



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky
reg. č.: CZ.1.07/2.2.00/07.0018.

Přehled metod svařování

Hana Lapšanská

Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky

17. listopadu 50a, 772 07 Olomouc, hana.lapsanska@upol.cz

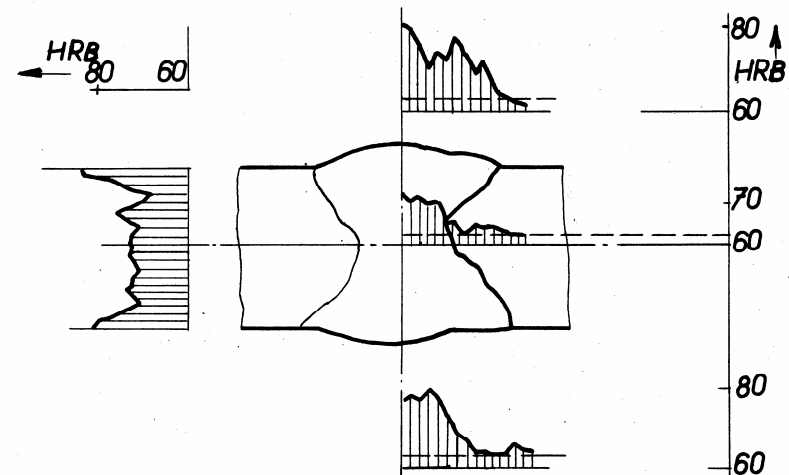
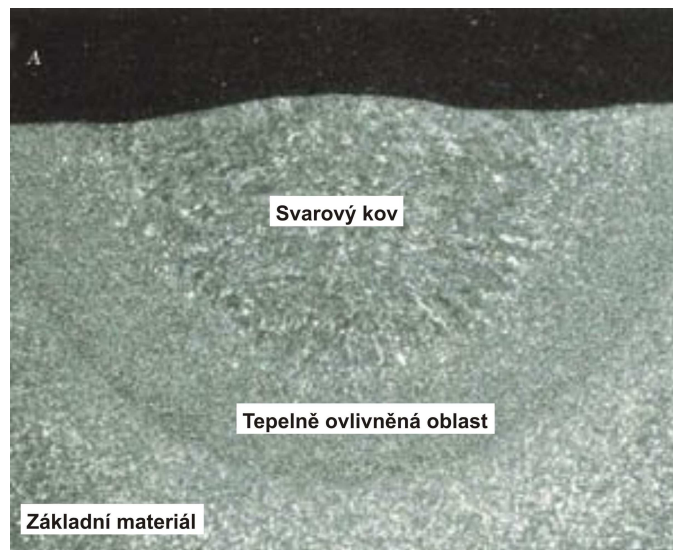
Obsah

- 1. Svařování**
- 2. Historie a vývoj svařování**
- 3. Přehled metod svařování**
- 4. Vybrané metody svařování**
 - Kovářské svařování
 - Obloukové svařování
 - Svařování plamenem
 - Odporové svařování
 - Tlakové metody svařování
 - Ostatní metody svařování
 - Hybridní metody svařování
- 5. Navařování kovů**
- 6. Metody kontroly svarových spojů**

1. Svařování

□ SVAŘOVÁNÍ

- proces vedoucí k vytvoření **nerozebíratelného** spojení dvou nebo více dílů (stejně nebo různé materiály)
- pomocí soustředěného **tepla** nebo **tlaku** (příp. jejich kombinace) – vytvoření termodynamických podmínek pro **vznik nových meziatomových vazeb**
- s nebo bez použití přídavného materiálu (stejně nebo podobné chemické složení jako spojované materiály)
- vede ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního materiálu v okolí spoje – **tepelně ovlivněná oblast**



Svařování

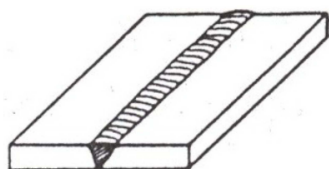
□ Svařitelnost

- schopnost materiálu vytvořit vhodnou technologií svarový spoj se stejnými nebo podobnými vlastnostmi jako má základní svařovaný materiál
- klasifikace
 - zaručená
 - zaručená podmíněná
 - dobrá
 - obtížná svařitelnost

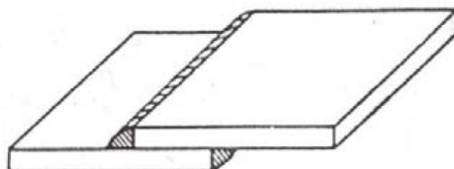
□ svařovat lze kovy i nekovy, materiály podobných i odlišných vlastností

□ různé metody – tavné, tlakové nebo kombinované

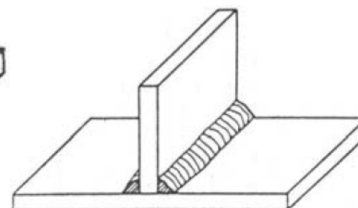
□ různé typy svarů



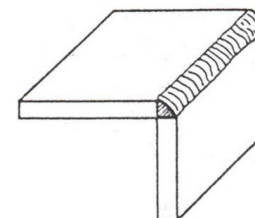
tupý



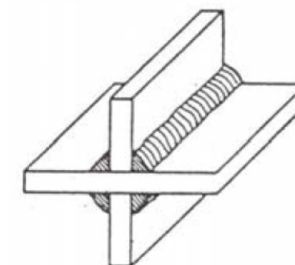
přeplátovaný



T spoj



rohový



křížový

2. Historie a vývoj svařování

□ KOVÁŘSKÉ SVAŘOVÁNÍ

- 3. tisíciletí př. n. l.
- první kováři pravděpodobně Asyřané – v polovině 19. století nedaleko Mosulu (dnešní Irák) našel Francouz Viktor Place skladiště železných předmětů (slitky vřetenovitého tvaru – až desítky kilogramů, zbraně, **svařované řetězy**)
- 1350 př. n. l. Egypt, Palestina, 1300 př. n. l. Damašek (Sýrie), Indie
- 700 př. n. l. Evropa, 6. st. n. l. Čína, 8. st. n. l. Japonsko
- do druhé poloviny 19. století jediná známá metoda svařování

□ SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

- 1801 anglický chemik Humprey Davy - objev elektrického oblouku
- 1860 Angličan Wilde – první spojení dvou kusů železa el. obloukem (1865 první patent v oblasti svařování kovů s použitím el. proudu)
- 1881 francouzský vědec Auguste DeMeritens - pravděpodobně první pokus svařování olověných desek **uhlíkovými elektrodami** – uhlíková elektroda na záporný pól, svařované předměty na kladný, zdrojem el. proudu akumulátorové baterie (patent)
- jeho žáci Nikolaj Benardos a Stanisław Olszewski tuto metodu rozvinuli pro svařování ocelových plechů – obrátili schéma zapojení el. oblouku (1885 patent ve Velké Británii, Belgii, Francii, Německu a Švédsku, 1887 v Rusku a USA)
- první praktické použití – svařování kovových nádrží, sudů, litinových trubek, zahradního nábytku (Anglie), opravy parních lokomotiv (USA)
- **problém křehnutí** (náchylnost k praskání) svarů při použití uhlíkové elektrody omezoval rozšíření používání této metody
- 1888 Rus Nikolaj Slavjanov, 1889 Američan Charles Coffin - použití **kovové elektrody** – svařování el. obloukem s použitím tavidla (omezení křehnutí)

Historie a vývoj svařování

- 1907 Švéd Oscar Kjellberg – **obalovaná elektroda** (ochrana tavné lázně - zvýšení kvality svaru, především tažnosti) » rozšíření použití, především ve zbrojním průmyslu
- 1908 Nikolaj Benardos – **elektrostruskové svařování** (možnost svařování tlustých plechů)
- I. světová válka – zbrojní průmysl (výroba ocelových plášťů pum, min, torpéd, trupů stíhacích letadel, opravy lodí)
- 1919 **kovová elektroda s celulózovým obalem** (výroba svarů o vysoké houževnatosti, bez strusky)
- 1920 první celosvařovaná loď (HMS Fuglar, Anglie)
- 1923 první celosvařovaný most (152 m, Toronto, Kanada)
- 1924 Paul O. Noble – svařování stejnosměrným proudem za použití svařovacím napětím ovládaného podávání **svařovacího drátu**
- 1924 americký fyzik a chemik Irving Langmuir – **svařování atomárním vodíkem** (hoření el. oblouku mezi elektrodami z kovu odolávajícího vysokým teplotám (např. wolfram) ve vodíkové atmosféře způsobuje disociaci a rekombinaci atomů vodíku za uvolnění velkého množství tepla)
- 1924 I. Langmuir a P. Alexander – zařízení pro svařování využívající **externě dodávanou ochrannou atmosféru** směsi vodíku a kyslíku o vysoké čistotě; později argon, helium, směs propanu a vodíku, směs propanu a oxidu uhličitého
- 1929 první celosvařovaný most v Evropě (Maurzyce u Lowicze, Polsko)
- 1929 patent společnosti National Tube (později jej koupila Linde Air Product) – **svařování pod tavidlem** (vysokovýkonová metoda)
- 1931 první svařovaný most v ČR (Plzeň), 1933 dnešní Tyršův most (Plzeň) – v té době s rozpětím 49,2 m šířka největší na světě
- 1940 Hobart a Devers – **svařování tavící se elektrodou v ochranném inertním plynu (MIG)**; argon a helium později doplněny/nahrazeny oxidem uhličitým – vyšší dostupnost metody (použití i pro nelegované oceli)

Historie a vývoj svařování

- 1941 V. H. Pavlecka a R. Meredith – **svařování s netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře hélia** » rozvoj svařování materiálů pro letecký průmysl (hořčík, hliník, nikl) - především vojenské letectví – začátek II. světové války
 - 1953 **svařování plazmou** (odvozeno od svařování s netavící se elektrodou v inertním plynu – vyšší stabilita hoření oblouku + vyšší koncentrace tepla)
 - 1954 společnost Bernard – **elektroda plněná tavidlem** (trubičkový drát) – kromě dodávaného plynu přispívají k ochranné atmosféře i plyny vznikající z tavidla při hoření oblouku (1959 plněné elektrody vytvářející ochrannou atmosféru bez nutnosti dodávky dalších plynů)
 - 1957 Nelson E. Anderson – **svařování impulsním proudem** (pravidelné střídání vysokého a nízkého svařovacího proudu)
 - 60. léta – **kovem plněné (trubičkové) elektrody** – vyšší výkon odtavení
 - v dalších letech až do současnosti - zdokonalování svařovacích zdrojů, přídavných materiálů a ochranných plynů za účelem **zvyšování efektivity** svařovacích procesů
- **svařování plamenem**
- 1801 americký chemik Robert Hare – vynález **hořáku pro kyslíko-vodíkový plamen**
 - 1901 Charles Picardes – **svařovací hořák pro kyslíko-acetylenové svařování**
 - 1913 Percy Avery a Carl Fisher – první **tlaková láhev pro acetylen**
- **odporové svařování**
- 50. léta 19. století James Joule – experimenty se svařováním svazků drátů **teplem generovaným elektrickým proudem**, 1886 Elihu Thomson zdokonalil
- **třecí svařování**
- polovina 50. let 20. století – pro svařování rotujících těles
 - 1991 třecí svařování promíšením (FSW)

Historie a vývoj svařování

- **SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM PAPSKEM**
 - 50. léta 20. století J. A. Stohr
 - 1967 svařování částí kosmické lodi Sojuz (hliníkové slitiny)
 - 70. léta 20. století svařování korozivzdorných ocelí, tantalu a slitin titanu (kostry vojenských letadel)

- **DIFÚZNÍ SVAŘOVÁNÍ**
 - 1956 N. F. Kazakov v Sovětském svazu
 - vývoj postupů difúzního svařování pro různé druhy slitin (nikové slitiny, kobaltové superslitiny)

- **SVAŘOVÁNÍ VÝBUCEM**
 - 60. léta 20. století V. V. Philipchuk – použití výbuchu pro **tváření** hliníkových profilů, **svařování** výbuchem; Arnold Holtzman – **zpevňování kovů** s využitím exploze
 - 1965 komerční výroba výbuchem svařované bimetalické desky

- **LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ**
 - 1960 Theodor Maiman - **první laser**
 - 1964 C. Kumar a N. Patel první **výkonový CO₂ laser** vhodný pro svařování
 - 1976 General Motors – první využití v automobilovém průmyslu (svařování ventilů)
 - poslední desetiletí – kombinace laserového a obloukového svařování

3. Přehled metod svařování

OBLOUKOVÉ	Tavící se elektrodou bez ochranného plynu	ODPOROVÉ	Bodové
	Pod tavidlem		Švové
	Tavící se elektrodou v ochranném plynu		Výstupkové
	Wolframovou elektrodou		Odtavovací stykové
	Plazmové		Stlačovací stykové
	Ostatní		Vysokofrekvenční
PLAMENOVÉ	S kyslíkem	OSTATNÍ	Aluminotermické
	Se vzduchem		Elektrostruskové
TLAKOVÉ	Ultrazvukové		Elektroplynové
	Třecí		Indukční
	Kovářské		Světelným zářením
	Výbuchové		Elektronové
	Difúzní	Svařování rázem	
	S plamenovým ohřevem		
	Za studena		

4. Vybrané metody svařování

Kovářské svařování

- napěchování a vykování styčných ploch – očištění od okují – posyp tavidlem (rozpuští okuje a brání oxidaci) - ohřev kovů v peci (do žlutého/bílého žáru - teplota 1200 - 1350 °C) – spojení kovů – prokování pomocí mechanické energie (kladivo, lis)



- 4. století - železný pilíř v Dillí (průměr 40 cm, délka 19 m – z toho 12 m zapuštěno do země, 98 % z tepaného železa, více než 6 tun) – vyroben technikou kovářského svařování spojováním železných disků (ultrazvuková analýza), bez známek rezivění

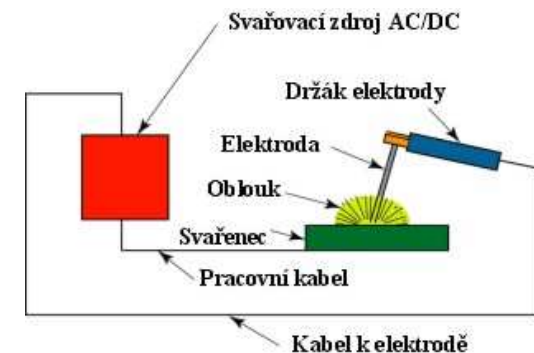
- oka nejkvalitnějších řetězů (např. kotevních) se až do II. světové války spojovala kovářským svařováním – svarem provedeným natupo, přeplátovaným nebo klínovým svarem

- damašková (damascenská) ocel
 - vysoká pevnost i houževnatost (meče, dýky)
 - pláty oceli a karbonizovaného železo (wootz) střídavě kladeny, rozžhaveny a na plocho kovářsky po jednom svařeny s předchozími vrstvami



Svařování elektrickým obloukem

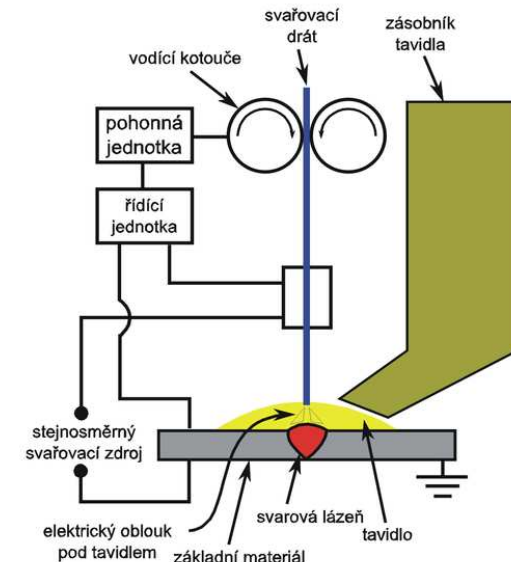
- zdrojem tepla je el. oblouk mezi anodou a katodou
- **elektrický oblouk** – nízkonapěťový vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí dostatečně ionizovaného plynu (plazma)
 - velký rozdíl potenciálů mezi elektrodami
 - proud jednotky až tisíce ampér
 - intenzitní viditelné záření z elektrod i sloupce oblouku + UV
 - 4000 – 7000 – 15000 °C
- natavení svarových ploch základního (příp. i přídavného) materiálu – postupné vyplnění svaru svarovým kovem
- regulovatelné zdroje svařovacího proudu (svařovací dynamy, transformátory, usměrňovače)
- **Ruční obloukové svařování obalenými elektrodami**
 - velmi jakostní svary požadovaného chemického složení (obalená elektroda je současně přídavný materiál)
 - **jádro** (drát = holá elektroda) + **obal elektrody** (s obsahem struskotvorných, rafinačních a pojivých látek)
 - funkce obalu
 - **plynotvorná** – hořením obalu vznikají se uvolňují plyny – ochranná a atmosféra (celulóza, uhličitán vápenatý)
 - **ionizační** – pro usnadnění zapalování a hoření oblouku (soli draslíku, sodíku)
 - **metalurgická** – rafinace (snížení obsahu fosforu a síry), dezoxidace, legování
 - spojování montážních dílů, kusová výroba, opravy



Svařování elektrickým obloukem

□ Svařování pod tavidlem

- do oblouku je podávána holá svařovací elektroda (odvíjející se z cívky nebo svitku) - brodí se vrstvou zrnitého tavidla (oxid křemičitý, oxid manganatý) - chrání oblouk před účinky okolí + brání vyzařování
- část tavidla se zúčastní metalurgických pochodů (dezoxidace) a ztuhne jako struska
- neroztavené tavidlo – tepelná izolace – za svarem odsáváno
- ve srovnání s ručním obloukovým **hlubší závar, lepší mechanické vlastnosti** spoje, ztráty rozstříkem eliminovány
- časově náročnější příprava – nevhodné pro krátké svary



□ Svařování v ochranném proudu plynu

- ochrana svarového kovu inertním nebo aktivním plynem
- plyny chrání roztavený kov před nežádoucími účinky vzduchu, ovlivňují zapálení oblouku, geometrii, energetickou bilanci...
- **MIG** (metal inert gas) - svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
 - Ar, He (drahé) – korozivzdorné a vysokolegované oceli, neželezné kovy
 - holá elektroda je současně přídavným materiálem
 - vysoká proudová hustota – vysoká rychlost odtavování – **velká svařovací rychlost + hluboký závar** (teplota oblouku až 15 000 °C, 90 % využití tepla)
 - tavící se elektroda na + pól – vyšší stabilita hoření oblouku + nižší ztráty rozstříkem
 - **nízký obsah plynů** ve svarovém kovu – **dobré pevnostní vlastnosti**

Svařování elektrickým obloukem

- **MAG** (metal active gas)- svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu
 - CO₂ a směsi plynů (Ar+O₂, Ar+CO₂, Ar+H₂+N₂) – nelegované a nízkolegované oceli a oceli na odlitky)
 - teplota oblouku 10 000 °C
 - svařování do úzké mezery – efektivní svařování s menším množstvím svarového kovu
 - MIG i MAG: **minimální tvorba strusky, vysoká efektivita, malá tepelně ovlivněná oblast** při vyšších rychlostech svařování, **vysoký výkon – hluboký závar, nízká pórovitost**

- **TIG (WIG)** (tungsten inert gas) - svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
 - W (W-Th) elektroda, ochranný plyn Ar (výjimečně He)
 - proud stejnosměrný (hlubší závar) nebo střídavý (vhodné pro oxidující slitiny Al, Mg a oceli a Ti slitiny malých tlouštěk)
 - bez přídavného materiálu
 - inertní plyn - **čistý povrch** svaru (nevzniká struska), **nevyžaduje tavidla** (ale lze použít)
 - stabilní oblouk, **celistvé svary**
 - přesné dávkování tepla, **malá tepelně ovlivněná oblast**
 - TIG + úzká intenzivně chlazená tryska hořáku – **plazmové svařování** – hluboký úzký závar, vysoká kvalita svaru, vysoká hustota energie (ve srovnání s laserem menší hustota energie, ale nesrovnatelně vyšší účinnost a celkově nižší provozní náklady)
 - **TOPTIG** – s přídavným materiálem (drát), srovnatelná nebo vyšší rychlost svařování než u MIG + bez rozstříku taveniny

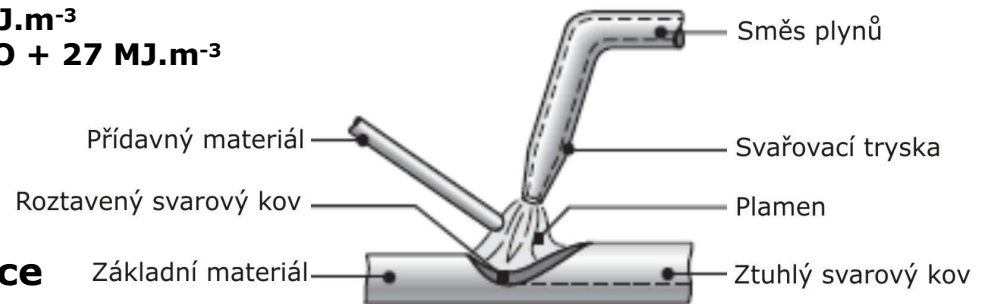
Svařování elektrickým obloukem

Tavící se elektrodou bez ochranného plynu	Ruční obalenou elektrodou Gravitační obalenou elektrodou Holou elektrodou Plněnou elektrodou bez ochranného plynu Obaleným drátem Položenou elektrodou
Pod tavidlem	Drátovou elektrodou Páskovou elektrodou
Tavící se elektrodou v ochranném plynu	V inertním plynu – MIG V aktivním plynu – MAG Plněnou elektrodou v aktivním plynu Plněnou elektrodou v inertním plynu
Wolframovou elektrodou	V inertním plynu – TIG Atomické
Plazmové	Plazmové – MIG
Ostatní	Uhlíkovou elektrodou Magneticky ovládaným obloukem

Svařování plamenem

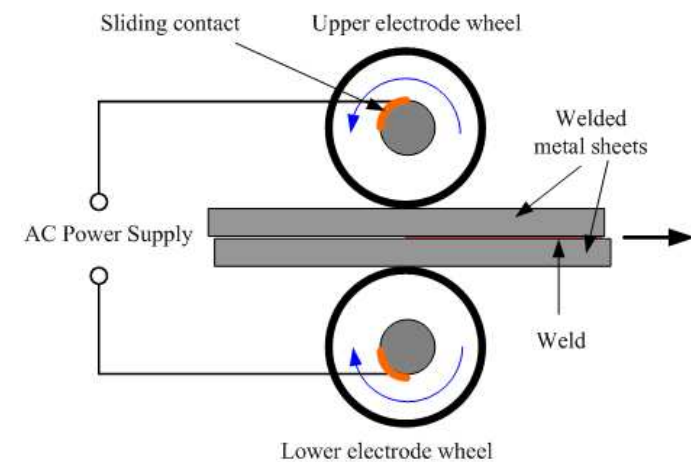
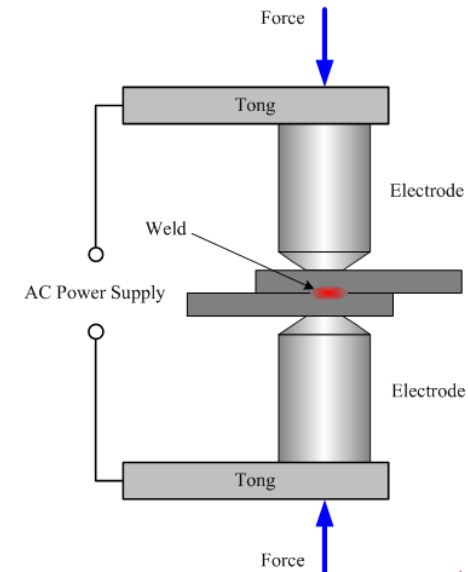
- zdrojem tepla je plamen vzniklý hořením směsi plynů
 - Kyslík – acetylen, kyslík – propan, kyslík – vodík
 - Vzduch-acetylen, vzduch – propan...
- přídavné materiály + tavidla
- až 3200 °C
- oxidační nebo redukční v závislosti na poměru množství plynů
- **kyslíko-acetylenový plamen**
 - neutrální ($O_2 : C_2H_2 \sim 1-1,1 : 1$) – bílý plamen (ocel)
 - redukční (<1) – bílý plamen (Al, Mg, litiny)
 - oxidační ($1,2 : 1$) – modrofialový plamen (mosaz, bronz)
 - 2 fáze spalovacího procesu
 - $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2 + 21 MJ.m^{-3}$
 - $2CO + H_2 + 3O = 2CO_2 + H_2O + 27 MJ.m^{-3}$

- **nízké investiční náklady**
- **mobilnost svařovací soupravy**
- **velká tepelně ovlivněná oblast**
- **zhrubnutí zrna, velké deformace**
- **malý výkon**
- **vysoké nároky na kvalifikaci a zručnost svářeče**
- **vhodné pro opravy**
- **ne pro sériovou výrobu, velké tloušťky a obtížně tavitelné slitiny**



Odporové svařování

- tlak + Jouleovo teplo, které se vyvine vlivem odporu materiálu při průchodu el. proudu o vysoké intenzitě (až 150 kA) a nízkém napětí (do 15 V)
- teplo $Q = RI^2t$
 - R – odpor svarového spoje, I – intenzita svařovacího proudu, t – doba svařování
- 60 % využití uvolněného tepla
- **Bodové**
 - nejčastěji
 - vložení svařovaných materiálů mezi elektrody (Cu) – přitlak – sepnutí el. obvodu – natavení stykových ploch – vypnutí el. obvodu – ztuhnutí – uvolnění přitlaku
- **Švové**
 - 2 proti sobě se otáčející kotoučové elektrody svařovací proud se zapíná s frekvencí odpovídající požadovanému překrytí (spoj pevný nebo pevný a těsný)
 - tloušťka až 10 mm
- **Výstupkové, Stykové ...**



Tlakové metody svařování

S natavením

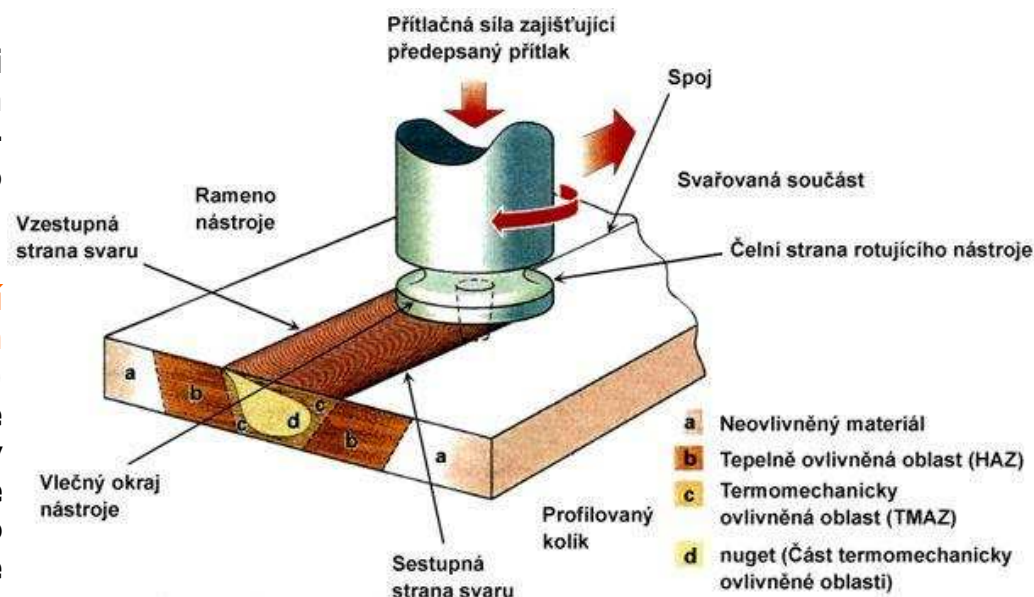
- svařování třením
- možno zařadit i odporové svařování

Bez natavení

- svařování difúzní, výbuchem
- za studena, ultrazvukové

□ Svařování třením

- stykové plochy se třením ohřejí v tenké vrstvě na svařovací teplotu (blízkou teplotě tavení) – plastický stav materiálu – tlakem se svaří
- bez přídavného materiálu
- dříve jen pro rotační součásti - svařovací součásti upnuty a vystředěny do jedné osy - vzájemný pohyb jedno nebo obou svařovaných dílů + vzájemný přítlak
- moderní metoda **třecí svařování s promíšením** (FSW - Friction Stir Welding) – tření a tlak způsobuje speciální nástroj - svařovaný díl již nemusí být pouze rotační, ale lze takto spojovat např. dlouhé rovné plechy, především hliník a jeho slitiny



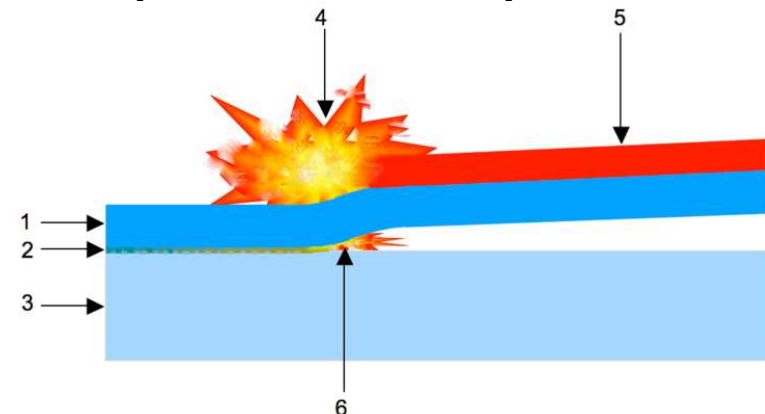
Tlakové metody svařování

□ Difúzní svařování

- difúze atomů stýkajících se svařovaných povrchů při relativně dlouhém působení
- doba působení je nejdůležitějším parametrem
- přítlak 0,5 – 100 hodin při teplotě **0,3 – 0,7 teploty tavení**
- ve speciálních komorách – vakuum nebo ochranná atmosféra
- vhodné i pro těžkotavitelné kovy (Mo, W, Ta, Nb), nekovy (sklo, keramika, grafit) s ocelí
- používají se **mezivrstvy** (folie, povlaky) – musí vytvářet tuhé roztoky s oběma materiály
- perspektivní metoda

□ Svařování výbuchem

- spojení působením tlaku vzniklého při detonaci výbušniny umístěné na povrchu svařovaných (deskových) dílů
- sypké trhavinu typu SEMTEX – detonační rychlost 2100 – 3000 m.s⁻¹
- **rázová vlna** 10 – 100 GPa (podstatně vyšší než mez kluzu v tlaku – výrazná plastická deformace – min 30 %), **pod teplotou tavení**
- svařování bimetálů a vícenásobných kompozitů ze speciálních slitin, navařování titanu, svařování otěruvzdorných materiálů na ocel, navařování práškových materiálů, letecký průmysl, kontakty
- 1 – navařovaný materiál, 2 – svar, 3 – základní materiál, 4 – exploze, 5 – trhavina, 6 – trysk



Tlakové metody svařování

□ Svařování ultrazvukem

- ultrazvukové kmity (nad 16 kHz) přiváděny rovnoběžně ke stykovým plochám svařovaných součástí (mírný přítlak) – tření – místní ohřev (dostatečný pro difúzi) – plastická deformace – rozrušení povrchových oxidických vrstev a odstranění nečistot (zarovnání povrchu) – přítlak – difúze – spojení
- difúzní procesy urychleny ultrazvukovými kmity, vysokou koncentrací poruch vlivem plastické deformace
- **bez natavení** a přídavného materiálu
- vhodné pro **plastické kovy** (KPC mřížka – Al, Cu, Ni, Pt, Au, Ag), svařování plastů
- **bez tepelně ovlivněné oblasti** (bez změny mechanických vlastností)

□ Svařování tlakem za studena

- přiblížení svařovaných povrchů na vzdálenost \sim mřížkový parametr – interakce atomů – vznik pevné vazby
- k dosažení přiblížení je nutná plastická deformace alespoň 60 % (tečení - závisí na materiálu)
- tlak 500 MPa – 4 GPa (závisí na materiálu, jeho stavu, typu spoje apod.)
- vhodné pro **plastické kovy** (KPC), Al a Cu vodiče, Ti+Cu, Pt+Al, Pt+Cu, Pt+Ni, Ni+Al, Ni+Cu (pod teplotou tavení)
- **bez tepelně ovlivněné oblasti, jemnozrná struktura** s deformačním zpevněním

Ostatní metody svařování

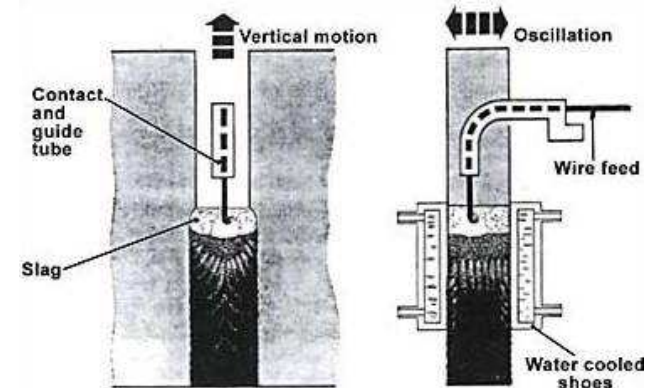
Aluminotermické svařování (svařování termitem)

- zdrojem tepla je **exotermická reakce** směsi práškového hliníku a oxidu železitého (termit)
- směs se místně zahřeje (např. plamenem svařovacího hořáku) na $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ – hoření termitu – oxid hlinitý a železo + uvolněné teplo – $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ – obě složky v tekutém stavu + natavení svarových ploch základního materiálu (těžší železo se usadí na dně reakční nádoby, oxid hlinitý ztuhne na povrchu jako struska)
- reakce probíhá v žáruvzdorné reakční nádobě (kelímku) – dává tvar svaru
- svar během několika sekund – vysoká produktivita – vhodné pro velké množství tvarově a rozměrově se opakujících svarů (svařování železničních kolejnic, betonářských výztuží)
- do termitu lze přidat 10 – 30 % úlomků slitinových ocelí nebo feroslitin pro dosažení požadovaného složení svaru



Elektrostruskové svařování

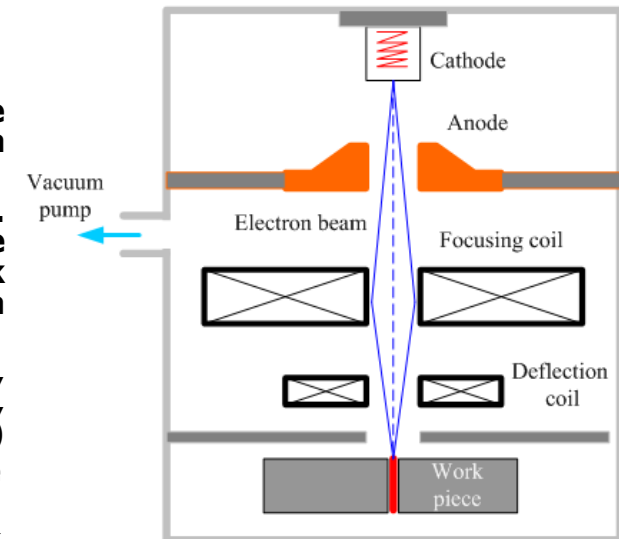
- roztavení (el. proudem) tavidla vloženého do spoje – struska – svařovací proud je veden roztavenou struskou – vlivem odporu se uvolňuje další teplo – roztavená struska postupuje **svisle zdola nahoru** mezi čelními svarovými plochami a deskovými vodou chlazenými měděnými příložkami (svařovací hlava) – taví svařovací elektrodu
- vysoká produktivita, nízké náklady na přípravu spojení, až 1500 mm
- velký energetický vstup – pomalé chlazení – hrubnutí zrn v tepelně ovlivněné oblasti



Ostatní metody svařování

□ Svařování elektronovým paprskem

- ve vakuu
- zdroj = **elektronové dělo** – válcová nádoba se žhavenou elektrodou na jednom konci a oddělovacím uzávěrem na druhém konci
- elektronové dělo vyčernáno na vysoké vakuu ($5 \cdot 10^{-4}$ Pa) – elektrony jsou termoemisí uvolňovány ze žhavené záporné elektrody (W, Mo, Te) – svazek elektronů fokusován magnetickým polem do místa dopadu
- lze spojovat i chemicky velmi **aktivní kovy** (Ti, Zn, Mo, Nb, W), které mají vysokou afinitu ke kyslíku, vysokotavitelné žárovevné slitiny (inconel, nimonic)
- úzká tepelně ovlivněná oblast, minimální deformace
- rafinační účinky vakua
- velké nároky na čistotu svarových ploch, vysoká cena



□ Svařování laserem

- natavení materiálu **fokusem** laserovým svazkem – **vysoká plošná hustota výkonu** (až 10^{12} W.cm⁻²)
- **nevyžaduje vakuu**
- **hluboké úzké svary, malé deformace** (více v samostatné přednášce)

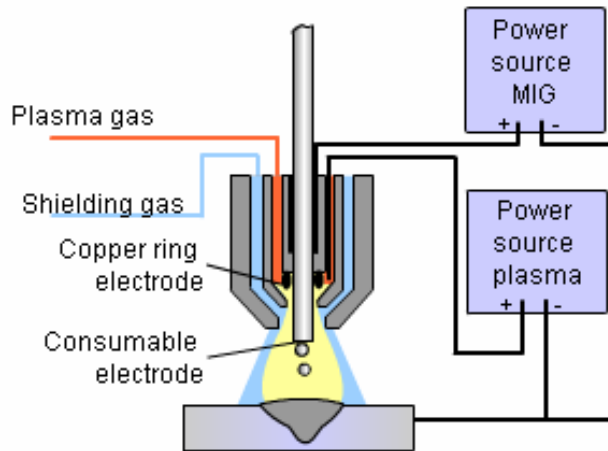


Hybridní metody svařování

□ **kombinace** dvou různých svařovacích metod s cílem dosáhnout optimální kvality svaru a svařovací rychlosti využitím předností dílčích metod

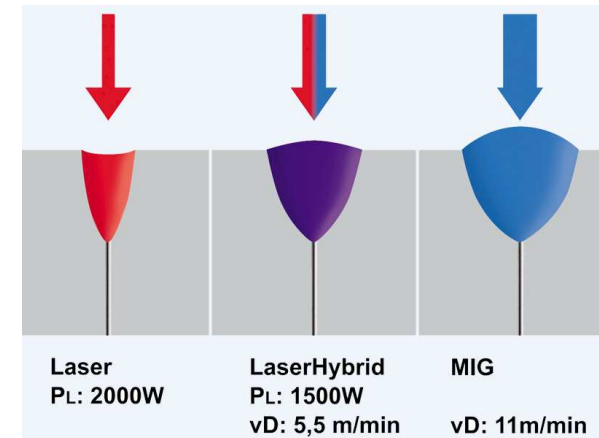
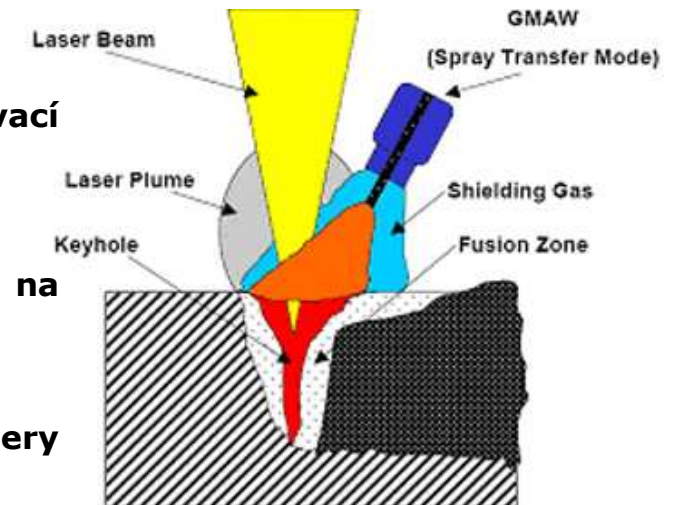
□ **Plazma - MIG**

- vyšší efektivity
- nižší svařovací rychlost
- větší tepelný vstup - distorze



□ **Laser - MIG**

- vyšší svařovací rychlost
- vysoká flexibilita
- náročné požadavky přípravu svarových ploch, konstantní šířku mezery mezi nimi



5. Navařování kovů

- vytváření **homogenních kovových** nebo **slitinových vrstev na povrchu základního materiálu**
- snaha o **minimální hloubku** závaru (minimální podíl základního materiálu v návarovém kovu), **minimální vnesené teplo** (minimální pnutí a deformace)
- navařování plamenem, elektrickým obloukem, laserem, plazmou, kombinované způsoby...
- **opravy** opotřebovaných výrobků nebo součástí (doplnění pro získání původních rozměrů) nebo **vytvoření vrstvy** odlišných vlastností než má základ (odolnost proti korozi, abrazi, erozi...)
- vytváření těsnících ploch, funkčních povrchů...
- zvyšování životnosti strojů, součástí, nástrojů...

- **oproti chemicko-tepelnému zpracování, PVD, CVD apod.**
 - **výhody**
 - **kompaktní vrstva**, spojená metalicky se základem – **pevnost** minimálně na úrovni pevnosti základu
 - vrstvy o větší tloušťce (až desítky mm)
 - lze mechanizovat
 - **nevýhody:**
 - **velké tepelné ovlivnění základního materiálu** (změna struktury), navařování na ušlechtilé oceli vyžaduje přehřev
 - obtížně se připravují tenké návary, návarové vrstvy je obvykle nutné opracovat (broušením) pro požadovaný rozměr, drsnost apod.

6. Metody kontroly svarových spojů

- průběžná kontrola během svařování (projekt CLET) X kontrola po svařování
- rozměry, povrch, zkoušky těsnosti svaru, pevnosti, homogenity...

Destruktivní zkoušky	Nedestruktivní zkoušky
<ul style="list-style-type: none"> □ zkoušky mechanických vlastností <ul style="list-style-type: none"> zkouška tahem zkouška lámavosti zkouška tvrdosti zkouška vrubové houževnatosti únavová zkouška 	<ul style="list-style-type: none"> □ defektoskopické metody <ul style="list-style-type: none"> zkouška prozařovací RTG a γ zářením zkouška vířivými proudy zkouška tahem zkouška ultrazvukem magnetická metoda prášková indukční metoda kapilární zkouška
<ul style="list-style-type: none"> □ technologické zkoušky <ul style="list-style-type: none"> zkouška odolnosti proti tvoření krystalizačních trhlin zkouška odolnosti proti tvoření trhlin za studena 	
<ul style="list-style-type: none"> □ metalografické zkoušky <ul style="list-style-type: none"> hodnocení mikrostruktury zjišťování vad 	

- více v samostatné přednášce o vlastnostech materiálů a metodách jejich zkoušení

Tato prezentace byla připravena za finanční podpory Evropského sociálního fondu v ČR v rámci projektu CZ.1.07/2.2.00/07.0018 „Moderní technologie ve studiu Aplikované fyziky“.

Děkuji Vám za pozornost.