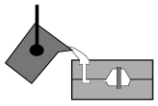
TECHNOLOGIE I.

Slévárenství, svařování, základy ochrany kovů proti korozi



Prof. Ing. Iva Nová, CSc.,
Ing. Iva Nováková, Ph.D.



LIBEREC 2019

Skripta vznikla s podporou projektu ROLIZ

Rozvoj lidských zdrojů TUL pro zvyšování relevance, kvality a přístupu ke vzdělání v podmínkách Průmyslu 4.0, R.č.: CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002329

Recenzent: doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

© Iva Nová, Iva Nováková, 2019
ISBN

OBSAH

ÚVOD **5**

1. SLÉVÁRENSTVÍ **7**
1.1 Slévárenství hutních odlitků 8
1.2 Slévárenství tvarových odlitků 13
1.3 Zásady konstrukce a navrhování odlitků 18
1.3.1 Základní konstrukční pravidla při navrhování odlitků 20
1.3.2 Tloušťky stěn a napojování stěn a žeber odlitků 22
1.4 Slévárenské slitiny kovů 31
1.4.1 Vlastnosti slévárenských slitin 31
1.4.2 Základní druhy slévárenských slitin 34
1.4.2.1 Litiny 35
1.4.2.2 Slitiny hliníku 48
1.4.2.3 Slitiny mědi 54
1.4.2.4 Slitiny hořčíku 59
1.4.2.5 Slitiny zinku, titanu, niklu 61
1.5 Tuhnutí a chladnutí odlitků, nálitkování odlitků a lineární smršťování 62
1.5.1 Tuhnutí odlitků 62
1.5.2 Důsledky při tuhnutí a chladnutí odlitků 64
1.5.3 Nálitkování odlitků 65
1.5.3.1 Principy navrhování nálitků 66
1.6 Charakteristika slévárenských forem 67
1.6.1 Pískové formy 69
1.6.1.1 Výroba pískových forem 70
1.6.1.2 Ruční výroba pískových forem 74
1.6.1.3 Strojní výroba pískových forem 76
1.6.2 Pískové formovací směsi 78
1.6.3 Výroba pískových forem bezrámovým formováním 80
1.6.4 Výroba pískových forem 3D tiskem 83
1.6.5 Výroba etážových forem 85
1.7 Výroba forem metodou chemicky tvrzených směsí (metoda CT) 86
1.8 Výroba skořepinových forem (metoda Croning) 87
1.9 Jádra a výroba jader 89
1.10 Výroba odlitků na vytavitelný model 98
1.10.1 Postup výroby forem na vytavitelný model 99
1.11 Výroba odlitků v kovových formách 107
1.11.1 Výroba odlitků v kovových formách gravitačním litím 108
1.11.2 Výroba odlitků nízkotlakým a vysokotlakým litím 109
1.11.2.1 Nízkotlaké lití odlitků 110
1.11.2.2 Vysokotlaké lití odlitků 111
1.11.3 Charakteristika tlakových forem 119
1.11.4 Přehled metod využívání zvýšeného tlaku při výrobě odlitků 123
1.12 Kontinuální odlévání polotovarů 127
1.13 Výroba odlitků ve zmrazených formách 128
1.14 Tavení a metalurgická úprava slévárenských slitin 129
1.14.1 Metalografické ošetření tavenin slitin kovů před odléváním 134
1.14.1.1 Ošetření tavenin litin 134
1.14.1.2 Ošetření neželezných kovů 134
1.15 Odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitků 135

1.15.1 Základní způsoby odlévání 135
1.16 Vytloukání odlitků z netrvalých pískových forem, čištění odlitků a dokončovací operace 137
1.17 Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků 139
1.18 Vady odlitků 141
Seznam literatury ke kapitole slévárenství ***145***
Kontrolní otázky ke kapitole slévárenství ***147***

2. SVAŘOVÁNÍ, PÁJENÍ A TEPELNÉ ŘEZÁNÍ KOVŮ 149
2.1 Svařitelnost ocelí 153
2.1.1 Svařování ostatních kovových materiálů 155
2.2 Základní pojmy a názvosloví svarového spoje 156
2.2.1 Polohy při svařování 157
2.3 Metalurgie tavného svařování 158
2.3.1 Struktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO) 160
2.4 Technologie a základní způsoby tavného svařování 162
2.4.1 Svařování kyslíko-acetylénovým plamenem 163
2.4.2 Svařování elektrickým obloukem 172
2.4.2.1 Přenos kovu v elektrickém oblouku 176
2.4.2.2 Metody svařování elektrickým obloukem 175
2.4.2.3 Svařování elektrickým obloukem ručně obalenou elektrodou 176
2.4.2.4 Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách 186
2.4.3 Svařování pod tavidlem 194
2.4.4 Svařování elektrostruskové 196
2.4.5 Svařování plazmou 198
2.4.6 Svařování laserem 199
2.4.7 Svařování elektronovým paprskem 202
2.5 Svařování tavné 203
2.5.1. Svařování elektrickým odporem 203
2.5.1.1. Odporové bodové svařování 204
2.5.1.2. Odporové švové svařování 207
2.5.1.3 Odporové stykové svařování 208
2.5.1.4 odporové výstupkové svařování 209
2.5.2 Svařování třením 210
2.6 Pájení kovů 211
2.6.1 Charakteristika pájek 211
2.6.2 Tavidla pro pájení 214
2.6.3 Pájedla 215
2.7 Řezání kyslíkem 217
2.8 Navařování kovů 218
2.9 Simulační výpočty svarů 219
Literatura ke kapitole Svařování, pájení a tepelné řezání kovů ***220***
Kontrolní otázky ke kapitole Svařování, pájení a tepelné řezání kovů ***222***

3. KOROZE A PROTI PROTIKOROZNÍ OCHRANA KOVŮ 223
3.1 Rozdělení koroze 223
3.1.1 Rozdělení koroze z hlediska mechanismu korozních dějů 223
3.1.2 Rozdělení koroze z hlediska korozního prostředí 224
3.1.3 Rozdělení koroze z hlediska korozního napadení 227
3.2 Charakteristika základních druhů koroze 229
3.2.1 Chemická koroze 229

3.2.2	Elektrochemická koroze	229
3.2.3	Atmosférická koroze	232
3.2.4	Koroze bludnými proudy	233
3.3	Vliv koroze na mechanické vlastnosti kovů	234
3.4	Obecné zásady pro předcházení koroze kovů	234
3.5	Ochrana kovů a slitin kovů proti korozi	236
3.5.1	Obecné zásady ochrany kovů proti korozi	236
3.5.1.1	Katodická a anodická ochrana materiálu	237
3.6	Způsoby povrchových úprav proti korozi	238
3.6.1	Příprava součástí před provedením povrchové úpravy proti korozi	239
3.6.2	Vytváření kovových povlaků	241
3.6.2.1	Chemické pokovování	241
3.6.2.2	Elektrochemické (galvanické) pokovování	242
3.6.2.3	Pokovování v roztavených kovech	243
3.6.2.3.1	Povlaky stříkané za žáru (metalizace)	244
3.6.2.4	Pokovování ve vakuu	245
3.6.3	Vytváření nekovových anorganických povlaků a smaltů	245
3.6.4	Vytváření povlaků z organických nátěrů	246
3.6.4.1	Princip a technologie vytváření nátěrů	248
3.7	Kombinace metod protikorozní ochrany kovů	250
	Literatura ke kapitole Koroze a povrchové úpravy kovů	***253***
	Kontrolní otázky ke kapitole Koroze a protikorozní ochrana kovů	***254***

ÚVOD

Technologie jsou výrobní metody, které se uplatňují při vytváření výrobku. Slovo technologie je řeckého původu a lze ho přeložit jako „věda“, resp. „nauka o praktické činnosti“. Jakou činností se tato věda zabývá je nutno ještě dále specifikovat. Ve strojírenství se tato věda zabývá zákonitostmi strojírenských výrobních procesů a také se často označuje „strojírenská technologie“ a nebo zkráceně technologie.

Strojírenská technologie zahrnuje nesmírné množství výrobních metod (odlišných svou podstatou i účelem), proto lze ještě dělit tuto technologii dle různých kritérií. Např. na strojírenskou metalurgii, a na obrábění a montáž. Velmi časté dělení je podle toho, zda-li v procesu zpracování je hlavním výrobním znakem odstraňování vrstev materiálu (vznik třísky), pak lze technologii dělit na netřískovou a třískovou.

A) Strojírenská metalurgie - jejímž společným znakem je změna struktury a vlastností materiálu, ke kterým dochází během jeho zpracování. Jednotlivé metody strojírenské metalurgie se liší svým principem, velmi často se člení na další obory:

a) *slévárenství* - je zpracování materiálu v tekutém stavu tak, že se tavenina vlévá nebo vtlačuje do slévárenské formy, kde ztuhne a získá se odlitek požadovaného tvaru a rozměrů;

b) *svařování, pájení, tepelné dělení, popř. lepení* - jsou metody, kterými se různé kovové polotovary nerozebíratelně spojují nebo dělí bez použití řezného nástroje;

c) *tepelné zpracování* - mění se vlastnosti a struktura materiálu, ale ne tvar. Účelem je zvýšení mechanických vlastností (např. pevnost, houževnatost, tvářitelnost, obrobitelnost, atd.);

d) *tváření* - trvalé změny tvaru materiálu vlivem jeho plastického stavu získaného působením vnějších (tvářecích) sil prostřednictvím tvářecích nástrojů. Výchozí materiál může být ve stavu litém (ingot) nebo tvářeném (plech, tyč), popřípadě se tvářením zpracovávají kovové prášky nejčastěji těžkotavitelných materiálů.

B) Obrábění a montáž – do této skupiny patří metody, které umožňují dát výrobku přesný tvar, rozměr a kvalitu funkčních ploch.

a) obrábění - zahrnuje metody, pro které je charakteristické odebírání třísky pomocí řezného nástroje, který musí být podstatně tvrdší, než opracovávaný materiál.

b) montáž - představuje souhrn pracovních činností, kterými se jednotlivé díly spojují ve finální výrobek (stroj, zařízení, investiční celek). S obrábění a montáží úzce souvisí měření (kontrola tvarů a rozměrů - metrologie) a lícování součástí.

C) Povrchové úpravy materiálů - mění se vzhled nebo korozní vlastnosti povrchových vrstev výrobků, aniž se tím ovlivňuje jeho tvar nebo vlastnosti zpracovaného materiálu.

D) Výroba a zpracování plastů - metody výroby polokrystalických nebo nekrystalických materiálů, jsou velmi rozmanité a do určité míry jsou shodné s metodami zpracování kovů.

Úkolem předmětu Technologie I je seznámit budoucí strojní bakaláře, popř. strojní inženýry v přednáškách i v praktických dílenských ukázkách s principy hlavních výrobních metod slévárenstvím, svařováním, s jejich odborným názvoslovím a se základy povrchových úprav materiálů.
Obsah této technologie by měl být současně základem pro tzv. **Průmysl 4.0** (též **Práce 4.0),** což představuje v historii již ***čtvrtou průmyslovou revoluci.*** Jejíž obsahem jsou trendy digitalizace a automatizace, které jsou do současných výrobních procesů začleňovány. Nebo přináší jiné prvky doposud používaných technologických procesů.
Podle této myšlenky by měly vzniknou ***„chytré továrny“,*** jež budou využívat kyberneticko-fyzikální systémy. Tato myšlenka vznikla na základě současného nedostatku pracovních sil a technických pracovníků. Kyberneticko-fyzikální systémy by měly přebrati opakující se činnosti, které do té doby vykonávali lidé. Měla by vznikat nová pracovní místa, která však budou vyžadovat vyšší kvalifikaci zaměstnanců (např. bakalářů a inženýrů).

Vážení studenti, připravily jsme vám skripta s velkým množství ilustrativních obrázků. Obrázky by vám měly usnadnit pochopení a také velmi dobré nastudování probírané látky. Byly bych velmi rády, kdybyste u zkoušky uměli o studovaných problémech jasně, jednoduše logicky pohovořit a tím prokázat požadované studijní znalosti. Předpokládáme, že tato skripta přispějí k vaším velmi dobrým znalostem u státní bakalářské zkoušky i ve strojírenské praxi.

V Liberci, říjen 2019

Autorky

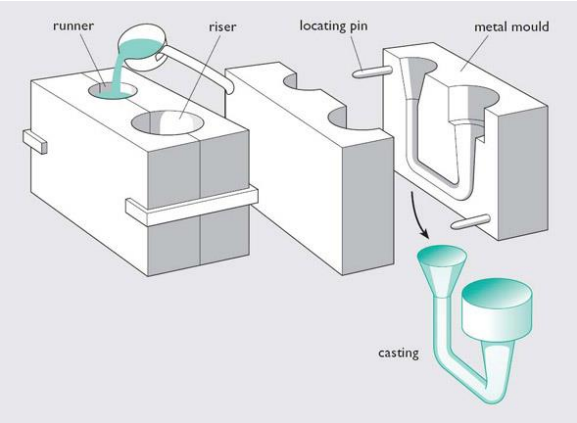
Bakalář je nižší akademický stupeň získaný studiem na vysoké škole. V minulosti byl získáván studiem na univerzitách v USA. V současné době lze tento titul získat nejen u nás, ale i na evropských univerzitách.

Inženýr je vyšší akademický titul než bakalář. Dříve se u nás získával nejčastěji pětiletým souvislým studiem na vysokých školách. V současné době některé firmy vyžadují od svých pracovníků vysokoškolský titul inženýr.
Také předpokládáme, že obsah těchto skript rozšíří i odborné znalosti studentům v jejich případném návazujícím inženýrském studiu.
Titul inženýr se odvozuje od latinského slova *ingenium*, které znamená vynalézavost, důvtip, důmysl, nadání. Podobný význam má i španělské slovo Ingenioros a italské incigerius.

1. SLÉVÁRENSTVÍ

Slévárenství je jedna z netřískových technologií, výrobní odvětví, kdy se zhotovují výrobky - *odlitky* - litím roztaveného kovu, resp. slitiny kovů do dutiny slévárenské formy.

Základní pracovní postup při odlévání spočívá v tom, že roztavený kov odlitý do slévárenské formy přijme tvar dutiny formy a současně v dutině tuhne. Tím je poměrně velmi snadno a jednoduše dosaženo tvaru požadovaného výrobku, viz obr. 1-1. Z tohoto obrázku je patrný jednoduchý odlitek kruhového průřezu tvaru U.



runner – vtok (vtoková soustava), riser – nálitek, location pin – středící kolík, metal mould – kovová forma (slévárenská); casting – odlitek, odlitek se vtokem a nálitkem (vpravo dole)

Obr. 1-1 Schéma principu výroby odlitků

Slévárenství vychází z analogického poznatku, že každá kapalina, resp. tavenina má objem, avšak obecně nemá tvar. Kapalina zaujme tvar podle nádoby, do které byla nalita. Tato aplikace práce s taveninou kovů je základem slévárenské výroby odlitků.

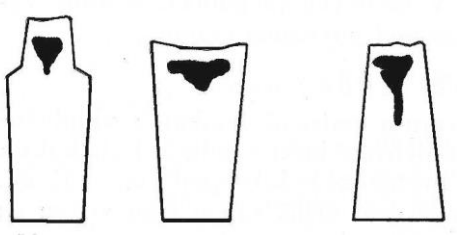
Výroba odlitků je poměrně energeticky náročná týmová práce, na které se podílí řada pracovníků odlišných profesí (technolog, metalurg, formíř, slévač, chemik, atd.), z nichž každý provádí svou profesi nebo zodpovídá za daný úsek výroby. Cílem jejich společné snahy je ekonomická výroba odlitků požadovaných tvarů, rozměrů, struktury a vlastností.

Ze širšího metalurgického pohledu rozlišujeme:

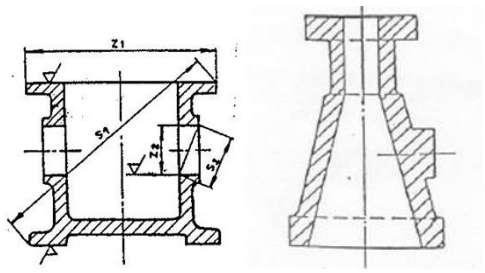
I. slévárenství hutnických odlitků;

II. slévárenství tvarových odlitků.

Odlišnost obou způsobů je v tom, že při výrobě tvarových odlitků získáváme v základních rysech tvar konečného výrobku. Slévárenstvím hutnických odlitků - tzv. *ingotů* se získávají jen hutní polotovary, které je nutno následně tvářet (tvarovat) do konečné podoby. Ingoty jsou tvarově jednoduché, ale hmotné odlitky, viz obr. 1-2. Na obr. 1-3 je schéma tvarových odlitků.



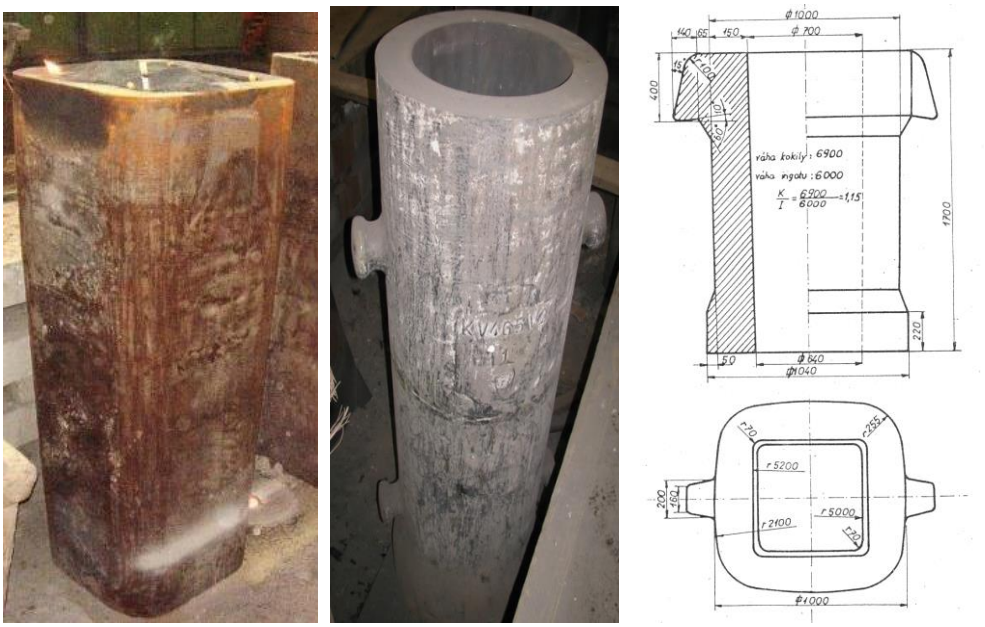
Obr. 1-2 Schéma hutních odlitků – ***ingotů***



Obr. 1-3 Schéma ***tvarových odlitků***

1.1 Slévárenství hutnických odlitků

Slévárenství hutnických odlitků se provádí v tzv. ocelárnách (odlévá se ocel). Hutní odlévání je základem výroby hutních polotovarů (např. Ostrava, popř. Kladno). Je založeno na odlévání taveniny požadovaných ocelí do tvarově jednoduchých kovových forem (kokil). Pracovní dutina kokily má tvar např. negativu komolého kužele nebo komolého jehlanu, viz obr. 1-4.

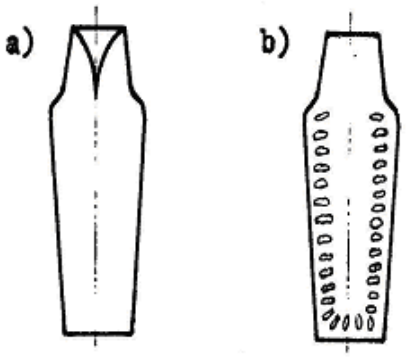


Obr. 1-4 Hutnické slévárenské formy – ***kokily*** [41]

Vzniklé odlitky se nazývají *ingoty* a jejich tvar přísluší dané kokile. Je-li ingot např. tvaru komolého kužele, pak má nepatrnou kuželovitost a délku 2 až 3 m s hmotností až 300 t (podle velikosti). Horní část ingotu se nazývá hlava. V této části se soustřeďují nečistoty a současně je zde dutina, tzv. lunker (soustředěná staženina), který vzniká v důsledku zmenšování objemu (stahování) kovu při jeho tuhnutí. V části hlavy ingotu pod soustředěnou straženinou se shlukuje síra, fosfor, uhlík. Hlava ingotu se po odlití odděluje. Schéma ingotu je na obr. 1-5 a). Ingoty se podle způsobu metalurgické přípravy oceli dělí na ingoty z oceli uklidněné a oceli neuklidněné. Ingoty z neuklidněné oceli obsahují ve své struktuře bubliny CO, viz obr. 1-5 a) vpravo.

Hutnické ingoty se ***vždy dále zpracovávají tvářením***.

Podle následného tvářecího procesu jsou ingoty určeny buď pro válcovny nebo pro kovárny.



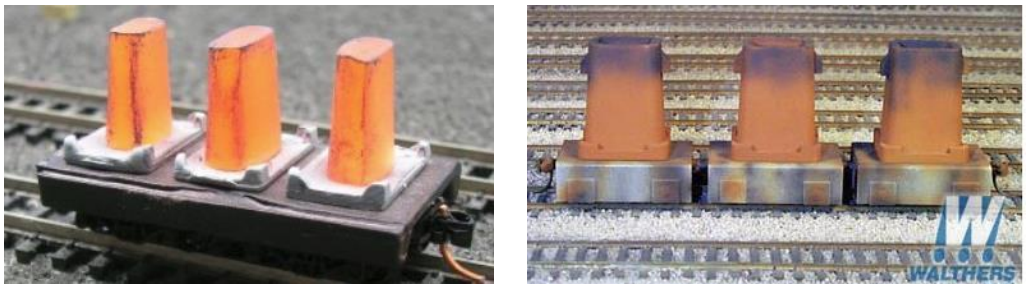
a) uklidněná ocel; b) neuklidněná ocel

Obr. 1-5 a) Schéma ingotu



Obr. 1-5 b) Ocelové ingoty [41]

Ze slévárny ocele, tzv. ***ocelárny*** odchází horké ingoty v kokilách do stripovací haly, kde jsou kokily stahovány z ingotů speciálními jeřáby. Ingoty se pak dopravují do haly hlubinných pecí. Pro přepravu žhavých ingotů k válcování nebo kování slouží speciálně konstruované ingotové vozy, viz obr. 1-6.



Obr. 1-6 Železniční vozy pro přepravu žhavých ingotů a hutnických kokil [41]

Ingoty se předehřívají se na teploty cca 1200°C, viz obr. 1-7. Ingoty se dále válcují a nebo kovají.

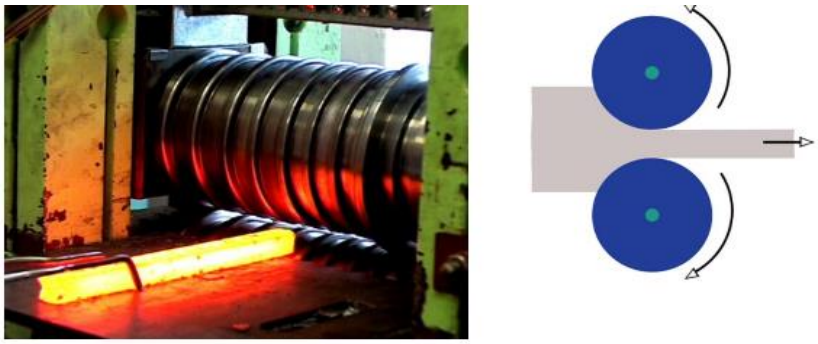


Obr. 1-7 Předehřev ocelových ingotů na teplotu cca 1200 °C [41]

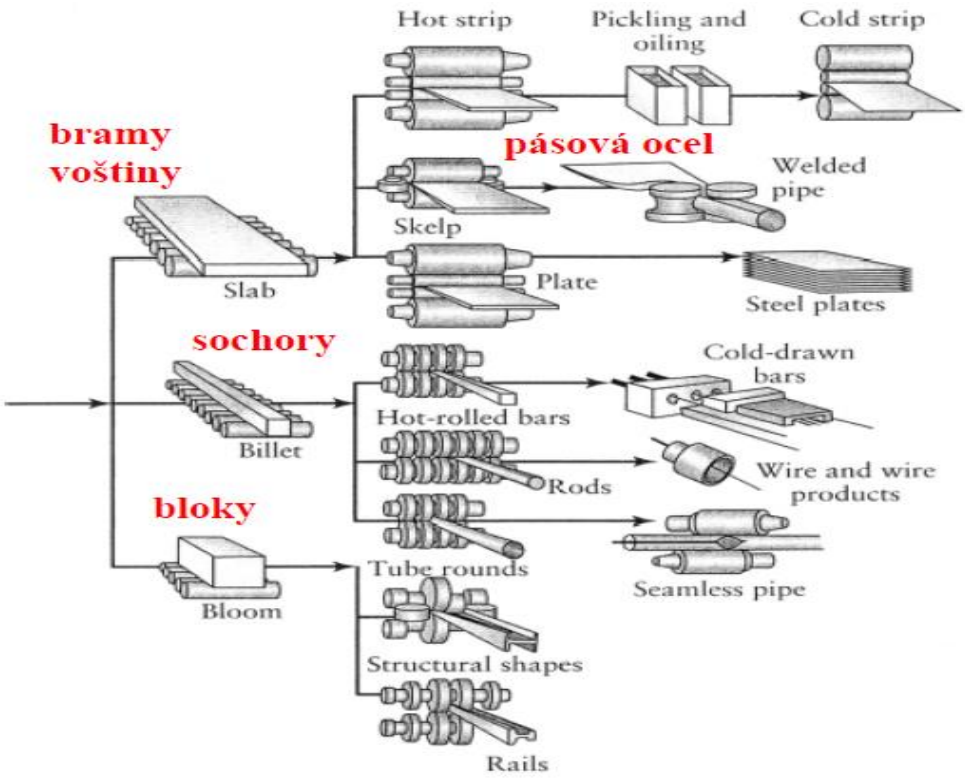
Válcování ingotů - ingoty se za tepla válcují na několik průvalů. K válcování se používají válcovací tratě, jejichž součástí jsou válcovací stolice. Zde ingot prochází mezi rotujícími válci, čímž dochází k jeho tvarování. Válcováním se zpracovává 85 až 90% vyráběné oceli. Podle typu stolice získáváme tvářené profily (vývalky) různých profilů. Vývalky válcované z oceli lze dělit na:

a) profily jednoduchých geometrických tvarů – kruhové, čtvercové, obdélníkové, I-profily U-profily, atd.;
b) plechy tloušťky 0,15 až 4 mm - šíře 3000 mm; 4 až 60 mm - šíře 3500 mm; 60 až 250 mm - šíře 4500 mm;
c) trubky - kruhového, obdélníkového, oválného průřezu;
d) válcování profilů získané zvláštním způsobem válcování.

Na obr. 1-8 je ukázka principů válcováním ingotů, resp. již sochorů. Na obr. 1-9 je schéma válcování různých hutních polotovarů.



Obr. 1-8 Ukázka válcování ingotů, resp. sochorů [45]

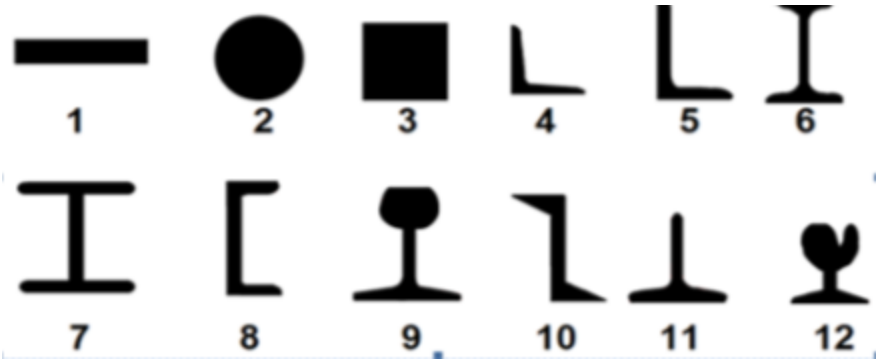


***Slab** = deska, brama, voština. **Billet** = sochor. **Bloom** = blok. **Skelp** = pásová ocel. **Hot rolled bars** = tyče válcovsné za tepla. **Tube rounds** = trubky. **Structural shapes** = strukturální tvary, (I profily). **Rails** = kolejnice.*

Obr. 1-9 Schéma různých způsobů válcování ocelových polotovarů [52]

Jak je z obr. 1-9 patrné tvářením ingotů získáváme např. tzv. bramy, voštiny, sochory nebo bloky, které dalším válcováním zpracováváme do konečné podoby hutních polotovarů. Např. dalším válcováním bloků se vyrábí např. kolejnice a I profily.

Na obr. 1-10 je ukázka hutních polotovarů, které jsou získány postupným tvářením ingotů.



1 - pásová ocel; 2 - kruhová ocel; 3 - čtvercová ocel; 4 - rovnoramenný úhelník; 5 - úhelník nerovnoramenný; 6, 7 - I profil; 8 - U profil, 9 - kolejnice; 10 - Z profil; 11 - T profil; 12 - tramvajová kolejnice

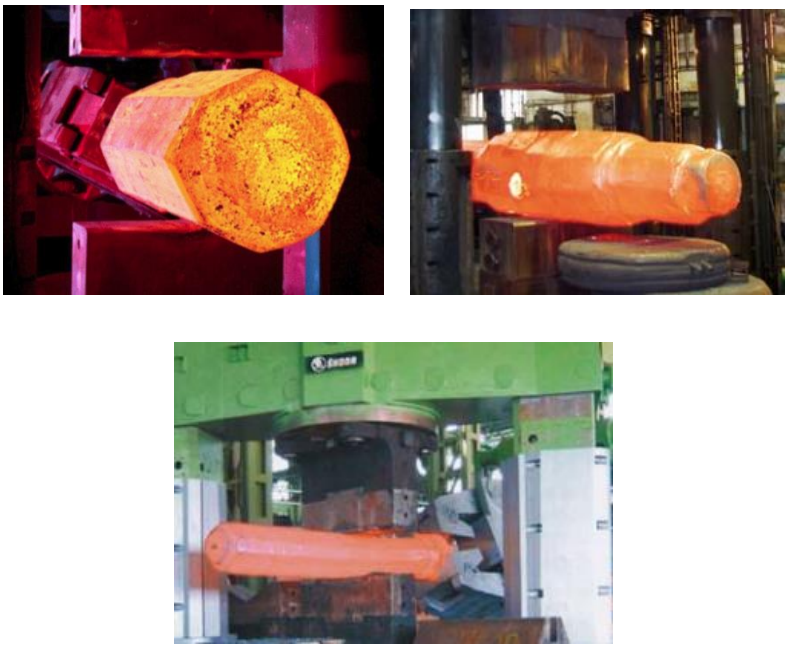
Obr. 1-10 Schéma hutních válcovaných polotovarů (profilů)



Obr. 1-11 Tvářené hutní polotovary

Válcované polotovary mohou být na bázi: *slitin železa* – oceli třídy ČSN tř. 10 - tř.19 (mimo tř.18 – slinuté karbidy). Nebo na bázi slitin hliníku, EN AW 1000 – EN AW 8000, na bázi slitin mědi.
Předpokládá se, že daný válcovaný profil z určité třídy ocelí vykazuje stejné mechanické vlastnosti ve všech jeho partiích, jak vyplývá z příslušné normy.

Kování ingotů – je další způsob tváření ingotů na kovacích bucharech nebo kovacích lisech. Mezi dvěma kovadly, viz obr. 1-12. Materiál ingotu je tvarován prostřednictvím tlakové síly kovadel (kování volné) nebo ve speciální tvarové „formě“ – zápustce (kování zápustkové).



Obr. 1-12 Ukázka volného kování ingotů [41], [45]

U tvářených a kovaných hutních polotovarů předpokládáme jejich odpovídající mechanické vlastnosti s ohledem na materiál ze kterého byly vyrobeny (např. u ocelí na třídu ocelí).

1.2 Slévárenství tvarových odlitků

Slévárenská výroba tvarových odlitků (strojních součástí) probíhá nejčastěji v samostatných výrobních závodech nebo popř. ve speciálních provozech - *slévárnách.*

Tyto odlitky se vyznačují členitostí a tvarovou složitostí (rádia, úkosy, žebra) a mají široké uplatnění např. v automobilovém, leteckém i spotřebním průmyslu (výroba bloků a hlav motorů, brzdových kotoučů a bubnů, částí výfukového a sacího potrubí, pístů a hlav spalovacích motorů, odlévaných disků kol, atd.). Odlitky pro automobilový průmysl jsou uvedeny na obr. 1-13, obr. 1 -14 a obr. 1-15.

Odlitky pro automobilový průmysl mohou být vyrobeny z litiny s lupínkovým grafitem (odvětrávané brzdové kotouče, brzdové bubny, vložné válce motorů, pístní kroužky), zde se uplatňují dobré tepelné vlastnosti litiny, tj. součinitel tepelné vodivosti je cca 47 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], součinitel teplotní roztažnosti je $10{,}5 \cdot 10^{-6}$ [K^{-1}]. Dále litina s lupínkovým grafitem vykazuje výborné mazací vlastnosti, viz obr. 1-13 dole, výroba vložek válců a pístních kroužků. Pro výrobu výfukového svodu výfukových plynů (viz obr 1-13, nahoře vpravo) se používá litina s červíkovým grafitem, která vykazuje příznivější tepelné vlastnosti než litina s lupínkovým grafitem. Na obr. 1-13 je také odlitek klikové hřídele automobilu ŠKODA – Fábia 1,2 HTP, vyráběný z litiny s kuličkovým

grafitem. Pro tento konstrukční díl je zcela mimořádně zavedená slévárenská výroba, neboť dynamicky namáhané součásti jsou obvykle ocelové výkovky.

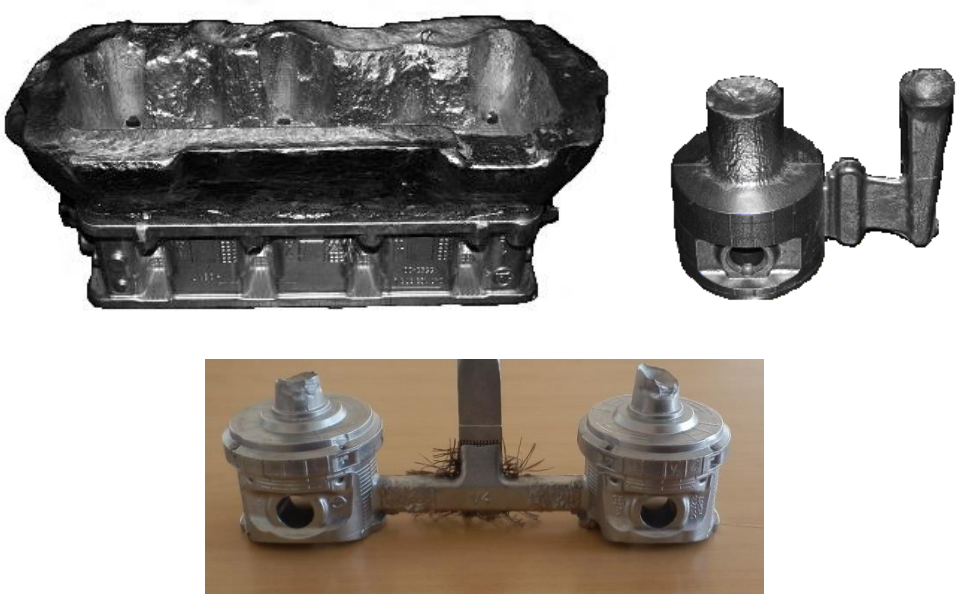




brzdový buben a odvětrávaný kotouč, výfukové potrubí motoru, vložný válec bloku motoru, pístní kroužek, kliková hřídel ŠKODA Fabia 1,2 - HTP a litinový odlitek dvaceti válcového bloku motoru [46]

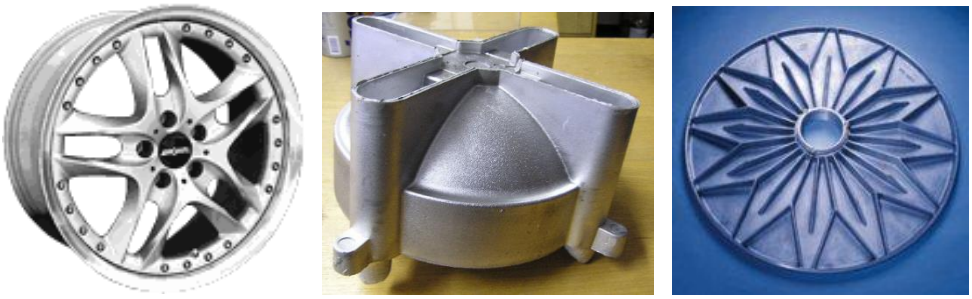
Obr. 1-13 Ukázky automobilových odlitků odlévaných do pískových slévárenských forem [2], [46]

Odléváním, viz obr. 1-14, se vyrábí i řada odlitků ze slitin hliníku pro automobilový průmysl (hlavy spalovacích motorů osobních automobilů, písty spalovacích motorů). Tyto odlitky jsou při práci motoru velmi tepelně namáhány cca 325 až 375 °C a proto musí být velmi kvalitní bez vnitřních dutin a jiných vnitřních vad (aby z tohoto důvodu nedošlo k náhlé závadě činnosti motoru). Z tohoto důvodu se tyto odlitky vyrábí gravitačním litím do kovových forem. Tato metoda zajišťuje kompaktnost struktury bez vnitřních vad.

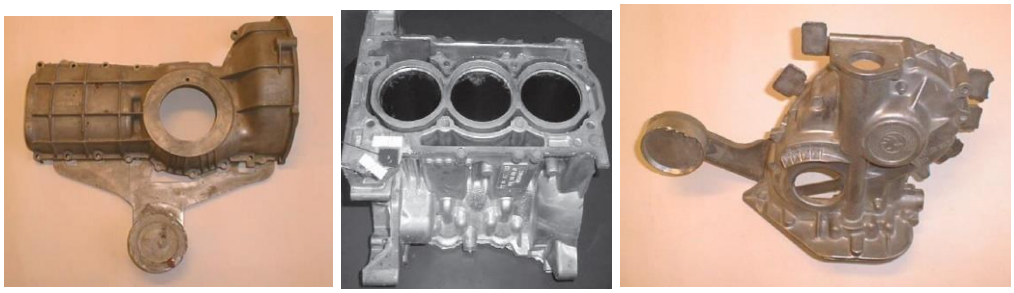


Obr. 1-14 Odlitky ze slitin hliníku pro automobilový průmysl, lité gravitačním litím do kovových forem [2]

Odlitky pro automobilový průmysl ze slitin hliníku lze vyrábět nízkotlakým nebo vysokotlakým litím. Metoda nízkotlakého lití zabezpečuje poměrně dobrou kvalitu odlitků. Tímto způsobem se odlévají dosti často rotační součásti, např. odlévané disky kol ze slitin hliníku (disky kol se také vyrábí z oceli svařováním), cylindrická víka výrobních zařízení, atd. viz obr. 1-15. Výroba odlitků ze slitin hliníku vysokotlakým odléváním se používá také pro výrobu součástí pro automobilový průmysl. Touto metodou se vyrábí např. bloky zážehových spalovacích motorů osobních automobilů, víka převodovek a rozvodovek a různé součástky automobilů, viz obr. 1-16.



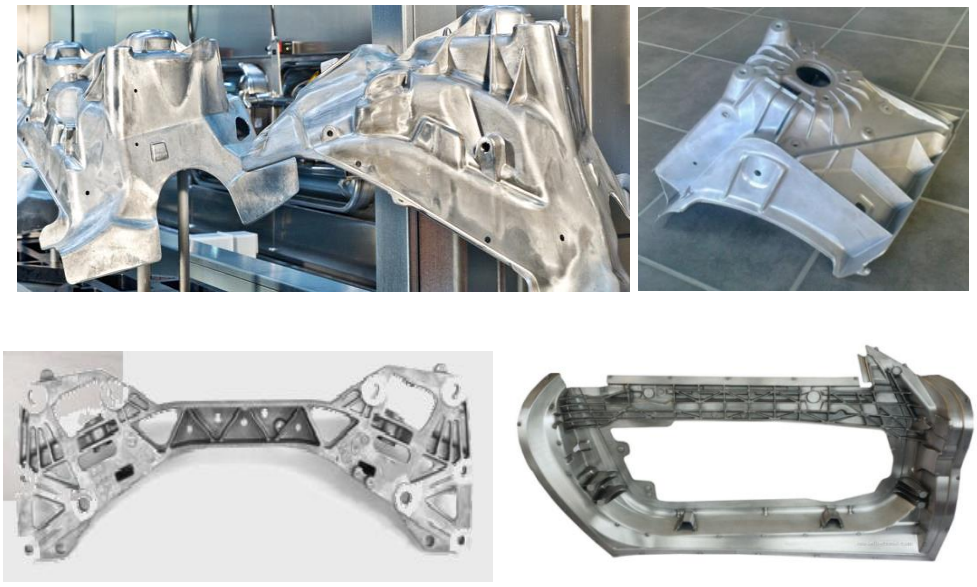
Obr.1-15 Odlitky ze slitin hliníku vyráběné nízkotlakým litím (do kovových forem), disk kola automobilu, cylindrické víko a těleso bočnice textilního válu



Obr.1-16 Odlitky ze slitin hliníku vyráběné vysokotlakým litím (do kovových forem) [2]

Metodou vysokotlakého lití se také dnes odlévají tzv. ***strukturální odlitky*** (strukturální díly). Dříve byl tvarově složitý díl sestavován z dílů jednodušších (z mnoha jednotlivých částí – odlitků, popřípadě svařenců), dnes ho nahradí jeden tvarově složitý odlitek – tzv. strukturální odlitek.

Na obr. 1-17 jsou uvedeny strukturální odlitky, které mají uplatnění v automobilovém průmyslu. Např. výroba částí karoserie, délka až cca 1 m, hmotnost až 12 kg, dále výztuhy a rámy karoserií, atd.

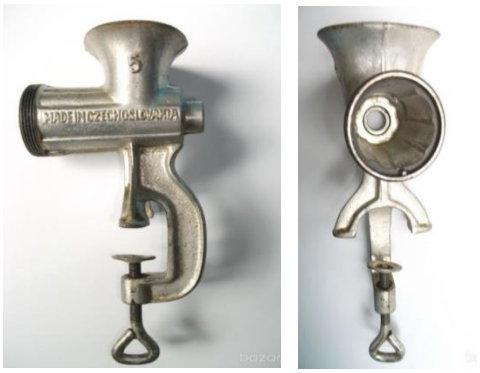


Obr. 1-17 Ukázky strukturálních odlitků [47], [48]

Odléváním se též vyrábí stojany obráběcích strojů, viz obr. 1-18 a) a textilních strojů, litá radiátorová tělesa ústředního topení, ale také tělesa mlýnků na maso, viz obr. 1-18 b) nebo tělesa mlýnků na mák. Tyto odlitky se vyrábí odléváním do netrvalých, resp. pískových forem z litiny s lupínkovým grafitem. Odléváním se vyrábějí některé druhy šperků, např. odstředivým litím. Na obr. 1-18 c) je forma z pryže pro odstředivé šperků tvaru „větvičky s lístky“. Odléváním do speciálních pískových forem se také odlévají zvony. Největší uplatnění slévárenské technologie lze však spatřovat při výrobě strojních součástí.



Obr. 1-18 a) Odlitek rámu obráběcího stroje (vodorovná vyvrtávačka) [49]



Obr. 18 b) Odlitek tělasa mlýnku na maso z litiny s lupínkovým grafitem, jehož povrch je ošetřen cínem



Obr. 1-18 c) Odlitek šperku tvaru „větvičky s lístky“ v jedné polovině pryžové formy pro odstředivé lití; odlitek zvonu [2]

Slévárenská výroba, resp. výroba odlitků představuje složitý a organizačně náročný výrobní cyklus, kde je podle okolností nutná celá řada pracovních zařízení, pomůcek, atd.

Při výrobě odlitků litých do pískových forem je současně nutné časové sladění jednotlivých operací. Tak např. před samotnou výrobou odlitků musí být

připraveny formovací rámy, modely nebo modelové desky, formovací směs, formovací zařízení, a musí být v předstihu vyrobena jádra a celá výroba musí být zabezpečena dalším potřebným zařízením a vybavením včetně tavících pecí, vsázkových materiálů, pánví, dopravníků a mostových jeřábů.

Při výrobě odlitků litých pod tlakem jsou nutné licí tlakové stroje, složité kovové formy (vyráběné třískovým obráběním v řídících centrech NC strojů), tavící pece, slévárenské slitiny ve formě housek, odstříhávací lisy, popř. jiná potřebná zařízení. Při odlévání do kokil gravitačním způsobem jsou nutné kokilové stroje, formy, tavicí zařízení, atd.

Např. při výrobě speciálních odlitků odlévaných do sádrových forem jsou nutná zařízení (míchačky) pro přípravu sádrové břečky, speciální rámečky a modelová zařízení.

Tato zařízení jsou specifická pro každý typ slévárenské výroby.

Nedílnou součástí každé slévárny je tavírna s tavícím zařízením, kde se připravuje tavenina příslušné slévárenské slitiny.

Dále je potřebná kontrolní laboratoř, včetně rychlých analyzačních metod odlitků. Současné slévárny se neobejdou bez certifikačních osvědčení tak, aby splňovaly mezinárodní normy ISO 9000, 9001, atd. Tyto slévárny jsou vyhledávány a jsou zárukou výroby kvalitních odlitků.

1.3 Zásady konstrukce a navrhování odlitků

Při návrhu konstrukce dílu (součásti) je třeba obecně brát v úvahu, jaká technologie je pro výrobu tohoto dílu nejvhodnější, to také označujeme pod pojmem ***technologičnost konstrukce.***

Technologičností konstrukce rozumíme takové konstrukční provedení součástí, nebo výrobků, které zaručuje co nejhospodárnější výrobu při splnění všech jejich funkcí, životnosti a spolehlivosti.

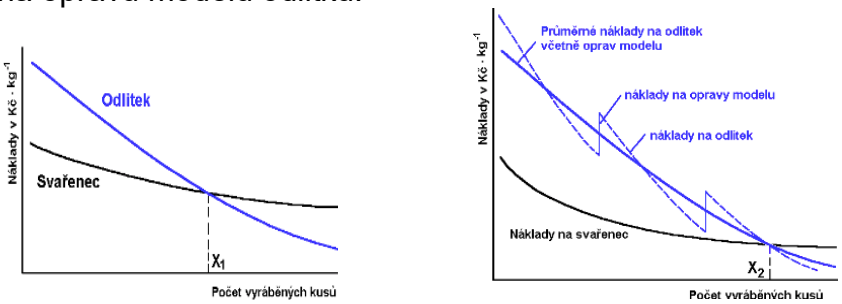
Konstruktér navrhuje tvar, rozměry, přesnost (tvarové, rozměrová, drsnost), materiál, atd. Dosti často materiál a tvar součásti rozhoduje o její výrobní technologii. Technologické hledisko vyráběného dílu (technologie výroby dílu) je vázáno na podmínky výrobní organizace. Tak např. odlitek z litiny se bude vyrábět ve slévárně, která je zařízena na odlévání litiny v pískových formách. Naopak odlitky víka ze slitin hliníku se budou odlévat ve slévárně tlakového (vysokotlakého) lití. Dále s technologičností souvisí nejen materiál, tvar vyráběného dílu, ale také přesnosti rozměrů a požadovaná drsnost povrchu.

Základními cíli technologičnosti konstrukce jsou:

a) minimální náklady, max. užitných vlastností, max. jakost, nulová rizika, min. pracnost (nesplnitelný cíl)
b) přijatelné náklady, požadované užitné vlastnosti, požadovaná jakost, přijatelná rizika a s co nejnižší pracností

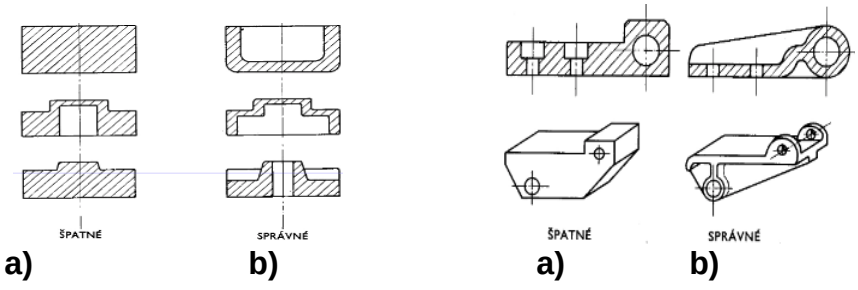
Pro výrobu jsou do jisté míry rozhodující užitné vlastnosti konstrukčního dílu, v tomto případě ***odlitku***, s tím úzce souvisí materiál, tvar a rozměry součásti. Do jisté míry o výrobě dílu rozhoduje konstruktér na základě navrženého materiálu a tvaru součásti. Tak např. díl navržený z plechu může být tvářený za studena, popř. svařovaný. Díl členitého tvaru, navržený z litiny (např. z litiny s lupínkovým grafitem) s největší pravděpodobností bude vyráběný odléváním. Díl navržený ze slitiny hliníku, např. víko nebo těleso převodovky nebo rozvodovky, atd. s největší pravděpodobností bude vyráběn vysokotlakým litím. Tato odůvodnění často souvisí s výrobními zkušenostmi.

Někdy se na základě teoretických úvah posuzují výrobní náklady: odlitek - svařenec, odlitek - výlisek, odlitek - obrobek viz grafy na obr. 1-19. Na 1-19a) je znázorněna souvislost mezi náklady a počtem odlitků a svařenců. Teoreticky, od určitého vyššího množství odlitků je jejich výroba výhodnější než tento díl vyrábět svařování. Na obr. 1-19 b) jsou uvedeny i náklady na opravu modelu odlitků.



Obr. 1-19 Porovnání výrobních nákladů dílu vyráběného svařováním a odléváním

Na obr. 1-20 jsou ukázky obrobků a odlitků a jejich odlišnosti v konstrukci srovnatelných dílů (srovnáváme dva vedle sebe uvedené díly).



a) – obrobek, b – odlitek

Obr. 1-20 Ukázky obrobků a odlitků a jejich odlišnosti v konstrukci srovnatelných dílů (srovnáváme dva vedle sebe uvedené díly)

Z prvního řádku, viz obr. 1-20, je patrné, že kde u obrobku může být plný materiál, naopak u odlitku musí být stejná tloušťka stěn a musí být dodrženy další zásady, které jsou pro konstrukci odlitků typické.

Při navrhování odlitků musí konstruktér sledovat nejen funkční hledisko odlitku, ale také *technologičnost konstrukce*. S tím také souvisí ustavení odlitku ve formě, poloha dělící roviny, velikosti úkosů, zabudování vtokové soustavy, popř. nálitku k odlitku, atd. To je také předpokladem jednodušší výroby odlitků, s nízkými ekonomickými náklady.

Dalším hlediskem při navrhování jsou též mechanické vlastnosti materiálu odlitku. Tak např. litiny s lupínkovým grafitem (dále LLG) vykazují rozdílné mechanické vlastnosti při jejím namáhání v tlaku a v tahu. To je způsobeno heterogenní strukturou litiny (přítomnosti lupínků grafitu). Tlakovým namáháním dochází k nerovnoměrnému rozdělení napětí tahových a tlakových vláken a tím se posouvá neutrální osa směrem k tlakovým vláknům. To má své praktické důsledky při konstrukci litinových profilů namáhaných i na ohyb. Aby se uvedené rozdíly vyrovnaly, navrhují se tvary odlitků v oblasti tlakových vláken užší než v oblasti vláken tažných. Tyto okolnosti mají také vliv na to, že litina snese cca 3x větší namáhání v tlaku než v tahu. Z toho vyplývá, že litinové odlitky by měly být konstruovány tak, aby byly namáhány především na tlak. Litinové profily namáhané na ohyb se konstrukčně řeší tak, aby napětí v tahu bylo v silnějším profilu. Snažíme se, aby výstužná žebra nebyla umístěna v oblasti maximálního namáhání v tahu, ale byla namáhána na tlak.

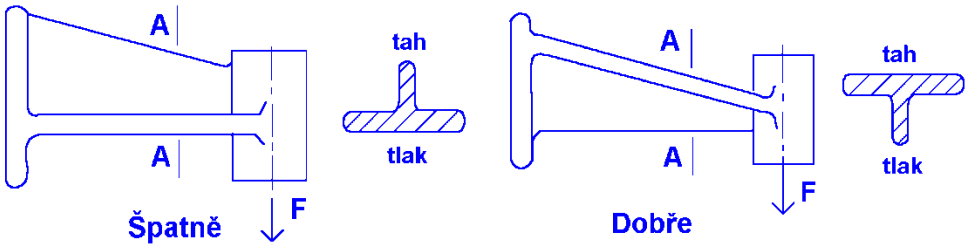
1.3.1 Základní konstrukční pravidla při navrhování odlitků

1) Odlitek musí mít ***stejnou tloušťku stěn*** (nebo poměr musí být maximálně 1:3, to platí především pro odlitky z litiny). Rovnoměrná tloušťka stěn je předpokladem pro zamezení tepelných uzlů, které tuhnou jako poslední a objevují se v nich staženiny.
2) Při určování minimální tloušťky stěn se vychází z materiálu odlitku, jeho rozměrů a hmotnosti, způsobu odlévání a mechanického namáhání (odlitky z LLG namáhat tlakem).
3) Odlitky mají mít velké rádia a nesmí mít ostré hrany a přechody stěn musí mít odpovídající zaoblení.
4) Tloušťky stěn se mají zvětšovat směrem k nálitku a při navrhování odlitku se musíme vyhnout konstrukci, kde by docházelo k nahromadění velké hmoty, neboť v těchto místech se mohou snadno vytvořit dutiny.
5) V jednom místě se má napojovat co nejméně stěn, je třeba se vyhnout křížícím se stěnám. Výhodné je také provést odlehčení některých míst návrhem díry, i když to znamená složitější formování s jádry.
6) Odlitek je třeba navrhnout tak, aby vnitřní pnutí bylo co nejmenší a nezpůsobovalo vznik trhlin. Proto např. u odlévaných kol mají význam ramena mírně zakřivená, kterých se vždy volí lichý počet.
7) Odlitek má být navržen tak, aby se model dal snadno vyjmout z formy. Stěny ve směru vyjímání musí být opatřeny úkosy.

8) Pokud to není výhradně nutné, nemají být na odlitku výstupky a osazení, protože zhoršují smršťování odlitků a zvyšují nebezpečí vzniku trhlin vlivem místního nahromadění hmoty.
9) Odlitky z grafitických litin by měly být konstruovány tak, aby byly namáhány ***tlakem***.
10) Mají-li se odlitky obrábět, musí být plochy určené k obrábění vhodně umístěny, z hlediska přístupnosti a upínání odlitku do obráběcího stroje.

Na následujících obrázcích jsou respektovány výše uvedené zásady pro vhodné (popř. nevhodné) navrhování odlitků.

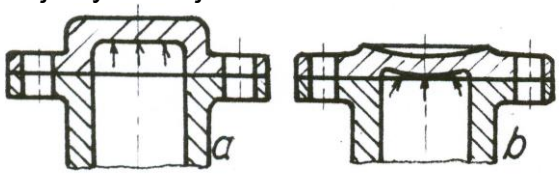
Litinová konsola se žebry - namáhání litinové konzoly, viz obr. 1-21, resp. jejího žebra je nutno je nutno volit s ohledem na *namáhání tlakem*. Obr. 1-21 vlevo, ukazuje namáhání, kdy vlivem síly F se žebro natahuje, resp. namáhá na *tah,* což je špatně. Naopak, obr. 1-21 vpravo ukazuje správné namáhání konzoly. To znamená, že směr působící síly F je vzhledem k namáhání žebra správné - síla F žebro stlačuje – tedy správně namáhána na *tlak*. V praxi závisí na tom, aby poloha konsoly byla, resp. její žebro bylo správně orientováno k tlakové síle. Vždy musí být žebro namáháno jen na tlak.



vlevo je situovaná konsola s žebrem tak, že působící tahová síla namáhá žebro
*na **tah**, to je **špatně***
*vpravo je situována konsola s žebrem tak, že působící tahová síla namáhá žebro na **tlak,** to je **dobře***

Obr. 1-21 Schéma správného a špatného namáhání litinové konzoly

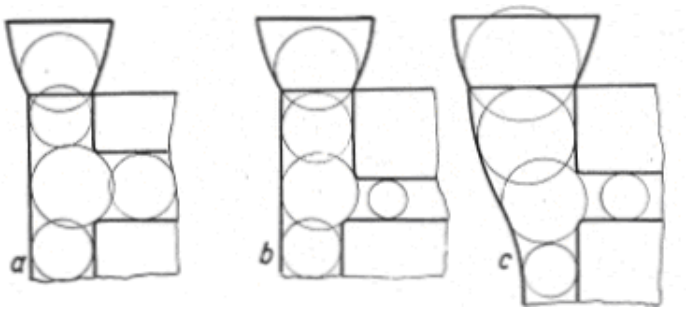
Konstrukce litinového víka tlakové nádoby, také je nutné zabezpečit namáhání litinového víka tlakové nádoby na tlak, viz obr. 1-22. Konstrukční provedení nižšího víka je výhodnější i z hlediska namáhání šroubů.



a) nevhodné b) vhodné

Obr. 1-22 Schéma konstrukce litinového víka tlakové nádoby

Konstrukce odlitku válcového tvaru s pravoúhlou stěnou, je na obr. 1-23. Je patrné, že je možno konstruovat různým způsobem, konstrukce vpravo (c) je vhodná a odpovídá ***metodě vepsaných koulí***. Průměry těchto koulí se zvětšují směrem do nálitku (tím se vytváří potřebný trychtýř). Tím dobře tavenina proudí do dutiny slévárenské formy.



a) špatná; b) lepší; c) nejlepší

Obr. 1-23 Volba konstrukce válcové nádoby s pravoúhlou stěnou

1.3.2 Tloušťky stěn a napojování stěn a žeber odlitků

Při volbě nejmenší tloušťka stěny odlitku musí zaručit úplné vyplnění formy kovem. Navrhovaná tloušťka stěny odlitku závisí na:

a) odlévaném materiálu,
b) licí teplotě,
c) rozměrech a tvaru odlitku,
d) na druhu a kvalitě slévárenské formy
e) na plnicím tlaku kovu.

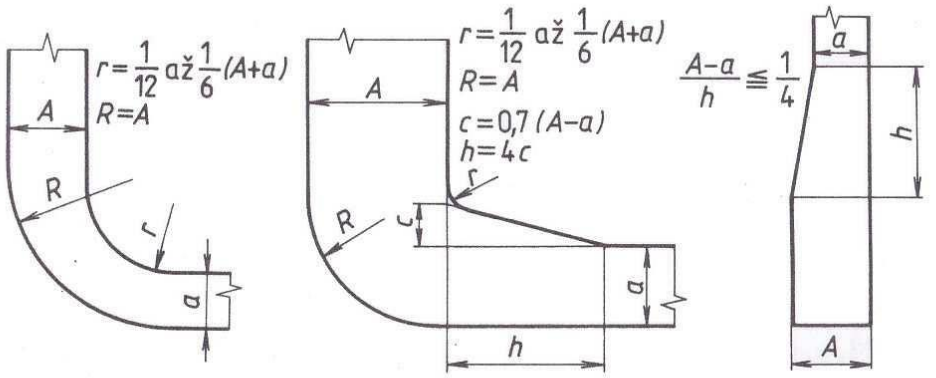
Technologické hledisko pro volbu tloušťky stěn

- volba tloušťky stěny souvisí s pevností materiálu, zvlášť nebezpečné jsou rozsáhlé tenké vodorovné stěny, kde se proud kovu při lití rozděluje, rychle chladne a tím mohou vzniknout vady typu nezaběhnutí nebo zavalenin (studené spoje);
- doporučené minimální hodnoty tlouštěk stěn pro jednotlivé druhy materiálů, pro výrobu odlitků, jež jsou stanoveny normou uvádí tabulka 1.1.

Tabulka 1.1 Doporučené tloušťky stěn odlitků vyráběných z různých materiálů

Doporučené tloušťky stěn odlitků [mm]			
Materiál odlitků	***Odlitky***		
	lehké	***střední***	***těžké***
Litina s lupínkovým grafitem	3 až 6	6 až 10	10 až 20
Ocel na odlitky	6 až 8	10 až 12	15 až 20
Temperovaná litina	2,5 až 4	6 až 8	-
Slitiny neželezných kovů	3 až 5	10 až 12	15 až 20

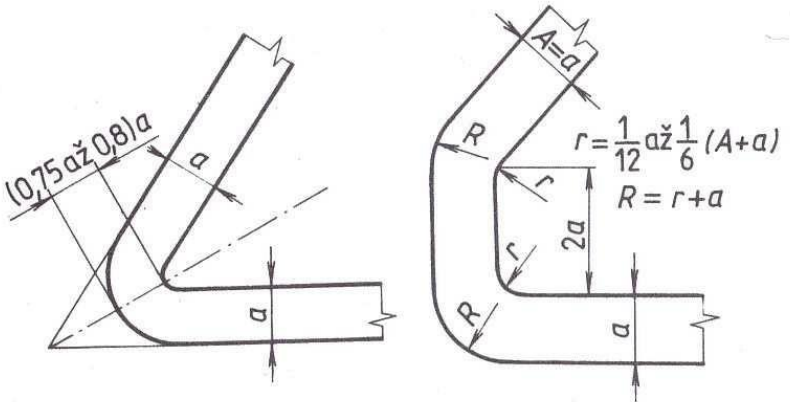
Napojování stěn odlitku různých tlouštěk je uvedeno na obr. 1-24. Velikosti rádií a úkosů závisí na tloušťkách stěn nebo žeber odlitků. Na obr. 1-25 je uvedeno napojování stěn různého charakteru.



a) b) c)

a) rozdílná tloušťka stěn odlitků, b) velmi rozdílná tloušťka stěn odlitků, c) rozdílná tloušťka přímých stěn odlitků

Obr. 1-24 Napojování stěn odlitku různých tlouštěk



a) b)

a) řešení malých rádií odlitků, b) spojení dvou stěn pod různými úhly

Obr. 1-25 Napojování stěn různého charakteru

Poloměry vnitřních zaoblení odlitků

Poloměry vnitřních zaoblení odlitků z litiny s lupínkovým grafitem upravuje norma ČSN 01 4909.

Zavádí se především:

a) k usnadnění výroby forem,
b) lepšímu zatékání kovu do formy;
c) zabraňuje tvorbě trhlin při tuhnutí.

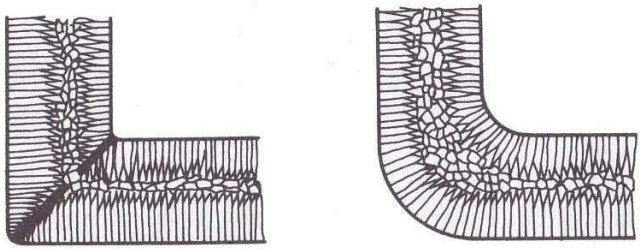
Velikost zaoblení je závislá na tloušťce spojovaných stěn a úhlu, pod kterým jsou spojeny, viz obr. 1-24 a obr. 1-25.

Zaoblení a poloměry vnitřních zaoblení a přechody stěn v odlitcích

Zaoblení stěn odlitků souvisí:

a) s odlévaným kovem,
b) se strukturou kovu vznikající tuhnutí a chladnutím roztaveného kovu. Struktura je ovlivněna rychlosti tuhnutí a chladnutí odlitků.

Proto má velký význam, jaká se používá forma a technologie odlévání.
Při použití *kovové formy* tavenina chladne rychle a vytváří se mnoho krystalizačních zárodků, naopak při použití *pískové formy* probíhá chladnutí pomaleji a tím se tvoří málo krystalizačních zárodků, krystaly mají možnost růstu a vzniká hrubozrnná struktura., která je méně pevná.
Struktura tuhnoucího odlitku se vytváří především ve směru *odvodu tepla,* tedy kolmo na stěny formy. Na obr. 1-26 je význam vlivu zaoblení stěn odlitků.

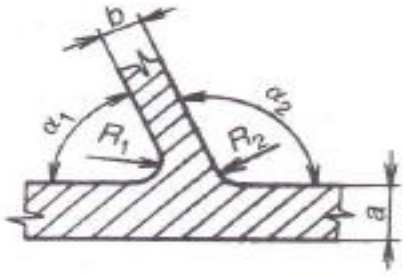


Obr. 1-26 Vliv zaoblení stěn odlitků na vznik a charakter krystalů

Z obr. 1-26 je patrné, že každý ostrý roh, který nemá patřičné zaoblení způsobuje nespojitost materiálu odlitku. Tím se zvyšuje tak riziko vzniku vad a tím je zde značně snížena pevnost, proto je nutné stěny odlitků konstruovat *s příslušným zaoblením*.

Rozměry vnitřních zaoblení

Poloměry vnitřních zaoblení odlitků ze šedé litiny upravuje norma ČSN 01 4909.
Tato norma se zavádí podmínky pro usnadnění výroby forem, resp. pro lepší zatékání kovu do formy a zabraňuje tvorbě trhlin při tuhnutí.
Velikost zaoblení je závislá na tloušťce spojovaných stěn a úhlu, pod kterým jsou spojeny. Na obr. 1-27 je ukázka poloměru vnitřního zaoblení v místě *styku dvou stěn*, z nichž je jedna průběžná.



Obr. 1-27 Poloměry vnitřních zaoblení odlitků

Velikost poloměru zaoblení je závislá:

a) na tloušťce styčných stěn
b) na úhlu stěn.

„Teoretický“ poloměr zaoblení se určí ze střední hodnoty tloušťky stěn:

$$s = \frac{a+b}{2} \qquad (1)$$

V tabulce 1.2 jsou uvedeny velikosti poloměrů stanovaných na základě teoretických úvah.

Tabulka 1.2 Hodnoty pro stanovení poloměrů zaoblení

Vztah pro stanovení vnitřních poloměrů odlitků		
Úhel α		**„Teoretický“ poloměr zaoblení [mm]**
nad	do	
45°	90°	0,5·s
90°	120°	1,0·s
120°	135°	1,6·s

„Teorertický“ poloměr zaoblení se zaokrouhluje na nejbližší vyšší hodnotu z řady normalizovaných poloměrů, viz tab. 1.3.

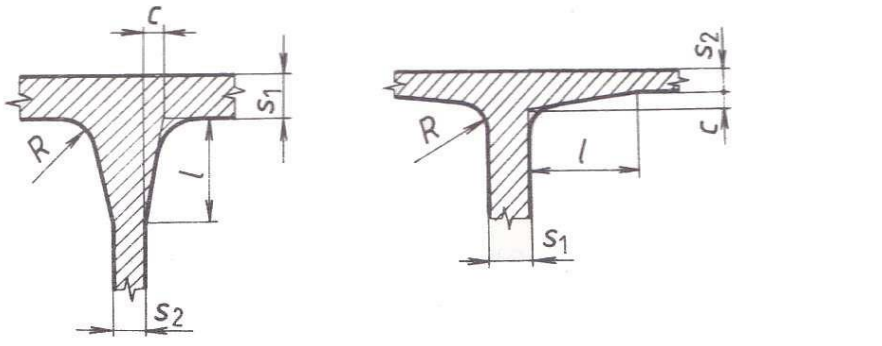
Tabulka 1.3 Řada normalizovaných hodnot poloměrů zaoblení

Řada normalizovaných hodnot poloměrů zaoblení [mm]											
3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40

Připojování stěn a výztuh odlitků

Připojování stěn a výztuh odlitků se vyznačuje těmito konstrukčními zásadami:

a) připojované stěny by měly mít nejlépe stejnou tloušťku a být spojené pod úhlem 90°;
b) dovolený maximální rozdíl tlouštěk je $s_1 : s_2 \leq 2$, pokud je tento poměr porušen je třeba použít plynulého přechodu stěn, viz obr. 1-28.



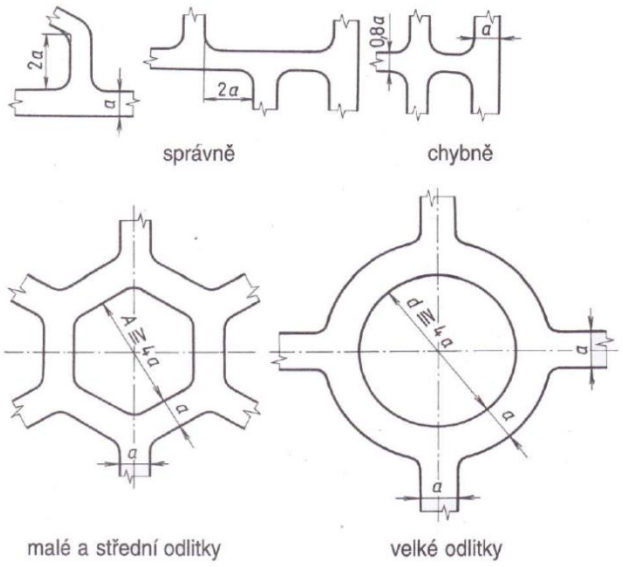
$c \geqq 1{,}5(s_1 - s_2)^{1/2},\ l \geqq 8c$ $\qquad$ $c = 2(s_1 - s_2)^{1/2},\ l \geqq 4c$

Obr. 1-28 Rozměry při připojování stěn a výztuh

Konstrukce výztuh a žeber odlitků musí brát v úvahu tyto konstrukční zásady:

a) žebra a výztuhy se konstruují přibližně o 30-40% tenčí, aby byla schopna ztuhnout jako první a mohla tak vytvořit pevnou kostru pomáhající udržet požadovaný tvar odlitku při tuhnutí;
b) při správné volbě žeber lze zamezit tvorbě trhlin, prasklin a borcení odlitku ;
c) *správná volba rozmístění žeber* i stěn je nutná také vzhledem k možnému vzniku staženin a mikrostaženin;
d) poněvadž obvykle tyto vady vznikají v místech tepelných uzlů, je třeba při oboustranném umístění žeber i stěn tyto vůči sobě předsazovat, a to minimálně o dvojnásobek tloušťky ;

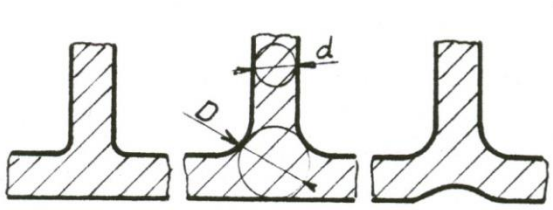
Konstrukce a předsazování žeber na odlitcích je na obr. 1-29.



Obr. 1-29 Konstrukce a předsazování žeber na odlitcích

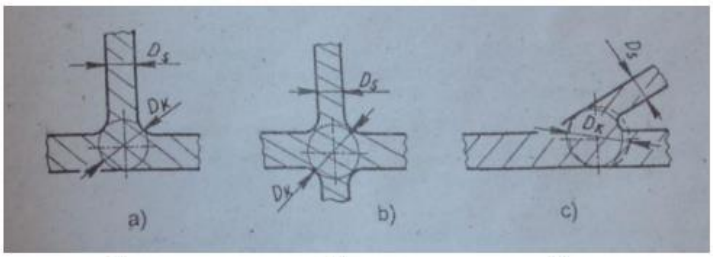
Konstrukce napojování pravoúhlých žeber ke stěně odlitku, viz obr. 1-30 a). Nesprávné napojení ke stěně odlitku může způsobit vznik tzv. *tepelného uzlu.* Posouzení se provádí tzv. *metodou vepsaných koulí*. Průměry koulí vepsané do průřezu stěny odlitku mají být stejné nebo se musí zvětšovat směrem ke vtoku nebo k nálitku. Vlevo je připojení stěny s nedostatečným zaoblením. Provedeme-li velké zaoblení (uprostřed), vzniká velký ∅ D vepsané koule, to signalizuje vznik nepříznivého *tepelného uzlu* (místa tepelných uzlů tuhnou nejdéle a je nebezpečí, že v těchto místech vzniknou vady - řediny). Konstrukční probrání vodorovné stěny (obr. vpravo) odstraní nebezpečí vzniku tepelného uzlu.

Tepelné uzly - ***v***elikost tepelného uzlu lze velice přibližně vyjádřit poměrem průměru vepsané koule D_k do uzlu k průměru vepsané koule D_s do přilehlé stěny. Čím je tento poměr větší, tím je relativně větší i tepelný uzel. Pro různé druhy spojů stěn odlitku jsou velikosti tepelných uzlů znázorněny na obr. 1-30 b).



a) b) c)

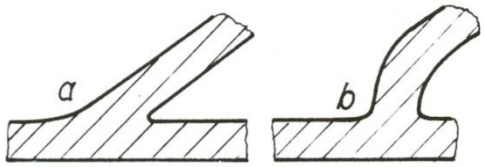
Obr. 1-30a) Schéma připojení pravoúhlého žebra k odlitku
(zamezení tepelného uzlu)



a) $\frac{D_k}{D_s} = 1,6$ b) $\frac{D_k}{D_s} = 2$ c) $\frac{D_k}{D_s} = 1,9$

Obr. 1-30b) Přibližné vyjádření velikosti tepelného uzlu

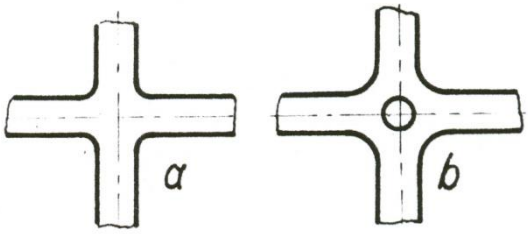
Též připojení šikmého žebra ke stěně, viz obr. 1-31, nesmí způsobovat vznik tepelného uzlu. Připojení vpravo (b) je lepší než vlevo, neboť nevznikají tak ostré hrany.



a) nevhodné; b) vhodné

Obr. 1-31 Připojení šikmého žebra ke stěně odlitku

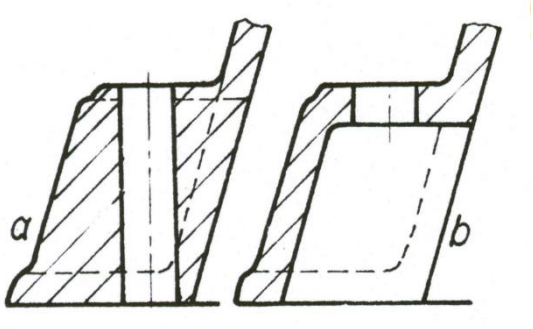
Též pravoúhlé křížení žeber je, viz obr. 1-32, nevhodné. Pomůže odlehčení otvorem. I když je mnohem složitější formování a je nutné použití jádra.



a) nevhodné; b) vhodné

Obr. 1-32 Pravoúhlé křížení žeber

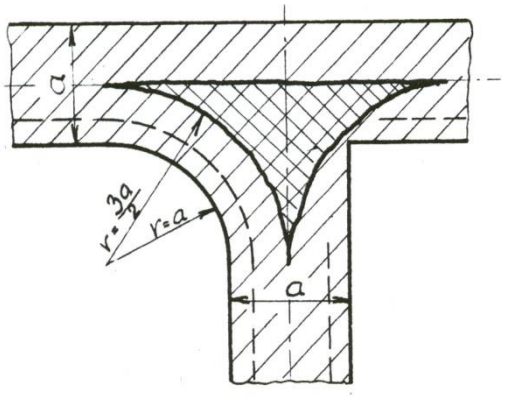
Na obr. 1-33 je ukázka nevhodné a vhodné (vpravo) konstrukce patky pro upínací šroub. Nevhodná konstrukce spočívá ve velkém množství materiálu kolem díry pro šroub a tím možnost vzniku tepelného uzlu.



a) nevhodná; b) vhodná

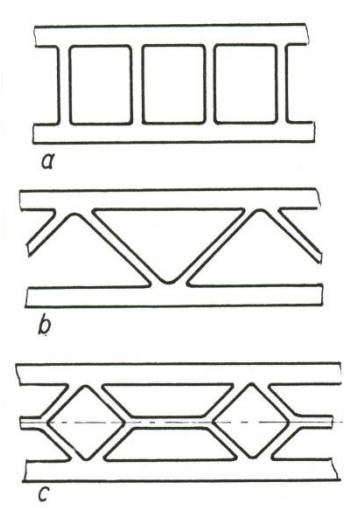
Obr. 1-33 Patka pro upínací šroub

Na obr. 1-34 je ukázka nutnosti zaoblení při pravoúhlém připojení žeber o tloušťce „a“ a jejich správné dimenzování. Ve střední partii je opačně šrafovaná oblast, kde probíhá nejpozdější tuhnutí odlitku. Současně je snaha, aby styk odlitku a formy byl příznivý pro odvod tepla z tuhnoucího odlitku. Tuto zásadu splňují poměrně velká rádia. V případě bez zaoblení (pravá část obrázku) je konstrukce nevhodná, neboť ostré hrany odvádí špatně teplo z odlitku.



Obr. 1-34 Ukázka nutnosti zaoblení při napojování stěn a žeber odlitku

Také odlitky se žebry vyžadují správnou konstrukci, viz. obr. 1-35. Žebrování rovnoběžných stěn, jako je např. u litinových loží, je velmi obtížné. Žebrované konstrukce jsou správné jen ty, které nevytváří příliš tuhou konstrukci a dovolují při smršťování určitou dilataci. Velmi důležité je, aby žebra byla umístěna vždy na straně, kde je v materiálu tlakové napětí. Svislá žebra odlitků jsou nevhodná, zhoršují tuhost konstrukce. Vnější část konstrukce je obvykle masivnější než vnitřní žebra. Tenčí žebra jsou při tuhnutí namáhána tlakem a tlustší partie tahem. Odlitek s konstrukcí skloněných žeber velikost sil při tomto namáhání eliminuje a tato konstrukce se stává příznivější.



a) špatně; b), c) dobře

Obr. 1-35 Konstrukce žeber odlitku

Základní požadavky na správnou konstrukci odlitků se vznikem minimální ho napětí (vnitřního napnutí), to jsou např. odlévaná kola s vnitřním nábojem. Na vnitřní napětí jsou náchylná ramena spojující vnější věnec s vnitřním nábojem. Proto je nutné pozornost věnovat vhodným konstrukčním řešení a zásadám.

Vhodné konstrukční řešení

a) plynulý přechod ramena do věnce;
b) náboj s co možná nejmenší hmotností;
c) tloušťka věnce musí být úměrná náboji (cca poměr tlouštěk 1:3), to znamená, že věnec nesmí být příliš tenký;
d) musí být volen *lichý počet ramen*, aby byla umožněna deformace odlitku.

Konstrukce věnce s nábojem (kolo) se zvlněným nebo kuželovým diskem;

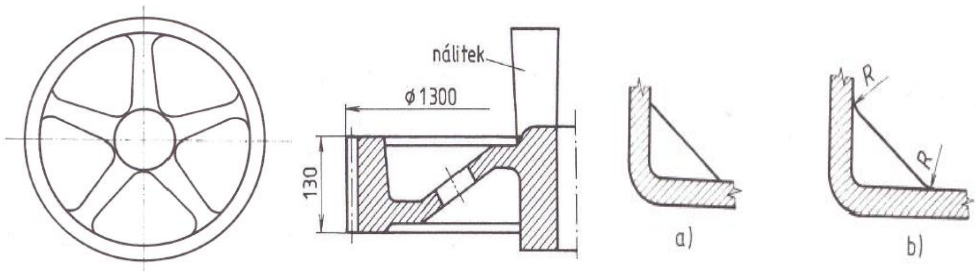
- tato konstrukce kola lépe snáší vnitřní pnutí, viz obr. 1-36;
- Je důležité vhodné umístění přilehlých výztužných žeber, které se konstruují tenčí než ostatní části odlitku, aby mohly ztuhnout jako první (je namáhání na tlak) a vytvořit tak pevnou oporu zabraňující deformaci, borcení, či vzniku trhlin a prasklin.

Zaoblení konců výstužných žeber

- je důležité vhodné *zaoblení konců* výztužných žeber, aby zde nemohly vznikat místní vysoká napětí;
- vhodné napojení žeber je na obr.

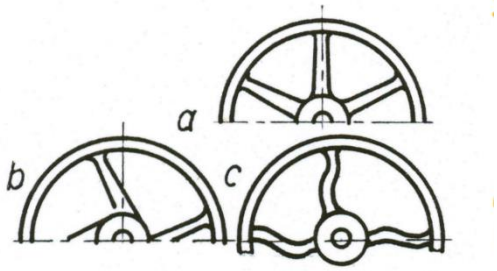
Řešení konstrukce odlitku kola s nábojem

- volba lichého počtu ramen, viz obr. 1-36a);
- konstrukce věnce s a náboje se zvlněnou konstrukcí ramene, viz obr. 1-36 b);
- ukázka napojení žeber, a) méně vhodné; b) - správné viz obr. 1-36 c)



Obr. 1-36 Řešení konstrukce odlitku kola (spojení kola s nábojem pomocí žeber)

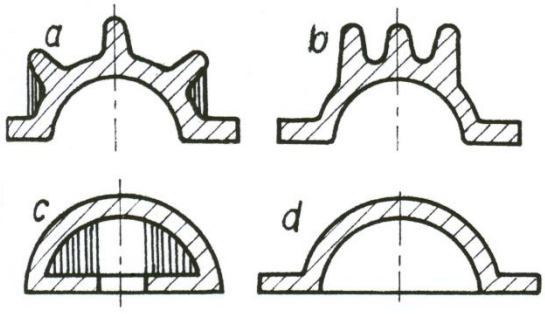
Podobné řešení odlitku kola s nábojem (ukázka spojení náboje a věnce kola pomocí výztuh) je uvedeno na obr. 1-37. Vždy je nutnost lichého počtu výztuh a jejich tvarování v důsledku kompenzace vnitřních pnutí při smršťování (řešení b,c). Sudý počet - tj. protilehlé výztuhy se při tuhnutí silově „přetahují“, což obvykle vede k jejich prasknutí. Pootočení náboje proti věnci (konstrukce b,c) vede k vyrovnávání vnitřních pnutí.



a) nevhodné; b),c) vhodné

Obr. 1-37 Schéma spojení náboje a věnce litého kola

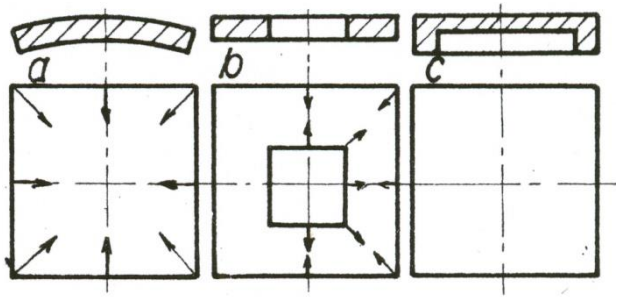
Na obr. 1-38 je uvedeno situování vnějších žeber s ohledem na snadné zaformování odlitku. Řešení se provádí tzv. *metodou vlastních stínů.* Metoda se aplikuje tak, že se odlitek postaví na půdorysnu a osvítí se shora (nebo zespodu) svazkem paprsků kolmých k půdorysně. Vržené stíny výstupků na těleso odlitku ukazují místa, kde by se musela při formování použít tzv. *nepravá jádra*. To za předpokladu, že by se model při formování vytahoval z formy ve směru paprsků. Proto je vhodné volit stejný směr žeber, viz obr. 1-38(b) nebo jinou konstrukci odlitku (d).



a), c) nevhodné; b), d) vhodné

Obr. 1-38 Řešení konstrukce odlitku metodou vlastních stínů

Na obr. 1-39 je ukázka správného navrhování litých desek. Deskovité části odlitku by měly mít výztužná žebra, která ***eliminují deformaci.*** Též je výhodné zesílení obvodového rámu desky nebo vytvoření souměrného otvoru uvnitř desky. V důsledku nerovnoměrného smršťování dlouhých deskovitých odlitků vzniká vnitřní pnutí a dochází k pokřivení odlitku.



a) špatně; b), c) lépe

Obr. 1-39 Správné navrhování litých desek

Jednoduchý tvar desky, obr. 1-39 a) se často prohne po odlití v důsledku napětí (vnitřního pnutí) vzniklého v procesu výroby , resp. tuhnutí a chladnutí desky. Zlepšení by nastalo, kdybychom navrhli uvnitř otvor v desce, viz obr. 1-39 b), avšak to by pro výrobu vyžadovalo zhotovení jader. To je neekonomické. Proto nejlepší řešení je provést zesílením obvodového rámu ve spodní čísti desky, viz obr. 1-39 c).

Bližší informace o zásadách technické přípravy výroby odlitků jsou uvedeny v příloze č. 1.

1.4 Slévárenské slitiny kovů

Pod pojmem slévárenské slitiny máme na mysli materiály ze kterých se vyrábí odlitky. Čisté kovy se zpravidla k výrobě odlitků nepoužívají, neboť nevykazují potřebné mechanické a často ani technologické vlastnosti. Por výrobu odlitků se používají slitiny železa s uhlíkem, tj. grafitické litiny a oceli na odlitky. Dále jsou to slitiny neželezných kovů, především slitiny hliníku, hořčíku, zinku, mědi titanu a niklu.

1.4.1 Vlastnosti slévárenských slitin

Pro určení vhodnosti kovů a jejich slitin pro výrobu odlitků je nejdůležitější ***slévatelnost,*** tj. schopnost slévárenských slitin vytvářet kvalitní odlitky.
Slévatelnost závisí na těchto základních slévárenských vlastnostech:

a) *Tavitelnost* - je schopnost kovů a slitin přecházet ze stavu pevného do stavu kapalného. Závisí na celkové spotřebě tepla. Množství tepla pro natavení slévárenského materiálu, resp. kovu potřebného k odlévání lze vypočítat podle známé fyzikální rovnice (1). Pro výpočet je nutno znát tepelně-fyzikální veličiny kovu.

$$Q = m[c_S . (T_{KR} - T_{20}) + l_{TÁ} + c_L . (T_{LITÍ} - T_{KR})] \quad (1)$$

kde značí: m - hmotnost taveného kovu (slitiny) [kg];
c_S - měrnou tepelnou kapacitu kovu v tuhém stavu [J.kg^{-1}.K^{-1}];
c_L - měrnou tepelnou kapacitu kovu v kapalném stavu [J.kg^{-1}.K^{-1}];
$l_{TÁ}$ – měrné skupenské teplo tání [J.kg^{-1}];
$T_{litÍ}$ - teplotu lití [°C];
T_{KR} - teplotu krystalizace daného kovu [°C];
T_{20} - počáteční teplotu ohřívaného kovu, bývá cca 20 [°C].

Teploty tání kovů jsou Fe = 1539°C; grafitická litina = 1147°C; Al = 660°C; Cu = 1083°C; Mg = 650°C; Zn = 419°C, atd. Taveniny se odlévají při vyšší teplotě (teplotě přehřátí) než je jejich teplota tání. To je nutné z důvodu manipulace s taveninou před odléváním. V tabulce 1.4 jsou uvedeny hodnoty tepelně fyzikálních vlastností důležitých slévárenských materiálů, resp. kovů a jejich slitin potřebných pro výpočet množství tepla Q.

Tabulka 1.4 Tepelné hodnoty slévárenských materiálů

Hodnoty vybraných tepelně-fyzikálních vlastností slévárenských materiálů				
Materiál	***Teplota tání [°C]***	***Měrné skupenské teplo tání $l_{TÁ}$ [J.kg^{-1}]***	***Měrná tepelná kapacita [J.kg^{-1}.K^{-1}]***	
			c_L	***c_S***
Čistý hliník 99,98%	660	397 163	1289,5	896,0
Slitina AlSi10		472 121	1070,0	968,0
Slitina AlSi9Cu3		463 100	1090,0	985,0
Slitina AlSi12		513 335	1131,0	1080,0
Čisté olovo	327	23 865	142,0	129,0
Čistá měď	1083	209 340	480.0	383,0
Mosaz (40%Zn)		180 032	447,0	381.0
Ocel (měkká)		272 142	670,0	405,0
Ocel (1,2%C)		251 200	710,0	473,0
Litina (LLG)	1147	259 200 299200	837,2 729,0	540,0 544,2
Čistý cín		56 615	227,0	243,0
Čistý zinek	419	112 206	502,0	385,0

Poznámka: ***Hodnoty v tabulkách jsou informativní (hodnoty se neučíme nazpaměť).***

Nejlépe jsou tavitelné slitiny kovů, které tuhnou při konstantní teplotě (eutektoidní slitiny).

b) *Tekutost* - vlastnost, která závisí na pohyblivosti jednotlivých částic taveniny za dané teploty. Tekutost závisí na vnitřním tření částic taveniny (velké tření způsobuje menší tekutost). Vyšší teplota taveniny zvyšuje tekutost. Dobrá tekutost taveniny ovlivňuje tzv. ***zabíhavost***.
Zabíhavost je technologická vlastnost taveniny a ukazuje schopnost taveniny vyplňovat slévárenskou formu. Závisí na mnoha činitelích (*slitině* - teplotě lití, hustotě, atd.; *slévárenské formě* - druhu, vlhkosti, atd.). Zabíhavost charakterizují různé zkoušky zabíhavosti (spirálová, klínová, atd.).

c) *Smršťování* - vyplývá z fyzikálních zákonitostí. Souvisí s uspořádáním částic kovů v kapalném a tuhém stavu. Smršťování taveniny během tuhnutí (tj. mezi teplotami T_L a T_S) je smršťování objemové a nazývá se ***stahování.*** V odlitku vznikají staženiny, které mohou být soustředěné nebo rozptýlené. V důsledku stahování je nutno většinu odlitků nálitkovat.
Smršťování při ochlazování odlitku je spojeno se změnou lineárních rozměrů odlitku, tj. ***lineární smršťování.*** S tím souvisí větší rozměr modelu, resp. dutiny slévárenské formy o tzv. míru lineárního (délkového) smrštění.
V tabulce 1.5 jsou uvedeny hodnoty objemového a lineárního smrštění vybraných kovů

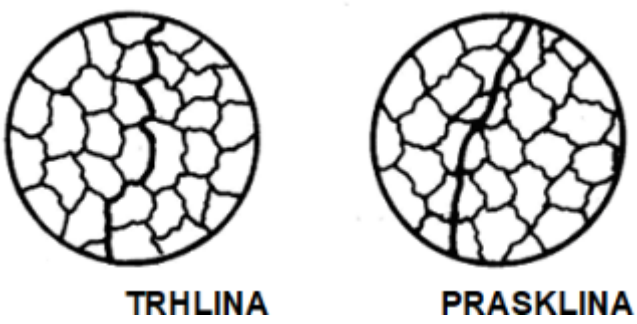
Tabulka 1.5 Hodnoty objemového a lineárního smrštění vybraných kovů

Kov, slitina	Objemové smrštění v kapalném stavu ε_{VL} [%]	Objemové smrštění při tuhnutí ε_{VL} [%]	Lineární smrštění odlitku ε_{LIII} [%]	
			písková forma	kovová forma
Čisté železo		3,0	2,4	
Ocel uhlíková	0,4 až 1,6	2,0 až 6,0	1,2 až 2,0	
LLG	1,1	-2,0 až 3,0	0,7 až 1,2	
LKG	1,0	-2,0 až 1,0	0,5 až 1,0	
Slitiny hliníku	1,2 až 1,3	3,0 až 6,0	0,9 až 1,4	1,5 (gravitační lití) 0,5 (tlakové lití)
Slitiny zinku	1,39	4,0 až 6,0	1,1	1,6 (gravitační lití) 0,6 (tlakové lití)
Slitiny hořčíku	7,0	4,0	1,1	1,4 gravitační lití) 0,7 (tlakové lití)

Poznámka: Z tabulky je patrné, že lineární smrštění je závislé nejen na slitině, ale také do jaké formy odléváme, nejčastěji se pohybuje od 1 do 2 %. Objemové smršťování = 3 x lineární.

d) *Sklon materiálu k trhlinám a prasklinám* - jde o náchylnost materiálu odlitku k porušení. Tím mohou být *trhliny*, které vznikají při teplotách v okolí teplot krystalizace, jdou po hranicích zrn a mají zoxidovaný povrch. Dále to jsou *praskliny*, které vznikají v důsledku pnutí v odlitku, při teplotách nižších jdou přes zrna a nemají zoxidovaný povrch.

Na obr. 1-40 je schéma trhliny a praskliny



Obr. 1-40 Schéma trhliny a praskliny na odlitku

Tabulka 1.6 Podmínky pro vznik trhlin a prasklin

Podmínky pro vznik trhlin a prasklin		
Příčiny vzniku	**Trhlina**	**Prasklina**
Teplota vzniku	vysoké teploty těsně pod T_S (v oblasti teploty solidu)	v oblasti teplot odpovídajícím pružným deformacím materiálu
Doba vzniku	postupným vývojem	okamžitě (v jednom časovém okamž xiku)
Příčiny vzniku	napětí exotermního charakteru	tepelná napětí odlitku
Vliv konstrukce odlitku	Malý	rozhodující
Zvukový efekt	Není	velmi silný
Tvar	křivolaký - po hranicích zrn	rovný – přes zrna
Povrch vady	Zoxidovaný	čistý (náběhové barvy)

e) *Odměšování (likvace)* - je přítomnost různého množství strukturních složek v odlitku. Příčinou je částečná nebo úplná nerozpustnost kovů v odlitku. Odměšování může být pásmové (v určitých místech odlitku) nebo dendritické (v určitých místech rozvětvených krystalů odlitku). Dobře je odměšování patrné z průběhu krystalizace slitin mezi likvidem a solidem, kdy se při určité teplotě vylučují krystaly různě bohaté na příměs.

1.4.2 Základní druhy slévárenských slitin

Pro výrobu odlitků se používají především slitiny, neboť vykazují příznivější slévárenské vlastnosti než čisté kovy. Mezi nejpoužívanější slévárenské slitiny se řadí:

1. Slitiny železa s uhlíkem (Fe-C), grafitické litiny a oceli na odlitky;
2. Slitiny hliníku (Al-Si; Al-Mg; Al-Cu; Al-Si-Mg; Al-Si-Cu, Al-Cu-Si, Al-Mg-Si);
3. Slitiny mědi (mosazi, bronzy);
4. Slitiny hořčíku;
5. Slitiny ostatních kovů (např. slitiny titanu, niklu, atd.).

1.4.2.1 Litiny

Litiny jsou slévárenské materiály, které jsou vhodné pro *lití odlitků – litiny*. Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem a některými dalšími prvky (křemíkem, manganem, fosforem, sírou, atd.), kdy obsah uhlíku je větší než 2,11% C. Konkrétní obsah prvků je závislý na druhu litiny.

Obecně se litiny dělí na dvě velké skupiny:

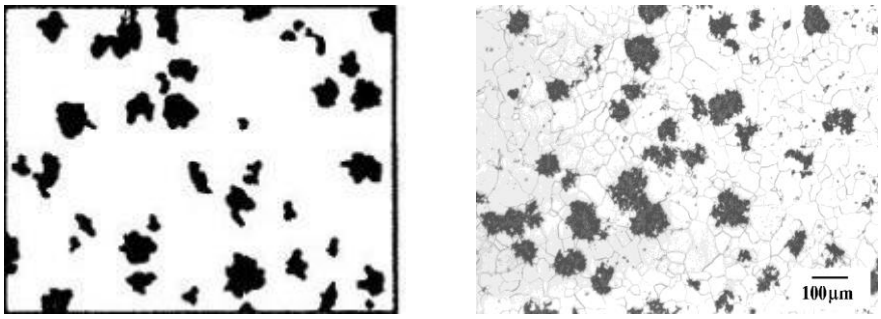
a) litiny bílé;
b) litiny grafitické, které mají značné uplatnění ve slévárenství.

Litiny bílé se dnes téměř nevyrábí. Dříve byla bílá litina základem pro výrobu temperované litiny. Bílá litina tuhne podle metastabilní soustavy Fe-C a základem struktury je ledeburit, resp. ledeburitický cementit, který je velmi tvrdý. Odlitky z bílé litiny se vyrábí především tam, kde chceme využít tvrdost cementitu. Na obr. 1-41 je uvedena struktura bílé litiny, která je tvořena Fe_3C a perlitem.



Obr. 1-41 Struktura bílé litiny (4,3 % C),
tmavá místa je pertit, bílá místa jsou cementit

Temperování je dlouhodobé žíhání odlitků z bílé litiny při teplotě cca 950 až 1050°C, kdy dochází k rozkladu cementitu: $FeC \rightarrow 3Fe + C_{(grafit)}$. Tím vzniká vločkový grafit, který je rozložen v základní kovové hmotě litiny (matrici). Základní hmota temperované litiny je závislá na způsobu temperování (na černý lom; na bílý lom; na perlit). Při temperování na černý lom vzniká matrice feritická, při temperování na bílý lom vzniká matrice feriticko-perlitická a poslední způsob je temperování za vzniku perlitické matrice. Temperované litiny se vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, temperovaná litina s perlitickou matricí dosahuje pevnost v tahu cca 700 MPa. Na obr. 1-42 je temperovaný grafit a struktura temperované litiny s feritickou matricí.



a) temperovaný grafit; b) TL - feritická matrice

Obr. 1-42 Grafit a feritická matrice temperované litiny [40]

Dnes temperovanou litinu nahrazují kvalitní litiny. Takové, které jsme schopni vyrobit pouze odlitím (litina s kuličkovým nebo červíkovým grafitem) bez následného a finančně náročného tepelného zpracování. Jen výjimečně se tepelně zpracovává LKG - kalení v solných lázní za vzniku bainitické matrice (v zahraničí se tento způsob označuje ADI - Austenpered Ductile Iron). Takto zpracovaná LKG dosahuje pevnost v tahu cca 1200 MPa.

Bílou litinu můžeme také nechtěně získat v tenké části odlitku při jeho výrobě z litiny s lupínkovým grafitem (to závisí na rychlosti tuhnutí a chladnutí odlitku, resp. na jeho tloušťce stěny i na jeho chemickém složení), viz *Maurerův* nebo *Klingensteinův* strukturní diagram litin.

Litiny grafitické jsou velmi používaným konstrukčním materiálem. Lze je podle tvaru grafitu rozdělit na tři velké skupiny:
1. Litina s *lupínkovým grafitem* (LLG); EN – GJL,
2. Litina s *červíkovým grafitem* (LČG); EN – GJV,
3. Litina s *kuličkovým grafitem* (LKG); EN – GJS**.**

Litiny se vyznačují dobrými útlumovými vlastnostmi, to platí především o LLG. Proto se z litiny s velkými lupínky vyrábí lože obráběcích strojů. U bloků velkých spalovacích motorů vyžadujeme jak útlumové vlastnosti, tak i vyšší pevnost; zde se dělá kompromis a využívá se LLG s vyššími mechanickými vlastnostmi. LKG působí na útlumové vlastnosti mírněji (ocel však má útlumové vlastnosti nepatrné). Lupínky grafitu však způsobují v kovové hmotě vrubové účinky (vruby) a tím je litina citlivá na namáhání v tahu. V tomto směru jsou příznivější kuličky grafitu, které méně narušují strukturu litiny. Litina s lupínkovým grafitem vykazuje 3x větší pevnost při namáhání v tlaku než v tahu. Při namáhání na ohyb se u litiny posouvá neutrální osa namáhaného profilu vlivem rozdílné pevnosti v tahu a tlaku ke směru působící ohybové síly. Z tohoto důvodu jsou často výhodnější nesouměrné profily, ve kterých se dosáhne rovnoměrnějšího rozložení napětí. Pro tepelně namáhané litinové díly (bloky, hlavy spalovacích motorů) je důležitá hodnota jejich tepelné vodivosti. Čím má litina vyšší tepelnou vodivost, tím intenzivněji rozvádí a odvádí teplo.

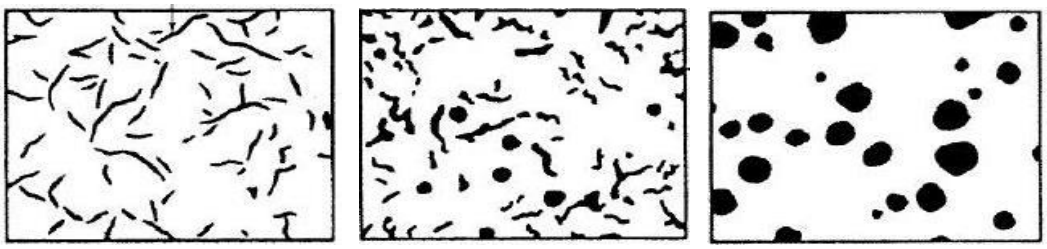
Grafitické litiny mají nízkou výrobní cenu a dobré technologické vlastnosti. Tavitelnost litin je velmi dobrá a litiny proti ocelím na odlitky mají teplotu tání cca 1147°C. Také je velmi dobrá zabíhavost, lze odlévat odlitky s tloušťkou stěny několik mm. Smrštění při krystalizaci je nepatrné, neboť grafit při krystalizaci zvětšuje objem. Smrštění v tuhém stavu je 1%.

Strukturu běžných grafitických litin tvoří:

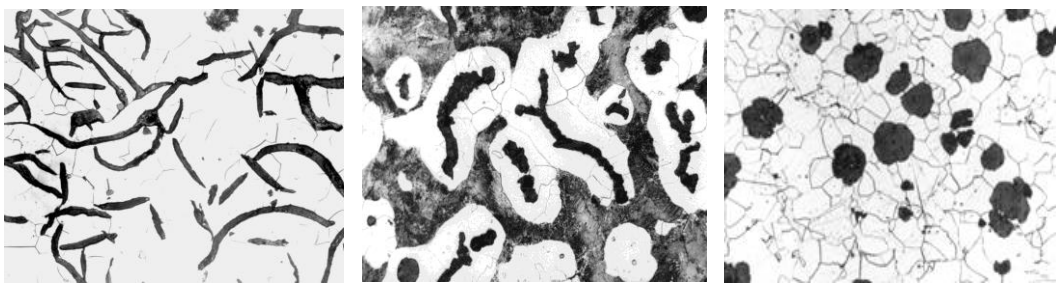
a) grafit;
b) základní kovová hmota (matrice);
c) ostatní strukturní součásti, které často bývají nevhodné (steadit, sulfidy, atd.).

Grafit má velký vliv na vlastnosti litin, neboť jeho částice zmenšují aktivní průřez kovové hmoty litiny, avšak lupínkový grafit způsobuje útlumové vlastnosti litiny. Grafit je elementární uhlík, který krystalizuje v hexagonální soustavě. Vzniká při eutektické přeměně litiny podle stabilního diagramu Fe-C a zůstává ve struktuře litiny bez ohledu, zda-li další přeměna probíhala podle stabilního nebo metastabilního diagramu Fe-C. Grafit má v porovnání s kovovou matricí litiny téměř zanedbatelnou pevnost.

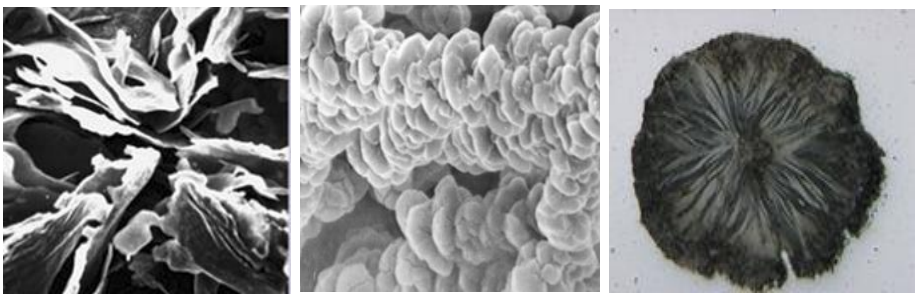
Důležitý je tvar (morfologie) grafitu, viz obr. 1-43a), 1-43 b) a 1-43 c). Za normálních podmínek krystalizuje grafit ve formě lupínků. Přidání určitého množství tzv. modifikátoru do taveniny způsobí vyloučení např. kuličkového nebo červíkového grafitu. Dále je důležitá velikost a rozložení grafitu. Chceme-li grafit drobnějšího vzhledu s pravidelným vyloučením přidáváme před odléváním do taveniny tzv. očkovadlo (ferosilicium, uhlík, měď, atd.).



Obr. 1-43 a) Schémata tvarů grafitu (lupínkového, červíkovitéha a kuličkového)



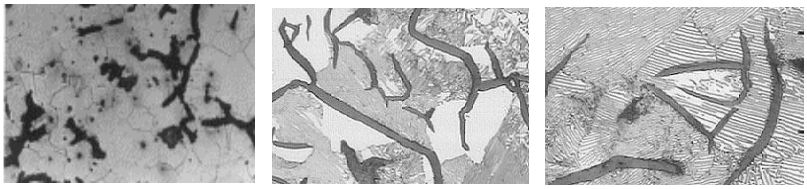
Obr. 1-43 b) Ukázka tvarů grafitu (lupínkového, červíkovitého a kuličkového), získáno na světelném mikroskopu



Obr. 1-43 c) Ukázky tvarů grafitu (lupínkový, červíkový a kuličkový), získáno na rastrovacím elektronovém mikroskopu [50]

Základní kovová hmota grafitických litin může být podle způsobu transformace austenitu vzniklého při eutektické krystalizaci litiny:
a) feritická;
b) feriticko-perlitická (nebo perliticko-feritická);
c) perlitická,ve zvláštních případech bainitická nebo martenzitická.

Ukázka základní kovové hmoty (matrice) grafitických litin je na obr. 1-44.



feritická matrice litiny s červíkovým grafitem, feriticko –perlitická matrice litiny s lupínkovým grafitem a perlitická matrice litiny s lupínkovým grafitem

Obr. 1-44 Základní typy kovové matrice litin [40]

Současně se mohou ve struktuře litiny objevovat i další strukturní součásti jako např. cementit, steadit (čti stídit), atd.
Ferit - ve struktuře litin snižuje pevnost v tahu, tvrdost a odolnost proti opotřebení, ale zvyšuje tvárné vlastnosti a vrubovou houževnatost litin. Ferit je u litin definován jako tuhý roztok uhlíku a křemíku v Fe_{α}.
Perlit - je v litinách v lamelárním stavu. Čím je větší množství perlitu v matrici, tím se zvyšují mechanické vlastnosti litiny (pevnost v tahu, tvrdost) a odolnost vůči opotřebení, avšak klesá tvárnost litiny.
Cementit - volný cementit v litině je nežádoucí, neboť se vyznačuje tvrdostí a křehkostí a nízkou obrobitelností a téměř žádnou tvárností.
Steadit - ternární fosfidické eutektikum, je směsí (Fe - Fe_3C - Fe_3P). Ve struktuře litiny se objevuje ve formě „pavučinek“. Toto nepříjemné eutektikum se vyskytuje při vyšším obsahu fosforu, tj. od 0,3%. Má nízkou teplotu tání (950°C). Je velmi tvrdou a nepříznivou strukturní složkou litin.

Hodnotící kritéria litin - při výzkumu litin s lupínkovým grafitem byla pro jejich hodnocení vypracována různá kritéria:

1. *Uhlíkový ekvivalent*:

$$C_E = \%C + 0{,}3\%Si + 0{,}3\%P \quad , \tag{2}$$

2. *Stupeň eutektičnosti*:

$$S_e = \frac{\%C}{4{,}23 - 0{,}3\%Si - 0{,}3\%P}, \tag{3}$$

kde značí: C - obsah uhlíku;
Si - obsah křemíku;
P - obsah fosforu.

Obě tato kriteria umožňují přibližně zjistit, zda posuzovaná litina je: podeutektická ($C_E < 4{,}3$; $S_e < 1$); eutektická ($C_E = 4{,}3$; $S_e = 1$); nadeutektická ($C_E > 4{,}3$; $S_e > 1$).

3. Poměr mezi uhlíkem a křemíkem:

$$\frac{\%C}{\%Si} \approx 1{,}8 \tag{4}$$

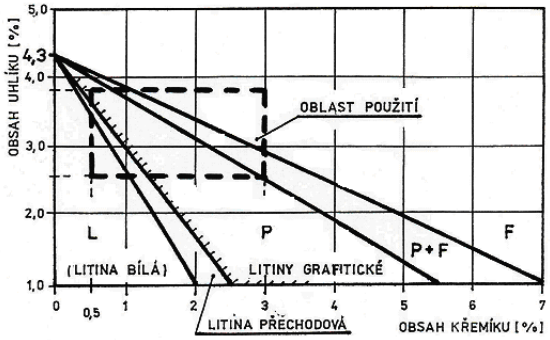
Uhlíkový ekvivalent nebo stupeň eutektičnosti mají význam pro posouzení kvality litin. Jak je patrné, závisí na chemickém složení litiny, především na obsahu uhlíku, křemíku a fosforu.
Pomocí stupně eutektičnosti (resp. známého chemického složení litiny) lze vypočítat pevnost v tahu (Rm) nebo tvrdost (HB) nebo Youngův modul pružnosti (E) litiny s lupínkovým grafitem:

$$R_m = 1006 - 800 \cdot S_e [MPa] \tag{5}$$

$$HB = 465 - 270 \cdot S_e \tag{6}$$

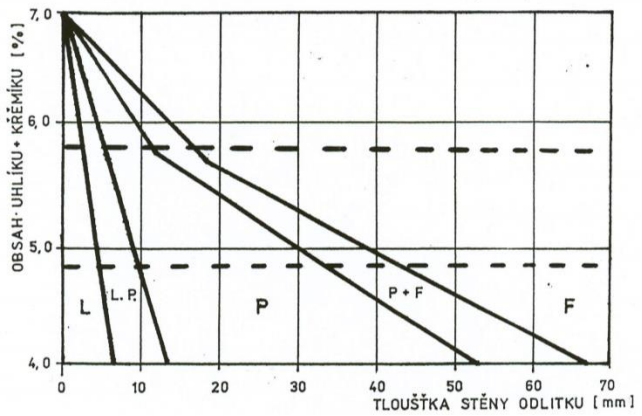
$$E = \frac{R_m}{HB} \cdot 10^5 [MPa] \tag{7}$$

Pro odhad struktury při krystalizaci grafitických litin s lupínkovým grafitem byla vypracována celá řada strukturních diagramů, ze kterých lze odvodit strukturu odlitku. Mezi tyto diagramy patři např. Maurerův, Kliengensteinův diagram, viz obr. 1-45 a) a 1-45 b).
Maurerův diagram podává přehled o souvislosti mezi chemickým složením a strukturou litiny (není to diagram rovnovážný), uvažuje konstantní rychlost ochlazování. Zde je třeba uplatnit poznatek, že křemík je prvek grafitotvorný. Je-li křemíku v litině málo, probíhá krystalizace za vzniku metastabilních podmínek - za vzniku ledeburitu (oblast I). S rostoucím obsahem křemíku vznikají podmínky pro krystalizaci litiny podle stabilní rovnováhy. Oblast II - litina se strukturou perlitickou, oblast IIb - litina se strukturou perlitcko-feritickou, oblast III - litina se strukturou feritickou. Oblast IIa je oblast přechodová, tzv. „maková litina“. To je litina jak s ledeburitem, tak s nepatrným grafitem.



L - ledeburit; L.P - přechodové pásmo (maková litina);
P - perlit; P+F - perlit a ferit; F - ferit

Obr. 1-45 a) Maurerův strukturní diagram litin



L - ledeburit; L.P. - přechodové pásmo (maková litina);
P - perlit; P+F - perlit a ferit; F - ferit

Obr. 1-45 b) Klingensteinův strukturní diagram litin

Klingensteinův diagram zahrnuje vedle chemického složení litiny i rychlost ochlazování prostřednictvím tloušťky stěny odlitku. Čím je větší tloušťka odlitku, tím je menší rychlost ochlazování a krystalizace probíhá více podle stabilní krystalizace. Oblasti jsou analogické jako u Maurerova diagramu. Naopak malá tloušťka odlitku způsobuje rychlé ochlazování za vzniku krystalizace podle metastabilní soustavy - tj. za vzniku ledeburitu.

Litina s lupínkovým grafitem (LLG) - dříve označovaná šedá litina. Pro konstrukční účely se používá podeutektického složení. ČSN označovala tuto litinu ČSN 42 24XX (poslední dvojčíslí udává minimální pevnost v tahu v $kp.mm^{-2}$. Dnes se však používají pro pevnost v tahu jednotky MPa (tj. $kp.mm^{-2}$. 9,81). V současné době se označování jednotlivých typů grafitických litin provádí dle norem Evropské unie. Podle těchto nových norem je možno všechny typy grafitických litin označovat značkami nebo číselně. Tento způsob značení se řídí normou ČSN EN 1560.

Mechanické hodnoty litin jsou závislé na druhu litiny. V tabulce 1.7 a 1.8 jsou uvedeny mechanické vlastnosti a chemické složení litiny s lupínkovým grafitem.

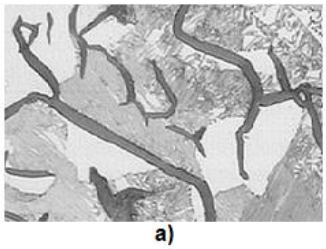
Tabulka 1.7 Základní normalizované jakosti litin s lupínkovým grafitem

Vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem dle ČSN						
Vlastnosti litin	*ČSN 42 24XX*					
	10	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**
Pevnost v tahu Rm [MPa]	100	150	200	250	300	350
Maximální tvrdost,max. HBS	180	200	220	240	260	270
Stupeň eutektičnosti Se (Sc)	1,05 až 1,11	0,99 až 1,05	0,93 až 0,99	0,87 až 0,93	0,81 až 0,87	0,75 až0,81
Doporuč. tloušťka odlitku [mm]	4 až15	5 až 30	8 až 40	15 až 50	25 až 70	40 až 100

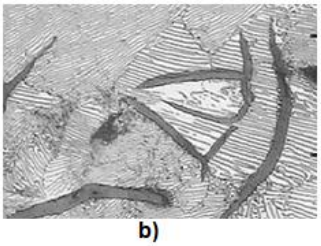
Tabulka 1.8 Chemické složení litiny s lupínkový grafitem

ČSN 42 24XX	*Chemické složení [%]*					C/Si	S_e
	C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**		
20	3,3až 3,5	1,8 až 2,0	0,65 až 0,85	0,3 až 0,45	max. 0,15	1,8	0,95
25	3,2 až 3,4	1,7 až 1,9	0,65 až 0,9	0,20 až 0,35	max. 0,14	1,8	0,91
30	3,0 až 3,2	1,6 až 1,8	0,65 až 1,0	0,10 až 0,25	max. 0,14	1,8	0,84
35	2,8 až 3,0	1,5 až 1,7	0,9 až 1,1	0,10 až 0,20	max. 0,10	1,8	0,78

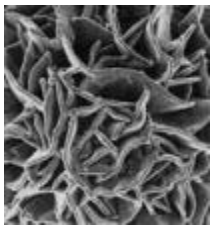
Chemické složení litiny s lupínkovým grafitem bývá: (2,8 až 3,6)% C; (1,4 až 2,8)% Si; (0,5 až 1,0)% Mn; (0,2 až 0,6)% P, max. 0,15% S. Nejméně je kvalitní litina ČSN 42 2410, pevnost v tahu je 100 MPa, má velké lupínky grafitu a feritickou matrici. Její tvrdost bývá 130 HB. Kvalitnější je litina ČSN 42 2415, pevnost v tahu je 150 MPa, tvrdost je 170 HB, struktura je feriticko-perlitická. Litina ČSN 42 2420 bývá očkovaná, čímž se zlepšují její vlastnosti. Pevnost v tahu je 200 MPa, tvrdost 200HB. Struktura je feriticko-perlitická. Litina ČSN 42 2425 se vždy očkuje, pevnost bývá 250 MPa a tvrdost 220 HB, struktura je perliticko-feritická. Litina ČSN 42 2430, pevnost v tahu je 300 MPa a tvrdost 260 HB, struktura je perlitická. Na obr. 1-46 jsou uvedeny struktury litiny s lupínkovým grafitem. Litina s lupínkovým grafitem s velkým množstvím feritu odpovídá pevnosti v tahu 100 MPa. Tato litina nemá velké technické uplatnění.



a)



b)



c)

a) feriticko-perlitická matrice, zvětšení 250x;
b) LLG - perlitická matrice, zvětšení 250x
c) prostorové uspořádání lupínkového grafitu

Obr. 1-46 Struktura litiny s lupínkovým grafitem [40]

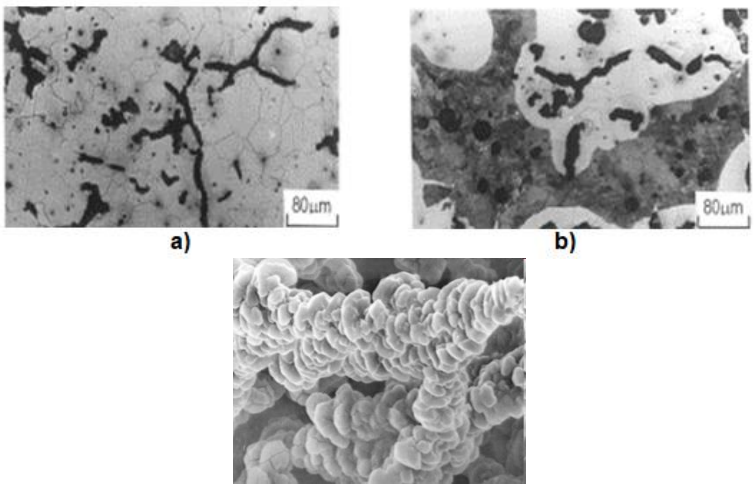
Použití litiny s lupínkovým grafitem je pro výrobu drobných litinových odlitků (víček, držáků a konzol). Kvalitnější typy litiny s lupínkovým grafitem se používají na výrobu bloků a hlav naftových spalovacích motorů, brzdových kotoučů a bubnů automobilů. Dále pro výrobu vložných válců, zdvihátek, vahadel spalovacích motorů.



Obr. 1-47 Odlitky z litiny s lupínkovým grafitem (např. odvětrávané brzdové koouče) [2]

Litina s červíkovitým grafitem (LČG) - litina vermikulární. Červíkovitý grafit se v zahraničí označuje CGI (compacted graphite iron). Chemické složení litiny se pohybuje: (3,5 až 3,8)% C; (2,4 až 2,7)% Si, 0,6% Mn; max. (0,02 až 0,06)% P; max. 0,02% S. Jsou základní tři typy. První typ je LČG - feritická, která má pevnost v tahu 320 MPa, tvrdost 180 HB. Druhým typem je LČG - feriticko-perlitická, která vykazuje pevnost v tahu 400 MPa, tvrdost je 200 HB. Třetím typem je LČG - perlitická, pevnost v tahu je 450 MPa, tvrdost 250 HB. Modul pružnosti bývá 140000 až 180000 MPa.

Struktura litiny s červíkovým grafitem je na obr. 1–48.



a) feritická matrice, zvětšení 250x;
b) feriticko-perlitická matrice, zvětšení 250x
c) prostorové uspořádání červíkového grafitu

Obr. 1-48 Struktura litiny s červíkovitým grafitem [40]

Litina se používá v automobilovém průmyslu pro dynamicky namáhané díly. V současné době se hodí též jako náhrada dříve hojně používané temperované litiny. Z litiny s červíkovitým grafitem se vyrábí výfuková potrubí osobních automobilů (např. Škoda Auto), ale v současné době i tenkostěnné bloky spalovacích motorů (např. Audi 3,0 TDI, výkon 170 kW má vyroben blok motoru z této litiny a celková hmotnost motoru je 202 kg, což se řadí na špičku světové produkce v této kategorii). Na obr. 1-49 jsou uvedeny odlitky z litiny s červíkovým grafitem.



Obr. 1-49 Odlitky litiny s červíkovým grafitem [38], [39]

Litina s kuličkovým grafitem (LKG) - označovala se dříve jako tvárná. Grafit ve formě globulí zmírňuje vrubové účinky v kovové matrici. Obsah uhlíku a křemíku bývá vyšší, zlepšuje slévárenské vlastnosti a má větší vliv na mechanické vlastnosti (na pevnost matrice). Chemické složení litiny bývá: (3,2 až 4,2)% C; (1,5 až 4,0)% Si; (0,4 až 0,8)% Mn; méně než 0,1% P, 0,02% S; (0,05 až 0,1)% Mg. LKG bývá většinou eutektického nebo nadeutektického složení. V roce 1947 Moprogh a Williams zjistili, že přísada malého množství *modifikátoru* (např. céru) do taveniny litiny způsobuje při tuhnutí vyloučení grafitu ve formě kuliček. Později se ukázalo, že má tento účinek i hořčík nebo (Ni-Mg, Cu-Mg, Al-Mg). Pro získání malých globulí grafitu je nutno taveninu před odléváním také *očkovat* ferosiliciem. Kovová hmota LKG je tvořena buď perlitem, feritem a perlitem nebo feritem. Podíl feritu docílíme přidáním křemíku a snížením manganu.

Podle ČSN je litina označována ČSN 42 23XX a obsahuje 6 základních skupin jakosti. Nejméně kvalitní je litina ČSN 42 2303, která má strukturu feritickou, pevnost je 300 MPa, vykazuje vysokou tažnost 22%, tvrdost je 150 HB. Litina ČSN 42 2304 má též feritickou matrici, pevnost je 400 MPa, tvrdost 180 HB, tažnost 15%. Litina ČSN 42 2305 má matrici feriticko-perlitickou, pevnost v tahu 500 MPa, tažnost 7% a tvrdost 200 HB. Litina ČSN 42 2306 má perliticko-feritickou matrici, pevnost v tahu 600 MPa, tažnost 3%. Litina ČSN 42 2307 má matrici perlitickou, pevnost v tahu 700 MPa, tažnost 2%, tvrdost 250 HB. Litina ČSN 42 2308 má metrici perliticko-bainitickou, pevnost v tahu 800 MPa, tažnost 2%, tvrdost 280 HB. Modul pružnosti bývá u LKG (160000 až 180000) MPa. Dále je ještě - ČSN 42 2340 - litina s kuličkovým grafitem žáruvzdorná.

V současné době se podle EU používá označení litiny s kuličkovým grafitem EN – GJS (Graphite Iron Spheroidal). Vyrábí se 8 typů litin s kuličkovým grafitem, z toho 2 skupiny mají speciální typ matrice.

EN GJS - 360 - 22: cca pevnost 360 MPa v tahu; tažnost 22 %; feritická matrice
EN GJS - 400 - 18: cca pevnost 400 MPa v tahu; tažnost 18 %; feritická matrice
EN GJS - 450 - 10: cca pevnost 450 MPa v tahu; tažnost 10 %; feritická matrice
EN GJS - 500 - 7: cca pevnost 500 MPa v tahu; tažnost 7 %; feriticko-perlitická matrice
EN GJS - 600 - 3: cca pevnost 600 MPa v tahu; tažnost 3 %; feriticko-perlitická matrice
EN GJS - 700 - 2: cca pevnost 700 MPa v tahu; tažnost 2 %; perlitická matrice

Grafitické litiny se speciálním zpracováním *(netradiční matrice):*

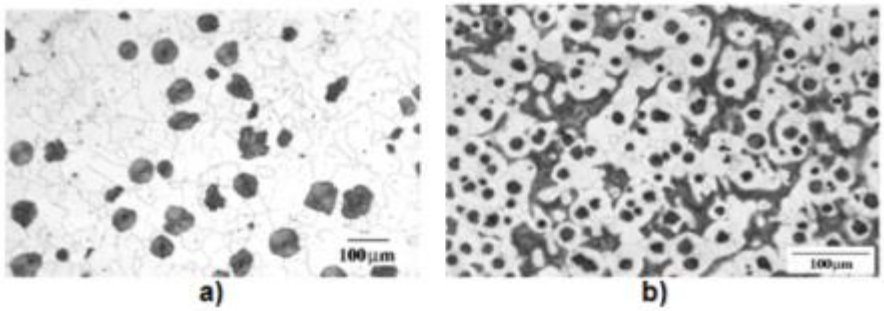
EN GJS - 800 - 2: cca pevnost 800 MPa v tahu; tažnost 2 %; perlitická + sorbitická matrice
EN GJS - 900 - 2: cca pevnost 700 MPa v tahu; tažnost 2 %; bainitická + sorbitická matrice

V zahraničí se vyrábí také litiny s kuličkovým grafitem austenitické, které obsahují cca 20% Ni a používají se pro práci za vysokých nebo naopak velmi nízkých teplot.

Zvýšení mechanických vlastností LKG, resp. GJS lze docílit i speciálním tepelným zpracováním - izotermickým zušlechťováním, (v zahraničí se označuje ADI způsob – Austempered Ductile Iron), kde se dosahuje pevnost litiny vyšší než je 1200 MPa. Jsou 4 typy ADI litin, které jsou popsány normou DIN EN 1564.

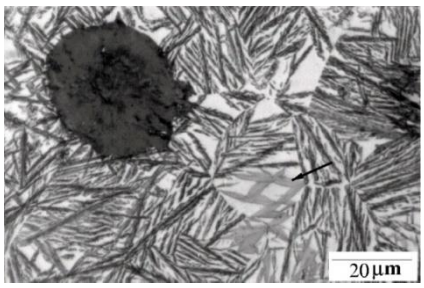
EN-GJS-800-8: cca pevnost 800 MPa v tahu; tažnost 8 %; matrici tvoří jehlicovitá struktura feritu ve které je vysokouhlíkový austenit.
EN-GJS-1000-5: cca pevnost 1000 MPa v tahu; tažnost 5 %; matrici tvoří jehlicovitá struktura feritu ve které je vysokouhlíkový austenit.
EN-GJS-1200-2: cca pevnost 1200 MPa v tahu; tažnost 2 %; matrici tvoří jehlicovitá struktura feritu ve které je vysokouhlíkový austenit.
EN-GJS-1400-1: cca pevnost 1400 MPa v tahu; tažnost 1 %; matrici tvoří jehlicovitá struktura feritu ve které je vysokouhlíkový austenit.

Na obr. 1-50 je struktura litiny s kuličkovým grafitem a na obr. 1-51 je litina zpracována ADI.



a) *feritická matrice, zvětšení 200x;* *b) feriticko-perlitická matrice, zvětšení 200x*

Obr. 1-50 Struktury litiny s kuličkovým grafitem [50]



Obr. 1-51 Struktura ADI litiny s kuličkovým grafitem, zvětšení 500 x [51]

Použití LKG je v automobilovém průmyslu pro dynamicky namáhané součásti - klikové hřídele, ojnice, tělesa čerpadel. Z hlediska pevnostních vlastností tvoří LKG přechod mezi ocelí a litinou. Na obr. 1-52 jsou odlitky vyráběné z litiny s kuličkovým grafitem, tyto odlitky mají vykazovat velkou pevnost v tahu, vyrábí se např. příčná ramena, tělesa kompresoru, kliková hřídel ŠKODA-Fabia 1.2 HPT, složité příruby, atd. Na obr. 1-53 jsou odlitky litiny s kuličkovým grafitem, zpracované metodou ADI, jsou to velmi namáhané páky, nejrůznějších tvarů, ale také drobná ozubená kola, atd.

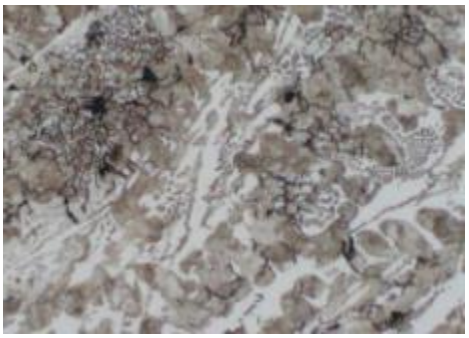


Obr. 1-52 Odlitky z litiny s kuličkovým grafitem [53], [54]



Obr. 1-53 Odlitky vyrobené z litiny s kuličkovým grafitem,
zpracované metodou ADI [55]

Temperovaná litina - je houževnatý a současně dobře obrobitelný materiál, který se vyrábí dlouhodobým žíháním – tj. *temperováním* bílé litiny. První podmínkou je vůbec vyrobit odlitek se strukturou bílé litiny, tj. s obsahem transformovaného ledebutitu, viz obr. 1-53.



Obr. 1-54 Struktura bílé litiny (transformovaný ledeburit) [40]

Získání transformovaného ledeburitu není u velkých odlitků není tak jednoduchá záležitost a je třeba do taveniny přidávat karbidotvorné prvky.
Transformovaný ledeburit (cementit + perlit = cementit + perlitický cementit + ferit). Při temperování nastává rozpad cementitu: $Fe_3C \Rightarrow 3\ Fe + C_{(grafit)}$. V podstatě lze říci, že metastabilní (cementitickou) soustava temperováním přechází na soustavu stabilní (grafitickou). Temperování probíhá v pecích za různých podmínek ohřevu s použitím různých temperačních prostředí. Podle těchto podmínek bylo možno dříve získat:

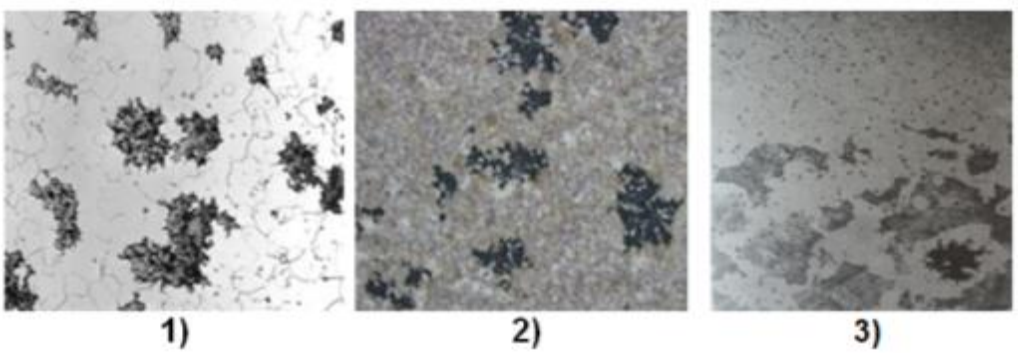
- *temperovanou litinu s bílým lomem (TLB);*
- *temperovanou litinu s černým lomem (TLČ);*
- *temperovanou litinu perlitickou (TLP).*

Bližší informace o výrobě temperované litiny jsou popsány v publikacích Nauky o kovech.

V současné době, se podle ČSN EN 1562, temperovaná litina označuje GJM (Grey Iron Malleable), rozlišujeme tři druhy litiny:

- EN GJMB (Grey Iron Malleable Black) – temperovaná litina s černým lomem
- EN GJMW (Grey Iron Malleable White) – temperovaná litina s bílým lomem
- EN GJM (Grey Iron Malleable pearlite) – temperovaná litina perlitická
-

Temperovaná litina byla velmi používanou litinou při výrobě součástí motorů v době (u nás 60. léta min. stol.), kdy nebyla ještě dobře technicky rozpracovaná výroba litiny s kuličkovým grafitem. Na obr. 1-55 jsou struktury temperované litiny. *S černým lomem* se vyrábí dynamicky namáhané odlitky, které nejsou namáhány na otěr. *S perlitickým lomem* jsou vyráběny středně dynamicky namáhané odlitky klikové hřídele, upínací spony, atd. *S bílým lomem,* v povrchové vrstvě je feritická oblast bez temperovaného grafitu, která přechází v perlitickou oblast s temperovaným grafitem. Povrchová vrstva bez grafitu umožňuje zinkování nebo cínování povrchů odlitku. Z temperované litiny s bílým lomem se vyrábí závitové spojky a fitinky, atd.



1) s černým lomem - EN GJMB, zvětšení 100x; 2) perlitická –EN GJM, zvětšení 100 x; 3) s bílým lomem - EN GJMW, zvětšení 100 x

Obr. 1-55 Struktury temperovaných litin



Obr. 1-56 Odlitky z temperované litiny [2]

1.4.2.2 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku nachází uplatnění v automobilovém a leteckém průmyslu, kde je využita především jejich nízká hustota ($\rho = 2500 kg \cdot m^{-3}$). Obvykle se slitiny hliníku dělí do dvou základních skupin: slitiny pro *odlévání* a slitiny pro *tváření*. Existuje velká rozmanitost druhů slitin hliníku podle chemického složení a možného způsobu tepelného zpracování. Slitiny pro odlévání mají větší obsah přísad; jsou heterogenní a v jejich struktuře je *eutektikum* (pro gravitační lití do pískových forem jsou vhodné slitiny eutektického složení nebo tomuto složení blízké). To proto, že tuhnou při jedné teplotě a tím je struktura odlitku homogenní. Slitiny pro tváření jsou za vyšších teplot tvořeny homogenním *tuhým roztokem* a vyznačují se malým obsahem přísad a tím i dobrou tvářitelností.

Dále lze slitiny hliníku rozdělit na *nevytvrditelné* a *vytvrditelné.* Některé přísadové prvky (např. Mg, Cu) vytváří slitiny hliníku se změnou rozpustnosti

mezikovové sloučeniny - tzv. intermetalické vytvrditelné fáze (např. MgSi, Al_2Cu), které umožňují tepelné zpracování odlitků - *vytvrzování*.

Slévárenské slitiny mají na rozdíl od čistého hliníku dobré slévárenské vlastnosti, odlévají se do syrových pískových forem, ale především do kovových forem pod tlakem. Umožňují výrobu tenkostěnných odlitků složitých tvarů.
Dnes se používají základní typy slévárenských slitin: Al-Si; Al-Mg; Al-Cu. Další vzájemnou kombinací přísad se vytváří řada slitin: Al-Si-Mg; Al-Si-Cu; Al-Cu-Si; Al-Mg-Si.

Mezi *nevytvrditelné slitiny* se řadí: Al-Si; Al-Mg; Al-Mg-Mn; Al-Mn.
Vytvrditelné slitiny jsou: Al-Si-Cu; Al-Cu-Mg; Al-Zn-Mg; Al-Mg-Si.

Slévárenské slitiny se vyznačují některými příznivými vlastnostmi:
a) nízkou teplotou tavení a lití (680 až 780°C);
b) jejich povrch je vždy chráněn slabou vrstvou oxidů (Al_2O_3);
c) mají malou náchylnost ke vzniku trhlin vlivem napětí.

Při lití do pískových forem, vlivem poměrně pomalého ochlazování, mají tyto slitiny sklon k hrubnutí zrna. Tomu lze předejít vhodnou modifikací a očkováním taveniny před odléváním.

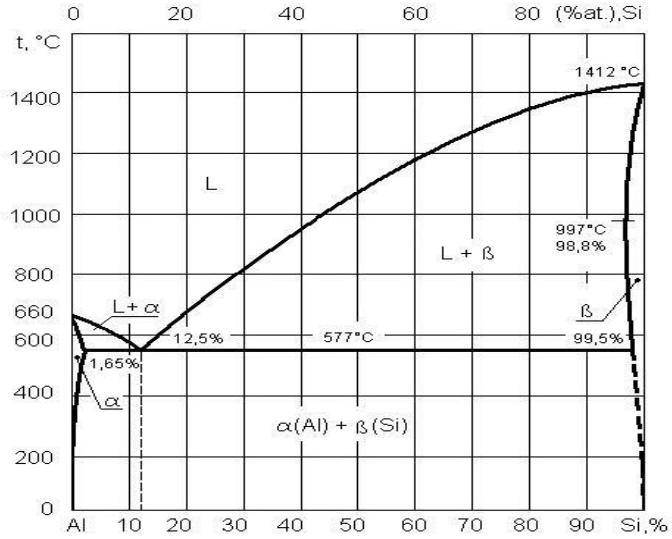
Slévárenské slitiny typu Al-Si (siluminy) mají vynikající slévárenské vlastnosti při vyhovujících mechanických hodnotách, proto patří k nejpoužívanějším slévárenským slitinám.

Siluminy jsou slitiny s různým obsahem křemíku podle něhož se dělí na:
a) *podeutektické* (4,5 až 10% Si);
b) *eutektické* (10 až 13% Si);
c) *nadeutektické* (nad 13% Si). Siluminy nadeutektického složení mají malou roztažnost, což je výhodné pro odlitky pracující za vyšších teplot, používají se na výrobu pístů spalovacích motorů.

Siluminy eutektického složení mají tyto slévárenské vlastnosti:
a) dobře vyplňují formu;
b) málo se smršťují;
c) mají velmi dobrou zabíhavost;
d) malou náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.

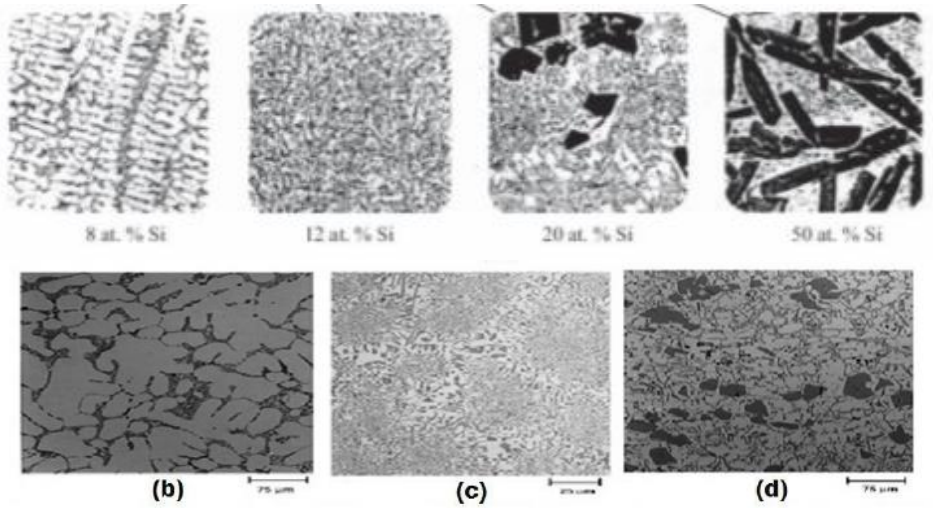
Na obr. 1-56 je uveden rovnovážný diagram Al-Si, který je základem pro předurčení vhodnosti určité slitiny siluminu pro výrobu odlitků.

Pro gravitační lití siluminů do kovových, popř. pískových forem je výhodná slitina Al-Si, která svým složením odpovídá eutektickému bodu (eutektický = dobře tavitelný). Taková to slitina je AlSi12 (12%Si), tuhne při jedné teplotě, tj. 577 °C. Např. slitina AlSi2 vykazuje velký rozdíl teplot mezi T_L a T_S, což také není vhodné pro její využití při gravitačním lití.
Na obr. 1-58 a jsou uvedeny struktury siluminů, které odpovídají určitému množství (atomárních %) křemíku.



tavenina (L); α,β - tuhé roztoky
teploty tání: čistý hliník 660°C; čistý křemík 1412°C

Obr. 1-57 Rovnovážný diagram Al-Si (nemodifikovaná tavenina)



b) *AlSi5 (5 hm. % Si);* ***c)*** *AlSi12 (12 hm. % Si);* ***d)*** *AlSi18 (18 hm. % Si)*

Obr. 1-58 Mikrostruktury siluminů [43], [44]

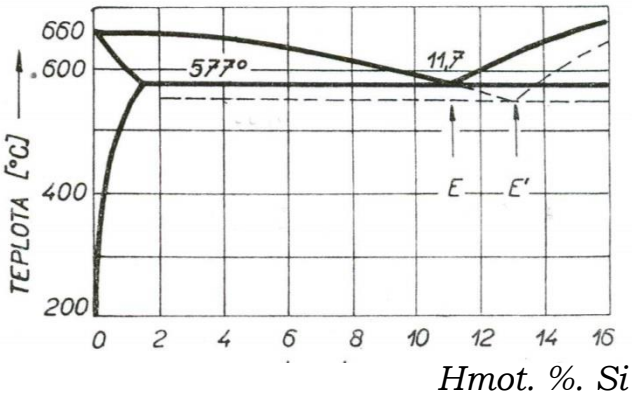
Z obr. 1-58 je patrné, že slévárensky doporučovaná slitina AlSi12 vykazuje také velmi jemnou strukturu a nechá se předpokládat, že bude vykazovat i velmi dobré mechanické vlastnosti.
Pro výrobu odlitků vysokotlakým litím u siluminů nebo dalších slitin hliníku i slitin jiných kovů, velký rozdíl teplot mezi T_L a T_S tolik nevadí, protože vysoké tlaky působící při krystalizaci tavenin kovů ji příznivě ovlivňují. Pro vysokotlaké lití odlitků se používá např. slitina AlSi9Cu3, která je vytvrditelná a zvyšuje mechanické vlastnosti odlitků využívaných především v automobilovém průmyslu.

Modifikace a očkování siluminů

Modifikace a očkování je metalurgické ošetření taveniny siluminu před odléváním do slévárenské formy. Především se uplatňuje při metodách gravitačního a nízkotlakého lití odlitků.

Očkování – jeho účelem je zjemnění primárně vyloučených fází z taveniny - tj. krystalů tuhého roztoku α a tuhého roztoku β, viz obr. 1-57. Tuhým roztokem α je v podstatě hliník ve kterém je nepatrné množství rozpuštěného křemíku. Tuhým roztokem β je křemík ve kterém je rozpuštěno nepatrné množství hliníku. Čili *očkováním* se zmenšuje makrozrno odlitku. Pro zjemnění fáze α (zjednodušeně *hliníku*), pro podeutektické složení siluminů, se do taveniny před odléváním přidává ***0,2 hmot. % titanu nebo 0,05 hmot. % bóru.***
Pro zjemnění fáze β (zjednodušeně křemíku), pro nadeutektické složení, se do taveniny před odléváním přidává ***0,1 až 0,3% pentachlorid fosforu - PCl_5*** při teplotě 780 až 830°C.

Modifikace - účelem modifikace je zmírnění krystalizační schopnosti křemíku, který se vylučuje při eutektické přeměně. Za normálních okolností má křemík větší krystalizační schopnost než hliník a vylučuje se v hrubých jehlicích.
Modifikace je vnášení modifikačních přípravků do taveniny siluminu, čímž se dosahuje toho, že hliník váže při eutektické krystalizaci větší množství křemíku než odpovídá rovnovážnému stavu. Slitina, která byla eutektická tuhne jako podeutektická a tím se snižuje krystalizační schopnost křemíku, který již se nevylučuje ve velkých jehlicích. Eutektický bod se vlivem modifikace posouvá směrem doprava (z 11,7 na 13% Si) a eutektická teplota z hodnoty 577 na 560°C, viz obr. 1-59. Při modifikaci a očkování se nemění chemické složení siluminu.
V počátcích se pro modifikace siluminů používal ***sodík*.** Ve formě soli na bázi halových prvků (NaCl+ KCl + NaF). Tato sůl se přidávala do taveniny o teplotě 750°C. Tato sůl byla současně také jako rafinační, pro odstranění kyslíkových sloučenin z taveniny. Po stažení strusky se za 10 minut po modifikaci odlévalo. Ukázalo se, že sodík způsobuje naplyňování taveniny a zvyšuje objemové stahování tuhnoucího odlitku.



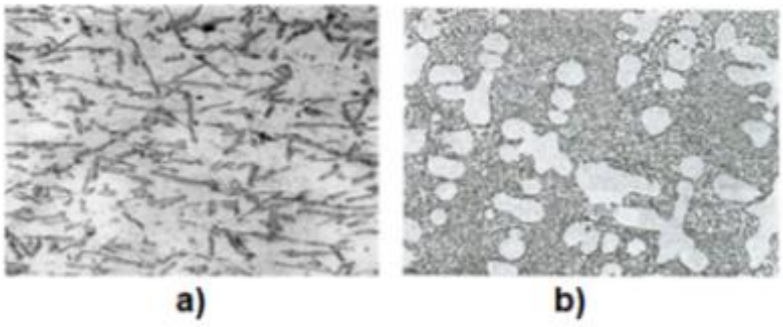
E – eutektický bod; E´- eutektický bod posunutý vlivem modifikace taveniny

Obr. 1-59 Vliv modifikace na diagram Al-Si

Dnes používaným prvkem je ***stroncium***, jehož modifikační účinek je až 2 hodiny. ***Stroncium*** s přísadou ***berilia*** (0,05 hm. % až 0,2 hm. %), tyto dva prvky se používají ve formě předslitin (např. AlSi13Sr10).

Pro modifikace nadeutektických siluminů se používá ***fosfor***. Lze použít i ***vápník***, avšak v množství 0,001 hm. %.

Na obr. 1-60 a) je struktura nemodifikovaného siluminu; na obr. 1-60 b) je struktura modifikovaného siluminu podeutektického složení (tuhý roztok α a eutektikum (α+Si)). Fáze α je v podstatě Al, fáze β je Si. Světlá struktura je tuhý roztok α, tmavá struktura je tuhý roztok β, resp. vyloučenina eutektického křemíku. Ten je v případě nemodifikované taveniny ve tvaru jehlic. Modifikací taveniny se dosáhne zjemnění vyloučenin eutektického křemíku.



a) nemodifikovaná tavenina
b) modifikovaná tavenina (směs NaCl +KCl+NaF)

Obr. 1-60 Struktura nemodifikovaného a modifikovaného siluminu, (leptáno HF, 200 x)

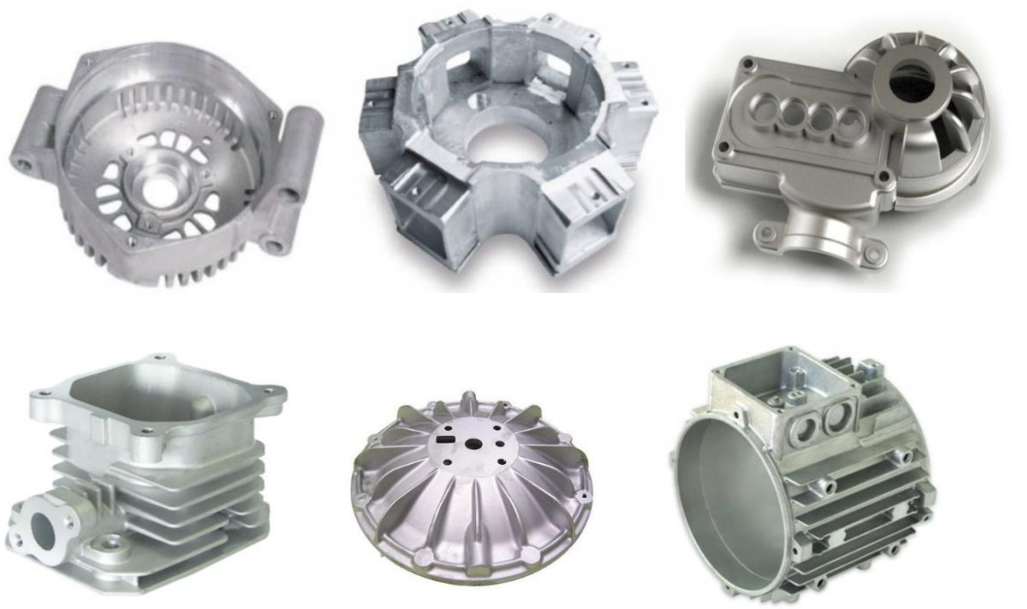
Podeutektické slitiny hliníku jsou odlévány do kovových forem gravitačně, nízkotlakým nebo vysokotlakým způsobem. Při odlévání vysokotlakým způsobem se tavenina před odléváním obvykle neočkuje ani nemodifikuje. To z důvodu, že ochlazovací schopnost kovových forem je velká a způsobuje značné přechlazení vylučované fáze α (podeutektických slitin) i přechlazení fází tvořících eutektikum. Krystalizace fází tvořících eutektikum probíhá téměř současně se vznikem většího množství krystalizačních zárodků. Tím vzniká jemné eutektikum. Podobného výsledku lze dosáhnout větším přehřátím taveniny před litím (krystalizace probíhá za většího přechlazení), avšak to vede k rozpustnosti většího množství plynů, které je v tavenině nepřípustné.

Vedle binárních slitin Al-Si (někdy označovaných siluminů α) se používají slitiny Al-Si-Mg (0,2 až 0,4% Mg), které se někdy označují siluminy β, jsou vytvrditelné a po vytvrzení se označují jako siluminy γ. Tuto slitinu udává ČSN 42 4331 (EN AC-43100).

Dále se používají slitiny Al-Si-Cu (s obsahem 1 až 4% Cu - např. AlSi8Cu4), kterou udává ČSN 42 4338 a je určena pro tlakové lití. V současné době se v automobilovém průmyslu začíná používat slitina AlSi9Cu3 (EN AC-46500). Pro práci za vyšších teplot se používá slitina Al-Si-Cu-Mg (AlSi12NiCuMgMn) a je uváděna ČSN 42 4336, lze z ní vyrábět i písty spalovacích motorů.

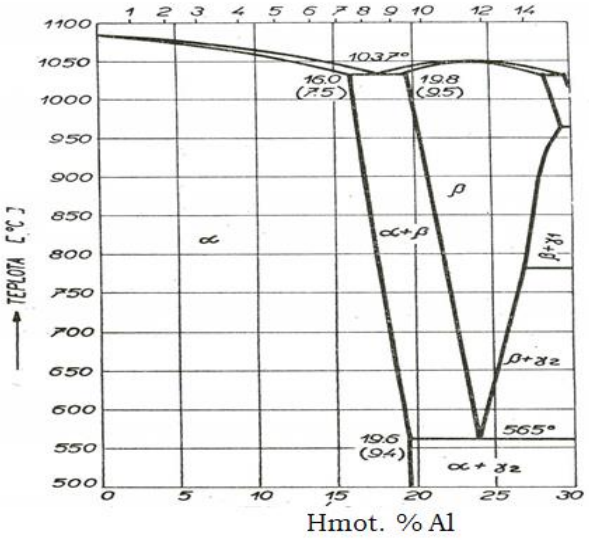
Nadeutektické siluminy (obsahují více než 14% Si) vykazují se zvyšováním obsahu křemíku snížení součinitele teplotní roztažnosti a tím mají zvýšenou stabilitu při dlouhodobém zatížení o teplotách 230°C a také výhodnou odolnost proti otěru. Proto mají označení jako *slitiny pístové* (obsah je nad 20% Si; 2% Cu; 0,5% Cr; 1% Co; 1% Ni). Tvorba jemného a stejnoměrného rozdělení primárních krystalů křemíku (fáze β) se dociluje očkováním.

Na obr. 1-61 jsou odlitky ze slitin hliníku. Využívá se jejich malá hustota, vysoká tepelná vodivost a také slušné slévárenské vlastnosti (víka, tělesa, chladící bloky zařízení).



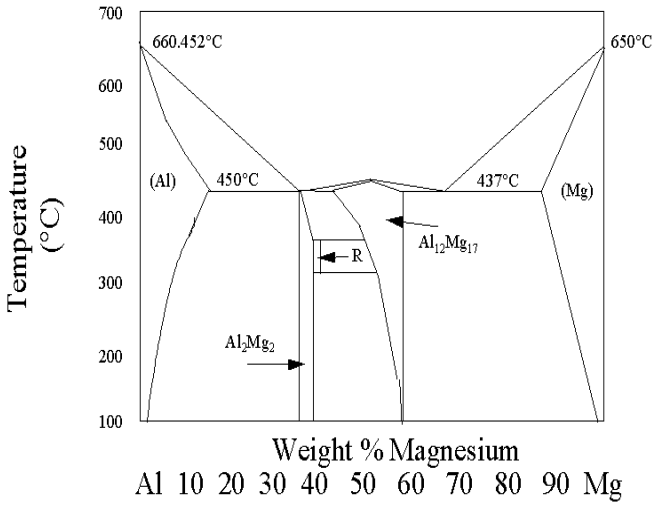
Obr. 1-61 Odlitky ze slitin hliníku

Slévárenské slitiny typu Al-Cu se řídí podle binárního diagramu, který je do 60 hmot. % Cu uveden na obr. 1-62 (max. rozpustnost Cu v Al, tj. fáze α je do 5,6% Cu při eutektické teplotě 548°C s eutektikem tvořené fázemi $\alpha + Al_2Cu$ při obsahu 32% Cu). Jak je z obr. 1-62 patrné, rovnovážné diagramy neželezných kovů jsou dosti složité. Pro slévárenství je vždy na rovnovážném diagramu důležitý *eutektický bod* (lehce tavitelný). Slitiny typu Al-Cu se používají ještě díky kombinaci s dalšími přísadovými prvky Si (až 3%), Mg (až 1,5%) i Ni (až 2%). Všechny slitiny typu Al-Cu jsou běžně vytvrditelné a jsou vhodné pro lití do kokil i pod tlakem. Tyto slitiny se vyznačují poměrně vysokou pevností. AlCu4 s přísadou titanu (až 0,3%) vykazuje R_m = 450 MPa, tažnost (A_5) až 12%. Další zvýšení pevnosti slitin typu Al-Cu-Ti se dociluje přidáním Mg nebo Zn, odlitky se vytvrzují.



Obr. 1-62 Část rovnovážného diagramu Cu-Al

Slévárenské slitiny typu Al-Mg (hydronália), viz obr. 1-63, jsou rozšířenými slitinami a vyrábí se s přísadou 1% Si a 0,5% Mn. Používají se pro lití do písku i pro tlakové lití. Vykazují dobré mechanické vlastnosti (pevnost R_m = 190 MPa při lití do písku; R_m = 260 MPa při tlakovém lití; tažnost 5 až 8%; tvrdost 60 až 80 HB) a mají vynikající odolnost proti vlivům atmosféry a mořské vody. Dají se dobře leštit.
Jejich odlévání je náročné, neboť jsou náchylné k naplyňování a oxidaci (proto přehříváme max. na teplotu 760°C). Jejich slévatelnost je horší než u siluminů. Jako metalurgicky vhodná přísada pro odlévání hydronália (nad 5% Mg) je 0,005% berylia. To snižuje propal hořčíku a zlepšuje zabíhavost.



teplota (temperature); hmot. % Mg (weight % Mg)

Obr. 1-63 Rovnovážný diagram Al – Mg

1.4.2.3 Slitiny mědi

Pro slévárenství se používají jen slitiny mědi (čistá měď má vynikající tepelnou vodivost, ale velmi obtížnou slévatelnost). Slévárenské slitiny mědi se dělí v podstatě do dvou skupin:

a) mosazi - Ms (slitiny mědi a zinku);
b) bronzy - Br (slitiny mědi s cínem, olovem, hliníkem, antimonem, beryliem, atd.).

Oba typy rovnovážných diagramů (Al-Zn a Al–Sn) jsou velmi složité.

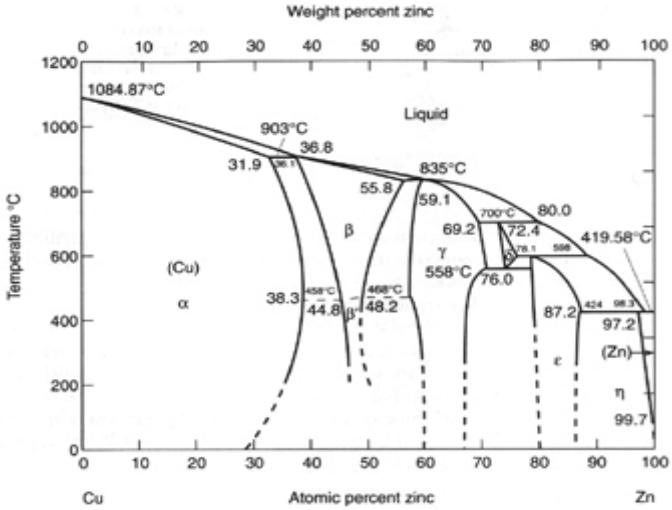
<u>Poznámka:</u> Slitiny mědi se označují tradičně symboly, bronzy: Br + značka hlavního legujícího prvku se středním obsahem (BrSn10), u červeného bronzu Bč + číslo udávající střední obsah cínu (Bč5); mosazi: Ms + číslo udávající obsah mědi v % (Ms60).

A) Mosazi

Mosazi jsou slitiny mědi se zinkem. Zinek tvoří s mědí substituční tuhý roztok α(Cu), s maximální rozpustností 38,3 hm. % při teplotě 458 °C. Na obr. 1-64 je rovnovážný diagram Al-Zn, který je velmi složitý.

Dalšími kovy v mosazi může být olovo, hliník, železo, mangan, nikl. Tyto kovy zlepšují pevnost, pak mluvíme o *speciálních mosazích*.

Na výrobu odlitků se používají *mosazi s obsahem 30 až 40% zinku.* Zinek zvyšuje též pevnost a tvrdost (asi do 45% Zn), tažnost stoupá (jen do 30% zinku), pak hodnoty klesají.



teplota (temperature), tavenina (liquid)
atomová procenta zinku (atomic percent Zn)
hmotnostní procenta zinku (weight percent Zn)

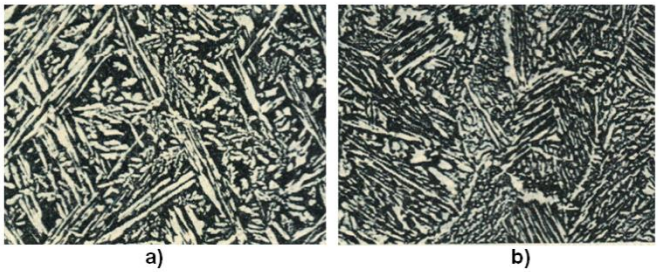
Obr. 1-64 Rovnovážný diagram Cu-Zn [42]

Struktura odlitků s obsahem zinku do 38,3 hmot.%, viz obr. 1-64, je tvořena homogenním tuhým roztokem α(Cu), tj. tzv. mosazi α. Při vyšším obsahu zinku se vyskytuje ve struktuře odlitků již křehká fáze Cu_5Zn_8 (tzv. fáze β'). Binární mosazi Ms60, Ms63 obsahují přísadu 2% olova, které zlepšuje opracovatelnost, ale snižuje houževnatost. Nejškodlivější nečistoty v mosazích jsou především vizmut (max. 0,003%), který snižuje tažnost, antimon (nad 0,4%) vyvolává křehkost, dále fosfor, křemík, arsen a hořčík.

Tyto mosazi se odlévají do pískových forem syrových i vysušených. Pevnostní hodnoty těchto mosazí jsou R_m = 150 až 250 MPa, A_5 = 10 až 15%, HB je 45 až 70 a poměrně dobrá odolnost proti korozi.

Technologie slévání těchto mosazí je středně náročná, licí teplota je 950 až 1100°C. Úzký interval tuhnutí (T_L-T_S) dává binárním mosazím slévárenské přednosti oproti bronzům. Mají větší slévatelnost, větší tekutost, menší sklon k

odměšování, menší objemové smrštění a malou náchylnost na vznik mikrostaženin. Sklon k soustředěným staženinám předurčuje větší nálitky. Na obr. 1-65 je jehlicovitá struktura odlévané mosazi.



a)+b) jehlicovitá struktura odlévané mosazi

Obr. 1-65 Mikrostruktura odlévané mosazi s 40 % zinku, je tvořena směsí zrn α + β (α - světlá zrna, β - tmavá zrna), zvětšeno 100x, leptáno $FeCl_3$ + HCl, [42]

Speciální mosazi jsou slitiny mědi a zinku, které dále mohou obsahovat prvky, které zvyšují pevnost a tvrdost: hliník (až 6%); nikl (6 až 14%); mangan (až 2%); křemík (až 3%); olovo (až 4%), čímž vytváří vícesložkové mosazi.

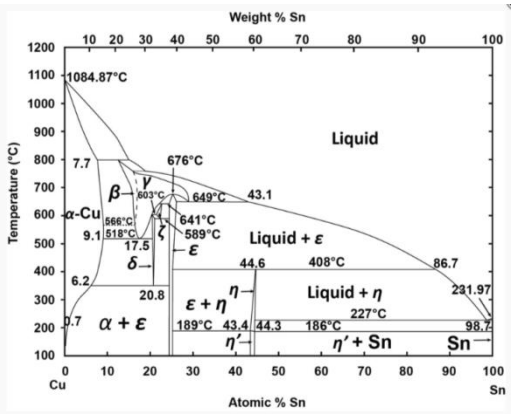
Odlévají se do pískových forem, kokil i odstředivým způsobem (např. Ms66-Al5Fe2Mn2; ČSN 42 3311) a pod tlakem (např. Ms60-Al0,2; ČSN 42 3321). Podle druhu a způsobu odlévání tyto mosazi překračují pevnost R_m = 400 MPa. Tvrdost bývá 90 až 150 HB a tažnost 7 až 20%.

Slévárenské technologie jsou pro odlévání speciálních mosazí náročná, při tuhnutí velmi stahují, při chladnutí značně smršťují a kolem 1,8% Al vytváří pěnu a oxidické blanky. Nálitky jsou u speciálních mosazí dvakrát větší než u mosazí binárních.

B) Bronzy

Bronzy jsou slitiny mědi s ostatními kovy mimo zinku. Nejčastěji však měď je s cínem, olovem, hliníkem, antimonem, beryliem, atd. Tyto slitiny se pak nazývají cínové, olověné, hliníkové, antimonové, beriliové bronzy.

Cínové bronzy - jsou nejstarší a nejvíce používané slitiny mědi. Jsou to slitiny, které byly jako první označeny bronzy. Nedostatek bronzu a tím i jeho vysoká cena vedly k jeho náhradě za jiné, výše uvedené kovy. Cín v cínových bronzích zvyšuje pevnost v tahu a tvrdost, snižuje tažnost a tvářitelnost za tepla i za studena. Na obr. 1-66 je uveden rovnovážný diagram Cu-Sn., na první pohled je velmi složitý a z toho lze usuzovat, že použití slitin typu Cu-Sn pro výrobu odlitků je omezené. Část rovnovážného diagramu Cu-Sn pro výrobu odlitků obvyklých slévárenských jakostí zahrnují slitiny s obsahem cínu 0,5 až 13%. Nejběžněji se používá *9 až 13 hmot. % cínu*



Temperature = teplota, weight % = hmot. % (jsou na stupnici nahoře)

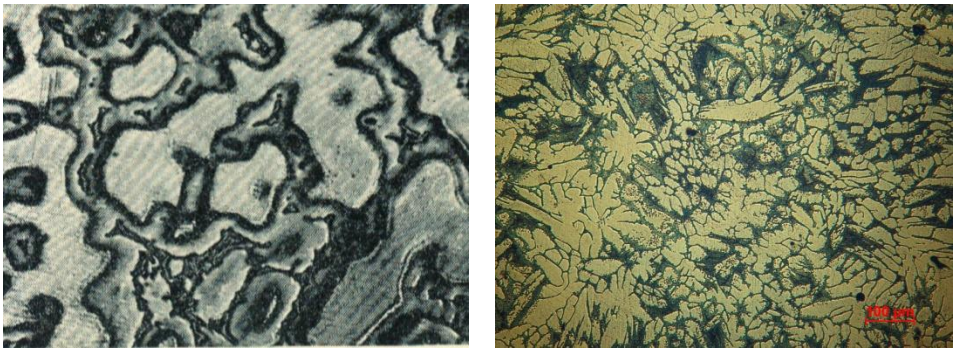
Obr. 1 – 66 Rovnovážný diagram Cu-Sn

Struktura je tvořena substitučním tuhým roztokem α(Cu), je tuhý roztok cínu v mědi. Levá (slévárenská) část diagramu, se vyznačuje se širokým intervalem tuhnutí (při obsahu 5 až 12% cínu je rozmezí teplot 110 až 160°C). Značný rozdíl teplot je nepříznivý, snižuje zabíhavost a náchylnost těchto slitin k mikrostaženinám. Cínové bronzy mají velkou náchylnost k odměšování uvnitř krystalů, v tomto případě tzv. *obrácené odměšování* (obrácená segregace) - kostra rozvětvených krystalů (dendritů) má nízký obsah cínu a naopak ty části dendritů, které vznikají ze zbytku taveniny, mají vysoký obsah cínu.

Licí teplota bronzů je 1050 až 1150°C. Prospěšné přísady: zinek (max. 0,5%); olovo (max. 0,5%); nikl (max. 1,5%) zlepšují slévatelnost a mechanické vlastnosti. Škodlivé přísady: hliník (max. 0,01%); vizmut (max. 0,02%); železo (max. 0,2%) zhoršují čistotu (šum), způsobují křehkost a korozi.

Při lití do pískových forem získáváme R_m = 150 až 240 MPa; A_5 je 8 až 20%; HB je 35 až 80. Při lití do kokil se hodnoty zvyšují.

Na obr. 1-67 je mikrostruktura bronzů.



a) **b)**

a) cínový bronz - 10 % cínu, tmavé oblasti jsou eutektikum (α + δ), je vyloučeno mezi zrny tuhého roztoku α (světlá zrna),
b) hliníkový bronz – slitina CuAl10Fe5Ni5, tmavé oblasti jsou eutektikum, okrové oblasti jsou zrna tuhého roztoku α.

Obr. 1-67 Dendritická struktura odlito do pískové formy, zvětšení 100 x, leptáno $NH_4OH + H_2O$

Odlitky z bronzu se používají při výrobě strojních součástí, které jsou namáhané dynamicky, třením při vysokých teplotách a jsou částečně i odolné proti korozi. Nejčastěji se uplatňují jako věnce ozubených kol, ložisková pouzdra s přírubami, tělesa čerpadel, armatury i umělecké předměty. Na obr. 1-68 jsou uvedeny odlitky z cínového bronzu.



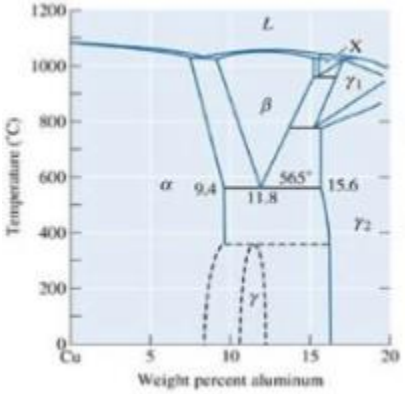
Obr. 1-68 Odlitky z cínového bronzu (CuSn 12), odléváno do písku

Olověné bronzy se dělí do dvou skupin (na odlitky a ložiskové výstelky)

a) na odlitky - jsou *cínoolověné bronzy* (10% Sn; 1% Ni; 5 až 10% Pb a zbytek je měď);
b) na ložiskové výstelky – jsou *olověné bronzy* (20 až 27% Pb; 1% Fe, zbytek měď).

Olovo se s mědí mísí v tekutém stavu jen částečně, ve stavu tekutém je v mědi nerozpustné, to se také projevuje u první skupiny, tzv. *cínoolověných bronzů,* kde je základem tuhý roztok α (Cu-Sn), se olovo vylučuje jako samostatná fáze olověných zrnek. Proto se cínoolovněné bronzy hodí na výrobu výstelek ložisek. Odlévají se do pískových forem, licí teplota je 1100°C. R_m = 180 až 200 MPa, A_5 je 8 až 12%, HB je 65, vykazují velmi dobrou tepelnou vodivost.
Druhá skupina, tzv. *olověné bronzy* se také vyznačují výbornými kluznými vlastnostmi. Uplatňují se jako ložiskové výstelky (o tloušťce asi 1,5 mm) odlévané gravitačně nebo odstředivě do ocelových pouzder (sdružené lití) s přísadou slitiny niklu (CuNi25), který brání odměšování cínu.

Hliníkové bronzy - hlavní přísadou je hliník (8 až 11%), který zvyšuje pevnost v tahu a tvrdost. Obsah deficitního cínu (0,2%), obsah niklu (1,0 až 5,5%), obsah železa (2,0 až 5,5%), manganu (0,5 až 2,5%), zbytek je měď. Na obr. 1-69 je uveden diagram Al-Cu.



Obr. 1-69 Rovnovážný diagram Cu – Al, struktura hliníkového bronze

Hliníkové bronzy jsou často používané materiály, které mají výborné mechanické a třecí vlastnosti, jsou antikorozní. Slévárenská (levá) část

rovnovážného diagramu ukazuje, že rozpustnost hliníku v mědi při eutektické teplotě 1035°C je 7,5% Al a při eutektoidní teplotě 565°C je 9,4% Al a tato rozpustnost je až do normální teploty. Konečná struktura odlitků je tvořena tuhým roztokem α a eutektoidem ($\alpha + \gamma$). Teplota likvidu je od 1083 do 1035°C. Jen o něco nižší je teplota solidu a proto je nízký interval teplot při tuhnutí (10 až 35°C). Tyto slitiny mají velmi dobrou zabíhavost a malý sklon k tvorbě mikrostaženin (mikroporozity). Objemové smrštění v tekutém stavu (stahování) je velmi velké asi 4%, proto je nutné hliníkové bronzy nálitkovat neobyčejně velkými nálitky. Velkým problémem je hliník v bronzu, který velmi lehce oxiduje a vzniká chemická sloučenina - oxid hlinitý (Al_2O_3), který má velmi vysokou teplotu tání (2000°C), je velmi houževnatý a ve slitině nerozpustný.
Výroba odlitků se provádí odléváním do pískových a kovových forem, i odstředivým způsobem. Je nutná speciální vtoková soustava forem. Licí teplota se volí co nejnižší (1050 až 1300°C), jinak vzniká příliš hrubozrnná struktura, materiál je naplyněný a zoxidovaný.
Hliníkové bronzy dosahují R_m (450 až 550 MPa); A_5 (10 až 20%); HB (80 až 150). Na obr. 1-70 jsou odlitky z hliníkového bronzu.



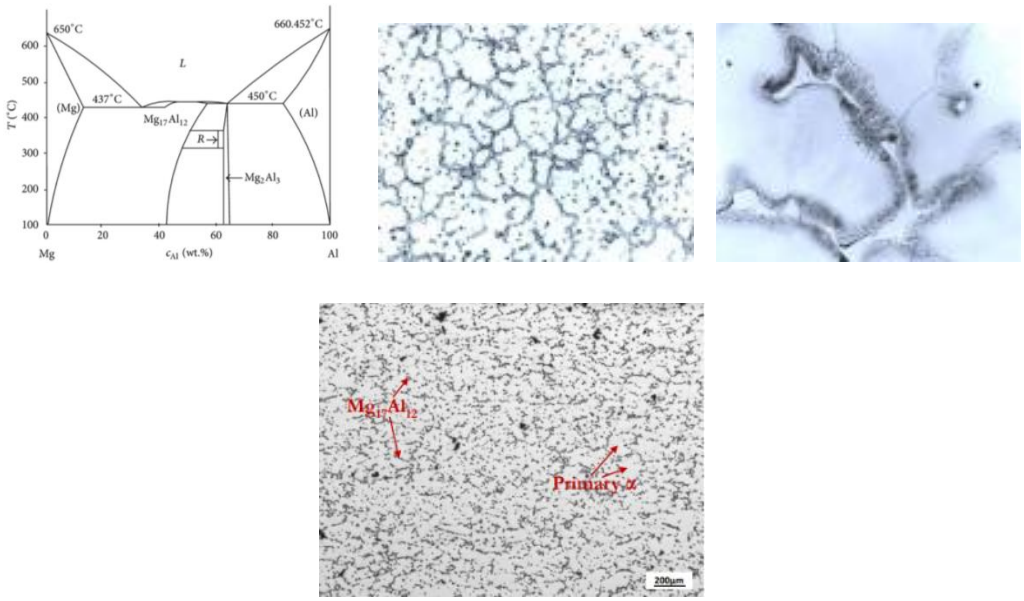
Obr. 1-70 Odlitky z hliníkového bronzu

Červené bronzy - jsou slitiny mědi a cínu (5 až 10%); zinku (2 až 6%); olova (0 až 5%). Poměrně vysoký obsah Cu způsobuje červenou barvu těchto slitin. Jsou to tzv. *úsporné slitiny*, běžně se vyrábí z vratného materiálu. Je to nejpoužívanější slitina mědi. Obsah zinku zužuje šíři intervalu tuhnutí taveniny, olovo snižuje rozpustnost vodíku, zlepšuje slévatelnost, kluzné vlastnosti, hustotu a obrobitelnost těchto bronzů.

1.4.2.4 Slitiny hořčíku

Hořčíkové slitiny jsou perspektivními slitinami zejména díky své nízké hustotě (1760 až 1900 $kg \cdot m^{-3}$) a poměrně vysoké měrné pevnosti v porovnání s podobnými charakteristikami slitin hliníku či oceli.

V současné době se začínají uplatňovat v automobilovém průmyslu slitiny hořčíku. Jsou to slitiny typu: Mg-Si; Mg-Mn; Mg-Al-Zn; Mg-Al-Zn-Ca. Výhodou hořčíku, a tím i slévárenských slitin, je poměrně nízká hustota (1800 $kg.m^3$). Slitiny jsou známé pod obchodním názvem *elektron*. Nejpoužívanější slévárenskou slitinou je slitina typu Mg-Al, viz rovnovážný diagram obr. 1 -71, resp. její druh Mg-Al8-Zn-Mn. Z této slitiny se v jediné české slévárně (v Hradci Králové) vyrábí odlitky hořčíkových slitin do pískových forem. Slitiny se používají i pro lití pod tlakem.



Obr. 1-71 Rovnovážný diagram Mg-Al a struktura slitiny AZ 91, zvětšeno 70 x a 500 x a popis mikrostruktury slitiny AZ 91 (primární krystaly α a vyloučeniny intermediální fáze $Mg_{17}Al_{12}$)

Základem slévárenských Mg slitin jsou binární slitiny rozšířené o další legury za účelem zlepšení technologických vlastností, mechanických vlastností nebo zvýšení odolnosti proti korozi. Takovými základními systémy jsou Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Mn, popř. Mg-Li. Komerčně nejrozšířenějšími hořčíkovými slitinami pro slévárenské účely jsou slitiny typu Mg-Al, kde nejpoužívanější slitina je ***AZ91,*** obsahuje cca 9 hm. % hliníku. Tyto slitiny mají dobrou odolnost proti korozi a je možné je použít pro odlití tenkostěnných, tvarově velmi komplikovaných odlitků. Přísady zirkonia či kovů vzácných zemin v základní slitině Mg-Zn ovlivňují mechanické vlastnosti a zvětšují oblast použití těchto slitin za vyšších teplot (min. do teplot 300 °C). Slitiny s manganem jsou lépe svařitelné a mají vyšší odolnost proti korozi, ale na úkor zhoršení slévárenských vlastností (nižší zabíhavost, vyšší smrštivost). Nejlehčí hořčíkové slitiny jsou v kombinaci s lithiem (hustota je1330 až 1350 $kg.m^{-3}$), ale tyto slitiny nejsou zatím příliš komerčně využívány díky vysoké ceně a technologické náročnosti výroby.

Mají dobrou schopnost tlumit vibrace a pohlcovat nárazy, vysokou tepelnou vodivost a jsou snadno recyklovatelné. Jsou dobře slévatelné a obrobitelné. Díky těmto vlastnostem je možné je využít v mnoha různých aplikacích, např. v automobilovém a leteckém průmyslu, mobilních telefonech, na sportovních potřebách, atd.

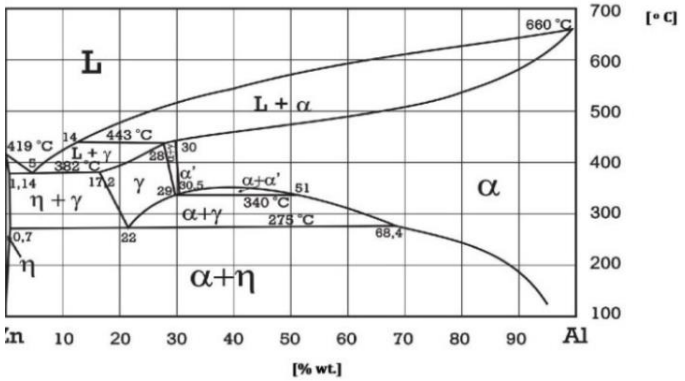
Hlavními nedostatky těchto slitin je jejich sklon k intenzivní *elektrokorozi* při kontaktu s většinou kovů a slitin, nízká pevnost za zvýšených teplot a špatná odolnost proti opotřebení. Těmto záporným vlastnostem však lze předejít vhodně zvolenou slitinou či povrchovou úpravou.



Obr. 1-72 Odlitky ze slitin hořčíku (rámy automobilových sedáků, rámy volantů, víka)

1.4.2.5 Slitiny zinku, titanu a niklu

Slitiny zinku se používají pro odlitky lité vysokotlakým způsobem. Nejpoužívanější slitiny zinku pro slévárenské učely jsou typu Zn–Al a Zn–Al-Cu, obsahují 4 hm. % hliníku a nepatrné množství hořčíku (0,01 hmot. %). Ternární slitina obsahuje 1 až 3 hm. % mědi. Slévárenské slitiny zinku mají označení ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3. s Teplota tavení zinku je 420 °C, (419 °C), teplota tavení hliníku je 660 °C. Na obr. 1-73 je rovnovážný diagram Zn-Al. Pro slévárenské účely má význam levá část diagramu, kde se nachází pro slévárenství důležitý eutektický bod.



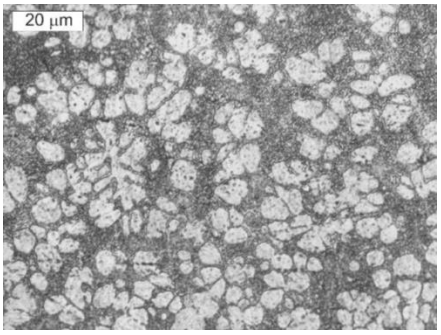
L (liquidus) – tavenina, α - tuhý roztok zinku v hliníku, η - tuký roztok hliníku v zinku

Obr. 1-73 Rovnovážný diagram Zn-Al

Z diagramu je patrná eutektická teplota 382 °C, při obsahu 5 hm. % hliníku. Je nepatrná rozpustnost hliníku v zinku (0,7 hm % Al) při teplotě 275 °C a při teplotě 383 °C tato rozpustnost činí 1,14 hm % Al, tato oblast je označovaná jako tuhý roztok η. Nad křivkou likvidu se nachází tavenina (L – liquid). V levé oblasti diagramu mezi křivkou likvidu a solidu, což v diagramu není označeno, se nachází η + tavenina. V přilehlé části k eutektickému bodu zprava se mezi křivkou likvidu a solidu nachází tavenina + γ. V levé části diagramu se mezi teplotou 382°C a 275 °C nachází směs tuhých roztoků: η + γ. Pod teplotou 275 °C se v levé části diagramu nachází směs tuhých roztoků: η + α.

Teplota tání slitin zinku je dle diagramu 383°C. Teplota lití těchto slitin je cca 500°C. Z těchto slitin se vyrábí drobné odlitky pro elektrotechnický,

automobilový a spotřební průmysl (závaží kol automobilů, drobné odlitky pro automobilový průmysl, drobné zarážky, držáčky, odlitky jezdců drhovadel, atd.). Na obr. 1-74 je mikrostruktura slitiny zinku ZnAl4Cu1.



Obr. 1-74 Mikro struktura slitiny zinku ZnAl4Cu1



Obr. 1-75 Odlitky odlévané ze slitin zinku [56]

Slitiny titanu - titan má velkou slučivost s kyslíkem a proto jeho výroba je obtížná, získává se titanová houba. Z té se lisováním připravují elektrody s přidáním legujícího prvku. Přetavováním elektrod v elektrické obloukové peci ve vakuu nebo v argonu se získávají ingoty, které se dále tváří (kovají, válcují nebo lisují).

K výrobě odlitků se používá např. slitina TiAl6V4. Tavení se provádí ve vakuu nebo ochranné atmosféře argonu. Taveniny titanových slitin reagují velmi rychle nejen s plyny, ale také s materiály kelímků a forem. Kelímky jsou grafitové nebo měděné, vodou chlazené. Formy jsou ze speciální směsi grafitu a organického pojiva. Titanové slitiny vykazují dobré mechanické vlastnosti R_m je 500 až 1800 MPa; A_5 je 8 až 20%, některé slitiny titanu lze i vytvrzovat.

1.5 Tuhnutí a chladnutí, nálitkování a lineární smrštění odlitků

1.5.1 Tuhnutí odlitků

Tavenina nalitá do dutiny slévárenské formy má vyšší teplotu než slévárenská forma. Tím se vytváří teplotní rozdíl mezi teplotou taveniny a teplotou formy. V důsledku toho dochází k přenosu tepla z taveniny do slévárenské formy. Tím taveniny ztrácí teplotu a postupně *probíhá její tuhnutí*

ve slévárenské formě. Dutiny ve slévárenské formě jsou členité a účelově tvarované. Postupně natuhávají vrstvy odlitku, které jsou čím dál více vzdáleny od líce slévárenské formy.

Je nutno si uvědomit, že tuhnutí odlitku ovlivňují tyto faktory:

- tvar a velikost odlitku,
- odlévaný materiál;
- charakter slévárenské formy a jádra.

Tavenina se do formy odlévá o teplotě vyšší než je teplota tuhnutí, tj. s teplotou přehřátí. Proto také tavenina nezačíná tuhnout ihned po nalití, ale v okamžiku s jakou intenzitou forma odvádí teplo. Kovová forma odvádí teplo rychleji, písková pomaleji. Tavenina tuhne nejdříve v místě styku s formou (tj. na líci formy). Postupem času vzniká při tuhnutí od líce formy směrem do středu odlitku pásmo krystalů, které postupně prostoupí celou dutinu formy. Tuhnutí končí v tzv. *tepelné ose odlitku*. V tomto případě geometrická osa odlitku je totožná s tepelnou osou odlitku. V tomto místě se shromažďují nečistoty, které se z taveniny vylučují během tuhnutí. Podle okolností se rozlišuje tuhnutí:

- jednofázové,
- dvoufázové,
- objemové.

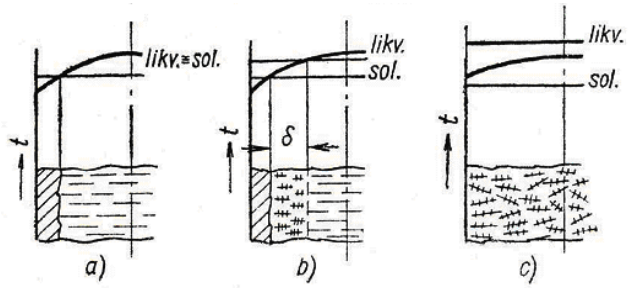
Jednofázové pásmo tuhnutí je typické pro tuhnutí čistých kovů nebo pro slitiny tuhnoucí při eutektické teplotě (tj. pro podmínky, kdy teplota likvidu je totožná s teplotou solidu dané slitiny). V jednofázovém pásmu tuhnutí je nejdříve tavenina a po ztuhnutí jen tuhá fáze - krystaly. Tento způsob se označuje také *progresivní tuhnutí*. Progresivní tuhnutí je velmi příznivé a nutné např. při gravitačním lití do pískových a kovových forem.

Dvoufázové pásmo tuhnutí je typické pro tuhnutí slitin, u kterých teplota likvidu není totožná s teplotu solidu. Tj. u slitin, které tuhnou v intervalu teplot ΔT (T_L-T_S). Toto pásmo se skládá z krystalů a taveniny. Je nevýhodné, neboť vede k odměšování přídavného prvku a též k vytváření rozptýlené staženiny v odlitku.

Objemové tuhnutí je méně častý způsob tuhnutí. Vyskytuje se při tuhnutí LKG v pískových formách a také při tuhnutí hliníkových slitin v sádrových formách. Tento typ tuhnutí se vyznačuje tím, že celý objem dutiny formy je neustále tvořen taveninou a v určitém okamžiku se tavenina v celém objemu změní v tuhou fázi.

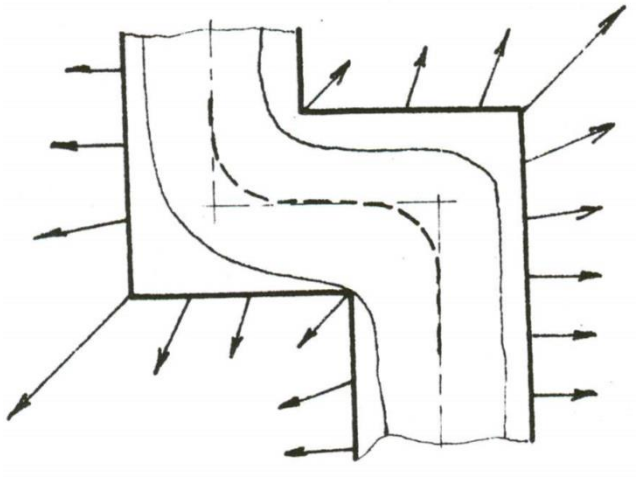
Při schématickém znázornění tuhnutí se vychází z příčného řezu dutiny formy, ochlazovací schopnosti formy prostřednictvím příčného teplotního gradientu a charakteru slitiny, tj. z výše teploty likvidu a solidu. Schématické znázornění tří základních způsobů tuhnutí je na obr. 1-76.

Poměrně komplikované tuhnutí je v případě zalomené stěny, viz obr. 1-77. Na *vnějším rohu* je tavenina, resp. kov stěnami formy více ochlazován než u stěny rovné. Na *vnitřním rohu* je ochlazován naopak méně. Na obrázku jsou nakresleny šipky intenzity odvodu tepla. V důsledku toho, se izotermy (křivky stejné teploty) v odlitku na vnějším rohu oddalují a k vnitřnímu přibližují. Stejnou intenzitu odvodu tepla lze zaručit zaoblením stěn, proto také odlitky při své konstrukci mají zaoblené hrany.



a) progresivní, b) dvoufázové, c) objemové

Obr. 1-76 Schéma jednofázového a dvoufázového tuhnutí odlitků



Obr. 1-77 Schéma tuhnutí taveniny v zalomené stěně

Pro výrobu kvalitních odlitků vyžadujeme nejen progresivní, ale také tzv. *usměrněné tuhnutí odlitku*. Vyžadujeme, aby odlitek tuhnul od nejvzdálenějších míst až k nálitku nebo vtokové soustavě a současně směrem k tepelné ose odlitku.

1.5.2 Důsledky při tuhnutí a chladnutí odlitků

Při tuhnutí a chladnutí odlitků probíhají různé jevy, především fyzikální, které přispívají ke změnám objemu a rozměrů odlitku. Mezi tyto jevy se řadí *smršťování*, které nějakým způsobem mění rozměry odlitků. Rozlišujeme ***smršťování objemové*** a ***smršťování lineární*** (o*bjemové smrštění* vytváří podmínky k tvorbě vnitřních dutin odlitku, lineární smrštění mění výsledné rozměry odlitku).

Objemové smršťování odlitků, tzv. stahování, vzniká v důsledku, že objem taveniny odlitku > než objem odlitku po jeho ztuhnutí. V odlitku chybí část materiálu (vzniká staženina nebo rozptýlené staženiny, řediny, atd.). Aby se předcházelo vzniku staženin, proto se před odléváním musí odlitky ***nálitkovat.***

Lineární smršťování odlitků probíhá při ***jeho chladnutí*** to je při teplotách pod teplotou T_S). Projevem jsou charakteristické změny na ***lineárních rozměrech*** **odlitku.**

Lineární smršťování odlitku je příčinou zmenšení rozměrů odlitku vůči modelu. Z tohoto důvodu se musí model (modelová deska) dělat větší o tzv. ***míru lineárního smrštění***. Konkrétní hodnota lineárního smrštění slitin kovů je ještě závislá na druhu použité slévárenské formy nebo na způsobu odlévání.

1.5.3 Nálitkování odlitků

Ve slévárenské praxi je neustálá tendence eliminovat ***objemové smršťování odlitku*** a zabránit tak vzniku staženin a mikrostaženin v odlitku, resp. zařídit smrštění tuhnoucí taveniny mimo odlitek. Tento způsob nám umožňuje *nálitkování* odlitků.

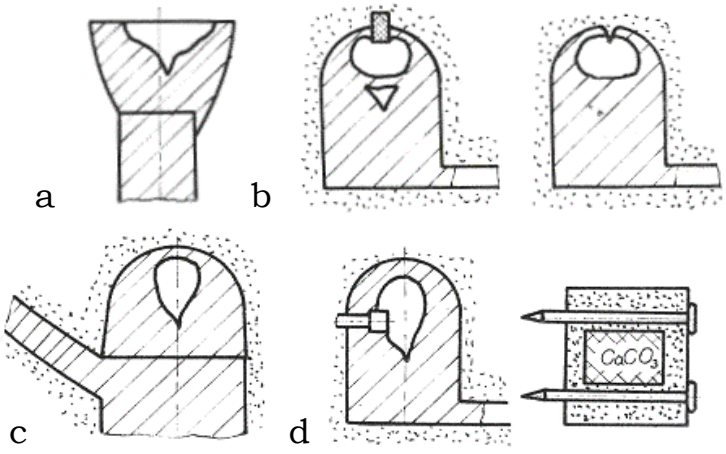
Nálitek představuje dutinu ve slévárenské formě, která je propojena s dutinou odlitku. Po odlití se naplní taveninou. Je to v podstatě zásobník taveniny, který zabezpečuje dosazování tekutého kovu do tuhnoucího odlitku. Čímž se očekávaná staženina přesune mimo ztuhlý odlitek, tj. do nálitku. Proto je nutné, aby nálitek ztuhnul až po ztuhnutí odlitku. Kromě vzniku soustředěné staženiny dojde i k oslabení vzniku rozptýlených pórů v odlitku, které se soustředí též v nálitku spolu s dalšími nečistotami, jež vyplouvají z tekutého kovu během tuhnutí odlitku.

Typy nálitků - rozlišujeme různé druhy nálitků:

a) *vůči atmosféře:*
   - otevřené: podtlakové, atmosférické, přetlakové;
   - uzavřené;

b) *podle umístění vůči vtokové soustavě:*
   - přilehlé;
   - odlehlé;

c) podle materiálu, který vymezuje prostor dutiny nálitku:
   - neošetřené;
   - izolované;
   - exotermické.



a - otevřený atmosférický nálitek; b - uzavřený atmosférický nálitek; c - podtlakový nálitek; d - vysokotlaký nálitek

Obr. 1-78 Schéma různých typů nálitků

Dutina pro neošetřený nálitek je vymezena formovací směsí jako dutiny nálitku. Pro správné tuhnutí odlitku musí mít tento nálitek větší modul M_N než je modul odlitku M_O. Modul nálitku $M_N = V_N/S_N$ (objem nálitku/plocha nálitku); $M_O = V_O/S_O$ (objem odlitku/plocha odlitku). Moduly, resp. rozměry izolovaných nálitků jsou menší, neboť izolační hmota zadržuje teplo nutné pro existenci taveniny. Hmota exotermických nálitků obsahuje látky, které po odlití hoří a ohřívají taveninu v nálitku, proto exotermické obkladové hmoty nálitků mají ještě menší rozměry, resp. modul.

Správná funkce nálitků je hodnocena dvěma kritérii:

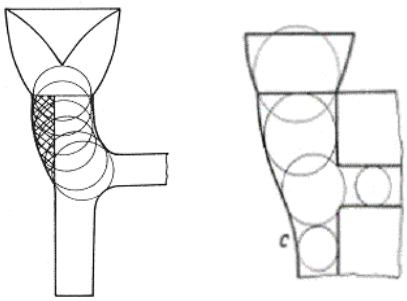
1. *kriteriem zralosti odlitku* - udává správnou funkci nálitku a je závislé na výšce nálitku (H_N) a hloubce makrostaženiny v nálitku ($H_{s\ st}$). Toto kriterium, při správné funkci nálitku, má být $H_{s\ st}/H_N < 0,8$; je-li $H_{s\ st}/H_N > 1$, pak makrostaženina zasáhne do odlitku. Pokud kriterium zralosti je 0,95, pak nálitek funguje na hranici použitelnosti.
2. *součinitel nehospodárnosti nálitku* (x) - je odvozen z poměrů objemů staženiny a nálitku $V_N/V_{st} = x$. V případě ideálně fungujícího nálitku $V_{st} = V_N$, pak $x = 1$.

x = 5,5 až 12 – nálitky neošetřené;
x = 4 až 5,5 – nálitky z izolačního materiálu;
x = 4 - nálitky z exotermického materiálu.

1.5.3.1 Principy navrhování nálitků

A) Metoda vepsaných koulí (nejstarší) je metoda podle Heuverse dává první konkrétní představu o velikosti nálitku z náčrtku tepelného uzlu. Vepsaná kružnice (koule) v tepelném uzlu se musí dát plynule vysunout až do nálitku v souladu s kladně usměrněným průběhem tuhnutí. Čili průřezy v soustavě odlitek - nálitek se musí směrem vzhůru stále rozšiřovat; vyšším průřezem musí alespoň projít koule vepsaná do průřezu ležícího níže, viz obr. 1-79.

Tato pravidlo platí jen v případě, že prostor dutiny pro nálitek je ze stejné formovací směsi jako dutina pro odlitek.



Obr. 1-79 Ukázka významu vepsaných koulí při navrhování nálitku

B) Metoda CAINEHO - je založena na době tuhnutí nálitku a odlitku. Doba tuhnutí nálitku musí být větší než doba tuhnutí odlitku.

$$t_{tuh\ N} > t_{tuh\ O} \qquad (7)$$

C) Metoda podle PŘIBYLA Existuje celá řada výpočtů velikosti nálitků, velmi výhodná je metoda českého slévárenského odborníka prof. PŘIBYLA (působil na VŠB Ostrava), který navrhl výpočet pro nálitek válcového tvaru ∅d a výšky h:

$$d = A.\sqrt[3]{\frac{m_o.x.\beta}{\rho.(1-x.\beta)}} \qquad (8)$$

kde značí: β - součinitel objemového smrštění (stahování) taveniny při změně teplot, od teploty lití do teploty tuhnutí;
m_O - hmotnost odlitku;
ρ - hustota taveniny při teplotě solidu;
x - součinitel nehospodárnosti nálitku;
A - součinitel závislý na poměru výšky nálitku/průměru nálitku (h/d)
h = 1,1 d …… A = 1,11
h = 1,2 d …… A = 1,07
h = 1,3 d …… A = 1,04

V tabulce 1.9 jsou uvedeny hodnoty stahování, součinitel β

Tabulka 1.9 Hodnoty součinitele stahování β pro různé slévárenské materiály

Slévárenský materiál	***Hodnota β***
Slitiny hliníku	0,040 až 0,050
Bronzy	0,035 až 0,045
Litina s lupínkovým grafitem (2,5 % C)	0,030 až 0,040
Litina s lupínkovým grafitem (3,0 % C)	0,020 až 0,030
Litina s lupínkovým grafitem (3,5 % C)	0,010 až 0,020
Bílá litina	0,045 až 0,055
Ocel na odlitky (0,10 % C)	0,020
Ocel na odlitky (0,35 % C)	0,030
Ocel na odlitky (0,70 % C)	0,053

V současné době se návrh nálitků řeší v aplikaci se simulačními slévárenskými programy pomocí kterých lze předurčit (predikovat) tuhnutí a chladnutí odlitků.

1.6 Charakteristika slévárenských forem

Slévárenská forma - je v podstatě pracovní předmět „nádoba“ vyrobená ze žáruvzdorného materiálu, jejíž dutina odpovídá tvarem - je negativem budoucího odlitku.

Poznámka: Analogie významu slévárenské formy je možno pro jednoduchost spatřovat ve formě pro pečení bábovky (bábovka má podobný význam jako odlitek).



Slévárenské formy dělíme z různých hledisek, např. podle trvanlivosti se dělí na formy:

a) *trvalé* - formy kovové se vyrábí z oceli třídy 17, 19 nebo z litiny s lupínkovým grafitem. V těchto formách lze provést až tisíce násobný počet odlití, ten závisí na složitosti dutiny formy a na typu odlévané slitiny. Do kovových forem může být tavenina odlévána gravitačním způsobem (využíváme vlastní tíhu taveniny) a tyto formy se vyrábí z LLG nebo z oceli ČSN 19552. Především se kovové formy plní tlakově, buď vysokotlakým nebo nízkotlakým způsobem. Pro oba způsoby musí být příslušná zařízení, resp. tlakové stroje. U vysokotlakého způsobu se tavenina do dutiny slévárenské formy dopravuje na základě tlaku pístu pracovního stroje. U nízkotlakého způsobu tlakem vzduchu působíme na hladinu taveniny v udržovací peci, která je pod úrovní podlahy slévárny. Pomocí tlakové trubice dopravujeme taveninu do formy, která je upevněna nad udržovací pecí k tlakovému stroji;
b) *polotrvalé* - keramické, které jsou vyrobené ze speciálních keramických materiálů obléváním modelu v rámu. Tyto formy slouží pro více odlití. Jsou vyráběny metodou Shaw, která je založena na oblévání modelu ve formovacím rámu keramickou břečkou. Ve světě není známo, že by tyto formy měly velké praktické využití.
c) *netrvalé* – jsou jen na jedno použití. Nejčastěji pod pojmem netrvalé formy máme na mysli ***formy pískové***, jsou to formy velmi často používané k odlévání litiny, slitin hliníku, oceli na odlitky, atd. Jsou pouze na jedno použití. Pískové formy mohou být před odléváním:
    a) syrové (nevysušené);
    b) přisušené (jsou vysušené pouze u pracovního povrchu - tzv. líce formy);
    c) vysušené (jsou vysušené v celém objemu).

Mezi netrvalé formy se také řadí např. formy sádrové, cementové nebo formy keramické na vytavitelný model.

Výroba kovových forem se provádí třískovým obráběním ve specializovaných pracovištích nebo firmách pomocí moderních číslicově řízených strojů, které umožňují přesnou výrobu složité dutiny formy. Tímto způsobem jsou vyrobeny např. formy pro tlakové lití bloků spalovacích motorů nebo formy pro odlévání hlav motorů osobních automobilů AUTO Škoda. Cena těchto forem odpovídá složitosti odlitku a pohybuje se od 2 do 10 miliónů Kč.

Podkladem pro výrobu všech odlitků je *strojírenský výkres* (kótovaný výkres) součástky, která se má vyrobit. Tvar součástky je třeba po konzultaci s konstruktérem upravit tak, aby se usnadnila výroba forem a snížilo nebezpečí vzniku vad odlitků (trhlin, povrchových a vnitřních defektů).
Dále se musí zvětšit některé rozměry na výkresu součástky o tzv. *slévárenské technologické přídavky* a *přídavky pro obrábění*. Pro výrobu dutiny formy jsou hodnoty lineárního smrštění odlitků. Zde závisí na technologii odlévání, nejmenší hodnoty lineárního smrštění se uvažuje při výrobě odlitků vyráběných vysokotlakým litím.
Plocha dutiny každé slévárenské formy, která je po odlití ve styku s taveninou kovů, se nazývá *líc formy*. Dutina může obsahovat i jádro. Součástí každé formy je *vtoková soustava.* K uvolnění vznikajících plynů ve formě po nalití taveniny slouží výfukové kanály (průduchy), u forem kovových odvzdušňovací kanály.

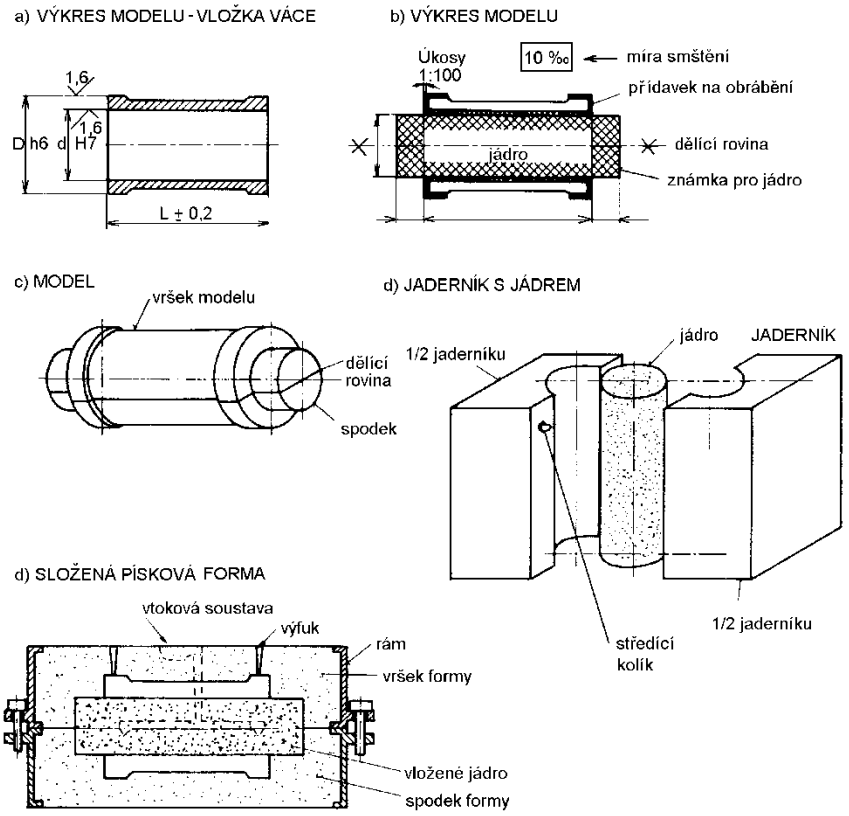
1.6.1 Pískové formy

Hlavním představitelem netrvalých forem jsou formy pískové, které slouží především pro výrobu litinových, popř. hliníkových, bronzových, mosazných zinkových a hořčíkových odlitků. I odlitků z oceli na odlitky. Celá výroba je založená na jednotlivých odděleních, jejichž činnost je vhodně technicky propojena. Schéma výroby odlitků jsou na obr. 1-80, zahrnuje:

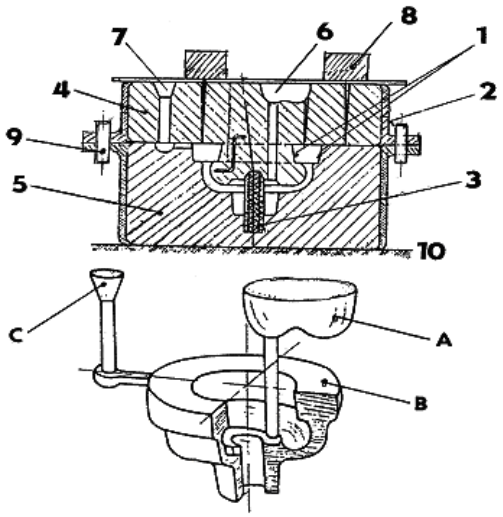
a) výkresu odlitku (válec vložky);
b) výkresu modelu;
c) model (je součástí modelového zařízení);
d) jaderníku s jádrem (je součástí modelového zařízení);
e) složené pískové formy.

Jak již bylo uvedeno, podkladem pro výrobu odlitků je *strojírenský výkres* (kótovaný výkres) odlitku, který má být vyroben. Při výrobě je třeba zabezpečit *technologičnost konstrukce odlitku*. Tvar součástky je třeba po konzultaci s konstruktérem upravit tak, aby se usnadnila výroba forem a snížilo nebezpečí vzniku vad odlitků (trhlin, povrchových a vnitřních defektů). Dále se musí zvětšit některé rozměry na výkresu součástky o tzv. *slévárenské technologické přídavky* a *přídavky pro obrábění*. Současně se zakreslí dle potřeby případné *nálitky, jádra a známky*. Podle tohoto výkresu se nakreslí výkresy modelového zařízení. Podle nich se dle potřeby v modelárně vyrobí příslušné modely a jaderníky.

Na obr. 1-81 je uvedeno schéma řezu pískovou slévárenskou formou. Písková slévárenská forma bývá nejčastěji půlená, skládající se z horní a dolní části. Vnější část a rozměry formy vymezují kovové slévárenské rámy, které jsou vyplněné formovacím materiálem, tzv. slévárenským pískem. Vzájemnou polohu rámů a tím i obou částí formy zabezpečují vodící kolíky. Uvnitř formy je pomocí modelu (nebo modelové desky nebo skládáním nepravých jader) vytvořená dutina formy.



Obr. 1-80 Schéma odlitku, modelového zařízení a pískové formy



1 - líc formy; 2 - rám; 3 - jádro; 4 - horní část formy; 5 - dolní část formy; 6 - dutina vtokové soustavy; 7 - nálitek; 8 - úkladky; 9 – kolíky; 10 - lící pole; A - vtoková soustava; B - odlitek; C - nálitek

Obr. 1-81 Schéma řezu pískovou slévárenskou formou

1.6.1.1 Výroba pískových forem

Výroba pískových forem se provádí přímo ve slévárnách, v provozech tzv. ***formovnách.*** Tyto provozy jsou dnes mechanizované výrobní jednotky.

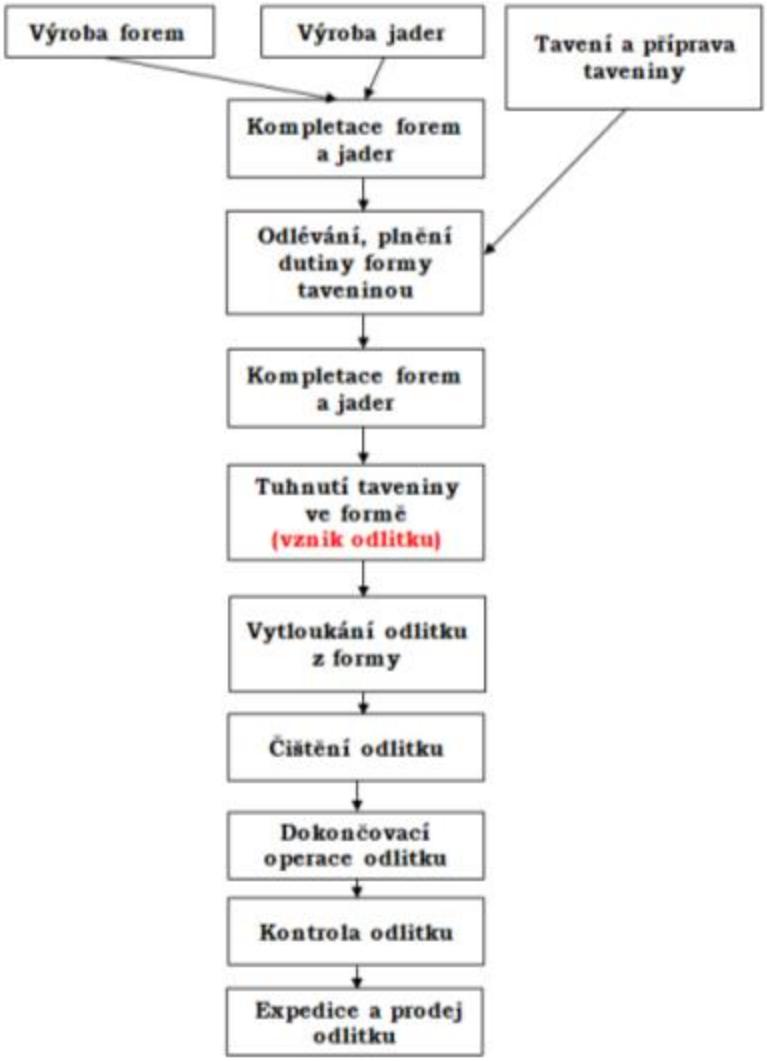
V úpravně formovacího materiálu se připravuje příslušná formovací směs (u pískových forem se zde smíchávají její příslušné složky:

a) ostřivo,
b) pojivo,
c) přísady,
d) voda u směsí s bentonitovým pojivem.

V této formovací směsi je voda důležitým činitelem pojení, ale musí se použít vůči ostatním složkám v určitém poměru.
Připravená formovací směs se dopravuje ***do formovny***. Zde se plní formovací rámy formovací směsí s modelem nebo rámy s formovací deskou. Plnění se může provádět sypáním, metáním, vstřelováním, atd. Pak následuje zhuštění směsi v rámu tak, aby formovací směs dobře kopírovala model v rámu. Od slévárenské formy vyžadujeme dobrou kompaktnost, pevnost v tlaku, prodyšnost, žáruvzdornost a po odlití i její rozpadavost. Zhuštění se provádí strojním (výjimečně ručním způsobem) pomocí strojů, které např. směs v rámu střesou a dolisují. Nebo provádí jiné podobné operace. Po vyjmutí modelu nebo modelové desky z rámu získáváme nejčastěji polovinu slévárenské formy. Spojením dvou příslušných polovin formy získáváme formu s její dutinou. Jádra se vyrábí příslušnou technologií v jadernících (formy pro výrobu jader). Tato jádra se dovážejí do formovny. Po vyjmutí modelu z formy se jádra vkládají (nebo jádro vkládá) do dutiny formy. Dutina formy má tvar, který je negativem budoucího odlitku. V případě výroby složitých dutin forem se dutina vyrábí skládáním nepravých jader do slévárenského rámu. Na obr. 1-82 je schéma výroby pískových forem.

Při formování je ještě nutno ve formě vyrobit *vtokovou soustavu* (tj. soustava kanálů sloužící k dopravě taveniny do dutiny formy) a *výfuky*, které odvádějí unikající plyny z formy. Někdy je nutné ještě ve formě vytvořit dutinu (dutiny) pro *nálitek*, který funguje jako zásobárna taveniny z něhož si tuhnoucí a smršťující odlitek doplňuje chybějící kov.

Pro výrobu dutiny pískových forem se používají různé pomůcky, které zahrnujeme pod pojem tzv. ***modelové zařízení***.
K modelovému zařízení patří modely, šablony a jaderníky, modelové desky, dále všechny potřebné pomůcky vyrobené v modelárně, které slouží k výrobě formy.
Je třeba rozlišovat *modelovou desku* pro *ruční* a *strojní* formování. Modelová deska pro ruční formování bývá nejčastěji rovná dřevěná podložka, na kterou se v rámu usazuje model. Modelová deska pro strojní formování je jednoúčelová pomůcka. Tvoří ji deska, na kterou je připevněn model odlitku, model vtokové soustavy, model výfuků, atd.

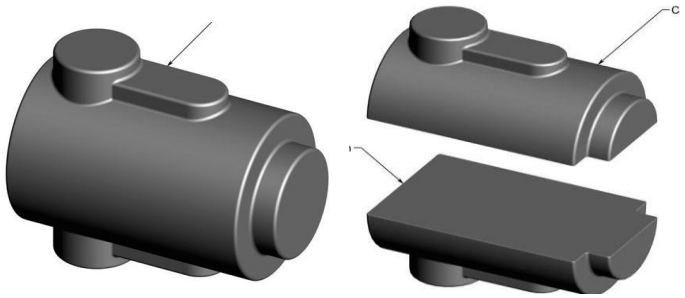


Obr. 1-82 Schéma výroby odlitků v slévárenských formách

Model - je základní pracovní pomůckou, která slouží k výrobě dutiny formy. Jeho tvar odpovídá budoucímu odlitku. Součástí modelu jsou i známky, které po zaformování modelu vytváří plochy ve formě sloužící k uložení jádra. Modely jsou často dělené, jen zřídka nedělené. Na obr. 1-83 je ukázka modelu. Vyrábí se ze dřeva, dnes již to jsou dřeva umělá, která nepodléhají roztažnosti a nabobtnávání. Rozměr modelu je proti odlitku větší o tzv. *míru lineárního smrštění materiálu odlitku*. Hodnota smrštění závisí na použitém odlévaném materiálu. Model musí obsahovat také potřebné úkosy, které usnadňují vyjímání modelu z upěchované formy (plochy kolmé na dělící rovinu mají úkos 1:50 až 1:100).

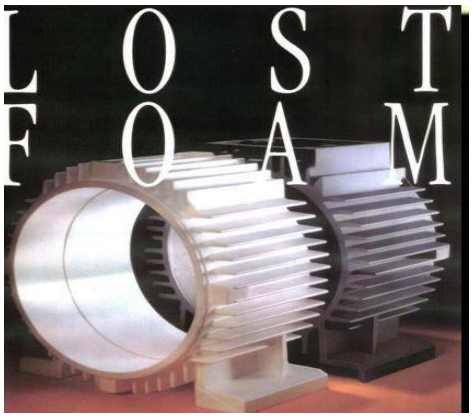
Modely jsou opatřeny barevným nátěrem. Nátěr chrání model proti navlhání a současně podle barvy modelu lze usuzovat jaký typ slitiny se bude odlévat:

- červená - litina s lupínkovým grafitem;
- bledě modrá - slitiny hliníku;
- šedá - slitiny hořčíku, atd.



Obr. 1-83a) Model, půlený model

Zvláštní skupinu modelů tvoří *modely netrvalé* (voskové - *vytavitelné* nebo ze speciálního napěněného polystyrenu - *spalitelné*), které se musí vyrobit pro každou formu. Výroba forem pomocí vytavitelných nebo spalitelných modelů patří do skupiny speciálních metod výroby forem. Na obr. 1-83b) jsou modely spalitelné.



Obr. 1-83b) Spalitelný model (Lost Foam) napěněného polystyrénu

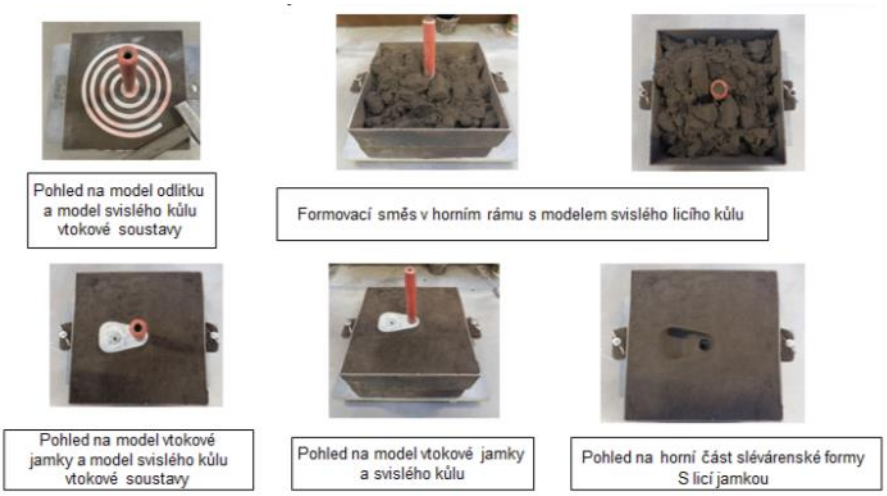
Šablony - jsou též pracovní pomůcky k výrobě dutiny formy, mají tvar obrysu odlitku. Uplatňují se tam, kdy odlitek má jednoduchý rotační tvar. Šablona je poměrně levná, ale výroba forem šablonováním je náročná a zdlouhavá. Dnes se šablony nejvíce uplatňují ve speciální slévárenské výrobě, tj. při výrobě forem pro odlévání zvonů.
Příslušenství modelového zařízení tvoří modely vtokových soustav (model jamky nebo nálevky, vtokového kanálu, struskováku, zářezů), modely výfuků, nálitků. Pro zlepšení a urychlení formování se při sériových výrobách odlitků místo modelů používají *modelové desky*. Dále se používají pomocné pomůcky jako např. kontrolní šablony, zaváděcí kolíky, atd.
Modelová zařízení jsou značně nákladná a jeho cena se promítá do ceny odlitku. Čím však je kvalitnější a dražší modelové zařízení, tím jsou však nižší náklady na formování a obrábění. Proto se musí s návrhem modelového zařízení zvážit i ekonomický dopad a volit optimální možnosti.

1.6.1.2 Ruční výroba pískových forem

Výroba pískových slévárenských forem může být ruční (na model na šablonu), avšak ve většině případů je strojní pomocí modelové desky. Při výrobě ručních forem se používají formovací desky, formovací rámy, model, jádra, separační prostředky a formovací nástroje (ruční pěchovačky, lanzetky, hladítka, botce, pískováčky, podpěrky jader). Ruční formování je vhodné pro výrobu forem jednoduchých odlitků. Na obr. 1-84a) je pro ilustraci ukázka ručního formování. Na obr. 1-84b) je pohled na různé okamžiky výroby slévárenské formy.



Obr. 1-84 a) Ukázka ručního formování

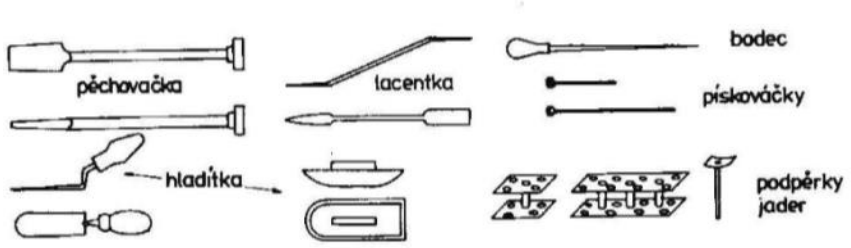


Obr. 1-84 b) Různé okamžiky výroby pískové formy

Nástroje a pomůcky při ručním formování

Při ručním formování se ***model a rám*** pokládá na podkladovou formovací desku (tzv. „ půdnici“, deska musí být tvrdá a rovná). Na model s rámem se sype přes síto modelová směs (formovací směs, aby ve směsi nebyly velké kusy a hrudky). Pak se směs ručně pěchuje pěchovačkami, které mají různý tvar i délku. V rozích a v blízkosti modelu se pěchuje klínem pěchovačky (aby se dosáhlo vysokého stupně upěchování). Ve větších vzdálenostech od modelu se používá plochá část pěchovačky (jek se slangově říká „knoflíkem“). Lze použít i pneumatickou pěchovačku. Přebytečná formovací směs, která přečnívá nad rámem se seřízne kovovým pravítkem. Pro zvýšení prodyšnosti formy, se do formy píchají kovovým bodcem průduchy. Při vyjímání modelu z formy se zvlhčují okraje formy v blízkosti modelu ve vodě smáčenými vlasovými štětci.
Model se uvolňuje z formy jeho poklepáním paličkou z tvrdého dřeva a vytlačuje se z formy pomocí háčku s očkem. Povrch formy se uhlazuje

Hladítkem a v špatně dostupných místech lancetkami různých tvarů. Lancetky se používají ke zhotovení zářezy, kterými se propojuje vtokový kanál s dutinou slévárenské formy. Dělicí rovina se zaprašuje dělicím práškem.
Ke zpevnění některých exponovaných částí formy se používají drátěné pískováčky s kruhovou plochou hlavou. Do míst, ze kterých se požaduje rychlejší odvod tepla z formy, se vkládají kovová chladítka. Přesné ustavení polohy hlavně rozměrnějších jader ve formě umožňují podpěrky z pocínovaného plechu.
Řada pomůcek je normalizovaných, některé si formíři zhotovují sami pro usnadnění práce a také proto, aby mohli formovat odlitky složitých tvarů. Nejběžnější nástroje jsou na obr. 1-84 b).



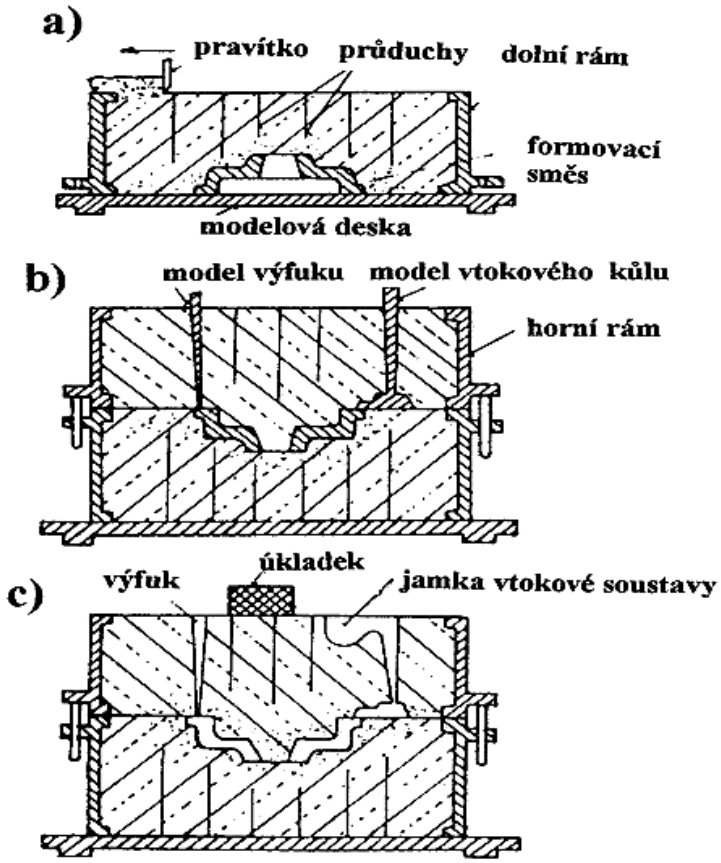
Obr. 1-84 b) Nástroje a pomůcky pro ruční formování

Postup výroby jednoduché formy ručním formováním

a) Na připravenou modelovou desku položíme formovací rám a do něho model (nebo půlku modelu), vždy širší částí dolů a mírně ke straně. Model se popráší separačním (dělícím) prostředkem. Model se posype prosetou modelovou formovací směsí popř. formovací směsí, kterou upěchujeme pěchovačkou. Přebytečnou směs seřízneme pravítkem a napícháme průduchy.
b) Takto vyrobenou část formy otočíme o 180° a pomocí vodících kolíků usadíme horní rám, do kterého opět nasypeme formovací směs a upěchujeme, zarovnáme pravítkem.
c) Oddělíme obě části formy a ze spodní vyjmeme model, vše je nutno dělat s velkou opatrností, abychom nepoškodili formu!
d) V obou částech formy vyřízneme potřebné části vtokové soustavy, event. prostor pro nálitek.
e) Pak následuje složení obou částí formy, které jsme opatřili separačním prostředkem, což zajistíme pomocí vodících kolíků.
f) Formu položíme na licí pole a zatížíme ji úkladky.

Na obr. 1-85 je schéma výroby formy po některých operacích při ručním formování:

a) dolní část formy (model je na modelové desce v rámu zasypán formovací směsí a směs je důkladně upěchována; přebytečná směs se z rámu odstraní seříznutím pomocí pravítka; průduchy ve formě se vytvoří vtlačením ostrého předmětu);
b) obě části formy s modelem odlitku, modelem vtokové soustavy a výfuku;
c) forma připravená k odlévání.



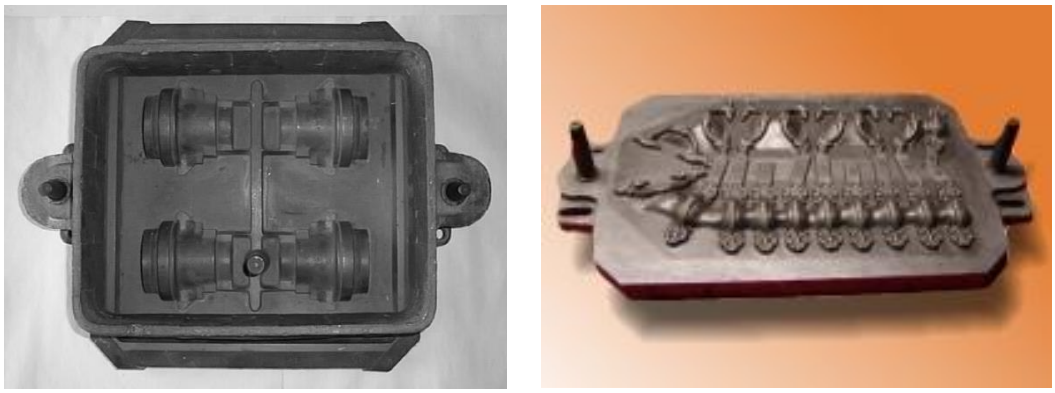
Obr. 1-85 Schéma slévárenské formy v různých okamžicích její výroby

1.6.1.3 Strojní výroba pískových forem

Ruční výroba forem je značně pracná a některé operace, jako např. pěchování jsou pomalé i fyzicky namáhavé, jiné vyžadují zručnost a fyzickou kondici formířů. Také volba a umisťování vtokové soustavy, především zářezů ve formě, vyžaduje zkušenosti.

V moderní a produktivní výrobě odlitků se uplatňuje jedině strojní výroba forem, pro kterou je typická mechanizace některých operací. Zde se nepoužívají modely, ale ***modelové desky***, viz obr. 1-86, pomocí nich je přesně vymezena poloha dutiny formy, výfuků, vtokové soustavy se zaústěním zářezů do odlitku, atd. Modelové desky jsou v podstatě jednoúčelové formovací desky s pevně upevněnou polovinou modelu, včetně modelu vtokové soustavy a vodících kolíků. Též plnění rámu formovací směsí je strojní, používají se nejrůznější způsoby, např. střásání s dolisováním. K tomu jsou nutné speciální formovací stroje, viz obr. 1-86b). Např. dřívější metání směsi do formovacího rámu na model, resp. modelovou desku se dnes používá málo.

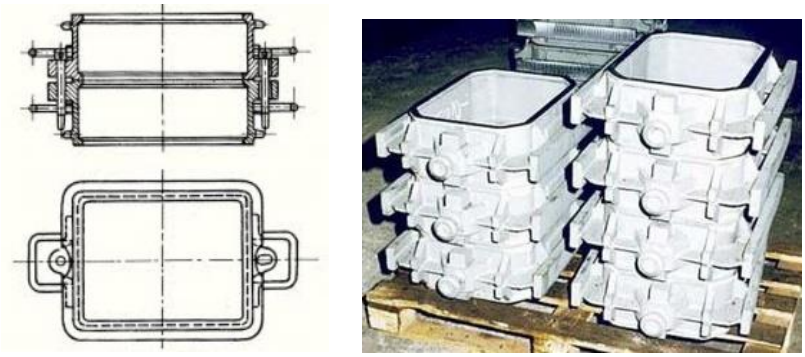
Dalším důležitou součástí pro výrobu forem jsou *formovací rámy*, které vymezují prostor slévárenské formy.



Obr. 1-86a) Pohled na modelovou desku uloženou v rámu (vlevo);
modelová deska (vpravo)



Obr. 1-86b) Pohled na formovací stroj a na modelovou desku



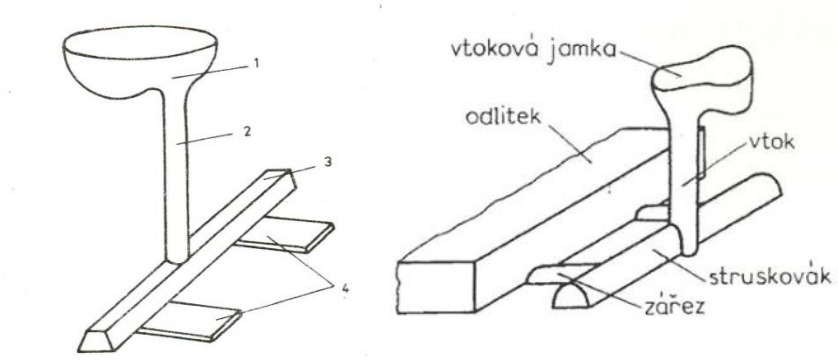
Obr. 1-86c) Schéma formovacích rámů (vlevo) a formovací rámy (vpravo)

Vtokové soustavy

Každá slévárenská forma musí mít sytém kanálů, který slouží k natečení taveniny kovu do dutiny slévárenské formy. Pro pískové formy existují dva typy vtokových soustav:

a) ***s lití jamkou,*** která obsahuje svislý licí kůl, vodorovný kanál tzv. struskovák (lapač strusky) a zářez (nebo zářezy). Nejdůležitější je zářez. To je poslední část vtokové soustavy, která je spojena s dutinou formy. Tato soustava se nejčastěji používá pro odlévání litin, viz obr. 1-87.
b) ***s nálevkou,*** která obsahuje svislý a vodorovný kanál. Vodorovný kanál ústí do dutiny formy. Tato soustava se používá především k odlévání oceli na odlitky.

Vtoková soustava ve slévárenské formě je systém kanálů, které jsou spojeny s dutinou slévárenské formy. Vyrábí se také formováním. Bývá součástí modelové desky.



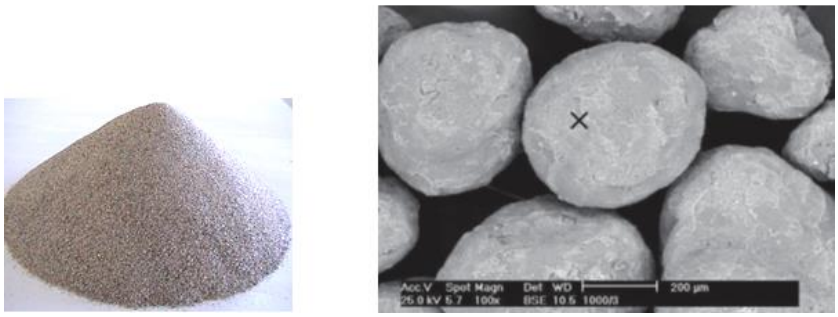
1- lití jamka; 2 - svislý kanál (licí kůl); 3 - vodorovný kanál (struskovák); 4 - zářezy

Obr. 1-87 Schéma vtokové soustavy pro odlévání litiny

1.6.2 Pískové formovací směsi

Pískové formovací směsi sloužící k výrobě netrvalých - pískových forem se skládají z těchto složek: *ostřiva; pojiva; přísad; vody*.
Formovací směsi jsou tvárovatelné (tvárlivé) hmoty, od kterých se vyžaduje dobrá formovatelnost, prodyšnost, pevnost za syrova, chemická stálost, malá plynotvornost, dobrá rozpadavost. Uvedené vlastnosti jsou závislé na ostřivu, pojivu, přísadách, popř. i na přítomnosti a množství vody.

Ostřivo - nosná část formovací směsi, jeho obsah bývá různý. Nejčastěji jeho obsah činí cca kolem 90% formovacího materiálu. Částice ostřiva jsou různého tvaru (kulatá i ostrohranná) a jejich velikost je větší než 0,02 mm. Podle původu se dělí na ostřivo přírodní (např. křemenný písek) nebo umělá (korund, magnezit). Dále se ostřiva dělí na kyselá (křemenné ostřivo), neutrální (šamot, chromit, korund) a zásaditá (magnezit). Nejpoužívanějším ostřivem je ostřivo *křemenné* (jehož chemickou podstatou je SiO_2) tzv. křemenný písek, který se v přírodě vyskytuje v různých lokalitách naší republiky. Na obr. 1-88 jsou částice křemenného ostřiva.



Obr. 1-88 Pohled na zrna křemenného ostřiva

Tavící teplota křemene je 1700°C a je hlavní složkou přírodních formovacích směsí. Křemenné ostřivo je kyselé povahy a nelze ho používat pro výrobu forem určených k odlévání materiálů, které vytváří oxidy zásadité povahy např. Haetfieldova ocel (manganová austenitická ocel). Šamot je vhodným ostřivem pro výrobu těžkých ocelových odlitků. Korund je vysoce žáruvzdorný materiál.

Pojivo - je ta část formovací směsi, která umožňuje soudržnost formovací směsi. Pojiv je celá řada a dělí se dle různých kriterií např. rozlišujeme pojiva anorganická (jíly, vodní sklo) a organická (pryskyřice, tuky, oleje sacharidy). Nebo novějším způsobem dělíme pojiva do 3 generací:

Pojiva 1. generace jsou pojiva anorganická a jsou to pojiva jílová, rozlišujeme 3 druhy těchto jílů:

a) *Kaolinitický* - má poměrně vysokou žáruvzdornost, ale malou bobtnavost. Jeho použití je při výrobě ocelových odlitků.
b) *Illitický* - má středně velkou žáruvzdornost a bobtnavost. Má zelenou barvu. Je hlavním pojivem přírodních směsí.
c) *Montmorillonitický* - má nižší žáruvzdornost, ale velkou bobtnavost. Tento typ jílu má obchodní název Bentonit nebo Sabenil a používá se pro výrobu forem určených především k odlévání litinových odlitků.

Na obr. 1-89 je bentonitové pojivo, jemný prášek barvy okru, který svým vzhledem připomíná Vitakávu.



Obr. 1-89 Bentonitové pojivo

Pojiva 2. generace jsou založena na chemické podstatě pojení, buď za tepla nebo za studena:

a) *Olejová* jsou určena pro výrobu jader, pojivový systém je založen na vysušení pojiva při teplotě cca 250°C.
b) Sacharidy (melasa, škrob, dextrin) jsou určeny pro výrobu jader, zajišťují dobrou pevnost po vysušení.
c) Pryskyřičná - jsou určeny pro výrobu jader a forem. Jsou velmi plynotvorné, avšak podporují dobrou rozpadavost směsi. Dnes se ve slévárenství uplatňuje celá řada pryskyřic, především ty, které nemají karcinogenní účinky. Z tohoto důvodu se již nepoužívají pryskyřice fenolformaldehydové. Dnes se používají pryskyřice: *furanové, polyuretanové, alkydové, novolakové, resolové.*

Pojiva 3. generace - nejsou pojiva v pravém slova smyslu jde spíše o pojivové systémy, neboť využíváme fyzikálních účinků pojení. To je např. formování v magnetickém poli, zmrazování, formování ve vakuu.

Přísady - jsou to látky ve formovací směsi, které zlepšují vlastnosti slévárenské formy. Např. zvyšují prodyšnost, rozpadavost, vyšší odolnost proti nejrůznějším povrchovým vadám odlitků (např. zapečeninám). Typickou přísadou je kamenouhelná moučka (letek), dále se používají též dřevěné piliny, atd. Dřevěné piliny po odlití vyhoří a ve formě vytvoří kanálky, čímž se zvýší prodyšnost a současně se umožní dilatace formy.

Voda - působí ve formovací směsi jako plastifikátor, tj. dává formovací směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování. Vody ve formě bývá kolem 3 až 4 hmot. %. Je podstatou pro formy syrové (nevysušené). Nejvíce se voda používá u směsí I. generace - tj. na bázi jílových pojiv, též při výrobě sádrových a cementových forem.

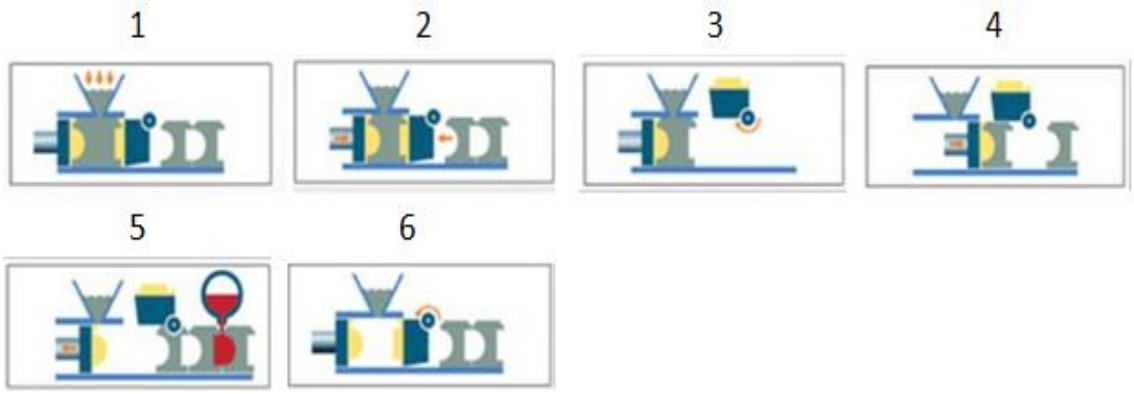
1.6.3 Výroba pískových forem bezrámovým formováním

Vedle klasických způsobů výroby *„pískových forem“* existuje netradiční metoda, tzv. bezrámové formování, kterou se vyrábí netrvalé pískové formy. Tyto formy mají masivní tloušťku stěny a svým vzhledem vypadají jako „buchty“. Nemají při odlévání kovový rám. Vyrábí se pomocí speciálních výkonných automatických formovacích strojů (označovaných DISAMATIC a UNIVERSAL), které mají buď oboustrannou modelovou desku nebo dvě formovací desky. Na těchto strojích lze vyrobit až 300 forem za hodinu.

Rozlišujeme dva způsoby formování, resp. dva druhy forem, podle směru dělící roviny:

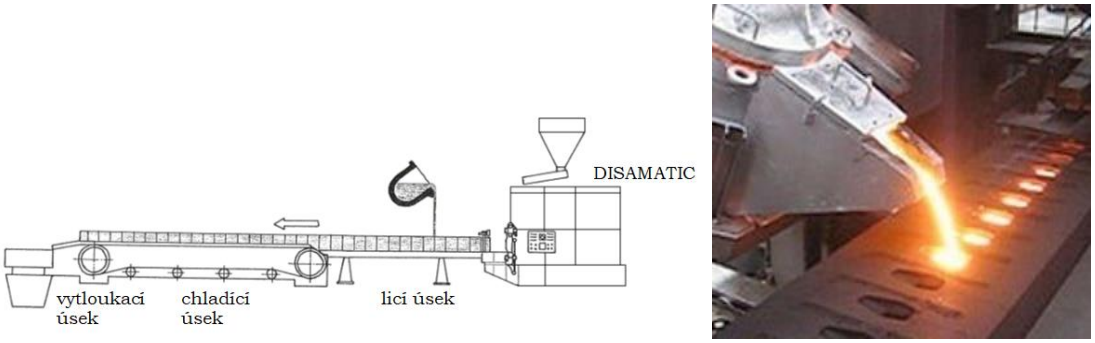
a) se *svislou* dělící rovinou;
b) s *vodorovnou* dělící rovinou.

Schéma způsobu výroby forem se svislou dělící rovinou je na obr. 1-90. Výroba spočívá ve vstřelování formovací směsi do komory, jejíž dvě protilehlé stěny tvoří modelové desky. Jedna je sklápěcí a tvoří jednu levou část formy, druhá je lisovací a vytváří pravou část formy. K vytvoření dutiny formy dojde spojením předchozí pravé části formy s levou částí následné formy.



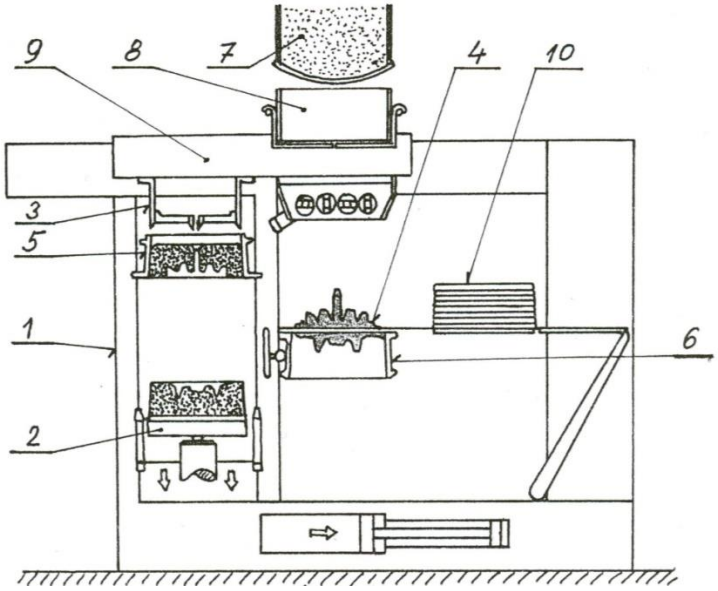
1. Ze zásobníku je směs vstřelená do lisovací komory;
2. Obě protilehlé modelové desky stlačí směs a tím vznikne „pískový masiv“
***buchta,** která svým tvarem ze dvou vnějších stran vymezuje tvar odlitku (mezera mezi dvěma „buchtama“ tvoří dutinu slévárenské formy);*
3. Sklopná deska se pomocí otočného mechanismu odklopí nahoru;
4. Píst posune buchtu na automatický dopravník, kde se buchty skládají k sobě;
5. Píst se vrací do základní polohy, mezi tím může probíhat lití;
6. Sklopná deska se vrací do základní polohy, čímž se uzavře komora a může začít další cyklus

Obr. 1-90a) Schéma výroby forem se svislou dělící rovinou



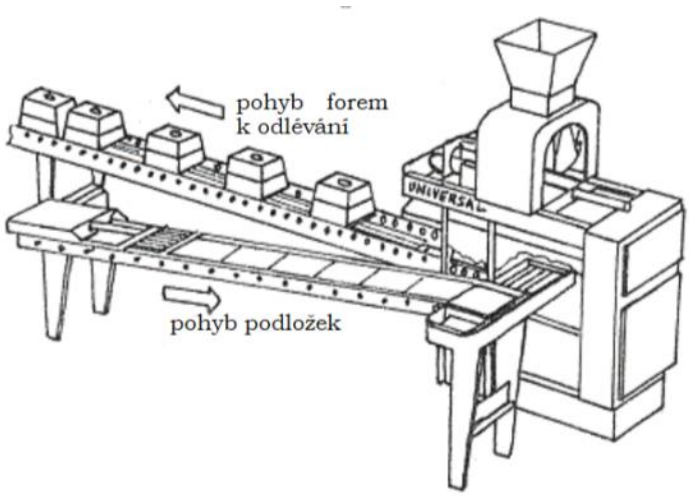
Obr. 1-90 b) Odlévání do forem vyrobených bezrámovým způsobem na automatickém formovacím stroji DISAMATIC (svislá dělící rovina)

Schéma způsobu výroby forem s vodorovnou dělící rovinou je na obr. 1-90. Tento stroj dělá více operací najednou. Formovací směs se vstřeluje do rámu s modelovou deskou v pravé části stroje, kde se vyrábí půlka formy, analogickým způsobem se v druhé části stroje vyrábí druhá půlka formy s využitím druhé strany formovací desky. Jedna část formy se spojuje s druhou částí formy vyrobenou v předchozím pracovním kroku.



1 - rám stroje; 2 - lisovací stůl; 3 - lisovací hlava; 4 - oboustranná modelová deska; 5 - horní formovací rám; 6 - spodní formovací rám; 7 - zásobník směsi; 8 - dávkovací nádoba; 9 - dávkovací váha; 10 - podložky

Obr. 1-91 Schéma základní polohy automatického formovacího stroje UNIVERSAL pro bezrámový způsob forem (vodorovná dělící rovina)



Obr. 1-91 Schéma vyrobených forem s vodorovnou dělící rovinou na formovacím stroji UNIVERSAL

Po vysunutí obou typů formy ze strojů jsou válečkovým dopravníkem transportovány do míst, kde jsou automaticky odlévány, chlazeny a vytloukány. Formy s vodorovnou dělící rovinou mají rozměry cca 550x400x350 mm. Uplatnění forem vyrobených bezrámovým způsobem je při výrobě drobných litinových odlitků hromadné výroby, které nevyžadují téměř žádné opracování. Dnes se používají tyto formy se svislou dělící rovinou např. k odlévání brzdových bubnů automobilů.

1.6.4 Výroba pískových forem 3 D tiskem

V současné době se objevuje výroba pískových slévárenských forem 3D tiskem. Tato výroba je perspektivní metodou, resp. aditivní technologií pro průmysl 4.0 (průmyslová revoluce s úkolem zavádění „chytrých továren“). Výroba forem 3 D tiskem je speciální výroba pískových forem, která je založena na pískové formovací směsi s aditivním pojivem (pojivo pro výrobu vrstev formy). K tomu je také zapotřebí speciální tiskařský 3 D stroj, viz obr. 1-92. Stroje pro 3 D tisk se řadí do kategorie aditivních strojů sloužící pro aditivních technologie potřebné v *Průmyslu 4.0*. Aditivní stroje si generují samy vlastní výrobní strategie a výrobní dráhy. Nepotřebují zvláštní přípravu výroby. Tisk formy je zdlouhavý, může trvat několik hodin.

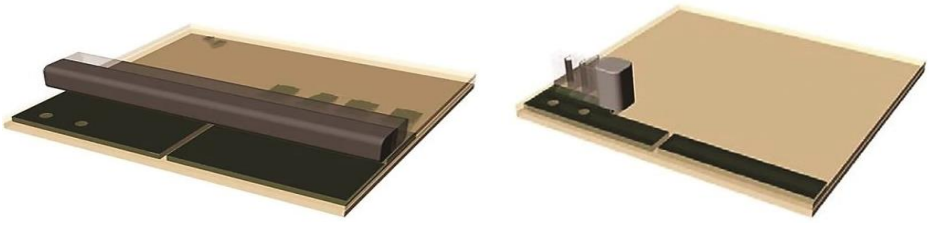


- vpravo je pracovní box - při tisku je zasunutý ve stroji [30]

Obr. 1-92 Americký stroj (Max od firmy Ex one) pro 3D tisk pískových slévárenských forem [31]

Maximální rozměr výrobního boxu největší 3D tiskárny od firmy Ex One je 1800 × 1000 × 700 mm. Dno tiskařského boxu a tisková hlava jsou na obr. 1-93. Na obr. 1-94 je schéma pracoviště pro 3D tisk pískových forem. Mezi části zařízení patří:

a) ***dno pracovního boxu*** *se v každém cyklu sníží o nastavenou hodnotu (0,28 – 0,5 mm).*
b) ***tisková hlava*** *s velkým množstvím trysek, která dopravuje pojivo do příslušných míst ostřiva.*



Obr. 1-93 Dno tiskového boxu a tisková hlava [30]

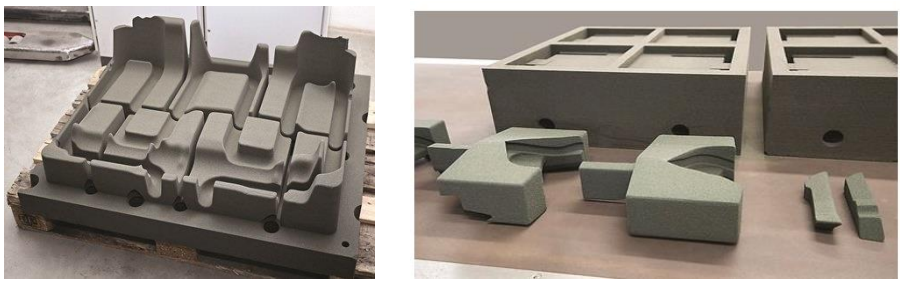


Obr. 1-94 Schéma pracoviště pro 3D tisk pískových slévárenských forem [30]

Stručný postup výroby pískových forem 3 D tiskem

- *ostřivo s aktivátorem* se vnese na dno pracovního tiskového boxu (deska) a vytvoří se tenká vrstva ostřiva po celé jeho ploše;
- *nad touto vrstvou ostřiva* přejede tisková hlava se soustavou trysek, která nanese potřebné množství pojiva na zrna do určitých míst, která mají být slepena dohromady (vytváří vyráběný masiv formy nebo jádra);
- *pojivo v příslušných místech reaguje* s aktivátorem a aktivovaná směs v těchto místech vytvrdne;
- pak box sjede o 0,28 až 0,5 mm směrem dolů;
- celý postup se opakuje až se vytvoří potřebná výška vyráběné formy (max. 700 mm).
- po výrobě formy je vnitřní prostor tiskového boxu je tvořen vytvrzenou formou a nevytvrzeným aktivovaným ostřivem;
- použitím průmyslového vysavače se z prostoru pracovního boxu vysaje nevytvrzené ostřivo;
- z boxu se vyjme vyrobená forma nebo vyrobená jádra.
- formu je možno po uložení úkladků použít k odlévání.

Na obr. 1-95a) a 1-95b) jsou formy vyrobené 3D tiskem. Tyto formy se vyznačují velkou pevností v tlaku a horší rozpadavostí po výrobě odlitků, při použití fenolických pryskařic nebo na bázi vodního skla, které se musí vyrvrzovat mikrovlnným ohřevem. Používají se pojiva jsou na bázi furanů (v podstatě jde o furanová pojiva).



Obr. 1-95a) Formy vyrobené 3D tiskem [30]



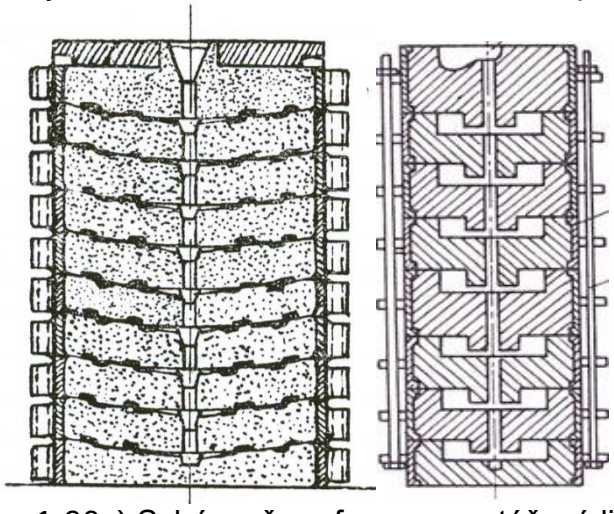


Obr. 1-95 b) Formy vyrobené 3D tiskem [30]

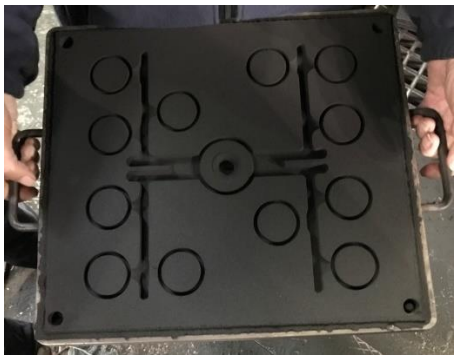
1.6.5 Výroba pískových etážových forem

Zvláštní způsobem výroby pískových, resp. bentonitových forem je jejich naskládání do tzv. etáže, viz schéma na obr. 1-96a). Tento způsob se používá při výrobě drobných tenkostěnných odlitků malých výšek. Mezi tyto odlitky se řadí např. litinové pístní kroužky spalovacích motorů, malé litinové páčky atd. Pro výrobu těchto odlitků se používají i menší formovací rámy např. cca 350 x 350 x 60 mm. Výroba dutiny formy se provádí na modelové desce, kde uprostřed je průchozí otvor pro vtok a od něj do stran jsou situovány 4 dutiny pro výrobu 4 pístních kroužků. Takto vyrobené formy se po 10 až 12 kusech sestaví nad sebe. Dutiny jednotlivých forem jsou v celém svislém směru propojeny vtokem. Vrchní forma má vtok opatřen mělkou licí nálevkou. Po nalití a ztuhnutí taveniny formy rozbijeme a získáme „stromeček“. Jeho „kmínek“ tvoří propojené vtoky jednotlivých forem. K nim jsou pod sebou v každé rovině připojeny odlitky nebo jeden odlitek.

Na obr. 1-96b) je pohled do otevřené bentonitové formy pro etážové lití pístních kroužků. Na obr. 1-96c) jsou formy pro etážové lití pístních kroužků spalovacích motorů. Na obr. 1-96c) uprostřed je pohled na odlitý „stromeček“ pístních kroužků. Pístní kroužky jsou odlévány z litiny s lupínkovým grafitem. Pístní kroužky jsou důležité strojní části, které jsou při funkci motoru tepelně namáhané, proto přípravě litiny s lupínkovým grafitem se věnuje velká pozornost, taví se obvykle v indukčních středofrekvenčních pecích.



Obr. 1-96a) Schéma řezu forem pro etážové lití



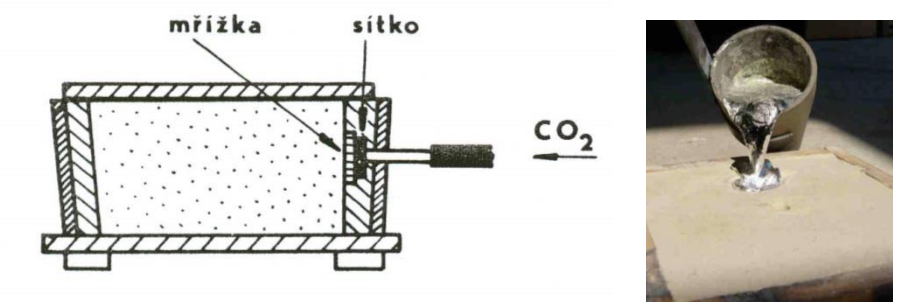
Obr. 1-96b) Pohled do otevřené formy pro etážové lití pístních kroužků



Obr. 1-96c) Formy pro etážové lití, odlitky a odlévání do forem pro etážové lití

1.7 Výroba forem metodou chemicky tvrzených směsí (metoda CT)

Metoda výroby chemicky tvrzených pískových forem je založena na směsi křemenného ostřiva a vodního skla. Tuto metodu vynalezl český slévárenský chemik Dr. Lev Petržela v 50. letech minulého století. Tato směs se nazývá CT. Při výrobě formy se směs mírně upěchuje ve formovacím rámu a nechá se formou proudit CO_2, který způsobí okamžité ztvrdnutí formy. K profukování CO_2 formou slouží speciální tryska, která je připojena na centrální rozvod plynu. Schéma je na obr. 1-97 (vlevo), na tomto brázku (vpravo) je také odlévání do formy z CT směsi. Pracovní povrch formy vyrobené metodou CT se často upravuje pyrogelovým nátěrem, aby se zamezilo povrchové vadě odlitků tzv. zapékání (tavenina proniká mezi zrna ostřiva). Na vzhled jsou tyto formy pískově žluté. Protože princip ztužování je velmi jednoduchý a ekologicky vyhovující, je tato metoda z ekologického hlediska neustále velmi perspektivní pro výrobu slévárenských forem. Dnes se hledají vhodné příměsi, které vedou k lepší rozpadavosti formy při vytloukání odlitků.

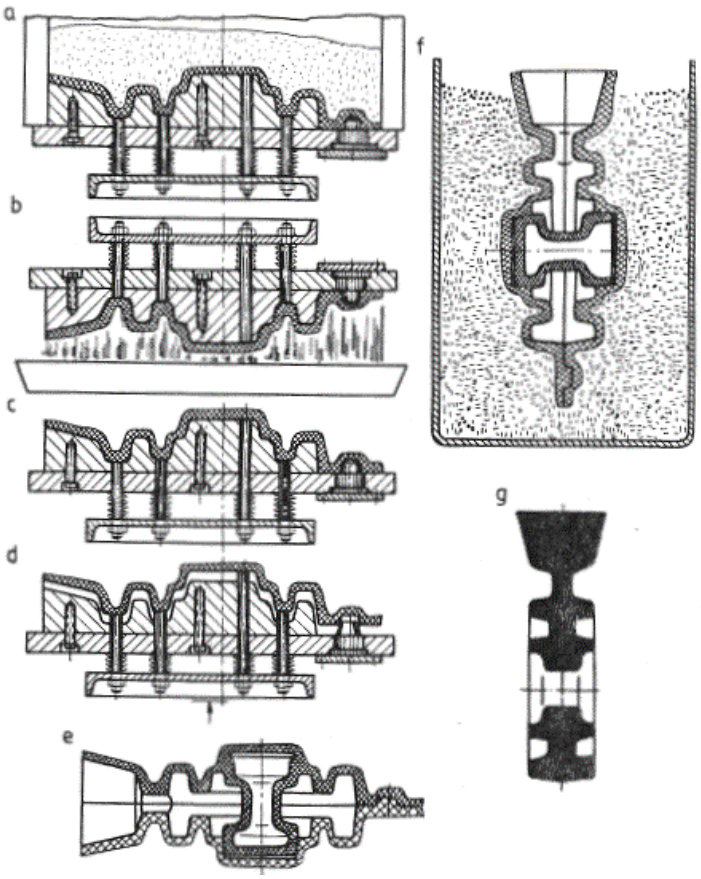


Obr. 1-97 Schéma výroby forem z CT směsi bočního foukáním CO_2 (vlevo); odlévání do formy z CT směsi (vpravo)

1.8 Výroba skořepinových forem (metoda Croninga, metoda C)

Charakteristickým rysem této metody je výroba dutin v poměrně tenkých skořepinách. Principem metody je nasypání směsi ostřiva a pryskyřice na kovovou modelovou desku, která je zahřátá na teplotu 200 až 250°C. Pracovní povrch modelové desky je ošetřen separačním přípravkem (silikonovým olejem). Směs se ponechá na modelové desce 8 až 20 sekund, podle požadované tloušťky skořepiny. Během této doby se pryskyřice do určité vrstvy na modelové desce nataví a vytvoří plastickou vrstvičku 8 až 12 mm. Zbylá nenatavená směs se odstraní otočením modelové desky o 180°. Pak následuje vytvrzení skořepiny při teplotě 300 až 450°C po dobu 30 až 180 sekund. To se provádí tak, že modelová deska se skořepinou se vkládá do pece. Po vytvrzení se skořepina vyjímá. Analogicky se vyrobí druhá polovina formy. Pak následuje případné vložení jader a sestavení obou půlek formy. Protože forma není samonosná, zasypává se před odlitím do písku. Princip metody je patrný z obr. 1-98. Na obr. 1-99 je ukázky forem vyrobených metodou podle Croninga.

Pro přípravu směsi se používá jemné kulaté křemenné ostřivo (střední velikost zrna d_{50} je 0,06 až 0,15 mm). Pro odlévání ocelí na odlitky je křemenné ostřivo nevhodné a používá se jemné kulaté ostřivo zirkoniové, popř. olivíny. Pojivem je novolaková pryskyřice, která je teplem tavitelná. Pro vytvrzení této pryskyřice je nutno přidat ještě hexametyléntetramin (zvaný urotropin $C_6H_{12}N_4$) ve formě prášku. To je látka, která se teplem rozkládá a způsobuje, že lze novolakovou pryskyřici teplem vytvrdit. Pro výrobu forem se používají dva typy formovací směsi. *Suchá směs* (zrníčka ostřiva a zrníčka pryskyřice) a *obalená směs* (zrníčka ostřiva jsou potažena pryskyřicí), schéma viz obr. 1-100.



a - nasypání směsi na model; b - otočení modelu a vysypání směsi;
c - vytvrzení skořepiny za tepla; d - sejmutí skořepiny z modelu;
e - složení obou půlek forem slepením; f - zasypání skořepinové formy do písku; g - surový odlitek

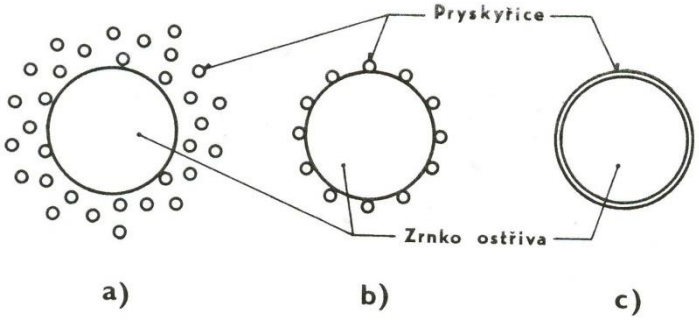
Obr. 1-98 Princip výroby forem metodou dle *Croninga* (skořepinové formy)



Obr. 1-99 Formy vyrobené metodou podle Croninga

Do těchto forem lze odlévat všechny typy slévárenských slitin do hmotnosti cca 50 kg. Proti odlitkům z pískových forem mají odlitky odlévané v těchto formách velmi dobrou drsnost povrchu i u členitých tvarů. Nevzniká brzděné smršťování odlitků, neboť se skořepina v průběhu tuhnutí odlitku porušuje a odlitky nemají

vnitřní pnutí. Do teploty kolem 450°C vykazují skořepiny pevnost v tlaku až 4,5MPa.



a) suchá směs v bubnovém mísiči;
b) suchá směs v kolovém mísiči;
c) obalená směs

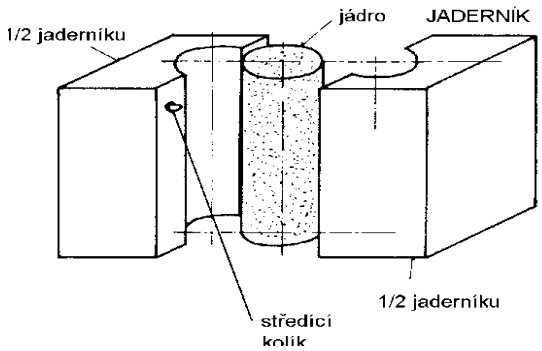
Obr. 1-100 Schéma suché a obalené směsi

Lze předpokládat, že tyto formy nezpůsobují vady odlitků např. zadrobeniny. Mají poměrně velkou prodyšnost, ale nízkou tepelnou vodivost, což umožňuje menší rozměry vtokové soustavy, nálitků i nižší teploty lití cca o 30°C proti lití do bentonitových forem. Jejich výhodou je malá spotřeba formovací směsi, dobrá skladovatelnost i ve vlhčím prostředí, nejsou vodou nasákavé (hygroskopické). Větší přesnost a hladkost povrchu odlitků. Nevýhody této metody jsou: nákladné vyhřívání modelové desky; pryskyřice použité při zahřívání uvolňují škodlivé zplodiny. Použití jen pro velkosériovou výrobu. Uplatnění je hlavně při výrobě válců vzduchem chlazených motorů.

1.9 Jádra a výroba jader

Jádra jsou části dutin slévárenských forem a vkládají se do míst, kam nemá natéci tavenina. To znamená, že např. slouží k výrobě děr nebo dutin v odlitku. Na obr. 101 je ukázka slévárenských jader. Na obr. 102 je schéma pravého a nepravého jádra.





Obr. 1-101 Jádra a schéma jaderníku s jádrem

Rozlišujeme jádra:

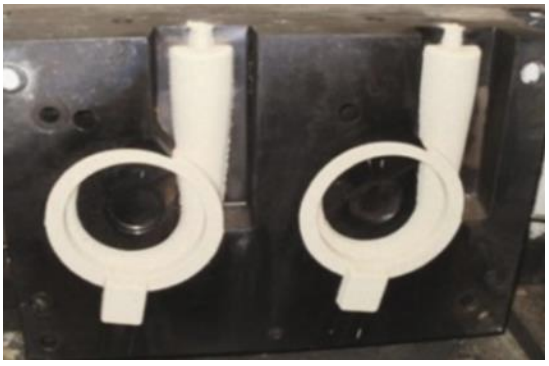
- pravá,
- nepravá.



Obr. 102 Schéma pravého a nepravého jádra

Pravá jádra jsou ze všech stran obklopena taveninou, slouží např. k výrobě děr v odlitcích.
Nepravá jádra jsou obklopena taveninou jen z části. Část jádra, která zajišťuje jeho polohu ve formě se nazývá známka. Známky svisle uložených jader ve formě se ve spodní části dělají delší a tato část má mírný úkos. Známka pro horní část jádra má úkos větší. Jádra vodorovně uložená ve formě mají známky stejně dlouhé. Jádra se vyrábí ve slévárnách, v tzv. jadernících. Jaderník je „nádobka“, která má dutinu. Tvar této dutiny je negativem tvaru jádra. Jádra mohou být „písková“ resp. z jádrových formovacích směsí nebo kovová. Výjimečně vyráběná z jiného materiálu (sádra, cement). Písková jádra se vyrábí v provozech zvaných jadernách a jsou součástí slévárny. Kovová jádra se vyrábí třískovým obráběním z materiálů, které odolávají vysokým teplotám (žáruvzdorné, nástrojové oceli, atd.). Do netrvalých pískových forem se vkládají jádra písková. Z důvodu nutné jejich poměrně vysoké pevnosti se volí pojiva vytvrditelná, tj. pojiva II. generace. Tato jádra se též používají i pro výrobu odlitků v kovových formách při gravitačním lití. Jádra v kovových formách pro nízkotlaké nebo vysokotlaké lití jsou z vhodné žáruvzdorné oceli, která snáší cyklické tepelné namáhání (nalití taveniny, otevření formy).

Jaderníky - jsou to kovové nebo dřevěné formy určené k výrobě jádra. Jejich dutina se naplní jádrovou směsí (to jsou speciální směsi) a podle druhu směsi (směsi na bázi pryskyřic, vodního skla, sacharidů, atd.) dochází v důsledku pojivových procesů, kdy využíváme chemických reakcí k výrobě kompaktního *jádra,* viz obr. 103a).

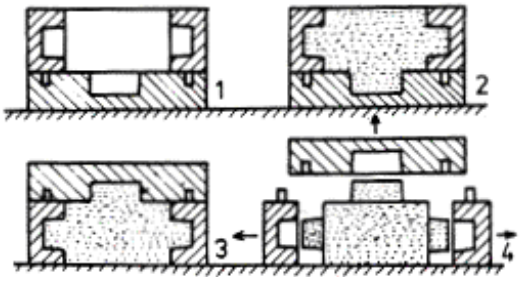


Obr. 103a) Pohled do otevřeného kovového jaderníku

Ruční výroba jader je určena pro malá jednoduchá „písková“ jádra. Tato jádra se vyrábí v jednoduchých jadernících z nichž se jádra vyjímají. Složitější jádra se vyrábí v jadernících složených z více částí tak, aby se jádro vyjmulo snadno, viz obr. 1-103b) a 1-104. Před pěchováním jádrové směsi do jaderníku se dutina natře separačním prostředkem. Pak se jádra suší v sušící komoře, čímž získává větší pevnost. Některá jádra je nutno vyztužovat např. ocelovými tyčkami.



Obr. 1-103b) Dřevěný jaderník pro výrobu jádra oběžného kola turbiny

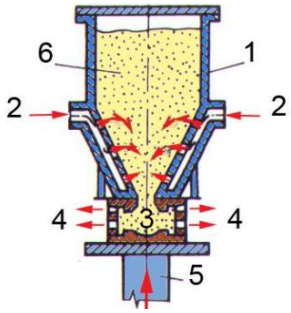


Obr. 1-104 Schéma několika dílného jaderníku

Strojní výroba jader se používá při sériové výrobě jader, zde se uplatňují dvě technologie pěchování jádrové směsí při plnění jaderníků:

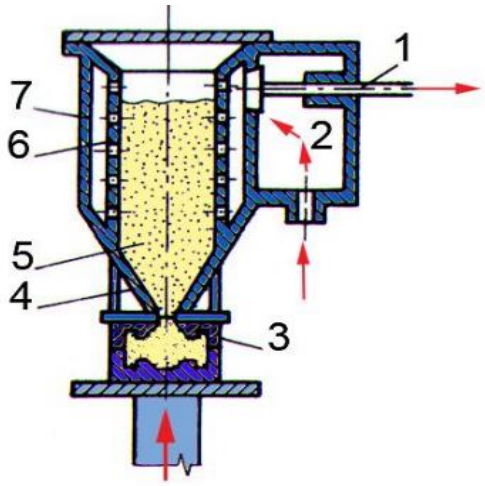
a) foukání jader;
b) vstřelování jader

Princip foukání směsi do jaderníku, viz obr. 1-105 a), do komory (1) foukacího stroje ústí přívody vzduchu (2) o tlaku 0,5 až 0,7 MPa. Proudem stlačeného vzduchu je strhávána jádrová směs (6) do jaderníku (3). K dokonalému zaplnění jaderníku je nutné jeho dobré odvzdušnění (4). Během celé operace foukání je jaderník přitlačován k foukacímu stroji pneumatickým přítlačným stolem (5).



Obr. 1-105 a) Princip foukání jádrové směsi do jaderníku

Princip vstřelování směsi do jaderníku, viz obr. 1-105b), je ten, že se zásobník jaderníku naplní jádrovou směsí bez přítomnosti vzduchu. Otevřením ventilu (1) proběhne expanze stlačeného vzduchu ze zásobníku vzduchu (2). Vzduch vytlačuje celý sloupec jádrové směsi ze vstřelovací hlavy (4) do jaderníku (3). Těleso vstřelovací hlavy má plechovou vložku (6) s podélnými otvory, která umožní vytvoření vzduchového polštáře a tím se sníží tření mezi tělesem hlavy (7) a jádrovou směsí (5). Vstřelení jádrové směsi o hmotnosti několika desítek kilogramů trvá jen 0,1 až 0,3 sekundy. Při použití další mechanizace je možno vyrobit až 500 jader za hodinu.



Obr. 1-105b) Schéma principu a vstřelováním jádrové směsi do jaderníku

Součástí výroby obou těchto metod plnění jaderníků je způsob jakým se jádrová směs v jaderníku vytvrzuje nebo zpevňuje. Protože jádro vyjímané z jaderníku musí mít určitý tvar, rozměry a pevnost.

Vytvrzování a zpevňování jader v jadernících se provádí zvláštními způsoby s použitím různých zařízení. Některé způsoby výroby se v mnohém shodují s některými způsoby výroby forem.

Výroba jader metodou podle Croninga (metoda C) - jádrová směs je tvořena ostřivem, pryskyřicí (směsi suché a obalené) a tužidlem. Používá se novolaková pryskyřice, princip je stejný jako při výrobě forem. Jaderník je kovový, ohřívá se na teplotu 200 až 280°C. Po nasypání nebo fouknutí této jádrové směsi do jaderníku se teplem jaderníku začne pojivo u stěny jaderníku natavovat a v několika desítkách sekund se vytvoří s ostřivem vrstvička (skořepina) o tloušťce 5 až 12 mm. To znamená, že vyrobené jádro ***je duté***. Nenatavený zbytek jádrové směsi se vysype otočením jaderníku. Pak následuje vytvrzení skořepiny při teplotě jaderníku nad 300°C cca po dobu 2 minut a vyjmutí jádra z jaderníku. Jádro vyrobené metodou podle Croninga je na obr. 1-106. Metoda C je vhodná pro sériovou výrobu malých a středně velkých jader se značnými požadavky na přesnost rozměrů odlitků. Nevýhodou je poměrně dlouhá doba výroby jader, energeticky náročný jaderník, použití drahých pojiv a separačních látek.



Obr. 1-106 Jádra vyrobená metodou dle Croninga (jsou dutá)

Výroba jader metodou horkého jaderníku - Hot Box (metoda HB) - je velmi obdobná metodě C. Podstatný rozdíl je v tom, že pojiva jádrové směsi nutně vyžadují upěchování směsi v jaderníku (u metody C stačí např. jen jednostranný ohřev jádra od jaderníku). Pojivem bývají furanové a močovinové pryskyřice, které jsou vytvrzovány teplem. Jaderník je kovový, vyhřátý na teplotu 220°C, do něhož se vstřeluje jádrová směs (je zabezpečeno dokonalé upěchování). Směs ve styku s jaderníkem se vytvrzuje do určité tloušťky, která závisí na pojivu, teplotě a času. Vytvrzování probíhá 15 až 45 sekund. Po vyjmutí jádra z jaderníku dochází k dotvrzování v celém průřezu jádra nakumulovaným teplem z jaderníku. Metoda HB je založena na výrobě plných jader. To je hlavní rozdíl od metody C (zde jsou jádra dutá). Metoda HB má široké uplatnění při výrobě drobných a středně velkých jader složitějších tvarů uplatňovaných při výrobě složitých odlitků (bloky motorů, armatury, radiátory, atd.). Rozměrová přesnost získaných odlitků je dobrá, na jmenovitý rozměr 20 až 50 mm lze dosáhnout přesnost 0,1 až 0,2 mm. Ve srovnání s metodou C je metoda HB produktivnější, avšak vyžaduje složitější zařízení. Jádra vyrobená metodou Hot Box jsou na obr. 1-107.



Obr. 1-107 Jádra vyrobená metodou Hot Box (HB)

Výroba jader metodou teplého jaderníku - Warm Box (metoda WB) - metoda analogická s metodou HB, někteří autoři tuto metodu označují jako variantu HB. Pryskyřice pro tento postup jsou furanové s nepatrným obsahem dusíku a velmi nízkým obsahem volného formaldehydu. Teplota jaderníku je cca o 70°C nižší než u metody HB. Zpracovatelnost jádrových směsí je kratší, proto směs se musí do jaderníku rychle vstřelovat. Vyrobená jádra touto metodou mají podstatně nižší sklon ke vzniku vad odlitku (pórovitosti a zálupům, viz vady odlitku).

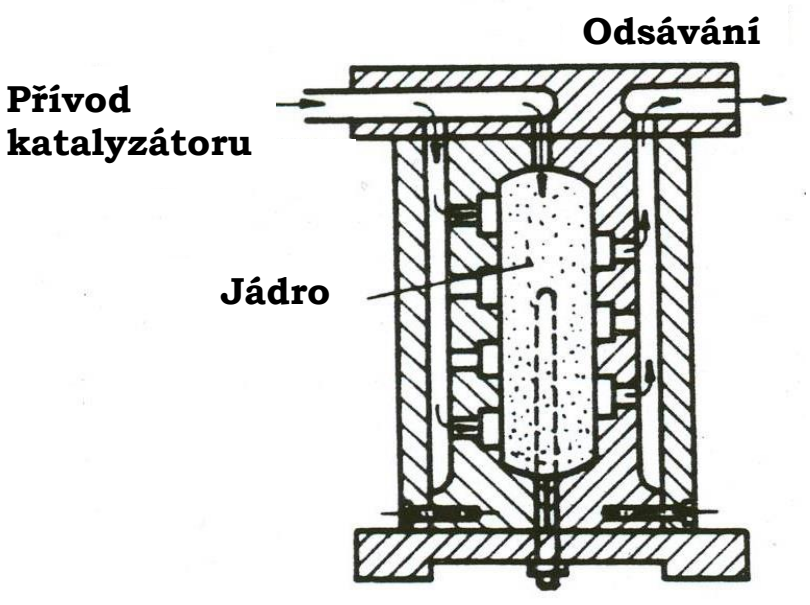
Výroba jader metodou studeného jaderníku - *Cold Box* (metoda CB) - metoda je založena na procesu, při kterém se používá studený jaderník. Tento způsob odstraňuje nedostatky, které mají metody HB a WB - tj. především nákladné kovové vytápěné jaderníky. Proto byly hledány metody, které by při výrobě jader využily jaderníky, ve kterých by vytvrzování probíhalo za normální teploty (za studena). Tato metoda byla vyvinuta v roce 1968, je známá pod označením CB (Coud - Box). Základem této metody je pryskyřice, která je zásaditého charakteru. Vytvrzovací proces pryskyřice způsobuje přidání katalyzátoru, tj. silné kyseliny. V současné době je to několik variant. Jedna z nich je např. Ashland - Coud - Box. Využívá se jádrová směs, která obsahuje dvě kapalné složky pojiva fenolovou pryskyřici (benzyletér) a polyizokrylát. Po naplnění jaderníku se jádrová směs profoukne aminovým (trietylaminem) katalyzátorem ve formě mlhoviny, který směs během několika sekund vyplní.

Výrobní zařízení se skládá ze vstřelovacího stroje a z generátoru plynného katalyzátoru. Do speciálně upraveného jaderníku se vstřelí směs ostřiva s pojivem a potom se přes takto zhuštěnou směs profoukne katalyzátor. Plynný katalyzátor je k jaderníku přiváděn prostřednictvím trysek, které musí být rozmístěny tak, aby zasáhly všechna místa jaderníku.

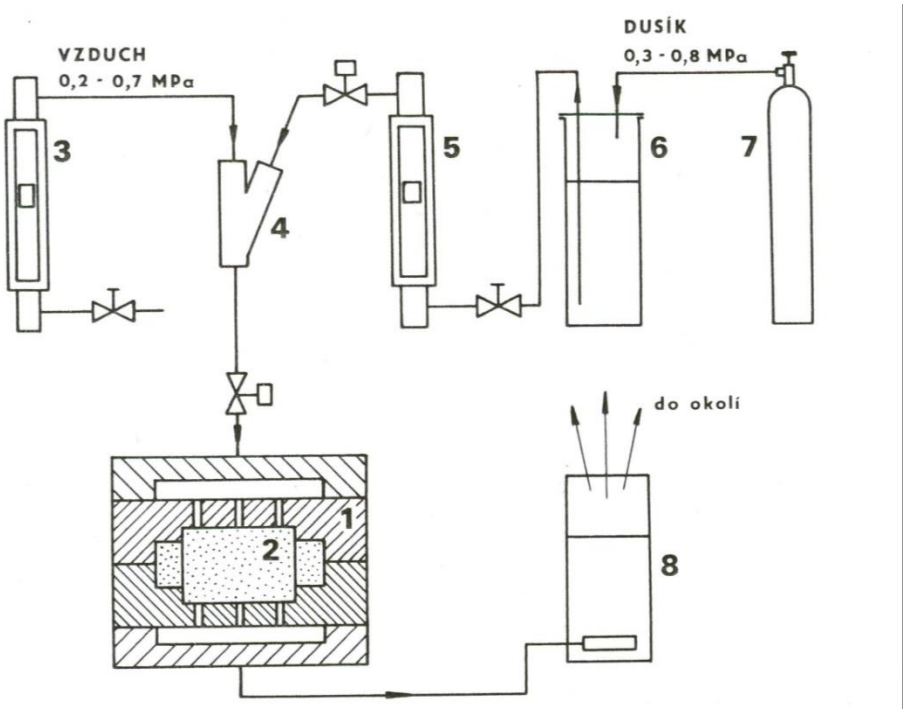
Metoda CB je nejpoužívanější metodou výroby menších jader pro sériovou výrobu odlitků.

Je vhodná pro odlitky z litiny s lupínkovým grafitem, slitin hliníku a mědi. Vykazuje vyšší produktivitu výroby jader a výhodnější náklady než metoda C, HB a WB. Při použití metody CB je nutno dodržovat bezpečnostní předpisy.

Odlévané slitiny, které mají vyšší teplotou než je 1620°C, narušují povrchovou vrstvu jádra a výsledkem je velmi hrubý povrch odlitku. Rozšíření této metody (přes značné výhody) brání zdravotní závadnost pojiva a katalyzátoru a také nutnost likvidace katalyzátoru prošlého jaderníkem. Schéma speciálně upraveného jaderníku pro výrobu jader vyráběných metodou Cold Box (CB) je na obr. 1-108a). Na obr. 1-109 jsou jádra vyrobená CB metodou.

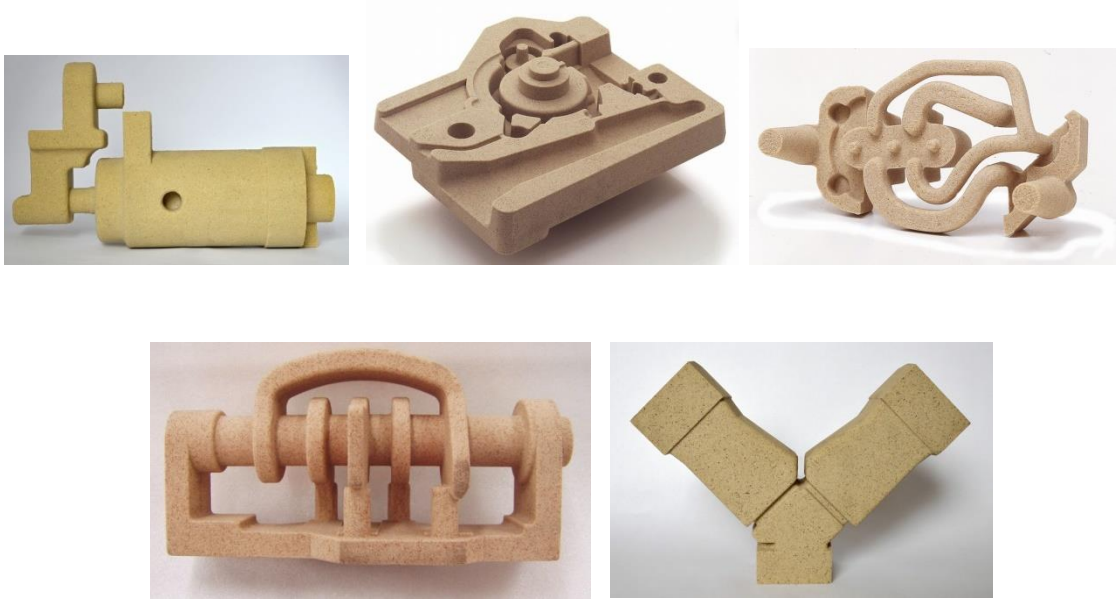


Obr. 1-108a) Schéma speciálně upraveného jaderníku pro metodu Cold-Box (CB)



1 - jaderník; 2 - jádro; 3 - průtokoměr vzduchu; 4 - směšovací komora katalyzátoru a vzduch; 5 - průtokoměr katalyzátoru; 6 - zásobník tekutého katalyzátoru; 7 - tlaková láhev s dusíkem; 8 - neutralizační lázeň pro zneškodňování přebytku katalyzátoru

Obr. 1-108b) Schéma vytvrzovacího zařízení pro výrobu jader metodou CB



Obr. 1-109 Jádra vyrobená metodou Cold Box, firma Formservis Brno [9]

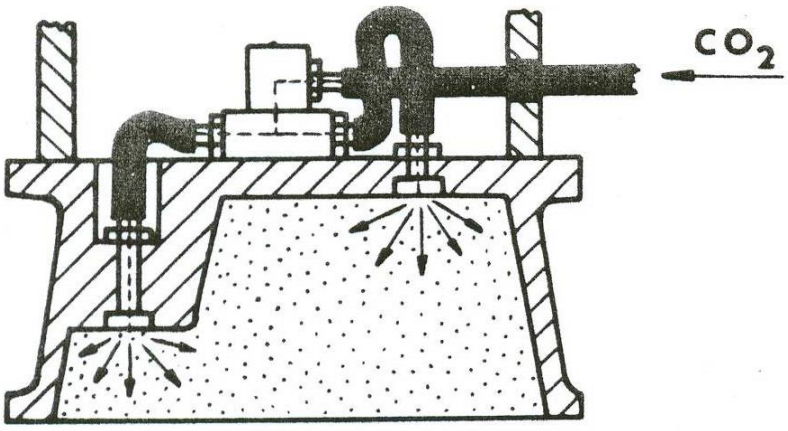
Výroba jader ze samotvrdnoucích směsí - využívá pojiva na bázi furanů a jsou dnes doplněna celou řadou dalších pojiv. Princip metody spočívá v tom, že smícháme příslušné ostřivo s katalyzátorem, přidá se vlastní pojivo a směs se co nejrychleji zpracuje v jaderníku. Rychlost tvrdnutí závisí na množství katalyzátoru a obvykle je možno jádra vyjmout po 20 až 60 minutách. Protože

jádra přesně kopírují tvar dutiny jaderníku, je vyjímání hotového jádra poměrně obtížné, proto je nutná úprava konstrukce jaderníku a také použití separačního (oddělovacího) prostředku (parafín, roztok vodního skla). Po vyjmutí je nutné jádro opravit, proto se natírá lihovým nátěrem. Vyrábí se jádra pro kusovou a malosériovou výrobu odlitků. Na obr. 1-109 je ukázka výroby velkých jader pomocí samotvrdnoucích jádrových směsí.



Obr. 1-109 Velká jádra se vyrábí ze samotvrdnoucích jádrových směsí, výrobce TOS MET, slévárna, a.s. [10]

Výroba jader chemicky tvrzených směsí (metoda CT) - je to výroba jader ze směsi křemenného ostřiva s vodním sklem. Tato směs se v jaderníku profoukne plynem CO_2, zde je důležitá správná konstrukce jaderníku s tryskami pro rozvod plynu. Schéma rozvodu plynu je na obr. 1-110. Nevýhodou těchto jader je jejich horší rozpadavost, avšak menší plynatvornost než u jader pojených na bázi pryskyřic. Jádra, podobně jako formy z CT směsí, mají tzv. velkou zbytkovou pevnost. To je příčinou, proč je tato metoda nahrazována progresivnější metodou výroby jader.



Obr. 1-110 Schéma centrálního rozvodu CO_2 při výrobě jader i forem z CT směsí

Na obr. 1-111 jsou jádra vyrobená metodou CT. CT směsi jsou směsi pojené vodním sklem, které je profouknuto plynem CO_2 (CO_2 vysušuje vodní sklo a podporuje kompaktní pojivový systém mezi ostřivem a pojivem (vodním sklem). Jak již bylo uvedeno, tato jádra vykazují velkou zbytkovou pevnost a po odlití se špatně odstraňují z dutin odlitků. Používají se ve slévárnách, kde je kladen důraz na ekologické hledisko.



Obr. 1-111 Jádra vyrobená metodou CT

Na obr. 1-112 je ukázka zakládání velkých jader do dutiny slévárenské formy



Obr. 1-112 Zakládání velkých jader do dutiny pískové slévárenské formy

Na obr. 1-113 je ukázka založených jader vyrobených CB v kovové formě.



Obr. 1-113 Jádra vyrobená metodou CB v kovovém jaderníku

1.10 Výroba odlitků pomocí vytavitelného modelu

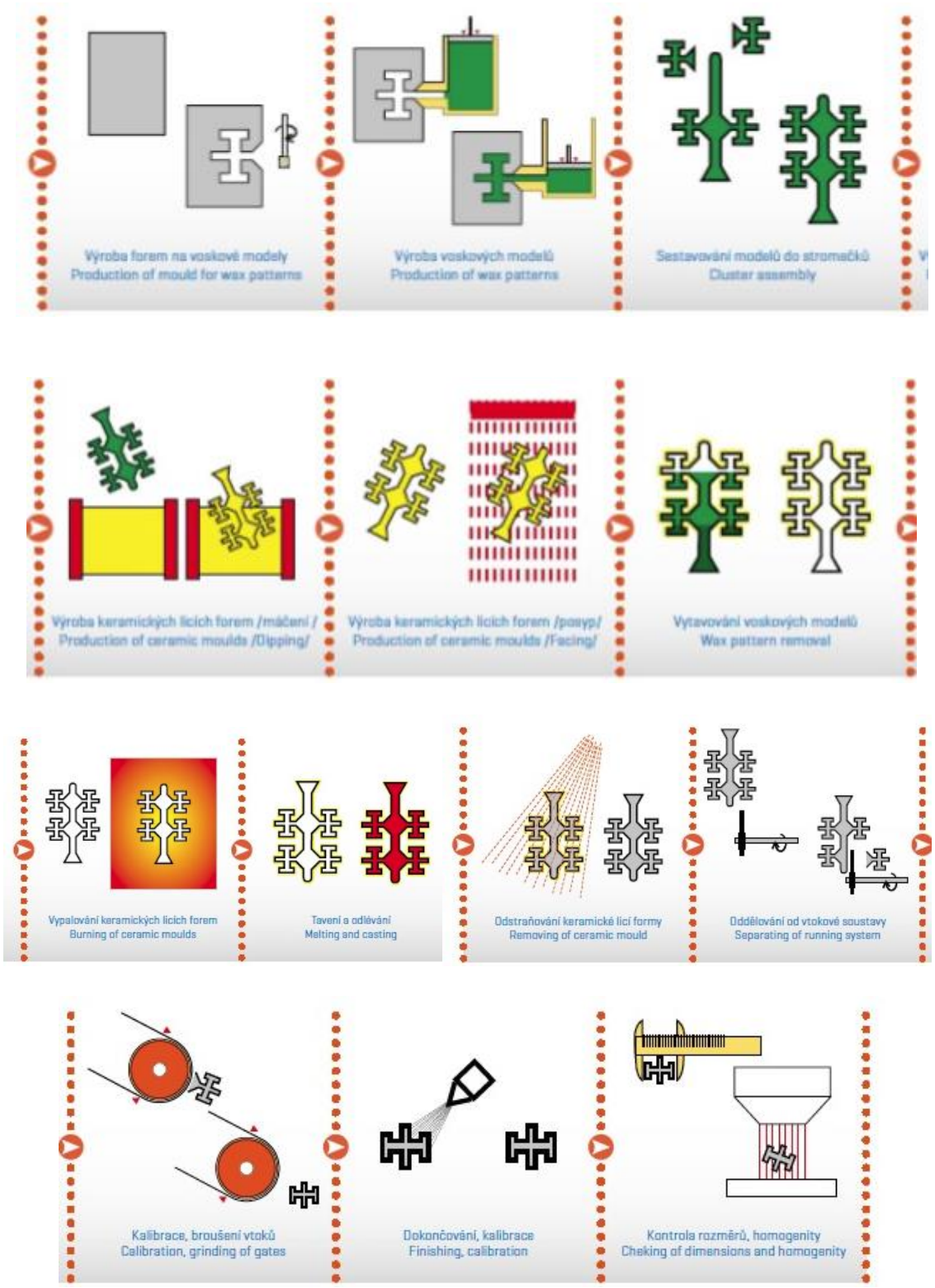
Některé speciální způsoby výroby slévárenských forem vedou k výrobě velmi hladkých a rozměrově přesných odlitků. Mezi tento způsob výroby patří výroba odlitků pomocí vytavitelného modelu.
Metoda výroby odlitků na vytavitelný model – patří do skupiny *přesného lití,* tj. technologii, která umožňuje vyrábět ***tvarově a rozměrově nejpřesnější odlitky.***
Odlitky vyráběné přesným litím se vyznačují tím, že část funkčních ploch se vyrábí již při lití s takovou rozměrovou tolerancí a s takovou drsností povrchu, ***že dokončování obráběním není nutné.*** Ostatní plochy odlitků, které je potřeba obrábět, mají relativně malé přídavky na obrábění, tím je i malá spotřeba času na obrábění. Výroba forem je specifická, modely jsou z vosku a vyrábí se ve speciálním kovovém modelovém zařízení. Specifická je též výroba „skořápky“ na voskovém modelu.

Parametry odlitků:

- rozměry odlitků: 100 – 200 mm (ve světě max. 1000 mm)
- hmotnost odlitků: 0,1 – 8 kg (48 kg –SPL Zlín, ve světě max. 200 kg)
- tvar odlitků : téměř bez omezení
- tloušťka stěny odlitků: ocel = 1,2 mm, neželezné kovy = 0,6 mm

Materiál odlitků: ocel, slitiny Co, Ni, Cu, Al, Ti, Mg, legované oceli
Sériovost: kusová až *velkosériová výroba*
Rozměrová přesnost odlitků: 0,003 až 0,1 mm

Na obr. 1-113 je uvedeno schéma výroby odlitků ve formách na vytavitelný model.

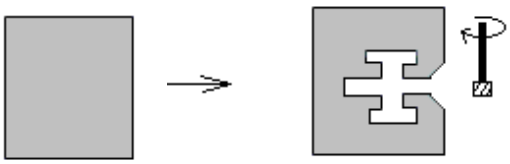


Obr. 1-114 Schéma výroby odlitků ve formách na vytavitelný model ALUCAST [18]

1.10.1 Postup výroby forem na vytavitelný model

Výroba modelového zařízení – je důležitou součástí výroby forem na vytavitelný model. Modelové zařízení je kovové, jehož dutina je svým tvarem

negativem budoucího voskového modelu. Vyrábí se kovoobráběním, viz obr. 1-115. Modelové zařízení umožňuje výrobu příslušných voskových modelů. Současně se vyrábí také modelové zařízení pro výrobu voskových vtokových soustav (voskových vtoků).



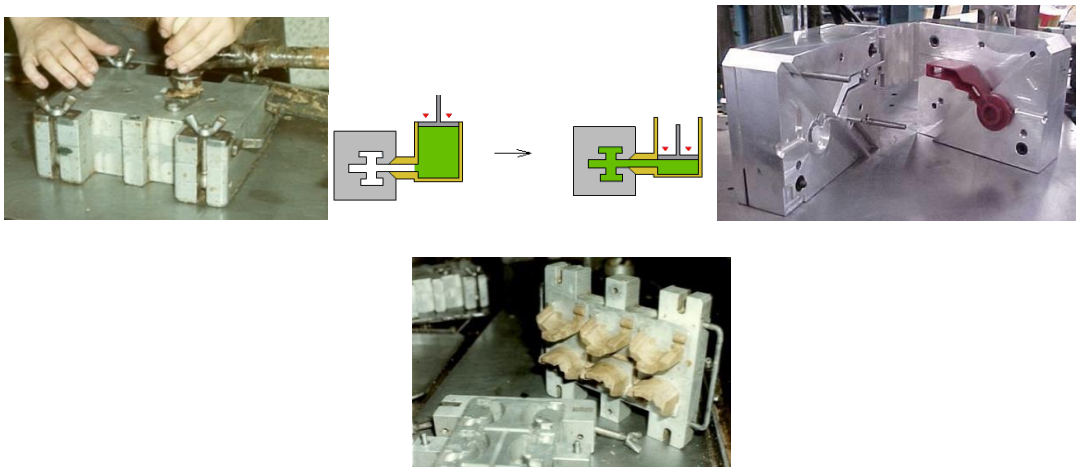
Obr. 1-115 Schéma výroby modelového zařízení

Vosky, voskové směsi, výroba voskových modelů a výroba voskových modelů vtokových soustav

V současné době se používají *směsi vosků (voskové směsi). Vosky* jsou estery vyšších mastných kyselin (např. kyselina stearová). Obecně rozlišujeme vosky: *měkké (světlé), a tvrdé (tmavé)*.
Pro výrobu modelů se používají vosky čisté (neplněné), resp. směsi čistých vosků. Na vtokové soustavy se používají vosky plněné a emulgované. Vosky speciální, které se dělí na vosky adhezní, namáčecí, opravné, vosky na jádra, atd. Na obr. 1-116 je ukázka vosků a voskových směsí. Na obr. 1-117 je výroba voskových modelů.



Obr. 1-116 Ukázka vosků a voskových směsí [18], [19]



Obr. 1-117 výroba voskových modelů v modelovém zařízení [18], [19]

Výroba voskových modelů se provádí vstřikováním. Do kovového modelového zařízení se pod tlakem, 0,5 až 1 MPa, vstřikuje vosk nebo vosková směs na speciálních vstřikovacích lisech. Teplota vosku při vstřikování se pohybuje mezi 55 až 90 ºC, to znamená, že vosková hmota je vstřikována v tekutém stavu. Po ztuhnutí je voskový model vyjmut z modelového zařízení, viz obr. 1-116 (vpravo). Takto zhotovené voskové modely je nutno očistit od otřepů z dělicí roviny a připravit pro montáž do sestav - stromečků.
Podobným způsobem se vyrábí voskové vtokové soustavy, viz obr. 1-118.



Obr. 1-118 Ukázka voskových soustav (hnědý vosk – vlevo, voskový „stromeček“ - vpravo)

Výroba voskových „stromečků“
Voskové stromečky se vyrábí pájením nebo lepením voskových modelů na centrální vtokovou soustavu, viz obr. 1-119.

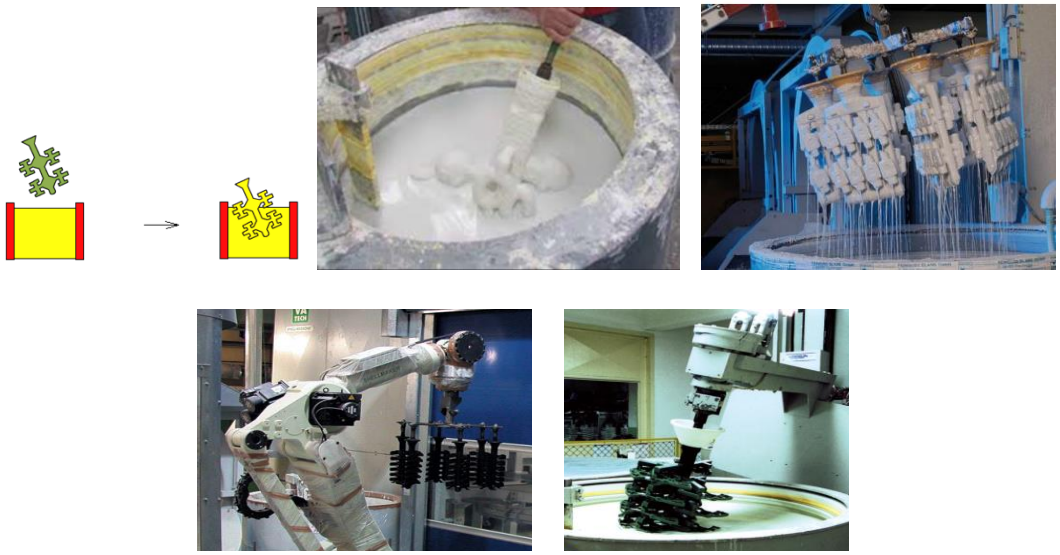


Obr. 1-119 Výroba voskových stromečků

Výrobě voskových „stromečků“ předchází
1) Výroba voskových modelů, výroba voskových vtokových soustav;
2) Pájení voskových modelů na voskové kůly (vtoková soustava) ⇒ **získáváme voskové stromečky.**

Výroba keramických obalů na voskových modelech (výroba skořepin)
Namáčení voskových stromečků do speciální keramické hmoty, zasypávání křemenným ostřivem, sušení ⇒ získáváme postupně na povrchu voskového stromečku **keramickou skořápku.**

1. Namáčení voskových stromečků - při namáčení se čisté voskové stromečky pozvolna ponořují do obalové hmoty(břečky) při současném otáčení a naklánění tak, aby obalová hmota rovnoměrně pokryla stromeček, a aby se neutvořily v koutech, rozích nebo drážkách vzduchové polštáře, nebo aby tam neulpěly vzduchové bublinky.



Obr. 1-120 Namáčení voskových stromečků do speciální břečky [18]

2. *Posypávání* ostřivem (žáruvzdorným materiálem) se provádí fluidně, ponořením do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva lícní obaly, které rozhodují o kvalitě povrchu odlitku se používá jemný zásypový materiál se *zrnitostí většinou 0,1 až 0,25 mm,* na další obaly pak *0,25 až 0,5 mm .*
Pro posyp se používají se písky na bázi křemíku, hliníku, zirkonu nebo molochitu (je vhodný především pro vakuové metody odlévání). Nanášení ostřiva se může provádět několika způsoby a to buď sypáním písku sprchovým zařízením (obr. 1-121), vířením pomocí stlačeného vzduchu nebo ručním posypem.



Obr. 1-121a) Sprchové nanášení ostřiva (vlevo) a fluidní posypávání ostřiva (vpravo) na vrstvu břečky po namočení vyráběné skořepiny [18], [19]



Obr. 1-121b) Ruční posypávání ostřiva na vrstvu břečky po namočení vyráběné skořepiny [18]

3. *Sušení keramických skořepin* – je nutno provádět za konstantních podmínek, nejlépe v klimatizovaném prostředí za teploty 20 °C (±1 °C), po dobu 2-4 hodin, a relativní vlhkosti 30-60 %. Při procesu sušení keramických skořepin musí každý obal schnout a musí být také zajištěno dostatečné proudění vzduchu. Při teplotě 27 °C a rychlosti proudění sušícího vzduchu 4 $m \cdot s^{-1}$ trvá sušení mezi jednotlivými obaly cca 55 sekund. Na obr. 1-122 je ukázka sušení keramických skořepin.



Obr. 1-122 Sušení keramických skořepin [19]

4. Vytavování vosku - se provádí v okamžiku po vytvoření posledního obalu a dokonalém usušení skořepiny. Vytavení se provádí v peci při teplotě tavení vosků (cca 60 až 90 °C). Při vytavování se musí pracovat opatrně. Nastává problém, který je v rozdílné tepelné roztažnosti vosku a skořepiny. Tepelná roztažnost vosku je vyšší než je tepelná roztažnost skořepiny. Tím při vytavování hrozí roztažením voskového modelu a porušení skořepiny. Proto se aplikuje rychlý ohřev, metoda tzv. tepelného šoku, [18].
Vytavování za vysoké teploty tato metoda je také nazývána metodou (flash fire). Obalené stromečky jsou vloženy do pece s minimální teplotou 750 °C, pracovní teplota je 900 až 1000 °C. Vosk je při této teplotě vytaven, zároveň však dochází také k vypálení skořepiny. Vytavování i vypalování trvá 15 až 25 minut.

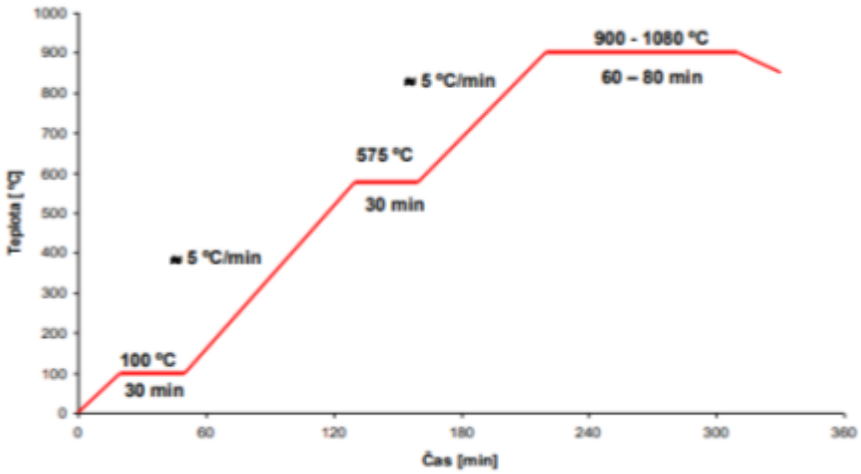
Tato technologie se již příliš nepoužívá z důvodu 10 až 15 % ztrát vosku a jeho částečnému znehodnocení, [20].



Obr. 1 -123 Vytavování vosku v peci

Žíhání keramické skořápky

Účelem žíhání je získání vyšších mechanických vlastností skořepiny, odstanění voskových podílů. Ve skořepině se nachází amorfní vrstva SIO_2. Ta se teplem převede na krystalickou fázi SiO_2. Při žíhání závisí zda-li jde o samonosnou skořepinu nebo nesamonosnou. Teplota žíhání bývá v rozmezí 900 až 1000 °C pro SiO_2, pro molochit, korund atd. jsou teploty i vyšší (1200 až 1400 °C),[20]. Na obr. 1-124 je ukázka pracovního cyklu žíhání skořepinové formy (skořepin).



Obr. 1-124 Pracovní cyklus procesu žíhání skořepinové formy [20]

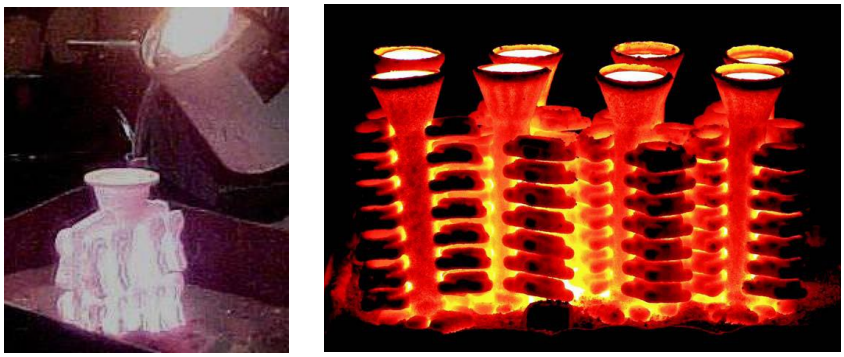
Pro proces žíhání se používají žíhací pece. Existují žíhací pece skříňové nebo průběžné, viz obr. 1-125.



Obr. 1-125 Žíhací pece pro žíhání skořepinových forem
a forma po vyžíhání [19]

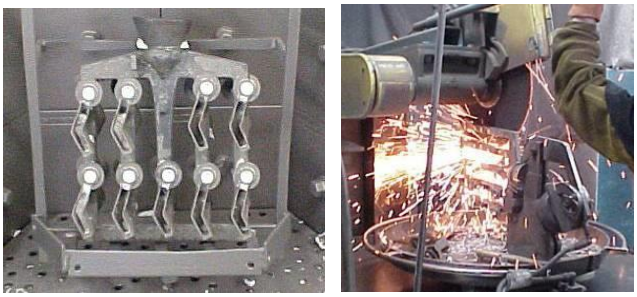
Odlévání do keramických forem

Po vyžíhání formy ihned následuje odlévání do formy. Teplota formy pro odlévání je cca 350 až 500 °C. Současně je důležité, zda-li jde o samonosnou nebo nesamonosnou skořepinu. Nesamonosná skořepina se zasypává ostřivem, čímž se forma před odléváním zpevňuje. Do takto předehřáté, a popř. zasypané formy, odléváme taveninu oceli. Na obr. 1-126 je ukázka odlévání.



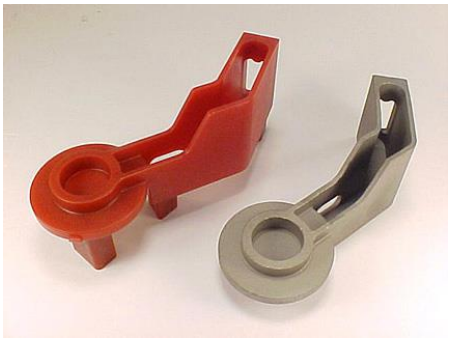
Obr. 1-126 Ukázky odlévání do keramických forem a formy po odlití

Po ztuhnutí získáme „kovový stromeček“, viz obr. 1-127 (vlevo) na jehož povrchu je skořepina. Pak následuje rozbití skořápky a oddělení jednotlivých odlitků od vtokové soustavy, viz obr. 1-127 (vpravo). Dále se provádí dočištění místa vtoku.



Obr. 1-127 Kovový „stromeček“ (vlevo) a odělování odlitků od vtokové soustavy (vpravo)

Na obr. 1-128 je ukázka voskového modelu a odlitku.



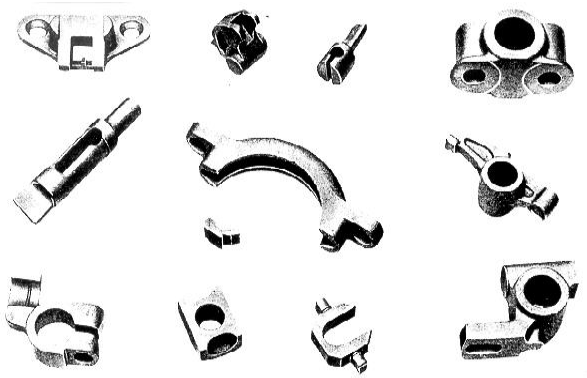
Obr. 1-128 Voskového modelu a odlitek

Materiál odlitků - odlévaným materiálem bývají nejčastěji oceli nebo slitiny hliníku, niklu atd. V tabulce 1.10 je přehled odlévaných materiálů do forem na vytavitelný model.

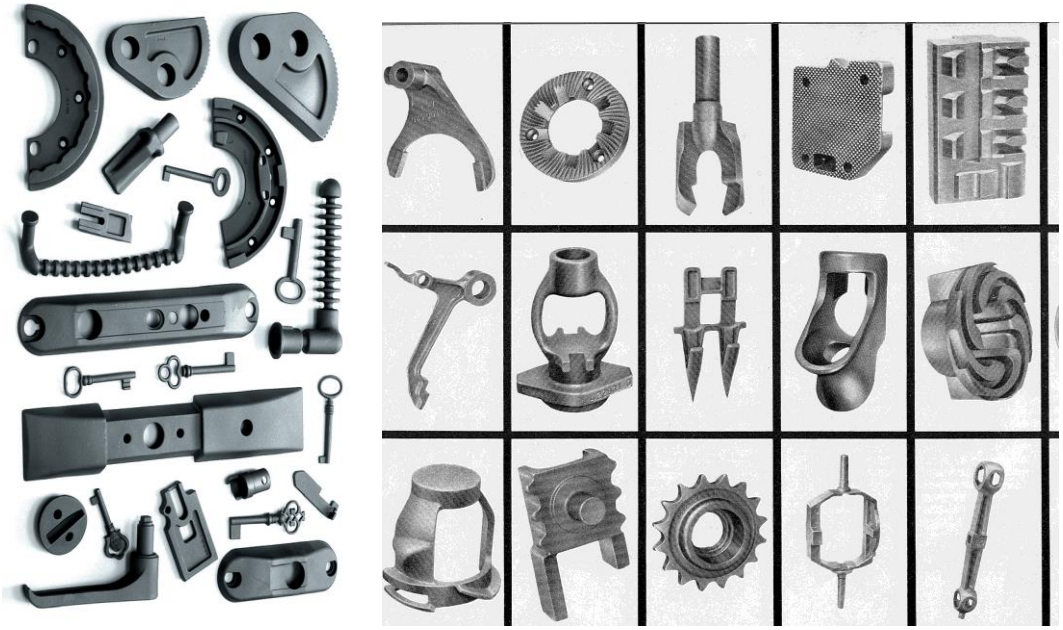
Tabulka 1.10 Přehled materiálů odlévaných do forem na vytavitelný model

Materiály odlitků odlévaných do forem na vytavitelný model	
1.	Austenitické slitinové oceli
2.	Martenzitické slitinové oceli
3.	Nástrojové oceli
4.	Nízkouhlíkové oceli
5.	Slitiny hliníku
6.	Slitiny niklu
7.	Slitiny kobaltu
8.	Slitiny mědi – mosazi

Odlitky vyráběné metodou na vytavitelný („ztracený model“) mají široké technické uplatnění především v automobilovém a textilním průmyslu. Tato se vyrábí např. obráběcí nástroje (výhrubníky, výstružníky, frézy). Tato metoda se používá např. k výrobě speciálních klíčů pro povolování matic šroubů, klíčů ke skříňkovým zámkům, ale také různé součástky šicích a textilních strojů nebo drobných součástek pro automobilový průmysl, viz obr. 129 a), 1-129 b) a 1-129c).



Obr. 1-129 Odlitky vyráběné metodou vytavitelného modelu [2]



Obr. 1-129 b) Odlitky vyráběné metodou vytavitelného modelu [2]

V současné době se do forem na vytavitelný model odlévají také endoprotézy a kloubní náhrady, viz obr. 1-129c). Materiálem odlitku „super-slitinou“ jsou slitiny kobaltu a chromu.



Obr. 1-129c) Ukázka odlitků pro kloubní náhrady od firmy United Superalloys [23]

1.11 Výroba odlitků v kovových formách

Všechny kovové formy se vyrábějí třískovým způsobem na obráběcích číslicově řízených strojích z ocelového masivu nebo skládáním ocelových dílů tvořící kovovou formu. Dnes se forma navrhne a nakreslí v nějakém z konstrukčních programů, např. *Pro Engineer***.** Prostřednictvím CD-Romu se data o formě přenáší na číslicový obráběcí stroj. V současné době existují speciální firmy, které se speciálně zabývají výrobou kovových forem. Rozlišujeme kovové formy pro vysokotlaký, nízkotlaký a gravitační způsob

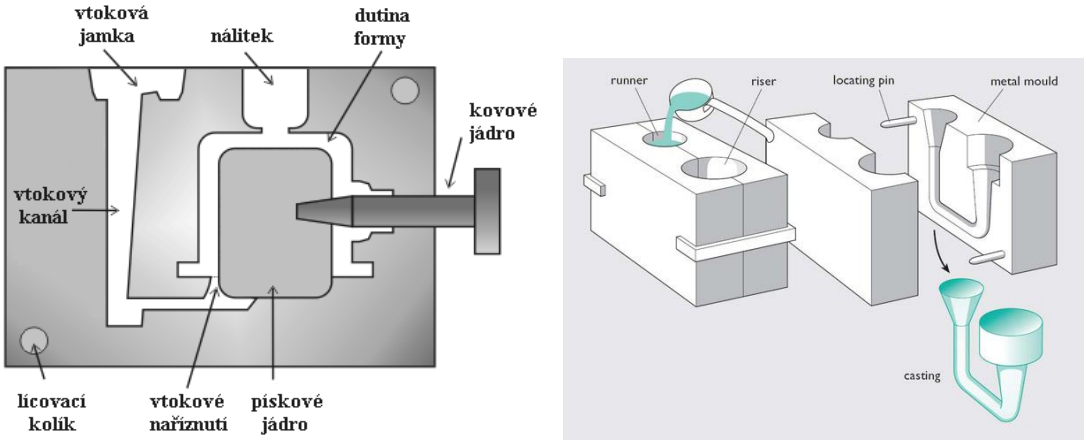
odlévání. Jejich konstrukce jsou specifické a závisí na tvaru odlitku a také na zvyklostech jejich navrhování.

Materiál kovových forem musí snášet poměrně vysoké teploty, v některých případech cca 400 až 600°C, v jiném případě teploty nižší. Nejčastějším materiálem forem pro velmi namáhaná místa je ocel ČSN 19552 a jí odpovídající zahraniční oceli. Tato ocel je Cr-V-Mo určená pro práci při vysokých teplotách. Z této oceli se vyrábí formy pro vysokotlaké lití, popř. pro nízkotlaké lití. Někdy se formy pro nízkotlaké lití a formy pro gravitační lití vyrábí z litiny s lupínkovým grafitem. Formy pro tlakové lití jsou dělené až specifické, mají i zvláštní tvar vtokové soustavy s tzv. naříznutím. Obsahují dutiny pro temperanční médium, pohyblivou část formy, vyhazovače, atd. Formy pro nízkotlaké lití jsou též dělené, pohyblivá část obsahuje vyhazovače, součástí formy jsou též dutiny pro temperanční médium. Také formy pro gravitační lití jsou dělené, nejčastěji se svislou rovinu. Též pohyblivá část formy obsahuje vyhazovače. Každá kovová forma před odléváním musí být ošetřena ochranným nátěrem (nástřikem) a předehřátá na správnou pracovní teplotu cca 200 až 400°C. Bez dodržení těchto zásad nelze do kovových forem vůbec odlévat.

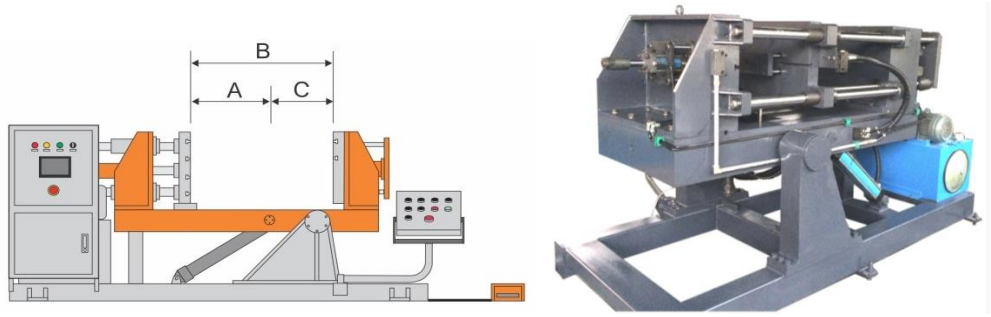
1.11.1 Výroba odlitků v kovových formách gravitačním litím

Při výrobě některých, pracovně velmi namáhaných, součástí (pístů, hlav spalovacích motorů, atd.) se uplatňuje gravitační lití do kovových forem. V porovnání s litím do pískových forem jsou kovové dražší, avšak odlitky z kovových forem se vyznačují výbornou vnitřní kompaktností a vyšší hladkostí povrchu. Kovová forma má však malou prodyšnost, ale velkou tepelnou akumulační schopnost a značnou pevnost, která znemožňuje volné smršťování odlitku. Žáruvzdornost kovových forem umožňuje odlévání slitin s vyšší teplotou tání (cca 700°C), výjimečně se odlévá i litina (brzdové válečky automobilů) a slitiny jiných kovů.

Tvar odlitku s ohledem na popsané odlišnosti se volí velmi jednoduchý. Slévárenská forma je předehřátá na pracovní teplotu se stálou temperancí na teploty cca 200 až 300°C (závisí na druhu odlévané slitiny). Líc formy je ošetřen nátěrem nebo nástřikem. Vtokovou soustavu tvoří kanál s nálevkou nebo vtokovou jamkou. Ustavení obou polovin formy je pomocí vodících kolíků. Formy se ustavují na stroje pro gravitační lití, obsahují otevírací mechanismy a mechanismy pro vkládání kovových jader, atd. Na obr. 1-130 a) je jednoduchý tvar kovové formy (kokily) pro gravitační lití. Je nutné upozornit, že kovové formy se označují kokily, avšak tento název se více používá u forem pro hutního odlévání. Pro výrobu tvarových odlitků se více ujal název kovová forma pro gravitační lití. Kovové formy pro gravitační lití bývají i velmi hmotné (těžké), proto pro jejich otevírání a vyjímání odlitků se používají stroje pro gravitační lití, viz obr. 1-130 b). Výhodou gravitačního lití do kovových forem jsou vnitřní kompaktnost a dobré mechanické vlastnosti odlitku, kvalitnější povrch než u odlitků litých do pískových forem, dobré rozměrové hodnoty odlitku. Nevýhodou je omezená složitost odlitku s větší tloušťkou stěn a omezená hmotnost odlitku max. do 15 kg. Touto metodou se odlévají např. písty a bloky spalovacích motorů ze slitin hliníku, viz obr. 1-131. Malé kovové formy mohou být otevírány ručně, velké formy bývají upnuty na speciálním stroji, který umožňuje jednoduché otevírání, ale také nutné jejich temperování.



Obr. 1-130 a) Schéma forem pro gravitační lití [57]



Obr. 130 b) Stroj pro otevírání forem pro gravitační lití [59]



surový odlitek pístu spalovacího motoru ze slitiny AlSi17Cu4
čistý odlitek pístu spalovacího motoru [34]
surový odlitek hlavy motoru ze slitiny AlSi10Mg

Obr. 1-131 Odlitky odlévané gravitačním litím do kovových forem [2]

1.11.2 Výroba odlitků nízkotlakým a vysokotlakým litím

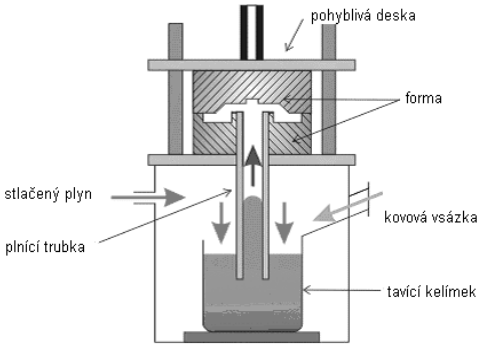
Kovové formy se vyznačují značnou akumulací tepla (intenzivně odvádí teplo z tuhnoucího odlitku). Díky této jejich vlastnosti by nebylo vhodné odlévaní tenkostěnných odlitků gravitačním způsobem (tavenina by ztuhla dříve, než by vyplnila slévárenskou formu). Proto se začalo využívat ke zvýšení zabíhavosti

taveniny ve slévárenské formě vnějších sil než je gravitace taveniny. Tak vzniklo lití pod tlakem nízkotlaké a vysokotlaké. V současné době existují nejrůznější alternativy lití, kde se využívá zvýšený tlak, viz *přehled metod využití zvýšeného tlaku při výrobě odlitků.*

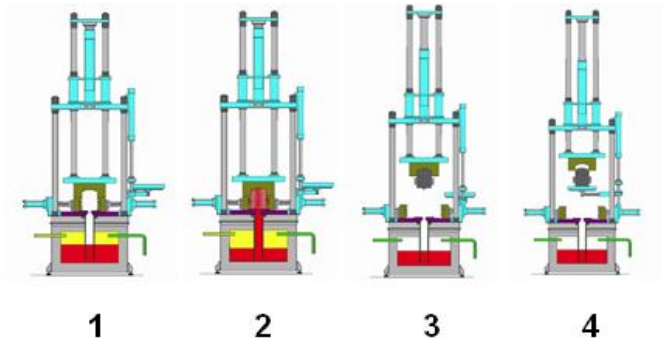
1.11.2.1 Nízkotlaké lití odlitků

Metoda nízkotlakého lití spočívá ve vytlačování roztaveného kovu přetlakem okolo 0,03 až 0,5 MPa z udržovací pece do kovové slévárenské formy. Pro nízkotlaké lití jsou určeny stroje. Pod podlahou stroje se nachází udržovací pec. Na stroji je upevněná slévárenská forma, která je dělená. Dělící rovina formy je vodorovná, odděluje horní a spodní část formy. Na spodní část formy je instalována keramická trubice, která má funkci vtokové soustavy. Přetlak je vyvozován plynným médiem nebo vysušeným vzduchem. Tímto přetlakem se tavenina dostává do dutiny formy pomocí plnící trubice, kde pod tímto přetlakem i tuhne. Udržovací pec je součástí nízkotlakého stroje a je situována pod ním. Kovová forma je dělená, předehřátá na pracovní teplotu cca 200°C a po celou dobu pracovního cyklu temperovaná, líc je ošetřen ochranným nástřikem (nátěrem). Jedna její část je pevně upnuta k rámu stroje, druhá je připojena na pohyblivé ústrojí (desku). Po ztuhnutí odlitku se forma otevře a pohyblivá část vytáhne odlitek z pevné části formy. Odlitek je unášen pohyblivou částí formy vzhůru. Zde forma najede na doraz a vyhazovače uvolní, resp. vyhodí odlitek z pohyblivé části formy. V tomto okamžiku speciální úchytné zařízení zachytí odlitek, který dále putuje k dalším operacím. Nízkotlaké lití je metoda, která se využívá především pro výrobu odlitků z lehkých slitin, které jsou symetrické kolem osy rotace, ale také pro odlitky pístů nebo bloků spalovacích motorů. Získané odlitky mají tloušťku stěn nejčastěji od 8 do 30 mm. Odlitky se vyznačují dobrou kompaktností a hutností materiálu bez vnitřních vad (porózita a mikrořediny). Je zde velké využití tekutého kovu 90 až 95%. Kvalitu odlitků lze srovnávat s odlitky litými gravitačně do kovových forem. S výhodou se touto metodou odlévají disky kol automobilů (AlSi7Cu). Jednou z nevýhod je vysoké tepelné zatížení systému pro dopravování roztaveného kovu do formy.

Metoda nízkotlakého lití vznikla po II. světové válce v Anglii u nás byly první zkoušky provedeny v roce 1956 ve firmě Metal Průhonice u Prahy. Zjednodušený princip metody je schematicky uveden na obr. 1-132a). Na obr. 1-132b) jsou uvedeny hlavní kroky výroby nízkotlakého odlitku (vytlačování taveniny do formy, tuhnutí odlitku ve formě, vyhození odlitku z otevřené formy).



Obr. 1-131a) Princip nízkotlakého lití



***1**- pod přetlakem je vtlačována tavenina do formy, **2** - tuhnutí taveniny ve formě pod přetlakem, **3** - pohyblivá část formy vyjíždí vzhůru a unáší odlitek, **4** - najíždí plošina na kterou je vysunut odlitek pomocí vyhazovačů formy*

Obr. 1-131b) Hlavní kroky nízkotlakého lití

Nízkotlakým způsobem se vyrábí např. disky kol automobilů nebo bočnice válů pro navíjení textilních látek, viz obr. 1-132.



Obr. 1-132 Odlitky (disky kol automobilů, čelo textilního válu) vyráběné nízkotlakým litím [12], [13]

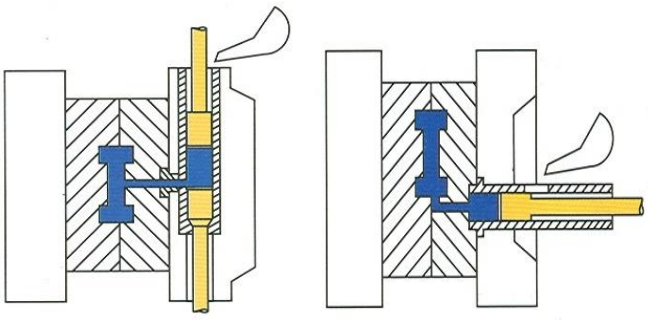
1.11.2.2 Vysokotlaké lití odlitků

Metoda vysokotlakého lití spočívá v tom, že roztavený kov se vtlačujeme do dutiny slévárenské formy tlakem pístu tlakového stroje. Podle velikosti stroje lze vyvodit tlaky 2 až 500 MPa. Stroje pro vysokotlaké lití se dělí na stroje s vertikální nebo horizontální komorou, viz obr. 1-133. Stroje s vertikální komorou pracují s tlaky cca 10 až 30 MPa. Stroje s horizontální komorou pracují s tlakem 10 až 90 MPa. Vyšší tlaky nepřináší výhody při odlévání, jen ničí tlakový stroj. Vertikální (svislá) komora vysokotlakých strojů může být studená (nevyhřívaná) nebo teplá, viz obr. 1-134 Horizontální (vodorovná) komora je vždy studená. Na obr. 1-135 je schéma postupu výroby odlitků při vertikálním vysokotlakém lití. Velké použití má výroba odlitků na strojích s horizontální komorou studenou komorou. Na obr. 1-136 je schéma postupu výroby odlitků na stroji s horizontální komorou:

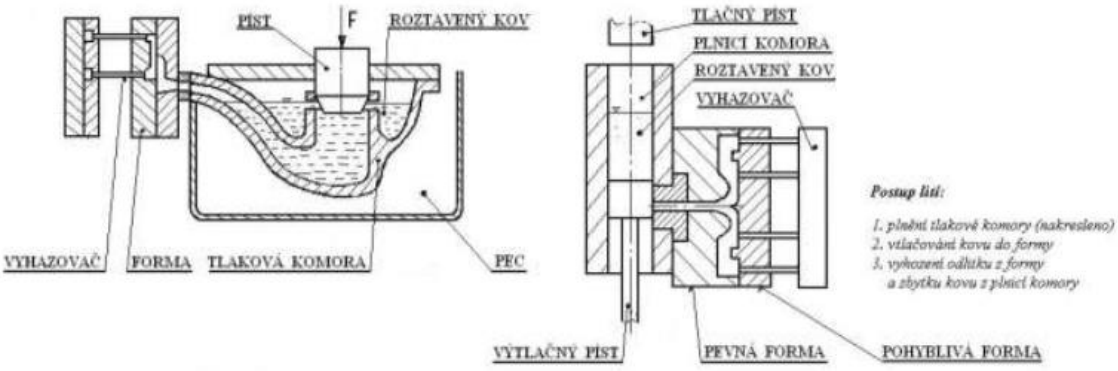
a) nalití správného množství taveniny do tlakové komory stroje;
b) pomalý pohyb pístu (0,1 až 0,4 $m \cdot s^{-1}$) vtlačí taveninu do vtokové soustavy (do nařínutí);
c) dojde k přepnutí rychlosti pístu na tzv. plnící rychlost, která je cca 1 až 6 $m.s^{-1}$. Tím se vyvodí rychlost taveniny vstupující do rormy cca 20 až 30 $m.s^{-1}$. Dojde k vyplnění dutiny formy taveninou – tavenina tuhne;
d) na tuhnoucí taveninu půssobíme dotlakem cca (cca 40 až 80 MPa).

Jak je z obr. 1-134 patrné, konstrukce stroje pro vysokotlaké lití s teplou a studenou komorou je odlišné. Teplá tlaková komora je součástí pece ve které

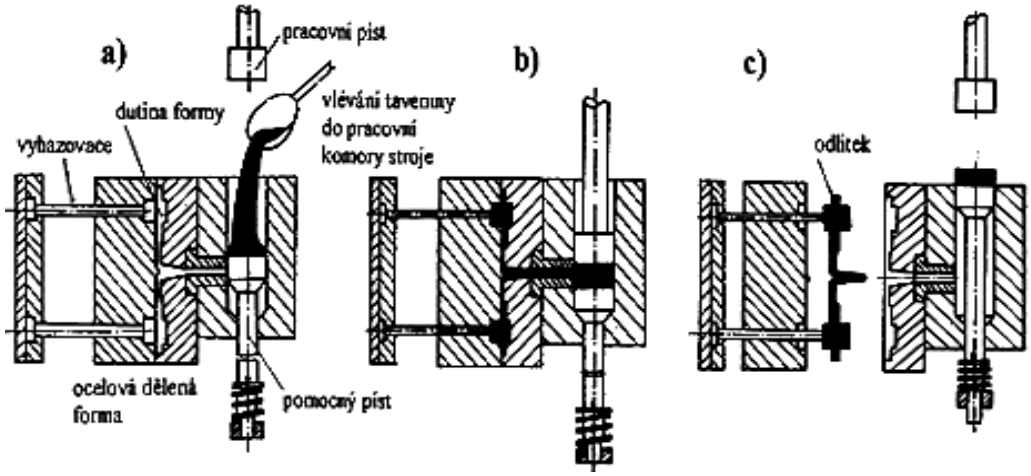
se taví odlévány materiál a prostřednictvím speciálně konstruovaného kanálu („husí krk“) se tavenina dostává do dutiny slévárenské formy.



Obr. 1-133 Schéma vysokotlakého lití odlitků, studená svislá komora (vlevo), horizontální komora (vpravo) [15]

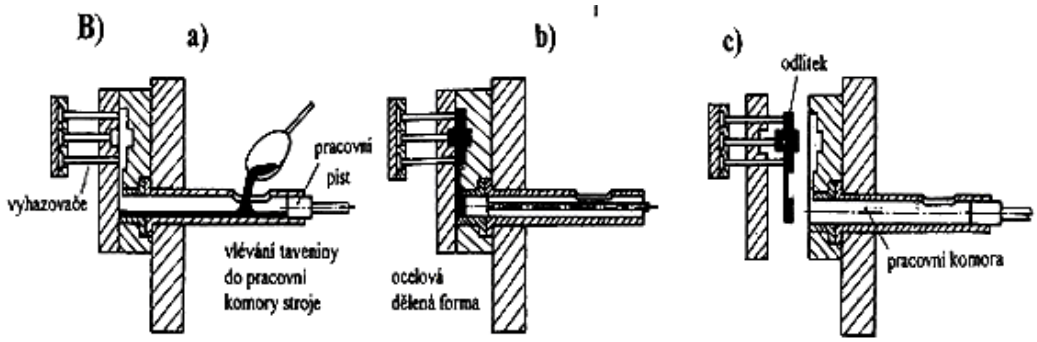


Obr. 1-134 Schéma vysokotlakého lití se svislou teplou komorou vyhřívanou (vlevo), se svislou studenou komorou (vpravo)



a) odlévání do pracovní komory
b) doprava taveniny tlakem pístu do formy
c) otevření formy a vyhození odlitku vyhazovači z formy

Obr. 1-135 Schéma postupu vysokotlakého lití se svislou komorou pracovního stroje



d) odlévání do pracovní komory
e) doprava taveniny tlakem pístu do formy
f) otevření formy a vyhození odlitku vyhazovači z formy

Obr. 1-136 Schéma tlakového lití se studenou komorou

V současné době se odlévá vysokotlakým způsobem cca 60 % odlitků ze slitin hliníku a 95% odlitků ze slitin zinku. Hlavním odběratelem takto vyrobených odlitků je především automobilový a elektrotechnický průmysl. Důvodem značného rozšíření tlakového lití lze spatřovat v těchto oblastech:

a) přesnost rozměrů odlitků,
b) velmi dobrá jakost povrchu,
c) hospodárné využití roztaveného kovu,
d) lepší mechanické vlastnosti odlitků,
e) větší výkonnost,
f) celkově menší náklady na výrobu odlitků.

Stupeň dosažitelné přesnosti odlitku závisí na rozměru odlitku, druhu slitiny, teplotě formy a pečlivosti dodržování celé technologie (čištění a ošetřování líce i sledování optimální pracovní teploty forem). Pečlivým zhotovením líce formy a zachováním stálých výrobních podmínek lze dosáhnout přesnosti odpovídající stupni 9., popř. až stupni 7. podle ISA. V tabulce 1.11. jsou uvedeny minimální hodnoty stěn odlitků vyrobených tlakovým litím.

Tabulka 1.11 Hodnoty minimálních tloušťek stěn odlitků z různých slitin vyráběných vysokotlakým litím [1]

Povrch odlitku [cm^2]	***Minimální tloušťka stěny odlitku [mm]***		
	Slévárenské slitiny		
	hliník, hořčík	**zinek, olovo, cín**	**měď**
3	1,0 až 1,5	0,6 až 1,0	1,5 až 2,0
3 až 100	1,5 až 2,3	1,0 až 1,5	2,0 až 2,5
100 až 500	2,3 až 3,0	1,5 až 2,0	2,5 až 3,0
500 a více	3,0 až 3,5	2,0 až 2,5	3,0 až 4,0

V tabulce 1.12 jsou uvedeny doporučené teploty líce slévárenských forem při vysokotlakovém lití vybraných slévárenských slitin.

Tabulka 1.12 Teploty při tlakovém lití

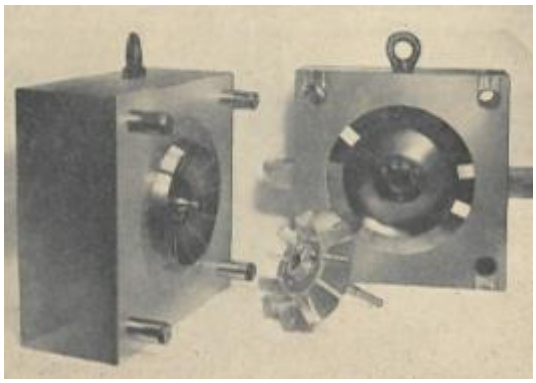
Pracovní teploty při vysokotlakém lití						
Typ slitiny	**Al**	**Zn**	**Sn**	**Pb**	**Mg**	**Cu**
Teplota formy [°C]	200-250	120-200	50-80	100	200 -250	300-350
Licí teplota formy [°C]	620-750	400-550	260-300	280-350	620-700	850-960

Výroba odlitků na strojích s vertikální tlakovou komorou

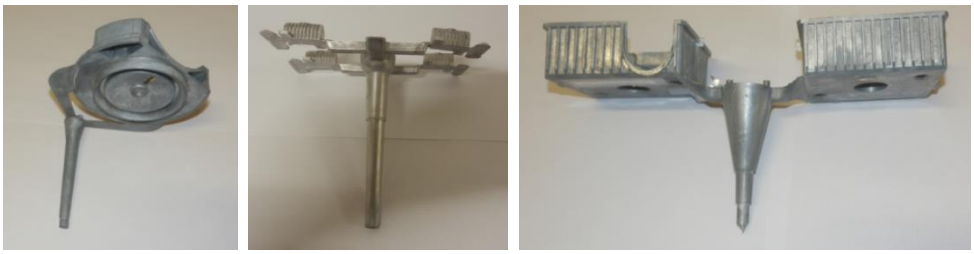
K tomuto účelu jsou vyráběny tlakové stroje, které mají vertikální tlakovou komoru. V komoře proti sobě jsou dva písty. Horní píst je pracovní, kterým se vtlačuje tavenina do dutiny formy (směrem dolů), druhý je pomocný, kterým se vytlačuje přebytek taveniny již ve formě ztuhlého kovu (směrem nahoru). Ztuhlý přebytek taveniny zůstává (po odlití a ztuhnutí odlitku) v tlakové komoře. Tento přebytek má tvar válečku (průměr je podle tlakové komory, výška je cca 30 až 40 mm). Tavenina se vlévá do tlakové komory speciální naběračkou v okamžiku, když je forma připravena k odlévání (tj. ošetřen líc formy a forma je zavřena). Píst postupně vtlačuje taveninu do dutiny formy. V okamžiku, když je forma vyplněna taveninou, probíhá její tuhnutí. Po ztuhnutí se forma otvírá. Pohyblivá část formy unáší odlitek. Když tato pohyblivá část formy dojede na doraz vyjedou z ní vyhazovače (kovové tyčinky cca ∅ 4 mm), které jsou uloženy v různých místech této části formy. Rozložení vyhazovačů ve formě je voleno tak, aby se odlitek při vyhazování nedeformoval.

Při odlévání je forma temperována na pracovní teplotu (cca 200°C pro odlévání slitin hliníku), závisí na odlévané slitině.

Na obr. 1-137 je forma pro tlakové lití se svislou komorou. Na obr. 1-138 jsou uvedeny odlitky odlévaných na strojích se svislou vtokovou soustavou.



Obr. 1–137 Forma pro vysokotlaké lití pro stroje se svislou tlakovou komorou



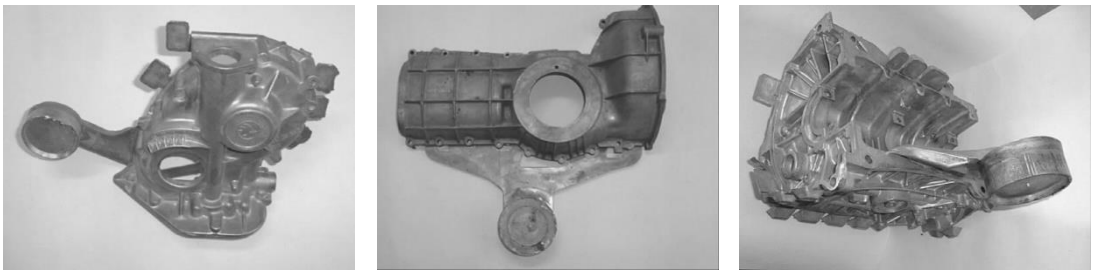
Obr. 1-138 Odlitky vyráběné metodou vysokotlakého lití s vertikální tlakovou komorou, [2]

Z obr. 1-138 je patrný tvar odlitku, ale také typický kuželový vtok, který kopíruje vtokovou soustavu slévárenské formy. Vtoková soustava formy ústí přes trysku do svislé tlakové komory stroje.

Výroba odlitků na strojích s horizontální tlakovou komorou

Také k tomuto účelu jsou vyráběny speciální tlakové stroje, které mají tlakovou komoru uloženou v horizontálním směru. Na tento stroj je připevněna dělená kovová forma. Pevná část je připojena k rámu stroje, pohyblivá na pojezdové ústrojí stroje. Po ošetření líce formy ochranným nástřikem (nátěrem) a jejím zavřením se do tlakové (pracovní) komory nalévá dávkovacím zařízením nebo speciální automatizovanou naběračkou a kanálkem tavenina. Rychlost plnění je cca 0,5 [$m.s^{-1}$] v okamžiku, kdy tavenina pronikne do zářezu, stroj zvýší rychlost plnění (cca na 5 [$m.s^{-1}$]), touto rychlostí stroj dopravuje taveninu do dutiny formy. Forma je opět dělená, předehřátá na pracovní teplotu (cca 200 až 240°C), temperovaná po celou dobu pracovního cyklu. Její líc je ošetřen ochranným nástřikem. Pevná část je upnuta k rámu tlakového stroje, pohyblivá část se pohybuje prostřednictvím pojezdového ústrojí. Jakmile se po odlití dostane tavenina do zářezu vtokové soustavy stroj přepne režim na tzv. dotlak. Pod pojmem dotlak rozumíme hodnotu tlaku, kterou působí pracovní píst v tlakové komoře a v podstatě se přenáší do dutiny formy na tuhnoucí odlitek. Působí tak dlouho, dokud se forma neotevře. Po otevření formy pohyblivá část spolu s odlitkem jede do mezní polohy, kde vyjedou vyhazovače, které uvolní odlitek ve formě. Odlitek z formy může vyjmout pracovník nebo robot, eventuálně manipulátor. Vysokotlakého způsobu lití je používáno především při výrobě tvarově členitých, tenkostěnných odlitků ze slitin hliníku a zinku, tam kde vyžadujeme hladkost povrchu a rozměrovou přesnost. Velkou nevýhodou tlakově litých odlitků je jejich porozita. Ta vzniká v důsledku chaotického proudění taveniny do dutiny formy. Zbytky vzduchu z tlakové komory se při proudění s taveninou do dutiny formy uzavřou ve formě a již nemohou opustit dutinu formy odvzdušňovacími kanály. To proto, že vzduch uzavřený v pórech se při vysokých teplotách rozpíná a došlo by k porušení odlitku, popř. k jeho destrukci. Tímto způsobem nelze vyrábět složité odlitky.

Vysokotlakým litím na strojích s horizontální komorou se vyrábí např. bloky spalovacích motorů, skříně převodovek, víka motorů, atd., viz. 1-139.



a) b) c)

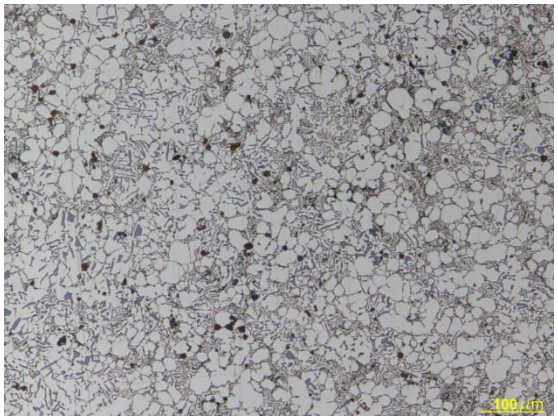
a) víko motoru, b) část skříně převodovky, c) těleso bloku motoru

Obr. 1-139 Automobilové odlitky lité tlakovým způsobem na strojích s horizontální komorou, odlitky vozů Škoda-Auto [2]

Jak je patrné z obr. 1-139 pro odlitky, které jsou lité na strojích s horizontální tlakovou komorou je odlišný vtok (není vtok kuželový), která končí válcovou „tabletou“, která je zbytkem ztuhlé taveniny v tlakové komoře na kterou působil píst.

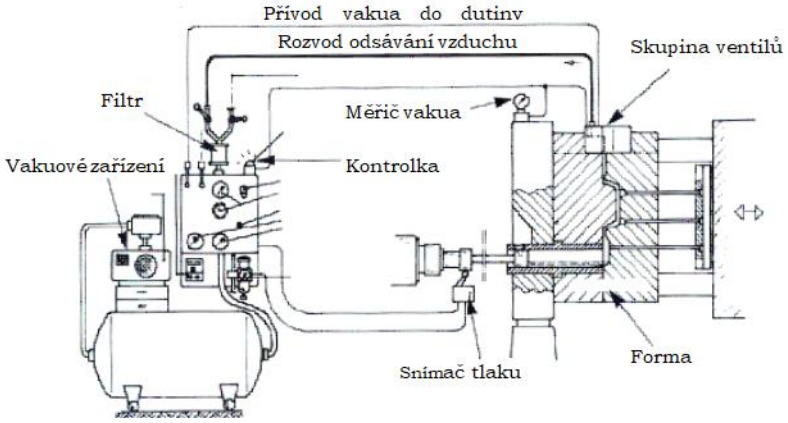
Nevýhodou běžně vyráběných odlitků vysokotlakým litím je typická jejich porozita, viz obr. 1-140. Naproti tomu vysokotlaké lití umožňuje výrobu odlitků s velmi dobrou tvarovou a rozměrovou přesností i vysokou kvalitou drsnosti povrchu a současně velkou využitelností odlévané slitiny a značnou produktivitou práce.

Porozita a mikroporozita těchto odlitků vzniká v důsledku velké rychlosti proudění taveniny, jak v tlakové komoře (primární rychlost plnění) až v zářezu tlakové formy a rychlosti ve formě (sekundární rychlost plnění). Pokud je primární rychlost plnění vyšší než 0,25 $m.s^{-1}$ a sekundární rychlost vyšší než 6 $m.s^{-1}$ a spolu s vysokou viskozitou taveniny při teplotě nad T_L (teplotě likvidu) je předpoklad, že vzniká turbulentní proudění taveniny, které způsobuje disperzní plnění dutiny formy. Proudící tavenina uzavírá určitý podíl atmosféry (vzduchu z tlakové formy). Atmosféra již nemůže z taveniny uniknout. Zvýšený tlak redukuje velikost bublin vzduchu na extrémně malou velikost, avšak to nezamezí vzniku mikropórovitosti ztuhlého kovu. Odlitky obsahující mikropóry nemohou být dále tepelně zpracovány, např. vytvrzovány, popř. ani svařovány.



Obr. 1-140 Mikropórovitost struktury vysokotlakoého odlitku ze slitiny hliníku (tloušťka stěny odlitku 2 mm)

Tyto odlitky, u kterých může být povolena nepatrná porózita jsou ze slitin neželezných kovů(nejčastěji hliníku) a jsou vyráběny ve velkých sériích. V současné době se pro snížení pórovitosti odlitků využívá vakua, které umožňuje odvádění vzduchu z prostoru dutiny formy. Tento postup se nabízí především pro odlévání velmi tenkostěnných odlitků a k získání odlitků bez vnitřních vad – porosity. Vakuování vysokotlakých slévárenských forem je založeno na odstraňování vzduchu pomocí vakuového zařízení a také vakuových ventilů, které jsou uloženy v tlakové formě. Na obr. 1-141 je uvedeno schéma vakuovacího zařízení vysokotlakých forem.



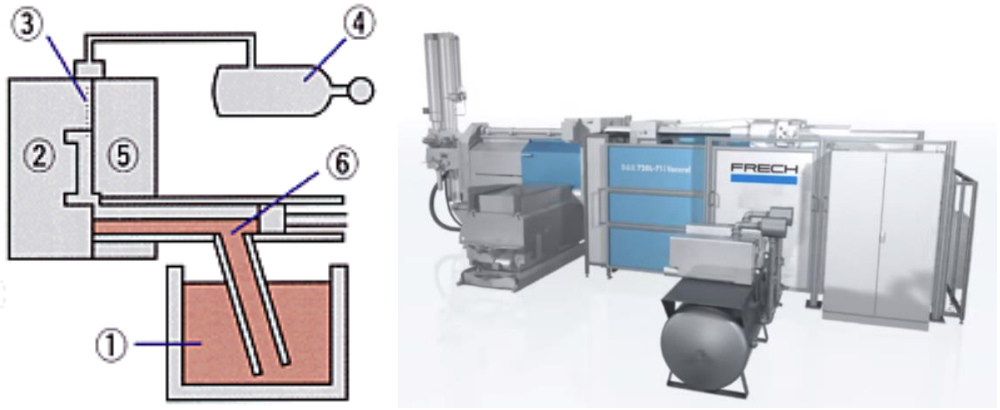
Obr. 1-141 Schéma zařízení pro vakuování vysokotlakých slévárenských forem

Výsledkem vakuování forem je snížení porozity odlitků, ve struktuře odlitku se nachází významně méně tmavých drobných míst než je tomu na obr. 1-140.

Vysokotlaké lití ve vakuu – VACURAL systém

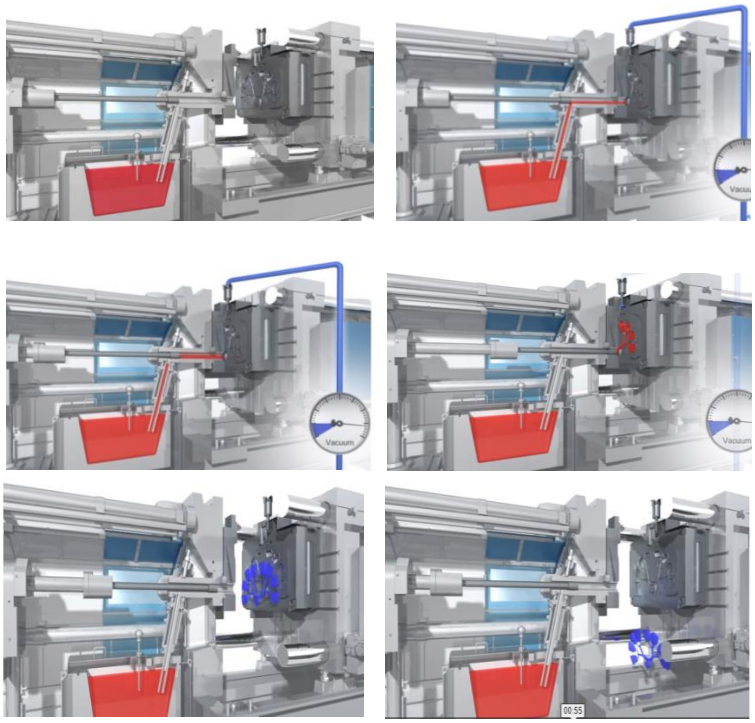
Pro výrobu odlitků ze slitin, které mají vysokou afinitu ke kyslíku byl zkonstruován stroj, který při odlévá využívá vakuum. Proces se nazývá *Vacural systém.* Vysokotlaké lití ve vakuu je používáno při výrobě odlitků ze slitin hořčíku (vysoká slučivost s kyslíkem). Základní schéma systému je uvedeno na obr. 1-142.

Celý systém, včetně systému dodávání roztaveného kovu, tlakové komory stroje a dutiny formy je pod vysokým vakuem. Pak se nasává roztavený kov do tlakové komory stroje. Pracovní píst vstřikuje roztavený kov do dutiny slévárenské formy. Tak se minimalizuje vznik oxidů a plynových vad v odlitku. Na obr. 1-143 je ukázka fází při výrobě odlitků na vysokotlakém stroji s vakuem. Z obr. 1-143 je patrný průběh odlévání: připravený stroj k lití, nasávání taveniny do tlakové komory, natlačení taveniny pístem do dutiny formy (červená barva odlitku), tuhnutí odlitku (modrá barva odlitku), vyhození odlitku z formy.



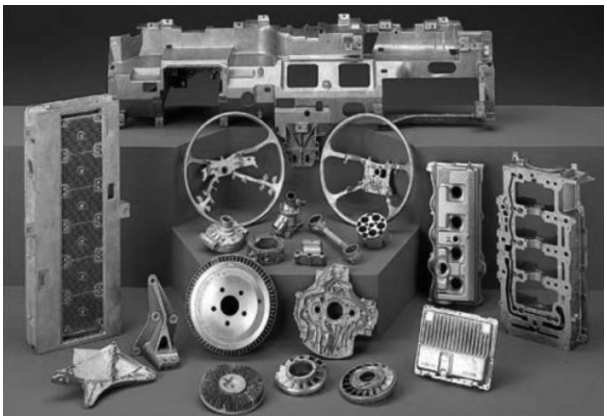
1 *– udržovací pec s taveninou;* ***2*** *– pohyblivá část formy (temperovaná);* ***3*** *– těsnící systém v dělící rovině formy;* ***4*** *– vývěva (zařízení pro tvorbu vakua);* ***5*** *– pevná část formy (temperovaná);* ***6*** *– tlaková komora s pístem (řízená temperace)*

Obr. 1-142 Základní schéma vysokotlakého stroje s vodorovnou komorou pracujícího s vakuem [29]



Obr. 1-143 Průběh odlévání na vysokotlakém stroji pracujícím s vakuem [32]

Na obr. 1-144 jsou odlitky ze slitiny hořčíku, které byly odlévány na stroji s vakuovým systémem – Vacural.



(Vacural systém)

Obr. 1-144 Odlitky ze slitin hořčíku vyráběné metodou Vacural [32]

1.11.3 Charakteristika forem pro tlakové lití

Materiál forem pro tlakové lití - je nástrojová ocel, u nás používaná ocel ČSN 19 552 (ČSN EN 1.2343) - chróm molybden křemíková vanadová ocel pracující při vysokých teplotách, resp. při tepelném cyklickém namáhání. V zahraničí se používají podobné oceli typu chrom-molybden-vanadové. Dnes se vyrábí dutiny formy pomocí tvarových ocelových vložek, které lze při poškození vyměnit. Každá forma má systém temperančních kanálů, kterými protéká medium, které zabezpečuje potřebnou pracovní teplotu formy. Temperačním médiem bývá nehořlavý olej, která proudí formou rychlostí 2 až 3,5 $m.s^{-1}$ a je připojen na speciální temperanční zařízení.
Podobné oceli se využívají pro konstrukci forem pro nízkotlaké lití.

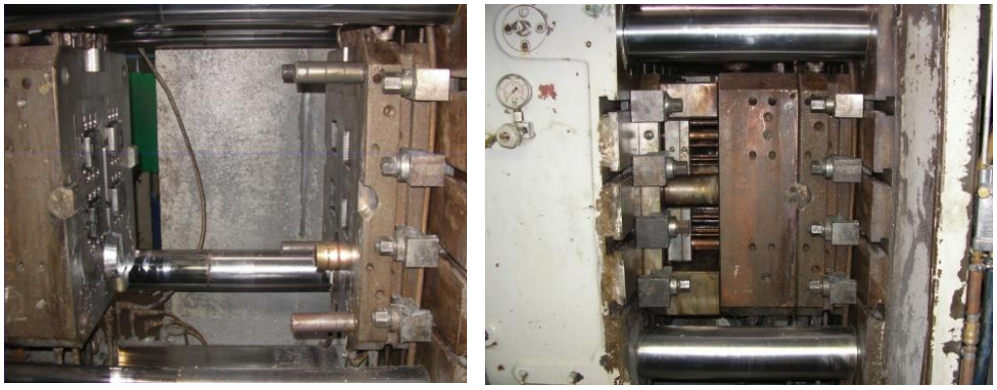
Vtoková soustava forem pro vysokotlaké lití je specifické konstrukce (odlišuje se od ostatních způsobů výroby forem), je jednoduchá a krátká. Tvoří ji kuželový vtok (vtoková špička), rozvodný kanál (nálitek), zářez a zbytek kovu (tableta). Jak již bylo uvedeno, rozlišujeme v podstatě dva typy vtokových soustav (pro vertikální a horizontální komoru). Vtoková soustava pro horizontální komoru je kratší (nepoužívá se vtokový kanál). Tableta je současně zbytkem vtokové soustavy a také součástí tlakové komory. Výška tablety je dána konstrukcí stroje a současně i požadavkem na využití tekutého kovu. U strojů s vodorovnou tlakovou komorou výška tablety nesmí být menší než je průměr vstupního otvoru vtokového kanálu. U strojů se svislou tlakovou komorou výška tablety nesmí být menší než je rozměr vstupního otvoru rozvodového kanálu.

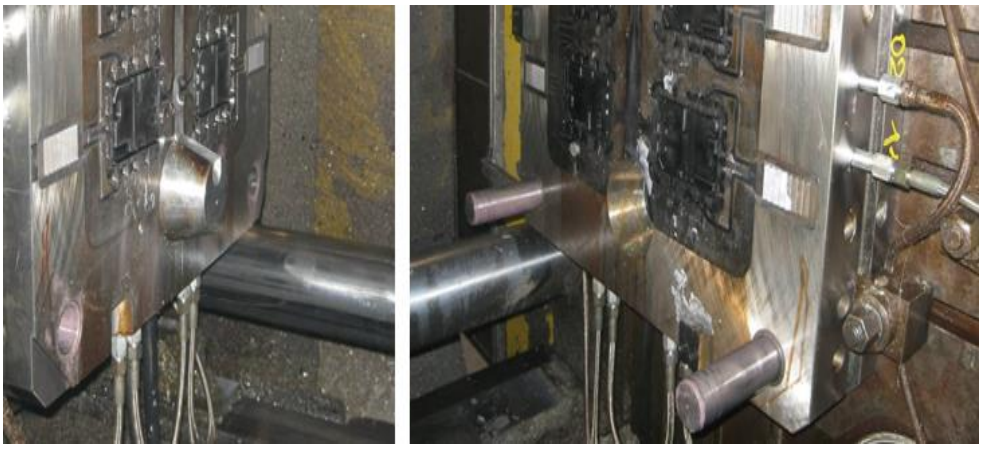
Odvzdušňovací systém forem **-** v důsledku vysoké rychlosti plnění dutiny formy taveninou vzniká vážný problém s odvzdušněním, proto se po dělící ploše formy zhotovují odvzdušňovací kanálky šíře 20 až 40 mm o hloubce 0.05 až 0.2 mm. Tyto kanálky se umisťují do míst nejvzdálenějších od zářezu při laminárním proudění taveniny a nebo do blízkosti zářezů při turbulentním proudění. Na odvzdušnění se používají také vložky z pórovitého materiálu. Pokud k odvzdušňování nestačí zářezy, vytváří se ve formě malé dutinky, které

na odlitku představují technologické přídavky tzv. „ledvinky“. Ledvinky přepouští zbylý vzduch z dutiny formy.

Vyhazovače - jsou kovové tyče různé konstrukce kruhového průřezu. U forem pro běžné vysokotlaké odlitky bývá ∅ vyhazovačů cca 4 mm. Vyhazovače jsou umístěny do různých míst pohyblivé části tlakové formy, tak aby při jejím otevření byl odlitek snadno vyjmutý z formy. Vyhazovače musí být také konstruovány v místech formy, které odpovídají poloze „ledvinek“. Vyhazovače jsou z nitridované oceli, jejich rozměry jsou normalizované a jsou profesně vyráběny.

Na obr. 1-145 je uveden pohled na vysokotlakou slévárenskou formu

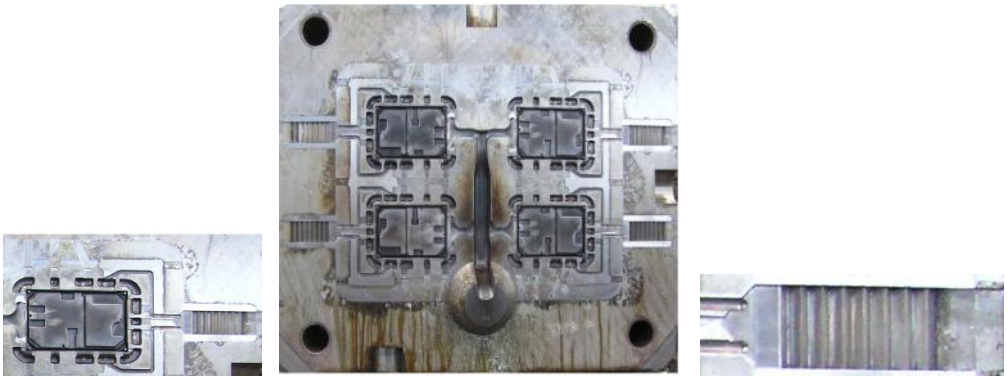




Obr. 1-145 Pohled na zavřenou formu (nahoře) pohled na líc pohyblivé [16]
části formy (dole vlevo), pohled na pevnou část formy (dole vpravo)

Jak je patrné z obr. 1-145, forma je 4 násobná (na jedno odlití se vyrábí 4 odlitky). Obě poloviny formy jsou sesazeny pomocí vodících kolíků (pevná část formy) a děr (pohyblivá část formy).

Na obr. 1-146 je odvzdušnění vysokotlaké licí formy – používají se odvzdušňovací kanály, tj. pásky, vlnovce, vlnovec má větší intenzitu odvzdušnění. Čímž jsou větší průřezy odvzdušňovacích kanálů – nižší tlak vzduchu ve formě. Odvzdušňovací prvky ústí až na povrch formy.



Obr. 1-146 Odvzdušňování vysokotlaké formy vlnovcem [16]

Na obr. 1-147 je odlitek vyrobený ve výše uvedené vysokotlaké formě.



Obr. 1-147 Systém 4 odlitků vyrobených ve 4 násobné tlakové formě (vlevo), pohled do příslušné dutiny formy (vpravo) [16]

Na obr. 1-148 je *termoregulační zařízení, které obsahuje temperační systém, tj.* soustava průtokových kanálů jednotlivých okruhú ve formě, kde proudí temperační médium. Temperační médium nejčastěji ochlazuje formu (výjímečně ji může i přihřívat). Temperačním médiem může být: olej, glykol; chemicky upravená voda nebo stlačený vzduch (malá účinnost).



Obr. 1-148 Temperační zařízení pro udržování stále pracovní teploty vysokotlaké formy [33]

Vedle slitin hliníku se používají pro odlévání slitiny hořčíku, zinku, popř. mědi, atd.

V tabulce 1.10 jsou uvedeny metody výroby odlitků a jim odpovídající rozměrové tolerance. Jak je z tabulky 1.10 patrné, nejpřesnější metoda výroby odlitků je na vytavitelný model. V tabulce 1.11 je charakteristika odlitků ze slitin hliníku vyráběných různými způsoby odlévání.

Tabulka 1.10 Dosahované tolerance odlitků při použití různých metod jejich výroby

Tolerance odlitků při použití různých metod odlévání	
Metoda odlévání	**Dosahovaná tolerance při rozměrech odlitku 30 až 50 mm**
Lití do forem na vytavitelný model	± 0,03 až ± 0,1 mm
Lití pod tlakem	± 0,05 až ± 0,2 mm
Lití do sádrových, skořepinových forem, do forem s krystalizací pod tlakem	± 0,1 až ± 0,3 mm
Lití do kovových forem	± 0,1 až ± 0,3 mm
Lití do forem CT, do forem z samotvrdnoucích směsí	± 0,1 až ± 0,4 mm
Lití do pískových forem	± 1,0 až ± 2,0 mm

Tabulka 1.11 charakteristika odlitků ze slitin hliníku vyráběných různými způsoby odlévání

Charakteristika odlitků ze slitin hliníku vyráběných různými způsoby odlévání					
Kritérium	**Lití do pískové formy vyrobené ručně**	**Lití do pískové formy vyrobené strojně**	**Gravitační lití do kovové formy**	**Nízkotlaké lití**	**Vysokotlaké lití**
Drsnost povrchu odlitku [μm]	25 až 200	25 až 100	3,2 až 25	6,3 až 12,5	1,6 až 12,5
Maximální odchylky rozměrů [%]	3	2	1,5	1	0,5
Běžné přídavky na obrábění [mm]	3 až 5	2 až 3	1,5 až 2	1 až 2	0,5 až 1
Pevnost v tahu [MPa]	130	130	160	170	200
Cena formy nebo modelu [Kč]	5000	25 000	75 000	350 000	600 000
Životnost formy, počet vyrobených odlitků	200	5000	10 000	60 000	75 000
Produktivita práce [kusy/hod]	5 až 10	80 až 100	40 až 60	50 až 80	120 až 150

Poznámka: ***ceny jsou pouze informativní, souvisí s technickými podmínkami výroby a ekonomickou dostupností použitých zařízení. Životnost formy závisí na složitosti odlitků.***

V tabulce 1.12 je přehled výroby odlitků a jejich technické podmínky a ekonomická kritéria.

Tabulka 1.12 Přehled výroby odlitků a jejich technické podmínky a ekonomická kritéria

Přehled metod výroby odlitků a jejich technické podmínky a ekonomická kritéria						
Technologie výroby forem, způsob odlévání	**Tolerance odlitku IT**	**Hmotnost odlitku [kg]**	**Tloušťka stěn odlitku [mm]**	**Drsnost povrchu odlitku [μm]**	**Vhodná série [ks]**	**Produktivita forem za hodinu**
Písková forma, ručně na syrovo	14 až 16	0,1 až 300	3 až 50	25 až 200	1 až 100	1 až 5
Písková forma, strojně na syrovo	12 až 16	0,1 až 300	2 až 50	25 až 100	nad 10	20 až 300
Písková forma, sušená	14 až 16	od 100	3 až 600	25 až 200	1 až 10	1
Formy CT tvrzená CO_2	11 až 16	od 0,1	2 až 600	6,3 až 100	1 až 10^4	1 až 100
Formy ze samotuhnoucích směsí	12 až 14	od 100	2 až 600	6,3 až 100	1 až 100	1 až 2
Formy vyrobeny metodou Croninga	9 až 15	0,1 až 30	2 až 40	6,3 až 25	100 až 10^4	20 až 100
Sádrové formy	12 až 14	0,1až 10	1 až 20	3,2 až 12,5	1 až 10^4	5
Keramické formy	10 až 15	1 až 1000	2 až 40	3,2 až 25	1 až 10^4	10
Pískové formy vyrob. Vakuováním	12 až 15	0,1 až 1000	2 až 200	12,5 až 100	100 až 10^4	50
Písková forma, vyrobená spalitelným modelem	11 až 16	1 až 1000	2 až 600	12,5 až 200	1 až 10^4	-
Forma vyrobená na vytavitelný model	8 až 13	0,01 až 20	0,5 až 20	1,6 až 25	100 až 10^4	10 až 100
Kovové formy pro gravitační lití	11 až 15	1 až 1000	5 až 600	3,2 až 25	1 až 10^4	20 až 100
Formy pro odstředivé lití	10 až 14	0,5 až 1000	5 až 500	6,3 až 25	100 až 10^4	-
Formy pro nízkotlaké lití	10 až 14	0,1 až 100	2 až 50	3,2 až 12,5	100až 10^5	100 až 200
Formy pro vysokotlaké lití	8 až 14	0,001 až 20	0,5 až 10	1,6 až 12,5	100 až 10^5	100 až 200

1.11.4 Přehled metod využívající zvýšeného tlaku při výrobě odlitků

V současné době jsou známé i modifikace principu lití pod tlakem, které vyžadují speciální konstrukce a úpravy strojů pro tlakové lití. Mezi tyto metody se řadí: *Squeeze casting a semisolid metal casting (SSM).* Metoda SSM je označována v Americe, v Evropě je tato metoda známá pod pojmem *Thixocasting* (nebo také Thixoforming). Existují nejrůznější modifikace těchto metod pod různým označením a někdy není patrné, zda-li jde o novou metodu nebo stávající modifikaci. Přehled všech metod využití zvýšeného tlaku při výrobě odlitků je na následující:

METODY ZVÝŠENÉHO TLAKU PŘI VÝROBĚ ODLITKŮ

NÍZKOTLAKÉ LITÍ (NTL)
(LOW CASTING)

VYSOKOTLAKÉ LITÍ

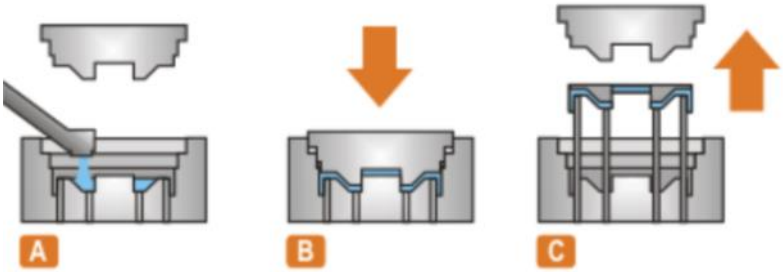
(PRESSURE DIE-CASTING)

LITÍ S KRYSTALIZACÍ POD TLAKEM
(SQUEEZE CASTING)
- přímé lití (přímý tlak)
(Direct Squeeze Casting)
- nepřímé lití (nepřímý tlak)
(Indirect Squeezee Casting)
- s vynuceným proudem

METODY POLOTUHÉHO STAVU
(SEMI-SOLID-METAL = SSM proces)
(SEMI SOLID METALWORKING)
(SEMI SOLID RHEOCASTING = SSR proces)
(NEW RHEOCASTING CONTINOUS = NRC proces)
- tixo lití (Thixocasting)
- tixo formování (Thixoforming)

LITÍ POD TEPLOTOU LIKVIDU
(SUB-LIQUID-CASTING = SLC proces)

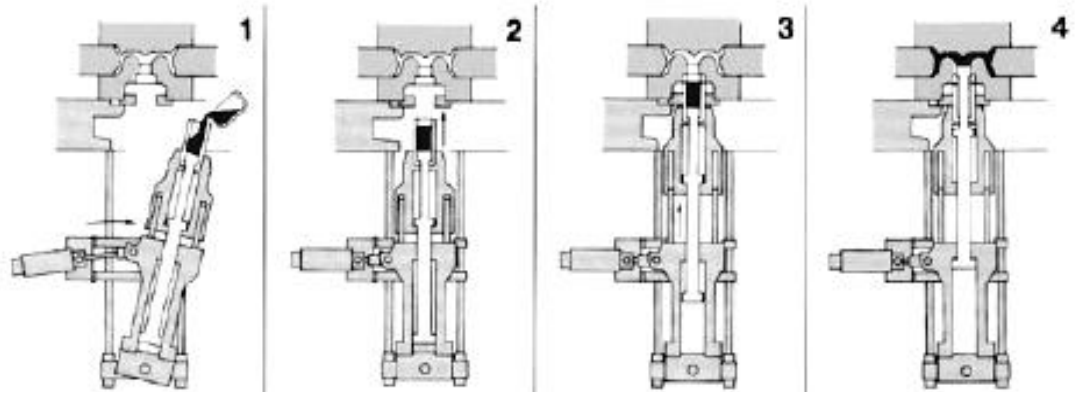
Metoda Squeeze casting (označováno jako lití s krystalizací pod tlakem) je založena na přímém vtlačování taveniny do dutiny formy. K tomu slouží zařízení jako je např. tvářecí lis, na kterém je upevněna dělená ocelová forma. Schéma principu je na obr. 1-149. Tato metoda se označuje také jako přímá metoda lití pod tlakem.



A nalití taveniny do formy spodní části formy
B stlačení horní části formy – získání odlitku
C rozevření formy- vyhazovače vyhodí odlitek z formy

Obr.1-149 Princip metody squeeze casting (lití s krystalizací pod tlakem) [24]

Dále existuje metoda squeeze casting nepřímá, viz obr. 1-150, která je založena na vtlačení speciálního pístku do pomocného nálitku umístěného nad materiálovým uzlem odlitku ještě v okamžiku než ztuhne kov ve formě. Tato metoda se používá např. jako pomocná při klasickém vysokotlakém lití hliníkových bloků spalovacích motorů ve ŠKODA-Auto.



1 - odlévání taveniny; 2 - pohyb pístu (razníku) se sklopným válcem; 3 - přisunutí sklopného válce k formě; 4 - vstříknutí taveniny pístem do dutiny formy

Obr. 1-150 Schéma nepřímé metody squeeze casting [25]

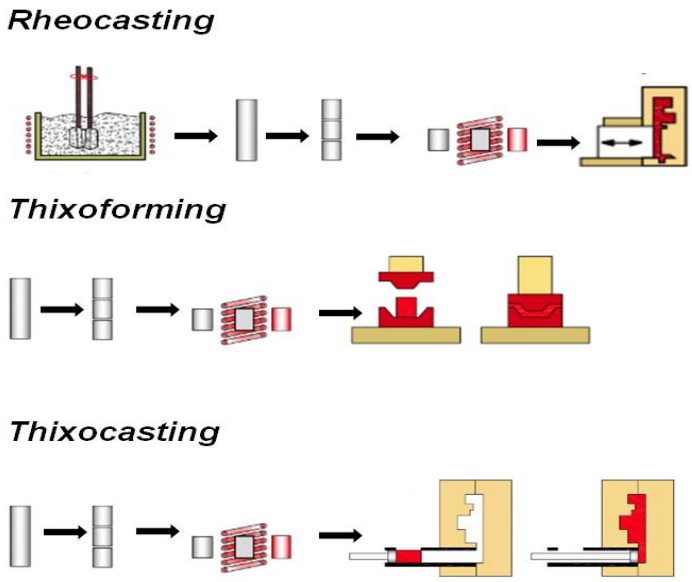
Tento proces potlačuje vznik staženin nebo je rozptyluje do nepatrných velikostí, proto je vhodný při výrobě odlitků s tepelnými uzly nebo rozdílnou tloušťkou stěn. K tomuto účelu slouží tlakový stroj se speciálním přídavným zařízením a upravenou slévárenskou formou. Tímto způsobem je vyroben pozoruhodný tlakový odlitek bloku spalovacího motoru (Porsche-Boxter) ze slitiny AlSi9Cu3 se zalitými vložkami z kompozitního materiálu na bázi hliníku s 25% částic křemíku a 5% výztužných vláken Al_2O_3. Zpomalené plnění formy umožňuje infiltraci odlévané taveniny do povrchu vložek založených do formy s cílem dokonalého zalití.

Metoda Semi-solid metal casting (thixocasting) je založena na tixotropním stavu použitého materiálu. Tento materiál nejčastěji tvoří speciální slitina označovaná „Thixalloy“ (AlSi10MgCu). Tato slitina je při vlastní výrobě polotovarů ∅ 75 mm plynulým odléváním navíc podrobena míchání v elektromagnetickém poli. Polotovary této slitiny jsou nařezány na válečky ∅ 75 x 92 mm. Při odlévání se polotovary ohřívají indukčním způsobem na teplotu 578°C, tj. do polotekutého stavu, tím se získává cca 55% tuhé fáze. V tomto stavu se vkládají pomocí manipulátoru do komory tlakového stroje a materiál v polotekutém stavu se vtlačují do dutiny formy. Princip metody je na obr. 1-151. Pro tento způsob je tlakový stroj konstrukčně přizpůsoben. Výsledkem je neporézní, velmi kompaktní odlitek s nepatrnými otřepy. Struktura takto „vytvarovaného“ materiálu v tlakové formě se vyznačuje globulárním tvarem krystalů, viz obr. 1-152. Tím vykazuje příznivé mechanické vlastnosti. Modifikací tohoto způsobu je metoda SSM (Semi-solid metal working).

Semi-solid metal working, viz obr. 1-153, je metoda založená na speciálně upravené konzistenci materiálu (např. jemné granule slitiny Mg), který se při vstřikování do tlakové formy převádí do polotekutého stavu (tj. jeho teplota je mezi likvidem a solidem) podobného konzistenci „horké plastelíny“. Též výhodou je minimalizace staženin v odlitku a globulární struktura.

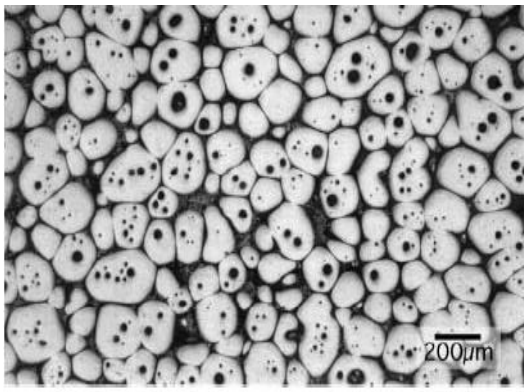
Thixoforging je metoda, která používá válcový polotovar, který je ohřátý indukčním způsobem a obsahuje 70% tuhé fáze. Tento polotovar se vkládá do

půlené slévárenské formy, která je upevněna na tvářecím lise. Schéma principu je na obr. 1-151. Horní obrázek ukazuje vložení polotovaru do speciálně konstruované tlakové formy. Spodní obrázek znázorňuje vyplnění dutiny formy - resp. tvar získaného výrobku. Na obr. 1-152 je struktura slitiny hliníku AlSi7Mg získaná metodou thixocasting.



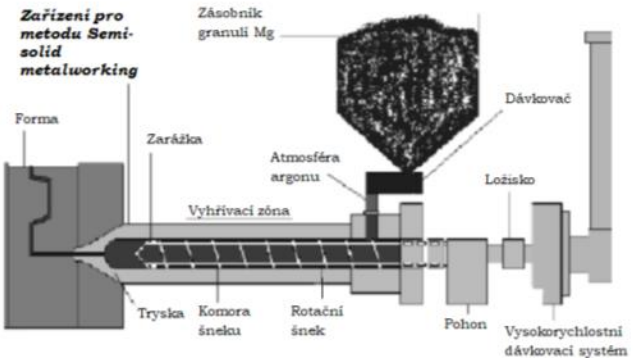
Obr. 1- 151 Schéma metod Rheocasting, Thixocasting a Thixoforging

Rheolití (rheocasting) je v podstatě modifikovaná metoda, která využívá kašovité konzistence zpracovávaného materiálu Vzhledem k tomu, že při přípravě materiálu polotovaru se využívá zákonů rheologie se tento způsob nazývá rheolití. Polotovary mají definovanou krystalizaci. Při dalším zpracování se materiál dostává do kašovitého stavu a je vtlačován do slévárenské formy.



Obr. 1-152 Globulárního struktura krystalů slitiny hliníku AlSi7Mg získaná metodou thixocasting, 200 μm [25]

Na obr. 1-153 je schéma principu semi-solid metal working.

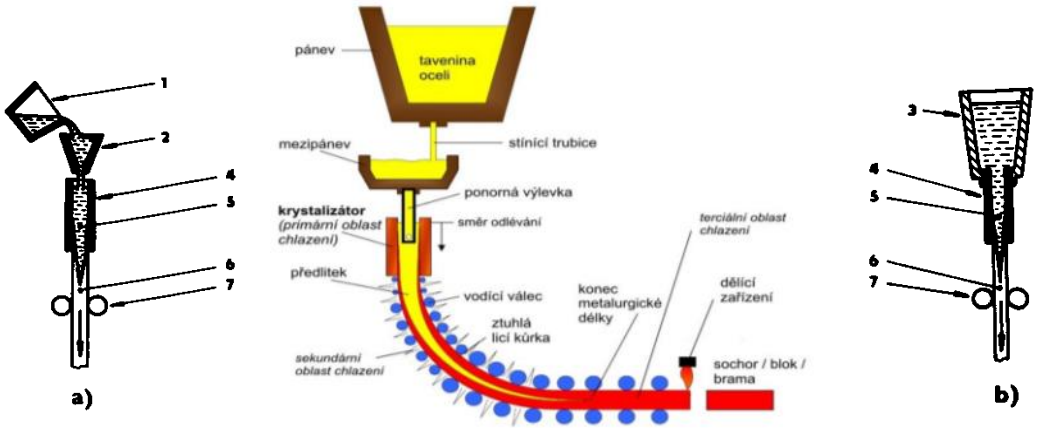


Obr. 1-153 Schéma principu Semi-solid metalworking [26], [28]

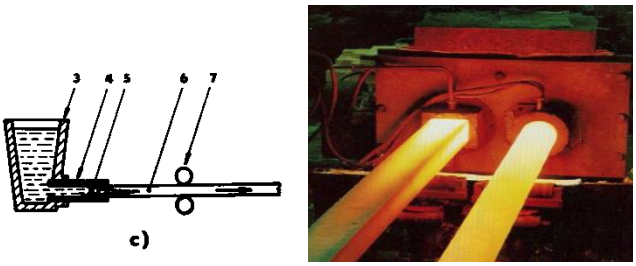
1.12 Kontinuální odlévání polotovarů

Zvláštní skupinu tvoří odlévání nepřetržité (kontinuální), nebo-li plynulé lití - pomocí kterého se odlévají např. litinové nebo hliníkové tyče čtvercového, kruhového (cca ∅ 150 mm) nebo obdélníkového průřezu o rozměrech cca 150 x 150 mm.

Princip výroby spočívá v tom, že v tavící peci se získá tavenina požadované kvality (litina, slitina hliníku, atd.), která se přeleje do udržovací pece (v udržovací peci neprobíhá vlastní tavení, ale plní funkci zásobníku taveniny a udržuje její potřebnou teplotu). Součástí spodní části udržovací pece je otvor, na který je připevněn grafitový krystalizátor o tloušťce cca 200 mm s průchozí dírou odpovídající tvaru budoucího profilu. Krystalizátor je v podstatě slévárenská forma s jednoduchou dutinou. Tavenina v krystalizátoru tuhne, čímž získáváme daný profil o délce 200 mm. V následném pracovním kroku tento profil povytáhneme z krystalizátoru. Tím opět vnikne do krystalizátoru tavenina, která v něm ztuhne. V tomto pracovním kroku již máme daný profil o délce 400 mm. Opakování těchto pracovních kroků získáváme profily o délce cca 4 až 5 m. Schéma metody je na obr. 1-154 a) a obr, 154 b).



Obr. 1-154 a) Schéma kontinuálního lití profilů [35]



a) vertikální otevřený systém
b) vertikální uzavřený systém
c) horizontální uzavřený systém

1-licí pánev; 2 - nálevka; 3 - kelímek; 4 - forma (krystalizátor); 5 - tavenina kovu; 6 - ztuhlý materiál; 7 - tažné válce

Obr. 1-154b) Schéma kontinuálního lití profilů [35]

1.13 Výroba odlitků ve zmrazených formách

Neustálý tlak na snižování nákladů při výrobě slévárenských forem přinutil odborníky k navržení a ověření nových metod, ke kterým se řadí výroba zmrazených forem a jader. Praktická aplikace přináší snížení energetické náročnosti při přípravě a pěchování formovací směsi, odpadá sušení forem a jader, příprava a použití ochranných nátěrů, čištění odlitků (popř. zcela odpadá, pokud je prováděna, náročná regenerace ostřiva). Zmrazené formy našly uplatnění v polovině 70. let (min. stol.) v anglické slévárně odlitků z LKG, slitin hliníku a oceli do hmotnosti až 150 kg. Přednosti hygienické a ekologické řadí výrobu zmrazených forem do oblasti směsí III. generace, kde se k pojení využívá fyzikálních jevů (výroba forem v magnetickém poli, výroba forem ve vakuu, výroba pískových forem bez pomocí spalitelného modelu). V České republice byl použit jako první u nás zmrazovací tunel (3,6 x 1,5 x 4,5 m) ve slévárně Tatra Kopřivnice v r. 1985 pro postupné zmrazování forem. Zmrazovací tunel obsahoval tři zóny - vstupní, předzmrazovací a zmrazovací. Zmrazování forem bylo prováděno sprchováním pomocí kapalného N_2 z mobilního zásobníku. Doba zmrazování závisí na velikosti formy, pro odlitek 100 kg, je doba zmrazování 60 až 90 [s].

Technologie výroby zmrazených forem má tyto přednosti:

a) *jednoduchou skladbu formovací směsi* - obsahuje ostřivo a vodu. Zmrazujeme-li směs až po doformování (po vyjmutí modelu) musí mít min. vazkost (pevnost za syrova) 3%, tu získáme přísadou malého množství bentonitu;

b) *směs neobsahuje obvyklé pojivo* a led má jen dočasný pojivový účinek, ostřivo není znečištěno a po jeho použití může být opět zařazeno do výrobního oběhu. To umožňuje i použití i drahých nekřemenných ostřiv (chromit, zirkon, korund, atd.);

c) *zmrazené formy vykazují vysokou pevnost*, která je srovnatelná s pevností samotvrdnoucích směsí s vodním sklem. Při použití nekřemenných ostřiv je u těchto forem pevnost v tlaku 20 až 30 MPa. U těchto forem s křemenným ostřivem je pevnost nižší 1 až 2 MPa. Formy s vyšším obsahem vody nad 6% vykazují po zmrznutí vysokou prodyšnost - cca 550 j.p. SI. Obecně zmrazené

formy vykazují vyšší prodyšnost než běžné (nezmrazené) formy s bentonitovým pojivem;
d) *ve zmrazených formách* vznikají při odlévání jiné poměry pro vznik kondenzační zóny;
e) zmrazené formy mají nižší odolnost proti erozi taveniny. Vyšší odolnost lze zajistit použitím drobnějších zrn ostřiva, malým přídavkem bentonitu. Také je menší odolnost proti sálavému teplu taveniny. Tyto vlastnosti se zvyšují přídavkem jílů;
f) *zmrazené formy vykazují* snadnou rozpadavost, obzvlášť když se ve formě ustaví nepatrně kladné teploty;
g) *odlitky ze zmrazených forem* vykazují poměrně dobrou drsnost povrchu, která je cca Ra = 16.10^{-6} [m] pro odlitky litinové a Ra = $6{,}3.10^{-6}$ [m] pro odlitky ze slitin hliníku.

1.14 Tavení a metalurgická úprava slévárenských slitin

K přípravě tavenin kovů slouží různá tavící zařízení, resp. pece. Pece pro tavení kovů jsou několika typů a liší se způsobem ohřevu, velikostí, výkonem, dosažitelností teploty, čistotou roztaveného kovu a možností ovlivněním chemického složení taveniny. Použitá pec závisí na druhu slévárenské slitiny.
Obecně platí, že pro *slitiny železa* (grafitické litiny a ocel na odlitky) se individuálně připravuje vsázka. Obsah jednotlivých složek kovové vsázky pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem (surové železo, vratný materiál, litinový šrot, ocelový šrot, feroslitiny) se počítá, aby bylo dosaženo potřebné chemické složení odlévané taveniny. Dále se pro výrobu litiny v kuplovně používá koks a vápenec. Na obr. 1-155 je surové železo, koks a vápenec ($CaCO_3$).



Obr. 1 – 155 Housky surového železa, koks a vápenec

Naopak slitiny *neželezných kovů* (slitiny hliníku, slitiny mědi, slitiny zinku, slitiny hořčíku, atd.) se kupují ve formě ***housek***, viz obr. 1-156 a) (od metalurgických firem).



Obr. 1-156 a) Housky neželezných kovů (slitiny hliníku, slitiny zinku,

slitiny mědi)

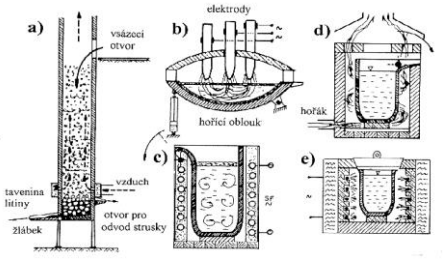
Na obr. 1-56 b) je ukázka odlévání housek, ze slitiny zinku, tak jak je vyrábí v metalurgických firmách. Housky se odlévají do kovových forem jednoduchých tvarů.



Obr. 1-56 b) Odlévání housek ze slitiny zinku do kovových forem a kovová forma pro výrobu housek [60]

Např. taveniny litin s lupínkovým grafitem se připravují v pecích tzv. *kuplovnách*. Jsou slévárny, kde se tavenina litiny připravuje v elektrických indukčních pecích (např. dříve ŠKODA – Auto tavila v elektrických indukčních pecích ve svém slévárenském provozu taveninu litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu vložných válců do bloků spalovacích motorů). Tento typ pece může sloužit i k tavení ocelí na odlitky. Elektrické obloukové pece se používají speciálně pro tavení ocelí. Slitiny hliníku, zinku, atd. se taví v plynových nebo odporových pecí. Tavenina litin a ocelí se připravuje tavením speciálních surovin (viz dále), slitiny neželezných kovů (hliníku, mědi, hořčíku a zinku) se dodávají do sléváren v houskách o příslušném chemickém složení, kde se taví v příslušné peci.

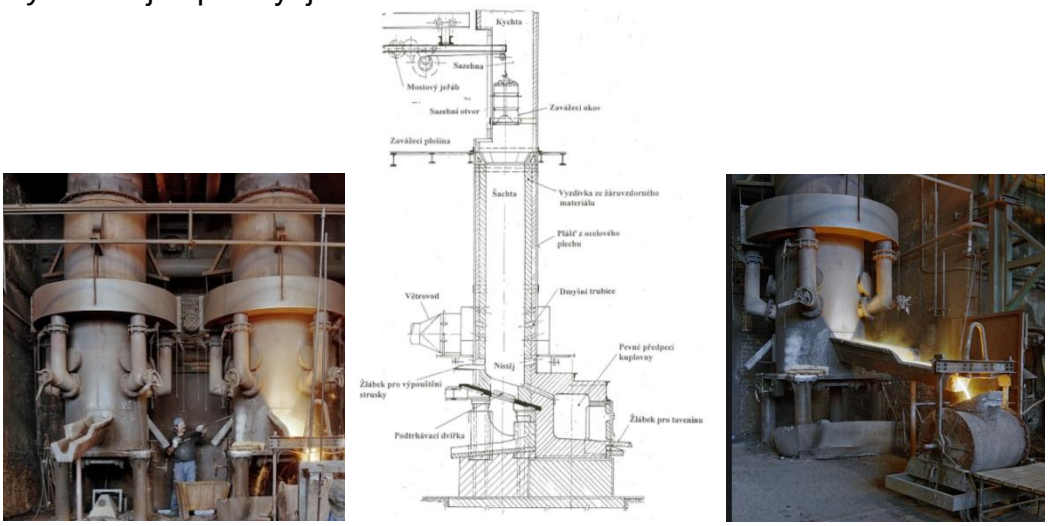
Tavenina se z tavící pece vlévá (přelévá) do pánví nebo do grafitových kelímků. Před odléváním se tavenina ještě ***metalurgicky ošetřuje***, stahuje se struska. Dále se podle potřeby tavenina před odléváním ***očkuje*** nebo ***modifikuje***, to závisí na typu odlévaného materiálu. Hliníkové slitiny se před odléváním ještě odplyňují a rafinují pomocí speciálních solí. Tavenina je pokryta struskou (je tvořena silikáty) a před odléváním se struska stahuje, aby se nedostala do dutiny formy. Po změření teploty se tavenina vlévá do slévárenské formy.
Tavící pece jsou: kuplovna, elektrická indukční středofrekvenční pec, obloukova pec, šachtová pec plynová, vanová pec plynová, kelímková pec plynová, odporová pec kelímková, atd. Jejich použití závisí na tavené slitině. Na obr. 1 –157 je schéma vybraných slévárenských pecí.



a) *kuplovna;* ***b)*** *oblouková pec;* ***c)*** *indukční pec;* ***d)*** *plynová kelímková pec;* ***e)*** *elektrická odporová pec*

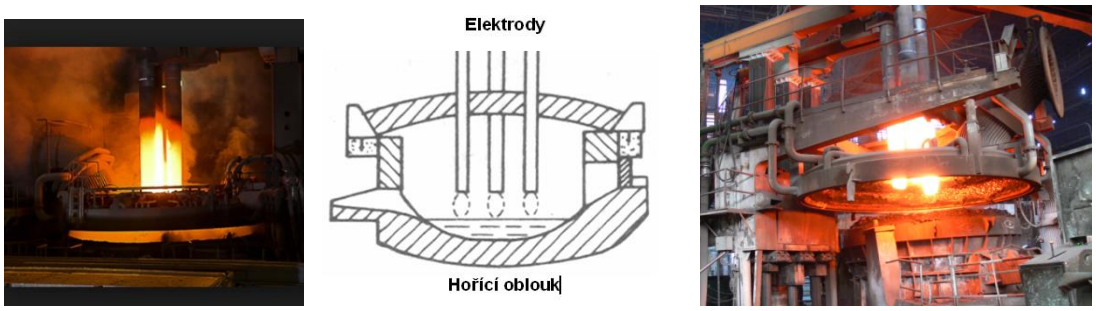
Obr. 1-157 Schémata tavících pecí

Kuplovna je šachtovitá pec, která výhradně slouží jen k tavení litiny, tj. slitiny železa s uhlíkem, kde obsah uhlíku je nad 2,14%. Kuplovna má pracovní průměr cca 1 m a výška pracovního prostoru je cca 5 m. Z vnějšku je tvořena ocelovým pláštěm a vyzdívkou. Horní část kuplovny je kychta, spodní část nístěj, kde se soustřeďuje tavenina a po žlábku vytéká z pece. Buď do tzv. předpecí nebo přímo do pánve. Do kuplovny se dává (vsází) v určitém poměru kovová vsázka, struskotvorné přísady (např. vápenec, kazivec) a koks jako palivo. Současně se do pece dmýchá vzduch, ten podporuje hoření. Vyzdívka klasické kuplovny běžně vydrží tavbu jednoho dne. Proto musí být tyto kuplovny dvě vedle sebe. V jedné se taví, druhá se opravuje a tak se to každý den opakuje. Dnes existují moderní kuplovny, které jsou jiné konstrukce, splňují i přísné ekologické nároky a lze v nich provádět tavbu dlouhodoběji (nepřetržitě cca tři týdny).
U klasické kuplovny se tekutý kov shromažďuje ve spodní části, kde je základový koks, po kterém stéká tavenina k odpichovému otvoru. Odtud nejčastěji do předpecí, které slouží jako zásobník roztaveného kovu a umožňuje homogenizaci chemického složení. Účinnost kuplovny je dobrá, výkon tavení je vysoký, možnosti ovlivnění metalurgických reakcí jsou však omezené a je obtížné udržet přesné chemické složení tekutého kovu, neboť do taveniny přechází jak nečistoty z kovové vsázky, tak uhlík a síra z koksu. Schéma kuplovny a nístěj kuplovny jsou na obr. 1-158.



Obr. 1-158 Schéma kuplovny a nístěj kuplovny se žlábkem (vpravo) [37]

Elektrická obloukové pec je určena především pro tavení oceli na odlitky. Kovová vsázka se ohřívá teplem elektrického oblouku, který hoří mezi dvěmi nebo třemi elektrodami zprostředkovaně přes kovovou vsázku, viz obr. 1-159. Hořením oblouku mezi elektrodami vyvolává teplotu cca 3200°C. Tekutý kov je krytý aktivní struskou, která umožňuje jeho rafinaci (snížení obsahu nežádoucích nečistot), současně však dochází i k propalu (ubytku) řady přísadových prvků. Obloukové pece jsou ve slévárnách oceli nezbytné, neboť umožňují tavit i méně čistou vsázku.



Obr. 1 –159 Schéma obloukové pece a pohled na obloukovou pec [36]

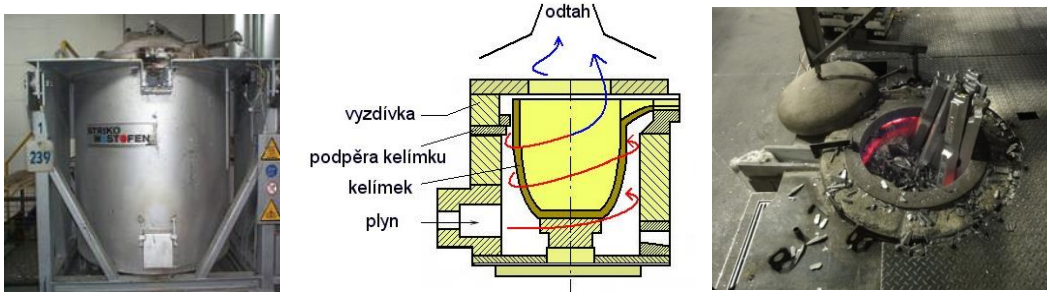
Elektrická indukční středofrekvenční pec je založena na principu vířivých proudů, viz obr. 1-160. Taví velmi rychle, s vysokou účinností a s minimálním propalem přísad. Vsázku dáváme do kelímku z nevodivého materiálu. Vsázka tvoří jádro cívky. Indukcí vzniká teplo potřebné k tavení vsázky. Pec se používá tam, kde potřebujeme uchovat potřebné chemické složení, tj. při tavení legovaných ocelí a speciálních druhů litin.



1 – kroužek spojený nakrátko, 2 – vodou chlazený měděný prstenec, 3 –tavenina,4 – ocelová kostra, 5 – betonový prstenec, 6 – kopulovitá hladina taveniny, 7 – pohyb taveniny, 8 – kelímek, 9 – induktor, 10 – svazek plechů

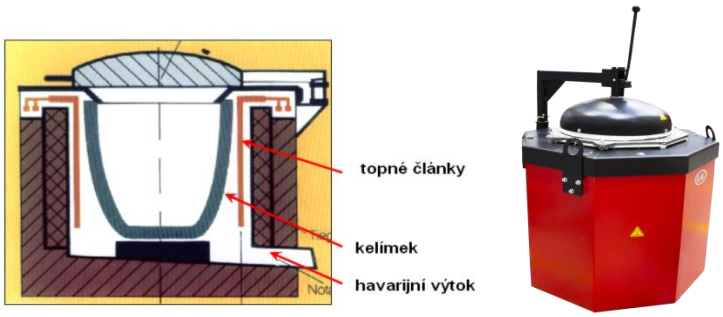
Obr. 1-160 Schéma a indukční středofrekvenční pece [61]

Plynová kelímková pec, viz obr. 1-161, se uplatňuje při tavení neželezných kovů (slitin hliníku a mědi). V současné době, kdy se zvyšují náklady za plyn, začíná být provoz těchto pecí velmi nákladný. Nehledě k tomu, že je nebezpečí nasycení taveniny vodíkem, který může v atomárním stavu proniknout kolem stěny keramického kelímku do taveniny.



Obr. 1–161 Schéma kelímkové plynové pece [58]

Elektrická odporová kelímková pec, viz obr. 1-162, se používá pro tavení slitin neželezných kovů, lze jí použít pro tavení hliníku a zinku. Její provoz je dosti nákladný. Kelímek se ohřívá sálavým teplem odporové spirály. Tím dochází k tavení kovu v kelímku.



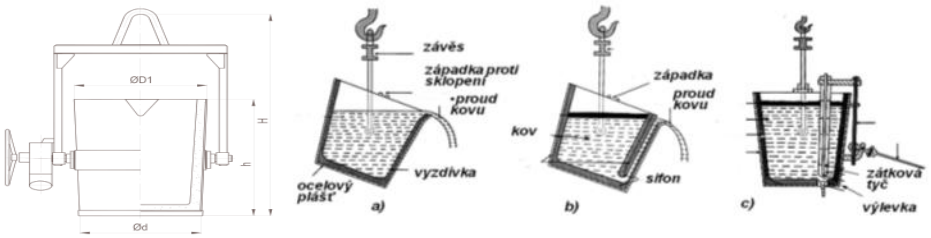
Obr. 1 – 162 Schéma odporové kelímkové pece [62]

Provádění tavby je náročné, neboť se musí dodržet přesné chemické složení slitiny. Roztavený kov nesmí být nasycen plyny.

Z tavících pecí se tavenina vlévá do různých *pánví*, které slouží k nalití taveniny do slévárenské formy. Rozlišujeme např. velké pánve bubnové nebo kelímkové. Obecně jsou známé dva způsoby odlévání horem a spodem. K tomu jsou také uzpůsobené pánve, např. pánev bubnová, která na svém vrcholu je opatřena nálevkou („hubičkou“), jak je patrné z obr. 1- 163. Na obr. 1-164 je hrncová pánev.



Obr. 1–163 Bubnová pánev



Obr. 1-164 Hrncová pánev, a) - sklopná, b) – čajníková, c) - zátková

Před vlastním odléváním taveniny do formy je důležitá teplota taveniny a současně je nutné i odstranění strusky, která plave na hladině taveniny.

1.14.1 Metalurgické ošetření tavenin slitin kovů před odléváním

1.14.1.1 Ošetření tavenin litin

Metalurgické ošetření tavenin litin, se provádí před každým odléváním taveniny do dutiny formy. Mezi tato ošetření se řadí *očkování a modifikace* taveniny litiny.

Očkování litin se provádí za účelem získání jemnozrnného a pravidelného vyloučení grafitu při krystalizaci litiny. Jako očkovadlo slouží např. ferosilicium FeSi 75, Gramod, nebo čistá měď. Tyto látky se přidávají do taveniny před jejím odléváním. Dnes existují různé způsoby očkování a výrobci očkovadel jim věnují velkou pozornost.

Modifikace litin se provádí za účelem získání jiného typu grafitu než je lupínkový. Modifikace taveniny před odléváním je nutná při výrobě litiny s kuličkovým grafitem (LKG) nebo litiny s červíkovitým grafitem (LČG). Modifikátor je povrchově aktivní látka, která se před odléváním přidává do taveniny. Při výrobě LKG se používá k modifikaci hořčík (v zahraničí cér), který však má nízkou zápalnou teplotu a při jeho odlévání probíhá bouřlivá reakce. Proto se používají speciálně upravené modifikační pánve nebo speciální modifikační zařízení (např. autoklávy - zařízení, kde lze měnit tlak). Po správné modifikaci LKG získáváme ve struktuře této litiny kuličkový grafit, podobně je tomu při výrobě LČG (litiny s červíkovitým grafitem).

Během tavení provádíme kontrolu chemického složení taveniny. Při tavení litin odléváme ještě různé zkušební tyče a sledujeme mechanické vlastnosti - pevnost v tahu a tvrdost (pomocí trhacího stroje a tvrdoměru).

1.14.1.2 Ošetření taveniny neželezných kovů

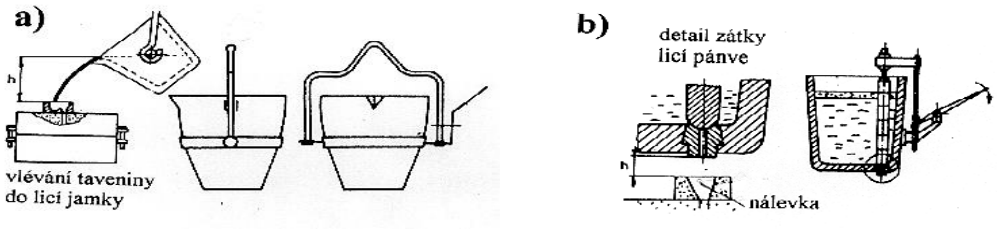
Ošetření taveniny neželezných kovů před odléváním, u taveniny neželezných kovů se současně provádí rafinace (tavenina se zbavuje dalších nečistot) pomocí rafinačních solí, které jsou na bázi chloridů a fluoridů a současně působí jako modifikátor. Např. u slitin Al-Si (silumínů) dochází při eutektické krystalizaci nemodifikovaného siluminu k příliš rychlému vylučování tuhého roztoku β (tj. v podstatě křemík), který se projevuje jehlicovitou strukturou. Aby se tomuto zamezilo, provádí se před odléváním tzv. modifikace taveniny siluminu prostřednictvím solí (NaCl+KCl+NaF), zde je modifikátor součástí rafinačních solí a přidává se do pánve s taveninou těsně před jejím litím. Při eutektické krystalizaci siluminu se vedle tuhého roztoku β (zde téměř čistého křemíku) vylučují také krystaly tuhého roztoku α (zde téměř čistého hliníku).

Méně často se používá *očkování* neželezných kovů, nejčastěji siluminů, které má za účel zjemňovat zrna odlitku, tj. zjemnit krystaly tuhých roztoků α nebo β, které vznikají při tuhnutí (krystalizaci) přímo z taveniny (viz obecně známý rovnovážný diagram s částečnou rozpustností v tuhém stavu). Pro zjemnění α fáze silumínů podeutektického složení jako očkovadlo slouží např. titan, a pro zjemnění β fáze u nadeutektoidních siluminů se používá fosfor. Tyto látky se přidávají do taveniny před jejím odléváním do formy.

1.15 Odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitků

Tekutý kov, resp. tavenina ze které se vyrábí odlitky se připravují ve speciálních provozech, které se označují *tavírny*.
Jak již bylo uvedeno, roztavený kov se až na výjimky z pece vlévá do pánví a v nich se dopravuje k vlastnímu odlévání do formy. Licí pánve jsou kovové nádoby různé velikosti opatřené keramickou žáruvzdornou vyzdívkou. Malé pánve žáruvzdornou výduskou. Menší pánve se přenáší ručně, větší pánve jeřáby. Existují dva typy odlévání, ke kterým jsou pánve uzpůsobeny:

a) odlévání horem (litina, bronz, hliník)
b) odlévání nebo spodem (ocel), viz obr. 1-165 b).



a) pánev pro odlévání horem; b) pánev pro odlévání spodem

Obr. 1-165a) Schémata licích pánví pro odlévání horem

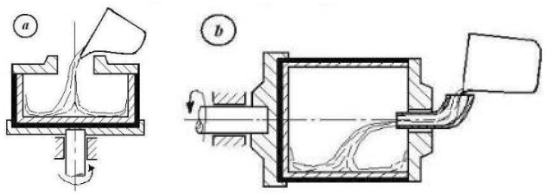


Obr. 1-165b) Licí kelímek a pánve pro odlévání horem (tzv. přes hubičku)

1.15. 1 Základní způsoby odlévání

Gravitační lití - tavenina se lije z pánve do formy, přičemž využíváme vlastní tíhy roztaveného kovu. Gravitačním způsobem se odlévá:
a) do kovových forem - odlévají se neželezné kovy, především slitiny hliníku (lití hlav spalovacích motorů ŠKODA), dosahujeme velmi kvalitní odlitky. Kovové formy v tomto případě jsou vyrobeny z litiny s lupínkovým grafitem. Výjimečně se do litinových kokil odlévá litina (výroba brzdových válečků fy. Lucas);
b) do pískových forem - odlévá se především grafitická litina, popř. slitiny hliníku, mědi a hořčíku;
c) do keramických forem na vytavitelný model - odlévá se především ocel na odlitky, dále slitiny hliníku nebo zinku.

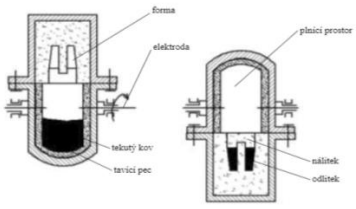
Odstředivé lití - způsob lití, kdy se vlévá tavenina kovu do rychle se otáčející formy (nejčastěji kovové). Kov je odstředivou silou (vyvozenou rotací formy) rovnoměrně přitlačován ke stěně formy, kde tuhne. Tento způsob lití se používá pro výrobu litinových rour, dále např. nízkotavitelných slitin neželezných kovů (zinek, cínu a olovo). Odstředivé lití dělíme na horizontální a vertikální, viz obr. 1-166. Tavenina se vlévá do rotující formy pomocí pánve. Dále na pravé a nepravé. U pravého odstředivého lití se shoduje osa rotace zařízení (stroje) s geometrickou osou rotace odlitku. Nepravé je takové, kdy osa rotace formy není totožná s osou odlitku. Výhodou je úspora jádra, odpadá použití vtokové soustavy a výfuku (plyny odcházejí volně do prostoru). Odlitky mají jemnozrnnou strukturu bez vnitřních vad. Tímto způsobem se odlévají odlitky rotačních tvarů, nedají se odlévat odlitky s neválcovou dutinou. Stroj musí mít tuhou konstrukci a musí být vybaven zařízením na změnu otáček. Pro odlévání je nutno stanovit potřebné otáčky, aby byl vyroben kvalitní odlitek. Nastavitelné otáčky stroje umožňují regulaci odstředivé síly, a tím i dokonalé vyplňování dutiny formy taveninou. Rozměrová přesnost odlitků je v rozmezí cca 0,05 až 0,1 mm. Odstředivé lití se používá pro výrobu rotačních odlitků, např. trub, kroužků válců, polotovarů ozubených kol, atd.



a) zařízení se svislou osou rotace, b) zařízení s vodorovnou osou rotace

Obr. 1-166 Schéma základních typů odstředivého lití

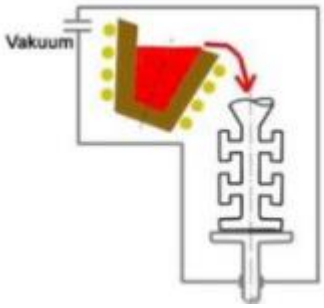
Sklopné lití - je takové, kdy sklopením tavícího zařízení (speciální pece), na kterém je upevněna slévárenská forma, dojde k nalití roztaveného kovu do dutiny formy. Při sklopném lití, viz obr. 1-167, které se velmi používá, se na obloukovou pec nasazuje písková formu. V peci se taví přesně stanovené množství kovu elektrickým obloukem. Elektrický oblouk hoří mezi dvěma uhlíkovými elektrodami uprostřed tavícího prostoru. Osa rotace sklopné pece se shoduje s osou rotace elektrod. Po natavení se pec překlopí o 180 ° a tavenina stéká do formy po jedné straně a po druhé straně vystupuje z dutiny formy vzduch. Tato metoda se používá při výrobě nástrojů (nástroje jsou vyrobeny z nástrojové oceli), neboť nedochází k nežádoucí oxidaci taveniny. Tímto způsobem jsou vyráběny frézy, šroubové vrtáky, atd.



poloha před odléváním (vlevo), poloha po odlití (vpravo)

Obr. 1-167 Schéma sklopného lití [21]

Lití ve vakuu - musí být speciální zařízení, které je schopné snížit tlak natolik, aby vzniklo vakuum. Proces je ekonomicky náročný, používá se tam, kde chceme vyrobit vysoce kvalitní odlitky. Vakuum se dosáhne vývěvou. Pro metalurgická zařízení se vyvozuje podtlak 10 až 10^{-1} [Pa]. V současné době existují vakuové pece, kde je možno realizovat odlití. Při odlévání ve vakuu nedochází např. k oxidaci taveniny. Kvalita odlitků je vysoká.



Obr. 1-168 Schéma odlévání ve vakuu [22]

Odlévání taveniny do netrvalých forem se provádí na tzv. *licím poli* (místo, kde jsou připraveny formy k odlití), zde se odlévá tavenina z optimální teploty do licí jamky nebo nálevky slévárenské formy. Licí jamka nebo nálevka je součástí vtokové soustavy.
Na licím poli dochází k tuhnutí a k chladnutí taveniny ve formě odlitky z litiny s lupínkovým grafitem (LLG), neboť je možnost. Ve správném časovém okamžiku po odlití je nutno formu rozbít a vyjmout odlitek. Na vytloukání z forem jsou citlivé vzniku prasklin. O okamžiku vytloukání odlitku rozhoduje výše jeho teploty.

1.16 Vytloukání odlitků z netrvalých forem, čištění odlitků a dokončovací operace

Vytloukání odlitků z netrvalých forem se provádí na vytloukacích roštech, zde pracovníci kladivem uráží i vtokovou soustavu a nálitky u odlitků z LLG. Pod vytloukacím roštem prochází pásový dopravník, který odvádí použitou formovací a jádrovou směs. Na obr. 1-169a) jsou válečkové dopravníky a na obr. 169b) je ukázka vytloukání odlitků z forem. V tomto případě formy s odlitky jedou po válečkové trati odlitky k jeřábu, který nadzvedne rámy a vyjmuté odlitky jedou po válečkové trati na místo oddělování vtokových soustav.



Obr. 1-169 a) Válečkové dopravníky pro dopravu forem k vytloukání




Obr. 1-169 b) Ukázka vytloukání hliníkových odlitků z formy

Vyjmutý odlitek z formy se nazývá *surový*, obsahuje vtokovou soustavu, výfuky, otřepy, popř. nálitky.

Čištění odlitků, viz obr. 1-170, se provádí v *čistírnách*, zde se odstraňují nálitky, případné výfuky (někdy i vtoky), švy - tj. kov, který vnikl mezi obě poloviny formy do dělící roviny. Tyto kovové podíly se vrací do tavírny k roztavení jako tzv. *vratný materiál*.
Je-li odlitek zbaven vtokové soustavy, výfuků a nálitků, popř. otřepů nazývá se *hrubý*. K odstranění formovací směsi a jader z odlitků se často používají tryskací boxy. Ve kterých se na odlitky tryskají malinké ocelové kulaté broky, které čistí povrch odlitků od zbytků formovací směsi a jader.




Obr. 1 – 170 Tryskací boxy

Dokončovací operace odlitků - mezi dokončovací operace patří např. hrubování některých částí odlitku, nebo jiná třísková operace. To je v případě, kdy obrobna je součástí slévárny. Je-li opracována některá funkční část odlitku, pak tento odlitek se označuje *čistý* a po případném ošetření základním nátěrem (dle sjednaného přejímacího protokolu) a po následné výstupní kontrole je odlitek určen k expedici.

Očištěné odlitky se podrobují kontrole rozměrů a jakosti. Sledujeme především rozměrovou toleranci, výskyt povrchových vad a trhlin. U některých odlitků, na jejichž funkčnosti závisí lidský život jsou 100% kontrolovány - např. prozařovány rentgenem nebo kontrolovány ultrazvukem. Charakter dokončovacích operací závisí na možnostech slévárny. Někdy upravený očištěný a zkontrolovaný hrubý odlitek opatřený proti korozním nátěrem bývá konečným výrobkem slévárny a odesílá se k dalším operacím do obrobny.

1.17 Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků

V současné době se i ve slévárenství uplatňuje výpočetní technika a to ve dvou oblastech. *Jedna oblast* je technologie, řízení celého výrobního procesu, včetně ekonomických ukazatelů výroby nebo alespoň řízení formovacích a odlévacích linek, dále řízení pracovního cyklu při vysokotlakém lití. *Druhá oblast* se týká simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitků. Tato oblast umožňuje předurčení případných výrobních chyb a nepřesností v době přípravy výroby nebo řešení technologických problémů, systematické odstraňování technologických chyb a úprav již vyráběného odlitku.

První slévárenské simulační programy se objevily v 80. letech minulého století, byly japonské provenience. Dnes nacházíme na evropském trhu celou řadu komplexních slévárenských simulačních programů, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh, stále se inovují, doplňují a rozšiřují možnosti jejich uplatnění. Orientují se zejména na řešení těchto hlavních skupin problémů:

a) plnění forem;
b) tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy);
c) vznik struktury a utváření vlastností odlitku;
d) vznik vnitřních pnutí a deformací.

Simulační výpočet se skládá ze tří základních kroků, k jejich uskutečnění slouží tzv. výpočtové moduly.

První modul je určen k vytvoření nebo načtení geometrie tzv. *preprocessing*. Hlavní výpočtový modul se označuje *mainprocessing*, který provádí vlastní simulační výpočet a na něj je vázán modul, tzv. *postprocessing*, který zobrazuje výsledky simulačního výpočtu. Součástí každého simulačního software je databáze, což je přehled tepelně-fyzikálních veličin používaných materiálů odlitků i forem. Databáze nejnovějších simulačních programů obsahují hodnoty alespoň některých fyzikálních veličin v závislosti na teplotě (tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu, hustotu, součinitel přestupu tepla). Téměř u všech simulačních programů je možnost databanku obohacovat o hodnoty vlastních materiálů a také s nimi počítat.

Kvalita simulačních programů je různá, závisí na různých okolnostech, především na kvalitě tepelně-fyzikálního popisu dějů, které probíhají při vytváření odlitků ve slévárenských formách. Poměrně velkým problémem při uplatnění simulačních programů je uplatnění správných hodnot potřebných tepelně-fyzikálních veličin použitých materiálů. Zde jsou potřebné tyto hodnoty v závislosti na teplotě. Nedostatek hodnot odpovídajících veličin v závislosti na teplotě bývá nejčastěji příčinou rozdílů mezi výsledky získanými simulací, resp. simulačním výpočtem a příp. prováděným experimentálním měřením při srovnatelných podmínkách.

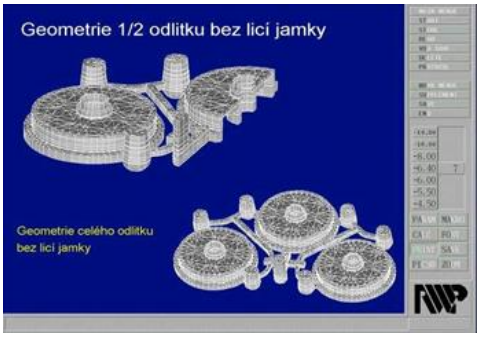
V současné době je ve světě asi 16 nejznámějších slévárenských simulačních programů, v tabulce 1.13 jsou uvedeny ty, které se nejvíce objevují na našem trhu.

Tabulka 1.13 Přehled výpočtových simulačních slévárenských programů

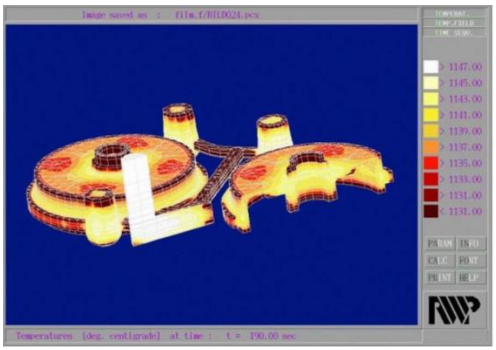
Název programu	Země původu	Metoda tvorby sítě	*Simulační výpočet zahrnuje*			
			Plnění formy	Tuhnutí a chladnutí	Zbytkové pnutí	Struktura odlitku
PROCAST ™	USA	FEM	X	X	X	X
WIN CAST (SIMTEC)	Německo	FEM	X	X	X	X
MAGMA SOFT	Německo	FDM	X	X	X	X
NOVA FLOW NOVA SOLID	Švédsko	FDM	X	X	-	X
PAM-CAST(tm)	Francie	FDM	X	X	-	X
FLOW 3D	USA	FDM	X	X	-	X
CALCO SOFT	Švýcarsko	FEM	X	X	-	X

***Poznámka**: U simulačních programů je důležitá metoda tvorby simulační sítě:*
FEM (Finite Elements Method) = metoda konečných prvků; FDM (Finite Differences Method) = metoda konečných diferencí (metoda sítí)

Na obr. 1-171a) je geometrie odlitků brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem. Tyto odlitky byly odlévány do bentonitové formy. Simulačním výpočtem byly sledovány teploty v různých časových okamžicích po odlití. Na obr. 1-68b) je ukázka rozložení teplot v odlitcích ve 190 [s] po odlití. Z těchto simulací se nechají posoudit některé okolnosti vedoucí k výrobě kvalitních odlitků.



Obr. 1-171a) Geometrie brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem, simulováno programem WinCast (RWP Aachen-SRN)



Obr. 1-171b) Nasimulované rozložení teplot v okamžiku 190 [s] po odlití (teplotní stupnice je v pravé části obrázku)

1.18 Vady odlitků

Výroba odlitků je vždy spojena s výskytem určitého množství odlitků s vadami. Vadou odlitku se rozumí každá odchylka od rozměrů, hmotnosti, vzhledu, makro nebo mikrostruktury nebo vlastností předepsaných příslušnými normami. Vady mohou být *zjevné* nebo *skryté*. Zjevná vada je vždy taková, která je vidět pouhým okem. Skryté vady jsou takové, které lze zjistit až po analýze odlitku vhodnými přístroji nebo laboratorními zkouškami. Podle rozsahu a charakteru mohou být vady *nepřípustné, přípustné*, *opravitelné* nebo *neopravitelné.*

Nepřípustná vada je taková odchylka od příslušných norem, kterou nelze odstranit opravou.

Přípustná vada je taková, kterou normy nebo technické dodací podmínky připouštějí, aniž požadují její odstranění u výrobce odlitků, pokud není zvláštními podmínkami dovolena nebo není vysloveně zakázaná.

Odstranitelná vada je taková odchylka od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek, jejíž oprava vhodným způsobem (zavařením, vyžíháním, atd.) je těmito normami nebo technickými podmínkami dovolenou nebo není vysloveně zakázána. Odstranitelnou vadu je možno odstranit po dohodě se spotřebitelem odlitku jen zvláštními úpravami. Podle ČSN 42 1240 se třídí vady odlitků do sedmi skupin podle vnějších znaků. V rámci těchto skupin se vady třídí podle druhu. V tabulce 1.14 je uveden přehled vad odlitků.

Nebezpečí zmetků je při výrobě odlitků mnohem vyšší než u jiných technologií, protože zde působí řada faktorů, z nichž některé nelze ani ovlivnit (jakost surovin, vlhkost ovzduší, složitost odlitků, atd.).

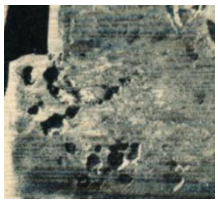
Nehledě na to, že slévárenství je z hlediska teoretického mnohovědní disciplína, která uplatňuje zákony: proudění kapalin, krystalizace slitin s eutektickou přeměnou, nestacionární sdílení tepla a hmoty, pružnosti a pevnosti, atd. Často je velmi složité identifikovat technologické nedostatky výroby, resp. vady odlitků.

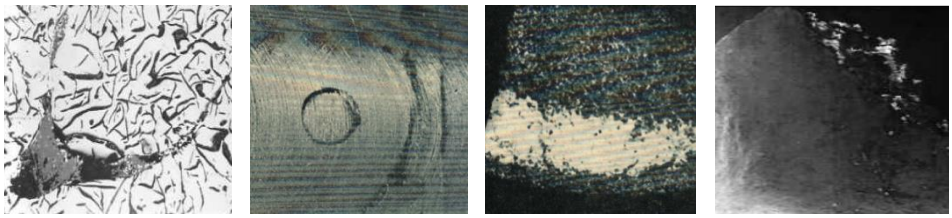
Pokud se zmetkovitost pohybuje v obvyklých mezích, počítá se s touto skutečností a zhotovuje se určitý počet odlitků navíc. Nepředvídané zvýšení zmetkovitosti a její včasné nezamezení může značně ochromit výrobu a tím i její ekonomický efekt.

Z těchto důvodů má pro slévárnu velký význam odbor řízení jakosti, pod který spadá tzv. technická kontrola. Jejím úkolem je sledovat nejen kvalitu odlitků, ale také dodržování všech technologických zásad. Při řízení jakosti má význam též matematická statistika, která umožňuje posuzovat, zda četnost jednotlivých vad nepřesahuje ekonomicky únosnou mez.

Na obr. 1-172 jsou uvedeny některé vady odlitků.





Vady shora odleva: bubliny, řediny, struskovitost, zadrobeniny, oxidické blány, kovové vměstky, obrácená zákalka a nekovové vměstky

Obr. 1-172 Vybrané vady odlitků

Tabulka 1.14 Vady odlitků dle ČSN 42 1240, roztřídění vad odlitků do skupin

Vady odlitků dle ČSN 42 1240, názvosloví a jejich rozdělení			
Číslo skupiny vad	***Název skupiny vady***	***Číselné označení vady***	***Název druhu Vady***
1	***Vady tvaru, hmotnosti a rozměrů odlitku***	11	Nezaběhnutí
		12	Přesazení
		13	Zatekliny
		14	Vyboulení
		15	Zborcení
		16	Mechanické poškození
		17	Nedodržení rozměrů
		18	Nedodržení hmotnosti
2	***Vady povrchu odlitků***	21	Připečeniny
		22	Zavaleniny
		23	Zálupy
		24	Nárosty, strupy
		25	Výronky
		26	Výpotky
		27	Okujení, opálení
		28	Omáčknutí, otlučení
3	***Porušení souvislosti***	31	Trhliny
		32	Praskliny
4	***Dutiny v odlitku***	41	Bubliny
		42	Bodliny
		43	Staženiny
		44	Řediny
		45	Mikrostaženiny
		46	Mikrobubliny
5	***Vměstky v odlitku***	51	Struskovitost
		52	Zadrobeniny
		53	Nekovové vměstky
		54	Broky
		55	Kovové vměstky
6	***Vady struktury Odlitků***	61	Odmíšení
		62	Nevyhovující lom
		63	Zatrvdlina, zákalka
		64	Obrácená zákalka
		65	Nesprávná struktura

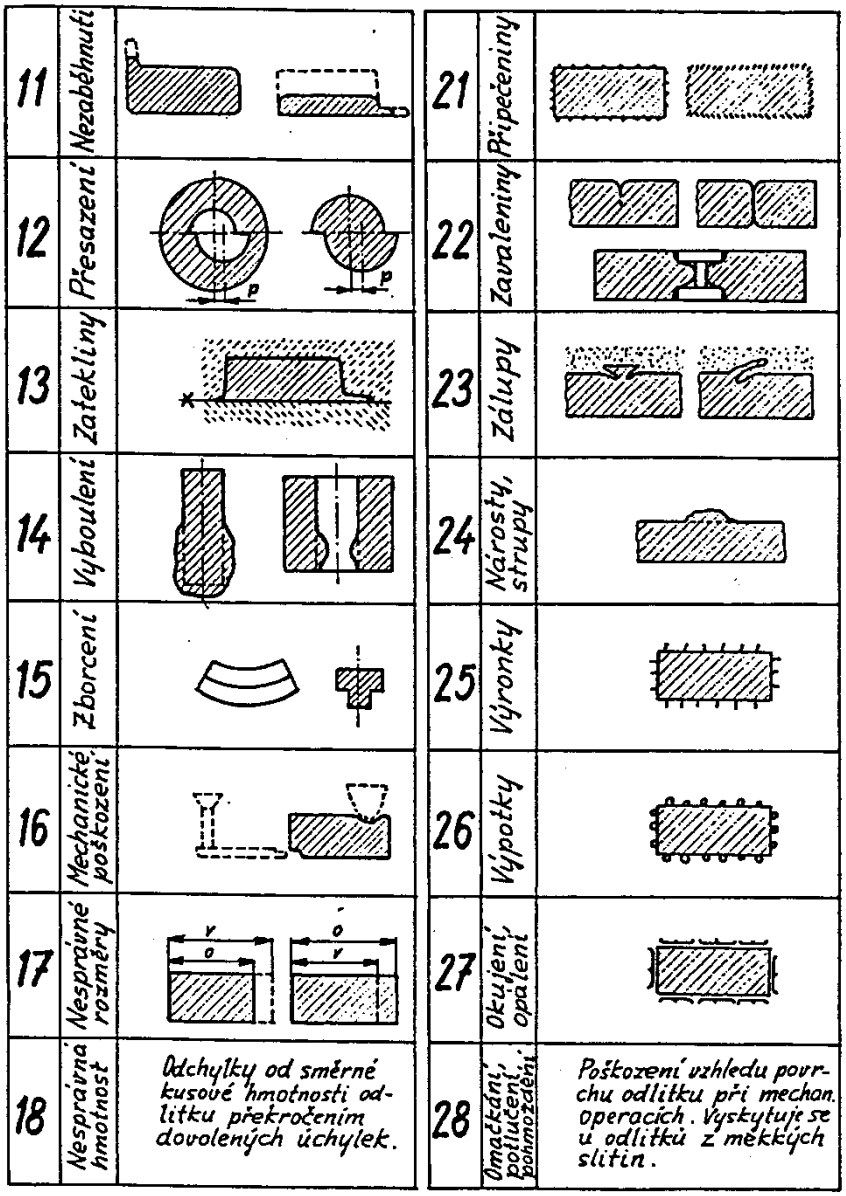
7	***Vady chem. složení, nesprávné fyz. nebo mech. vlastnosti odlitku***	71	Nesprávné chemické složení
		72	Nesprávné mech. vlastnosti
		73	Nevyhovující fyz. vlastnosti

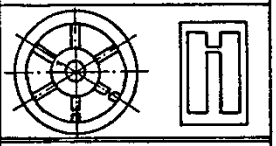
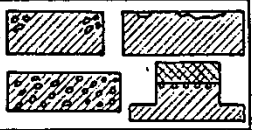
Poznámka: ***Klasifikace odlitků podle jakosti***

Z hlediska použitelnosti odlitky lze rozdělit do 4 skupin:

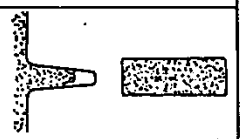
1. Zcela dobré odlitky – vyhovují výkresu, technickým podmínkám i normám;
2. Opravitelné odlitky – je možno odstranit opravitelné vady, aby odlitky vyhovovaly podmínkám;
3. Nevyhovující odlitky – ani případnou opravou nelze odstranit příslušné vady.
4. Podmíněné zmetky – mají vady, které po dohodě s odběratelem lze akceptovat.

Tabulka 1.15 Schéma vad odlitků



31	Trhliny	
32	Praskliny	
41	Bubliny	
42	Bodliny	
43	Staženiny	
44	Řediny	
45	Mikrostaženiny	Mezikrystalické, prostým okem neviditelné dutiny, vznikající při tuhnutí kovu zmenšováním objemu zbytku taveniny, uzavřené mezi dříve ztuhlými krystaly.
46	Mikrobubliny	Tečkovité drobné dutiny, prostým okem neviditelné, vznikající při tuhnutí kovu mezi dříve ztuhlými krystaly vylučováním plynů rozpuštěných v kovu.

51	Struskoviny	
52	Zadrobeniny	
53	Nekovové vměstky	
54	Broky	
55	Kovové vměstky	

61	Odmíšení	
62	Nevyhovující lom	Odchylka jakosti lomu odlitku od požadavku normy nebo sjednaných technických podmínek (TP).
63	Zatvrdlina, zákalka	
64	Obrácená zákalka	
65	Nesprávná struktura	Odchylky v druhu, velikosti, množství nebo rozdělení strukturních složek od ustanovení norem nebo TP.

71	Nesprávné chem. slož.	Odchylky chemického složení od požadavku normy nebo sjednaných TP.
72	Nevyhovující mech. vlastn.	Odchylky mechanických vlastností materiálu odlitku od požadavků normy nebo sjednaných TP.
73	Nevyhovující fyzik. vlastn.	Odchylky fyzikálních vlastností materiálu odlitku od požadavku normy nebo sjednaných TP.

Literatura pro kapitolu slévárenství

[1] NOVÁ, I. NOVÁKOVÁ, I. a J. BRADÁČ. Technologie I. [Skripta], FS-TU v Liberci 2006.
[2] Galerie odlitků Katedra strojírenské technologie, TUL, od roku 1960-2019.
[3] NOVOTNÝ, J., ŠANOVEC, J., BEDNÁŘ, B., KREIBICH, V.: Technologie I. [Skripta]. ČVUT Praha 1999.
[4] BLAŠČÍK, F. a kol.: Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania. 1. vyd. Bratislava/Praha 1988.
[5] ŽÁK, J., HORÁČEK, M.: Základy strojírenské technologie Část I: Slévání, tváření, svařování. [skripta]. FS-VUT Brno, 1983.
[6] Podkladové materiály firmy Kovocentrum Jiskra – Enginnering.
[7] Podkladové materiály firmy Formservis Brno
[8] Podkladové materiály firmy TOS MET, slévárna a.s.
[9] ŠEBL, J. Lití kovů pod tlakem. 1.vyd. SNTL Praha 1961.
[10] VALECKÝ, J a kol. Lití kovů pod tlakem. 1. vyd. Praha 1963.
[11] ELBEL, T a kol. Vady odlitků ze slitin železa. Brno 1992.
[12] Technické podklady firmy RONAL Jičín.
[13] Technické podklady firmy Unitherm Jablonec nad Nisou.
[14] Technické podklady o vysokotlakých strojích firmy Bühler.
[15] NOVÁ, Iva HOŠEK, Zdeněk a NOVÁKOVÁ Iva. Rozvoj tlakového lití. MM Průmyslové spektrum. Květen 2004, číslo 5, s.79–81. ISSN 1212–2571.
[16] NOVÁKOVÁ Iva Tepelné a tlakové poměry v soustavě odlitek-forma při vysokotlakém lití slitin hliníku s křemíkem. [Doktorská práce]. FS-KSP, TU v Liberci 2006.
[17] BRYXÍ-STUNOVÁ, B.: Návrhy a výpočty. [Podklady pro řešení vysokotlakého lití]. Ústav strojírenské technologie, FS – ČVUT v Praze.
[18] Podkladové materiály firmy Alucast, s.r.o.
[19] ŠTIPL, J. Současné trendy při výrobě keramických skořepinových forem. [Bakalářská práce]. FSI VUT Brno 2012.
[20] HORÁČEK, Milan. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu [online]. Brno: FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2012-05-12]. http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologievytavitelneho modelu.pdf.
[21] KOLEKTIV Strojírenská technologie, část III. [Studijní text]. Obnova a modernizace technických oborů v Olomouckém kraji, 2010/2011.
[22] MLÝNEK, T. Metodika vizuálního hodnocení odlitků. [Bakalářská práce]. FT-UTB Zlín, 2018.
[22] BENNET, F.C. What to expect from a vacuum die casting. The British Foundryman, 54, (2), 54 – 58, 507 (February 1961).
[23] Cast Superalloys. UNITED SUPERALLOYS [online]. United Superalloys © [cit.2016-05-17].Dostupnéz:http://www.unitedsuperalloys.com/cast-superalloys.html.
[24] FLEMMINGS, M.C.: Semisolid Forging, the Process and the Path Forward. Metallurgical Science and Technology, vol. 18, No 2, 3-4 2000.
[25] JORSTAD, J.L.: High Integrity Die-Casting Process Variations. In: International Conference on Structural Aluminium Casting. Nov. 2-4, 2003 Orlando Fl.

[26] WALUKAR, D.M. et al. Thixomolding of Magnesium. Technology Dead Sea Israel 1997, p. 54.
[27] YUE, T.M., CHADWICK, G.A.: Squeeze Casting of Light Alloys and their composites. Journal of Materials Processing Technology 58, 1996, p. 302 to 307.
[28] YURKO, J.: SSM Process (Semi-Solid Rheocasting). Process Technology Licensed from the MIT Michigan, USA.
[29] COOK ARNOL, J. Vacuon die casting. Patent US 5800468A, 1999.
[30] HORÁČEK, L. Unukátní technologie 3D tisku písku. MM Spektrum: Monotematická příloha - Slévárenství, č. 6, 2015 p. 122.
[31] Technické podkladové materiály firmy Modelárna LIAZ Liberec.
[32] Vysokotlaký stroj se systémem Vacural. Propagační internetové materiály firmy Oskar Frech, GmbH + Co KG, 2015.
[33] Thermobiehl, Apparatebau GmbH, propagační materiály firmy Šebesta-služby pro slévárny, s.r.o. Brno.
[34] Technické materiály formy Kolbenschmit Ústí n. Labem
[35] TKADLRČKOVÁ, M, MICHALEK, K. GRYC, K a L. SOCHORA. Základy 3D Modelování metalurgických procesů. [Studijní opora]. FMMI, VŠB – TU Ostrava, 2013.
[36] JIRÁSEK, J., VAVRO, M.: Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: MŠMT & VŠB-TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3
[37] Technické propagační materiály Slévárny Zábřeh, 2018.
http://www.slevarna-zabreh.cz/de/galerie/produktion-galerie/kuplovna/
[38] Technické propagační materiály firmy Heunisch Guss, září 2012.
[39] Technické propagační materiály firmy BAS Castings a PRECISION ENGINE, září 2012.
[40] PODRÁBSKÝ, T., POSPÍŠILOVÁ, S.: Struktura a vlastnosti grafitických litin. [Studijní materiál – studijní opora]. FSI – VUT Brno, 2006.
[41] Propagační materiály firmy WALTRES,
https://www.walthers.com/manufacturer-name, 10.09.2018.
[42] Propagační materiály firmy Wanlutong Metal Materials, Co., Ltd.
http://www.wanmetal.com, 10.09. 2018.
[43] MICHNA, Š. aj. Encyklopedie hliníku.1. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
[44] P.K. Jain, Al-Si equilibrium diagram. https://www.researchgate.net/figure/a-Al-Si-equilibrium-diagram.
[45] Arcelor Mittal. Magazín Patriot [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://www.patriotmagazin.cz/arcelormittal-si-hycka-zlepsovatele-loni-huti-usetrilirekordnich-150-milionu/
[46] Podkladové materiály firmy MAN (1995).
[47] Alloys for Pressure die Casting. Rhefelden Alloys, GmbH & Co. KG.
[48] Technické propagační materiály firmy DGS Druckguss systeme AG, St. Gallen, Switzerland.
[49] Technické podkladové materiály firmy TOS.
[50] Litina s kuličkovým grafitem, https://cswikipediaorg/wiki/Tvarna_litina.
[51] Mikrostruktura ADI (Austempered Ductile Iron), University of Cambridge.
[52] ČERMÁK, J. Teorie a metodiky tváření. Volby výrobní technologie. FS – ČVUT v Praze, 2006.
[53] Technické propagační materiály firmy FOCAM, spol. s.r.o Olomouc.
[54] Technické propagační materiály firmy BOROI, Casting International Ltd.

[55] Technické propagační materiály firmy CSZI Hebei Province Jing Country Jinli Casting, Co, Ltd.
[56] Propagační technické materiály firmy ALFE, s.r.o. Brno
[57] LEARN, EASY www.learneasy.info.
[58] Technické propagační materiály – plynové kelímkové pece firmy Striko Westofen, GmbH.
[59] Technické propagační materiály firmy BETA, Die casting. Equipment.
[60] Technické propagační materiály firmy UMICORE, Belgium, zinc alloys production.
[61] Technické propagační materiály firmy JUNKER, Industrial Equipment, s.r.o.
[62] Technické propagační materiály firmy LAC

Kontrolní otázky ke kapitole Slévárenství

1. Jaký je hlavní princip výroby odlitků.
2. Charakteristika slévárenské technologie, jaký je rozdíl mezi odlitkem vyrobeným hutním způsobem a tvarovým odlitkem.
3. Jaké jsou zásady, resp. základní pravidla při navrhování správné konstrukce tvarových odlitků.
4. Co jsou strukturální odlitky.
5. Co jsou tepelné uzly odlitku.
6. Jakým typem namáhání mohou být ovlivňována žebra odlitku.
7. Jaké základní typy slévárenských forem rozlišujeme.
8. Jaké jsou hlavní vlastnosti slévárenských slitin pro výrobu odlitků.
9. Které typy slévárenských slitin se uplatňují při výrobě odlitků.
10. Co je to litina, které typy litin rozlišujeme.
11. Co představuje hodnotící kritérium litiny – tzv. stupeň eutektičnosti.
12. U litin je důležitý poměr C/Si, jakou hodnotu by měl mít při výrobě litiny s lupínkovým grafitem.
13. Jaké typy odlitků vyrábíme z litiny s lupínkovým grafitem.
14. Pro výrobu jakých odlitků se používají slitiny hliníku, slitiny mědi (mosazi a bronzy), slitiny zinku a slitiny hořčíku.
15. Nakreslete rovnovážný diagram Al-Si vymezte oblast koncentrace křemíku, která charakterizuje nejvhodnější slitinu pro výrobu odlitků.
16. Co je proces tuhnutí a chladnutí odlitků, proč se odlitky vyráběné v pískových formách často nálitkují.
17. Které faktory ovlivňují tuhnutí odlitků.
18. Proč musí být dutina formy nebo model (model na modelové desce) větší o tzv. míru lineárního smrštění.
19. Jaký je účel nálitkování odlitků, co je nálitek.
20. Co je slévárenská forma, jak se slévárenské formy dělí.
21. Co jsou pískové formy vyráběné 3 D tiskem, na jakém principu se vyrábějí.
22. Jakým způsobem se vyrábí netrvalé pískové formy.
23. Jakým princip výroby forem metodou podle Croninga.
24. Jakým způsobem se vyrábí kovové slévárenské formy.
25. Co jsou slévárenská jádra, jaké dva základní druhy jader rozlišujeme, které metody výroby jader se používají.
26. K čemu slouží model (model na modelové desce).
27. Jaký je účel pískových formovacích směsi, z jakých složek se tyto směsi skládají.

28. Jaký je postup při výrobě formy na vytavitelný model.
29. Jaké typy odlitků se vyrábí ve formách na vytavitelný model.
30. Jaký je princip výroby odlitků gravitačním litím do kovových forem, jakou dominantní vlastnost mají vyrobené odlitky.
31. Jaký princip je výroby odlitků nízkotlakým litím.
32. Jaký princip je výroby odlitků vysokotlakým lití. Jaké druhy vysokotlakého lití rozlišujeme. Která dominantní vlastnost těchto odlitků není vhodná.
33. Z jakých materiálů se vyrábí kovové slévárenské formy.
34. Jaký je účel vtokových soustav forem.
35. Proč musí být každá kovová forma před odléváním temperovaná a ošetřená nátěrem nebo nástřikem.
36. Jaký účel mají vyhazovače u kovových forem.
37. Jaké jsou základní principy „vlévání“ taveniny do dutiny slévárenské formy.
38. K čemu slouží slévárenské pánve.
39. Co rozumíme pod pojmem surový, hrubý a čistý odlitek.
40. Co je účelem čištění odlitků a dokončovacích operací.
41. Proč se často ve slévárenské praxi při přípravě výroby odlitků používají simulační slévárenské programy.
42. Odhadněte jakou drsnost (Ra) mají litinové odlitky odlévané do pískových forem.
43. Vady odlitků, uměli byste určit nějakou vadu na odlitku.

2. SVAŘOVÁNÍ, PÁJENÍ A TEPELNÉ ŘEZÁNÍ KOVŮ

Svařování je spojování kovových dílů (vhodných kovových materiálů - nejčastěji ocelí) v nerozebíratelný celek za působení tepla, tlaku, tepla a tlaku, někdy i za pomoci přídavného materiálu podobného nebo stejného, výjimečně jiného chemického složení schopného vytvořit metalurgické spojení se základním kovem.

Přesnější charakteristiku, resp. definici na základě teorie svařování udává ČSN 05 0000:

Svařování je metalurgický proces, při kterém se vytvářejí nerozebíratelná spojení prostřednictvím meziatomových vazeb mezi svařovanými částmi přímo nebo prostřednictvím přídavného materiálu při jejich ohřevu nebo plastické deformaci.

Svařování kovů se dělí do dvou základních skupin: na svařování *tavné* a tlakové, viz tab. 2.1.

Tavné svařování - při tavném svařování dochází k natavování základního (svařovaného) i přídavného materiálu. Vzniká tzv. tavná lázeň. Po ztuhnutí tavné lázně vzniká tzv. kohezní spoj, neboť kovy v tomto případě jsou stavebně spojeny kohezními (soudržnými) silami mezi jednotlivými atomy. Kohezní spoj, který je pro svařování charakteristický, může vzniknout i bez evidentního natavení základního materiálu, pokud jsou spojované kovy v těsném styku a mají-li dokonale kovový povrch (bez oxidů, nečistot, atd.), jsou-li případně povrchy ohřáté na vyšší teplotu a přiblíženy k sobě tlakem.

Tlakové svařování je charakterizováno působení jak tlaku tak tepla za vzniku plastických deformací a ke spojení dochází i při částečně natavených materiálech. Způsobů, které se řadí do tlakového svařování je cela řada, viz tab. 2.1, liší se specifičností procesu.

Tabulka 2.1 Základní způsoby svařování

Svařování teplem (tavné)	**Svařování tlakem** (tlakem, popř. teplem a tlakem)
Svařování el. obloukem: - obalenou elektrodou - v ochranných atmosférách odtavující se elektrodou - drát nebo plněná trubička(MIG, MAG) - v ochranných atmosférách neodtavující se elektrodou (WIG, TIG) - automatické různými typy elektrod (uhlíková) - pod tavidlem - svařování rotujícím obloukem	Svařování elektrickým odporem: - bodové - švové - výstupkové - stykové - pěchováním - odtavením
Svařování plamenem	Svařování třením
Svařování termitem (aluminotermické)	Svařování indukční
Svařování elektrostruskové	Svařování ultrazvukem

Svařování laserem	Svařování (tlakem za studena)
Svařování plazmou	Svařování výbuchem
Svařování elektronové	Svařování kovářské
Svařování slévárenské	

Metody uvedené v tab. 2.1 se často označují pouze číselně nebo se používají jejich zkratky. V tab. 2.2 je uvedeno číselné označení metod.

Tabulka 2.2 Přehled metod svařování a jejich označování

Označení dle EN ISO 4063	**Evropská zkratka**	**Americká zkratka**	**Název**
111	MMA	SMAW	Manual Metal ArcWelding Shielded Metal ArcWelding
114	FCAW	FCAW	Flux-coredwire metal arcweldingwithoutgasshield Flux-coredarcwelding
12	SAW	SAW	SubmergedArcWelding
131	MIG	GMAW	Metal InertGasWelding Gas Metal ArcWelding
135	MAG	GMAW	Metal-arcActiveGasWelding Gas Metal ArcWelding
136	MAG	FCAW	Flux-coredwire metal arcweldingwithactivgasshield Flux coredarcwelding
137	FCAW	FCAW-S	Flux-coredwire metal arcweldingwithinertgasshield Flux coredarcwelding
141	TIG	GTAW	Metal-arcActiveGasWelding Gas Metal ArcWelding

Uvedené číselné značení znamená:
111 - Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
114 - Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu
12 - Svařování pod tavidlem
131 - Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu MIG
135 - Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu - MAG
136 - Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu
137 - Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu
141 - Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu - TIG

Někdy se setkáváme ještě s označeními, která upřesňují použitou metodu:

A) *americké značení:*
GMAW-P - metoda GMAW(131, 135) pulsujícím obloukem (P - pulsedarcwelding)
GMAW-S - metoda GMAW (131,135) zkratovým přenosem (S - Shortcircutarcwelding)
GTAW-P - metoda GTAW(141 pulsujícím obloukem (P - pulsedarcwelding)

B) *německé značení*
MAGM - svařování MAG ve směsném plynu
MAGC - svařování MAG v CO_2
MIGp - svařování MIG pulzním obloukem
MAGp - svařování MAG pulzním obloukem

Svařováním vyrábíme různé ocelové konstrukce (mosty, příhradové konstrukce stavebních jeřábů, mořských lodí) nebo spojujeme strojní díly v celek, jehož výroba by byla jinou technologií nákladná nebo nemožná. Svařováním se spojují především tvářené polotovary nebo dílce, např. trubky, tyče, výlisky, plechy. Nenahraditelné je svařování při výrobě velkých celků: parovodů, ropovodů, mostních a lodních konstrukcí, tlakových nádob, rozvodů ústředního topení, výroby vrat, plotů, atd. Výjimečně se svařují i odlitky.

Velké uplatnění má svařování v automobilovém průmyslu při výrobě karoserií automobilů. Zde se používá svařování *tlakové - elektrickým odporem, bodové* (bodováním), spojujeme části karoserie (plechové výlisky) až získáváme karoserii automobilu. Nenahraditelné je též svařování při výrobě velkých celků (kotlů, tlakových nádob, železničních vagónů, lodí, atd.). Při výrobě menších strojních dílů se svařování někdy volí proto, že složitý výrobek lze zhotovit z jednoduchých dílů, čímž výroba je levnější a také snadnější.
V tabulce. 2.1 jsou uvedeny základní způsoby svařování.

Vedle svařování kovů rozlišujeme ještě pájení kovů. ***Pájení*** je způsob nerozebíratelného spojení, která se od svařování liší v tom, že vlastní spojení uskutečňuje přídavný materiál - *pájka*. Pájka se vyznačuje tím, že má výrazně nižší teplotu tání než pájený (základní) materiál. V řadě případů je pájení nenahraditelné, neboť řadu kovových výrobků nelze spojit jinak než pájením.

Někdy ke způsobu svařování kovů řadíme problematiku tepelného řezání kovů.

Tepelné řezání kovů jsou způsoby dělení kovových materiálů, společným znakem je ohřev děleného materiálu na tak vysokou teplotu, že se dá spálit v proudu kyslíku - *řezání kyslíkem,* nebo roztavený materiál se dá z místa řezu odstranit proudem plynu - *řezání plazmovým paprskem,* nebo se materiál v místě řezu odpaří - *řezání svazkem elektronů.*

Při návrhu optimální technologie svařování je nutno posoudit základní (svařovaný) materiál - jeho složení, vlastnosti a rozsah strukturních změn, které mohou nastat při svařování.

Po zvolení technologie svařování je nutno určit svařovací parametry, popř. přídavný materiál, zvolit tepelný režim (předehřev, tepelné zpracování po svařování). Současně je nutno vzít v úvahu i rozměry a tvar součásti, tloušťku stěn, které mohou být příčinou vzniku vad. Též je nutno navrhnout způsob a rozsah kontroly svařovaných dílů, vše s ohledem na kvalitu i výrobní náklady. Také svařované kovy musí splňovat podmínky svařitelnosti pro daný účel.

Na obr. 2-1 jsou ukázky svařovaných dílů a konstrukcí.



Obr. 2-1 Ukázka svařovaných dílů a konstrukcí z firem JAVAREX [17], MARKOS [18], ŠKODA [51], stavební konstrukce KLÍMA [52], kolejnice, Dílny Blansko [19], svařování parovodů – ACTERM servis, a.s., DRLÍK [24], svařování trupu celohliníkové jachty KUBÍČEK [27]

2.1 Svařitelnost kovů

Svařitelnost kovů - schopnost svařovaného materiálu vytvořit svar, resp. spoj, který odpovídá požadovaným vlastnostem (např. pevnosti). Některé kovové materiály se svařují lépe, některé hůře. Protože svařování je technologická operace, proto svařitelnost je technologická vlastnost. Jinými slovy vyjadřuje komplexní charakteristiku kovového materiálu pro vznik požadovaného svarového spoje předepsané jakosti a konstrukční spolehlivosti.
Svařitelnost kovů je závislá ne těchto činitelích:
a) chemickém složení kovu;
b) metalurgickém způsobu výroby kovů;
c) na způsobu odlévání a tváření kovu;
d) na tepelném zpracování kovu.

Hodnocení svařitelnosti kovů se zaměřuje na určení:

a) vhodnosti materiálu ke svařování za určitých technologických podmínek svařování, popř. konstrukčních podmínek;

b) technologických podmínek svařování určitého kovu pro dosažení funkčně vyhovujícího spoje.

Svařitelnost jednotlivých kovových materiálů a jejich slitin je velmi rozdílná. Uvádí se v normách jakosti materiálu (materiálové listy). Z uvedených hledisek lze kovové materiály rozdělit na *svařitelné*, *svařitelné za určitých podmínek* a *běžně nesvařitelné*. Konkrétní svarový spoj je však třeba posuzovat ze všech hledisek.

2.1.1 Svařitelnost ocelí

Oceli - jejich svařitelnost závisí na chemickém složení, způsobu výroby a technologii svařování. Při opravách již provozovaných dílů je nutno navíc zohlednit změnu některých vlastností vlivem stárnutí (snížení plasticity, creep, atd.).

Oceli se pro svařování dělí podle různých kritérií: např. uhlíkové, nelegované nebo legované. Nebo se dělí na běžné konstrukční oceli, nerezavějící, žáruvzdorné a austenitické oceli. Svařitelnost ocelí velmi významně ovlivňuje množství uhlíku. Čím je vyšší obsah uhlíku, tím je horší svařitelnost. Oceli s obsahem uhlíku nad 0,5 % se již nedoporučují pro svařování. Obecně platí oceli dobře kalitelné jsou špatně svařitelné.
Velmi dobrou svařitelnost vykazují uhlíkové, nelegované ocele s obsahem uhlíku do 0,22 % (avšak pro tloušťky nad 25 mm musí být předehřáté).

Z hlediska chemického složení závisí svařitelnost i na doprovodných prvcích:
a) prospěšných: mangan, křemík, měď;
b) škodlivých: síra, fosfor, kyslík, dusík, vodík.

Svařování ocelí probíhá v oblasti austenitu nebo nad ním (v oblasti taveniny), viz metastabilní diagram Fe-C.

Svařitelnost uhlíkových ocelí se m.j. posuzuje na základě chemického složení pomocí tzv. *uhlíkového ekvivalentu* (C_E). Jeho výpočet uvádí i ČSN, ale

existuje celá řada dalších. Nejpoužívanější vzorce jsou podle mezinárodního svářečského institutu nebo podle japonských vědců ITA a BESSYE. Jeden z jednodušších vzorců je:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{4} + \frac{S+P}{2}\ [\%] \qquad (9)$$

kde značí: C, Mn, Si, S, P - množství prvků ve svařovaném materiálů;
pro C_E< 0,45 - ocel je dobře svařitelná;
pro C_E> 0,45 - při svařování oceli je nutno použít předehřev.

Teplota předehřevu T_p = (C - 0,45) . (100 až 200) [°C]. Pro stanovení teploty předehřevu existuje řada dalších vzorců, podle různých autorů. Někteří zohledňují význam tloušťky svařovaných dílů (např. francouzský svářeč SÉFERIÁN) jiní tuhost spoje a obsah difúzního vodíku (uvažují japonští autoři ITO a BESSY).

Svařitelnost běžných konstrukčních ocelí se stanovuje uhlíkovým ekvivalentem, dle vztahu podle IIW (International Institute of Welding):

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}\ [\%] \qquad (10)$$

Oceli s $C_E \leq 0{,}35$ jsou obvykle svařitelné bez problémů v běžně používaných tloušťkách. S rostoucí velikostí C_E (tj. s rostoucím obsahem C nebo legujících prvků) je nutno počítat se zabezpečením nižší ochlazovací rychlosti.Z důvodu, aby se zamezilo vzniku trhlin. Nejjednodušší cestou je aplikace předehřevu svařovaných dílů - obecně platí, že čím vyšší je C_E a čím silnější je svařovaný materiál, tím vyšší teplotu předehřevu je třeba volit. Pro oceli s obsahem uhlíku C ≤ 0,22% resp. s CE ≤ 0,41 obvykle není předehřev třeba. V jiných případech lze doporučení hledat v materiálových listech příslušné oceli. Pro rychlou orientaci lze využít i údaje z tabulky 2.2, která je určena především pro navařování kovů.

Oceli se zaručenou svařitelností jsou dle ČSN označeny pátým pořadovým číslem 3, např. ČSN 11 373.

Svařitelnost materiálu závisí na jeho chemickém složení, hlavně na obsahu uhlíku. Mezní hranice uhlíku je cca 0,5%. Vlivem vyššího obsahu uhlíku se oceli svařují poměrně obtížně. Také litiny mají nesnadnou svařitelnost, lze je svařovat pokud předepíšeme speciální režim svařování.

Legované oceli - mívají obvykle horší svařitelnost, která je ovlivněná legujícími prvky, které podporují vznik nestabilních struktur (martenzit, bainit, atd.).

Tabulka 2.2 Doporučené teploty předehřevu pro svařování ocelí podle firmy ESAB [7]

Základní materiál **Přídavný materiál**	**Tloušťka dílu [mm]**	**Konstrukční ocel** **C_E< 0,3** **HB < 180**	**Nízkolegovaná ocel** **C_E = 0,3 až 0,6** **HB 200 až 300**	**Nástrojová Ocel** **C_E = 0,6 až 0,8** **HB 300**	**Chromová ocel** **5 až 12 %Cr** **HB 300 až 500**
	Doporučená teplota předehřevu [°C]				
Nízkolegovaný 200-300 HB	**≤20**	-	100	150	150
	>20 ≤60	-	150	200	250
	> 60	100	180	250	300

Typu nástrojové oceli 300-450 HB	**≤20**	**-**	100	180	200
	>20 ≤60	**-**	125	250	250
	> 60	125	180	300	300
Typu 12 % Cr 300 – 500 HB	**≤20**	-	150	200	200
	>20 ≤60	100	200	275	300
	> 60	200	250	350	375

2.1.2 Svařitelnost ostatních kovových materiálů

Grafitické litiny - jejich svařitelnost je za normálních okolností špatná, což způsobuje především vysoký obsah a forma uhlíku (nad 3%). Proto se používají různé způsoby svařování, které zahrnují různý předehřev svařované litiny, použití přídavných materiálů s velkým obsahem niklu, případně zdánlivě nelogické svařování litiny bronzovými elektrodami, či pájení mosazí.
Svařování vyžaduje speciální režim např. s použitím předehřevu. Rozlišujeme svařování litiny za tepla (při teplotě 500 až 650°C), za poloohřevu (při teplotě 200 až 450 °C) a za studena (teplota nesmí překročit 100 °C). Nejčastěji se pro svařování používá plamenem nebo elektrickým obloukem s použitím přídavných materiálů s vysokým obsahem niklu. Lze použít svařování obalenou elektrodou po předehřevu litiny na cca 400°C s použitím elektrod s vysokým obsahem niklu (nikelitky). Lze svařovat i bronzovými elektrodami s předehřevem kolem 250°C. Při dlouholetých opravách litinových odlitků bylo zjištěno, že nakonec každá grafitická litina je svařitelná, avšak je nutno vynaložit určité úsilí. Při svařování elektrodou za studena je nutno volit krátké housenky, které se postupně poklepávají (překovávají). Vhodné elektrody na bázi niklu (ES 716, ES 723 či OK 92.60) a na bázi bronzu (OK 94.25). Je nutné nepřekročit teplotu 100 °C.
Dále lze použít svařování pomocí ochranné atmosféry argonu – metodu WIG (TIG). Touto metodou se dají svařit jen velmi malé tloušťky litiny s doporučením předehřevu jen cca 75°C. provádět jen krátké housenky s následným překováním a následným pokračováním ve svařování. Po svařování ohřát na cca 300°C. a nechat vychladnout v zábalu. Přídavný materiál je drát bohatý na nikl.

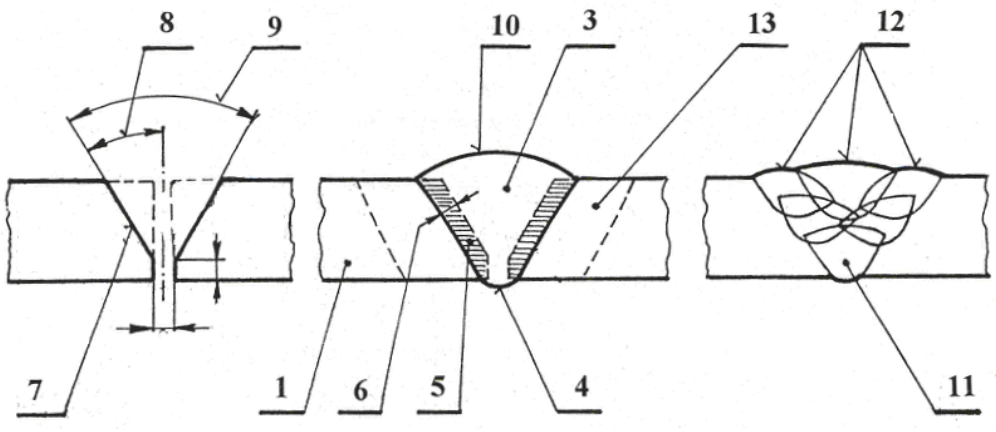
Hliník a slitiny hliníku - mají různou svařitelnost a to podle jejich chemického složení. Některé slitiny mají svařitelnost dobrou, jiné obtížnější. Hliník má vysokou slučivost s kyslíkem. Svařování značně zhoršují povrchové oxidy hliníku - Al_2O_3 (teplota tání je cca 2000°C), který je hydrofilní a váže vodu, která je zdrojem bublin ve svaru. Nebo obsah dalších plynů jako je vodík, poměrně vysoká tepelná vodivost hliníku, atd. Při zahřívání hliník nemění svoji barvu, což ztěžuje ruční svařování. Také oxid hlinitý je stejně „stříbrně“ barevný a to má za následek, že změna teploty „není vidět“. Z tohoto důvodu se hliník často svařuje na měděné podložce. U průmyslově podélných svarů se s oblibou u tupých spojů používá „ztracená“ hliníková podložka.
Hliníkové slitiny se nejčastěji svařují elektrickým obloukem v ochranných atmosférách inertních plynů (Ar, He) a současně je nutné rozbít vznikající Al_2O_3. Využívá se čistícího účinku střídavého svařovacího proudu o vysoké frekvenci (řádově kHz), na rozdíl od běžné frekvence 50 Hz.

Měď a slitiny mědi - svařitelnost je horší, k tomu přispívá vysoká tepelná vodivost, obsah vodíku, síry za vzniku sirníku mědi (CuS), obsah kyslíku, vzniká Cu_2O. Svařuje se elektrickým obloukem v ochranných atmosférách, pod tavidlem, obalenou elektrodou nebo kyslíko-acetylenovým plamenem. Silnější plechy (nad 10 mm) je nutno předehřívat až na 700°C.

Svařitelnost neželezných kovů závisí na druhu neželezného kovu. Slitiny mědi a hliníku ovlivňuje jejich vysoký součinitel tepelné vodivosti. Při svařování mosazi (slitina mědi a zinku) se odpařuje zinek a je třeba odsávat páry. Svařitelnost slitin hliníku je za normálních okolností velmi obtížná, neboť vznikají oxidy s vysokou teplotou tání. Proto je nutné volit metody svařování v ochranných atmosférách.

2.2 Základní pojmy a názvosloví svarového spoje

Svařovaný díl (svařenec) – je montážní jednotka, která se zhotovuje z jednotlivých dílů svařováním v nerozebíratelný celek.
Svar - je část svarového spoje, která se vytváří svařováním, nejčastěji v důsledku krystalizace kovu ze svarové lázně.



Obr. 2-1 Schéma svarového spoje - základní pojmy

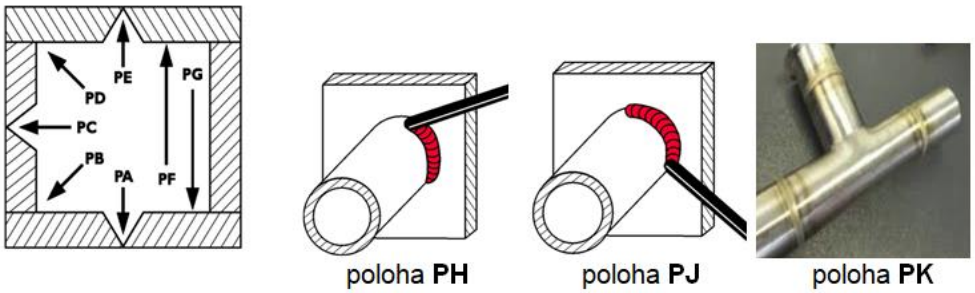
Legenda k obr. 2-1:

1. *základní materiál* - kovový materiál, který svařujeme (nebo navařujeme);
2. *přídavný materiál* - materiál, který se přidává do svarové lázně (např. elektroda, svařovací drát);
3. *svarový kov* - kov odtavený z přídavného materiálu a promíchaný s nataveným základním materiálem;
4. *kořen svaru* - část svaru, která se vytváří na odvrácené straně první housenkové vrstvy;
5. *oblast závaru* - oblast základního materiálu roztavená při svařování;
6. *závar* - hloubka roztaveného základního materiálu;
7. *svarová plocha* - část povrchu základního materiálu, na které se vytváří svar;
8. *úhel zkosení* - úhel mezi osovou rovinou na základní materiál a mezi svarovou plochou;

9. *úhel rozevření* - úhel mezi svarovými plochami;
10. *svarová housenka* - část svaru vytvořená na jeden chod svařováním;
11. *kořenová vrstva* - první svarová vrstva svarového kovu v kořeni;
12. *krycí vrstva* - poslední svarová vrstva tvořící povrch svaru;
13. *teplem ovlivněná oblast* - oblast nenataveného základního materiálu, kde vlivem tepla ze svaru došlo k ovlivnění struktury;
14. *svarová lázeň* (tavná lázeň) - materiál, který se nachází při svařování v roztaveném stavu (není na obr. vyznačeno).

2.2.1 Polohy při svařování

Při tavném svařování (např. svařování elektrickým obloukem) se uplatňují různé polohy tupých a koutových svarů při vytváření svarové housenky, viz obr. 2-2. Charakteristika poloh při svařování podle ČSN EN ISO 6947 je uvedena v tabulce 2.3.



***PA** – poloha vodorovná shora; **PB** – poloha vodorovná šikmo shora; **PC** – poloha vodorovná; **PD** – poloha vodorovná šikmo nad hlavou; **PE** - poloha vodorovná nad hlavou; **PF** – poloha svislá nahoru; **PG** – poloha svislá dolů; **PH** – svařování trubky zdola nahoru; **PJ** – svařování trubky shora dolů; **PK** – orbitální svařování trubek*

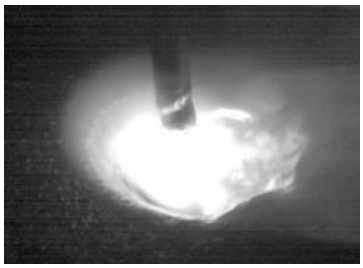
Obr. 2-2 Hlavní polohy u tupých a koutových svarů při svařování

Tabulka 2.3 Charakteristika poloh při svařování

Poloha	Zkratka polohy	Charakteristika
Poloha vodorovná shora	**PA**	Vodorovný směr svařování, svislá osa svaru, krycí vrstva nahoře.
Poloha vodorovná šikmo shora	**PB**	Vodorovný směr svařování, krycívrstva směrem šikmo nahoru.
Poloha vodorovná	**PC**	Vodorovný směrsvařování,vodorovná osa svaru.
Poloha vodorovná šikmo nadhlavou	**PD**	Vodorovný směr svařování, nadhlavou, krycí vrstva směrem šikmo dolů.
Poloha vodorovná nad hlavou	**PE**	Vodorovný směr svařování, nadhlavou, svislá osa svaru, krycí vrstvadole.
Poloha svislá nahoru	**PF**	Svislý směr svařování zdola nahoru
Poloha svislá dolů Dolů	**PG**	Svislý směr svařování shora.

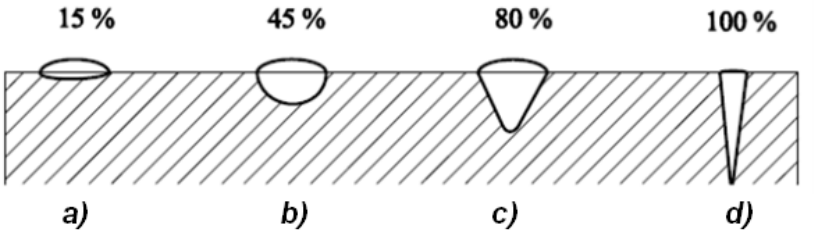
2.3 Metalurgie tavného svařování

Podstatou tavného svařování je postupné lokální tavení svařovaného (základního) materiálu (zpravidla pohyblivým intenzívním zdrojem tepla) a současně natavení přídavného materiálu za vzniku ***tavné lázně***. Po ochlazení, resp. krystalizaci tavné lázně získáme ***svarový kov***. Děje se tak v důsledku toho, že okolní, nenatavený materiál odvádí teplo z tavné (svarové) lázně, viz obr. 2-3. Tím tavná lázeň krystalizuje, čímž vzniká svar (svarový kov).



Obr. 2-3 Pohled na svarovou lázeň a tavící se svařovaný (základní) a přídavný materiál

Podíl nataveného základního a přídavného materiálu se může výrazně lišit při svařování kořenové a výplňové části svaru. Podíl nataveného základního materiálu a přídavného materiálu ve svarovém kovu nazýváme ***promísení***. Při svařování obloukovými technologiemi (jsou velmi používané a výhodné dochází jen k lokálnímu natavení základního materiálu) může být stupeň promísení 10 až 40 %. Na obr. 2-4 jsou uvedeny hodnoty podílu základního materiálu ve svarovém kovu při různých technologií svařování.



a) plazmové svařování; b) ruční svařování el. obloukem obalenou bazickou elektrodou; c) ruční svařování el. obloukem obalenou hluboko-závarovou elektrodou; d) elektronové svařování

Obr. 2-4 Hodnoty podílu základního materiálu ve svarovém kovu při různých technologií svařování

V tabulce 2.4 jsou pro informaci uvedeny hodnoty energie, resp. koncentrace tepelného výkonu potřebné pro natavení svařovaného materiálu při různých typech svařovacího procesu.

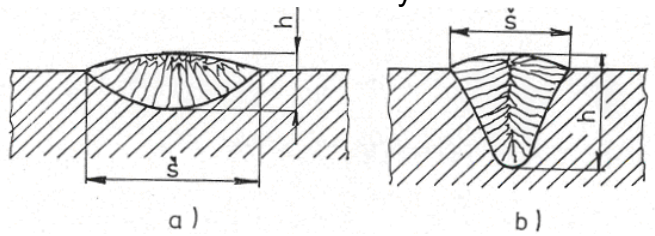
Tabulka 2.4 Hodnoty energie pro různé typy svařovacího procesu [1]

Metoda svařování	Nejmenší plocha ohřevu [cm^{-2}]	Největší koncentrace tepelného výkonu [$W \cdot cm^{-2}$]
Kyslíko-acetylénový oblouk	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{3}$
Elektrický oblouk s použitím obalené elektrody	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{4}$
Elektrický oblouk metody WIG, MIG, MAG	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{5}$
Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{7}$
Elektronový paprsek	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{8}$ až $5 \cdot 10^{8}$
Laserový paprsek	$1 \cdot 10^{-8}$ až $1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{9}$ až $5 \cdot 10^{13}$
Sluneční paprsek		$15 \cdot 10^{12}$

V procesu tavného svařování probíhají následující pochody:

1. ***Natavení svarových ploch*** a případně i přídavného materiálu působením koncentrovaného zdroje tepla.
2. ***Fyzikálně-metalurgické pochody*** ve svarové lázni, tj. promíchání tekutého kovu a sdílení tepla ve svarové lázni, metalurgické reakce mezi roztaveným kovem a okolním prostředím (atmosféra, roztavené tavidlo nebo obal elektrody). Výsledkem všech reakcí může být výrazná změna chemického složení svarového kovu spoje, např. legováním ze strusky, pohlcováním plynů, atd.
3. ***Vytváření povrchu svarové lázně*** (vlivem povrchového napětí taveniny svarového kovu) a ostatních působících sil (gravitační síly od tíže taveniny).
4. ***Krystalizace svarového kovu*** a jeho chladnutí odvodem tepla do základního materiálu (základní materiál s vysokou tepelnou vodivostí Cu, Al odvádí teplo rychleji).

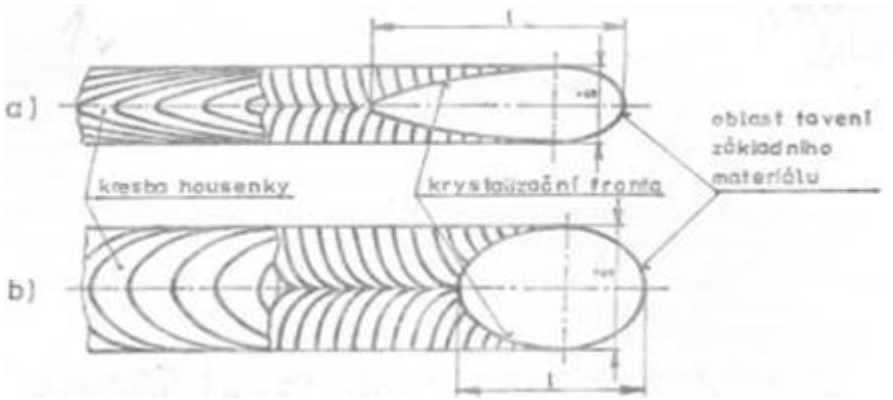
Při krystalizaci svarového kovu v procesu tavného svařování se nejčastěji setkáváme se vznikem rozvětvených krystalů (dendritů). Pokud se při podmínkách svařování vytváří velká šíře a malá výška svarového spoje, pak orientace rostoucích krystalů je směrem vzhůru - viz obr. 2-5a); pokud jsou podmínky svařování takové, že vzniká svarový spoj malé šíře a značné výšky - pak krystaly rostou směrem do osy svaru a zde se vylučují nečistoty, které ovlivňují vlastnosti svaru a možnost vzniku krystalizačních trhlin - viz obr. 2-5b).



a) velká šíře, malá hloubka svaru - svařování plamenem
b) malá šíře, značná výška - svařování elektrickým obloukem

Obr. 2-5 Vliv celkové hloubky a šíře svarového kovu na charakter orientace rostoucích krystalů

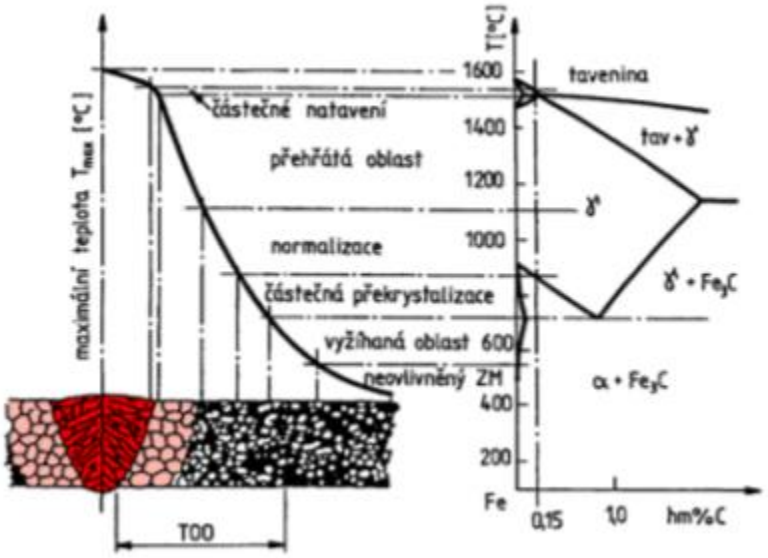
Při svařování se také sleduje vliv rychlosti svařování na tvar svarové lázně a orientaci dendritů. Sledujeme oblast krystalizace, *tzv. krystalizační frontu.* Velká rychlost svařování vede k šípovitému tvaru povrchu svařovací housenky. Malá rychlost svařování vede ke vzniku oblého tvaru povrchu housenky, viz obr. 2-6.



Obr. 2-6 Tvar povrchu svarové housenky dle rychlosti svařování

2.3.1 Struktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO)

Vedle struktury a kvality provedeného svaru je také důležitá struktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Tepelně ovlivněná oblast svařence je neroztavená část základního materiálu, která bezprostředně sousedí se svarovým kovem. Svarový kov byl vystaven teplotnímu procesu svařování. Na vznik tepelně ovlivněné oblasti se podílelo teplo vnesené do materiálu při svařování. Rozsah této oblasti závisí na přivedeném teple během svařování. Rozsah teplot je od bodu tání až k mnohem nižším teplotám. Proto se tato oblast skládá z řady různých mikrostruktur. Šířka TOO závisí na použité technologii svařování (při ručním svařování je TOO 3 až 4 mm).
U ocelí (kovy s polymorfní přeměnou) dochází v TOO k výrazným strukturním změnám, které mají výrazný vliv na vlastnosti svarového spoje. Při svařování nelegovaných ocelí, viz 2-7, lze s pomocí rovnovážného diagramu odvodit odpovídající struktury na svařovaném materiálu. Dále také příslušné teplotní oblasti: částečného natavení, přehřátí, normalizace, částečné překrystalizace, vyžíhání. Dále následuje oblast neovlivněného základního materiálu (ZM). Předpokladem této teplotní analýzy je hmotnostní obsah 0,15 % C ve svařované oceli, teplota tání svařovaného materiálu 1600 °C.



Obr. 2-7 Struktury ocelového svařence v závislosti na teplotě odvozené z rovnovážného metastabilního diagramu Fe-C [1,4]

Jak je z obr. 2-7 patrné, TOO je tvořena několika oblastmi:

I. Oblast částečného natavení – je přechod ze svarového kovu do TOO. Pásmo této oblasti je minimální. U většiny ocelí se tato oblast redukuje na linii (hranice ztavení) případně plochu, protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je malý. Také je malý rozdíl teplot svarového kovu a začínající TOO.

II. Oblast přehřátí – je ta část svařovaného materiálu, kde se nachází rozmezí teploty v rozmezí cca 1300 až 1050 °C (přesné rozmezí teplot závisí na druhu oceli). Tato oblast přiléhající k pásmu *ztavení*, odpovídá přehřáté mikrostruktuře, neboť v ní také dochází ke tvorbě nežádoucího δ-feritu. Oblast vykazuje hrubozrnnou strukturu, protože při maximální teplotě (Tp, z anglického peak temperature) jsou v této lokalitě již rozpuštěny precipitáty, které bránící růstu austenitického zrna. Důsledkem je výrazné zhrubnutí austenitických zrn.

III. Oblast normalizace – je ta část svařovaného materiálu, které odpovídají teploty v rozmezí 1100 až 850 °C. Při těchto teplotách se ve svařovaném materiálu projevuje krátká doba a nízká teplota austenitizace. Tím vznikají jemná a rovnoměrná austenitická zrna (tak jak je známo z normalizačního žíhání, proto oblast normalizace).Nepříznivé je to, že jemná austenitická zrna během chladnutí svařovaného materiálu mohou transformovat na jemnozrnnou bainitickou nebo martenzitickou struktura.

Proto je tato oblast je považována za jednu z nejkritičtějších částí svarového spoje v průběhu zahřívání svařovaného materiálu na který ještě působí napětí (creepová expozice).

IV. Oblast vyhřátá v intervalu teplot A_3 až A_1 (nazývá se také jako pásmo částečné rekrystalizace) – nedochází zde k úplné polymorfní přeměně. Při ohřevu dochází k přeměně perlitu na austenit a k následnému ochlazení. Vlivem toho mají perlitická zrna jemnější lamely cementitu, ale feritická zrna se nemění.

V. Oblast odpovídající podmínkám žíhání - je definována teplotami mezi teplotami A_1 až 450 °C, avšak prakticky významné jsou teploty mezi A_1 až 600 °C.

VI. Oblast základního materiálu je neovlivněný *základní materiál.* Za neovlivněný základní materiál je považována oblast, v níž teplota nepřesáhne hodnotu A_1, ale prakticky je to teplota cca 600 °C, kdy jsou mikrostrukturní změny nevýrazné.

2.4 Technologie a základní způsoby tavného svařování

Při tomto způsobu vzniká spoj místním natavením svařovaných ploch základního materiálu, ale současně dochází i k natavení přídavného materiálu. Vzniká tzv. tavná lázeň. Tavenina vyplňuje svařované místo a postupnou krystalizaci přechází v tuhý stav - tím vzniká svar.

Výpočet spotřeby přídavného kovu – hmotnost spotřeby přídavného materiálu při tavném svařování, plamenem a elektrickým obloukem (při svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou je to hmotnost ocelového jádra elektrody) m [kg]:

$$m = \frac{S \cdot l \cdot \rho \cdot z_1 . z_2}{1000} \text{ [kg]}, \qquad (10)$$

kde značí: S – plochu průřezu svaru [mm^2]; l – délku svaru[mm]; ρ - hustotu přídavného materiálu – ocel 0,00785 [$g \cdot mm^{-3}$]; z_1 – součinitel ztrát nevyužití celého množství přídavného materiálu. z_2 – součinitel ztrát rozstřikem a vypařením.
Hodnoty součinitelů z_1 a z_2 jsou uvedeny v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5 Hodnoty součinitelů z_1 a z_2

Hodnoty součinitelů ztrát z_1 a z_2 u tavného svařování		
Metoda tavného svařování	***Součinitel nevyužití materiálu z_1***	***Součinitel rozstřiku a vypaření z_2***
Svařování kyslíko-acetylénovým plamenem	1,00 až 1,02	1,00 až 1,01
Svařování el. obloukem, elektroda do ∅ 2,5 mm, kyselý obal	1,15	1,15 až 1,20
Svařování el. obloukem, elektroda do ∅ 2,5 mm, bazický obal	1,15	0,97
Svařování el. obloukem, elektroda nad ∅ 3,15 mm, kyselý obal	1,10	1,10
Svařování el. obloukem, elektroda nad ∅ 3,15 mm, bazický obal	1,10	0,97
Svařování pod tavidlem	1,02	1,03
Svařování v ochranné atmosféře	1,02	1,10

Poznámka: ***U elektrod s bazickým obalem je součinitel rozstřiku menší než 1,0 neboť obal těchto elektrod obsahuje železný prášek, který nahrazuje rozstřik.***

2.4.1 Svařování kyslíko-acetylenovým plamenem

Teplo potřebné k natavení svařovaného (základního) materiálu se až na výjimky získává hořením směsi plynů, nejčastěji *kyslíku* a *acetylenu*. Acetylen (C_2H_2) je plyn, který hoří a kyslík (O_2) hoření podporuje. Tyto plyny přivádíme z tlakových nádob (lahví) přes redukční ventily a hadice do hořáku, kde se v určitém poměru směšují, dostávají se do hubice hořáku a po zapálení tvoří plamen. Podle poměru míšení obou plynů rozeznáváme tři typy plamenů:

A) ***Plamen neutrální*** vzniká v případě, že spalujeme přibližně stejné množství obou plynů, tj. poměr míšení $O_2 : C_2H_2 = 1$. Tento typ plamene se pro svařování používá nejčastěji. Při podrobnějším pohledu lze tohoto plamene rozpoznat 3 světelné kužele:

a) *První kužel* - jádro plamenu (vnitřní světelný kužel plamene) je oblast ostře ohraničená. Zde probíhá postupný ohřev do teploty zapálení plynné směsi, která proudí z hubice hořáku.

b) *Druhý kužel* je oblast svařování. Zde probíhá spalovací proces, který má dvě fáze. *V první fázi* probíhá nedokonalé spalování na povrchu světelného kužele - acetylen se rozkládá na původní složky, uhlík se spaluje na oxid uhelnatý a vodík zůstává převážně volný.

1.fáze: $$C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2 + teplo\,, \qquad (11)$$

kde značí:C_2H_2 - acetylén;O_2 - kyslík; CO - oxid uhelnatý;H_2 - vodík.

Teplo uvolněné v první fázi spalování označujeme jako výhřevnost acetylenu. Oblast vhodná ke svařování, kde je nejvyšší teplota (cca 3100°C), leží ve vzdálenosti cca 1 až 2 mm od vrcholu 1. světelného kužele. Tato oblast má dezoxidační (redukční) charakter a chrání roztavený kov před vnější atmosférou, nazývá se nejen oblastí svařovací, ale také pracovní.

c) *Třetí kužel* - oblast vnější části plamene (žluté zabarvení). Zde probíhá druhá fáze spalování C_2H_2 s atmosférickým O_2:

2. fáze: $$2Co + H_2 + 3/2\,O_2 = 2CO + H_2O + teplo\,, \qquad (12)$$

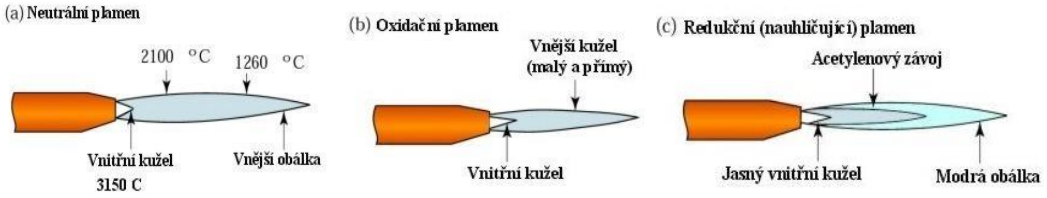
Potřebný kyslík si plamen odebírá ze vzduchu a kužel vnějšího plamene má oxidační účinek.

B) ***Plamen nauhličující*** s poměrem míšení $O_2 : C_2H_2 < 1$ plamen má přebytek acetylenu. Světelný kužel je překrytý mlhavým závojem, jehož délka závisí na přebytku acetylenu. Plamen je čadivý a má silný dezoxidační účinek. Obsahuje volné částice nespáleného uhlíku a způsobuje nauhličování nataveného kovu. Pro běžné svařování ocelí nemá uplatnění. Používá se pro svařování litin, hliníku.

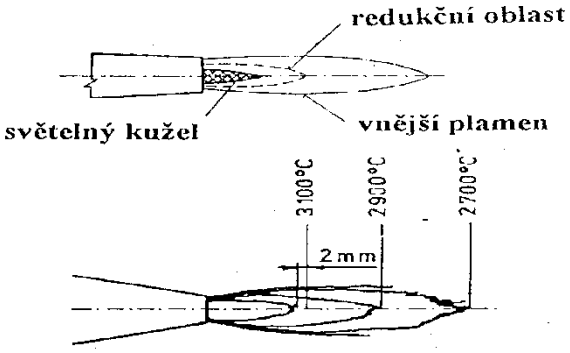
C) ***Plamen oxidační*** s poměrem smíšení $O_2 : C_2H_2 > 1$ plamen má přebytek kyslíku a má tendence propalovat svařovaný materiál. Světelný kužel je krátký a podle obsahu kyslíku je zbarven od modré až do modrofialové. Kyslík z oblasti světelného kužele se lehce dostává do styku s roztaveným kovem a oxiduje ho. Plamen není vhodný pro svařování ocelí, litin, neželezných kovů. Používá se pro svařování některých druhů mosazí (slitina Cu-Zn) a bronzů (slitina Cu-Sn). Kyslík tvoří se zinkem na povrchu svařovaných materiálů oxidy, které brání vypařování Zn, Sn.

Na obr.2-8 jsou schémata plamenů v souvislosti s poměrem O_2:C_2H_2. Na obr.

2-9 je schéma neutrálního kyslíko-acetylenového plamene.



Obr. 2-8 Schéma neutrálního, oxidačního a redukčního plamene



Obr. 2-9 Schéma oblastí (kuželů) neutrálního kyslíko-acetylenového plamene

Rozdělení plamene podle výstupní rychlosti – podle výstupní rychlosti rozlišujeme 3 typy plamenů:

a) ***měkký plamen,*** výstupní rychlost **70 *až 100 m/s*** nestabilní, náchylný ke zpětnému šlehnutí;
b) ***střední plamen,*** výstupní rychlost ***100-120 m/s*** stabilní, zaručuje dobrou jakost svaru;
c) ***ostrý plamen*****,** výstupní rychlost je ***větší než 120 m/s*** velký dynamický účinek na svarovou lázeň.

Jak je z tohoto rozdělení zřejmé, pro svařování se používá střední výstupní plamen.

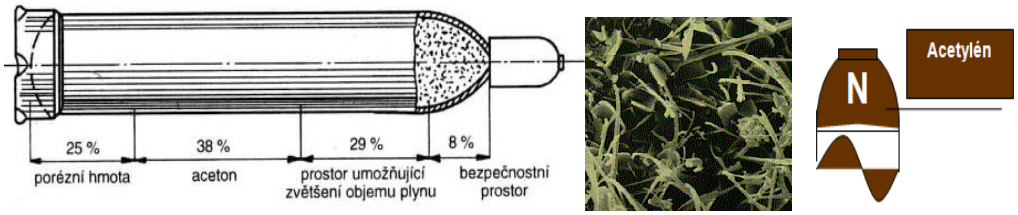
Charakteristika plynů - oba plyny se uchovávají v tlakových ocelových lahvích.

Acetylen - (C_2H_2) je uhlovodík, který obsahuje 92,2 % C a 7,8% H_2. Při normálním tlaku hoří bílým plamenem a vyvíjí velké množství sazí. Je cítit po česneku. Smícháním se vzduchem tvoří výbušnou směs! Vyrábí se z karbidu vápníku CaC_2 působením vody.
Acetylen je bezbarvý plyn, česnekového zápachu. Při hoření dodává teplo do okolí. Při manipulaci s ním je třeba dávat ***pozor***, protože za určitých podmínek může dojít k jeho výbušnému rozkladu a se vzduchem může explodovat v širokém rozmezí koncentrací a také sám má sklon k explozivnímu rozkladu. Nedá se stlačovat. Z tohoto důvodu se dodává v tlakových nádobách (lahvích) naplněných *průlinčitou hmotou*, viz obr. 2-10, nasycenou acetonem.

V acetonuje acetylen rozpuštěn pod tlakem. Jeden litr acetonu rozpustí 24 l acetylenu, tj. 16x24=384 litrů, pak se stlačí na tlak 15 atmosfér (tj. tlak 1,5 MPa), 16 x24x15 získáme 5760 litrů acetylenu.
Množství acetylenu v tlakové nádobě o obsahu 40 l a s obsahem 25 % porézní hmoty a s obsahem 38 % acetonu v láhvi se vypočítá:

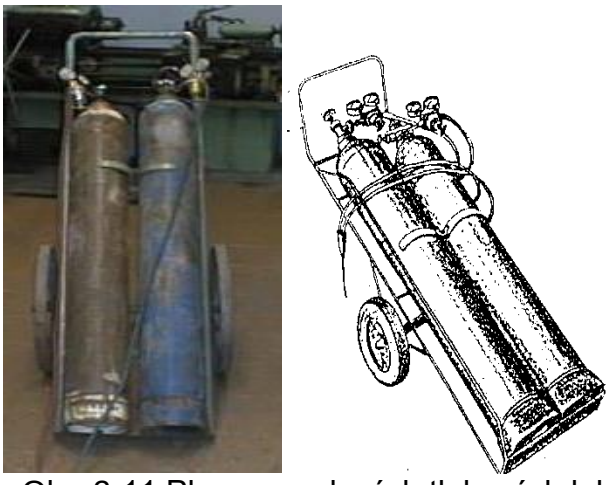
$$V = \frac{38}{100} \cdot 40 \cdot 25 \cdot 15 = 5700\ litrů\ acetylenu$$

Láhev o objemu 40 l obsahuje 5 až 6 kg acetylenu, to je množství, které odpovídá spotřebě kyslíku ve stejně velké láhvi. Ocelová láhev se dle EN ČSN označuje názvem acetylen. Schéma lahve je na obr. 2-10.



Obr. 2-10 Schéma tlakové nádoby pro acetylén a struktura průlinčité hmoty (zvětšení 10 000 násobné, mikroskop REM) a označení tlakové nádoby

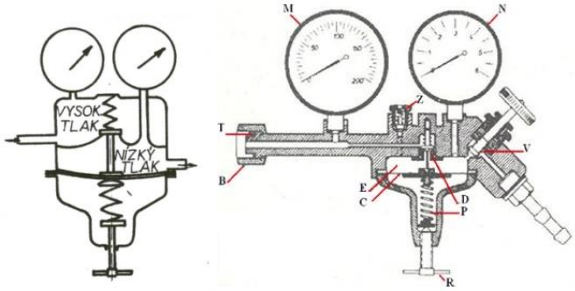
Kyslík (O_2) při atmosférickém tlaku a teplotě -183°C zkapalní na modrou kapalinu (1 litr kapalného kyslíku = 800 l plynného kyslíku). Tlaková láhev s kyslíkem se dle ČSN označuje modrým pruhem. V současné době se postupně přechází na nové barevné značení ve smyslu evropských norem (EN). Technické plyny k svařování dodávají specializované zahraniční firmy. Na obr. 2-11 je ukázka tlakových lahví používaných při svařování.
Pokud se kyslík dostane do styku s mastným prostředím je výbušný.



Obr. 2-11 Plyny v ocelových tlakových lahvích

Pro ocelové lahve se stlačenými plyny platí přísné bezpečnostní předpisy. Např. musí být spolehlivě chráněny proti pádu a být dostatečně vzdáleny od místa svařování. Nesmí ležet – s vodorovnou rovinou musí svírat úhel min. 30°, je omezeno množství odebíraného acetylenu, atd. Tlak kyslíku v tlakové nádobě je 15 MPa, tlak acetylenu 1,5 MPa. Každá láhev je opatřena *lahvovým ventilem* (ventil pro kyslík a acetylen se liší). Tlak obou plynů při vlastním

svařování je menší, proto také každá láhev je opatřena ještě *redukčním ventilem*, který upravuje tlak v lahvích na tlak potřebný pro svařování (pracovní). Redukční ventil ze skládá z části vysokotlaké a nízkotlaké, každá obsahuje jeden manometr, proto na jedné lahvi jsou dva manometry. Schéma redukčního ventilu je na obr. 2-12. Vlastní ventil je umístěn v sedle mezi vysokotlakou a nízkotlakou částí. Je mechanicky spojen s velkoplochou membránou, uzavírající nízkotlakou část. Při větším odběru plynu se membrána narovná a otevírá redukční ventil. Tuhost membrány (její citlivost k činnosti) je nastavena podle velikosti hořáku a odběru plynu pomocí šroubového vřetene a pružiny. Tyto regulační prvky jsou ve spodní části redukčního ventilu.



M – manometr tlaku plynu v tlakové nádobě; N – manometr odebíraného plynu z nádoby; V – výstupní ventil; B –převlečná matice na připojení redukčního ventilu k lahvi; E – komora na snížení tlaku plynu; C – membrána; D – ventilové sedlo; P – pružina, R – regulační šroub ventilu; T – těsnění pro připojení tlakové nádoby; Z – pojistný ventil

Obr. 2-12 Schéma a podrobnější popis redukčního ventilu acetylénu [6]

Na obr. 2-13 je ukázka redukčního ventilu pro kyslík a acetylén.



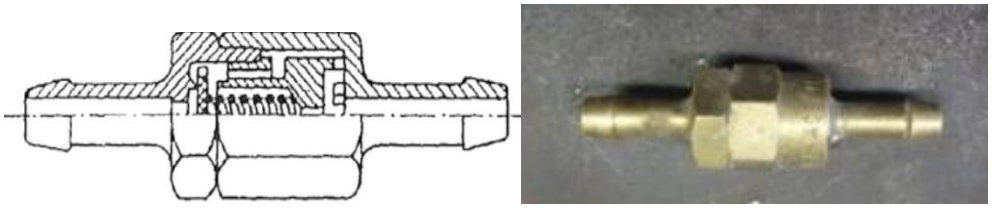
Obr. 2-13 Redukční ventily pro kyslík, s převlečnou maticí (vlevo) a pro acetylén s třmenem (vpravo)

Hadice jsou pryžové a slouží k přívodu plynů od redukčních ventilů do hořáku. Hadice slouží jako pružné propojení svařovacího hořáku s lahví (zdrojem plynu). Hadice pro přívod kyslíku a acetylenu se liší ***barvou*** a ***světlostí.*** Hadice pro *kyslík* jsou *modré* a hadice pro *acetylén*je oranžové barvy, viz obr. 2-14. Tloušťka stěny je 4 až 6 mm. Světlost hadic pro kyslík je 6 až 9 mm, pro acetylen 9 - 14 mm. Nejmenší délka hadic může být 5 m (hadice pro acetylen je zkoušena na přetlak 1MPa, stěna tlakové hadice je vyztužena textilní vložkou, hadice pro kyslík je zkoušena pro přetlak 2 MPa).



Obr. 2-14 Hadice pro svařování kyslíko-acetylénovým plamenem (modrá kyslík, oranžová – acetylén)

Pojistka proti zpětnému šlehnutí zabraňuje proniknutí zpětného šlehnutí plamene hadicí do redukčního ventilu. Současně nedovolí vniknutí kyslíku do přívodu hořlavého plynu a vytvoření výbušné směsi. Zařízení se umisťuje do hadice pro přívod acetylenu ve vzdálenosti asi 1 m od rukojeti hořáku. Někteří výrobci umísťují tyto pojistky přímo do rukojeti hořáku.



Obr. 2-15 Schéma pojistky a pojistka proti zpětnému šlehnutí plamene

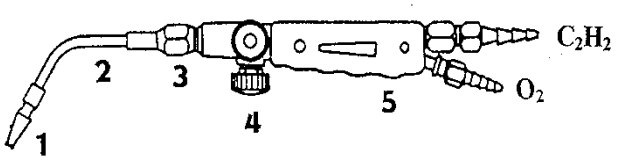
Svařovací hořáky resp. *svařovací soupravy*, viz obr. 2-16, se skládají z rukojeti se dvěma ventily, které ovládají přívod obou plynů. Tvar rukojeti je přizpůsoben dlani ruky a je ukončen dvěma nátrubky pro upnutí hadic. Přední část rukojeti je opatřena závitem pro převlečnou matici, která slouží k upnutí hořákového nástavce. Hořákové nástavce jsou konstrukčně přizpůsobeny pro směšování plynů a oba plyny se zde mísí za potřebného přetlaku k dosažení vhodné výstupní rychlosti a v množství potřebném k dosažení vhodného směšovacího poměru. Konec hořákového nástavce je opatřen měděnou hubicí (špičkou).

Podle konstrukce rozdělujeme svařovací soupravy na *injektorové* (nízkotlaké) a *směšovací* (vysokotlaké). Nízkotlaké soupravy (zjednodušeně označované jako hořáky) jsou univerzální. Vysokotlaké soupravy mají omezené použití.

Svařovací soupravy obsahují sadu (cca 6 až 8) výměnných nástavců, viz obr. 2-17, resp. hořáků, které umožňují svařovat materiály různých tlouštěk.

Tlak plynů v hořáku je přibližně pro kyslík 0,3 MPa, tlak acetylenu je 0,1 MPa.





1 - hubice hořáku, 2 - hořák, 3 - převlečná matice, 4 - ovládací ventily, 5 - rukojeť, C_2H_2 – acetylen; O_2 - kyslík

Obr. 2-16 Svařovací hořák



Obr. 2-17 Ukázka hořáků svařovací soupravy

Druhy hořáků pro svařování plamenem – při svařování plamenem rozlišujeme dva typy hořáků:

a) injektorové;
b) bez injektorové.

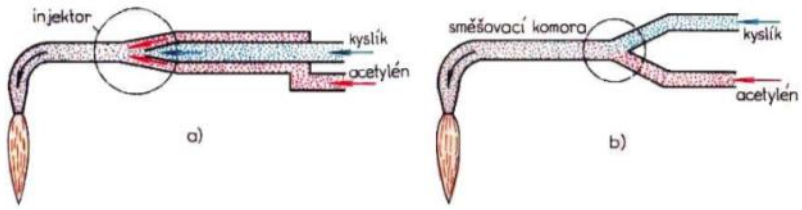
Injektorové (nízkotlaké)-využívají jevu (z termodynamiky plynů), při kterém plyn s vyšším tlakem proudící relativně malým otvorem se natolik zrychlí, že za ním vzniká ***vakuum***.

Bez injektorové (vysokotlaké) **-** dochází ke klidné hoření plamene, vyžadují však vyšší nároky na redukční ventily.

V praxi se nejvíce používají ***injektorové hořáky***, viz obr. 2-18. Na obr. 2-19 je schéma odlišností obou typů hořáků.



Obr. 2-18 Princip injektorového svařovacího hořáku [23]



a) injektorový (nízkotlaký) hořák, b) bezinjektorový (vysokotlaký) hořák

Obr.2-18 Odlišnost mezi injektorovým a bezinjektorovým hořákem

Přídavné materiály - pro ruční svařování se označují svařovací dráty. Mají stejné nebo podobné chemické složení jako svařovaný materiál. Rozlišujeme dráty pro svařování: nelegovaných ocelí, nízkolegovaných ocelí, vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů.

Dráty se dodávají v tyčinkách dlouhých 1 m a vyrábí se o průměrech: 1,6; 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6,3; 8 mm a podle ČSN a EN. Označení se liší podle výrobce. Například dříve český výrobce ve Vamberku používá toto značení:

G XXX

G - přídavný materiál pro svařování plamenem.
X - první číslo udává pro jakou skupinu základních materiálů je určen.
XX - 2. a 3. číslo mají charakter pořadový a mají význam jen pro výrobce.

Nebo používá i jiné značení, viz tabulka 2.6a), kde je ukázka současného označení dvou typů přídavných materiálů (drátů) podle firmy ESAB (Vamberk).

Tabulka 2.6a) Vybrané dráty pro svařování kyslíko acetylenovým plamenem

Charakteristika drátů pro svařování kyslíko-acetylenového plamene							
Označení	**Chemické složení hmot. [%]**			**Mechanické hodnoty**			**Použití**
	C	***Si***	***Mn***	***Rm [MPa]***	***$Rp_{0.2}$ [MP]***	***A_5 [%]***	
G 102	0,1	0,1	0,5	410	200	29	Drát pro nenáročné svary potrubí a tenkých plechů, též pro běžné stavební a zámečnické svařovací práce. Drát je poměděný, používá se pro svařování ve všech polohách.
OK GASROD 98.70 *EN 12536*	0,09	0,15	1,05	350	300	> 20	Drát pro plamenové svařování slabých plechů a tenkostěnných trubek z nelegovaných ocelí.

V tabulce 2.6b) je vedena souvislost mezi tloušťkou svařovaného plechu a průměru drátu přídavného materiálu pro svařování kyslíko-acetylénového plamene.

Tabulka 2.6 b) Souvislost mezi tloušťkou svařovaného plechu a průměru drátu přídavného materiálu pro svařování kyslíko-acetylénového plamene.

Souvislost mezi tloušťkou svařovaného plechu a průměru drátu přídavného materiálu						
Tloušťka plechu [mm]						
0,5 až 1,0	1,0 až 3,0	4,0 až 5,0	6,0 až 7,0	8,0 až 9,0	10 až 15	20 až 30
Průměr svařovacího drátu [mm]						
1,6	2,0	3,2	4,0	5,0	6,3	8,0

Na obr. 2-19 je ukázka svařovacích drátů, resp. přídavných materiálů pro svařování kyslíko-acetylénovým plamenem.



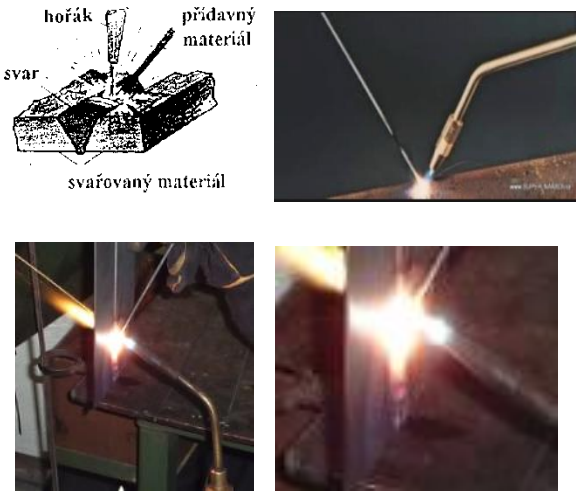
Obr. 2-20 Svařovací dráty pro svařování kyslíko-acetylénovým plamenem

V tabulce 2.7 je uvedena spotřeba plynu na odtavení 1 kg ocelového přídavného materiálu při svařování kyslíko-acetylénovým plamenem.

Tabulka 2.7 Spotřeba plynu na odtavení 1 kg ocelového přídavného materiálu

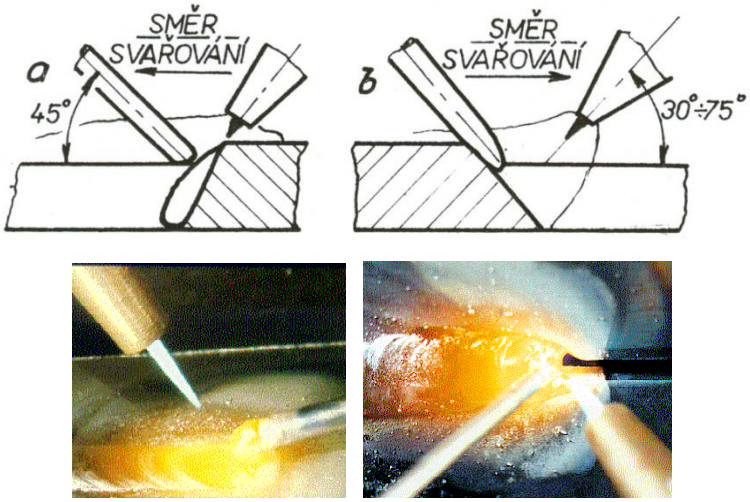
Přibližná spotřeba plynů		
Druh svařování	Spotřebovaný plyn	Spotřeba [$l \cdot kg^{-1}$]
Kyslíko-acetylenový plamen	Kyslík	920 až 1300
	Acetylen	820 až 1200

Technika svařování plamenem, na obr. 2-21 je schéma a ukázky svařování plamenem.Při svařování plamenem se uplatňujídvě metody svařování *vpřed* a *vzad*, viz obr. 2-22.



Obr. 2-21 Schéma a ukázky svařování plamenem [21], [22]

Z obr. 2-21 dole, je patrné, že se svařuje ve svislé poloze zdola nahoru, to znamená, že jde první drát a za ním hořák, tj. svařování vpřed

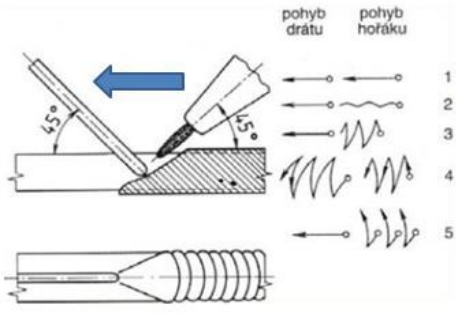


a) svařování vpřed; b) svařování vzad

Obr. 2-22 Schéma svařování

Svařování vpřed je vhodné pro plechy do tloušťky 3 mm. Plamenem se nataví základní materiál a do tavné lázně se přerušovaně ponořuje přídavný materiál. Při svařování se přídavný materiál pohybuje před hořákem a svírá úhel 45° se základním materiálem. Drát se odtavuje v jednotlivých kapkách. Celý proces svařování závisí na citu a dovednosti svářeče. Zde dochází k horšímu provaření kořene svaru vlivem předbíhání svarové lázně. Též nedochází k intenzivní temperaci a prohřívání základního materiálu, což způsobuje rychlé ochlazování svaru a vznik vnitřních pnutí. Vnitřní pnutí může způsobit porušení svařované součásti.K natavenému materiálu má snadnější přístup atmosféra. Nedoporučuje se pro výrobu pevnostních spojů. Metoda je vhodná pro svařování tenkých plechů do tl. 4 mm.

Na obr. 2-23 jsou naznačeny techniky svařování vpřed při tvorbě tupého V svaru. Např. při svařování tenkých plechů je vodorovný pohyb jak drátem (přídavným materiálem), tak hořákem. Např. při svařování plechu tl. 8 mm, drát a hořák vykonávají při svařování kývavý pohyb.

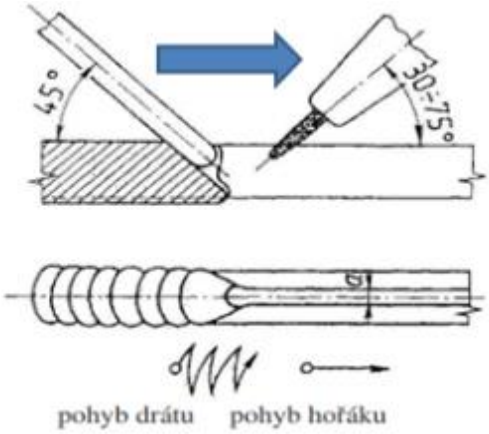


***1** - svařování tenkých plechů - pohyb drátu, pohyb hořáku;*
***2** - svar I tl. plechu do 4 mm - pohyb drátu, pohyb hořáku;*
***3** - svar V do tl. plechu 8 mm - pohyb drátu, pohyb hořáku*
***4** - svar V tl. plechu nad 8 mm - pohyb drátu, pohyb hořáku*
***5** - svar V tl. plechu nad 8 mm - pohyb drátu, pohyb nesprávného vedení hořáku*

Obr. 2-23 Schéma technik svařování vpřed tupého V svaru [23]

Svařování vzad (vpravo) je typické tím, že nejdříve hořák postupuje pod úhlem 30 až 70°, který dostatečně prohřívá a natavuje základní materiál. Za ním následuje kývavý pohyb přídavného materiálu, který je skloněn pod úhlem 45°. Plamen taveninu a materiál intenzivně ohřívá a chrání ji před oxidací. Intenzivnější nahřívání materiálu zajišťuje jeho pomalejší chladnutí a tím nevznikají vnitřní pnutí. Svářeč drát nevyjímá z lázně a promíchává ji. Takto vyrobené svary jsou pevnostně výhodnější. Dovoluje svařovat plechy větších tlouštěk. Svařováním vzad získáme kvalitnější svary, zaručené provaření kořene, menší pnutí a deformace ve svařeném materiálu. Tento způsob je vhodný ke svařování plechů pro nejrůznější konstrukce.

Správná technika svařování je kývavý pohyb drátu těsně nad tavnou lázní, viz obr 2-24 a přímý pohyb hořáku.



Obr. 2-24 Schéma techniky svařování vzad tupého V svaru

Plamenem se svařují materiály různých tlouštěk, obvykle od 0,6 do 6 mm, např. spojování trubek ústředního topení, oprava karoserií automobilů, atd.

Svařování plamenem je jedním z nejstarších způsobů svařování. Jeho velkou nevýhodou je, že způsobuje značné tepelné ovlivnění základního materiálu, což může způsobovat značné snížení mechanických vlastností. Z tohoto důvodu tento způsob svařování nenalezl širší průmyslové uplatnění.
Při svařování plamenem svářeč musí mít ochranné pomůcky, mezi které mimo jiné patří ochranné brýle pro svařování plamenem (se zelenými, nebo alespoň modrými skly), kožená zástěra, kožené rukavice a vhodná kožená obuv.

2.4.2 Svařování elektrickým obloukem

Svařování elektrickým obloukem je velmi používaný způsob tavného (tepelného) svařování. Zdrojem tepla k natavení základního a přídavného materiálu je *elektrický oblouk*, který se vyznačuje vysokou tepelnou energií. Z fyzikálního hlediska je elektrický oblouk samovolný elektrický výboj v plynném prostředí (ve velmi ionizované směsi plynů a par, která je vodivá a prochází jí

proud) s vysokou teplotou za pomoci stejnosměrného (ss) nebo střídavého (≈) proudu.
Při svařování hoří elektrický oblouk mezi svařovaným materiálem a svařovací elektrodou. Teplem elektrického oblouku dojde k lokálnímu natavení svařovaného materiálu a materiálu svařovací elektrody za vzniku tavné lázně, která tvoří po svém vychladnutí základ spojení, tj. svaření součástí.

Elektrický oblouk se zapaluje buď přerušením zkratu nebo vysoce napěťovou jiskrou, která ionizuje plyn a tak ho vytváří vodivým.

Ke svařování obloukem se řadí mnoho metod, jež se liší druhem elektrody, prostředím, ve kterém hoří oblouk. Tepelný výkon Q [W] elektrického oblouku je množství tepla, které projde z oblouku do sváru:

$$Q = \eta \cdot I \cdot U \qquad (1)$$

kde značí: η- účinnost příslušného procesu svařování (0,7 až 0,85); I - proud při svařování [A]; U – napětí při svařování [V].

U ručního svařování obalenou elektrodou se svařovací proud určuje podle průměru elektrody. Podle těchto empirických vzorců lze určit intenzitu proudu ***I*** [A] v závislosti na průměru jádra elektrody ***d*** [mm].

Velikost svařovacího proudu pro elektrodu s kyselým obalem:

$$I \approx (40 \text{ až } 55) \cdot d \quad [A] \qquad (2)$$

Velikost svařovacího proudu pro elektrodu s bazickým obalem:

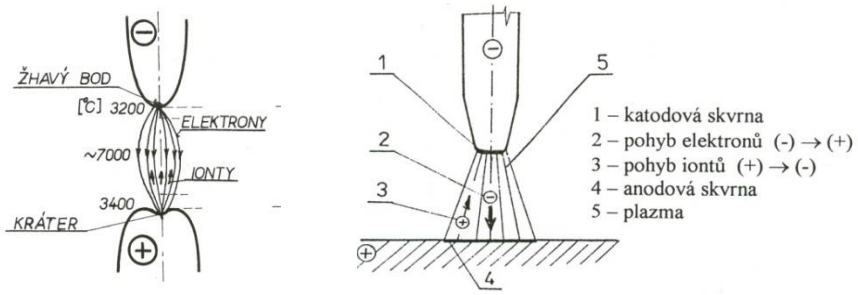
$$I \approx (35 \text{ až } 50) \cdot d \, [A], \qquad (3)$$

kde značí: d – průměr drátu elektrody [mm].

Elektrický oblouk se skládá z katodové oblasti, sloupce oblouku a anodové oblasti. Délka katodové oblasti je nepatrná 0,00001 až 0,0001 mm, délka anodové oblasti je 0,001 až 0,01 mm. Na katodě i anodě jsou tzv. skvrny.
Katodová skvrna je část povrchu žhavé katody, ze které vychází elektrony.
Anodová skvrna je část povrchu anody, kde jsou pohlcovány elektrony.
Sloupec oblouku je jasně zářivá viditelná část oblouku s vysokou teplotou a malým napětím, která je tvořena plazmatem (plazma je 4. skupenství hmoty, které vzniká ionizací plynu). Ve sloupci oblouku nastává ionizace plynu (umožňuje hoření oblouku). Katoda vysílá elektrony (ty se sráží s atomy plynů a svou kinetickou energií je rozbijí na kationy a elektrony). Elektrony naráží na anodu (+), jejich kinetická energie se mění na tepelnou. Teplota na anodě dosahuje *cca 2600°C*.

Kationy naráží na katodu, ta se také ohřívá na teplotu *cca* 2400°C*.* Tato teplota opět dovoluje vysílání elektronů, které přechází na anodu. Teplota na oblouku je cca 6000°C - to je teplota potřebná k lokálnímu natavení kovového materiálu.

Na obr. 2-25 je schéma vzniku elektrického oblouku - a) fyzikální podstata; b) interpretace pro svařování. Na obr. 2-26 je schéma oblastí oblouku.

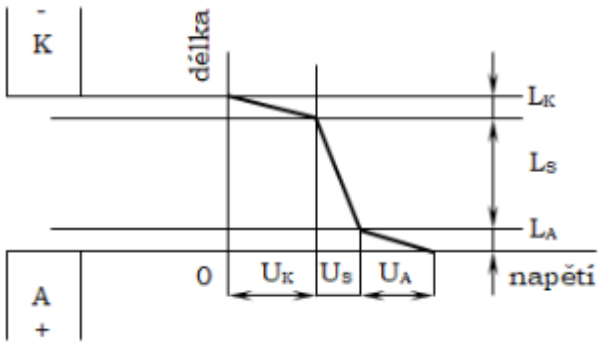


a) b)

a) fyzikální podstata vzniku a hoření oblouku
b) interpretace hoření oblouku při svařování

Obr. 2-25 Schéma vzniku a hoření elektrického oblouku

Při svařování elektrickým obloukem jednu elektrodu tvoří vlastní *svařovací elektroda*, která plní funkci elektrody, někdy i funkci přídavného materiálu. Teplota oblouku při svařování elektrodou je závislá na použité metodě svařování. Např. obalená elektroda: 4800 až 6400°C, WIG: 6500 až 9000°C. Pro metody MIG a MAG: 8000 až 15000°C. Délka svařovacího oblouku bývá 2 až 7 mm, proud 10 až 2000 A, a napětí 10 až 50 V.



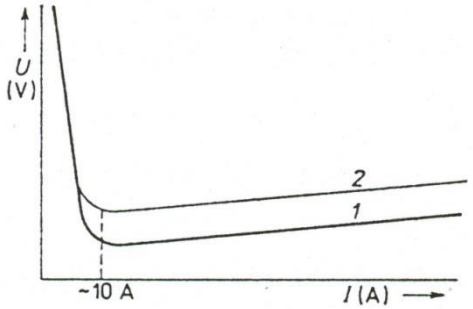
L_K - délka katodové oblasti;
L_S- délka sloupce oblouku;
L_A - délka anodové oblasti;
U_K - napětí na katodě;
U_S - napětí na sloupci;
U_A - napětí na anodě.

Obr. 2-26 Schéma oblastí elektrického oblouku

Z technologického hlediska je velmi důležité, že elektrický oblouk při svařování vytváří *koncentrovaný zdroj tepla*, který rychle natavuje (resp. odtavuje) elektrodu ve formě kapiček i základní materiál. Tak se vytváří svarová lázeň. Ve svarové lázni se promíchává tavenina základního materiálu i tavenina elektrody. Po vychladnutí této taveniny vzniká svarový spoj, resp. *svar*. Ten přechází do tzv. tepelně ovlivněné oblasti, což je teplem ovlivněná nenatavená oblast základního materiálu. Čím je menší, tím je to pro užitné vlastnosti svarového spoje výhodnější. Z důvodů fyzikální jednoduchosti procesu a vzniku malé tepelně ovlivněné oblasti našlo svařování elektrickým obloukem značné průmyslové uplatnění. Tato metoda se neustále rozvíjí, jednotlivé způsoby

se vylepšují tak, aby šlo svařovat co nejširší spektrum materiálů a tlouštěk. Do obloukového svařování patří řada metod, které se vzájemně liší buď druhem elektrod nebo prostředím, ve kterém oblouk hoří.

Statická charakteristika elektrického oblouku je odpor, který klade prostředí, ve kterém elektrický oblouk hoří vůči průchodu elektrického proudu. Odpor závisí na teplotě plazmatu a druhu plynu, z kterého plazma vzniká. Statická charakteristika elektrického oblouku se zakresluje do grafu napětí - proud, viz obr. 2-27. V oblasti charakteristiky do proudu cca 10 [A] svařování nepracuje. Teprve proudy od 10 [A] jsou pro svařování elektrickým obloukem již použitelné. Pak tuto část statické charakteristiky lze nahradit přímkou, která se dá pro ruční svařování obalenou elektrodou napsat ve tvaru: $U = 20 + 0{,}04 \cdot I$ (20 je konstanta pro svařování obalenou elektrodou).



1- normální délka oblouku; 2 - větší délka oblouku

Obr. 2-27 Statická charakteristika elektrického oblouku

Dynamická charakteristika oblouku – svařovací zařízení (svářečka) určuje dynamiku elektrického oblouku. Nejlepší dynamiku - odezvu na změnu mají samozřejmě svařovací agregáty typu – ***invertory***, které využívají frekvenci 50 kHz a jsou po elektrické stránce vypracované na hoření velmi kvalitního elektrického oblouku.

2.4.2.1 Přenos kovu v elektrickém oblouku

V procesu svařování je důležitý mechanismus přenosu kapky utavující se elektrody do svarové lázně. Přenosem kovu v elektrickém oblouku se rozumí proces, kdy kapky utavující se elektroda (roztavovaného přídavného materiálu) pronikají do svarové lázně při hoření elektrického oblouku. Charakter přenosu kovu ovlivňují parametry svařování, tj. svařovací proud resp. *proudová hustota*, *svařovací napětí, složení ochranné atmosféry a přídavný materiál.*

Zkratový přenos – při tomto typu přenosu se kapka roztaveného kovu (z odtavující se elektrody) se dotkne povrchu tavné lázně, oblouk zhasne a dojde ke zkratu elektrického proudu. Tím se zvýší teplota a kapka se odpadne od utavující elektrody a spadne do svarové lázně. Tím dojde opět k zapálení elektrického oblouku.

Poznámka: ***Zkratový přenos vzniká při nastavení svařovacího proudu v intervalu od 60 do 180 A, svařovacího napětí od 14 do 22 V, průměru elektrody od 0,6 do 1,2 mm a v libovolné ochranné atmosféře, např. 100% čistého CO_2 nebo směsi 75 až 80 % argonu +***

25 až 20 % CO_2. S vyšším svařovacím napětím klesá frekvence kapek odtavených z elektrody, roste jejich velikost a zvětšuje se rozstřik. AMBROŽ [25].

Kapkový přenos – při tomto přenosu se z tavící elektrody odtavují kapky (frekvencí 20 až 50 kapek za sekundu). Nedochází ke zkratům. Pro vznik kapkového přenosu jsou nutné vysoké hodnoty svařovacího proudu (190 do 300 A) při napětí (22 do 28 V), které nataví konec elektrody do velké kapky. Kapkový přenos je dobře použitelný v ochranné atmosféře CO_2, ve směsných plynech s argonem výrazně hůře. Hojně se využíval během 60. až 70. let minulého století pro vysoký výkon odtavení. V současné době se od něj již ustoupilo, především pro velký rozstřik a tvorbu hrubých svarových housenek, [25].

Sprchový přenos – při tomto přenosu, který je též bezskratový, kapky tekutého kovu jsou jemně rozptýleny a pohybují se ve směru osy elektrody. Sprchový přenos nastává při hodnotách svařovacího proudu (200 do 500 A) a svařovacím napětí (28 do 40 V), ochranných plynech bohatých na argon (argonu s maximálně 18 % CO_2nebo argonu s 1 až 5 % O_2). Směs argonu a CO_2 tvoří širší závar oproti směsi argonu s O_2, který má schopnost hlubšího závaru. Argon podporuje ionizaci plynu a tvorbu plazmatu. Při vysokém proudu se nestačí vytvořit větší kapky, ale vznikají drobné kapky s vysokou frekvencí 150 až 350 Hz -***jakoby sprcha.*** Velkou výhodou je nízký rozstřik. Přenos je velmi výkonný a používá se především při svařování v poloze vodorovné shora dále např. při svařování slitin hliníku a mědi, nebo mědi, [25].

2.4.2.2 Metody svařování elektrickým obloukem

Základní metody svařování elektrický obloukem jsou uvedeny v tabulce 2.8. Obloukové technologie jsou v současné svařovací praxi velmi používané, neboť vytváří lokální zdroj tepla a lze jimi výhodně svařit řadu ocelových konstrukcí a dílů.

Tabulka 2.8 Základní metody svařování elektrickým obloukem

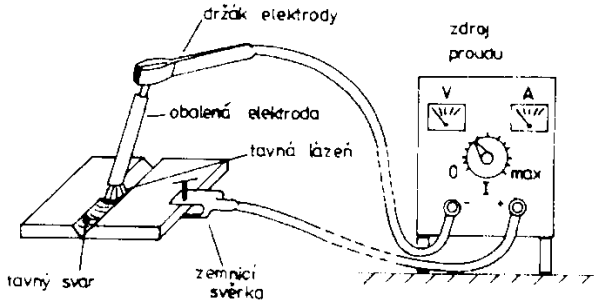
Elektroda	Ochranné prostředí	Zkratka a název metody
Obalená (kovové jádro a obal)	látky z obalu	MMA - ruční obalenou elektrodou
Holý drát nebo plněná trubička	zrnité tavidlo	SAW - automatické, pod tavidlem
	ochranný plyn inertní (Ar)	MIG-(metal - inert - gas)
	ochranný plyn aktivní (Ar + O_2)	MAG - (metal-activ- gas)
	ochranný plyn CO_2	CO_2 - svařování v CO_2
Netavící se wolframová elektroda	inertní plyn	WIG-(wolfram- inert- gas) anglické označení: TIG - (tungsten-inert-gas)

<u>Poznámka:</u> Pro zkrácené názvy metod se používají mezinárodní zkratky, označení nebo číselný kód podle ČSN EN 24063 (např. obalenou elektrodou MMA - 111, pod tavidlem SAW – 121, Submerged arc Welding, atd.).

2.4.2.3 Svařování elektrickým obloukem ručně obalenou elektrodou

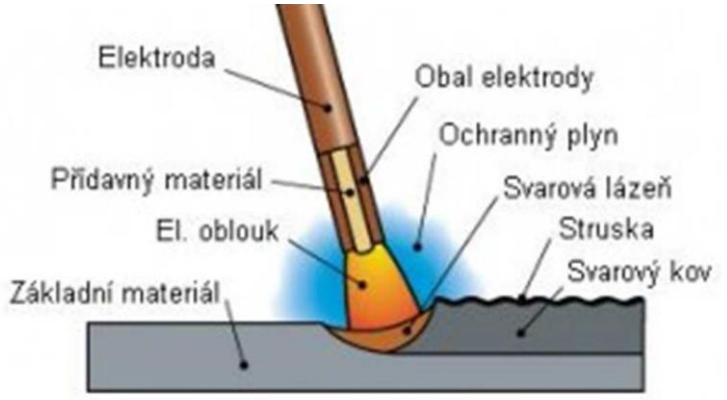
Svařování obalenou elektrodou je nejpoužívanější způsob svařování. Elektrický oblouk hoří mezi základním materiálem a elektrodou (tyčinkou s obalem). Jak již bylo uvedeno, natavená elektroda poskytuje taveninu kovu, resp. přídavného materiálu, který spolu s taveninou základního materiálu vytváří svarovou lázeň, resp. svarový kov spoje. Princip technologie svařování obalenou elektrodou je na obr. 2-12.

Při svařování je velmi důležitý způsob přenosu kovu z odtavující se elektrody do svarové lázně. Tento způsob ovlivňuje svařovací proces, tj. stabilitu hoření oblouku, ztráty rozstřikem a hloubku závaru. Při svařování obalenou elektrodou se uplatňuje zkratový přenos kapky přídavného materiálu do svarové lázně.



Obr. 2-28 Schéma svařování elektrickým obloukem

Na obr. 2-29 je schéma detailu svařování obalenou elektrodou.



Obr. 2-29 Schéma svařování obalenou elektrodou [27]

Důležité parametry zdrojů elektrického oblouku (svařovací zařízení)

Zdroje pro ruční svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou se nazývají *svářečky*, které musí mít schopnost dodávat proud a napětí potřebné velikosti pro stabilní hoření elektrického oblouku. Důležité parametry svářeček jsou:

a) ***napětí naprázdno*** je napětí na výstupních svorkách svářečky při běhu naprázdno (tj. když nehoří oblouk a svařovacím obvodem neprochází proud).

Jeho hodnota je z bezpečnostního důvodu omezena, při použití stejnosměrného proudu je 100 [V] a u střídavého proudu 80 [V]. Pro bezpečnost je lepší nižší napětí, avšak pro zapalování a stabilitu hoření oblouku napětí vyšší;

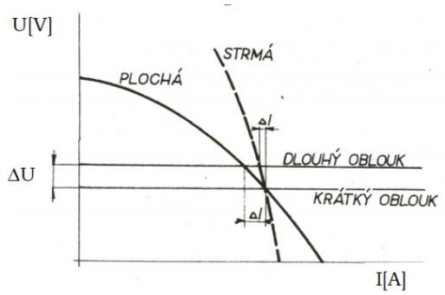
b) ***poměrná doba zatížení*** tzv. zatěžovatel (DZ), je poměr doby zatížení svářečky svařovacím proudem k celkové době pracovního cyklu (svařování, výměna elektrody, atd.);

c) ***jmenovitý svařovací proud*** - proud, který je možno odebírat ze svářečky při poměrné době zatěžování DZ = 60% (tj. pro normalizovaný cyklus ručního svařování);

d) ***trvalý svařovací proud*** - to je proud, který je možno odebírat ze svářečky trvale (DZ = 100%);

e) ***statická charakteristika svařovacího zařízení*** - je závislost mezi napětím a proudem na výstupních svorkách svářečky v ustáleném stavu. Při ručním způsobu svařování obalenou elektrodou je na schopnostech svářeče jak vede elektrodu nad svařovaným materiálem a to ovlivňuje délku oblouku, která způsobuje změnu napětí na oblouku (zvětší-li se délka oblouku, vzroste napětí a naopak). Důležitým požadavkem při svařování je, aby se tyto změny napětí (prostřednictvím změny délky oblouku) projevovaly jen nepatrně na změně nebo kolísání svařovacího proudu. To může zajistit pouze svařovací zdroj speciální konstrukce s příznivým průběhem statické charakteristiky.

Pro nejmenší kolísání svařovacího proudu při ručním svařování obalenou elektrodou je nejvýhodnější svařovací zdroj s co nejstrmější statickou charakteristikou, viz obr. 2-30.

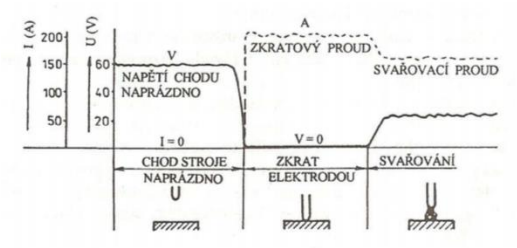


Obr. 2-30 Statická charakteristika svařovacího zdroje

Z obr. 2-30 je patrné, že při svařování obalenou elektrodou pomocí svářečky se strmou statickou charakteristikou např. proudem I_1 (krátkým obloukem) o napětí U_1 se může z nějakého důvodu zvětšit délka oblouku (např. nerovností svařovaného materiálu nebo menší zručností svářeče) a to se projeví zvětšením napětí na hodnotu U_2 a svařovací proud klesne na hodnotu I_2. Jak je z obrázku zřejmé, poměrně velká změna napětí ΔU (U_2 - U_1) vyvolaná náhlým zvětšením délky oblouku způsobí jen nepatrnou změnu svařovacího proudu ΔI. To je výhodné pro ruční svařování, neboť se velmi málo mění svařovací proud.

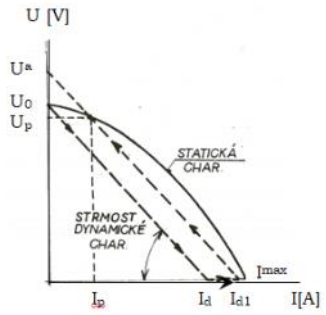
f) ***dynamická charakteristika svařovacího zařízení*** - popisuje schopnost zdroje vyrovnávat s náhlými krátkodobými změnami napětí (při zapalování, zhasínání oblouku, tj. při zkratu a při přerušení oblouku). Udává závislost mezi přechodovými hodnotami proudu a napětí, tedy při okamžitých změnách během svařování. Na obr. 2-31 je dynamická charakteristika svařovacího zdroje

(zařízení). V okamžiku před svařováním zařízení vykazuje napětí chodu naprázno (V, ale I = 0). Při zapalování oblouku (dotknutí se elektrodou svařovaného materiálu – vyvoláme zkrat) docílíme velký proud ($I_{ZKATOVÉ}$), např. na 220 A, ale napětí klesne na nulu (U = 0). V okamžiku hoření oblouku napětí vzroste a postupně se ustálí např. na hodnotě 70 V, to je v bodě statické charakteristiky svařovacího zařízení.



Obr. 2-31 Dynamická charakteristika svařovacího zařízení

Na obr. 2-32 je uvedena statická a dynamická charakteristika svařovacího zařízení.



I_d – hodnota zkratového proudu [A], I_{dl} – hodnota proudu při zapálení oblouku, U_P – ustálená pracovní hodnota napětí [V], I_P – ustálená pracovní hodnota proudu

Obr. 2-32 Statická a dynamická charakteristika svařovacího zařízení

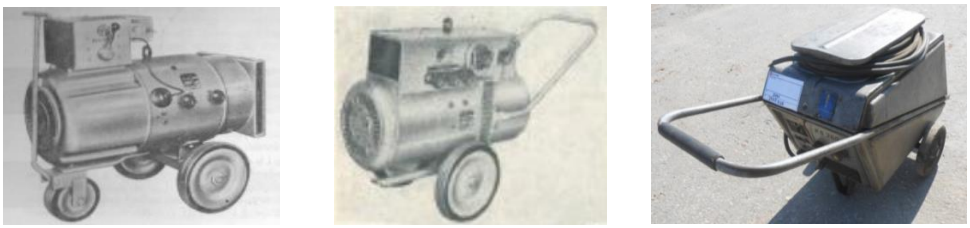
Z obr. 2-32 je patrný úhel (závislost U_0 – I_d), který charakterizuje strmost dynamické charakteristiky zařízení. Při dotyku elektrody s materiálem dojde ke zkratu proud dosáhne hodnoty $I_{d,}$ se zapálí oblouk proud vzroste na hodnotu I_{dl} a po určité době se hodnota proudu i napětí ustálí na pracovní hodnotě (I_P, U_P).

Typy svařovacích zařízení (zdroje neboli svářečky) pro ruční svařování elektrickým odporem

A) Zdroje na základě stejnosměrného el. proudu:

1) točivé - svařovací dynama poháněná motorem. Jejich nevýhodou je velká spotřeba proudu i při běhu naprázdno, značná hmotnost, hlučnost, atd. K jejich výhodám se řadí: jednoduchá a snadná údržba, poměrně nízká pořizovací cena, nedochází ke kolísání svařovacího proudu při změnách napětí v elektrické síti a velmi dobré svařovací vlastnosti. Tyto svářečky byly označeny ***Triodyn*** (I = 30 až 320 A), byla možnost je připojit na různá síťová napětí. Zdrojem elektrického proudu bylo dynamo poháněné elektromotorem, vykazovaly velkou hlučnost. Tyto svařovací agregáty jsou

pro zajímavost na obr. 2 -33. *Triodyn K220* je rotační svařovací stroj, tedy třífázový motor točí vestavěným dynamem a výsledkem je dokonalý stejnosměrný proud. Velikost svařovacího proudu se stanoví regulátorem - regulačním odporem - v budícím vinutí dynama. K 220 v označení svářečky znamená maximální svařovací proud 220 A.



Triodyn K 320, Triodyn K 220 a KS 250 R

Obr. 2-33 Typy stejnosměrných zdrojů pro ruční svařovacích elektrickým obloukem

2) *netočivé (stacionární) svařovací zdroje - usměrňovače a invertorové zdroje (měniče)*

Usměrňovače se skládají z transformátoru, usměrňovače a regulátoru svařovacího proudu. Mezi jejich výhody se řadí: nižší hmotnost, nízká hlučnost, snadná údržba, nižší příkon při běhu na prázdno, snadná dálková regulace svařovacího proudu. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena než u rotačních a náročné opravy. Mezi tyristorové svařovací usměrňovače se řadí svařovací zařízení KS 250, KS250 R, viz obr. 2-33.

Invertory pracují na principu transformace střídavého proudu mnohem vyšší frekvence (20 až 100 kHz), než je síťová (50 Hz). Střídavý proud se získává v měniči (střídači) z usměrňovaného proudu ze sítě. Za transformátorem je usměrňovač. Výhodou je menší jádro transformátoru, nízká hmotnost zařízení (30 až 50 kg při jmenovitém proudu 200 až 300 A), vysoká účinnost (až 90%), malé rozměry, vynikající svářecí vlastnosti a snadná údržba. Nevýhodou je složitá konstrukce.



Transformátorová svářečka Nordika 3200 (vlevo); starší transformátorová svářečka Migatronic, obsahuje transformátor a usměrňovač, (vpravo)

Obr. 2-34 Typy zdrojů na střídavé napětí

B) Zdroje střídavého proudu:

Svařovací transformátory přizpůsobené pro vytvoření elektrického svařovacího oblouku. Mají vysoké napětí naprázdno a nerovnoměrně zatěžují

elektrickou síť (jednofázové). Při svařování střídavým proudem se síťovou frekvencí 50 Hz dochází k opakovanému zhasínání a znovu zapálení elektrického oblouku. Ke svařování je nutno použít jen některé elektrody, jejichž obaly usnadňují znovu zapálení oblouku. Jsou to elektrody s obalem kyselým nebo rutilovým a některé speciální elektrody s bazickým obalem. Svařovací transformátory se používají pro svařovací napětí cca 50 V (při běhu naprázdno je napětí cca 70 V) a pro regulované proudy až do 150 A. Tyto transformátory mají strmou voltampérovou charakteristiku. Jejich výhodou je malá spotřeba energie při běhu naprázdno, lehká údržba a relativně nízká cena. Na obr. 2-35 je ukázka svařovacího transformátoru.



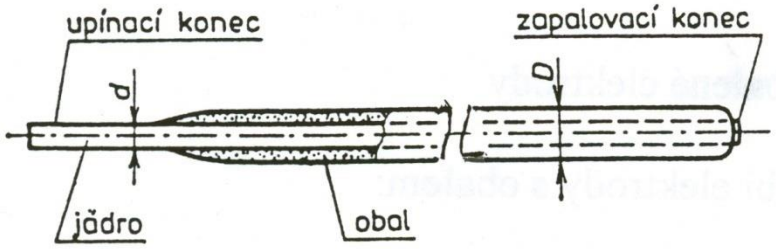
Obr. 2-35 Svařovací transformátory

Elektrody pro ruční svařování elektrickým obloukem

Elektroda pro ruční svařování je v podstatě kovová tyčinka (drát kruhového průřezu) s obalem. Kovová část elektrody - jádro bývá většinou vyrobeno z nízkouhlíkové oceli a legující prvky se přidávají do obalu elektrody. Vzniklý svarový kov má požadované chemické složení. Elektrody dělíme podle použití:

a) pro svařování nelegovaných ocelí;
b) pro svařování nízkolegovaných ocelí;
c) pro svařování vysokolegovaných ocelí;
d) pro svařování neželezných kovů;
e) pro svařování litin;
f) pro speciální účely.

Elektrody mají odstupňované průřezy jádra: ∅ 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6,3 a 8 mm. Materiál elektrod by se měl vyznačovat nízkým množstvím nečistot. Obal elektrody je různého složení z látek keramických, organických nebo i kovových. Na obr. 2-36 je uvedeno schéma elektrody a na obr. 2-37 jsou uvedeny různé typy elektrod.



Obr. 2-36 Schéma obalené elektrody



Obr. 2-37 Různé typy svařovacích elektrod

Typy obalů elektrod pro ruční svařování kovů

a) stabilizační obal - obsahuje ionizační látky, které mají vliv na stabilní hoření oblouku při zapojení elektrody jak na (+), tak na (-) pól;
b) rutilový obal - je tvořen oxidem titaničitým (rutilem), který dává dobrou ovladatelnost elektrody při svařování v různých polohách. Používá se proud stejnosměrný, elektroda se připojuje na (-) pól a také proud střídavý;
c) kyselý obal - obsahuje železné, manganové rudy, křemičitany, živce, rutil. Struska kyselých elektrod špatně váže škodlivé prvky P, S (též kyselého charakteru), proto lze svařovat oceli s nižším obsahem P a S. Svarový kov je teplý a svarová lázeň se vytváří v drobných kapičkách;
d) bazický obal je nejpoužívanější. Je tvořen vápencem. Svarový kov je méně teplý a přechází do svarové lázně ve velkých kapkách. Elektrody se připojují na (+) pól stejnosměrného proudu. Svařování vyžaduje krátký oblouk;
e) organický obal - chrání svarovou lázeň proti vzduchu. Obsahuje organické látky. Vytváří se hustě tekutý svarový kov a hodí se ke svařování materiálů s větší mezerou;
f) obal ze solí halových prvků - používá se ke svařování hliníku, k rozpouštění lehce vznikajícího Al_2O_3 s vysokou teplotu tání (2000°C). Elektroda se připojuje na (+) pól;
g) zvláštní obal např. grafitový pro svařování litiny s lupínkovým grafitem. Nebo elektrody z niklu, slitin železa a niklu, atd. Elektrody se připojují na (+) pól stejnosměrného proudu.

Funkce obalu při svařování
A) obsahuje látky plynotvorné - vytvářejí clonu ochranných plynů, která chrání tekutý kov před přístupem vzduchu;

B) obsahuje látky stabilizující hoření oblouku - obsahují ionizační látky (soli draslíku, sodíku, lithia, atd.). Tyto látky usnadňují zapalování a klidné hoření oblouku;
C) obsahuje struskotvorné látky a látky ovlivňují metalurgické reakce v tavné lázni (odstranění škodlivin). Struska chrání taveninu před vlivem atmosféry a *rychlým ochlazováním;*
D) obsahuje legující prvky - ty upravují chemické složení svarového kovu na požadované hodnoty.

Označování elektrod
Dnes se elektrody pro ruční svařování elektrickým obloukem označují dle ČSN EN ISO 2560. Na světovém trhu existují dva rozdílné přístupy na klasifikaci dané elektrody. *Přístup A* je založený na původní evropské normě EN 499. *Přístup B* spočívá především na normách, jež se používají v tichomořské oblasti. Tato norma uznává oba přístupy a umožňuje použití jednoho nebo obou přístupů. Výtah z normy ČSN EN ISO 2560, který je Vám nyní předkládán, zahrnuje přístup A, používající se v našich podmínkách. Klasifikace elektrod podle přístupu B je dostupná v příslušném znění normy (označení je pak ČSN EN ISO 2560-B), [28]. V tabulce 2.9 je uvedeno označení a význam symbolů při označení obalené elektrody pro ruční obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí.

Volba základních parametrů svařování - parametry, které ovlivňují režim svařování jsou:
a) proudové zatížení elektrody;
b) délka oblouku;
c) poloha při svařování;
d) obal elektrody;
e) rychlost pohybu elektrody.

Tepelný efekt elektrického oblouku pro svařování je dán proudovou zátěží a napětím (závislost mezi napětím a proudem). Napětí oblouku se mění podle jeho charakteristiky a v části oblouku, ve které se nesvařuje, je napětí dané ionizací plynů, která závisí na komponentech obalu elektrody a délce oblouku.

Proudová zátěž elektrody [$A.mm^{-1}$] - je závislá na ∅ elektrody, druhu a tloušťce obalu na druhu svaru a poloze svařování. Čím je větší svařovací proud, tím větší je závar, rychlost odtavování přídavného materiálu a tím i rychlost svařování.

Malý svařovací proud snižuje stabilitu hoření oblouku, zmenšuje hloubku závaru a zmenšuje produktivitu svařování.

Naopak u příliš vysokých proudů dochází např. k velkému rozstřiku a značnému ohřevu jádra i obalu elektrody. To vede ke ztrátě plynů, které vytvářejí ochrannou clonu a propalu prvků z jádra elektrody.

Při svařování uhlíkových ocelí se v praxi obyčejně volí proud 40 [A] na mm ∅ jádra elektrody a tato hodnota se upravuje podle podmínek svařování. Při svařování se používá stejnosměrný i střídavý proud od 50 do 450 [A] a napětí 15 až 40 [V]. Obal elektrody příznivě ovlivňuje svařovací proces i volbu parametrů.

Tabulka 2.9 Označení a význam symbolů při označení obalené elektrody pro ruční obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí, ESAB [28]

Povinná část | Doplňková část

E 46 3 1Ni B 5 4 H5

E - elektroda pro ruční obloukové svařování

Označení pevnostních vlastností a tažnosti svarového kovu

Označení	Min. mez kluzu [1] MPa	Pevnost v tahu MPa	Min. tažnost [2] %
35	355	440 až 570	22
38	380	470 až 600	20
42	420	500 až 640	20
46	460	530 až 680	20
50	500	560 až 720	18

[1] Platí dolní mez kluzu (R_{eL}). Při nevýrazné mezi kluzu se musí použít smluvní mez kluzu 0,2% ($R_{p0,2}$).

[2] Měřená délka je pětinásobkem průměru zkušební tyče.

Označení nárazové práce svarového kovu

Označení	Teplota pro nárazovou práci min. 47 J °C
Z	nepožaduje se
A	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

Označení chemického složení svarového kovu

Značení	Chemické složení v hmotn. % [a) b) c)]		
	Mn	Mo	Ni
bez označení	2,0	-	-
Mo	1,4	0,3 až 0,6	-
MnMo	1,4 až 2,0	0,3 až 0,6	-
1Ni	1,4	-	0,6 až 1,2
2Ni	1,4	-	1,8 až 2,6
3Ni	1,4	-	2,6 až 3,8
Mn1Ni	1,4 až 2,0	-	0,6 až 1,2
1NiMo	1,4	0,3 až 0,6	0,6 až 1,2
Z	Jiné dohodnuté chemické složení		

[a] Mo < 0,2; Ni < 0,3; Cr < 0,2; V < 0,05; Nb < 0,05; Cu < 0,3; pokud není stanoveno jinak.

[b] Jednotlivé hodnoty v tabulce jsou hodnoty maximální.

[c] Výsledky se zaokrouhlují na stejný počet platných míst, jaký je uveden v tabulce, podle ISO 31-0: 1992, přílohy B, pravidla A.

Polohy svařování, pro něž jsou elektrody zkoušeny (EN 15792-3)

Označení	Polohy svařování
1	všechny polohy (PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG)
2	všechny polohy mimo polohy svislé shora dolů (PA, PB, PC, PD, PE, PF)
3	tupý svar v poloze vodorovné shora, koutový svar v poloze v úžlabí a vodorovné shora (PA, PB)
4	tupý svar v poloze vodorovné shora a koutový svar do úžlabí (PA)
5	poloha svislá shora dolů a polohy dle označení 3 (PA, PB, PG)

Označení obsahu vodíku ve svarovém kovu (ISO 3690)

Označení	Max. obsah vodíku ml/100g čistého svarového kovu
H5	5
H10	10
H15	15

Označení výtěžnosti a druhu proudu

Označení	Výtěžnost %	Druh proudu
1	<= 105	střídavý a stejnosměrný proud
2	<= 105	stejnosměrný proud
3	> 105 <= 125	střídavý a stejnosměrný proud
4	> 105 <= 125	stejnosměrný proud
5	> 125 <= 160	střídavý a stejnosměrný proud
6	> 125 <= 160	stejnosměrný proud
7	> 160	střídavý a stejnosměrný proud
8	> 160	stejnosměrný proud

Označení druhu obalu

Označení	Druh obalu
A	kyselý
C	celulózový
R	rutilový
RR	rutilový (tlustý)
RC	rutil - celulózový
RA	rutil - kyselý
RB	rutil - bazický
B	bazický

Optimální délka oblouku - je vzdálenost konce elektrody od svařovaného materiálu. Při použití kyselého obalu optimální délka oblouku se rovná průměru jádra, při elektrodách s bazickým obalem je oblouk o něco kratší. Při delším oblouku se roztavený kov dostává do styku s okolní atmosférou a znehodnocuje se.

Poloha při svařování má vliv na volbu svařovacího proudu a kvalitu svarového spoje. Svarový spoj se znehodnocuje nejvíce nesprávným sklonem elektrody a nesprávným kladením housenek.

Rychlost pohybu elektrody (postupová rychlost) - velmi ovlivňuje kvalitu svařovacího spoje. Při velké rychlosti svařování vzniká tenká pórovitá housenka s velkým počtem vměstků (cizích částic). Při velmi pomalé rychlosti svařování nastává větší tepelné ovlivnění svařovaného materiálu a velké prohřátí roztaveného kovu.

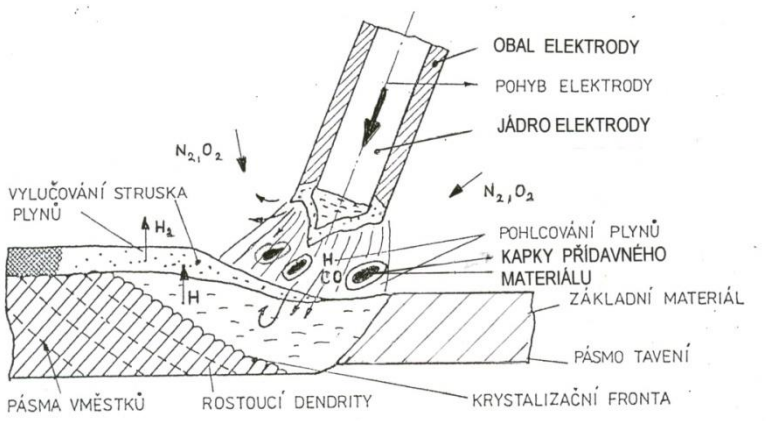
Technologie ručního svařování obalenou elektrodou se provádí s pomůckami a vybavením k tomu určených. Svařovací proud, který se odebírá ze svařovacího zdroje (svářečky) o vhodné statické charakteristice a citlivé regulace, se vede dvěma přívodními kabely. Jeden kabel je spojen s držákem elektrod, druhý je připojen k zemnicí svorce, která se upíná na svařovaný materiál nebo svařovací stůl, na kterém je materiál umístěn. Materiál, který chceme svařovat, musí být před svařováním patřičně očištěn a musí mít upravené plochy, na kterých bude svar proveden. Elektroda se upne do držáku elektrody, zapne se svářečka a škrtnutím elektrody o základní materiál vznikne zkrat a jeho přerušením se zapálí elektrický oblouk. Teplota oblouku odtavuje elektrodu a natavuje základní (svařovaný) materiál, vytváří se tavná lázeň pokrytá struskou (sklovitou hmotou).

Svarový kov musí mít předepsané chemické složení, vysokou čistotu a vyhovující mechanické vlastnosti, zejména pevnost a vrubovou houževnatost. Dnes existují katalogy elektrod, dle kterých lze vhodně zvolit potřebnou elektrodu s vyhovujícími vlastnostmi.

Postupy kladení svarových housenek se liší podle délky a velikosti konstrukce, polohy a funkce svaru. Pokud se provádí svarových housenek více nad sebou, potom je nutno věnovat pozornost a provedení první tzv. kořenové housence.

Na obr. 2-37 je schéma metalurgických vlivů na tvorbu sváru při svařování obalenou elektrodou.

Častou součástí úspěšného svařování je předehřev svařovaného materiálu. Předehřev, který je dán technologickým předpisem, je běžný při svařování litiny s lupínkovým grafitem (LLG) na teplotu 550 až 600°C. Při svařování za studena se pro LLG nejčastěji používají elektrody z niklu, železa, atd. Svarové spoje zhotovené obalenou elektrodou mohou mít různou geometrii, nejčastěji se volí tupé svary a označují se podle úpravy úkosů svarových ploch písmeny, které tomu úkosu odpovídají (V, I, X, U, K, atd.). Velmi časté jsou i svary koutové, kde je příprava svarových ploch jednoduchá.



Obr. 2-37 Metalurgie tvorby svaru při svařování obalenou elektrodou

Velikosti svarů jsou dány pevnostním výpočtem, který při volbě svařence (svařovaného dílu) provádí konstruktér. Na základě velikosti svařovaného materiálu se volí technologické parametry a další potřebné pomůcky.

Velkou výhodou tohoto svařování je bohatý výběr přídavných materiálů, možnost použití této metody jak v dílně, tak na montáži a velká univerzálnost co do složení a tloušťky svařovaných materiálů, tvaru a pozice svařování (nad hlavou, na svislé stěně, atd.).

Nedostatkem je hlavně nízká produktivita práce a velká závislost kvality svaru na schopnostech svářeče. To bylo podnětem k vývoji dalších obloukových metod, které tyto nedostatky více, či méně odstraňují. Tyto metody jsou založeny na mechanizovaných nebo automatických způsobech svařování jako je např. svařování pod tavidlem nebo v ochranných atmosférách a do značné míry nahrazují svařování obalenou elektrodou. Svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře argonu je zvláště vhodné pro svařování legovaných ocelí některých speciálních slitin.

4.2.4.4 Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách

Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách představují technologie, které jsou ve strojírenství neustále více používány. Předností je snadná *automatizace svařovacího procesu* a vhodnost využití pro robotizovaná pracoviště.

Při tomto způsobu svařování hoří elektrický oblouk mezi elektrodou (tavící se nebo netavící se) a základním materiálem a kolem elektrody se do prostoru svarové lázně přivádí ochranná atmosféra (inertního nebo aktivního plynu). Tím je svarová lázeň a část vytvářené svarové housenky chráněna před nepříznivými účinky okolní atmosféry (vzduchu). Mezi tyto metody se řadí:

A) ***metoda MAG*** (Metal Active Gas), označovaná 135 – obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu;
B) ***metoda MIG*** (Metal Inert Gas), označovaná 131, obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu;
C) ***metoda WIG***, svařování netavící se wolframovou elektrodou, resp. v anglickém pojetí TIG (Tungsten Inert Gas), označovaná 141- obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu.

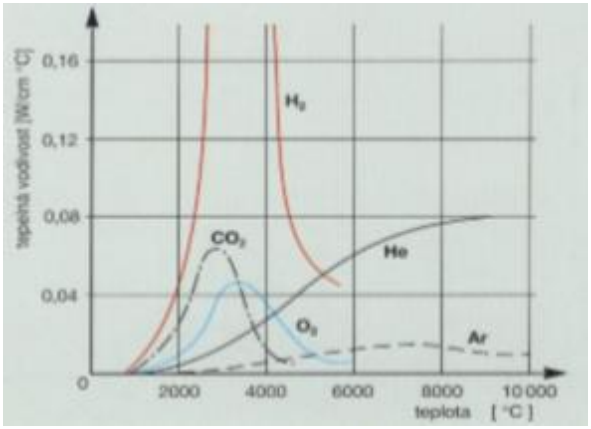
Vedle těchto základních metod jsou používané zvláštní metody obloukového svařování v ochranných atmosférách:

D) metoda FCAW (Flux Cored Arc Welding), označovaná 136 – obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu;
E) metoda FCAW (Flux Cored Arc Welding), označovaná 137 – obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu;

Při svařování je také důležitý přenos tepla plynem ochranné atmosféry. Ten je závislý na tepelné vodivosti příslušného plynu. Na obr. 2-38a) jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti různých plynů používaných jako ochranné atmosféry (mino O_2) při svařování kovů.

Tak např. v ochranné atmosféře čistého oxidu uhličitého je přenos tepla velmi dobrý a přispívá k dosažení hlubokého a širokého profilu oválné svarové

housenky. Při vyšších svařovacích parametrech hrozí nebezpečí vzniku vrubů a při velkých ochlazovacích rychlostech mohou ve středu svaru vznikat trhliny.



Obr. 2-38 a) Hodnoty tepelné vodivosti vybraných plynů v závislosti na teplotě [50]

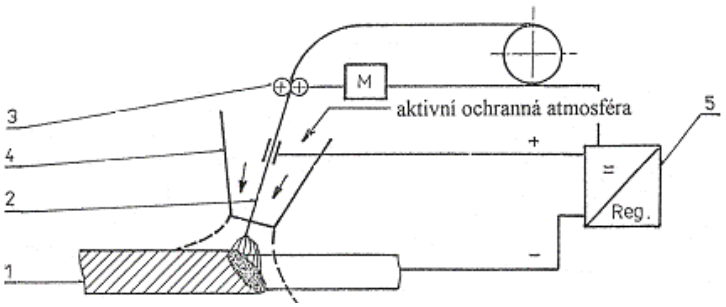
A) Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu - metoda MAG

Způsob svařování MAG (Metal-Active-Gas) se používá pro svařování ocelí je to jedna z nejpoužívanějších technologií. Při svařování metodou MAG tvoří jednu elektrodu svařovaný materiál a druhou elektrodu přídavný materiál (nejčastěji stejného nebo podobného chemického složení jako materiál základní, tj. svařovaný). Přídavný materiál, resp. jedna elektroda je ve formě drátu (obvykle ∅1 až 2,5 mm), který je navinut na cívce a podávaný podávacím mechanismem svařovacího zařízení do hubice svařovacího hořáku, viz schéma na obr. 2-38 b). Na obr. 2-38 c) je uveden hořák a svařování metodou MAG.

Elektrický oblouk hoří mezi přídavným a základním materiálem, v tom je shoda s metodou MIG. Obě metody se liší především druhem použití ochranné atmosféry, konstrukčními úpravami svařovacího zařízení a v drobných odchylkách regulačního systému. Při svařování metodou MAG se používají *aktivní ochranné atmosféry*, tj. atmosféry, které do jisté míry reagují se svarovou lázní a kovem přecházejícím odtavením elektrody do svarové lázně. Při metodě MAG se používají k vytvoření ochranné atmosféry např. směsné plyny ($Ar + 1\%O_2$, $Ar + CO_2$), které se využívají při svařování všech druhů ocelí včetně vysokolegovaných (korozivzdorných a žáruvzdorných). Přídavek kyslíku do argonu snižuje viskozitu svarové lázně (zvyšuje tekutost) a zlepšuje přechod svaru do základního materiálu (snižuje převýšení svarové housenky). Směsné plyny mohou být i vícesložkové, např. $Ar + CO_2 + O_2$, atd. V tabulce 2.10 je uveden přehled směsí aktivních plynů pro svařování metodou MAG.

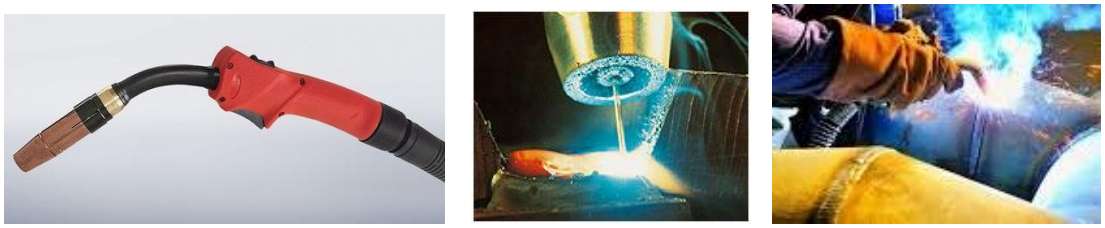
Tabulka 2.10 Přehled plynů použitelných při metodě MAG

Číslo	Složení aktivního plynu	Použití
1	Ar + 1 %O_2	pro všechny typy ocelí
2	Ar + CO_2	
3	CO_2	
4	Ar + CO_2 + O_2	
5	82% Ar + 18 % CO_2	nízkolegované oceli
6	96% Ar + 4 % CO_2	korozivzdorné oceli



1 - základní materiál, 2 - přídavný materiál, 3 - podávací kladičky, 4 - svařovací hořák, 5 - zdroj svařovacího proudu a ovládací a regulační prvky

Obr. 2-38 b) Schéma svařování metodou MAG



hořák – vlevo; detail svařování – uprostřed; svařování MAG - vpravo

Obr. 2-38c) Hořák a svařování metodou MAG

Zde mohou být dva základní typy přenosu svarového kovu do lázně (zkratový a bezzkratový).

Přenos zkratový (je např. typický pro svařování v atmosféře CO_2). Konec narůstající kapky se dotkne svarové lázně dříve, jak se kapka oddělí od elektrody a nastává zkrat. Po jejím odtrhnutí, resp. oddělení se proces opakuje.

Přenos bezzkratový je typický pro svařování ve směsích plynů (např. Ar + CO_2). Kapky svarového kovu jsou velmi malé (nedotknou se), čímž nedochází ke zkratu.

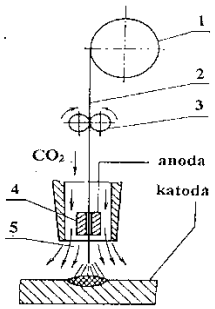
Metodu MAG s použitím aktivního plynu CO_2 používáme především v případech, kdy požadujeme malé množství vneseného tepla do svarového kovu (např. slabé plechy - oprava karoserií automobilů v důsledku vzniku malých deformací a lepší odolnosti proti korozi).

Pokud mají atmosféry oxidační účinek, musí se oxidační schopnost atmosféry potlačit přídavkem dezoxidačních prvků (prvků rušících oxidaci) do

přídavného materiálu. Svarové spoje potom obsahují oxidy těchto prvků (a říkáme, že vykazují vyšší obsah nekovových vměstků).

Pro svařování se používají zdroje stejnosměrného elektrického proudu s plochou statickou charakteristikou a obrácenou polaritou (elektroda je připojena na (+) pól).

Specifickým případem MAG je svařování elektrickým obloukem odtavující se elektrodou v ochranné aktivní atmosféře CO_2 (oxid uhličitý). Schéma je na obr. 2-39.



1- cívka s přídavným materiálem (svařovací drát); 2 - svařovací drát; 3 - podávací zařízení (kladky); 4 - napájecí průvlak; 5 - ochranná clona plynu

Obr. 2-39 Schéma principu svařování v CO_2

Tato metoda dnes nachází i velké uplatnění v automobilovém průmyslu i při opravách karoserií automobilů. Princip svařování v ochranné atmosféře je založen na tom, že holý svarový drát svinutý na cívce, je veden přes podávací kladky do napájecího průvlaku. Napájecí průvlak je uvnitř ochranné hubice. Přes průvlak přechází drát do tavné lázně.

Plyn CO_2 chrání oblouk a tavnou lázeň před přístupem vzduchu. Oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Napájecí průvlak, tj. kudy přechází svařovací proud do elektrody, je připojen na kladný pól zdroje stejnosměrného svařovacího proudu a svařovaný (základní) materiál je připojen na jeho záporný pól.

Přechod přídavného kovu z odtavující se elektrody do tavné lázně je charakterizován vytvářením jednotlivých kapek, které musí přejít z elektrody přes mezeru do tavné lázně.

Při svařování v CO_2 rozlišujeme tzv. *bezzkratový* a *zkratový* proces. V podstatě jde o to, jakou velikost má kapka vůči vzdálenosti konce drátu od tavné lázně. U bezzkratového procesu je kapka menší než je vzdálenost konce elektrody od materiálu. U zkratového procesu kapka tvoří vodivý můstek mezi elektrodou a tavnou lázní a tím vzniká zkrat svařovacího obvodu.

Zkratový proces se využívá při *svařování tenkých plechů* i při svařování materiálů větších tlouštěk u montážních prací, kdy se svařuje menšími proudy a nižším napětím. Tento proces se dnes používá v autodílnách a je vhodný pro opravárenství karoserií automobilů.

Plyn CO_2 se dodává v tlakových nádobách (ocelových tlakových lahvích) s vodním obsahem 20l v tekutém stavu. Odpařením vznikne cca 10 m^3 plynného CO_2, který musí mít minimální čistotu 99,7% a rosný bod - 40°C. Podle ČSN je láhev s CO_2 barevně označená černou barvou a hrdlový kroužek je natřen bíle nebo má nové barevné značení ve smyslu EN 1089-3. V láhvi je CO_2 v tekutém a plynném stavu pod tlakem cca 5,5 MPa. Tekutý CO_2 zaujímá

cca dvě třetiny lahve, nad ním je CO_2 v plynném stavu. Při odvádění plynného množství CO_2 z láhve je jeho úbytek doplňován odpařováním z tekutého podílu CO_2 lahve. Tím neklesá tlak CO_2 v lahvi. Je-li množství CO_2 v lahvi vyčerpáno, dochází k prudkému poklesu tlaku na hodnotu cca 1,2 MPa a láhev je nutno vyměnit.

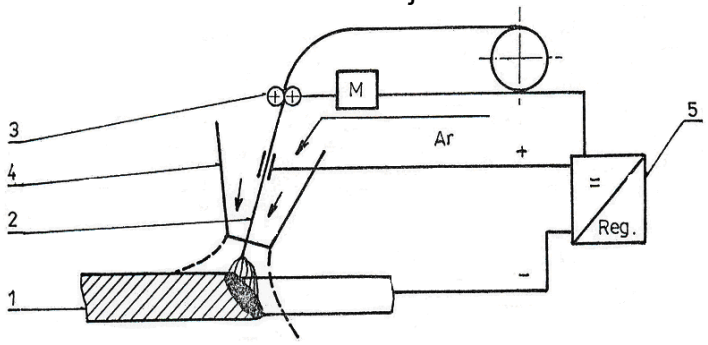
Nejvíce se používají elektrody - holé dráty ∅ 0,8; ∅1,0; ∅ 1,2 mm. V našich provozech se nejvíce používají svařovací poloautomaty, svařuje se převážně zkratovým procesem, drátem ∅1,2 mm, svařovacím proudem 300A.

Přídavné materiály

Dnes na našem trhu lze koupit i malá svařovací zařízení, která slouží k ručnímu svařování metodou CO_2. Uplatňují se např. při dílenských opravách karoserií automobilů.

B) Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu - metoda MIG

Při svařování metodou MIG (Metal-Inert-Gas) tvoří elektrodu přídavný materiál (stejného nebo podobného chemického složení jako materiál základní). Elektroda je ve formě drátu (obvykle ∅1 až 2,5 mm), který je navinut na cívce a podávaný podávacím mechanismem do svařovací hubice. Elektrický oblouk opět hoří mezi přídavným a základním materiálem. Ochrannou atmosféru zde opět nejčastěji plní argon, který je vháněn též do svařovací hubice kolem elektrody. Schéma svařování metodou MIG je na obr. 2-40.



1 - základní materiál; 2 - přídavný materiál; 3 - podávací kladky; 4 - svařovací hořák (pistole) 5 - zdroj svařovacího proudu, regulační a ovládací prvky

Obr. 2-40 a) Schéma svařování metodou MIG



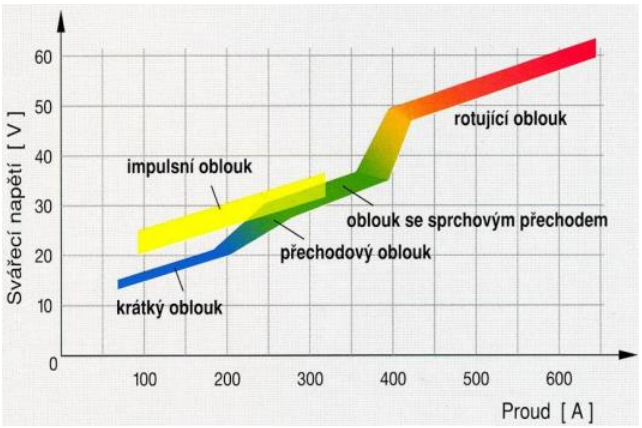
Obr. 2-40 b) Svařování metodou MIG [34]

Z obr. 2-40 b) je zřejmé, že svářeč drží svařovací hořák, která se používá pro svařování metodami MIG a MAG. V tomto případě se jedná o svařování metodou MIG.

Svařování metodou MIG je produktivnější než metodou WIG (TIG). Při použití vyšších svařovacích parametrů se však musí svařovat v nucených polohách. Svařují se především neželezné kovy, dále legované oceli. Při svařování tenkých plechů se doporučuje utváření kořene housenky pomocí podložek. Vysoce aktivní kovy (titan, zirkonium, tantal) se nejčastěji svařují v komorách s ochrannou atmosférou.

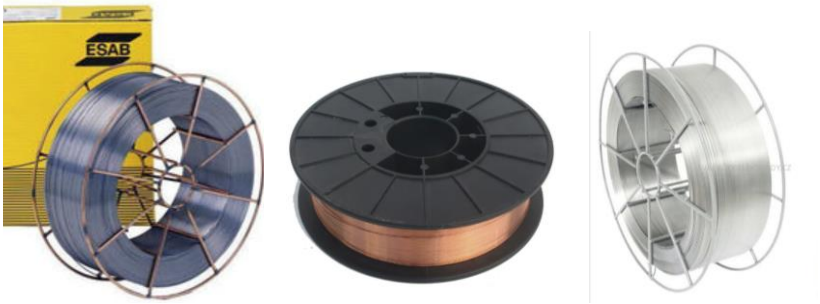
Rychlost svařování se obvykle pohybuje v rozmezí (6 až 90) [m.hod^{-1}]; svařovací proud (150 až 500) [A]; napětí na oblouku (20 až 30) [V]. Zdroj elektrického proudu má plochou charakteristiku. Zařízení má samoregulaci sloužící k zachování stejné délky oblouku. Zdroj používá jen stejnosměrný zdroj proudu a obrácené (nepřímé) polarity (to znamená, že elektroda je připojena na (+) pól).

Na obr. 2- 41a) je souvislost mezi svařovacím napětím a proudem za vzniku různých typů oblouků pro metodu MAG a MIG.



Obr. 2-41a) Souvislost mezi svařovacím napětím a proudem za vzniku různých typů oblouků

Na obr. 2-41b) jsou uvedeny přídavné materiály pro svařování metodou MAG a MIG.

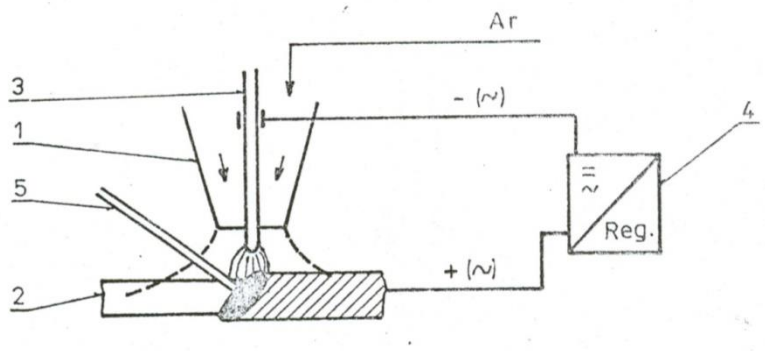


drát pro svařování oceli /vlevo), drát pro svařování a pájení slitin mědi (uprostřed), drát pro svařování nerezových ocelí 18Cr/8Ni (vpravo)

Obr. 2-41b) Ukázky cívek s dráty pro svařování MAG a MIG

C) Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu - metoda WIG (TIG)

Při této metodě svařování se používá elektroda, která je ve formě tyčinky z wolframu nebo z wolframu a oxidů thoria. V anglosaské literatuře se tato metoda označuje TIG, (neboť wolfram se anglicky řekne tungsten). Průměr elektrody se pohybuje obvykle v rozmezí 0,5 až 6,5 mm a musí odpovídat velikosti svařovacího proudu a polaritě. Jako ochranný plyn se zde používá argon, méně často helium. V našich podmínkách se výhradně používá argon nebo směs Ar + He. Označení metody je wolfram-inert-gas (Tungsten-Inert-Sas). Schéma svařování metodou WIG je na obr. 2-42 a). Svařovat lze i bez použití přídavného materiálu.

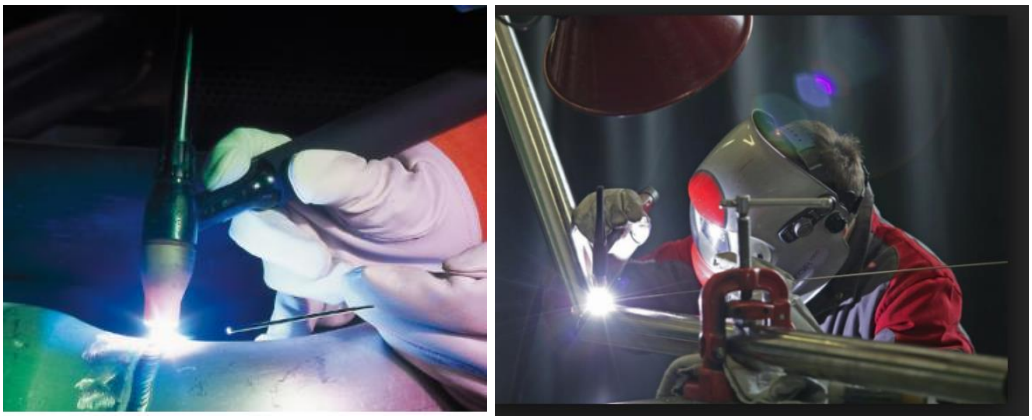


1- svařovací hořák; 2 - základní materiál; 3 - wolframová elektroda; 4 - zdroj svařovacího proudu a regulační a ovládací prvky; 5 - přídavný materiál (stejného nebo podobného chemického složení jako základní materiál)

Obr. 2-42a) Schéma svařování metodou WIG

Elektrický oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Wolframová elektroda se prakticky neodtavuje. Kolem elektrody proudí mírným přetlakem argon, který zabraňuje v přístupu vzduchu do lázně svarového kovu. Pro svařování větších průřezů se musí použít přídavný drát, který se odtavuje v elektrickém oblouku a vzniklá tavenina přispívá ke zvýšení množství tavné lázně.

Svařování metodou WIG se používá především pro svařování legovaných ocelí, slitin hliníku, hořčíku (jen výjimečně čistého hliníku a hořčíku). Tyto kovy díky svým těžkotavitelným vrstvám oxidům se za normálních okolností (tj. bez ochranné atmosféry) špatně svařují. Při svařování metodou WIG se využívá tzv. *čistícího účinku argonu*, ke kterému dochází při svařování stejnosměrným proudem obrácené polarity a při svařování střídavým proudem (vždy v půlperiodách, kdy je na elektrodě (+) pól). Na obr. 2-42b) je ukázka svařování metodou WIG. To je zřejmé již z hořáku, který má svislý nástavec pro netavící se wolframovou elektrodu. Na obr. 2-42c) jsou díly svařované metodou WIG.



Obr. 2-42b) Ukázka svařování metodou WIG/TIG [29], [35]



Obr. 2-42c) Konstrukční díly svařované metodou WIG/TIG [29]

Na rozrušování oxidické vrstvy se kromě těžkých iontů argonu se podílí i účinek nestabilní katodové skvrny. Vzhledem k tomu, že při obrácené polaritě připadá na základní materiál pouze 1/3 z celkového množství tepla, používá se pro svařování hliníku výhradně střídavý proud (vykazuje přijatelný závar a postačující čistící účinek). Je to proto, že hliník a jeho slitiny nají velkou tepelnou vodivost. V případech, kdy se nevyžaduje čistící účinek argonu svařuje se stejnosměrným proudem přímé polarity.

Metoda WIG je použitelná pro svařování téměř všech kovových materiálů. S ohledem na vysokou cenu argonu se používá kromě již uvedených kovů a slitin, při svařování legovaných ocelí, neželezných kovů a slitin a tam, kde se vyžaduje vysoká jakost svarů. Metodou WIG lze svařovat ve všech polohách. Svařovací proud je obvykle v rozmezí (10 až 600) [A], napětí na oblouku (10 až 30) [V], rychlost svařování (6 až 50) [$m.hod^{-1}$]. Zdroje svařovacího proudu mají strmou statickou charakteristiku. Svařují se především plechy, trubky, profily s malou tloušťkou stěny.

Na obr. 2-42d) je svařovací hořák pro metodu MAG/MIG a WIG (TIG).

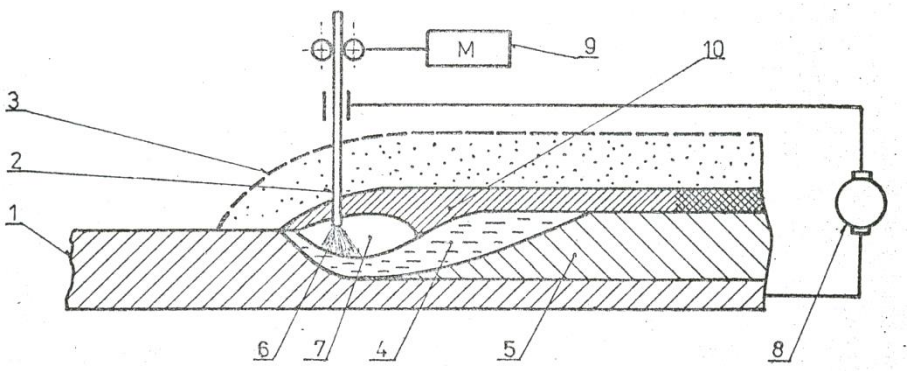


Obr. 2-42d) Ukázka svařovacích hořáků pro svařování metodou MAG/MIG (vlevo) a WIG/TIG (vpravo)

Jak je z obr. 2-42d) patrné, hořák pro svařování metodou WIG, s netavící se wolframovou elektrodou, má specifickou konstrukci. Proto při svařování můžeme lehce zjistit, zdali se jedná o svařování WIG. Naopak rozdíl mezi svařováním MAG a MIG lze určit na základě svařovaného materiálu ocel – MAG, hliník – MIG. Nebo na základě použitého ochranného plynu, směs plynů – MAG, argon – MIG.

2.4.3 Svařování pod tavidlem

Při svařování pod tavidlem hoří elektrický oblouk mezi odtavující se elektrodou (drát nebo pásek odvíjený ze svitku) a základním materiálem pod vrstvou tavidla. Přídavný materiál se odtavuje v uzavřeném prostoru naplněném parami a plyny vzniklými z tavidla. Struska a přetlak plynů chrání svarovou lázeň před účinky okolní atmosféry. Schéma metody svařování pod tavidlem je na obr. 2-43 a) a na obr. 2-43b).



1 - základní materiál; 2 - přídavný materiál; 3 - tavidlo; 4 - svarová lázeň; 5 - ztuhlý kov; 6 - elektrický oblouk; 7 - dutina par a plynů; 8 - zdroj svařovacího proudu; 9 - motor s podávacím ústrojím; 10 - struska

Obr. 2-43 a) Schéma svařování pod tavidlem

Pro svařování pod tavidlem musí být k dispozici speciální pojízdné zařízení „traktor“, které je na obr. 2-43 b).



Obr. 2-43 b) Pojízdná automatická zařízení pro svařování pod tavidlem, [31], [32]

Pojezdové zařízení obsahu cívku se svařovacím drátem, svařovací hořák a násypku pro transport a sypání tavidla na svařovaný materiál.



Obr. 2-43 c) Ukázky svařování pod tavidlem [30]

Svařování pod tavidlem je automatizovaný způsob svařování, který ve srovnání s ručním svařováním elektrickým obloukem má řadu výhod:

a) podstatně vyšší produktivitu práce (použití vyšších svařovacích proudů a postupné rychlosti svařování);
b) hlubší závar umožňuje svařovat i větší tloušťky plechu I svarem;

c) oblouk hoří pod vrstvou tavidla a neoslňuje svářeče (nelze však kontrolovat svarovou lázeň);
d) lepší mechanické vlastnosti svarového spoje (lepší ochrana svarové lázně, je déle tekutá - únik plynů a vyplouvání vměstků, atd.);
e) efektivní využití tepla oblouku.

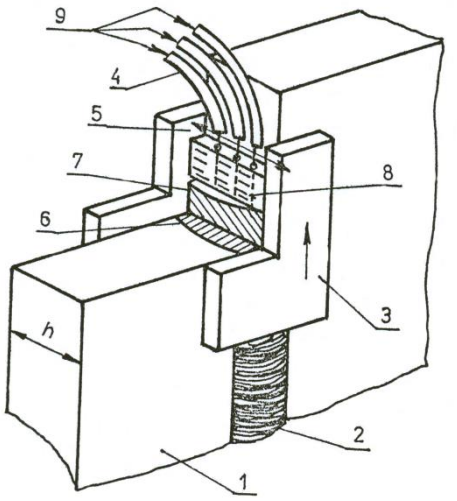
Svařování pod tavidlem se používá na dlouhé přímé svary a svary na rotačních nádobách, kdy se vyplatí náročnější příprava před svařováním a polohování svařence.

Svařují se všechny konstrukční oceli, vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a jejich slitiny. Obvykle svařované tloušťky jsou od 3 do 100 mm. Svařuje se v poloze vodorovné shora nebo do úžlabí. Svařovací proud se pohybuje obvykle v mezích od 200 do 2000 [A], napětí oblouku je (20 až 50) [V].

Při svařování pod tavidlem se používají tavená nebo aglomerovaná tavidla (musí se před svařováním přesušit). Musíme věnovat zvýšenou pozornost čistotě základního a přídavného materiálu, pečlivé přípravě před svařováním a výběru vhodného typu polohovadla. Zvyšují se i požadavky na metalurgickou jakost základních materiálů.

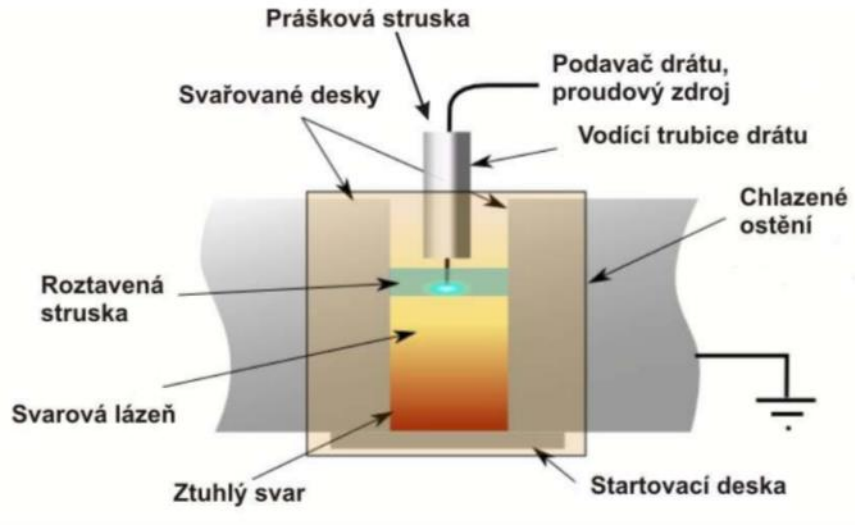
2.4.4 Svařování elektrostruskové

Elektrostruskové svařování se používá pro svařování velkých tlouštěk materiálu, obvykle od 50 mm a výše. Svařování se provádí ve svislé poloze ze zdola nahoru s nuceným formováním svaru z obou stran základního materiálu pomocí chlazených Cu příložek. Svařované součásti jsou rovnoběžné, s mezerou asi 30 mm. Svar se zhotovuje na jeden průchod svařovacího automatu bez přerušení. Princip této metody je zřejmý ze schémat, viz obr. 2-44a) a obr. 2-44 b).



1 – svařované desky (svařovaný základní materiál), 2 - svar, 3 - formovací podložka, 4 - hubice, 5 - příčný rozkyv hubice, 6 - ztuhlý svarový kov spoje, 7 - svarová lázeň, 8 - roztavená struska, 9 - přídavný materiál

Obr. 2-44 a) Schéma elektrostruskového svařování



Obr. 2-44 b) Schéma elektrostruskového svařování [33]

Zdrojem tepla k natavení spojovaných desek (základního materiálu) a přídavného materiálu je zde ***odporové teplo***, které vzniká průchodem elektrického proudu roztavenou a elektricky vodivou struskou.

Jinými slovy - roztavený kov potřebný pro vyplnění spáry mezi dvěma svařovanými deskami ***vzniká odporovým teplem*** (nikoliv teplem z elektrického oblouku, který tam vůbec nevzniká). Odporové teplo vzniká průchodem elektrického proudu z tavícího se drátu (přídavného materiálu) průchodem přes roztavenou strusku vykazující přiměřený elektrický odpor nutný pro vznik tepla.

Elektricky vodivá struska je ohřátá na teplotu vyšší než je teplota tání oceli, takže elektrody se v této lázni taví a kapky klesají do lázně svarového kovu. Svarový kov i roztavenou strusku udržují v místě svaru dvě měděné, vodou intenzivně chlazené příložky (formovací příložky). Zde v procesu vlastního svařování nehoří oblouk, ten hoří pouze v počáteční fázi svařování než dojde k roztavení tavidla a vytvoření struskové lázně. Svarová lázeň se vytváří mezi dnem a bočními hranami svařovaných součástí tavením základního a přídavného materiálu. Celé zařízení, příložky, elektrody i nádržka na tavidlo, postupují automaticky vzhůru po svařovaném materiálu.

Elektro struskové svařování probíhá pouze ve svislé poloze. Lze svařovat desky v rozmezí tlouštěk od 20 do 150 mm. Mezera mezi deskami svařovanými deskami bývá zpravidla cca 30 mm. Pro rovnoměrnější tavení může vodící trubice kmitat přes spáru. Při svařování větších tlouštěk desek se používá více podavačů drátu. Se zvyšováním hladiny tekutého kovu se posunuje trubice podavače drátu i boční příložky. Metoda vznikla v roce 1955 ve svářečském institutu v Kyjevě, avšak většího rozšíření metody nastalo po roce 1970.

Výhody elektrostruskového svařování - se docílí velmi kvalitní svar, nevznikají deformace svařence, malé riziky naplynění svaru vodíkem, resp.

nebezpečí malého množství vodíkových trhlin, rychlost svařování se pohybuje v rozmezí 1 m za hodinu.
Nevýhody elektrostruskového svařování - velká svarová lázeň způsobuje pomalé chladnutí svarového kovu, což vede k utváření hrubozrnné struktury svarového kovu. To je spojeno s nižšími mechanickými vlastnostmi spoje. Proto je nutno normalizačně žíhat (se získá jemnozrnnější strukjtura). Lze zvařovat jednoduché tvary.

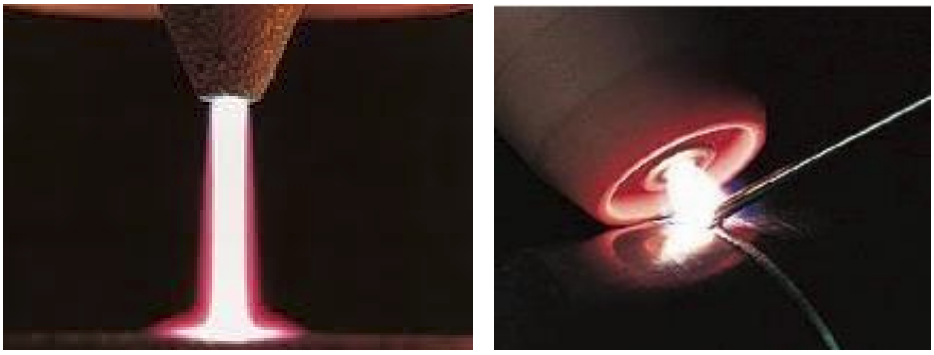
Použití elektrostruskového svařování - *v lodním průmyslu*, svařování trupů, *v hornictví*, pláště vysokých pecí, *stavební průmysl* , konstrukční prvky, strojírenství, vysokotlakové nádoby. Dále je vhodné pro svařování velmi tlustých plechů, rámů lisů a válcovacích stolic, při výrobě turbín, atd.

2.4.5 Svařování plazmou

Svařování plazmou (PAW - Plasma Arc Welding) je metoda svařování velmi podobná metodě WIG, avšak se liší jiným uspořádáním hořáku a fyzikálními zvláštnostmi procesu.

Plazma je ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů , který vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu, či roztržením jeho molekul (ionizací). Plazma je *čtvrté skupenství hmoty*.

Plazma je plyn ohřátý na vysokou teplotu (cca 20 000°C), tvořený ionty a elektrony, popř. atomy. Plazma má vysokou tepelnou energii a proto při svařování je zdrojem tepla. Z plazmové trysky hořáku vystupuje vysokou rychlostí úzký svazek plazmy, který je koncentrovaný zdrojem tepla s dynamickým účinkem. Svařování plazmou je velmi účinné.



Obr. 2-45a) Plasma a svařování plasmou

Pro svařování se používá plazmový hořák s wolframovou elektrodou, která je připojená na (-) pól (pro svařování hliníku na (+) pól) stejnosměrného svařovacího proudu. Elektrický oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem a prochází měděnou tryskou, která zaškrcuje oblouk, zvyšuje se tak hustota energie, teplota a vzniká plazma. Jako plazmový plyn se používá argon, okolo měděné trysky proudí směs plynů (např. Ar + H_2), které zužují proud plazmového plynu vycházející z měděné trysky.

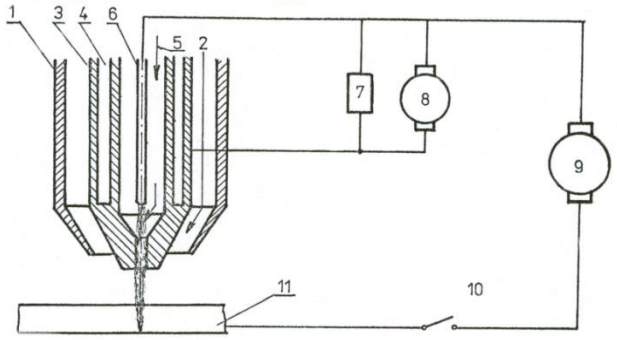
Z hlediska velikosti použitého svařovacího proudu lze technologie svařování rozdělit na svařování:
a) plazmou (proud větší než 15 A);

b) mikroplazmou (proud 0,1 až 15 A).

Svařování mikroplazmatem je díky vysoké koncentraci tepla vhodné pro spojování plechů z ocelí nelegovaných a vysokolegovaných od tloušťky 2,5 mm do 10 mm. Vhodné je pro svařování slitin niklu, titanu a mědi v leteckém a raketovém průmyslu. Rychlost svařování je proti metodě WIG až dvojnásobná.

Mikroplazmové svařování je vhodné pro svařování fólií tloušťky od 0,01 mm. Svařovací proudy se pohybují od několika desetin [A] až do 15 [A]. Mikroplazmové hořáky zajišťují ionizaci prostředí pro plazmový oblouk pomocným obloukem, který hoří mezi elektrodou a dýzou hořáku. Schéma zařízení pro mikroplazmové svařování je na obr. 2-45b).

Technologie svařování mikroplazmou je v současné době velmi používaná např. v elektrotechnickém průmyslu pro spojování fólií kondenzátorů, funkčních části kontaktů, atd.



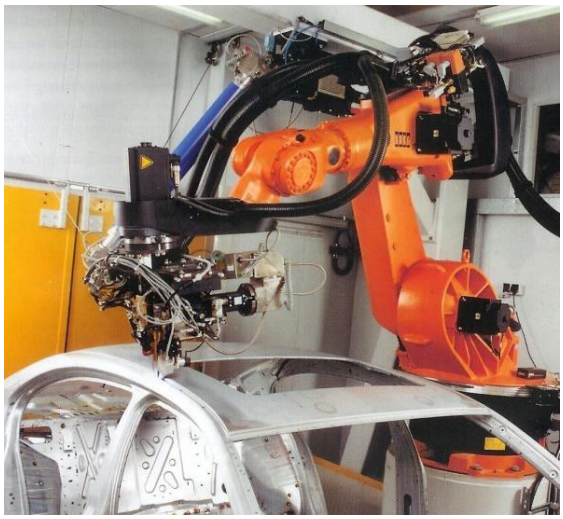
1 - keramická hubice pro přívod ochranného plynu, 2 - ochranný plyn, 3 - měděná tryska, 4 - vodní chlazení, 5 - plazmový plyn, 6 - wolframová elektroda, 7 - ionizátor, 8 - zdroj pro pomocný oblouk, 9 - zdroj pro svařovací oblouk, 10 - spínač, 11 - základní materiál

Obr. 2-45b) Schéma zařízení pro mikroplazmové svařování

2.4.6 Svařování laserem

Při svařování laserem se pro tavení základního materiálu používá tepelné energie soustředěný svazek fotonů.

Označení laser je z anglického Light Amplication by Stimulated Emission of Radiation. Lasery jsou kvantové zesilovače světla s využitím stimulované emise záření. Podle aktivního prostředí, ve kterém se zesílení svazku fotonů děje, se lasery dělí podle fáze ve které pracují. Rozlišujeme lasery *pevnofázové*, *kapalinové* a *plynné*. Podle druhu provozu rozdělujeme lasery na *kontinuální* a *pulsní*. Pro účely svařování se používají pevnofázové (pevnolátkové) lasery, vedení paprsku (svazku fotonů) je pomocí optického vlákna do místa svaru. Proto tyto lasery jsou výkonné a pro svařování vhodné. To je jejich velká přednost proti laserům CO_2 (plynné prostředí), která využívají pro intenzitu paprsku nastavených zrcadel a jejich účinnost pro svařování je nízká. Tyto lasery lze použít při svařování např. karoserií automobilů, viz obr. 2-46 a).



Obr. 2-46a) Svařování karoserií automobilů plynovým laserem (robotizované pracoviště) [51]

Svazek fotonů má vysokou hustotu výkonu v dopadové ploše na ozářený materiál, je bez elektrického náboje, není ovlivňován magnetickým polem a prochází průzračným prostředím, což umožňuje svařování v ochranné atmosféře.

Při svařování laserem paprsek fotonů dopadající na základní materiál ho natavuje, avšak dochází k minimálnímu tepelnému ovlivnění základního materiálu, svar má velmi malý rozměr a lze ho přesně situovat. Lze svařovat i materiály výrazně rozdílné tloušťky. Svařuje se buď bodově, tj. bod po bodu nebo plynule při kontinuálním provozu laseru.

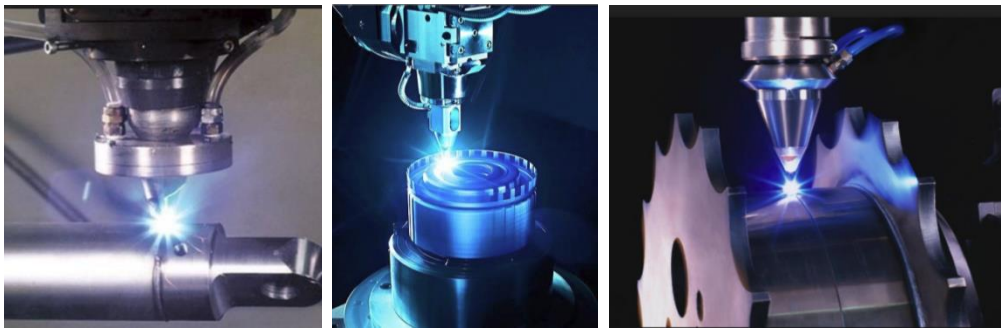
Na obr. 2-46b) je ukázka robotizovaného laserového pracoviště pro svařování kovů. Na obr. 2-46c) je ukázka svařování kovů laserem.

Pro svařování laserem v podstatě existují dva základní principy (mechanismy) svařování laserem:

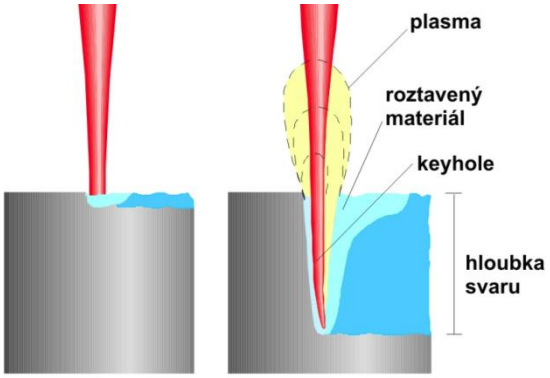
a) svařování vedením tepla,
b) svařování vyšší hodnotou plošné hustoty výkonu svařování.



Obr. 2-46b) Ukázka laserového svařovacího pracoviště [37]



Obr. 2-46c) Ukázky svařování laserem [38], [39] a [40]



princip svařování vedením tepla (vlevo),
princip svařování s vyšší hodnotou plošné hustoty svařovacího výkonu (vpravo)

Obr. 2-46d) Schéma dvou základních principů svařování laserem [36]

Při ***svařování vedením tepla,*** viz obr. 2-46d) - vlevo, se materiál taví absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým paprskem. Tento postup umožňuje svařování jen *do relativně malých hloubek průvaru*. Nicméně rychlost svařování může být vyšší a pro některé aplikace je porovnání hloubky průvaru a rychlost svařování vyhovující. Zvláště v těch případech, kde rychlost svařování je důležitější než úzký a hluboký průvar.

Při ***svařování s vyšší hodnotou plošné hustoty výkonu*** (cca $1 \cdot 10^6$ $W \cdot cm^{-2}$), kdy dochází k tvorbě par kovů nad samotným povrchem svařovaného materiálu. Společně pak spolu s působením vysoké plošné energie fokusovaného laserového paprsku se vytváří plasma a začíná docházet k ***hlubokému provařování,*** viz obr. 2-46d), vpravo. Laserový paprsek vytvoří kapiláru. Tlak plynů vystupujících z kapiláry pak brání jejímu uzavření. Plasma nad povrchem materiálu pak zpětně ovlivňuje tvar kapiláry. Tímto procesem může laserový paprsek pronikat hluboko do materiálu a vytváří ***tzv. keyhole,*** (česky klíčová dírka, není výraz úplně přesný, proto používáme výraz *keyhole)*. Tím vzniká ***úzký a hluboký svár***.

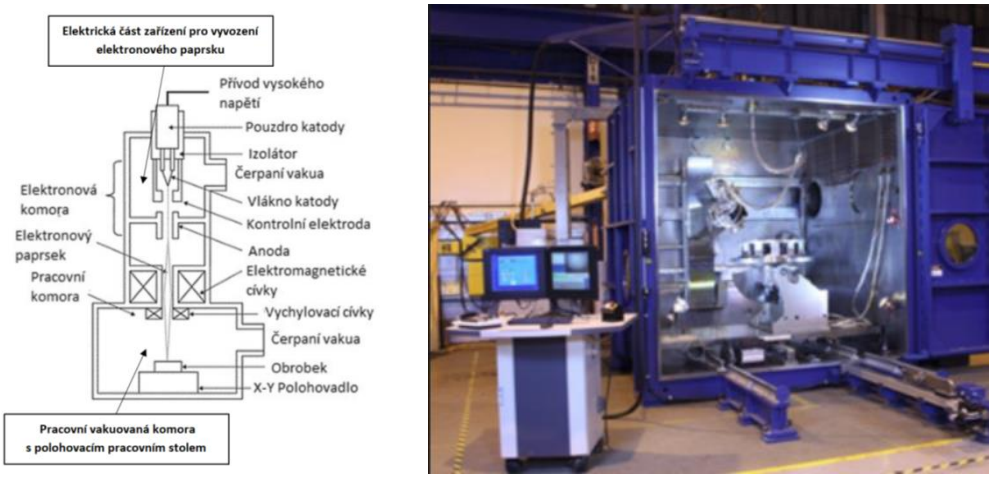
Hlavní předností laserového svařování je kvalita sváru, vyšší hloubka průvaru a podstatně nižší tepelně ovlivněná oblast materiálu (HAZ - Heat Affected Zone), vysoká produktivita, snadnější možnost automatizace, v neposlední řadě pak povrchový vzhled a svařování bez přídavného materiálu.

Ve ŠKODA – Auto se používá laser k pájení mosazí střech automobilů Škoda Octavia.

2.4.7 Svařování elektronovým paprskem

Při svařování elektronovým paprskem se pro ohřev a tavení základního materiálu využívá energie úzkého svazku elektronů emitovaných wolframovou elektrodou - katodou ohřátou asi na 2300°C. Soustředění a urychlení elektronů se děje elektrickým polem (urychlovací napětí je až 200 [kW]). Dopadem elektronů na svařovaný materiál se kinetická energie elektronů mění v tepelnou.

Na obr. 2-47 je schéma zařízení pro svařování elektronovým paprskem.



Obr. 2-47 Schéma a zařízení pro svařování elektronovým paprskem

Zařízení se skládá ze dvou částí, ***první část*** zabezpečuje vznik elektronového paprsku. Je tvořena systém elektrod, elektronovým dělem elektromagnetickými čočkami. ***Druhá část*** je v podstatě ***pracovní komora***, která slouží k realizaci procesu svařování. Uvnitř pracovní komory je vakuum, které zaručuje lepší kvalitu svaru. Protože elektronová paprsek není ovlivňován okolní atmostérou - vzduchem.

V komoře je polohovací pracovní stůl, na který se umisťuje svařovaný materiál. a uchycen obrobek pro následné svařování. Tento stůl umožňuje nejrůznější polohy. Řízení polohy stolu i svařovacího procesu je pomocí počítače, samozřejmě uloženého mimo pracovní komoru.

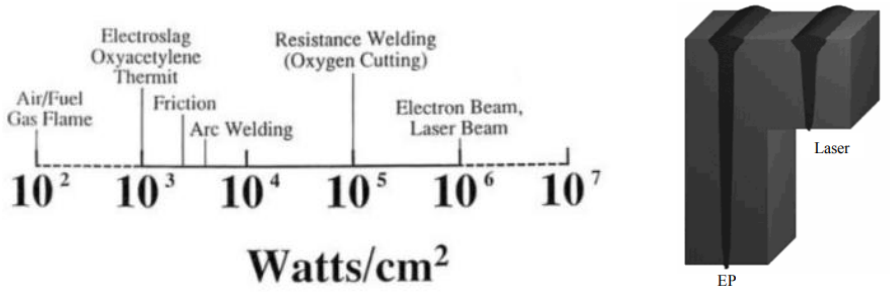
Svařování elektronovým paprskem má řadu specifických výhod:

a) tavení probíhá přednostně ve směru dopadu elektronů a lze dosáhnout hlubokého průvaru. Poměr šířky k hloubce natavené oblasti může být až 1:60;
b) teplem ovlivněné oblasti jsou malé, což umožňuje svařovat slitiny i ve vytvrzeném stavu;

c) velký teplotní gradient a malé množství nataveného materiálu umožňuje spolu svařovat i kovy s rozdílnými vlastnostmi;
d) vysoká rychlost svařování;
e) svařování probíhá ve vakuu a dochází ke snižování obsahu plynů v natavené oblasti (mohou vznikat pórovité svary);
f) lze svařovat vysoce reaktivní kovy jako např. titan, wolfram, zirkon, atd.

V současné době se začíná metoda svařování svazkem elektronů používat i při svařování běžných legovaných ocelí v automobilovém a leteckém průmyslu i při výrobě turbin.

Na obr. 2-48 jsou uvedeny parametry charakterizující různé druhy svařování.



Air/Fuel - vzduch/palivo; Gas Flame – plynový plamen; Electro slag – elektro-struskové; Oxyacetylene – kyslíko acetylenový; thermit – termit; Friction – třecí; Are Welding – jsou svařovány; Resistance Welding – odporové svařování; Oxigen Cutting – řezání kyslíkem; Electron Beam – elektronový paprsek; Laser Beam – laserový paprsek.

Obr. 2-48 Srovnání svařovacích parametrů jednotlivých typů svařování a ukázka hloubek svarů u při použití elektronového paprsku a laseru

2.5 Svařování tlakové

Svařování tlakové je charakterizováno nejen působením tlaku, ale současně také působením tepla za vzniku plastických deformací a ke spojení dochází i při částečně natavených materiálech.

2.5.1 Svařování elektrickým odporem

Svařování elektrickým odporem je způsob svařování, který k natavení svařovaného materiálu výrazně využívá *elektrický odpor*. Množství tepla, které vzniká, se vypočte podle Jouleova (čti džaulova) vztahu:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t, \text{ [J]} \qquad (12)$$

kde značí: R - elektrický přechodový odpor [Ω];
I - intenzitu elektrického proudu [A];
t - dobu průchodu proudu [s].

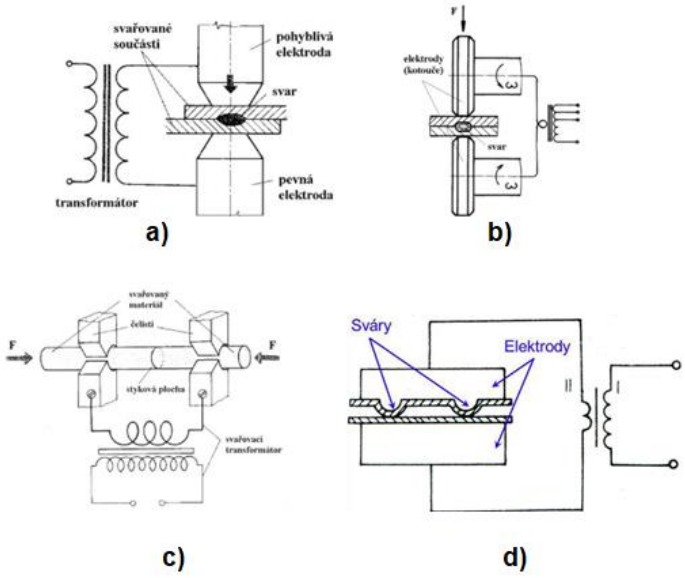
Často se také zjednodušeně říká, že pro svařování elektrickým odporem se využívá Jouleova tepla. Jak je z rovnice (4) patrné, na Jouleovu teple se podílí proud ve druhé mocnině, čas průchodu proudu a elektrický přechodový odpor.

Zdrojem proudu jsou *odporové svářečky*, které se skládají z části elektrické a mechanické. Elektrickou část tvoří nejčastěji jednofázový transformátor, který má primární a sekundární vinutí. Primární vinutí má více závitů a sekundární vinutí jeden závit. Tím se na sekundárním vinutí docílí poměrně malého napětí, U = 2 až 20 V a vysoká intenzita střídavého svařovacího proudu, I = 10 000 až 150 000 A, podle velikosti a účelu stroje.

Mechanická část zabezpečuje polohu svařovaných součástí. Odporové svářečky se dělí podle účelu a způsobu svařování:

a) přeplátováním - bodové, švové, výstupkové a bradavkové;
b) stykové (natupo) - stlačením bez odtavení nebo s odtavením.

Odporové svařovací stroje s jednofázovým zapojením nejsou energeticky výhodné, způsobují nerovnoměrné zatížení elektrické sítě. Pro velké výkony se již používají třífázové odporové svařovačky.



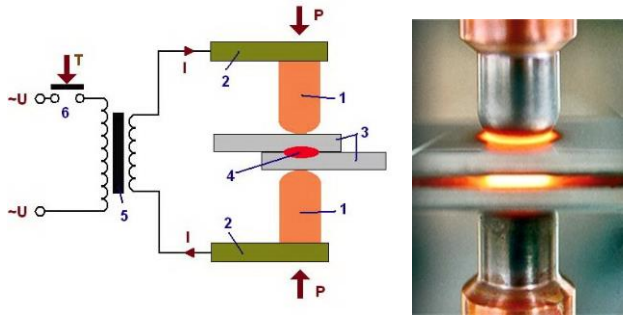
a) bodové svařování, b) švové svařování, c) stykové svařování, d) výstupkové svařování

Obr. 2-49 Schéma důležitých způsobů odporového svařování

2.5.1.1 Odporové bodové svařování

Bodové svařování má velký význam pro spojování plechů, především při výrobě karoserií v automobilovém průmyslu.

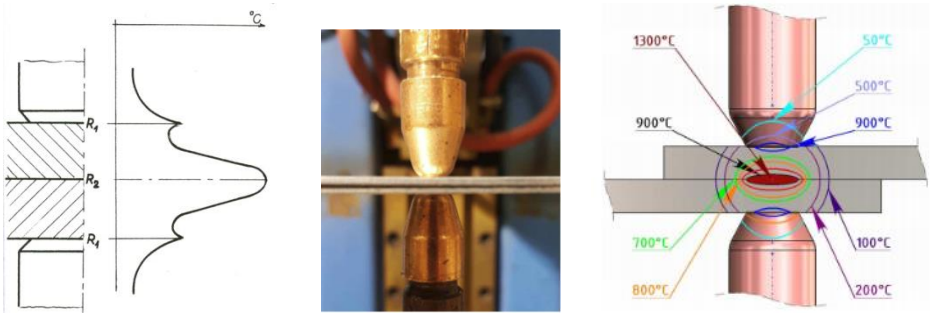
Mechanickou část odporových svářeček tvoří dvě měděné duté elektrody s přídavkem 1% Cr (u velkých strojů elektrody jsou chlazené vodou). Jedna elektroda je pevná, druhá pohyblivá, viz obr. 2-50a).



1- elektroda; 2 - přítlačná ramena elektrod, 3 – svařovaný materiál, 4 - svarová čočka; 5 – transformátor, spínač zdroje

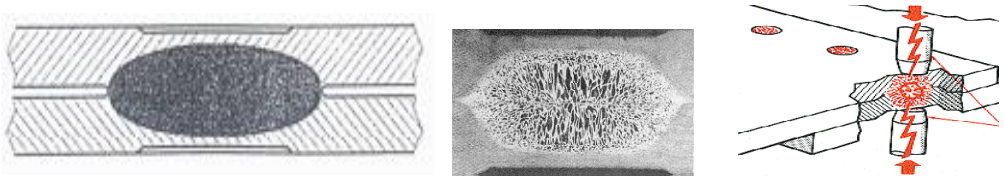
Obr. 2-50a) Schéma bodového odporového svařování [41]

Mezi tyto elektrody se vkládají dva stejné svařované materiály (nejčastěji tenké plechy) přeplátováním (překrytím). Elektrodami se oba materiály sevřou a zapne se elektrická jednotka stroje. Síla sevření elektrod se vyvozuje mechanicky, hydraulicky nebo pneumaticky. Vlivem průchodu proudu mezi elektrodami vzniká v dotykové části elektrody a materiálu poměrně velký přechodový odpor (R_1). Značně vyšší elektrický přechodový odpor (R_2) vzniká na styku ploch obou materiálů. Přitom platí $R_2 >> R_1$. Na obr. 2-50b) je uvedeno rozložení přechodových odporů a jemu odpovídající poměrně vysoké teploty. Na obr. 2-52b) je rozložení teplot těsně po bodování, týká se ocelového plechu používaného v automobilovém průmyslu (tloušťka 1 mm).



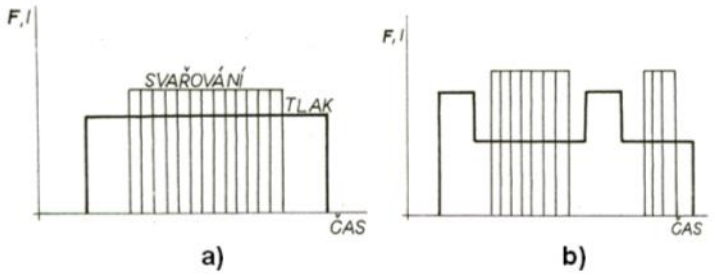
Obr. 2-50b) Schéma rozložení přechodových odporů (vlevo) a teplot (vpravo) při svařování elektrickým odporem, detail elektrod se svařovanými plechy [42],[43]

V důsledku vysoké teploty dojde k natavení obou plechů v prostoru pod elektrodami. Pak následuje stlačení elektrod, čímž se natavený materiál spěchuje. Jakmile je svár hotov svařovací proud se automaticky vypne. Svár tuhne dále pod tlakem vyvozeným stlačením elektrod. Na stykové ploše svařovaných materiálů se vytvoří tzv***. čočka,*** viz obr. 2-51.



Obr. 2-51 Schéma svarové čočky na spojovaných plechách [41]

Na obr. 2-52a) je uveden průběh nejjednoduššího pracovního cyklu bodové svářečky, na obr. 2-52 b) je dokonalejší pracovní cyklus bodové svářečky.



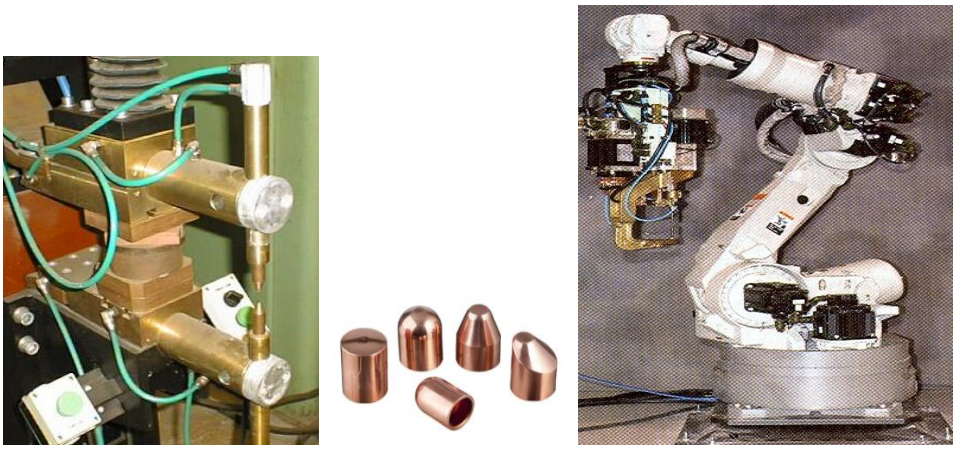
šrafovaná oblast je časová závislost působení el. proudu
plná čára značí časovou závislost síly
a) *jednoduchý pracovní cyklus,* **b)** *složitější pracovní cyklus*

Obr. 2-52 Pracovní cykly odporové bodové svářečky

Na obr. 2-52 a) je pracovní cyklus, kdy stroj nejprve vyvolá tlakovou sílu k sevření elektrod. Tím dojde k dostatečnému vyrovnání povrchových nerovností svařovaných dílů v místě styku. Potom je zapnut proud, který vyvolá ohřev. Po vypnutí proudu stlačení elektrod ještě trvá. To umožňuje vyrovnání případně vzniklého objemového smrštění ve svaru a zamezení možností vzniku mikrostaženin. Současně se svar „tváří“, čímž se ruší vzniklá dendritická struktura po natavení materiálu. Tím se zlepšují i mechanické vlastnosti bodového spoje.

Na obr. 2-52 b) je složitější pracovní cyklus bodové svářečky. Stroj pracující s uvedeným cyklem může vykonat dvě různé přítlačné síly elektrod. Vyšší sílu elektrod pro vyrovnání povrchových nedokonalostí svařovaných materiálů a nižší sílu při ohřevu materiálu. Materiály se upnou mezi elektrody a vyvolá se vyšší síla k vyrovnání povrchových nerovností. Pak následuje snížení síly a v určitém okamžiku i zapnutí proudu pro ohřev svařovaných dílů. Pak následuje vypnutí proudu a za okamžik zvýšení přítlačné síly, která se po určité době opět sníží. Za určitý okamžik následuje opětné sepnutí proudu, které má zajistit ohřev pro žíhání svaru. Po vypnutí proudu za okamžik následuje i vypnutí přítlačné síly a vyjmutí svařených dílů ze stroje.

Na obr. 2-53 je pohled na pracovní část bodové svářečky pracující s programovatelným cyklem a na robota pro svařování plechů karoserií automobilů. Konce elektrod jsou chráněny výměnnými čepičkami, viz obr. 2-53, uprostřed.



Obr. 2-53 Zařízení pro odporové svařování, bodováním (vlevo), ochranné čepičky elektrod (uprostřed) robot pro výrobu karoserií automobilů bodováním (vpravo), [42]

V současné době jsou bodovací zařízení nejvíce využívána v automobilkách při výrobě karoserií. Zde jsou automatizovaná pracoviště, která se skládají z celé řady robotů pro odporové svařování. Vedle těchto složitých strojů existují i jednoduchá bodovací zařízení bodovací kleště nebo pistolové bodovky.

Na obr. 2-54 je ukázka části karoserie automobilu, kde jednotlivé části příslušných tvarovaných plechů byly spojeny bodovým odporovým svařováním.



Obr. 2-54 Části karoserie automobilu spojené odporovým bodovým svařováním [51]

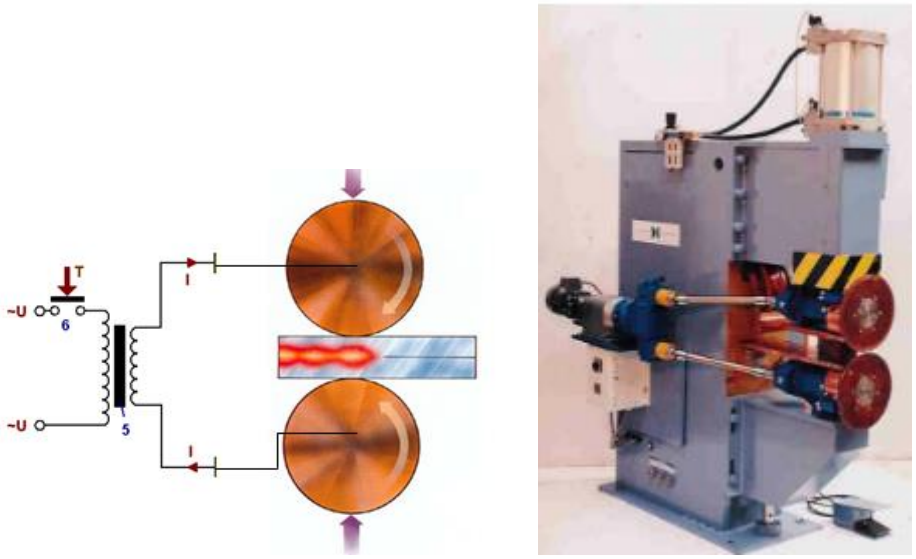
Také existuje celá řada elektrod (bodovacích čelistí) a jejich zakončení podle druhu svařovaných materiálů.

Na podobném principu jako je bodování elektrickým odporem se provádí svařování švové a výstupkové.

2.5.1.2 Odporové švové svařování

Odporové švové svařování, viz obr. 2-55, je analogie bodového svařování, pouze elektrody jsou kotoučového tvaru. Při švovém svařování získáváme průběžný „šev“ jako při šití. Svařované materiály se vkládají mezi elektrody.

Pokud chceme při svařování získat průběžný svár připomínající „šev“, pak proces svařování je průběžný. Při švovém svařování se obě elektrody otáčení a tlačí mezi sebou svařované plechy. Metoda je určena hlavně pro svařování nepropustných plechů, k výrobě těsných přeplátovaných spojů. Nepoužívá se tak často jako svařování bodové. Plechy tloušťky 1 mm se svařují nepřerušovaným střídavým proudem (za sekundu vznikne 100 proudových impulzů, tj. 100 těsně za sebou jdoucích svarů), plechy větších tlouštěk se svařují přerušovaným proudem. Vytváří se tak řada bodů, buď jednotlivých, nebo vzájemně překrytých, což se řídí rychlostí svařování, výkonem a délkou doby, kdy neprochází elektrodami svařovací proud. Touto metodou se často svařují např. některé druhy radiátorů ústředního topení nebo plechové obaly.



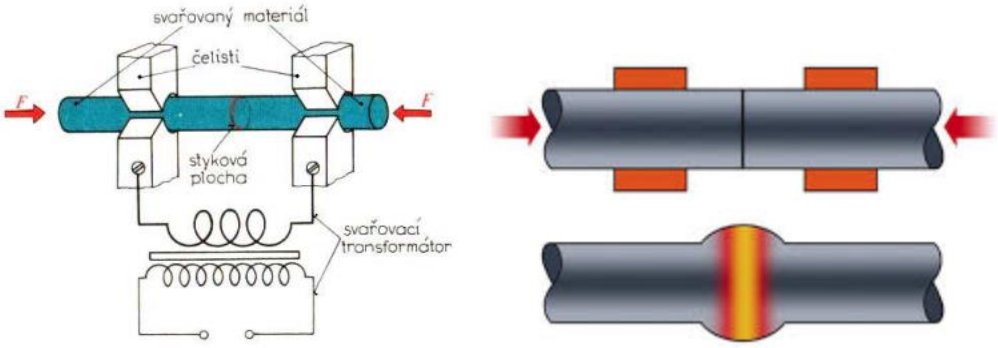
Obr. 2-55 Schéma odporového švového svařování a svářečka pro švové svařování [41]

2.5.1.3 Odporové stykové svařování

Elektrický proud se odebírá ze sekundárního vinutí transformátoru a vede se do měděných čelistí, do nichž jsou oba svařované díly upnuty a které se dají k sobě mechanicky přiblížit. Je důležité, aby svařované konce měly stejný tvar průřezu a byly ze stejného materiálu. Svařovanými díly probíhá velký proud, který vlivem přechodového odporu v místě styku způsobí za několik sekund ohřátí materiálu. Stlačením obou dílů k sobě vznikne svar za vzniku otřepu.

Svařování natupo s odtavením je zpočátku shodný proces, ale jakmile jsou spojované materiály dostatečně předehřáté, nepatrně se od sebe oddálí. V důsledku vysoké teploty pak dochází k termické emisi elektronů a ionizaci tak, že vznikne elektrický oblouk - odtavovací proces. Z natavených čel obou spojovaných dílů se tak odstraní vrstva oxidů. Nakonec následuje stlačení natavených konců dílů k sobě za vzniku otřepu. Schéma metody odporového stykového svařování je na obr. 2-56a).

Pokud požadujeme svar bez otřepů, odstraníme je specielními nástroji. Výhodou této technologie je 2 až 5krát nižší spotřeba elektrické energie než bez odtavení. Na obr. 2-56b) je ukázka předmětů svařených stykovým svařováním.



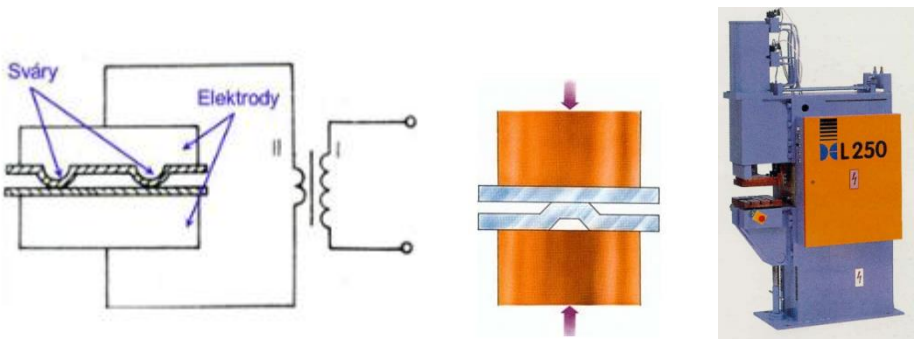
Obr. 2-56a) Schéma odporového stykového svařování [41]



Obr. 2-56b) Předměty (plátek pily, řetěz) svařené odporovým stykovým svařováním [41]

2.5.1.4 Odporové výstupkové svařování

Odporové výstupkové svařování je také analogií svařování bodováním. Pro vývoj tepla pro svařování je základem transformátor, který má na primárním vinutí hodně závitů, na sekundárním vinutí málo závitů. Tím transformátor splňuje požadavek vysokých svařovacích proudů. Při svařování se nepoužívá přídavný materiál. Pro svaření je nutné teplo, které je opět definováno Jouhleovým zákonem a přítlačná síla. Svar vzniká na speciálně připravených místech na svarovém kusu. Tato kontaktní místa jsou tvořena kruhovými nebo prodlouženými výstupky. Svařování může probíhat v několika kontaktních místech najednou. Délka elektrody musí být taková, aby pokryla všechny svary, které budou svařovány během jedné operace.



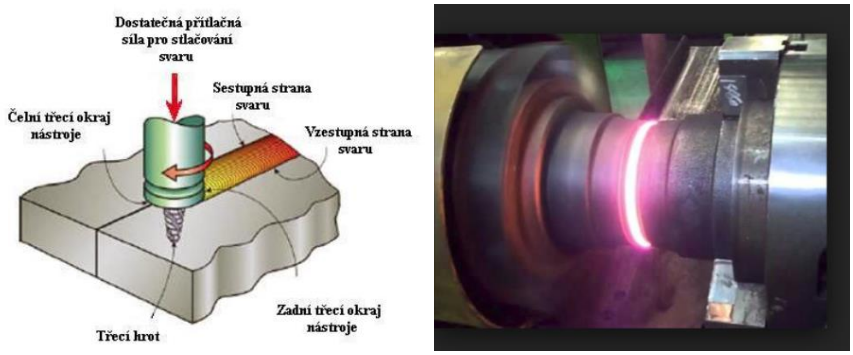
Obr. 2-57 Schéma principu odporového výstupkového svařování, zařízení pro výstupkové svařování [41]

V podstatě výstupkové svařování je několikabodové svařování, kde rozložení bodů je určeno příslušnými výstupky na svařovaném materiálu. Zde je nutno, aby místa výstupků a protikusu byla velmi čistá.

2.5.2 Svařování třením

Svařování třením (FSW – Friction Stir Welding) je proces který lze použít při spojování plechů, v poslední době hlavně hliníkových, aniž by se dosáhlo jejich bodu tavení.

Svařování třením bylo vynalezeno ve Svářečském institutem TWI v Cambridge (Velká Británie), patentováno a rozvinuto pro použití v průmyslu. Na obr. 2-58 je schéma svařování třením. Při svařování třením se nástroj s cylindrickým ramenem a profilovaným kolíkem otáčí a pomalu se ponořuje do místa spoje mezi dva kusy plechu nebo do desky materiálu, které se k sobě natupo svařují. Součásti je nutno upnout do podložky tak, aby se jejich čela neoddálila. Teplo vzniklé mezi svařovacím nástrojem odolným proti opotřebení a svařencem způsobuje, že svařenec může změknout, aniž by dosáhl bodu tavení, a tak umožní, že nástroj přechází podél linie svaru. Změklý materiál je přenesen na vlečný okraj nástroje a je vykován těsným kontaktem ramene nástroje a profilem kolíku. Při chlazení mezi těmito dvěma kusy povoluje vazba pevné fáze. Svařování třením lze použít při spojování hliníkových plechů a desek bez přídavného drátu nebo ochranného plynu. Je možno svařovat materiál o tloušťce 1,6 až 30 mm při plném průniku a bez pórů a vnitřních dutin. Daří se dosáhnout svarů o vysoké celistvosti s nízkou deformací, převážně u slitin hliníku a dokonce i u materiálů, které jsou považovány za obtížně svařitelné z hlediska konvenčních tavných svařovacích metod. Materiály, které byly dodnes úspěšně svařeny třením, zahrnují různé slitiny hliníku (série 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx a 8xxx) a slitiny Al-Li. Nedávno byly provedeny ukázky svařování třením také pro olovo, měď, hořčík a dokonce i pro slitiny titanu.



Obr. 2-58 Schéma metody svařování třením, aplikace metody

Závěrem je třeba uvést, že *technologie svařování třením FSW* je nejmladší svařovací metodou, je používána v několika modifikacích (s použitím jednoho nebo více svařovacích nástrojů). Zkoušky prokázaly, že mechanické vlastnosti spojů jsou velmi dobré. Jsou velmi závislé na svařovacích parametrech a na typu svařovacího nástroje. Tím, že při tomto svařování nedochází k natavení

materiálu vznikají jen malé tepelně ovlivněné oblasti materiálu. Proto jsou mechanické vlastnosti příznivé. Použití metody FSW je ve spojování hliníkových slitin pro železniční, námořní, leteckou dopravu. Nahrazuje metodu MIG.

2.6 Pájení kovů

Pájení kovů je též metoda spojování dvou kovových součástí v nerozebiratelný celek za přítomnosti *pájky.* Pájka zde působí jako přídavný materiál, má značně nižší tavící teplotu než je materiál spojovaných součástí. Také pevnost v tahu pájky bývá obvykle nižší než pevnost základního materiálu.

Dříve se pájení také označovalo také ***letování*** (z německého löten - je technika spojování kovů pomocí snadno tavitelných slitin, nejčastěji na bázi cínu).

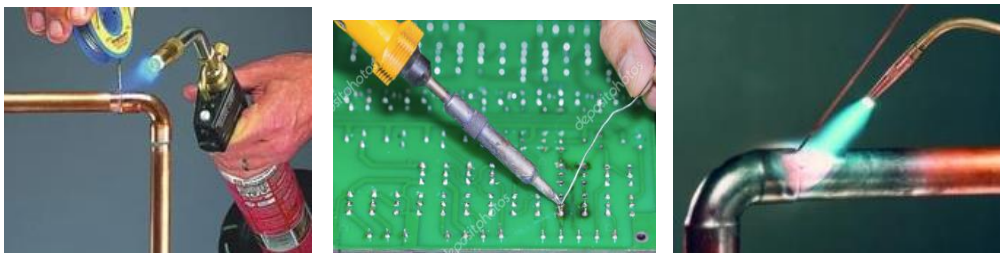
Při pájení vzniká *adhezní* (přilnavý) *spoj*, při svařování *kohezní* (soudržný) *spoj*. Pájení nejvíce známe ze spojování vodičů v elektrotechnice, avšak pájení má též značný význam při spojování různých strojních součástí.

Pájky jsou materiály, které mají jinou tavící teplotu než je teplota pájeného materiálu. Tavící teplota pájek je nízká. Pájky dobře smáčí očištěný kovový povrch, jsou vzlínavé a nevytváří se základním materiálem křehké sloučeniny. Vzlínáním (kapilárními silami) se pájka dostane i do úzké mezery.

Podle rozdělení pájek rozeznáváme i způsoby pájení:

a) ***pájení měkké*** - používají se především pájky cínové, které mají teplotu tavení nižší než 450°C;
b) ***pájení tvrdé*** - používají se pájky měděné, mosazné, stříbrné, které mají teplotu tavení vyšší než 450°C.

V elektrotechnice se používá pájení nánosové, pájka se nanáší do spoje dvou vodičů např. pistolovou páječkou, viz obr. 2-59 (uprostřed). Teplota pájených ploch je cca 50 až 200°C, což je nižší než teplota tavení pájky.



Obr. 2-59 Ukázky měkkého (vlevo, uprostřed) a tvrdého pájení (vpravo) [47], [48]

2.6.1 Charakteristika pájek

Pájky jsou materiály s nízkou tavící teplotou, nejvíce to jsou slitiny kovů, jen výjimečně čisté kovy.

Měkké pájky mají teplotu tání nižší než 450°C (slitiny Pb-Sn, slitiny Bi, slitiny Sn, atd.). Nejběžnější pro měkké pájení je *pájka klempířská* (45% Sn až 55% Pb).
Tvrdé pájky se používají jak pro výrobu spojů nebo ke spojování součástí při výrobě (např. rámy jízdních kol), tak i v opravárenství (např. se mosaznou pájkou pájí zlomený šroubový vrták). Pájení je zde často výhodnější než svařování. Pevnost v tahu u pájených spojů dosahuje až 300 MPa. Nejčastěji to jsou pájky na bázi mosazi (Cu-Zn, Cu-Zn-Ag).

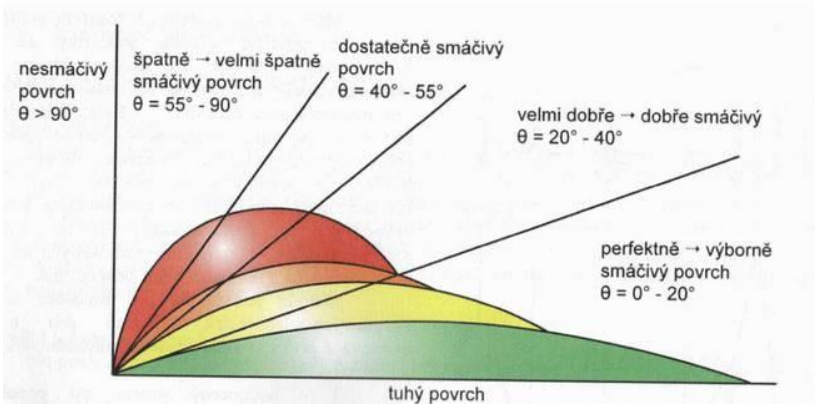
Od pájek se po natavení vyžadují tyto vlastnosti:

- smáčivost - co nejvíce se dotýkaly pájeného materiálu;
- přilnavost - aby co nejvíce lnuly k pájenému materiálu, materiálu
- vzlínavost - aby se dobře dostávaly do všech míst pájení,
- roztékavost – e dobře roztékaly po pájeném materiálu.

Dobrou smáčivost mají pájky v roztaveném stavu, ty které vytváří kapku protáhlého tvaru s velkou styčnou plochou k podložce, viz obr. 2-60. Na obr. 2-61 jsou ukázána schémata různých stupňů smáčivosti pájek.



Obr. 2-60 Ukázky typů snášivostí pájek



Obr. 2-61 Ukázky různého stupně smáčivosti pájek

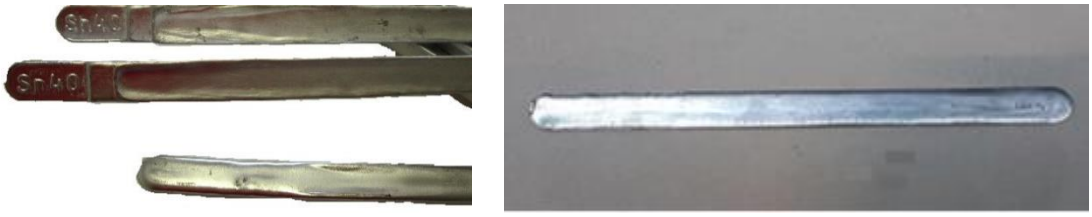
Měkké pájky - velkou skupinu těchto pájek tvoří tzv. cínové pájky s obsahem více složek jako je Sn, Pb, Sb, Zn, které pokrývají rozsah teplot od 183 do asi 285°C. V elektrotechnice je používaná pájka se slitiny Sn-Pb (eutektická slitina, 63% cínu a 37% olova), teplota tání je 183 °C. Při práci s plechem „v klempířině“ se používá pájka klempířská Pb60-Sn40 (60 % olova – 40 % cínu), teplota tání 183 až 285 °C. Dále se používá pájka Pb50-Sn50 (50 % olova – 50 % cínu), teplota tání 183 až 215 °C.
Pro aplikace v elektronice se *měkké pájky* dodávají ve formě trubičky vyplněné tuhým tavidlem, obvykle na bázi kalafuny.

Na obr. 2-62 jsou ukázky různých druhů měkkých pájek, které jsou ve formě dutého drátu nebo drátu určitého průměru navinutého na cívce. Průměry drátů jsou např. 1 mm. Tyto pájky se používají v elektrotechnice.



Obr. 2-62 Ukázky měkkých pájek

Na obr. 2-63 je ukázka pájky klempířské (je to odlitá plochá tyč o rozměrech 27x10x400 mm, pro zajímavost, hmotnost kusu je cca 595 g), Sn60Pb40. Používá se při ručním pájení ocelových plechů (okapy, chladiče, atd.).



Obr. 2-63 Pájka klempířská

Tvrdé pájky – jsou pájky pro tzv. tvrdé pájení (teploty tavení pájky jsou vyšší než 450 °C. Jsou to pájky měděné, mosazné a stříbrné.

Stříbrné pájky – jak říká název, jsou na bázi stříbra (20 až 55 % Ag), s přidáním dalšího kovu, např. Zn, Cu, Cd, Mn, jsou vhodné pro pájení téměř všech typů kovů, dále pro pájení nerezů, austenitických ocelí, pro mosaz, měď, bronz, nikl. Jsou vyráběny ve dvou provedení, buď obalené tavidlem a nebo holé.

Pájky s obsahem stříbra do 20 % - používá se pro materiály citlivé na teplotu, která je *710 až 860 °C.*

Pájky s obsahem stříbra min. 20 % + další přísady Cu, Zn, Sn, Mn, Ni – používají se pro pájení slinutých karbidů, pracovní teplota pájek je 610 až 960 °C.

Měděné pájky – jsou vhodné pro pájení mědi a jejích slitin do obsahu 10 % Ni. Měděné pájky jsou na bázi Cu-P-Ag. Při pájení nelegovaných mědí fosfor (P) účinkuje (pak použití tavidla při pájení není nutné). Pro roztavení pájky se používá neutrální kyslíko-acatylénový plamen. Legované mědi se pájí stříbrnými pájkami. Pájky měděné jsou určeny pro pájení ocelí, niklu a jeho slitin, pracovní teplota pájek jsou 710 až 1100 °C.

Mosazné pájky – nejsou určeny k pájení mosazi, ale ocele. Mosazné pájky jsou na bázi slitiny Cu-Zn (mosaz) a legujících prvků, např. Sn, Si, Ag, Ni, Mn.

Mohou být obalené nebo holé. Velmi důležité je dodržení předepsané teploty pájení.

Ukázka holých pájek je na obr. 2-64.



Obr. 2-64 Ukázka holých pájek – stříbrná, měděná, mosazná

2.6.2 Tavidla pro pájení

Tavidla jsou chemické látky, které usnadňují, umožňují a tím zlepšují technologii pájení. Tavidla chrání pájku i základní materiál před účinky okolního prostředí (oxidací). Rozpouští především oxidy a umožňují dokonalou přilnavost pájky.

Požadavky na tavidla jsou:

- dobře smáčet základní materiál a pájku,
- zlepšovat pájecí vlastnosti,
- rozpouštět oxidickou vrstvu,
- zdravotní nezávadnost.

Často se používá *kyselina borit*á a *borax*. Borax velmi účinně rozpouští oxidy kovů a kyselina boritá dobře smáčí a chrání povrch před oxidací. Podstatu tavidel tvoří chloridy, fluoridy alkalických prvků. Tavidla se používají ve formě prášků, past nebo roztoků. Použitím tavidel vznikají škodlivé zplodiny, proto je nutno pracovníky dokonale chránit potřebnými pracovními pomůckami a pájecí pracoviště důkladně větrat.

Tavidla pro měkké pájení

- ***pájecí kapalina*** (chlorid zinečnatý), pracovní teplota 140 až 450 °C;
  použití pro silně zoxidované kovy (ocel, měď, slitiny mědi a cínu), podporuje korozi, omýt vodou;
- ***pájecí pasta*** (směs zinkochloridu a chloridu amnonného s organickými tuky), pracovní teplota 200 až 400 °C, zbytky omýt ředidlem;
- ***kalafuna*** (organická pryskyřice), pracovní teplota 200 až 400 °C, nepodporuje korozi, není nutno zbytky odstraňovat.



Obr. 2-65 Tavidla pro měkké pájení (*soldering – angl. měkké pájení; brazing – angl. tvrdé pájení)*

Tavidla pro tvrdé pájení

- ***sloučeniny bóru a fluoridů*** – obchodní značení F-SH1, pracovní teplota 550 až 800 °C;

používají se pro stříbrné pájky u pracovních teplot přes 600 °C;

- ***borax (sloučenina bóru) –*** obchodní značení F-SH2, pracovní teplota 750 až 1100 °C, použití u pracovních teplot nad 800 °C pro tvrdé pájky mědi a zinku, ***pozor - borax je velmi jedovatý.***
- ***tavidla typu FH 10 -*** podle ČSN EN 1045.

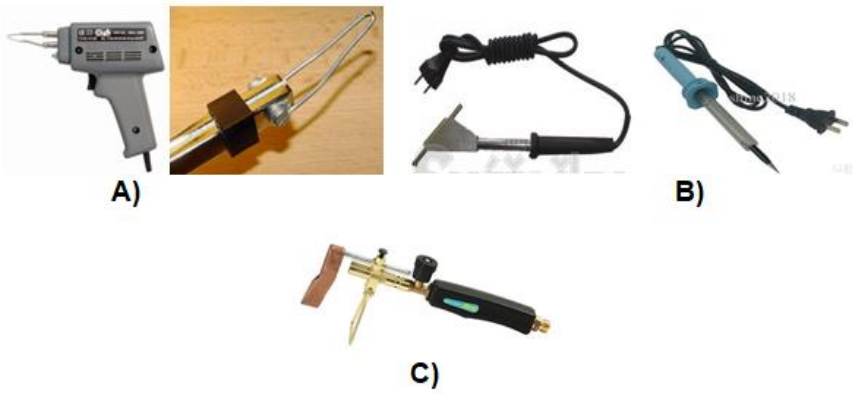


Obr. 2-66 Tavidla pro tvrdé pájení, tavidlo s úplným označením (vlevo)

2.6.3 Pájedla

Pomůcky pro *vyvození tepla* k roztavení pájky se nazývají ***pájedla***. Způsoby ohřevu pájky při pájení jsou různá. Buď je to ohřev v důsledku hoření plamene, nebo ohřev odporovým teple nebo jiným způsobem.

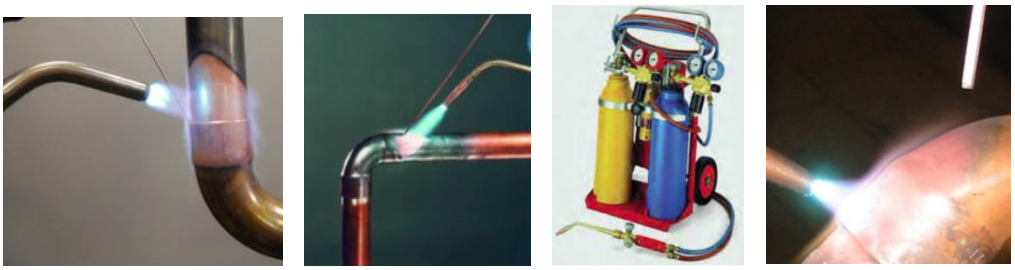
Pro měkké pájení jsou pájedla uzpůsobena na ohřev elektrickou odporovou topnou spirálu a dosahují teploty cca 500°C, dále na hoření plynu, popř. benzinu, lihu, atd. Dříve se používala jednoduchá pájedla, která měla na konci měděný jehlan a ohřívala se na ohni.
Před pájením musí být pájené plochy dostatečně čisté. Též plochy pájedla se při *měkkém pájení* očistí salmiakem.
Na obr. 2-67 jsou pájedla pro měkké pájení.



A) - elektrické odporová pistolové pájedlo pro elektrotechniku, B) - elektrická odporová pájedla, C) – plynové pájedlo

Obr. 2-67 Pájedla pro měkké pájení

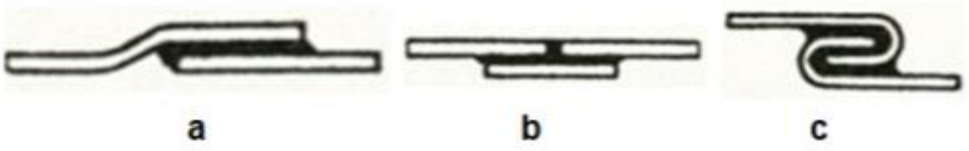
Také při *tvrdém pájení* musí být plochy určené k pájení dostatečně čisté. Místa spojů a jejich okolí kartáčujeme, odmašťujeme a moříme. Nejpoužívanějším zdrojem tepla pro natavení pájky je *kyslíko-acetylenový* plamen.



Obr. 2-68 Ukázka tvrdého pájení – kyslíko-acetylenový plamen, pájecí plynová souprava [48]

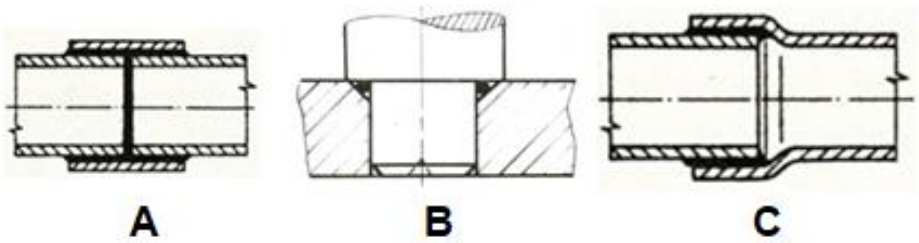
Používají se hořákové nástavce poloviční velikosti jako při svařování ocelí. Při opravárenském pájení litiny s lupínkovým grafitem je nutno díly před pájením zahřát. Menší součástky se ohřívají plamenem, větší se předehřívají v peci na teplotu 500°C. Používá se pájka Cu60ZnSi. Při pájení nerezavějících ocelí se používá pájka Ag28ZnMnNi.

Měkké pájení se používá ke spojování měkkých a tvrdých ocelí, pozinkovaných a pocínovaných plechů, hliníku a slitin mědi. Tvrdé pájení se používá hlavně tam, kde je spoj namáhán na tah. Tímto způsobem se pájí hliník a jeho slitiny, ocel s jinými kovy. Na obr. 2-69a jsou ukázky pájených spojů plechů. Na obr. 2-69b jsou ukázky pájení trubek a zapájeného čepu.



a - spoj provedený plátováním plechů, b - spoj podložený styčnou deskou, c - spoj s přehybem

Obr. 2-69a) Ukázky pájených spojů na plechách



A - spoj trubek pomocí vnějšího kroužku, B – zapájení čepu, C - spoj s rozehnutým koncem jedné z trubek

Obr. 2-69b) Ukázky pájených spojů trubek a čepu

2.7 Řezání kyslíkem

Řezání kovových materiálů kyslíkem patří do skupiny tepelného dělení materiálu. Řezání kyslíkem probíhá při teplotě hoření základního materiálu, který se spaluje v proudu kyslíku a současně se z vznikající mezery řezu odstraňují tekuté oxidy železa.

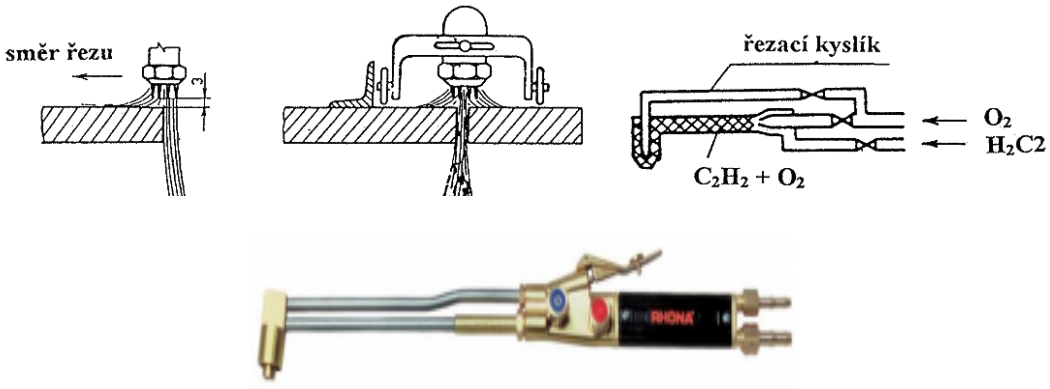
Základní podmínky, za kterých lze materiál řezat kyslíkem:

1. Zápalná teplota musí být nižší než teplota tavení (nelegovaná nízkouhlíková ocel má zápalnou teplotu cca 1100°C a teplotu tavení cca 1500°C).
2. Teplota tavení vznikajících oxidů musí být nižší než teplota tavení řezaného materiálu.
3. Zplodiny hoření (oxidy) musí být dostatečně tekuté.
4. Při řezání musí vznikat dostatečné množství tepla k ohřevu řezaného materiálu v celé tloušťce řezu.

Je to způsob tepelného dělení kovových materiálů jehož principem je hoření řezaného materiálu v proudu kyslíku. Pro řezání se používají speciální hořáky, které mají výměnné řezací a nahřívací hubice. Řezací kyslík je veden samostatnou větví přes ovládací ventil do řezací hubice, která je umístěna uprostřed nahřívací hubice. Pouze speciální řezací hořáky určené k řezání malých tlouštěk mají nahřívací a řezací hubici za sebou. Na obr. 2-70 je schéma řezacího hořáku a schéma řezání kyslíkem.

Do předehřívací hubice je přiváděna směs plynů $C_2H_2 + O_2$. Předehřívací plamen ohřeje okraj řezaného materiálu na zápalnou teplotu, tj. pro ocel asi 1100°C (červená barva), otevře se ventil řezacího kyslíku a probíhá lokální spalování kovového materiálu v místě proudícího kyslíku a současného vyfukování zplodin hoření z mezery. Ohřívacím plamenem a spalováním materiálem se udržuje dostatečná teplota, aby řez mohl dostatečně postupovat až do oddělení materiálu.

Řezání kyslíkem nelze použít např. při dělení vysokolegovaných ocelí, litiny, slitin hliníku, atd. To proto, že nebývá splněn bod 1) základních podmínek. V ostatních případech je řezání kyslíkem oproti mechanickým způsobům velmi výkonné.



Obr. 2-70 Schéma řezání kyslíkem a řezací hořák

Pracovní tlaky plynů závisí na tloušťce řezaného materiálu a tím na velikosti použitých hubic. Přesné údaje jsou přiloženy ke každé řezací soupravě. U nejčastěji řezaných tlouštěk (ocel do 20 mm) bývá tlak kyslíku 0,2 až 0,3 MPa a tlak acetylénu 0,15 MPa.

Vedle ručního řezání kyslíkem se používá i řezání strojní, kdy se dosáhne kvalitnější řez. Strojní řezání je výhodné pro přesné řezy v sériové výrobě. Stroje umožňují vedení hořáku v nastavené výšce rovnoměrnou rychlostí. Hořák je možno nastavit v potřebném úhlu. Konstrukce řezacích strojů se liší podle druhu práce, ke které jsou určeny. Moderní řezací stroje jsou programově řízeny. Na obr. 2-71 je ukázka řezacího stroje i detail řezání.



Obr. 2-71 Průmyslový stroj prořezání kovů kyslíkem, detail řezání [49]

Řezání kovů kyslíkem je hospodárný a rychlý způsob oddělování materiálů. Používá se k řezání tlustých materiálů, při demontážích, k úpravě svařovaných částí atd. Řezání kyslíkem se používá nejčastěji pro konstrukční fa oceli, popř. litiny. Běžné řezací hořáky řežou tloušťky materiálu do 300 mm, se speciálními hořáky je možno řezat tloušťky do 1500 mm. Při správném pracovním postupu je řezná zpráva úzká a pravidelná a řezné plochy jsou hladké. Neželezné kovy a jejich slitiny nelze řezat kyslíkem, mají nízkou teplotu tavení. Na obr. 2-72 je řez kyslíkem.



Obr. 2-72 Ukázka řezu na konstrukční oceli [49]

2.8 Navařování kovů

Technologie navařování kovů je analogická s tavným svařováním. Svařováním spojujeme díly dohromady, navařováním v podstatě dodáváme chybějící část materiálu, který chybí např. v důsledku opotřebování dílu, atd. Technologie navařování kovů vhodně doplňuje proces spojovacího svařování a společně se

uplatňují při vytváření některých konstrukcí. Navařování kovů v poslední době zaznamenalo značný rozvoj, díky zkvalitnění navařovacích technologií a návarových kovů. Navařováním se vytvářejí homogenní vrstvy se základním materiálem založeném na difuzním spojení. Navařování lze použít k běžnému doplnění rozměrů opotřebeného nástroje nebo výrobku až po vytváření vrstev, které mají zcela odlišné vlastnosti než základní materiál. Navařování má také značné uplatnění v opravárenství a údržbě funkčnosti dílů strojů. Na obr. 2-73 je ukázka navařovaných konstrukcí.



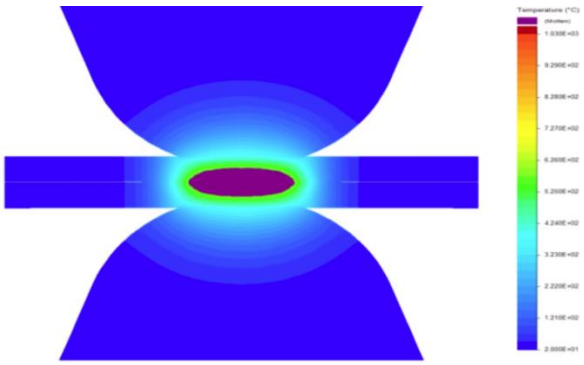
Obr. 2-73 Ukázka navařených kovů a tvrdých kovů na dílech odolných proti otěru a renovace ozubení navařováním

2.9 Simulační výpočty svarů

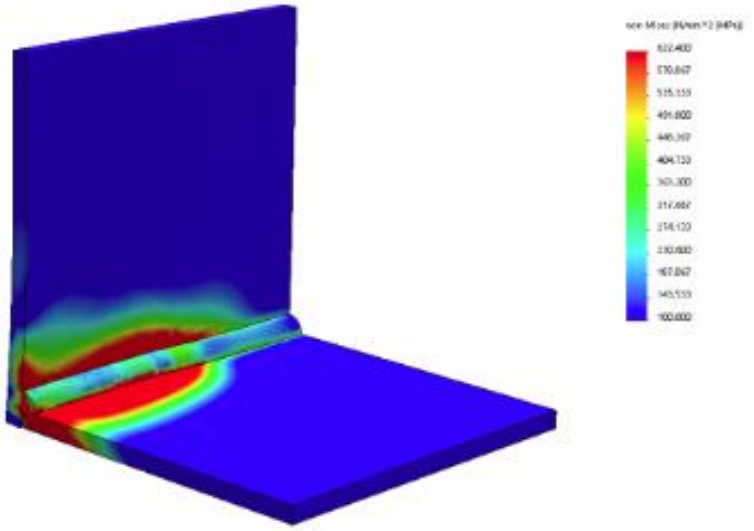
Podobně jako ve slévárenství, také ve svařování existují simulační programy. Tyto programy lze rozdělit na programy simulující tavné svařování a na programy simulující svařování tlakem. Programy, pro simulaci tavného svařování jsou: SYSWELD, MAGdata, WELDdata, HAZ-CALCULATOR, PREHEAT, WELDplan, SAMET, X-WELD. Mezi programy pro svařování teplem a tlakem se řadí program SORPAS, viz simulace na obr. 2-74.

V podstatě lze nasimulovat jakýkoliv proces svařování. Výsledky simulačního výpočtu lze rozdělit do dvou skupin:

1) ***Sledování teplotních polí*** rozložení fází, tvrdosti a velikosti austenitických zrn. Ukázka teplotního pole koutového svaru pomocí simulačního výpočtu provedeného programem SYSWELD je na obr. 2-75. V pravé části obrázku je stupnice barev, která odpovídá určitým teplotám.
2) ***Sledování mechanických vlastností*** (stanovení velikosti teplotních napětí, deformací, zjištění časové závislosti jednotlivých složek tenzoru napětí, lze zobrazit jakoukoliv prostorovou napjatost, umožňuje výpočet pružných a plastických deformací, atd.);



Obr. 2-74 Teplotní pole při odporovém bodovém svařování plechů (simulace programem SORPAS)



Obr. 2-75 Teplotní pole koutového svaru (simulace programem SYSWELD)

Literatura ke kapitole svařování kovů

[1] HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
[2] HLAVATÝ, Ivo. Svařitelnost uhlíkových ocelí. In Materiály a jejich svařitelnost. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2000. Kapitola 9, s 115-122. ISBN 80-85771-85-3
[3] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
[4] OCHODEK, Vladislav. Struktura svaru. In Materiály a jejich svařitelnost. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2000. Kapitola 7, s. 95-102. ISBN 80-85771-85-3.
[5] FOLDYNA, Václav. Slitiny a fázové diagramy. In Materiály a jejich svařitelnost. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2000. Kapitola 4, s 67-78.
[6] Kolektiv. Materiály v laboratorní technice. Katedra chemie – FP Masarykova univerzita v Brně, 2008-2009.
[7] BLAŠČÍK, F. a kol.: Technológia tvárnenia, zlivárenstva a zvárania. 1. vyd. Bratislava/Praha 1988.
[8] BERNAS, J. a kol.: Svařování I. (Elektrickým obloukem). 2. upravené vyd. Praha 1976.
[9] BERNAS, J. a kol.: Svařování II. (Plamen). 3. upravené vyd. Praha 1982.
[10] Podkladové materiály firmy ESAB – Svařitelnost některých technických materiálů a volby přídavných materiálů.
[11] KUNCIPÁL, J. a kol.: Technologie svařování a zařízení. ZEROSS Praha 1986, 395 s, 1. vydání, ISBN 80-85771-81-0.
[12] Kolektiv: Materiály a jejich svařitelnost. /Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů/. Ostrava 1999.
[13] Kolektiv. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. /Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů/. Ostrava 1999.

[14] MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita, 2009. 151 s. ISBN 978-80-7372-439-9.
[15] HLAVATÝ, I, ZMYDLENÝ, T.: Značení svarů svařované konstrukce. [Studijní materiály]. VŠB-TU Ostrava, http://fs1.vsb.cz-hla8.
[16] Podkladové materiály firmy Klíma – technika – inovace – realizace, 2009.
[17] Podkladové materiály firmy Javarex, s.r.o.
[18] Podkladové materiály firmy Markos.
[19] Propagační materiály firmy Realizační díly Blansko.
[20] Podkladové materiály firmy Homola, a.s., svařování potrubí.
[21] Podkladové materiály firmy Actherm servis, a.s. (opravy patrovody).
[22] Podkladové materiály firmy Svařovací technika, Plzeň.
[23] KUBÍČEK, J. Technologie svařování (studijní opora pro výuku 5ST, ETV, ETV-K, ÚSP, obor svařování.
[24]Propagační a podkladové materiály firmy Zámečnictví Drlík, Brno.
[25] AMBROŽ, Oldřich. KUBÍČEK, Jaroslav. KANDUS, Bohumil. *Technologie svařování a zařízení.* Ostrava, Zeross 2001.
[26] MALINA, Z. Základní kurz svařování MIG/MAG. 5. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-76-4.
[27] KUBÍČEK, J. Technologie II (část svařování) FSI - VUT Brno 2006.
[28] Podkladové materiály firmy ESAB, označování elektrod pro ruční svařování. Klasifikace v systému – A.
[29] TIG, základní princip. SVARINFO – Magazín praktického svařování, 7.1. 2009.
[30] Technické a propagační materiály firmy SOLWE COOM. All Rights Reserved solwecom.cz, 2014.
[31] Propagační materiály zařízení SAW 1250, firma Petr Sobol, Česká republika.
[32] Technické a propagační materiály firmy HBT weld, s.r.o.
[33] MRŃA, Libor. Elektrostruskové svařování. [Pomůcka pro výuku]. FSI – VUT Brno, 2010.
[34] Propagační materiály firmy Svařování J.M. Kapa.
[35] Propagační materiály firmy Promat.
[36] Technické propagační materiály firmy Lao, Lasery a optika.
[37] Propagační materiály firmy IPG Laser Welding.
[38] Propagační materiály firmy Preco Metal - Laser Welding.
[39] Propagační materiály firmy SPI Lasers, UK Ltd. United Kingdom.
[40] Propagační materiály firmy Laser Welding TRUMF, spol. s r.o. Praha.
[41] Technické propagační materiály firmy ROCKWELD - GROUP
[42] Propagační materiály firmy ART WELD.
[43] STEINER, Jaromír. Pevnost bodového spoje v měkkém a tvrdém režimu svařování. [Diplomová práce]. FSI-VUT Brno, 2015.
[44] Propagační materiály zařízení firmy DEL.
[45] Kolektiv: Technologie svařování a zařízení. /Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů/. Ostrava 2001.
[46] Technické materiály firmy VIDEOMAN,
[47] Propagační materiály o pájení firmy Depositphotos.
[48] Propagační materiály o pájení firmy Teplong.
[49] Technické materiály prořezání kovů kyslíkem firmy TRUMPF.

[50] KUBÍČEK, J. Technologie II. – část svařování, díl 1 základní metody tavného svařování, FSI - VUT 2006.
[51] Svařování karoserií automobilů ŠKODA-Auto, a.s.
[52] Propagační materiály KLÍMA – Technika- inovace – renovace.

Kontrolní otázky z kapitoly Svařování kovů

1. Jaký je účel svařování kovů.
2. Co je svařitelnost kovů, svařitelnost ocelí, uhlíkový ekvivalent.
3. Svařitelnost litin, neželezných kovů.
4. Na rovnovážném diagramu Fe-C ukažte oblast, uhlíku, kde se nachází dobrá svařitelnost ocelí.
5. Nakreslete schéma tavného svarového spoje, popište jej.
6. Které základní pochody probíhají při tavném svařování.
7. Které základní způsoby svařování rozlišujeme.
8. Charakterizujte svařování plamenem, kde se svařování plamenem používá.
9. Jaký účel mají tlakové nádoby, manometry, hadice, hořáky při svařování kovů kyslíko-acetylenovým plamenem.
10. Jaké dva základní druhy hořáků rozlišujeme.
11. Nakreslete schéma kyslíko-acetylénového neutrálního plamene, vyznačte oblasti teplot.
12. Co znamená pojem měkký, střední a ostrý plamen, kde se jaký typ plamene využívá
13. Vysvětlete fyzikální podstatu elektrického oblouku.
14. Jaké znáte metody svařování elektrickým obloukem.
15. Jaké jsou typy přenosu kovu v elektrickém oblouku při svařování.
16. Charakterizujte ruční svařování elektrickým obloukem a obalenou elektrodou.
17. Jaké typy obalených elektrod rozlišujeme z hlediska svařovaných materiálů.
18. Jaké typy obalů elektrod se používají a jaké vlastnosti zabezpečují při svařování.
19. Jaká je funkce obalu elektrody pro ruční svařování.
20. Jaký je účel svařovacích agregátů (*SS* proud: dynama – točiné, invertory. usměrňovače – netočivé; střídavý proud: transformátory).
21. Nakreslete schéma a charakterizujte technologii svařování metodou MAG (metal – active – gas).
22. Nakreslete schéma a charakterizujte technologii svařování metodou MIG. (metal – inert – gas).
23. Nakreslete schéma a charakterizujte technologii svařování metodou WIG, jaký je rozdíl mezi metodou TIG a WIG.
24. Pro jaké kovy se používá řezání kovu kyslíkem.
25. Jaké jsou podmínky pro řezání kovů kyslíkem.
26. Které materiály nejdou řezat kyslíkem.
27. K jakému účelu slouží navařování kovů.
28. Proč se používají simulační výpočty ve svařování kovů.

3. KOROZE A PROTIKOROZNÍ OCHRANA KOVŮ

Stroje, strojní součásti, i konstrukční materiály jsou při plnění svých funkcí vystaveny působení okolního prostředí. Tím dochází k jejich postupnému poškozování a ztrátě předpokládaných mechanických vlastností. Jedním z rozhodujících vlivů při rozrušování kovových materiálů je *koroze* (dále to může být vysoký žár a nadměrné mechanické namáhání).

Koroze (název pochází z latiny, corrodere = rozhlodávati) je rozrušování kovů a jejich slitin vzájemným chemickým nebo elektrochemickým působením *materiálu* a *okolního prostředí*. Korozní účinek na materiálu se projevuje různým způsobem - materiál na povrchu ubývá, vznikají důlky, skvrny, materiál křehne a praská. Technické výrobky pracují nebo se nacházejí v prostředí plynů a kapalin. Korozní rozrušování kovových dílů v plynech nebo kapalinách může být dějem fyzikálním, chemickým, ale nejčastěji elektrochemickým. Někteří autoři zahrnují ke korozi i mechanický účinek odírání kovu drobnými pevnými částicemi prachu, písku, nečistot, atd. Tento děj se správně nazývá *eroze* materiálu. Proudící kapaliny mohou způsobovat zvláštní druh koroze, který se označuje *kavitace*.

3.1 Rozdělení koroze

Korozi dělíme různým způsobem, např. podle způsobu napadení povrchu materiálu, vzhledu a umístění. Korozi lze také rozdělit podle těchto kritérií.

1. Rozdělení koroze z hlediska mechanismu korozních dějů,
2. Rozdělení koroze z hlediska korozního prostředí,
3. Rozdělení koroze z hlediska korozního napadení.

3.1.1 Rozdělení koroze z hlediska mechanismu korozních dějů

a) chemická koroze,
b) elektrochemická koroze,
c) biologická koroze.

Elektrochemická, popř. chemická koroze se řadí k základním druhům koroze.

Chemická koroze, objevuje se výjimečně, je vyvolávána agresivními látkami plynného nebo nevodivého kapalného prostředí (kapalné prostředí je nejčastěji vodivé), kde je rychlost koroze dána procesem chemické reakce. V prostředích oxidačně působících plynů vzniká na povrchu kovu vrstva oxidu, která může mít do jisté míry i ochranný charakter. Tento případ je typický pro kovy Zn, Al, Cu, Pb. Za vyšších teplot stejného prostředí vznikají na povrchu Fe oxidy zvané okuje, ŠČERBEJOVÁ, 1993 [4].

Elektrochemická koroze vzniká v prostředích, které vedou elektrický proud – ***elektrolytech*** (vodivé kapaliny, roztoky, taveniny, atd). Takový to případ koroze je nejčastější. V elektrolytu vždy probíhá tzv. ***anodová a katodová reakce*** současně. Jejich vztah je natolik vzájemně závislý, že nemohou probíhat samostatně, pokud degradujícím kovem neprochází žádný vnější proud. Při ***korozi anody dochází k oxidaci*** a současně probíhá ***redukce na katodě***. Z chemického hlediska vyplývá, že musí být zachován počet odevzdaných

a spotřebovaných elektronů v reakci. Rychlost koroze je ovlivňována anodovou nebo katodovou reakcí, případně může být degradace kovu urychlena oběma reakcemi současně. Vzniklé reakce tvoří vlastní korozi, která se vyskytuje přímo na povrchu napadeného kovu nebo v jeho blízkosti. Přímo na povrchu kovu probíhají obě reakce v případě, že je kov stejnorodý a složení roztoku, který je v přímém kontaktu s kovem, je konstantní ve všech oblastech. (Bartoníček a kol. 1966) [3],[7].

Biologická koroze, vzniká působením biologických faktorů je chemické i fyzikální. Některé rostliny vytváří organické kyseliny a zadržují kapalnou vodu, která při poklesu teplot pod bod mrazu vytvoří krystalizační tlak ledu a bývá příčinou poškození. Příkladem chemické biokoroze jsou biologické pochody např. u exkrementů a moči zvířat. Vznikají látky, které narušují kovy, beton i nekovové materiály. (Rovnaníková 2005).

3.1.2 Rozdělení koroze z hlediska korozního prostředí

Podle charakteru korozního prostředí, rozlišujeme:
a) korozi v plynech (oxidační a redukční plyny),
b) korozi atmosférickou,
c) korozi v kapalinách (ve vodách),
d) koroze půdní (biologická koroze),
e) koroze v průmyslovém prostředí.

Koroze kovů v plynech, základním plynem který se nachází na zemském povrchu je vzduch (21% kyslíku, 78% dusíku, zbytek jsou ostatní plyny - přesně: 20,99% kyslíku; 78,03% dusíku; 0,933 argonu; 0,030% oxidu uhličitého; 0,0005% vodíku; 0,00018% neonu; 0,0005% helia; 0,0001% kryptonu; 0,00009% xenonu). Kovy v roztaveném stavu se slučují především s kyslíkem, dusíkem a vodíkem, popř. dalšími. Kovy v pevném stavu se nejčastěji slučují s kyslíkem - probíhá tzv. *oxidace*.
Oxidace kovů postupuje v závislosti na čase dvojím způsobem:

a) *korozní vrstva nepůsobí jako* ochrana proti další korozi, pak nárůst korozní vrstvy s [mm] v závislosti na čase je lineární. Jako příklad je možno uvést slitiny $AlMg_3$ a lze psát vztah:

$$s_1 = k_1 \cdot t \,, \tag{13}$$

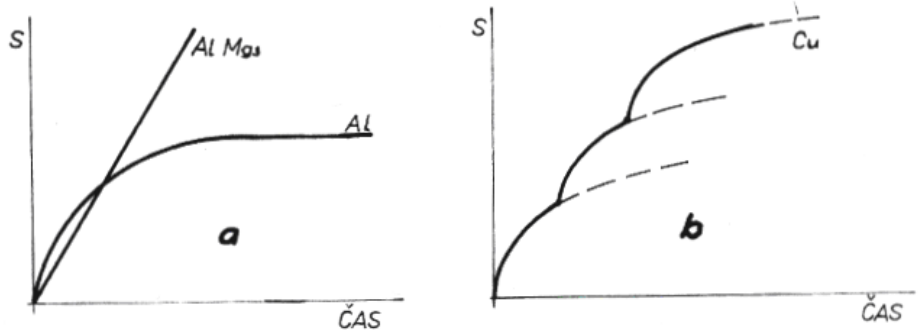
kde značí: k_1 - konstantu, kterou lze stanovit na základě experimentu;
t - čas probíhajícího děje.

b) *korozní vrstva působí jako ochrana* proti korozi. To je např. v případě Al za vzniku Al_2O_3, kdy tento oxid (nekovového charakteru) působí proti další oxidaci, proto se děj po určité době zpomalí až ustane. Nárůst korozní vrstvy se řídí podle parabolického zákona. Tloušťka zkorodované vrstvy s_2 se vypočte:

$$s_2 = k_2 \cdot \sqrt{t} \,, \tag{14}$$

kde značí: k_2 - konstantu, kterou lze zjistit experimentálně pro tento děj;
t - čas probíhajícího děje.

Na obr. 3-1a) jsou grafické závislosti tloušťky vzniku korozní vrstvy dle lineární a parabolické závislosti. V případě mědi je situace složitější. Nárůst korozní vrstvy je též podle parabolické závislosti, ale zplodiny koroze mají větší molekulární objem než samotná měď. Proto se po určité době růstu vrstva zplodin zvrásní, popraská a děj se opakuje znovu, viz obr. 3-1b).

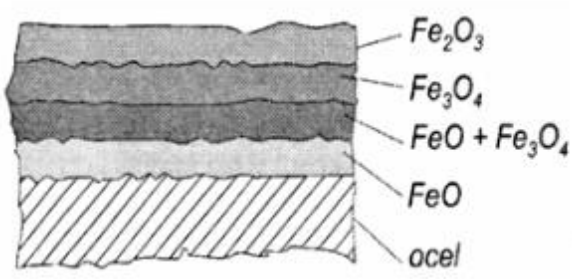


Obr. 3-1 Závislost růstu korozní vrstvy na čase pro různé kovové materiály

Ještě komplikovanější je případ oxidace železa. Železo tvoří celkem tři odlišné typy oxidů:

1) FeO (oxid železnatý) - metalograficky nazývaný *wüstit*;
2) Fe_3O_4 (oxid železnato-železitý) - metalograficky nazývaný *magnetit*;
3) Fe_2O_3 (oxid železitý) - metalograficky nazývaný *hematit.*

Nejstabilnější je FeO, avšak nejměkčí. Stabilnější je Fe_3O_4 než Fe_2O_3. Oba tyto oxidy vytváří vrstvu s dobrou tvrdostí a pevností. Měkká vrstva FeO způsobuje, že se vrstvy oxidů železa odlupují od železného podkladu. Přesto však i oxidy železa mohou oceli poskytovat protikorozní ochranu (provádí se např. černění oceli). Přitom je snaha vést oxidaci tak, aby se zamezilo vzniku měkkého wüstitu. Na obr. 3-2 je uvedeno pořadí vrstev oxidů železa.



vrstva FeO je měkká, naopak vrstvy Fe_3O_4 a Fe_2O_3 mají dobrou pevnost

Obr. 3-2 Pořadí vrstev oxidů na oceli, resp. železném podkladě

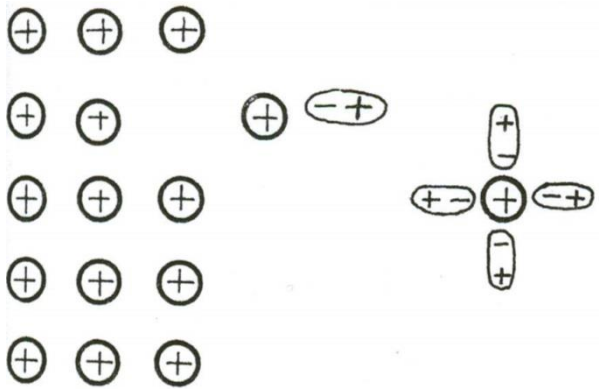
V technické praxi je známé pořadí kovů, jak se slučují s kyslíkem (tj. afinita kovů ke kyslíku). Největší slučivost za normální teploty vykazuje Mg, Al, Ti, V, Mn, Fe, Cu, nejnižší Ag.

Veškerou korozi v plynech jsme zatím uvažovali jako děj probíhající v suchých a chemicky čistých plynech.

Atmosférická koroze, její vznik je způsoben obsahem vodní páry a nečistot ve vzduchu. Voda na povrchu kovu vytváří ***elektrolyt*****,** ve kterém vzniká koroze

a postupně se narušuje korodující materiál. Rychlost a způsob účinků korozního působení je dán teplotou, tlakem, vlhkostí, složením elektrolytu, atd., proto bývá průběh koroze v různých prostředí rozdílný. Pouze výjimečně, v případě, že se na povrchu kovu nenachází žádný ***elektrolyt***, je mechanismus koroze čistě chemický.

Koroze v kapalinách, zvláštním případem koroze v proudících kapalinách je ***kavitace*****.** Vzniká např. na lopatkách turbín vlivem působení proudu kapalin.
Určitým druhem kapaliny je voda. Pak hovoříme o korozi ve vodě. Voda je obecně vodičem elektrického proudu, proto říční nebo mořská voda je ***elektrolyt*** s různou korozní agresivitou. Podle tvrdosti vody se může jednoduše určit míra nebezpečí pro daný kov. V případě tvrdé vody dochází na povrchu kovu k tvorbě uhličitanu vápenatého, který slouží jako bariéra a odděluje kov od korozního prostředí. Vody dešťové, které bývají často znečištěny sírany z ovzduší, mohou být pro kov naopak značně agresivní. Důsledkem často bývá důlková koroze, což je místní forma poškození, které může prostupovat i do větších hloubek, přičemž celková koroze se jeví jako minimální, NOVÁK [8].
Z korozního hlediska je nutno kapaliny rozdělit na elektricky vodivé (obsahující volné ionty) a nevodivé. Koroze může být zjištěna i v nevodivých kapalinách jako např. naftě, benzinu, petroleji, neboť obsahují vodu, kyslík, popř. další látky. I ve zcela čisté, chemicky neutrální vodě, dochází k rozpouštění zcela čistých kovů. Tento proces se označuje *hydratace*. Na obr. 3-3 je schéma, které vysvětluje vznik hydratace.

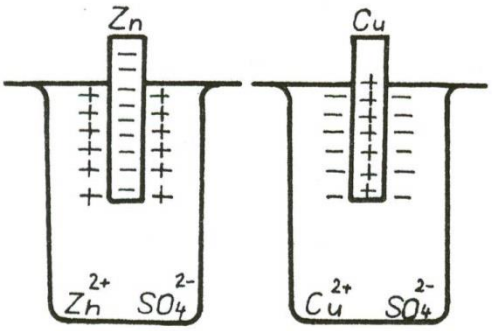


Obr. 3-3 Schéma vzniku hydratace

K uskutečnění hydratace je potřeba, aby kovový masiv ponořený do vody měl na svém povrchu nedokonalé krystalické mřížky, které charakterizují jeho strukturu. To mohou být např. vady vnitřní struktury kovů (tzv. dislokace, vakance, atd.). Tuto podmínku splňují za normálních okolností všechny kovy. Hydratace nastává tak, že k povrchu kovu, resp. k jeho kationu (+) se přiblíží voda, resp. její polarizovaná molekula - tzv. dipól svou zápornou částí. Tím se obzvláště v blízkosti mřížkové poruchy povrchu kovu poruší rovnováha vazebných sil a kation je uvolněn. Okamžitě ho obklopí další dipóly vody.

Jiný průběh nastává, je-li kovový masiv (ze Zn, Cu, atd.) vložen do chemicky aktivní vody. Jako příklad lze uvést masiv ze Zn nebo Cu, který vložíme samostatně do vodného roztoku kyseliny sírové (H_2SO_4), viz obr. 3-4. V obou případech dochází k reakci kovu s chemicky agresivní kapalinou, k

tvorbě solí síranu zinečnatého a ve druhém případě síranu měďnatého. Současně lze pozorovat i fyzikální důsledky chemické reakce: zinek je obklopován v kapalině svými kladnými ionty (kationy) a přebytek jeho elektronů se projeví jeho záporným nábojem. Děj se po určité době zastaví, ale působí jako nabitý kondenzátor. Ve druhém případě s mědí je tomu opačně. Masiv mědi je obklopen aniony $SO_4^{(-)}$ a sám má kladný náboj. Chemicky aktivní voda - elektrolyt se mění z roztoku H_2SO_4 na $ZnSO_4$ nebo $CuSO_4$.



Obr. 3-4 Schéma mechanismu rozpouštění zinku a mědi v H_2SO_4

V některých případech dochází při rozpouštění kovů v chemicky aktivních roztocích ke zvláštnímu jevu tzv. *pasivaci.*

Sledujeme-li závislost rychlosti koroze na koncentraci rozpouštědla, má funkce při určitých, obvykle vysokých koncentracích, extrém. Při němž se tvoří na povrchu součásti jako produkt chemické reakce vrstva odolná proti dalšímu rozpouštění a to i při nižších koncentracích. Tato vrstva se nazývá pasivační. Jako příklad je možno uvést železo v koncentrovaném roztoku kyseliny dusičné. Z technických kovů se pasivuje zejména chróm, jeho slitiny a chromové oceli.

Koroze půdní, je ovlivňována několika základních faktory, jako je např. zadržené množství vody, množství bakterií, minerálních a plynných látek v půdě, atd. Protože druh půdy muže mít rozdílné vlastnosti, proto koroze v různých půdách muže být odlišná.

Koroze v průmyslovém prostředí je závislá na jeho korozní agresivitě. Korozní agresivitu podporuje např. vysoká teplota, páry, vyšším obsahem kyselin, solí, organické chemikálie. Všichni tito činitelé vytváří tzv. průmyslové prostředí. Působením koroze může dojít ke vzniku mnoha závažných bezpečnostních problémů, které se projevují ve snížené pevnosti dílů nejenom díky úbytku na materiálu, ale i narušením vlastní struktury materiálu, což může vést ke snížení mechanických vlastností materiálu.

3.1.3 Rozdělení koroze z hlediska korozního napadení

Korozní napadení materiálů může být:
A) rovnoměrné napadení,
B) nerovnoměrné napadení.

Rovnoměrné korozní napadení probíhá na celé ploše kovového materiálu stejnoměrně a se stejnou korozní rychlostí. Výskyt těchto napadení se dá lehce předpovídat.

Nerovnoměrné napadení vzniká v místech rozdílných vlastností korozního prostředí nebo kovu. Je charakteristické např. nerovnoměrnou hloubkou napadení, atd. Napadení materiálu korozí muže být:

a) skvrnité
b) bodové (místní) - napadá materiál jen v určitých místech;
c) *důlkové* (pitting), koroze vytváří znatelné důlky, rozhodující je šířka *b* a hloubka napadení *h*;
d) *nitkové*
e) *mezikrystalické* (mezi krystaly)
f) *transkrystalické* (přes krystaly).
g) *selektivní*, tzv. výběrová zasahuje jen určité části struktury, vzniká jen u některých složek slitin např. zinku, mosazi).

Skvrnité napadení vzniká např. při teplotních rozdílech nebo při vytvoření makročlánku. Spojením dvou rozdílných kovů a působením elektrolytu vznikají na méně ušlechtilém kovu povrchové skvrny, které časem mohou vytvořit rovnoměrné napadení.

Bodové a důlkové napadení se často vyskytuje při poruše pasivační vrstvy kovu. Lokálně ohrožují kov až do značných hloubek. Vyvrcholením této koroze může dojít k samotnému proděravění materiálu.

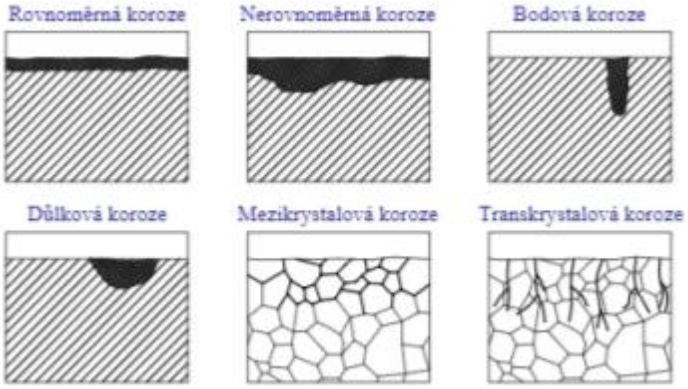
Nitkové napadení vzniká v pórech ochranného povlaku. Šíří se křivolace mezi kovem a ochranným povlakem. Svojí činností vytváří u nátěrových ploch puchýře, které mohou následně praskat a odhalovat kov.

Mezikrystalické napadení, koroze se nachází mezi krystaly příslušného kovu. Je způsobena snížením obsahu chromu v bezprostřední blízkosti hranic zrn, pod hranici pasivovatelnosti, tedy pod 12 %. Za toto snížení je odpovědná tzv. precipitace (vylučování) karbidů s vysokým obsahem chrómu právě na hranicích zrn. Karbidy se vylučují při ohřevu v kritické teplotní oblasti 400–800 °C např. při svařování. S menším podílem chromu tyto oblasti korodují přednostně, dochází tak ke ztrátě soudržnosti zrn a ke snížení mechanických vlastností materiálu.

Transkrystalické napadení, napadení přes krystaly - vzniká v důsledku vnitřního napětí nebo napětím vnějšími silami prochází přímo zrny kovu vznikají v kovu trhliny, které způsobují transkrystalovou korozi. Důsledkem tohoto napadení je nežádoucí změna mechanických vlastností kovu.

Selektivní a extrakční napadení, selektivní (výběrová) koroze se vyskytuje jen ve vybraných částech kovu, nejčastěji v místech mechanického poškození. Extrakční napadení mění strukturu krystalické mřížky a vyskytuje se u slitin s vícefázovou strukturou.

Na obr. 3-5 jsou schémata základních druhů korozního napadení, resp. základní druhy koroze kovů.



Obr. 3-5 Schéma základních druhů koroze kovů

Korozi podléhají téměř všechny materiály nejen kovy a jejich slitiny, ale také nekovové materiály keramické nebo silikátové (sklo, beton) i materiály organické (guma, plasty).

Koroze je závislá nejen na materiálu a korozním prostředí, ale také na rychlosti. Při ochraně materiálu proti korozi se snažíme ovlivňovat: *materiál - korozní prostředí - rychlost koroze.*

Z chemického hlediska je koroze takový děj, při kterém kov přechází do zoxidovaného stavu, tj. že probíhá oxidace. Oxidace je každá reakce, při které kov ztrácí ze svých atomů elektrony.

3.2 Charakteristika základní druhů koroze

Mezi nejčastější druhy se řadí koroze: chemická, elektrochemická a atmosférická.

3.2.1 Chemická koroze

Chemická koroze je takový děj, při kterém dochází k chemické reakci prostředí s materiálem (přesněji - atomy materiálu, které jsou v přímém sousedství s atomy okolního prostředí se vzájemně ovlivňují). V případě koroze kovů jde o přímý přestup elektronů z kovu do korozní zplodiny. K chemické korozi se řadí:

A) koroze kovů a slitin kovů v plynech za vyšších teplot;
B) koroze kovů a slitin kovů v redukujících plynných prostředích;
C) koroze kovů a slitin kovů v nevodivých kapalinách.

3.2.2 Elektrochemická koroze

Jak po přečtení výše uvedeného vyplývá, elektrochemická koroze je nejrozšířenější druh koroze, NOVÁK [8]. Elektrochemická koroze je děj, který probíhá za přítomnosti aktivního vodního roztoku - ***elektrolytu*.**

Do skupiny elektrochemické koroze se řadí:

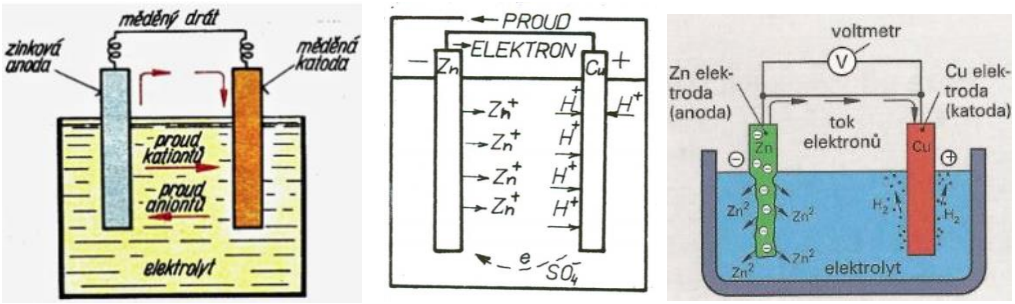
A) koroze kovů a slitin kovů ve vodivých roztocích elektrolytu (kyselé, neutrální, alkalické);
B) koroze kovů a slitin kovů působením tavenin louhů a solí;

C) atmosférická koroze;
D) půdní koroze;
E) koroze, tzv. bludnými proudy.

Elektrolyt je kapalné vodivé prostředí, ve kterém dochází k průchodu proudu vlivem pohybu iontů a elektronů. V elektrolytu vždy probíhá tzv. ***anodová a katodová reakce*** současně. Jejich vztah je natolik vzájemně závislý, že nemohou probíhat samostatně, pokud degradujícím kovem neprochází žádný vnější proud. Při ***korozi anody dochází k oxidaci*** a současně probíhá ***redukce na katodě***. Z chemického hlediska vyplývá, že musí být zachován počet odevzdaných a spotřebovaných elektronů v reakci.
Tím se mohou ionty a elektrony z kovu přenášet na větší vzdálenost než tu, kterou mají dva sousední atomy. Pak vzniká korozní článek, který je možno přirovnat ke galvanickému článku. Příčinou koroze je tedy tvorba **korozního galvanického článku**. Vznikne vodivé spojení mezi ***kovem*** (látkou), který vystupuje jako ***anoda***, a druhým kovem (látkou), který je ***katodou***. Materiál, který je v článku ***anodou*, *oxiduje a tedy koroduje.***

Obecně korozní článek mohou vytvářet dva kovy (např. zinek a měď), které se nachází v nějakém kapalném prostředí. Kapalné prostředí kovy vodivě spojuje. To lze vysvětlit na základě experimentu za vzniku elektrického článku, viz obr. 3-6 tak, že zinek i měď jsou vloženy do společné lázně (elektrolytu – vznikají z nich elektrody) a vyčnívající konce jsou vodivě spojeny, vznikne elektrický článek.
Měděná elektroda má proti vodíku kladný potenciál (je proti vodíku ušlechtilejší kov), naopak zinek má záporný potenciál (je proti vodíku méně ušlechtilý kov). Na elektrodách vznikne napětí a z měděné elektrody protéká proud na elektrodu ze zinku. Elektrony se pohybují ze zinkové elektrody. Zinková elektroda oxiduje a tím se stává anodou. Zinková elektroda se rozpadá – to znamená, že koroduje. S měděnou elektrodou se nic neděje a tedy je katodou.

Poznámka: **Pozor na označení anoda a katoda.**
Anoda: je elektroda na které probíhá oxidace. V případě galvanického článku je *záporným pólem*. V případě elektrochemického článku (tj. při elektrochemické korozi) je *kladným pólem*. Anoda může být tedy kladná i záporná.
Katoda: je elektroda na které probíhá redukce. V případě galvanického* článku je *kladným pólem*. *V případě elektrochemického článku (elektrolyzéru – tj. při elektrochemické korozi) je *záporným pólem*. Katoda tedy může být záporná i kladná.



Obr. 3-6 Schéma vzniku elektrického článku

Korozní galvanický článek vznikne také spojením dvou různých kovů ve vodivém prostředí. Je tedy zřejmé, proč nelze upevňovat měděný plech ocelovými vruty nebo nýty. Ze stejného důvodu je nutné provést galvanické pokovení ocele mědí naprosto dokonale, jinak by se ve štěrbinách vytvořil mikrogalvanický článek mezi ocelí a mědí. Ocel by se začala o to rychleji rozkládat.

Jak se různé kovy chovají v chemickém rozpouštědle nebo v elektrolytu, resp. jak jsou kovy schopny vytvářet korozní články, rozhoduje jejich elektrochemická ušlechtilost. Ušlechtilé kovy mají menší schopnost oxidace a tím méně vytváří korozní články než kovy neušlechtilé.

Elektrochemickou ušlechtilost kovů hodnotíme pomocí tzv. *standardního elektrodového potenciálu kovů* [V]. Je to napětí, které vznikne při ponoření kovu do elektrolytu s normální koncentrací kovových iontů proti vodíkové elektrodě, která byla zvolena za „0“ srovnávací stupnici. Vodíková elektroda je platinový drát obklopený platinovou černí nasycenou vodíkem při tlaku 0,1 MPa.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny vybrané kovy a jejich příslušné hodnoty standardního elektrodového potenciálu.

Tabulka 3.1 Hodnoty elektrodových potenciálů vybraných kovů

Kov	*Standardní elektrodový potenciál [V]*
Au	+1,36
Cu	+0,34
H_2	**0,00**
Pb	-0,12
Sn	-0,14
Co	-0,23
Fe	-0,42
Cr	-0,56
Zn	-0,77
Al	-1,33
Mg	-1,80
Na	-2,71
K	-2,92

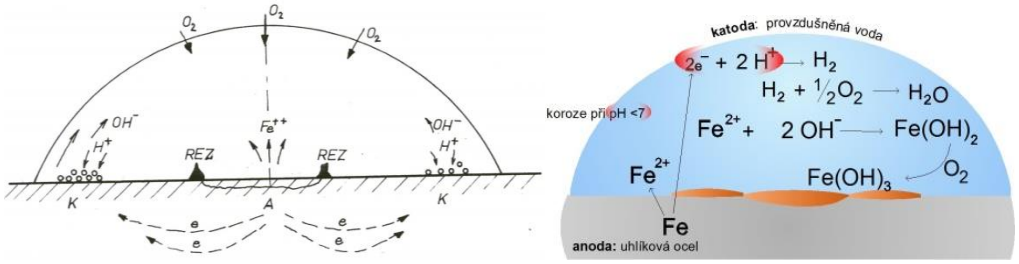
Tímto seřazením je dáno vodítko pro stanovení elektrochemické ušlechtilosti jednotlivých kovů. Vzájemný rozdíl potenciálu jednoho prvku proti druhému ve společném elektrolytu však nemusí přesně odpovídat rozdílu jejich elektrodových potenciálů. Zhruba však je možno říci, že kovy, které mají větší rozdíl elektrodových potenciálů, vytváří i článek s větším napětím.

Např. zinek má hodnotu standardního elektrodového potenciálu - 0,763 [V] a železo - 0,440[V]. To znamená, že povlak zinku chrání povrch železa, neboť jako anoda koroduje dříve zinek, než železo (protože Zn má zápornější hodnotu stand. elektrodového potenciálu, čímž chrání železo proti korozi). To se využíká při výrobě pozinkovaných plechů pro automobilový průmysl.

Článek uvedený na obr. 3-6 znázorňuje procesy elektrochemické koroze na strojních součástech. Analogie je několikerá. V makrorozměrech máme dvě součásti z různých kovů, které jsou spojeny mechanickým spojem a vytváří v místech spoje galvanický článek, je-li spoj pokryt elektrolytem. Elektrolytem může být jen nepatrně znečištěná voda. Elektrochemický článek vyvolá korozi obou součástí. Vedle toho probíhá současně ještě elektrochemický děj v mikrorozměrech, tj. na povrchu každé součásti ve styku s elektrolytem. V každém kovu mohou být např. přítomny vměstky (cizí částice), které způsobují odlišnosti elektrodového potenciálu. Tato místa se podle své elektrochemické ušlechtilosti stávají vůči sobě buď anodickými nebo katodickými a jsou důvodem koroze.

3.2.3 Atmosférická koroze

Atmosférická koroze je charakterizovaná podle možného korozního prostředí. Je to případ nejčastějších podmínek pro vznik koroze na strojních součástech. Ve vzduchu je přítomný nejen kyslík, ale také vodní pára i kondenzovaná voda. Ta není úplně čistá, průletem kapiček atmosférou v sobě rozpouští kyslík a nad obydlenými nebo průmyslovými oblastmi se i okyselí přítomností oxidu siřičitého, či uhličitého. Poměry v kapce vody naznačuje obr. 3-7. Kapka vody na povrchu kovové součásti působí jako elektrolyt zasahující anodická i katodická místa materiálů součástí.



Obr. 3-7 Schéma koroze v kapce vody

Nad katodou se voda rozkládá. Dvojmocné kladné ionty železa odcházejí do elektrolytu. Protože v elektrolytu je přítomen kyslík a voda, železo se slučuje přes své oxidy na hydroxid železa $Fe(OH)_2$, tj. rez, který se usazuje na rozhraní mezi anodou a katodou. Z anodického místa je hmota odnášena - *materiál koroduje*.

Jednotlivé druhy koroze nelze uvažovat odděleně, je nutno uvažovat komplexní korozní pochody a korozní napadení i zvláštní případy koroze.

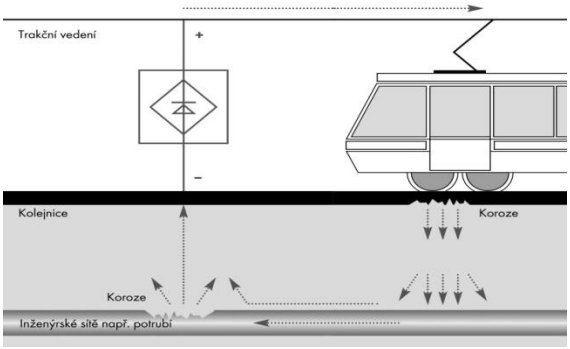
Pro průběh koroze kovů je důležité, jak jednotlivé kovy obecně odolávají korozi. Na obr. 3-8 je uvedena charakteristika kovů a jejich odolnost proti korozi. *Kovy, které se pasivují:* Mg, Al, Mn, Zn, Ni, Sn, Pb, Cu. *Korozivní kovy:* Li, K, Ba, Sr, Ca, Na, Fe. ***Kovy odolné vůči korozi:*** **Ti, Cr, Co, Ag, Au, Hg, Pt, Au.**



Obr. 3-8 Znázornění odolnosti kovů v závislosti na napětí E^0 [V]

3.2.4 Koroze bludnými proudy

Bludný proud je jev, který se vyskytuje při použití stejnosměrného napětí, u obvodů, kde je jen pól umyslně, či náhodně uzeměn. Je – li v blízkosti nějaké potrubí, pak bludný proud způsobuje elektrochemickou korozi. Rychlost koroze je závislá na intenzitě bludného proudu. Schéma vzniku bludných proudů je na obr. 3-9. ***Bludný proud je elektrický proud unikající z elektrických zařízení nedostatečně izolovaných proti zemi nebo používajících země jako zpětného vodiče,*** dle ČSN 03 8370. Negativní účinky bludných proudů jsou především v těch místech, kde bludné proudy z kovových konstrukcí vystupují do země (např. z úložných potrubí, nádrží, železobetonových objektů, armatur mostů, metalických kabelových plášťů).

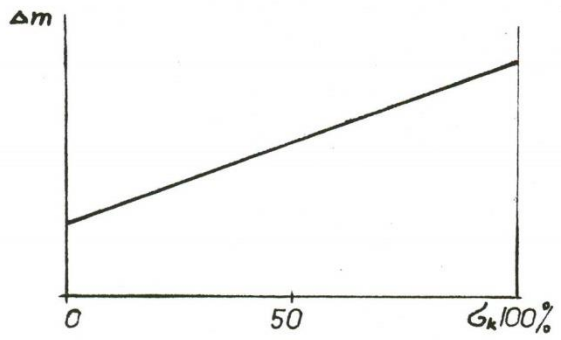


Obr. 3-9 Schéma koroze bludnými proudy

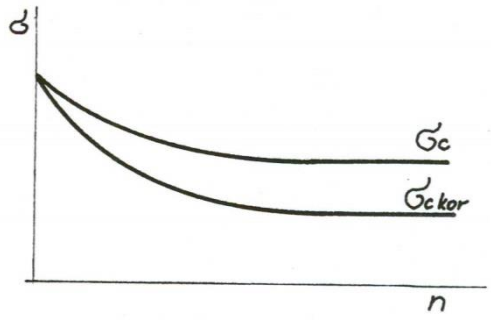
Tento druh koroze také vzniká na principu anodického a katodického procesu, ale s tím rozdílem, že zde na kov působí vnější zdroj stejnosměrného proudu (např. pro pohon vozidel elektrických drah). Vyskytuje se převážně u kovových úložných zařízení, které buď nejsou vůbec, nebo jsou nedostatečně odizolovány od půdního prostředí a jsou uloženy v blízkosti zdrojů, které bludné proudy vyvolávají. K těmto zdrojům patří především kolejová doprava elektrizovaná stejnosměrným proudem (vlaková doprava, tramvaje). Kladný pól napájecího zdroje je u většiny elektrizovaných tratí připojen k troleji, záporný pak ke kolejnici. Kolejnice jako zpětný vodič trakčního proudu není a ani nemůže být nikdy zcela odizolován od okolního prostředí (od země), část trakčního proudu se tedy dostává do země a v blízkosti trakční měnírny teče zpět ke zdroji elektrického proudu.

3.3 Vliv koroze na mechanické vlastnosti kovů

Koroze materiálu způsobuje jeho úbytek a tím se může měnit jeho únosnost. Současně je třeba brát v úvahu, že koroze při mechanickém napětí materiálu probíhá ještě rychleji. Závislost korozního úbytku hmotnosti materiálu (μm) na mechanickém napětí je lineární, viz obr. 3-10. Zde napětí je vyneseno v procentech meze kluzu (R_E). Korozní úbytek (μm) je lineárně úměrný zatížení součástí tahem. To znamená, že zmenší-li se nosný průřez korodující součásti, stoupne napětí, které ještě korozi urychlí. Na obr. 3-11 je průběh dvou Wöhlerových křivek, jedna je pro nezkorodovaný a druhá pro zkorodovaný materiál. Jak je zřejmé, koroze též značně snižuje mez únavy materiálu. Hodnota snížení je závislá na druhu koroze. Největší snížení způsobí pitting nebo mezikrystalická koroze, to proto, že tyto typy koroze způsobují jakési vruby v materiálu. Jak je obecně známo, vruby soustřeďují napětí a to muže být tak velké, že překročí i hodnotu meze pevnosti.



Obr. 3-10 Závislost korozního úbytku hmotnosti materiálu μm na mechanickém napětí (100% mechanického napětí je vztaženo k mezi kluzu)

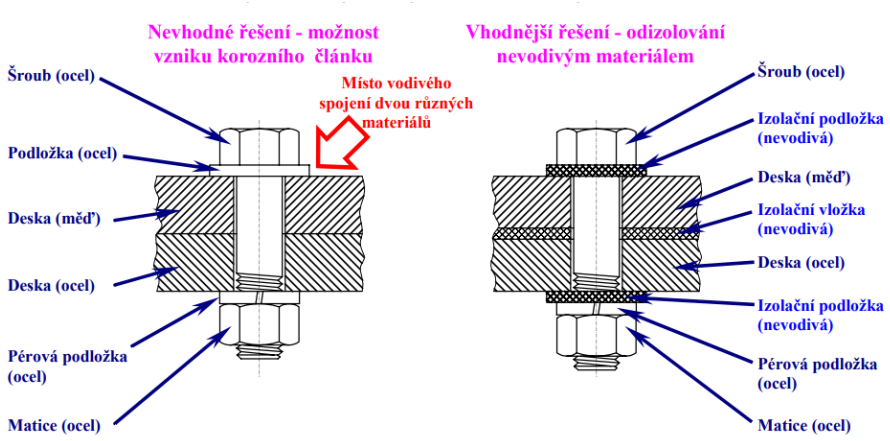


Obr. 3-11 Vliv koroze na hodnotu meze únavy

3.4 Obecné zásady pro předcházení koroze kovů

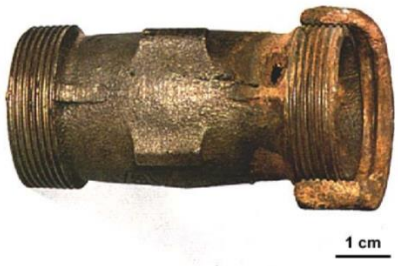
Při návrhu konstrukčních dílů, např. u plechů karoserií se vyvarovat *ostrým hranám*, které jsou nejčastěji iniciátory koroze. Dále a jejich spojování je nutno se vyvarovat ***vzniku korozního galvanického článku*** (makročlánek nebo mikročlánek)

Korozní makročlánek vzniká např. pokud se do ocelové nádrže naplněné vodou zašroubuje měděný šroub. Ocel (resp. Fe) má záporný potenciál – 0,42 V a měď má kladný potenciál + 0,34 V, viz tabulka 3.1. Protože ocel má záporný potenciál, stane se anodou, čímž se bude rozpouštět (bude ubývat). Měď má kladný potenciál, proto se stane katodou. Zde nám jde o to, že ocelový konstrukční díl bude ubývat a to je špatné řešení. Proto bychom neměli volit měděný (resp. mosazný) šroub. Podobným případem *vzniku makročlánku* nastane, když se dva kovy ponoří nebo se namočí vodivým prostředím. Nebo galvanický článek může vzniknout dotykem dvou stejných kovů s výrazně různou drsností povrchu. Je nutno také dávat pozor na vznik makročlánků při volbě různých spojovacích elementů, viz obr. 3-12.



Obr. 3-12 nevhodné a vhodné řešení šroubového spoje [7]

Vznik korozního makročlánku při spojování mosazného a litinového dílu viz obr. 3-13.



Obr. 3-13 Makročlánek, spojení mosazného dílu s litinou

Korozní mikročlánek, vzniká tehdy, když elektrody jsou mikroskopických rozměr. Korozní mikročlánek vzniká v materiálu, kde je nehomogenní struktura, např. ve struktuře slitin kovů, jako jsou slitiny Fe–C (oceli), strukturní složky jsou známé z rovnovážného diagramu Fe-C, atd. Příkladem vzniku korozního mikročlánku je koroze nelegované oceli.

Železo ve struktuře je méně ušlechtilý kov, viz tab. 3.1, proto tvoří katodu, která se rozpouští (ubývá). Kladnou elektrodu je uhlík. Protože obě elektrody jsou vodivě spojeny (tvoří strukturu oceli), vzniká elektrický proud, který podporuje ubývání železa.

3.5 Ochrana kovů a slitin kovů proti korozi

3.5.1 Obecné zákonitosti ochrany materiálu proti korozi

Korozní proces je velmi komplikovaný soubor dějů, který závisí na značném množství proměnných parametrů.

Ochranu kovového materiálu proti korozi lze provádět:
a) ***Úpravou korozního prostředí,*** tj. odstranění korozně aktivní složky z korozního prostředí. Tj. např. odstranění zbytkového množství kyslíku z napájecích vod (kyslík způsobuje nebezpečnou důlkovou korozi energetických zařízení) nebo snížení relativní vlhkosti vzduchu ve skladech nebo zavedení ochranné atmosféry při ohřevu kovů nebo jejich slitin během různých operácích s nimi. Úpravu korozního prostředí lze provést také přidáním látek, které zřetelně zpomalují průběh koroze. Jde o použití tzv. *inhibitorů* (to jsou látky, které brzdí korozní děj). Jejich použití je velmi časté při ochraně materiálu proti korozi.
b) ***Volbou materiálu,*** různé kovové materiály a jejich slitiny korodují s různou rychlostí nebo mají různou náchylnost k jednotlivým druhům koroze. Volba materiálu odolného vůči korozi vychází z hlediska:
- stálosti kovu a jeho slitin proti vzniku nejrůznějších sloučenin. Touto vlastností se vyznačují ušlechtilé kovy (zlato, platina, měď, nikl, molybden), které neoxidují v prostředí kyselin. Ocelové automobilové plechy příliš neodolávají kyselému prostředí.
- schopnost snadné a účinné *pasivace.* Pasivace je vytváření takového stavu na povrchu kovu, který odolává korozi. To je vytvoření korozně odolné oxidické vrstvy na povrchu kovu. Tuto vrstvu jsou schopné vytvářet např. antikorozní ocel, titan, hliník, atd.
- vytváření na povrchu kovů tlustých vrstev korozních zplodin, které odolávají korozi. Tuto schopnost má např. měď, zinek, olovo.
- použití materiálu s malým sklonem ke korozi. Tím se vyznačují např. austenitické chromniklové oceli pro stavbu chemických zařízení, která odolávají účinkům sirovodíku.

c) ***Volba vhodného řešení konstrukce*** nebo konstrukčního řešení kovového dílu je důležitá. Tak např. u výrobků z plechů, kam se řadí i karoserie automobilů, se koroze objevuje nejčastěji v záhybech. Také není vhodné vytvářet bimetalické spoje. Jako např. ocelovým šroubem spojovat materiály z jiných kovů nebo ocelový pozinkovaný plech spojovat měděným šroubem, kdy se koroze uplatňuje na kovu méně ušlechtilém, což je pozinkovaný ocelový plech. Není-li při spojení vyhnutí, je třeba mezi dva různé kovové materiály vkládat izolační vložky.

Na konstrukci je nutno odstranit štěrbiny, ostré úhly, prohlubně. Všechny tyto konstrukční prvky zadržují např. vodu, nečistoty a podporují korozi.
d) ***Provedení elektrochemické a elektrické ochrany materiálu***, podstata této ochrany spočívá v záměrné změně potenciálu kovu vůči danému elektrolytu. Tato změna je způsobena ovlivňováním velikosti proudu na rozhraní kov-elektrolyt. Tím, že ovlivňujeme polarizaci kovu chráníme jej proti korozi.

Rozlišujeme tři základní možnosti náchylnosti nebo odolnosti proti korozi kovu s elektrolytem:

- aktivní stav kovu - kov je náchylný na korozi;
- imunní stav kovu - koroze kovu prakticky neprobíhá;
- pasivní stav - kov je odolný ke korozi.

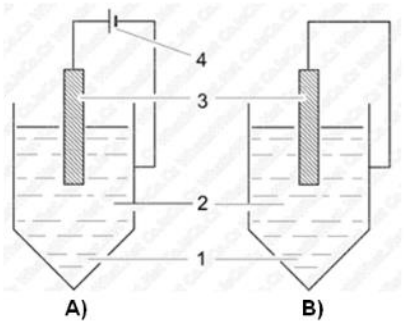
Účinkem stejnosměrného proudu lze výhodně působit na elektrochemické korozní pochody na povrchu kovu a dosáhnout tak výrazného zmenšení, příp. odstranění koroze. K tomu se využívá buď vnějšího zdroje proudu nebo úmyslného vytvoření galvanického článku, jehož jedinou elektrodou je chráněný povrch kovu.

Samostatnou oblastí těchto elektrických ochran jsou způsoby, jimiž se naopak vhodně zneškodňuje *stejnosměrný elektrický proud*, který nežádoucím způsobem vnikl na kov z jiných elektrických obvodů (tzv. bludných proudů).

3.5.1.1 Katodická a anodická ochrana kovů

Katodická a anodická ochrana, patří do skupiny elektrochemické ochrany kovů (hlavní roli tam sehrává elektrický obvod), jsou hlavními metodami ochrany kovů proti korozi.

Katodická ochrana - v elektrickém ochranném obvodu je ***chráněný kov*** proti korozi ***katodou***. Proud pro elektrický ochranný obvodu se dodává zvnějšku – jako zdroj stejnosměrného proudu. Nebo proud pro elektrický ochranný obvodu se získává připojením na *„obětovanou anodu“.*



1*- chráněné zařízení proti korozi,* ***2*** *– kapalina,* ***3*** *– anoda,*
4 *– vnější zdroj elektrického proudu*
A) *zapojením chráněného zařízení na záporný pól vnějšího elektrického zdroje*
B) *spojením s kovem – protektorem (obětovanou anodou).*

Obr. 3-14 Schéma katodické ochrany kovů proti korozi

Na obr. 3-14 je schéma elektrochemické ochrany kovů proti korozi. Jedná se o ochranu zařízení (které může být z oceli, mědi, mosazi, hliníku) proti korozi. Tuto ochranu lze provést dvěma způsoby, viz obr. 3-14:

A) ***katodickou ochranou*** – nebo-li katodickou polarizací, kdy se chráněné zařízení připojuje *na záporný pól vnějšího elektrického zdroje*;
B) ***obětovanou anodou***, tj. kov se kterým se spojuje chráněné zařízení. Obětovaná anoda – protektor má zápornější elektrochemický potenciál než chráněný kov. Chráněný kov (chráněné zařízení) se stává ***katodou***.
Jako protektor se používá nejčastěji deska zinku, hořčíku, popřípadě slitin hořčíku. Oba tyto způsoby ochrany A) a B) jsou katodickou ochranou materiálu

proti korozi. Katodická ochrana má značný význam pro ochranu před korozí zařízení uložených v půdě (potrubí, kabelů, popřípadě ocelových nádrží) a lodních trupů.

Na obr. 3-15 jsou uvedeny protektory, (tzv. ztracená anoda), které je možno použít při katodické ochraně kovů proti korozi. Hořčíkové lité anody lze použít k ochraně rozvodů plynu, nafty, vody v půdě nebo ve vodě. Páskové hořčíkové anody lze použít k ochraně trubek, nádrží a potrubních rozvodů. Hliníkové protektory se používají pro ochranu trupu lodí, dalších konstrukcí v přístavech. Zinkové elektrody se hodí pro ochranu všech ocelových konstrukcí.



1) – hořčíková litá anoda, 2) – páskové anody, 3) – hliníková litá anoda, 4) zinková litá anoda

Obr. 3-15 Ukázky protektorů „ztracená anoda“ pro katodickou ochranu kovů

Anodická ochrana - je založena na tom, že za určitých podmínek chráněný kov proti korozi přechází do stálého tzv. ***pasivního stavu.*** Tato schopnost je u ocelí, titanu a niklu. Dosažení toho stavu se dociluje vhodnou anodickou polarizací. Ochranný proud se získává z vedlejšího zdroje stejnosměrného proudu, z makročlánků nebo připojením speciálních protektorů (obvykle z různých oxidů) k chráněnému povrchu kovu. Hlavní využití této oblasti je ochrana armatur z korozivzdorných ocelí a titanu při působení účinků kyselin.

3.6 Způsoby povrchových úprav proti korozi

Povrchové úpravy materiálů strojních součástí slouží především při ochraně proti korozi. U některých výrobků, jako např. u *automobilů,* má povrchová úprava karoserie vedle odolnosti proti korozi splňovat i estetické hledisko.

Především v automobilovém a leteckém průmyslu se vyvíjí metody k ochraně materiálů před korozí.

Povrchové úpravy materiálů se provádí pomocí ochranných vrstev a povlaků.

Ochranná vrstva - vytváří se za vzájemného působení základního materiálu a prostředí. Vrstva je se základním materiálem neoddělitelně spojena.

Ochranný povlak - je vytvořen na základním materiálu na základě jeho přilnavosti; leží na původním povrchu materiálu.

Při povrchových úpravách materiálů se nejčastěji uplatňují právě *povlaky*.

Jednotlivé ochranné povlaky se vzájemně liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, chemických složením a technologií jejich vzniku. To vše určuje charakter jejich ochranného účinku, způsob jejich použití, možnosti provedení, trvanlivost i jejich cenu.

3.6.1 Příprava součástí před prováděním povrchových úprav kovů

Před vytvářením povlaků nesmí být povrch základního materiálu vlhký, mastný, zrezivělý a musí mít potřebnou drsnost.

Podle charakteru procesu se *čištění* provádí buď způsobem mechanickým nebo chemickým. Nejčastěji se používá jejich kombinace, např. chemické odmašťování se současným kartáčováním.

1) Mechanické čištění

Broušení a kartáčování - při broušení se povrchy součástí brousí na stojanových bruskách; kotouče jsou na bázi Al_2O_3 nebo SiC. Nebo se používají pásové stoly. Pro broušení menších předmětů slouží brusky, větší předměty se brousí na stolech. Práce je celkem namáhavá. A její kvalita je závislá na schopnosti a dovednosti brusiče.

Kartáčování se používá pro dva druhy úprav. Při odstraňování hrubých nečistot (rzi, starých nátěrů) a dále je zařazena jako operace po broušení před leštěním, aby se odstranila oxidická vrstva. Používá se drátěných kartáčů nebo drátěných kotoučů nebo kotoučů z přírodních syntetických vláken.

Omílání - jde o úpravu povrchu materiálu volným brusivem. Brusivo se může pohybovat rotací, vibrací, atd. Omílání se provádí v omílacím bubnu. Způsob je ekonomicky velmi výhodný, na odbornost obsluhy jsou kladeny malé požadavky, jde jen o to, aby nedošlo k poškození dílu při vkládání do bubnu.

Otryskávání - provádí se pomocí vodních nebo pneumatických tryskačů s ručně ovládanou pohyblivou pistolí. Tryskače mohou být stolové nebo komorové. Používá se pro čištění výkovků, odlitků, svařenců, atd. Náklady jsou závislé na otryskávacím zařízení.

Další možností čištění je pomocí rotujících ocelových kartáčů nebo broušením pomocí filcových kotoučů s brusnou pastou. Drobné součástky se omílají (hromadně brousí a leští) ve speciálních válcových bubnech s dřevěnými pilinami a brusnými tělísky (např. tvaru kuliček nebo různých nepravidelných tvarů).

2) Chemické čištění

Odmašťování - jak říká název je odstraňování olejů a nejrůznějších mastných podílů z kovových materiálů, které se budou dále povrchově upravovat. Rozlišujeme několik typů odmašťování:

a) odmašťování ve vodných roztocích - mastnoty jsou podle své povahy převáděny do teplého roztoku. Prostřednictvím alkálií jsou mastnoty typu mastné kyseliny, rostlinné a živočišné tuky převáděny do roztoku nebo mastnoty na bázi minerálních tuků jsou převáděny pomocí emulgátorů (syntetických odmašťovadel nebo mýdel) do emulze. K tomu slouží vytápěné jednoduché vany do nichž se ponořují předměty. Lze použít téměř ve všech případech, je jen rozměrové omezení součástí. Dále se používají komorové a průchozí postřikovací stroje. Zde je důležité, aby členitost výrobku nebránila intenzitě postřiku. Není vhodné tam, kdy daný materiál nemusí snášet charakter vodního roztoku.

Po čištění je povrch součásti mokrý a je nutno jej sušit, což proces zdražuje.

b) odmašťování v rozpouštědlech - používá se organických rozpouštědel (syntetické látky, benzin, nafta). V současné době se dbá na výběr těchto látek

nejen ze zdravotního, ale také ekologického hlediska. Nejde použít tam, kde kovové součásti obsahují např. nátěr, pryž, plasty, atd. Tyto látky se tímto způsobem odmašťování leptají nebo rozpouštějí. V technické praxi se pro odmašťování používá především *trichlóretylen* (trichlor), který však má charakteristický zápach a je třeba používat speciální uzavřená zařízení. Proto se dnes používají saponáty a mýdlové roztoky nebo roztoky sody, zahřáté na teplotu cca 60 až 70°C. Po odmašťování následuje oplach čistou vodou s alkoholem, který zamezuje korozi.

c) odmašťování párou - sytá nebo mokrá pára s dostatečnou rychlostí proudu dobře odmastí a očistí povrch kovové součásti i od mechanických nečistot. Není žádný škodlivý odpad. Tento způsob odmašťování je vhodný pro velké předměty. Je nutný vyvíječ páry.

d) emulzní odmašťování - spočívá v ponořování předmětů do organických rozpouštědel, je to v podstatě kombinace způsobů (a, b). Rozpouštědlo rozpouští mastnoty, snižuje jejich viskozitu (vnitřní tření) a proniká do vrstvy nečistot za pomocí tzv. *emulgátoru* (emulgátor je organická látka). Po určité době se předměty z rozpouštědla vyjmou a opláchnou vodou. Přitom se nečistoty i rozpouštědlo z povrchu předmětů odstraní ve formě vodní emulze.

Proces je velmi účinný při odstraňování velkého množství mastných nečistot. Výhodou je, že emulzní odmašťování se provádí při normální teplotě. Nevýhodou je likvidace emulzních zplodin, které mohou znečišťují odpadní vody.

Moření neboli dekapování je odstraňování korozních produktů (kovových oxidů) z povrchu kovových součástek a výrobků za pomoci vodního roztoku kyselin nebo alkálií. To způsobuje odstraňování tenkých oxidických povlaků (okují) znečišťující materiál. Zbytek okují, který se neuvolnil při moření, se odstraní mechanicky. Nejčastěji se k moření používají kyseliny - solná, sírová, dusičná, fluorovodíková. Např. zinek a hliník lze mořit v alkalických roztocích. Moření lze provádět ve vanách pouhým ponořením. Dnes se používají mořící autoklávy. Je vhodné pro součásti menších rozměrů, nevhodné je pro oceli vysoké pevnosti, kdy vodík z kyselin by mohl ovlivnit mechanické hodnoty (vzniká vodíková křehkost).

Ke způsobům moření se řadí také odrezování, což je operace, při které se z povrchu ocelových předmětů odstraňují oxidy vzniklé při atmosférické korozi. *Odrezování* je též čištění součástí, které zbavujeme rzi – hydroxidu železa. Provádí se v odrezovačích (oplachových nebo bezoplachových). Oplachovým odrezovačem je např. kyselina fosforečná s přídavkem různých alkoholů, které slouží k zamezení nové tvorbě rzi po odpaření vody. Tento odrezovač rozpustí nebo alespoň uvolní hydroxid železa, aniž poškodí železný základ. Odstranění rzi má značný význam jako ochrana proti další korozi. Rez je hygroskopická tak, že způsobuje pokračování koroze i pod vrstvou laku, pokud nebyla odstraněna. Bezoplachové odrezovače převádí hydroxid železa na sloučeniny, které odstraňují korozi.

Nejčastěji se používá odrezovač na bázi kyseliny fosforečné. A jeho obchodní název je Odrezovač (lze jej koupit v prodejnách drogerie).

Leštění - se provádí za účelem zvýšení hladkosti povrchu na stejném zařízení jako broušení. Místo brusných tělísek se používají jemné leštící prostředky, jako např. pemza, křída a leštící pasty.

3.6.2 Vytváření kovových povlaků

Vytváření tenkých ochranných povlaků popř. ochranných vrstev na povrchu kovových součástí slouží především k ochraně proti atmosférické korozi, ty mohou být kovové a nekovové. Kovové povlaky se zhotovují různými způsoby, ve strojírenství jsou nejpoužívanější:

a) chemické pokovování;
b) elektrochemické (galvanické) pokovování;
c) pokovování v roztavených kovech;
d) žárové stříkání kovů.

Nekovové povlaky nebo vrstvy jsou zhotovovány:

A) smaltováním;
B) vytváření povlaků pomocí organických nátěrů.

V technické praxi existuje celá řada povrchových úprav, které lze rozdělit do 6 hlavních skupin a dalších podskupin, viz tab. 3.2.

3.6.2.1 Chemické pokovování

Chemicky lze vytvářet kovové povlaky z mědi, cínu, niklu, stříbra. Vylučování kovů se provádí v lázních, do kterých nepřivádíme z vnějšku proud, avšak proud se vytváří přímo v lázních vlivem rozdílného potenciálu kovu, který pokovujeme a roztoku soli kovu, kterým pokovujeme. Podstatou chemického pokovování je vylučování ušlechtilejšího kovu na povrchu kovu méně ušlechtilým vlivem potenciálních rozdílů obou kovů v roztoku nebo vyredukováním ušlechtilejšího kovu z jeho soli redukčním činidlem. Většinou se pokovovací lázeň skládá ze soli kovu, který má být vyloučen a z redukčního činidla, které vyredukuje kovovou sůl na kov. Lze pokovovat i velmi členité předměty. Vytvořený povlak má ve všech místech stejnou tloušťku. Nevýhodou je malá produktivita práce.

Tabulka 3.2 Přehled základních způsobů povrchových úprav kovů

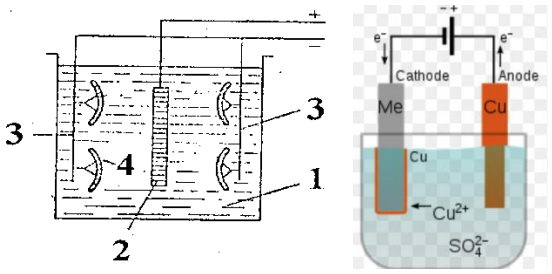
1. Povrchová úprava Chemická	- oxidace		
	- chromátování		
	- fosfátování		
	- eloxování		
2. Pokovování	A. termické	- ponořování do roztavených kovů	- zinkování
			- cínování
			- poolovování
			- kadmiování
			- hliníkování
		- difúzní	- zinkování
			- hliníkování
			- chromátování
		- parami kovů nebo plynů	

<table>
<tr><td rowspan="14"></td><td></td><td>- amalgámem</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="10">B. elektrochemické</td><td>- bez elektrického proudu</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="8">- elektrickým proudem</td><td>- mědění</td></tr>
<tr><td>- mosazením</td></tr>
<tr><td>- niklováním</td></tr>
<tr><td>- chromováním</td></tr>
<tr><td>- zinkováním</td></tr>
<tr><td>- kadmiováním</td></tr>
<tr><td>- stříbřením</td></tr>
<tr><td>- cínováním</td></tr>
<tr><td>- katodové rozpouštění kovů</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">C. mechanické</td><td rowspan="6">- stříkání kovů</td><td>- zinkování</td></tr>
<tr><td>- hliníkování</td></tr>
<tr><td>- poolovování</td></tr>
<tr><td>- cínování</td></tr>
<tr><td>- kadmiování</td></tr>
<tr><td>- mědění</td></tr>
<tr><td>- plátování</td><td></td></tr>
<tr><td>3. Povlaky barev a laků</td><td colspan="2">- natírání
- stříkání
- elektroforeticky</td></tr>
<tr><td>4. Smaltování</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">5. Povlaky asfaltem, dehtem a kaučukem</td><td>- namáčení</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>- ponořování</td></tr>
<tr><td>- postřik</td></tr>
<tr><td>6. Povlaky plasty</td><td>- lepení</td><td></td></tr>
</table>

3.6.2.2 Elektrochemické (galvanické) pokovování

Galvanické pokovování je jedním z nejrozšířenějších způsobů vytváření povlaků. Důvodem je vysoká přesnost vylučovaných povlaků, tloušťky povlaků dosahují 10^{-3} až 10^{-4} mm. Při vhodném složení lázně lze prakticky vyloučit na povrchu kovových součástek všechny kovy (technicky nejpoužívanější jsou zinek, měď, cín, chróm, nikl).

Princip pokovování je založen na průchodu stejnosměrného elektrického proudu roztokem vhodné soli příslušného kovu, který se vylučuje na záporném pólu - *katodě* a zde krystalizuje. Katodu tvoří pokovované součástky. Při elektrolytickém pokovování se postupuje tak, že máme tzv. galvanickou vanu s dvěma elektrodami (katodou, anodou). Na katodu navěsíme pokovované součástky. Do vany dáme příslušnou pokovovací lázeň. Anoda je tvořena kovem, kterým pokovujeme. Kov na anodě přechází v ionty - rozpouští se. Tím se udržuje v roztoku rovnováha. Existují způsoby, kdy se anoda nerozpouští a kov se do lázně přidává ve formě solí.



1 - pokovovací lázeň, 2 - anoda, 3 - katoda, 4 - pokovované předměty

Obr. 3-16 Schéma galvanického pokovování a galvanické nanášení mědi

Galvanické mědění - povlaky mědi slouží spíše jako podklad pro cínování, niklování, popř. stříbření, zlacení. Dnes se používají lázně s hlavní chemikálií $CuSO_4.5H_2O$.
Galvanické zinkování - provádí se pro ochranu ocelových součástí proti korozi. Dnes se zinkují ocelové plechy pro výrobu karoserií v automobilovém průmyslu.
Galvanické niklování - používá se pro ochranu ocelí, mědi, zinku a jejich slitin.
Galvanické chromování - používá se pro ochranu proti korozi a zlepšení vzhledu. Proces je odlišný proti ostatním způsobům galvanického pokovování. Vyloučený chróm nevzniká rozpouštěním chromové anody, ale ve formě anionu v elektrolytu tvořené kyseliny chromové.

Kvantitativně se proces elektrolýzy řídí *Faradayovými zákony*. Z nich vyplývá, že množství látky uvolněné elektrolýzou je přímo úměrné intenzitě elektrického proudu procházejícího elektrolytem a době pokovení. Pro praktické pokovení existuje vztah, kterým lze vypočítat tloušťku povlaku, resp. dobu vylučování kovu:

$$h = \frac{I.t.k.r}{10.P.d}, \qquad (15)$$

kde značí: h - tloušťku povlaku [μm];
I - proud [A];
t - čas [s];
k - elektrochemický ekvivalent [mg/A.s];
r - proudovou účinnost [%];
P - plochu pokoveného předmětu [cm^2];
d - měrnou hmotnost povlakového kovu [$g.cm^{-3}$].

<u>Poznámka</u>: μm (mikrometr) 1 μm = 0,001 mm

3.6.2.3 Pokovování v roztavených kovech

Očištěné kovové předměty se ponořují do lázně povlakového kovu, která je ohřátá na teplotu blízkou bodu tavení. Touto metodou lze poměrně jednoduše vytvořit ochrannou protikorozní vrstvu o dostatečné tloušťce povlaku s malou pórovitostí. Takto se pokovují ocelové a litinové předměty, ocelové plechy, pásy, trubky a dráty. Je to jednodušší způsob ochrany než je galvanické pokovování, ale tyto povlaky jsou hrubší a méně vzhledné. Základní podmínkou je, aby teplota tání základního kovu, na kterém se vytváří povlak, byla vyšší než

kovu, ze kterého se vytváří povlak. Z tohoto důvodu se tato metoda používá pro nanášení kovů s poměrně nízkou teplotou tání: zinek (420°C), cín (232°C), olovo (327°C) hliník (660°C). Mechanismus vytvoření povlaku je na základě tzv. difúze (podstatou je pronikání atomů povlakového kovu do atomové mřížky základního kovu), čímž vzniká difúzní mezivrstva, která spojuje povlak se základním materiálem.

Pro strojírenství mají hlavní význam povlaky zinkové.

Zinkování - je velmi účinná a levná ochrana, která chrání materiál proti korozi ve vnější atmosféře a ve vodě. Tloušťky povlaku bývají 20 až 100 μm. U nás lze tímto způsobem zinkovat díly do délky 8 m, především konstrukční prvky.

Cínování - se používá k ochraně proti korozi potravinářských strojů a zařízení.

Olověné povlaky - mají význam především jako antikorozní povlak pro kyselá prostředí.

Jednotlivé způsoby pokovování nejsou odborně náročné, avšak jsou fyzicky namáhavé v nepříjemném prostředí.

3.6.2.3.1 Povlaky stříkané za žáru (metalizace)

Žárové stříkání kovů (metalizace) nebo-li šopování jsou povlaky, které se získávají za žáru a dovolují vytvářet na velmi čistém a dobrém povrchu součástí povlaky téměř ze všech kovů. Výhodou je, že lze tímto způsobem nanášet povlaky i na rozměrné předměty. Přitom je možno nanášet kovy i na nekovové materiály.

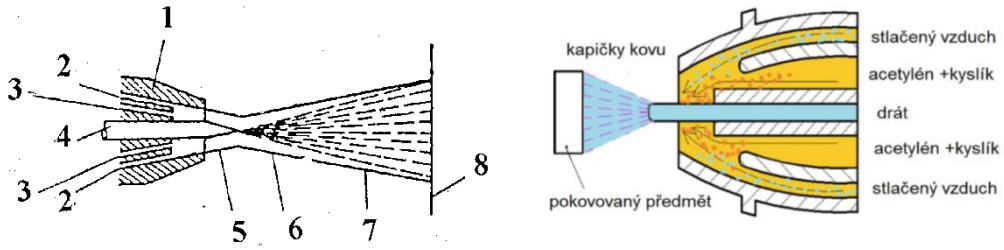
Princip metalizace je v tom, že nejprve dochází k natavení povlakového kovu a pak jeho rozstříknutí stlačeným vzduchem na upravený povrch předmětů. Podle toho jakým způsobem dochází k natavení stříkaného kovu, rozdělujeme metalizaci na:

a) plynovou (k natavení dochází v plynovém plameni do teploty 2850°C);
b) elektrometalizaci (k natavení je použit elektrický oblouk do 3500°C);
c) plazmové (je možno použít nástřik kovů s vysokou teplotou tání až do 20000^{o}C);

***Poznámka**: Plazma je čtvrté skupenství hmoty, představuje soubor velkého počtu částic bez pevné vzájemné vazby.*

Materiál, který se žárově stříká, může být ve formě drátu, tyčinky nebo prášku. Zařízení je v podstatě stříkací pistole různé konstrukce podle druhu metalizace (plynová, elektrometalizace, plazma). Metalizací se získávají vrstvy 0,1 až 1,0 mm. Nastříkaný povlak je křehký, tvrdý, velmi odolává tlaku. Na obr. 3-17 je schéma trysky pistole pro plynovou metalizaci drátem.

V současné době se uplatňuje i žárové stříkání *keramických povlaků* plazmovým stříkáním. Získáváme nejen nástřiky keramických materiálů, ale také kovo-keramických materiálů.



1 - tryska pistole; 2 - přívod vzduchu, 3 - přívod plynu; 4 - povlakový kov ve formě drátu, 5 - zóna natavení kovu; 6 - zóna rozpadu roztaveného kovu; 7 - kužel stříkaného kovu, 8 - upravený povrch materiálu

Obr. 3-17 Schéma trysky pro plynovou metalizaci drátem [13]

3.6.2.4 Pokovování ve vakuu

Je to též tepelný způsob nanášení povlaků kovů na předměty. Způsob je založen na vytváření povlaků odpařováním kovů ve *vakuu*, tj. ve vzduchoprázdném prostoru, kde je velmi nízký tlak 10^{-4} až 10^{-5} kPa. Zde je povlakový kov zahříván na teploty vyšší než je jeho teplota opařování. Tím dochází k odpařování kovu do vzduchoprázdného prostoru a k současnému zkapalnění jeho par na chladných předmětech umístěných do vakuové komory. Tento způsob umožňuje nanášet povlaky tenké, rovnoměrné tloušťky s vysokým leskem. Lze pokovovat i nevodivé předměty. Takto se získávají povlaky ze stříbra nebo hliníku.

3.6.3 Vytváření nekovových anorganických povlaků a smaltů

Nekovové anorganické povlaky jsou konverzní povlaky (fosfátování, oxidace, pasivace) a keramické smalty.

Konverzní povlaky - vznikají přeměnou (konverzí) vlastního povrchu kovu na chemické sloučeniny, které pevně lpí na povrchu upraveného kovu a dávají mu požadované funkční vlastnosti.
Fosfátování - na povrchu součástí z oceli, zinku a hliníku se vytváří povlak daného fosforečnanu podle použitého fosfatizačního přípravku. Povlaky nerozpustných fosforečnanů jsou velmi tenké (0,5 až 2 μm). Fosfátuje se většinou v lázni ponorem za teploty až 75°C. Většinou se používá fosfátování dílů v automobilovém průmyslu jako podkladový povlak pro organické povrchové úpravy. Povlaky z fosforečnanů jsou šedé až tmavě šedé. K hlavním důvodům fosfátování patří to, že fosfátováním se vytváří nejen ochranný povlak materiálu proti korozi, ale také tvoří výbornou nosnou vrstvu pod nátěr.
Oxidace - je proces výroby povlaků kovů pomocí uměle vytvořené oxidace. Oxidace chrání předměty před korozí a dodává předmětu dekorační vzhled. Typickým oxidačním procesem je *černění oceli* ve vhodných vodných roztocích. Tento způsob se používá pro povrchovou úpravu kovových částí zbraní. Tloušťka těchto povlaků bývá 0,5 až 0,8 μm.

Jiným způsobem oxidace je *barvení kovů za zvýšené teploty.* Tento způsob povrchové úpravy ocelí je založen na tvorbě oxidů. Na povrchu oceli se při zvýšené teplotě vytváří různé oxidy, kterým odpovídá určité zabarvení.

Povrch součástí musí být před touto povrchovou úpravou dostatečně odmaštěn a vyleštěn. Použití této metody je pro drobné předměty, které se vkládají do bubnu. Buben se vkládá do elektrické nebo plynové pece a zde se otáčí. Předměty se zahřívají na požadovanou teplotu. Vychladnuté předměty se dále lakují a konzervují v oleji.

Dalším způsobem je oxidace hliníkových předmětů, kdy se vytváří oxid hlinitý (Al_2O_3). Je to elektrochemický proces, známý pod pojmem *eloxování.* Tento proces spočívá v oxidaci předmětů z hliníku a jeho slitin ve vodném roztoku kyseliny sírové (H_2SO_4) nebo kyselině chromové, popř. kyselině šťavelové. Předmět je zapojen jako anoda, katoda je hliníková.

Tento způsob získání povrchové ochrany lze podle rozdělení zařadit jako oxidaci, ale současně jako způsob galvanického pokovování.

Pasivace - je chemický způsob, kdy vytváříme ochranný povlak materiálu proti korozi. Povrch kovu buď nemění svůj vzhled (např. pasivace cínu) nebo mění barvu (např. pasivace zinku), avšak neztrácí charakter příslušného kovu. Nejrozšířenějším způsobem pasivace je chromátování. Na povrchu součástí se vytváří povlak chromových sloučenin, jejichž základem je dvojchroman draselný ($K_2Cr_2O_7$). Tento povlak chrání kovové součásti před lehkým korozním napadením.

Smalty - jsou skelné povlaky anorganického původu vytvářené na kovovém povrchu. Aby smalt na kovovém povrchu dobře držel, nanáší se ve formě taveniny. Smalty jsou tvrdé, ale křehké jako sklo, lesklé, hladké. Mají vysokou odolnost proti chemikáliím, ale neodolávají mechanickému a tepelnému namáhání. Pro výrobu smaltů jsou vhodné rovinné plochy. Princip smaltování spočívá v tom, že se na očištěný kovový povrch nanáší jemně mletá *frita* (modifikovaná sklovina) buď ve vodní suspenzi nebo jako suchý prášek, která pak vysokou teplotou slínuje (smalty pro ocel asi 800°C, pro hliník cca 580°C). Povlak je tvořen složitými křemičitany s větším obsahem kovových kysličníků a uchovává si charakteristické vlastnosti skla. Většinou se smalty nanáší stříkáním. Při nanášení za sucha (práškování) se předměty po vyjmutí z ohřívací pece uvolňují na otočném polohovadle a práškováním pomocí bronzových sít se naprašuje keramický smalt. Při máčení se používá nádrží na tekutý smalt a pro polévací metodu se používají stoly. Mokré smalty se suší v sušárnách nebo infrazářiči. Po vysušení se smalty vypalují v elektrických nebo plynových pecích při teplotách 800 až 850°C.

3.6.4 Vytváření povlaků z organických nátěrů

Organické povlaky z nátěrových hmot představují nejrozšířenější způsob povrchové úpravy výrobků. To je dáno poměrně vysokým ochranným účinkem nátěrových systémů a zároveň i snadnou dostupností a způsobem vytváření těchto povlaků.

Nátěrových hmot se používá pro zhotovování povlaků, které především povrch výrobků chrání a zlepšují jejich vzhled, ale také pro speciální účely (např. matovací, svítící, elektrovodivé, atd.).

Nátěr je souvislý povlak požadovaných vlastností vzniklý nanesením a zaschnutím jedné nebo několika nátěrových vrstev na upravený povrch. Podle počtu nanesených vrstev jsou nátěry jedno nebo vícevrstvé, které se dělí do skupin podle účelu, vlastností, vzhledu a pořadí v nátěrovém systému.

Nátěrové hmoty, které se používají k vytváření nátěrů, jsou tekuté až pastovité hmoty, které se na povrch nanáší v tenké vrstvě a vytvářejí souvislý film. Nátěrové hmoty se skládají ze tří hlavních složek:

a) filmotvorné složky - netěkavé látky, které mají schopnost vytvářet tenkou souvislou transparentní vrstvu. Jsou to syntetické a přírodní pryskyřice, deriváty kaučuku a celulózy, vysýchavé oleje;
b) těkavé složky - upravují tekutost nátěrových hmot, aby při použití byly dostatečně tekuté. Jsou to rozpouštědla a ředidla;
c) pigmenty, plniva a barviva - dávají nátěrové hmotě barevný odstín a krycí mohutnost. Pigmenty jsou anorganické látky, které dávají nátěrové hmotě krycí schopnost a upravují její antikorozní vlastnosti (inhibiční pigmenty - suřík, zinková žluť, zinkový prach, atd.).

Nátěrové hmoty se třídí podle *základní filmotvorné složky,* jak uvádí tab. 3.3.

Tabulka 3.3 Druhy filmotvorných složek nátěrových hmot

Značka filmotvorné složky	Druh filmotvorné složky
A	asfaltové
C	nitrocelulózové, estercelulózové, étercelulózové
H	chlórkaučukové
L	lihové
O	olejové, fermežové
S	syntetické, polymerové, rezolové, polyakrylátové
V	vodové, emulzní

Podle obsahu a druhu pigmentů se dělí na:

a) ***základní*** - obsahují inhibitory koroze, nanáší se bezprostředně na povrch součástí;
b) ***vrchní*** - emaily, zaměřené se zřetelem na estetičnost nátěrů.

Dále nátěrové hmoty dělíme na transparentní a pigmentové.

Transparentní nátěrové hmoty - zanechávají průhledný film. Jsou bez pigmentů, obsahují jen filmotvorné složky nebo rozpouštědla, ve kterých jsou filmotvorné složky rozpuštěny.

Pigmentové nátěrové hmoty - vytvářejí vždy barevný neprůhledný krycí film a obsahují jemně rozptýlené pigmenty, popř. plniva. Dělí se dále na nátěrové barvy a nátěrové tmely. Podle zasychání rozdělujeme nátěrové hmoty na:

- fyzikálně zasychající - tj. pouhým odpařením rozpouštědla;
- chemicky zasychající - tj. vlivem vnitřních přeměn filmotvorných složek.

Nátěrové hmoty mají různé technologické vlastnosti, které rozhodují o technice nanášení na povrch.

Vlastnosti nátěrových hmot závisí na vlastnostech filmotvorné složky. Je třeba mít na zřeteli, že povlaky z nátěrových hmot jsou velmi tenké, nejčastěji 50 až 100 μm. Obecně také platí, že povlaky z nátěrových hmot, které se vytvrzují (vypalují) při vyšší teplotě, jsou tvrdší a vzhlednější než hmoty, které schnou za normální teploty.

Současně také obecně platí, že čím tlustší vrstva se nátěrem vytvoří, tím více nátěr chrání základní materiál proti vnějším vlivům. Vzhledem k tomu, že nátěry se nevytváří všude stejně tlusté, např. na hranách jsou vždy tenčí než na plochách. To je důvodem, proč se nátěrové povlaky porušují nejčastěji na hranách.

Vytváření nátěrů je nejobecnější technologie povrchových úprav vůbec. Nátěry jsou vhodné pro všechny přírodní podmínky a většinu průmyslových prostředí, kde se vyžaduje zachování kovového povrchu výrobku, zařízení, atd. Omezujícím činitelem pro použití nátěrů je často teplota prostředí než jeho agresivita. Se stoupající teplotou klesá použitelnost nátěrů. Dnes se v automobilovém průmyslu používají vodou ředitelné nátěrové hmoty.

3.6.4.1 Princip a technologie vytváření nátěrů

Nátěrová hmota se ve vhodné konzistenci nanese v tenké vrstvě na upravený povrch, kde po čase zaschne. Proces a rychlost zaschnutí je závislý na druhu filmotvorné složky a někdy je možno jej urychlit teplem. Nátěrové hmoty, které zasychají pouhým odpařením rozpouštědla, mají krátkou dobu zasychání a vytváří velmi tenké (10 μm), pórovité povlaky, které je nutno mnohokrát opakovat (např. 6 krát i více krát). To se týká nátěrových hmot nitrocelulózových, chlór kaučukových, asfaltových, na bázi PVC, atd.

U ostatních nátěrových hmot probíhají při zasychání chemické reakce, které vedou zpravidla k zvětšení molekulové hmotnosti filmotvorné složky a tím i ke změně vlastností.

Nátěrové hmoty, které k vysýchání nepotřebují vzdušný kyslík a obsahují minimální množství těkavých složek, je možno jednotlivé vrstvy nanášet v tloušťce cca 0,1 mm. Pak není nutno vytvářet mnoho vrstev. To je především u nátěrových hmot na bázi syntetických pryskyřic (epoxidových, polyesterových, polyuretanových).

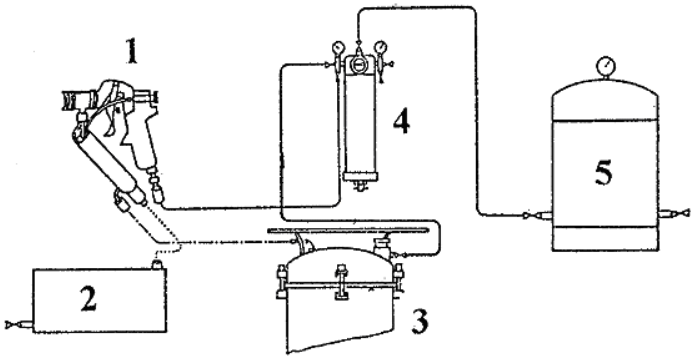
Technologie vytváření nátěrů - nátěrové hmoty se nanáší na dostatečně očištěný a předem upravený předmět. Provádíme-li obecně nátěry na karoseriích automobilů, pak je nutno karoserii nebo její části dostatečně odmastit, popř. mořit, atd., to závisí na technologických předpisech zhotovování povlaků nátěry. Nátěrový systém se skládá ze dvou nebo více vrstev nátěrů. Často je vytvořený z rozdílných nátěrových hmot nátěru. Nátěrové hmoty jsou: (napouštěcí, základní, vyrovnávací, podkladové, vrchní). *Základní nátěr* je vytvořen ze základní nátěrové hmoty a *vrchní nátěr* je vytvořen z příslušné požadované nátěrové hmoty, která má nejen ochranný účel, ale také estetický.

Nátěrové hmoty lze na povrch součástí nanášet třemi způsoby: roztíráním, stříkáním, máčením nebo poléváním.

1. ***Roztírání štětcem nebo nanášení válečkem*** - je to způsob velmi pracný. Nátěry štětcem nejsou příliš vzhledné. Tyto metody nelze příliš mechanizovat.
2. ***Stříkáním*** - nátěrová hmota se rozprašuje vzduchem - pneumatické stříkací pistole, která je na obr. 3-18, nebo vysokým tlakem.

Vývoj této technologie se prudce rozvíjí a je snaha, aby se snížily ztráty nátěrových hmot, proto se vytváří zařízení, která uplatňuje stříkání ohřátých nátěrových hmot. Současně se zvyšují nároky na zvyšování kvality životního prostředí. Takto vyrobené povlaky jsou velmi vzhledné a kvalitní.

3. ***Máčení nebo polévání*** - zcela jednoduchý způsob, avšak je problém se získáním stejnoměrné tloušťky povlaku. Proto tyto způsoby se hodí k vytváření povlaků na součástech, od kterých se nevyžadují estetické nároky.



1 - stříkací pistole; 2 - elektrické příslušenství; 3 - tlaková nádoba s nátěrovou hmotou; 4 - regulátor tlaku; 5 - zásobník tlakového vzduchu

Obr. 3-18 Schéma zařízení pro stříkání nátěrových hmot

4. ***Kataforézní lakování (KTL)***, je jeden ze dvou způsobů *elektroforetického lakování*. Druhým, zastaralejším způsobem elektroforetického lakování je *anaforetické lakování (ATL).*

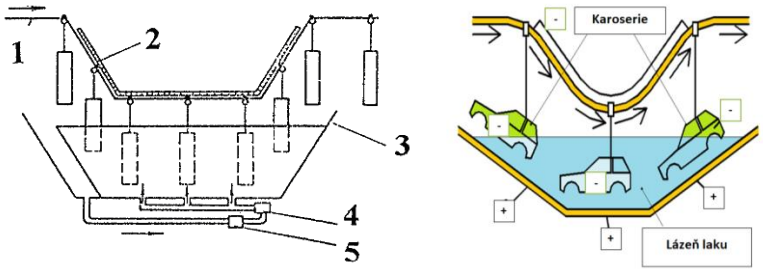
Metoda elektroforetického lakování (asi dnes je je používán způsob kataforetického lakování) byla vyvinuta v 60. letech minulého století v USA. Jako první jí průmyslově začala používat americká automobilka Ford na drobné díly karoserií. Do Evropy se anaforéza dostala v roce 1967, kdy byla použita na úpravu karoserií francouzskou automobilovou firmou Peugeot a firmou Chrysler-Francie. U nás se také začala využívat ve firmě PAL Beroun pro lakování stěračů skel automobilů. Dnes má kataforézní lakování široké průmyslové uplatnění při protikorozním ošetřování nebo nanášení barev na části karoserií automobilů.

Princip metody - metoda je založena na stejnosměrném elektrickém proudu (s napětím 100 V). Celý proces svou podstatou připomíná galvanické pokovování. Při lakování je výrobek ponořen do lakovací lázně a zapojen jako katoda. Umístěním stejnosměrného napětí mezi výrobek a protielektrodu (anodu) se vytvoří elektrické pole, které usměrní pohyb polykationtů ke katodě. Na povrchu výrobku (na katodě) se vylučují hydroxylové ionty. S narůstající tloušťkou povlaku roste odpor vrstvy a tím klesá rychlost vylučování.

Nátěrová hmota je tvořena speciální pryskyřicí (na bázi epoxidových polymerů, proto se musí nátěr následně vytvrzovat), pigmentovou hmotou a vodou. Při vytváření nátěru na daném kovovém materiálu probíhají na obou elektrodách složité chemické procesy. Na povrchu výrobku se vylučují hydroxylové ionty. S narůstající tloušťkou povlaku roste odpor vrstvy a tím klesá rychlost vylučování. Vylučování pokračuje přednostně na místech s doposud malou tloušťkou vrstvy (v místech stíněných, v dutinách apod.). Tím dochází k tvorbě velmi rovnoměrného povlaku na celém povrchu včetně těžko přístupných míst. Po dosažení určité tloušťky povlaku na celém povrchu se další vylučování zastaví. Tloušťka závisí především na velikosti použitého napětí, běžně se pohybuje mezi *15 a 30 μm*, při extrémních požadavcích *až okolo 45 μm* (tzv. silnovrstvá katoforéza). Elektricky vyloučená vrstva pevně lne k podkladu.

V praxi pečlivě očištěné předměty tvoří jednu elektrodu, nejčastěji katodu. Druhou elektrodou je kovová vana, naplněná speciálním roztokem nátěrové hmoty do které se ponořují kovové lakované výrobky zavěšené na dopravníku. Kataforéza je ekologický způsob lakování patřící k nejhospodárnějším způsobům lakování ocelových, pozinkovaných a hliníkových výrobků.

Při lakování je výrobek ponořen do lakovací lázně a zapojen jako katoda. Umístěním stejnosměrného napětí mezi výrobek a proti elektrodu (anodu) se vytvoří elektrické pole, které usměrní pohyb polykationtů směrem ke katodě. Vyloučený povlak je nutno ***vypálit při teplotách okolo 160 až 180°C,*** kdy dochází k polymeraci a povlak získává konečné vlastnosti.



1 - dopravník; 2 - anoda ; 3 - katoda (vana); 4 - čerpadlo; 5 - tryska

Obr. 3-19 Schéma elektroforezního nanášení povlaků a nátěrů kovů (katoforéza nebo anoforéza), vlevo; uplatnění katoforézy v automobilovém průmyslu, vpravo

Jak je patrné z obr. 3-19, díly určené k lakování jsou připevněné na (-), jsou nabity záporně. Částice laku jsou nabity kladně a tím jsou přitahovány k lakovaným součástím, na kterých pevně ulpívají. Vytváří se rovnoměrný povlak na tvarech i v dutinách.

Dnes se používají vodou ředitelné barvy, které jsou velmi šetrné k životnímu prostředí.

3.7 Kombinace metod protikorozní ochrany kovů

V současné době se pro vytváření protikorozní ochrany kovů používá kombinací vrstev získanými různými metodami, jak je např. aplikováno v automobilovém průmyslu, při výrobě karoserií automobilů, viz obr. 3-20. Je např. využíván ocelový plech, který obsahuje vrstvu zinku, která již tvoří protikorozní ochranu. Pro zvýšení odolnosti proti korozi se může použít i pasivační vrstva. Určitou ochranu zajišťuje vrstva základního a vrchního nátěru. Vrstva vrchního nátěru má především dotvářet vzhledovou podstatu.



Obr. 3-20 Lakované karoserie automobilů

Při výrobě karoserií automobilů jsou požadavky na proces lakování, tj. zajištění:
a) korozní odolnost karoserie,
b) estetického a trvalého vzhledu automobilu,
c) odolnost proti vlivům provozu a prostředí,
d) šetrnost k životnímu prostředí;
e) únosné ekonomické náklady

Systém nátěrů a ochranných vrstev karoserií automobilů, viz obr. 3-21:
1) plech s tloušťkou pozinkované vrstvy cca ≥ 5 μm,
2) fosfátová vrstva o tloušťce 2 μm,
3) protikorozní vrstva vytvořena ***kataforézou (katoforézou)***, tloušťka cca 20 μm (pak nutno sušit při 120 °C a následně vypálit při teplotě 165 °C po dobu cca 10 min),
4) plnič, tloušťka cca 30 ± 10 μm,
5) barevný základ, tloušťka cca 20 ± 10 μm,
6) bezbarvý lak, tloušťka cca 40 μm.



Obr. 3-21 Schéma ochranných vrstva a barev na karoserii automobilů

Plech pro výrobu karoserie o tloušťce max. 0,7 do 2 mm, s žárově pozinkovanou tloušťkou vrstvy cca ≥ 5 μm, je lisován do tvaru jednotlivých dílů částí karoserie. Tyto části karoserie se k sobě svařují, nejčastěji elektrickým odporem – tzv. *bodováním.* Takto vytvořené rámy karoserií, dveře a víka se dále opatřují různými ochrannými protikorozními nátěry v tomto pořadí: fosfátová vrstva, protikorozní nátěr (kataforezické lakování), vrstva plniče (stříkání), vrstvy barevného základu (stříkání) a vrstvy bezbarvého laku (stříkání). V automobilkách k tomto účelům slouží samostatné výrobní lakovací linky.

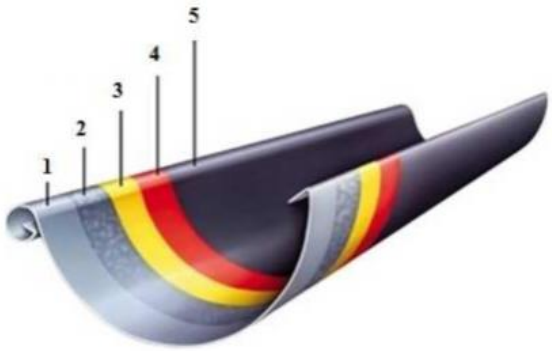
Fosfátování – je nanášení protikorozní ochranná vrstva na pozinkovaný plech karosérie. Na karosérii se vytvoří povlak z krystalků fosfátu. Fosfátová vrstva zlepšuje přilnavost nanášené katoforezické ochranné vrstvy (KTL).
Katofareza - je systém nanášení laku, v tomto případě protikorozního nátěru, viz kapitola 3.6.4.1. Karosérie ve vaně slouží jako *katoda* stejnosměrného proudu, vana s lázní laku slouží jako *anoda*. Na katodě probíhající reakce vedou k vylučování příslušného nátěrového filmu. Katoforetické lakování probíhá při ponoru karosérie do vany (pak následuje třístupňový oplach ultrafiltrátem a konečný oplach demineralizovanou vodou).
Plnič - je základní nosná část pro vytváření dobrého podkladu, který slouží pro barevný základ.
Barevný základ (pigmentový základ) – dává karoserii příslušný barevný vzhled.
Bezbarvý lak – slouží k prodloužení hezkého vzhledu příslušné barvy na karoserii automobilu. Tento lak chrání proti znehodnocování barvy vlivem slunečního záření.
Celý proces vytváření ochranných vrstev na karoseriích automobilů se provádí v ***lakovně.***
Lakovna karoserií je rozdělena na dva objekty, na *lakovnu základu* a na *lakovnu vrchního laku*. Karoserie automobilů při průchodu lakovnou dostávají několik ochranných vrstev, viz obr. 3.21
V rámci konečného vzhledu karoserie automobilu nás upoutá příslušná barva. Pro její dlouhou životnost se ještě nakonec nanáší bezbarvý nátěr

Lakovna základu – v této lakovně se po odmaštění v lázních na povrch pozinkovaného plechu aplikuje první ochranná antikorozní vrstva fosfátu. Po provedení oplachu je provedena pasivace, která uzavírá případné mikropóry fosfátové vrstvy. Následně je proveden oplach a nanesena další antikorozní vrstva metodou *kataforézního lakování*. Při kataforézním lakování je karoserie ponořena do lakovací lázně a působením stejnosměrného proudu (napětí) mezi karoserií a protilehlou elektrodou je vytvořeno elektrické pole, které usměrní pohyb částic laku ke karoserii. Elektricky vyloučená vrstva lne k podkladu a přebytečný lak je v následujících operacích opláchnut. Vrstvu je nutné ještě vypálit, to je provedeno v sušičce při teplotě 180 °C, kdy dochází k polymeraci a vytvořený antikorozní povlak získává konečné vlastnosti. Ze sušičky karoserie vstupují do zásobníku, z kterého pokračují na ruční pracoviště. Zde pracovníci provádí utěsňování svarových spojů, podběhů a pokládají ochranné folie. V další části linky je ve stříkacích boxech prováděn nástřik spodku karoserie těsnícím, ochranným tmelem. Na dalším pracovišti se z karoserie sejmou ochranné pásky a chrániče a se provede utěsnění karoserie, dále kapoty a dveře jemným tmelem na lemy. V dalším kroku karoserie projíždí sušičkou, kde je zajištěno ztuhnutí nanesené hmoty z předchozích operací. Poslední pracovní činností v lakovně základu je broušení defektů základového laku, po kterém následuje předání karoserií do lakovny vrchního laku.
Lakovna vrchního laku - zde je prováděn nástřik karoserie plničem, barevným základem a vrchním lakem. Po vytvrzení laku se provádí kontrola jeho kvality a odstraňování případných lakových defektů. Je-li lak na karoserii v pořádku, je karoserie uvolněna a podle typu modelu směřuje do příslušného sekvenčního zásobníku.



Obr. 3-22 Ruční a robotický nástřik vrstvy plniče na karoserii automobilu a robot pro barvení karoserií automobilů [17]

Další použití kombinace dvou a více protikorozních úprav, které se v praxi běžně používají, je např. protikorozní ochrana střešních okapů a jejich svodů. Mimo protikorozní ochrany je také nutný výběr vhodného konstrukčního materiálu, ale také volba vhodné konstrukce řešení. Jako je plynulá konstrukce střešního okapu bez ostrých hran, viz obr. 3-23.



1 – ocelový plech tl. 1 mm; 2 – vrstva zinku; 3 – pasivační vrstva; 4 - vrstva základního nátěru; vrstva vrchního nátěru

Obr. 3-23 Vrstvy při ochraně střešního okapu [18]

Volba kombinace povrchových úprav materiálu má velký význam na celkovou životnost materiálu. Velmi často se používá kombinace katodické ochrany s ochrannou vrstvou.

LITERATURA ke kapitole Koroze a povrchové úpravy

[1] MOHYLA, M. Koroze a povrchové úpravy kovů ve strojírenství. VŠB-Technická univerzita, 1981, Ostrava.
[2] CHMELA, J. Koroze a ochrana materiálu - kovů. Ústav technického rozvoje a informací, Praha, 1979.
[3] BARTONÍČEK, R., BARTOŇ K. Koroze a protikorozní ochrana kovů. Academia, Praha, 1966.
[4] ŠČERBEJOVÁ, M. Strojírenská technologie. Vysoká škola zemědělská, Brno, 1993.
[5] KOCICH J., TULEJA S., Korózia a ochrana kovov. Technická univerzita, Košice, 174 s. 1998.
[6] MÍŠEK B., HRSTKA J., Koroze a povrchová úprava kovů. SNTL-Nakladatelství technické literatury, Praha, 1982, 208 s.
[7] ŠULC, R. 8. Koroze, [Podklady pro výuku]. Ústav procesní a zpracovatelské techniky, FS ČVUT v Praze, 2008.
[8] NOVÁK, Pavel. Druhy koroze kovů. Koroze a ochrana materiálu. 2005, roč. 49, čís. 4, s. 75–82. ISSN 0452-599X. *(*Dostupné online*).*
[9] ČÍHAL, Vladimír. Mezikrystalová koroze ocelí a slitin. Praha: SNTL, 1978. 406 s.
[10] NOVÁK P., KORKÁ M.: Průmyslové aplikace anodické ochrany v České republice. Koroze a ochrana materiálu. 2006, Asociace korozních inženýrů, 50 (1): 1 - 24.
[11] ČÍHAL, Vladimír, 1999. Korozivzdorné oceli a slitiny. Praha: Academia. 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
[12] MATOUŠ, J. Koroze uložných zařízeníc a působení bludných proudů. *Profi-Elektrika.CZ*, 19.4. 2011.
[13] POKORN,Ý, J. Koroze - Rozdělení koroze podle vnitřních mechanismů. [Výukové materiály]. Inovace do rozvoje vzdělávání, 2016.
[14] PODVAL, J. FILASOVÁ, A. Provozní zkušenosti s použitím anodické ochrany,1993.
[15] ŠKODA AUTO A.S. Interní materiály. Mladá Boleslav, 2015.
[16] HOLOUBEK, Vít. Kataforetické lakování [online]. [cit. 2017-0317]. http://www.povrchoveupravy.cz/2005-04-clanek01.html.
[17] Propagační technické materiály firmy BMW Group Plant Leipzig, Paint shop. In: BMW Group [online].
[18] Propagační technické materiályfirmy Bratex.

Kontrolní otázky ke kapitole Koroze a korozní ochrana materiálu

1. Co je koroze a podle jakých kritérií se nejčastěji dělí.
2. Co způsobuje oxidace železa, jaké oxidy železa se vyskytují.
3. Jakým způsobem chráníme materiály proti korozi.
4. Co je potenciál napětí a jak ho při ochraně kovů proti korozi využíváme.
5. Co je katodická a anodická ochrana materiálu.
6. Jaké konstrukční zásady bychom měli respektovat abychom eleliminovali vliv koroze.
7. Co je korozní makročlánek a mikročlánek.
8. Jaké jsou možnosti povrchové úpravy kovů v ochraně proti korozi.
9. Jaký je princip galvanického pokovování.

10. Jaký je princip kataforézního nanášení nátěrů (povlaků).
11. Jaké všechny ochranné vrstvy obsahuje protikorozní nátěr karoserií automobilů.