svařování hrozí rizika popálení odstříkujícího kovu, okují i strusky ze svarové lázně, a dále dotyku s horkými svařovanými částmi. Proto je nutné, aby svářeč a osoby nacházející se na stanovišti byly adekvátně ochráněny osobními ochrannými pracovními prostředky z nehořlavých materiálů, tj. svářecí zástěru, případně oblek, rukavice, pokrývku hlavy.



Legislativní požadavky

Bezpečnostní ustanovení pro svařování je zakotveno v normách ČSN 0506xx, jejichž znalost je jednou ze základních povinností svářečů, svářečských techniků a svářečských dozorců. Ve zmíněných normách je definována terminologie, návrh a provedení svářečských pracovišť z hlediska bezpečnosti (odvětrávání, osvětlení, dostatečný prostor, atd.), pracovní podmínky na pracovištích a další:

- ČSN 05 0600. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro svařování kovů. Projektování a příprava pracovišť.*
- ČSN 05 0601. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro svařování kovů. Provoz*
- ČSN 05 0610. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro plamenové svařování kovů a řezání kovů.*
- ČSN 05 0630. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro obloukové svařování kovů.*
- ČSN 05 0650. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro odporové svařování kovů.*
- ČSN 05 0661. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro třecí svařování kovů.*
- ČSN 05 0671. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro laserové svařování kovů*
- ČSN 05 0672. *Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro elektronové svařování kovů*
- Předmětem vyhlášky Ministerstva vnitra č. 87/2000 Sb. je definice nebezpečných koncentrací hořlavých látek, hodnocení požárního rizika, stanovení opatření proti vzniku a šíření požáru, a další. Vyhláška souvisí se zákonem o požární ochraně.

Kvalita

Během svařování se vytváří takové termodynamické podmínky, při kterých snadno zanikají staré a vznikají nové strukturní vazby. Obecně tedy lze svařování popsat jako proces změny vnitřní struktury jak základního tak přídavného materiálu za účelem získání trvalého nerozebíratelného spojení.

Tepelně ovlivněná oblast

Kromě svarového kovu bývá odlišná od základního materiálu i jeho struktura v nejbližším okolí svaru. Týká se to především svarů provedených tavnými metodami svařování. Tato zóna, která se nazývá tepelně ovlivněnou oblastí, bývá nejslabším místem dobře provedeného svarového spoje z hlediska mechanických vlastností. Její velikost a změna struktury resp. substruktury je ovlivněna převážně množstvím vneseného tepla a u některých slitin (např. feritických ocelí) i rychlostí ochlazování a rychlosti polymorfních přeměn struktury.

Vady ve svarech



Nekvalitní svar trubek se zápaly a studenými spoji

Během svařování se mohou vyskytnout okolnosti, které vedou na vznik nedokonalostí a vad svarů. Druhy vad jsou většinou typické jak daným svařovaným materiálům, tak metodám svařování. Vady jsou normativně hodnoceny, tedy kvantifikovány a kvalifikovány na základě daných kritérií pro daný typ výrobku:

- ČSN EN ISO 5817 pro oceli, nikl, titan a jeho slitiny,
- ČSN EN ISO 10042 pro hliník.

Jiná kritéria jsou nastavena pro výrobky a konstrukce, jejichž kolaps mají minimální dopad na majetek, zdraví či životy osob (např. zábradlí) a jiná platí pro oblast, ve které může relativně drobná chyba způsobit katastrofální následky (např. zařízení pro jadernou energetiku).

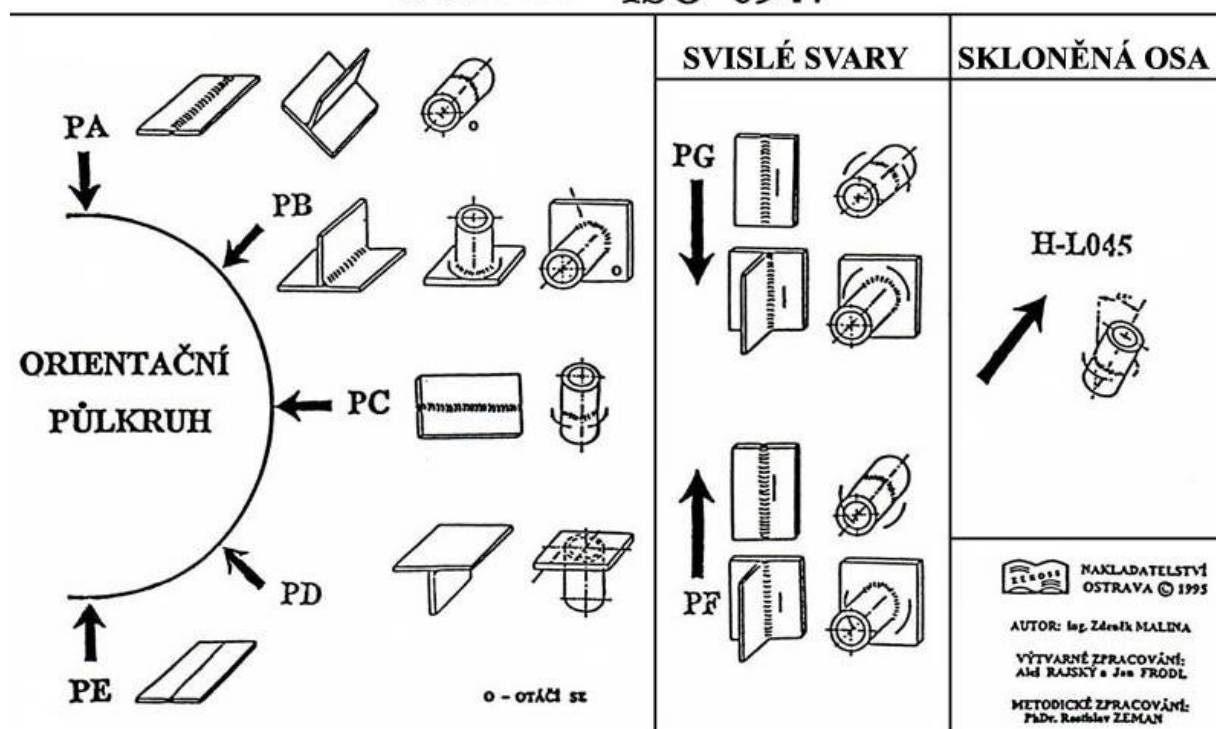
Trhliny, zápaly, studené spoje, koncové krátery se v dynamicky namáhaných konstrukcích (dopravní prostředky, některá strojní zařízení, mosty, apod.) se nesmí vyskytovat, neboť mohou vést k iniciaci a šíření tzv. únavové trhliny, která může způsobit náhlý kolaps.

Typy a polohy svarů

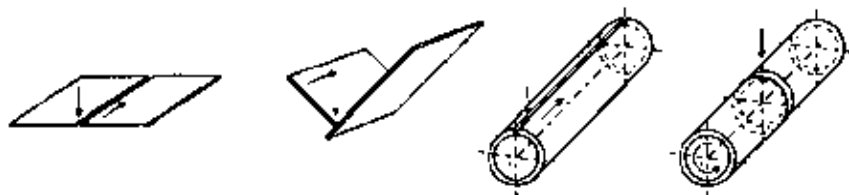
Známe dva základní typy svarových spojů. Spoje koutové, značka FW a spoje tupé, značka BW.

Polohy svařování- učební pomůcka pro určení polohy

POLOHY SVAŘOVÁNÍ PODLE ISO 6947



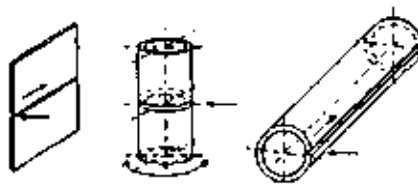
Rozsahy poloh svařování



a) PA: poloha vodorovná šhora



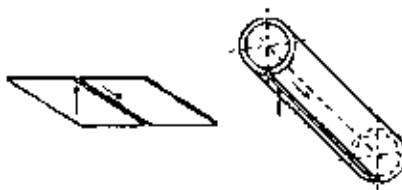
b) PB: poloha vodorovná šikmo šhora



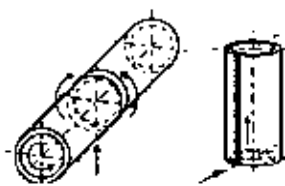
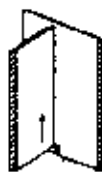
c) PC: poloha vodorovná



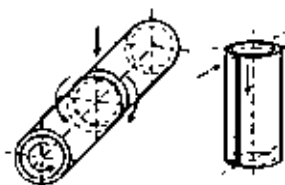
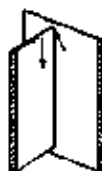
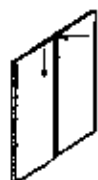
d) PD: poloha vodorovná šikmo nad hlavou



e) PE: poloha vodorovná nad hlavou



f) PF: poloha visící nahoru



g) PG: poloha visící dolů

Vady ve svarech a jejich určování přípustnosti vychází nomy EN ISO 5817. Vady rozeznáváme vnější a vnitřní. Základním parametrem hodnocení je síla základního

materiálu (h) a skupina hodnocení (B,C,D). Každá vada má svůj přesný popis a číselné označení. Vadám předcházíme dodržováním postupů svařování a určených parametrů.

ANB

ZNAČKY

a - jmenovitá velikost koutového svaru
 b - šířka převýšení svaru
 h - výška nebo šířka vady
 t - tloušťka plechu

ČSN EN ISO 5817
URČOVÁNÍ STUPNŮ JAKOSTI
 mezní hodnoty vybraných typů vad koutových svarů pro stupně jakosti B, C, D

Červené hodnoty
 $t \geq 0,5$ až 3 mm
Černé hodnoty
 $t > 3$ mm

ESAB

503 Nadměrné převýšení koutového svaru

$t \geq 0,5$

$b = 5$
 $h \leq 1,5$ B
 $h \leq 1,75$ C
 $h \leq 2,25$ D

$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$, max. 3 mm
 $h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 b$, max. 4 mm
 $h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$, max. 5 mm

512 Nadměrná asymetrie koutového svaru

$t \geq 0,5$

$a = 5$
 $h \leq 2,25$ B
 $h \leq 2,75$ C
 $h \leq 3,0$ D

$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$
 $h \leq 2 \text{ mm} + 0,15 a$
 $h \leq 2 \text{ mm} + 0,2 a$

5214 Překročení velikosti koutového svaru

$t \geq 0,5$

$a = 5$
 $h \leq 1,75$ B
 $h \leq 2,00$ C
 $h \leq \cdot$ D

$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$, max. 3 mm
 $h \leq 1 \text{ mm} + 0,20 a$, max. 4 mm
 Neomezeno

5213 Podkročení velikosti koutového svaru

$t \geq 0,5$ až 3 $t > 3$

$a = \cdot$ $a = 5$
 $h \leq \cdot$ $h \leq \cdot$
 $h \leq \cdot$ $h \leq 0,8$
 $h \leq \cdot$ $h \leq 0,8$

B Nepřípustné
 C Krátké vady $h \leq 0,2 \text{ mm}$
 D Krátké vady $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 a$

$h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,1 a$, max. 1 mm
 $h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,1 a$, max. 2 mm

617 Špatné sestavení koutových svarů

$t \geq 0,5$ až 3 $t > 3$

$a = \cdot$ $a = 5$
 $h \leq \cdot$ $h \leq 1,0$
 $h \leq \cdot$ $h \leq 1,5$
 $h \leq \cdot$ $h \leq 2,5$

B $h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1 a$, max. 2 mm
 C $h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,2 a$, max. 3 mm
 D $h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 a$, max. 4 mm

ZERORS
 2005