

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra metalurgie a slévárenství



STUDIJNÍ OPORA

Metalurgické technologie

doc. Ing. Libor Čamek, Ph.D.

doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.

Ostrava, 2013

POKYNY KE STUDIU

Metalurgické technologie

Pro předmět Metalurgické technologie 3. semestru bakalářského studijního oboru Moderní metalurgické technologie a studijního programu Ekonomika a řízení průmyslových systémů jste obdrželi studijní balík obsahující integrované skriptum pro kombinované studium obsahující i pokyny ke studiu.

Prerekvizity

Předmět nemá žádné prerekvizity.

Cílem předmětu a výstupy z učení

Předat studentům základní teoretické a praktické znalosti z oblastí technologie a metalurgie výroby surového železa a výroby oceli, výrobní technologie tváření kovů, výrobní technologie a metalurgie ve slévárenství odlitků ze železných a neželezných kovů.

Po prostudování předmětu by měl student být schopen:

výstupy znalostí:

- student bude umět charakterizovat základní výrobní technologie výroby surového železa a oceli,
- student bude umět charakterizovat základní výrobní technologie tváření kovů,
- student bude umět vysvětlit základy výrobní technologie ve slévárenství odlitků z železných a neželezných kovů.

výstupy dovedností:

- student bude umět využít svých základních znalostí z oblastí technologie výroby surového železa a oceli při řešení problematiky v oblasti hutní výroby,
- student bude umět zhodnotit svoje základní znalosti v oblasti řešení technologie tváření kovů, student bude umět aplikovat své základní teoretické poznatky v oblasti slévárenské výrobní technologie.

Pro koho je předmět určen

Předmět je zařazen do bakalářského studia oborů Metalurgické technologie, studijního programu Moderní metalurgické technologie a studijního programu Ekonomika a řízení průmyslových systémů

Studijní opora se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup

- student si vymezí časový prostor pro studium,
- student se seznámí s textem cíle kapitoly,
- student pozorně prostuduje celý text kapitoly,
- podle získaných vědomostí si student ujasní shrnutí pojmů z kapitoly,
- svoje vědomosti ze studia kapitoly použije při nácviku odpovědí na otázky, případně podle potřeby opakuje studium výkladu.

Způsob komunikace s vyučujícími:

Základním úkolem studentů bude vypracování semestrálního projektu na zadané téma z oblasti: výroby surového železa, technologie výroby oceli, výrobní technologie tváření kovů, slévárenské výrobní technologie.

Projekt bude kontrolován vyučujícím do 14 dnů po odevzdání a výsledky budou studentům zaslány e-mailem prostřednictvím IS.

Absolvování zápočtového testu - výsledky zápočtového testu budou studentům sděleny po jeho absolvování.

Na začátku semestru při prvním kontaktu se studenty budou jednotlivé okruhy požadavků na studenty upřesněny, včetně možností a způsobů konzultací studentů a případně jejich dalších návrhů a potřeb.

Kontakt: garant předmětu – libor.camek@vsb.cz – tel. +420 596 994 205, +420 606 749 207

OBSAH

1. VSÁZKOVÉ SUROVINY A PŘÍPRAVA VSÁZKY PRO VÝROBU SUROVÉHO ŽELEZA.....	6
1.1. Železo	6
1.1.1. Surové železo.....	6
1.1.2. Přímou redukované železo	6
1.2. Stručná historie výroby železa.....	6
1.3. Vsázkové suroviny a příprava vysokopecní vsázky	8
1.3.1. Železné rudy	8
1.3.2. Manganové rudy.....	9
1.3.3. Druhotné suroviny	9
1.3.4. Požadavky na kovonosné suroviny.....	9
1.3.5. Chemické a mineralogické vlastnosti	9
1.3.6. Fyzikální vlastnosti.....	10
1.3.7. Fyzikálně-chemické vlastnosti	10
1.4. Paliva.....	11
1.4.1. Třídírný koksu	11
1.4.2. Vlastnosti koksu	11
1.5. Struskotvorné přísady	13
1.6. Složení vysokopecní vsázky.....	13
1.7. Úprava surovin	14
1.7.1. Homogenizace surovin	14
1.8. Aglomerace a peletizace vysokopecní vsázky	15
1.8.1. Spékání železných rud (aglomerace).....	15
1.8.2. Peletizace rud.....	19
2. VÝROBA SUROVÉHO ŽELEZA VE VYSOKÉ PECI (TECHNOLOGIE VÝROBY A ZÁKLADNÍ ZÁKONITOSTI)	23
2.1. Popis vysokopecního závodu.....	23
2.2. Hlavní části vysoké pece, popis a funkce	24
2.2.1. Pochody v oblasti výfučen (oxidační prostory pece).....	25
2.2.2. Proudění plynu a pohyb surovin.....	26
2.2.3. Přestup tepla ve vysoké peci.....	27
2.3. Vypařování vlhkosti a disociace některých látek, redukce oxidů železa	28
2.3.1. Reakce vodní páry ve vysoké peci a disociace hydrátů.....	28
2.3.2. Disociace sulfidů ve vysoké peci.....	29
2.3.3. Redukce oxidů železa ve vysoké peci	29
2.4. Základní teorie redukce; redukční prostředky ve vysoké peci.....	30
2.5. Vznik strusky a její význam pro vysokopecní pochod	32
2.6. Odsiřování ve vysoké peci	33

3. PRODUKTY VYSOKÝCH PECÍ, SOUČASNÉ EKOLOGICKÉ ASPEKTY VÝROBY SUROVÉHO ŽELEZA, ALTERNATIVNÍ ZPŮSOBY VÝROBY SUROVÉHO ŽELEZA	35
3.1. Druhy surových želez	35
3.2. Ekologické aspekty výroby surového železa.....	38
3.2.1. Škodlivé látky při výrobě surového železa.....	38
3.3. Aglomerace.....	38
3.4. Peletizace	39
3.5. Vysokopecní výroba.....	39
3.6. Recyklace odpadů v hutním závodě.....	40
3.6.1. Možnosti recyklace odpadů v hutním závodě	41
3.6.2. Recyklace na aglomeračním provozu	42
3.6.3. Recyklace ve vysoké peci.....	42
3.7. Výroba surového železa mimo vysokou pec	43
3.7.1. Základní principy přímé a tavné redukce	43
3.7.2. Procesy tavné redukce SRI (SMELTING REDUCTION IRON)	44
3.7.3. Perspektivy vysokopecní výroby surového železa	45
4. VÝZNAM A POUŽITÍ OCELI V SOUDOBÉ SPOLEČNOSTI. ZÁKLADNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE V KYSLÍKOVÝCH KONVERTORECH.	47
4.1. Význam a použití oceli v soudobé společnosti.....	47
4.1.1. Statistika výroby oceli	47
4.2. Historie vzniku výrobní technologie v kyslíkových konvertorech	48
4.3. Výroba v kyslíkových konvertorech	49
4.3.1. Některá základní zařízení kyslíkových konvertorů	50
4.3.2. Výrobní technologie kyslíkových konvertorů	52
4.3.3. Časový průběh oxidace doprovodných prvků v kyslíkovém konvertoru	53
4.3.4. Reakce probíhající v kyslíkovém konvertoru	53
4.3.5. Hlavní typy kyslíkových konvertorů	54
5. ZÁKLADNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE V ELEKTRICKÝCH OBLOUKOVÝCH PECÍCH A MOŽNOSTI JEJICH INTENZIFIKACE.	57
5.1. Rozdělení elektrických obloukových pecí (EOP).....	57
5.2. Elektrické obloukové pece s přímo působícím obloukem	58
5.2.1. Funkce jednotlivých součástí EOP	59
5.2.2. Technologie vedení tavby v EOP	59
5.2.3. Průběh tavby v EOP	59
5.2.4. Výroba vysokolegovaných ocelí v EOP	60
5.3. Stejnoseměrné elektrické obloukové pece	60
5.4. Možnosti intenzifikace výroby oceli v elektrických obloukových pecích	61
5.5. Soudobé vývojové trendy ve výrobě oceli v EOP	61

6. VÝZNAM, FUNKCE A TECHNOLOGIE MIMOPECNÍHO ZPRACOVÁNÍ OCELI.....	65
6.1. Metody sekundární metalurgie	66
6.1.1. Metody sekundární metalurgie provozované při atmosférickém tlaku	68
6.1.2. Technologie SM provozované při sníženém tlaku	73
6.1.3. Speciální pochody SM pro velké objemy zpracovávaného kovu s využitím vakua	75
6.1.4. Speciální metalurgické pochody a zařízení	75
7. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA ODLÉVÁNÍ OCELI, PROCESY PROBÍHAJÍCÍ PŘI TUHNUTÍ OCELI. SEGREGACE, VADY INGOTŮ. PLYNULE ODLÉVÁNÍ OCELI, JEHO TECHNOLOGICKÉ A EKONOMICKÉ VÝHODY, HLAVNÍ SOUČÁSTI ZAŘÍZENÍ.....	77
7.1. Způsoby odlévání oceli	79
7.1.1. Odlévání do kokil	79
7.1.2. Plynulé lití oceli.....	80
7.1.3. Členění ZPO a jejich charakteristiky	82
7.1.4. Jednotlivé součásti zařízení ZPO	85
7.2. Vady předlitků	87
7.2.1. Tvarové vady předlitků.....	87
7.2.2. Povrchové vady předlitků.....	87
7.2.3. Vnitřní vady předlitků	88
7.3. Historie a současnost výrobců oceli na zařízení plynulého odlévání v České republice.....	89
7.3.1. Perspektivy odlévání na ZPO	89
8. ZÁKLADY TVÁŘENÍ KOVŮ	91
8.1. Rozdělení tvářecích procesů	91
8.1.1. Rozdělení technologií tváření	91
8.1.2. Válcování (rolling)	92
8.1.3. Rozdělení tváření podle tvářecí teploty	96
8.2. Ohřev kovů.....	100
8.3. Fyzikální základy ohřevu.....	103
8.3.1. Průvodní jevy ohřevu	107
8.3.2. Typy ohřevu.....	109
8.3.3. Ohřívací pece.....	110
9. ROZDĚLENÍ VÁLCOVACÍCH TRATÍ	116
9.1. Úvod.....	116
9.1.1. Rozdělení VT podle konstrukce válcovací stolice a počet válců ve stolici	116
9.1.2. Rozdělení VT podle způsobu otáčení válců	118
9.1.3. Rozdělení VT podle druhu vývalků a průměru pracovních válců	121
9.1.4. Válcování těžkých tvarových vývalků	123
9.1.5. Válcování hrubých, středních a jemných tvarových vývalků.....	123

10. KOVÁNÍ.....	133
10.1. Úvod	133
10.2. Výchozí materiály pro kování.....	134
10.2.1. Struktura kovářských ingotů.....	135
10.2.2. Volné kování	136
10.2.3. Základní způsoby pēchování	138
10.3. Zápustkové kování.....	141
10.4. Stroje pro kování	144
11. TVÁŘENÍ ZA STUDENA.....	149
11.1. Povrchové úpravy před tvářením za studena.....	149
11.1.1. Chemické odokujování – moření (pickling).....	150
11.1.2. Povrchová úprava po moření.....	150
11.1.3. Mechanické odokujování.....	151
11.2. Válcování za studena	152
11.3. Tažení drátů a tyčí.....	153
11.3.1. Teorie tažení	154
11.3.2. Tažné stolice.....	154
11.4. Protlačování	157
11.4.1. Způsoby protlačování	158
12. VÝZNAM SLÉVÁRENSTVÍ, PŘÍPRAVA FORMY, VÝROBA FOREM A JADER	161
12.1. Vývoj slévárenství.....	161
12.2. Příprava formy	164
12.2.1. Výroba modelů.....	164
12.2.2. Příprava formovacích materiálů pro výrobu jednorázových pískových forem	164
12.3. Suroviny pro přípravu formovacích směsí.....	165
12.3.1. Ostřiva	165
12.3.2. Pojiva.....	166
12.3.3. Přísady.....	167
12.3.4. Pomocné látky	167
12.4. Příprava formovacího materiálu.....	168
12.5. Vlastnosti formovacích směsí a jejich zkoušení	168
12.6. Výroba forem a jader	168
12.6.1. Netrvalé formy.....	168
12.6.2. Další postupy výroby forem a odlitků	171
12.7. Trvalé formy	172
12.7.1. Tlakové lití.....	172
12.7.2. Nízkotlaké lití	174
12.7.3. Odstředivé lití.....	175
12.7.4. Plynulé (kontinuální) lití.....	175

13. ZÁKLADY SLÉVÁRENSKÝCH POCHODŮ, TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ KOVŮ, APRETACE ODLITKŮ.	177
13.1. Základy slévárenských pochodů	177
13.1.1. Způsob krystalizace	177
13.1.2. Zabíhavost a plnění formy	179
13.1.3. Smršťování kovu při tuhnutí	180
13.1.4. Smršťování kovu v pevném stavu	181
13.1.5. Plyny v kovu a ve slévárenské formě	182
13.2. Tavení a odlévání kovů.....	183
13.2.1. Kuplovy	184
13.2.2. Elektrické indukční pece a elektrické obloukové pece	184
13.2.3. Konvertory	185
13.2.4. Rotační plynové pece	186
13.2.5. Kelímkové odporové a palivové pece	186
13.2.6. Plamenné pece	187
13.2.7. Šachtové plynové pece	187
13.2.8. Odlévání taveniny	188
13.3. Čištění a apretace odlitků	188
13.4. Kontrola, vady odlitků a jejich opravování.....	189
 14. ZÁKLADNÍ SLITINY PRO VÝROBU ODLITKŮ ZE ŽELEZNÝCH A NEŽELEZNÝCH KOVŮ	 192
14.1. Slévárenské slitiny železa s uhlíkem.....	193
14.1.1. Základní charakteristika	193
14.1.2. Rozdělení slitin železa s uhlíkem	193
14.2. Oceli na odlitky	193
14.2.1. Uhlíkové (nelegované) oceli	194
14.2.2. Nízkolegované oceli	194
14.2.3. Vysokolegované oceli	194
14.3. Litiny	195
14.3.1. Grafitické litiny	196
14.4. Slévárenské slitiny neželezných kovů.....	199
14.4.1. Slitiny mědi	199
14.4.2. Slitiny zinku	200
14.4.3. Slitiny hliníku	200
14.4.4. Slitiny hliníku s křemíkem	200
14.4.5. Slitiny hliníku s hořčíkem	200
14.4.6. Slitiny hliníku s mědí	201

1. Vsázkové suroviny a příprava vsázky pro výrobu surového železa



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základy výroby surového železa
- definovat požadavky na kovonosné suroviny při výrobě surového železa
- definovat požadované fyzikálně-chemické vlastnosti koksu
- definovat aglomeraci a peletizaci vysokopecní vsázky
- popsat fyzikálně-chemické a mineralogické vlastnosti vsázkových surovin
- popsat optimální složení vsázky
- popsat aglomeraci a peletizaci vysokopecní vsázky proces



Výklad

1.1. Železo

Názvem železo se označuje nejen chemicky čistý prvek, ale i různé druhy technického železa. Technické železo obsahuje řadu prvků, které mění jeho vlastnosti. Tyto vlastnosti nejvíce ovlivňuje uhlík, jehož přítomnost do obsahu asi 2,14% dovoluje železo (ocel) v zahřátém stavu tvářet. Železo s vyšším obsahem uhlíku tyto vlastnosti ztrácí a je křehké jak za studena, tak i po zahřátí. Tyto slitiny železa s obsahem uhlíku okolo 4,2 – 5,0 % vyrobené ve vysoké peci, se nazývají litinou a mezi ně patří i surová železa.

1.1.1. Surové železo

Je slitina železa s uhlíkem (kolem 4,5 %), křemíkem, manganem, sírou, fosforem a dalšími prvky. Vyrábí se redukcí oxidů železa, v tekutém stavu, ve vysokých pecích. Tímto termínem se obvykle označuje i tekutý produkt vyrobený tavnou redukcí (SRI), vyráběný bez vysoké peci a bez koksu.

Surová železa se dělí na surová železa ocelářská, která jsou určena k dalšímu zpracování na ocel různými zkujňovacími pochody, a na surová železa slévářská, z nichž se přetavováním vyrábí litina.

1.1.2. Přímou redukované železo

Je produkt přímé redukce železa (oceli) z rud v pevném stavu (při teplotě nižší než teplota tavení) DRI, HBI (železná houba) a tavná redukce železa z rud bez koksu, SRI.

1.2. Stručná historie výroby železa

K redukcí oxidů železa postačuje teplota 700 °C. S rostoucí teplotou roste nauhličení redukovaného železa a při teplotách nad 1200 °C je produktem redukčních pecí surové železo.

Nízká teplota redukce umožnila výrobu železa v různých primitivních pecích již u prvních civilizací.

Archeologickým výzkumem byly na našem území odkryty pece na výrobu oceli z doby brzy po příchodu Slovanů.

Tyto pece byly nazvány dýmačky nebo také „vlčí“ pece.

Dýmačky byly šachtové pece o výšce 1 až 2 m vytápěné dřevěným uhlím, ve kterých se redukovaly zřejmě velmi čisté železné rudy při teplotách 700 až 1200 °C.

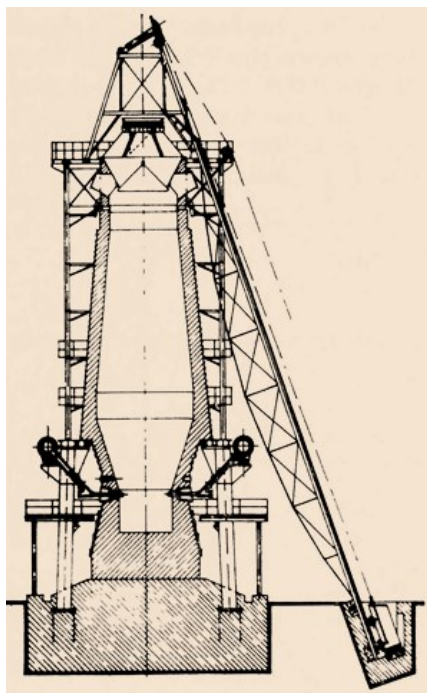
Vyredukováná železná houba se svařovala kovářským způsobem v dejl, který již sloužil k výrobě železných předmětů. Pochod je doložen archeologickými nálezy z doby před 4000 lety.

Požadavek na zvýšení výroby v šachtových pecích vedl k jejich zvětšování a k dmýchání vzduchu do pecí, tzv. větru.

V 16. století se staví první vysoké pece vytápěné dřevěným uhlím, ve kterých se v důsledku vyšších teplot vyrábělo surové železo. Surové železo se dále zkujňovalo ve „fryšovacích“ výhních za přísady okují a železných rud.

Zvýšení produktivity zkujňování surového železa přinesly koncem 18. století pudlovací pece vytápěné černým uhlím. Jednalo se v podstatě o plamenné pece, kde se z důvodu nedostatku dřevěného uhlí začalo používat uhlí černého. Teplota dosahovaná v nížeji pudlovací pece byla však ještě nedostatečná pro roztavení oceli. V průběhu oxidace manganu, křemíku a posléze i uhlíku se zvyšovala teplota tavení roztaveného kovu, čímž se začala vylučovat polotuhá zrna kujného železa.

Produktem z pudlovací pece tedy byla opět železná houba, která se ještě v peci upravovala na kulovité „dejly“. Tyto se po rozpálení do bílého žáru vytahovaly z pece a kovářím na lisech nebo bucharech se z nich vytěsňovala struska. Současně s vytěsňováním strusky docházelo v důsledku silného tlaku ke svařování železa. Spotřeba paliva činila 80 až 90 % z hmotnosti vyráběného kovu a propal železa dosahoval 12 až 15 %.



Obr. 1.1. Koksová vysoká pec

V následujícím 19. století se začíná používat ve vysokých pecích jako palivo koks. První koksová vysoká pec byla uvedena do provozu ve Vítkovicích v roce 1836. Koksové vysoké pece byly již agregáty s velkým výkonem.

Obr. 1.1. znázorňuje základní profil vysoké pece Lurmannovy konstrukce z druhé poloviny 19. století. Moderní technologii ve zkujňování přináší vynález Bessemerova konvertoru v roce 1855.

Další vývoj směřoval k nové výrobní technologii v Siemens-Martinských pecích, která byla uvedena do provozu v roce 1864. Vysokých teplot plamene se dosahovalo předehřevem vzduchu i topného plynu v regeneračních komorách.

Následně v roce 1878 uvádí Thomas do provozu zásaditou vyzdívku pro konvertory a zkujňování oceli pod zásaditou struskou na bázi oxidu vápenatého.

Výroba ušlechtilých ocelí je na začátku 20. století, zaváděna do elektrických pecí.

V roce 1902 je uvedena do provozu první oblouková pec (Heroult) a následně ve stejném roce první indukční pec (Kjellin).

V první polovině 20. století dominují ve výrobě oceli Siemens-Martinské pece a konvertory dmýchané vzduchem.

Nové požadavky vývoje moderní techniky vedly k rozvoji elektrometalurgie.

V roce 1952 byl uveden do provozu konvertor dmýchaný horem, tzv. LD pochod. Byla zahájena výroba oceli pomocí plynného kyslíku a tím byl zahájen nástup kyslíkových pochodů.

V 60. letech směřoval další vývoj moderní technologie výroby oceli k přesunu vedení některých metalurgických reakcí z pece do pánve a nastal tím rozvoj sekundární (mimopecní) metalurgie.

1.3. Vsázkové suroviny a příprava vysokopecní vsázky

Vysokopecní vsázku tvoří rudná část, struskotvorné přísady a palivo.

Rudnou část vsázky tvoří železné rudy a koncentráty, manganové rudy a různé druhy odpadů obsahující železo. Tyto rudné složky bývají ve vsázce obsaženy obvykle jako produkty vysokoteplotní úpravy, tj. jako aglomerát nebo pelety.

Aglomerát tvoří v současnosti asi 70 % kovonosné vsázky, pelety asi 30 %. Aglomerát má ve srovnání s peletami lepší pevnost při redukci a vyšší zásaditost. Má nevýhodnější tvar zrna a menší obsah železa. Pelety mají ideální tvar a vyšší obsah železa, ale bývají obvykle kyselé, při redukci mají sklon k puchnutí a následnému rozpadu.

Základním zdrojem železa jsou železné rudy.

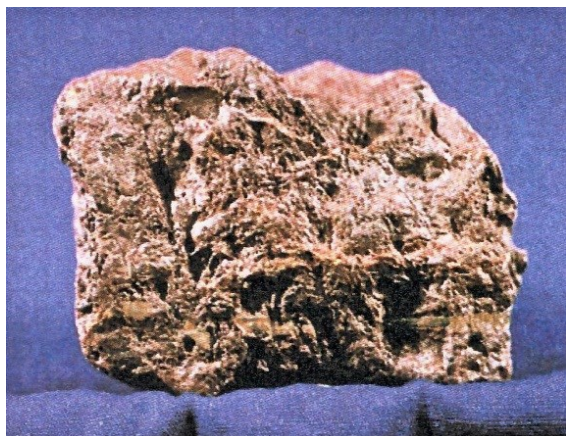
1.3.1. Železné rudy

Za železnou rudu se považuje hornina vhodného chemického a mineralogického složení, z níž lze přiměřenými náklady získat železo žádaného složení.

Podle chemického složení lze železné rudy rozdělit do skupin:

1. Bezvodé oxidy

a. Oxid železitý, Fe_2O_3 , hematit (krevel). V čistém stavu obsahuje 70 % železa, v přírodě asi 60 %. Krystalizuje v trigonální soustavě, je nemagnetický, tmavě červené barvy a jeho hlušina obsahuje obvykle hodně SiO_2 .



Obr. 1.2 Oxid železitý, Fe_2O_3



Obr. 1.3 Oxid železnato-železitý, Fe_3O_4

b. Oxid železnato-železitý, Fe_3O_4 , magnetit (magnetovec). Obsah železa v čistém stavu je 72,4 % železa, v přírodě do 68 %. Má feromagnetické vlastnosti a krystalizuje v kubické soustavě. Bývá těžko redukovatelný.

2. Uhličitany Siderit, (ocelek), FeCO_3 , obsahuje v čistém stavu 48,3 % Fe, 13,8 % O_2 a 37,9 % CO_2 . Má šedou barvu, krystalizuje v trigonální soustavě a před použitím se vždy disociací zbavuje CO_2 .

3. Křemičitany Chamosit $[\text{Fe},\text{Mg}]_{15}\text{Al}_{10}\text{Si}_{11}\text{O}_{52} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$. Těží se jen velmi zřídka a nemá praktický význam.

1.3.2. Manganové rudy

Z pohledu chemického složení je můžeme také rozdělit na bezvodé a hydratované oxidy, uhličitany a křemičitany.

V manganových rudách se nachází minerály jako např. pyrolizit (burel) MnO_2 , braunit Mn_2O_3 aj.

Obsah manganu v manganových rudách bývá obvykle menší než obsah železa v železných rudách a jen výjimečně překračuje 50 %.

1.3.3. Druhotné suroviny

Mnoho odpadů z průmyslové výroby vzhledem k svému chemickému složení a vlastnostem může sloužit jako náhrada železných rud, případně struskotvorných přísad.

Mezi nejpoužívanější druhotné suroviny patří ocelový odpad, okuje odprašky a kaly z hutní výroby, ocelářská struska apod.

Podíl druhotných surovin ve vysokopecní vsázce závisí na obsahu škodlivých látek v těchto materiálech.

Většina jemnozrnných materiálů, hlavně odpadů ve formě odprašků a kalů nejen že není schopna přímého zpracování v metalurgickém výrobním agregátu, ale činí velké potíže i při dopravě. Z tohoto důvodu je téměř vždy potřeba tyto materiály zkusovět.

Vlastnosti takto upraveného materiálu (pelety anebo aglomerát) musí odpovídat způsobu jeho dalšího zpracování, nebo manipulaci s nimi.

1.3.4. Požadavky na kovonosné suroviny

Všeobecně je úkolem, aby náklady na výrobu surového železa při použití dané rudy byly minimální. Vhodnost jednotlivých druhů rud, aglomerátu nebo pelet pro výrobu surového železa záleží na jednotlivých vlastnostech suroviny.

1.3.5. Chemické a mineralogické vlastnosti

Jsou dány chemickým složením suroviny a množstvím a složením jednotlivých mineralogických složek. Obsah základních kovů v rudě (% Fe + Mn) se označují jako kovnatost. Obsah by neměl být nižší než 50 %. Důležitá je ale také chemická povaha a množství hlušiny.

Byl zaveden pojem bohatosti rudné vsázky Br:

$$B_r = \frac{\% (Fe + Mn)}{100 + p} \cdot 100 \quad (\%)$$

p – spotřeba vápence v kg na 100 kg rudy

Z chemického složení také vychází i definice bazicity. Ve VP teorii se používá B1 úzká bazicita a B2 rozšířená bazicita.

$$B_1 = \frac{(CaO)}{(SiO_2)}$$

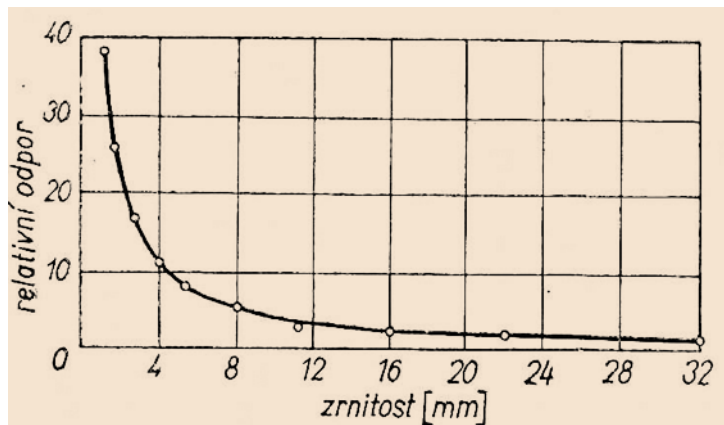
$$B_2 = \frac{(CaO) + (MgO)}{(SiO_2) + (Al_2O_3)}$$

Z toho vyplývají kyselé $B < 1$ a zásadité bazicity $B > 1$, tzn. představují procentuální obsah jednotlivých oxidů v surovině. Suroviny mohou obsahovat i některé sloučeniny S, P, As, Cr, Pb, Cu, Zn, Ti, aj., které mohou ovlivňovat jejich použití při výrobě SŽ.

1.3.6. Fyzikální vlastnosti

Vlhkost rud souvisí hlavně s jejich strukturou a zrnitostí. Hydroskopická voda absorbovaná na povrchu a v pórech kusů ztěžuje manipulaci při zpracování.

Kusovost rudných surovin se musí posuzovat podle použití (aglomerát, pelety).



Obr. 1.4 Odpor proudění plynu v sypaných vrstvách o různé zrnitosti

Například na obr. je znázorněno, že zmenšením střední kusovosti ze 32 mm na 12 mm vzroste odpor proudění na dvojnásobek.

Na výrobu aglomerátu se používají železné rudy o zrnitosti pod 10 mm. Pro výrobu pelet jsou vhodné nejjemnější suroviny. Většinou o zrnitosti pod 0,2 mm. Rudy, které mají po obohacení zrnitost pod 1 mm, a obsah železa nad 60 % nazýváme koncentráty.

Měrná hmotnost se stanovuje jako skutečná, zdánlivá a násypná. Z násypných vlastností je důležitý hlavně sypaný úhel, jehož znalost je důležitá při práci zásypných zařízení vysoké pece a při projektování rudných skládek.

Pórovitost je definována podílem hmotou nezaplňného objemu z celkového objemu kusu rudy. Mezi póry se započítávají všechny volné prostory uvnitř kusu rudy včetně trhlin.

Za makropóry se obvykle považují póry větší než 0,1 mm, kdežto póry s průměrem menším než 10^{-6} mm se nazývají mikropóry. Lineární rozměry v mezích 10^{-6} až 10^{-1} mm spadají tedy do oblasti pórů střední velikosti. Pórovitost můžeme vypočítat:

$$\varepsilon_r = \left(1 - \frac{\rho_{zd}}{\rho_{sk}}\right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.1)$$

kde ρ_{zd} , ρ_{sk} je zdánlivá a skutečná měrná hmotnost (kg.m)

Pórovitost přírodních rud je velmi rozdílná. Nejmenší je u magnetitů (1 až 5 %) a největší u hnědelů (10 až 27 %).

Mechanickou pevností rud je obecně myšlen odpor proti rozpojování jejich částic mechanickým namáháním. Hodnota tohoto odporu charakterizuje, do jaké míry si ruda zachová svoji celistvost účinkem tlaku, nárazu, pádu nebo otěru. Podle druhu tohoto namáhání se pak rozlišuje pevnost v tlaku, vzdornost proti nárazu (tříštivost) a vzdornost proti otírání (otíravost).

1.3.7. Fyzikálně-chemické vlastnosti

Temoplastické vlastnosti surovin (měknutí) zhodnocují fyzikálně-chemické změny, které surovina prodělává při přechodu do plastického stavu. Měknutí je stav, který předchází tavení. Pro použití ve vysoké peci má mít surovina vysokou teplotu začátku měknutí a při tom úzký interval

měknutí. Tepelným zpracováním (spékáním, vypalováním pelet) se termoplastické vlastnosti podstatně mění.

Redukovatelností nazýváme souhrn vlastností suroviny, které určují rychlost přeměny oxidů železa (manganu) na kov působením redukovadla. Měřítkem redukovatelnosti je úbytek hmotnosti rudného vzorku za jednotku času, způsobený přechodem kyslíku do plynu.

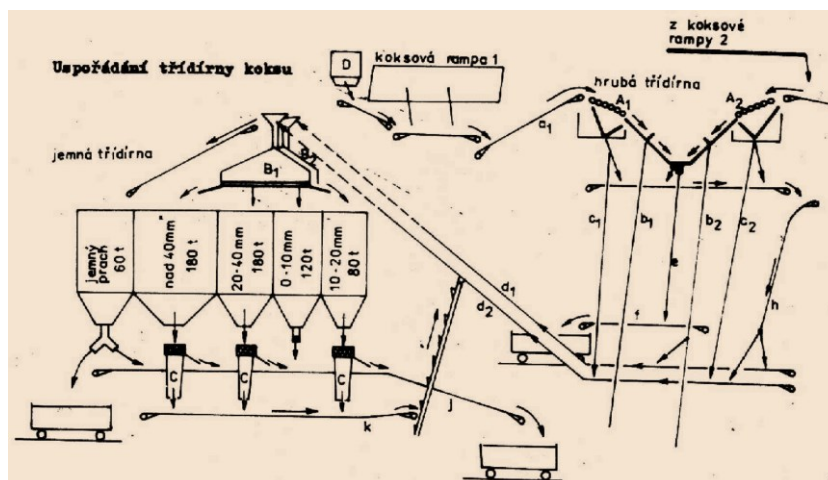
1.4. Paliva

Převažujícím palivem při výrobě surového železa je vysokopecní koks. Koks ve vysoké peci plní úlohu nejen paliva, ale i funkci redukovadla, nahličovadla a funkci nosné kostry.

Část vysokopecního koksu je možno nahradit palivy v pevném anebo plynném stavu dmýchané výfučnami do nístěje vysoké pece (prachové uhlí, zemní plyn apod.).

1.4.1. Třídírny koksu

Vyrobený koks, tzv. celkový koks představuje polydispersní směs zrn různého tvaru pro další použití, třídí se na různé granulometrické frakce (třídy) tak, aby svojí velikostí co nejvíce vyhovoval následnému technologickému použití. Proto se provádí třídění koksu. Zprvu jde o třídění hrubé na roštech typu např. Diestl-Suski. Nadsítné (zrno o velikosti větší než je rozteč mezi pomalu rotujícími roštnicemi) jde obvykle k místu spotřeby, zbývající část se převádí na jemné třídění, kde dochází k dalšímu dělení zrn. Uspořádání třídírny je patrné z obrázku



Obr. 1.5 Uspořádání třídírny koksu

1.4.2. Vlastnosti koksu

Koks je pevným pórovitým odplyněným zbytkem z karbonizace uhlí, vedené až k teplotám 950 až 1050 °C. Jeho hlavní použití je pro vysokopecní výrobu železa, pro slévárenské účely, k chemické výrobě a pro komunální sféru (palivo).

Chemické vlastnosti koksu

Anorganické složky tvoří voda a popel. Vlhkost závisí zejména na režimu hašení, na kusovosti koksu, kusy větší zrnitosti obsahují méně vody než jemnější frakce, celkový koks má přibližně 6,5 % vody, vysokopecní třídy kolem 3 až 4 %. Obsah popela leží kolem 8 až 10 %. Voda působí jako balast, ke svému odpaření potřebuje určité množství tepla, složené ze skupenského tepla vypařování a citelného tepla, potřebného k ohřátí uvolněné vodní páry na teplotu odcházejících produktů.

Organickou hmotu (hořlavinu) tvoří především uhlík a velmi nízké koncentrace vodíku, kyslíku, dusíku a síry. Vodík a kyslík s částí uhlíku tvoří zbytkovou prchavou hořlavinu, jejíž obsah u dobře zkoksované hmoty činí 0,9 až 1,2 %.

Výhřevnost koksu leží kolem 30 až 32 MJ na 1 kg.

Fyzikální vlastnosti koksu

U koksu rozlišujeme *skutečnou hustotu*, její hodnota činí zhruba $1,8 \text{ g.cm}^{-3}$, ta nasvědčuje o stupni zralosti koksu, dále *hustotu zdánlivou*, která se pohybuje v rozmezí 0,9 až $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$. Je odrazem hustoty vsázky, rychlosti odplynění a obsahu prchavé hořlaviny ve vsázce. Z obou hodnot lze posléze vypočítat pórovitost koksu.

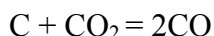
Skutečná hustota představuje hmotnost objemové jednotky zkoumaného koksu, zbaveného dutin, pórů a trhlin jeho rozemletím na zrno pod 0,2 mm. **Zdánlivá hustota** označuje hmotnost objemové jednotky reálných zrn koksu, vzniklých při karbonizačním pochodu. Rozdíl skutečné a zdánlivé hustoty dělený skutečnou hustotou je pak matematickým vyjádřením pórovitosti. Zdánlivá hustota a zrnitostní skladba koksu ovlivňují sypanou hustotu, která je tím větší, čím je zrno jemnější a pohybuje se v rozmezí od 0,45 (nejhrubší) do 0,7 (nejjemnější) tun na 1 m^3 .

Elektrická vodivost koksu velmi citlivě reaguje na stupeň zralosti koksu. Čím je koks strukturálně uspořádanější, tím vyšší je vodivost. Stanoví se obvykle recipročně jako měrný elektrický odpor. Strukturální pevnost koksuje především dána jeho tvrdostí a stěnovitostí (tloušťkou stěn mezi póry). Zápalná teplota závisí na chemickém složení a aktivním povrchu koksu a leží tím výše, čím vyšší je konečná teplota karbonizace a čím menší je obsah prchavé hořlaviny koksu. Zápalná teplota bývá kolem 650 C.

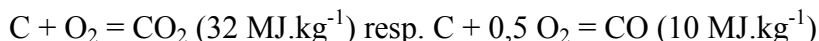
Fyzikálně-chemické vlastnosti koksu se obvykle omezují jen na reaktivitu koksu.

Rozlišujeme při tom

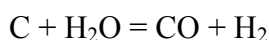
- reaktivitu vůči oxidu uhličitému (Boudoardova reakce) podle vztahu



- reaktivitu vůči kyslíku, označovanou též jako spalitelnost podle vztahu



s tím, že každá z uvedených rovnic má svoje tepelné zabarvení, což hraje roli jednak ve slévárnách jednak v oblasti energetiky *reaktivitu vůči vodní páře* podle rovnice



Hodnocení reaktivity koksu se provádí například podle japonského způsobu, celkově označovaného jako postup NSC (Nippon Steel Company). Zde se zvláštním postupem (ohřev připravené zrnitostní frakce na vysoké teploty v atmosféře oxidu uhličitého) zkoumají pevnostní parametry koksu po proběhnutí reakci a vypočítávají se hodnoty CSR (Coke Strength after Reaction) resp. CRI (Coke Reactivity Index).

Fyzikálně-mechanické vlastnosti koksu

Jsou ovlivněny jakostí použité koksované vsázky a režimem karbonizace. V důsledku proběhnutí smrštní je koksová hmota prostoupena sítí trhlin. Při použití zejména ve vysokopečním provozu se uplatňuje mechanické namáhání zrn koksu otěrem. K hodnocení odolnosti proti tomuto způsobu mechanického namáhání se stanoví pevnost v otěru a množství otěru bubnovou zkouškou MICUM. Po provedené zkoušce se vypočítává pevnost M40 a otěr M10. M40 leží mezi 72 až 80 %, hodnota M10 kolem 6 %.

Vedle této klasické zkoušky se někdy provádí hodnocení metodou IRSID příp. pádová zkouška Shatter test a jiné.

Velmi významná je celková zrnitostní skladba koksu. Po třídění se celkový koks rozděluje do těchto tříd:

- nad 90 mm - slévárenský - pro kuplovny;
- 60 až 90 mm - pro vysokopecní výrobu, v současnosti se užívají i menší zrna - dokonce nad 25 mm - úspory, cena;
- 40 až 60 mm - ořech I. - uplatnění zejména v chemické výrobě - redukovadla, karbidy apod., zplyňování;
- 20 až 40 mm - ořech II. - zejména pro komunální otop;
- 10 až 20 mm - hrášek - otop, zplynění, redukovadla, chemická výroba, výdusky, žáruvzdorné materiály;
- 0 - 10 mm - prach-pro aglomeraci.

Zde jsou uvedeny pouze rámcové účely použití, existuje více možností, avšak řídí se jednak dostupností na trhu, jednak cenovými relacemi.

Vedle koksu byla anebo jsou využívána další druhy paliva:

Hnědouhelný koks, dřevěné uhlí, antracit, topné oleje a plynná paliva (vysokopecní plyn, koksárenský plyn a zemní plyn).

1.5. Struskotvorné přísady

Prvky a sloučeniny, které se neredukují, přecházejí do strusky.

Za struskotvorné přísady považujeme bazické přísady (vápenec, dolomitický vápenec a dolomit), které vytvářejí během přechodu do tekuté fáze strusku, za účelem trvale vázat kyselé hlušinové složky rud a další nežádoucí příměsi.

Struskotvorné přísady zabezpečují, aby vznikla vysokopecní struska o optimálním chemickém složení a s optimálními technologickými vlastnostmi. Nejpoužívanějšími struskovými přísadami jsou vápenec, dolomitický vápenec a dolomit.

Kusovost struskotvorných přísad ve vysoké peci by měla být v rozmezí 20 - 40 mm.

1.6. Složení vysokopecní vsázky

Složení vysokopecní vsázky vychází z materiálově bilance vsázkových surovin a předpokládaných produktů. Pro vznik požadovaných metalurgických vlastností musí mít vsázka určitý podíl zásaditých přísad, tzv. **volných zásad**.

Pro každou složku vsázky se určí hodnota volných zásad složky RO_m.

Například:

$$RO_m = (CaO_m + MgO_m) - B_2 (SiO_{2m} + Al_2O_{3m}) \quad [\%] \quad (1.2)$$

kde B₂ je požadovaná bazicita strusky:

$$B_2 = \frac{(CaO) + (MgO)}{(SiO_2) + (Al_2O_3)} \quad (1.3)$$

Množství bazických přísad na danou složku se potom vypočítá:

$$V_m = \frac{RO_m}{RO_v} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ složky}] \quad (1.4)$$

kde RO_m je hodnota volných zásad m -té složky a RO_v hodnota volných zásad bazické přísady.

Množství bazických přísad pro jednotlivé složky vsázky se sčítají a dostaneme celkové množství bazických přísad. Při přesném výpočtu se počítá i s přechodem křemíku do surového železa, s odpařováním prvků a dalšími parametry.

Množství paliva (redukovadla koksu) se v minulosti určovalo podle „Šárkova diagramu“ (viz Hutnictví železa-Návody ke cvičení z železářství a koksárenství) ze závislosti na bohatosti vsázky.

Dnes se potřebné množství paliva určuje pomocí statistických matematických modelů, nebo z tepelné bilance vysokopecního pochodu.

Podíl koksu (paliva) ve vsázce závisí kromě množství a složení vsázkových surovin i na jejich jakosti, na konstrukčních a technologických parametrech vysoké pece, na požadované jakosti a složení surového železa a na dalších parametrech.

Podíl jednotlivých vsázkových surovin se většinou uvádí v měrných jednotkách tj. přepočteno na jednotku vyrobeného surového železa.

V současnosti je měrná spotřeba paliva v moderní vysoké peci kolem $450 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1} \text{ s.ž.}$

1.7. Úprava surovin

Vsázkové suroviny pro vysokou pec se mohou zpracovávat ve vytěženém stavu pouze ojediněle. Palivo a struskotvorné přísady se většinou upravují pouze granulometrický způsobem. Kovonosná vsázka vyžaduje téměř vždy složitou úpravu.

Způsoby úpravy rud za studena: drcení, mletí, třídění, homogenizace a většina způsobů obohacování rud.

Způsoby úpravy rud za tepla: pražení, spékání, peletizace a případně částečná redukce (předredukce) rud.

Provozy aglomerace jsou většinou součástí vysokopecních závodů. Ostatní způsoby úpravy rud se provádějí většinou v místě těžby.

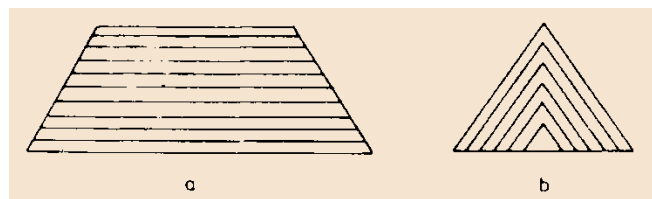
1.7.1. Homogenizace surovin

Účelem zprůměrnování surovin je zmírnit kolísání jejich vlastností a chemického složení. Pro zabezpečení rovnoměrného chodu vysoké pece je potřebné, aby především obsah železa a bazicita vsázkových surovin (obsah SiO_2) kolísaly minimálně. Při každé manipulaci se surovinou dochází k určitému zprůměrování. Ke skutečnému zprůměrování však dochází jen ve zvláštních homogenizačních zařízeních.

Podstatou homogenizace surovin je jejich uskladňování ve velkém počtu tenkých vrstev a odběr surovin z takto vytvořené homogenizační hromady tenkými řezy ve směru přirozeného násypného úhlu, nebo ve směru kolmém na uložení vrstvy.

Jednotlivé vrstvy se zakládají do homogenizační hromady vodorovně anebo ve směru přirozeného násypného úhlu.

Podle způsobu zakládání vznikají potom homogenizační hromady s průřezem lichoběžníkovým anebo trojúhelníkovým.



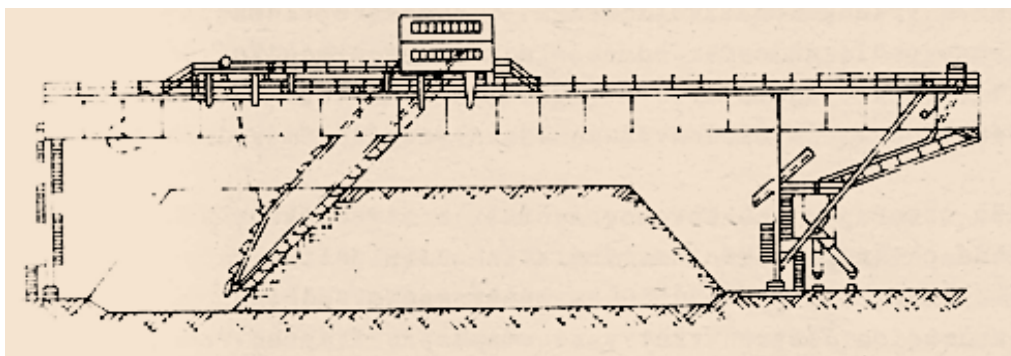
Obr. 1.6 Průřez homogenizační hromadou

Jako příklad můžeme uvést homogenizační zařízení podle F. Patrmána, které využívá mostového jeřábu k přísunu a také k odsunu surovin na obr. 1.6.

Ruda se ukládá pomocí pásových dopravníků se shazovacími smyčkami na činné ploše jeřábové dráhy a odebírá se podél hromady pomocí korečkového nakladače. Tento je posuvatelny v podélném a příčném směru pomocí druhého mostového jeřábu.

Výška hromady je 13 m a hlavní výhodou je větší využití skladovací plochy. Vysoký stupeň zprůměrnění je základním předpokladem k vytvoření aglomerační směsi stabilního složení a vlastností. Takto vytvořená směs dává předpoklad také k rovnoměrné práci vysoké pece. Účinná homogenizace je také nutná k zavedení automatického řízení procesu spékání.

Proto se zavádí dvojstupňová homogenizace. V prvním stupni se homogenizují jednotlivé suroviny samostatně a ve druhém stupni se zakládají podle předem určeného programu do společné homogenizační skládky. Celý zakládací proces je automatizován.



Obr. 1.6 Homogenizační zařízení podle F. Patrmána

1.8. Aglomerace a peletizace vysokopecní vsázky

1.8.1. Spékání železných rud (aglomerace)

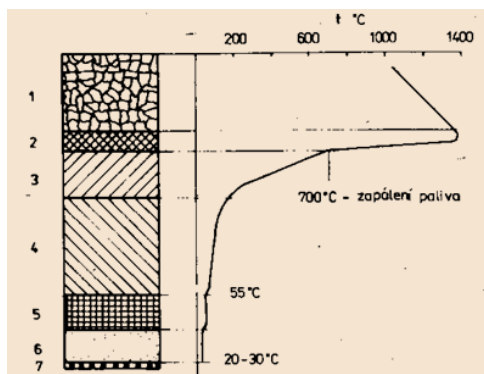
Aglomerace (spékání železných rud a koncentrátů) je v současnosti nejrozšířenější způsob přípravy vysokopecní vsázky. Zavedení této technologie se výroba vysokých pecí mohla významně zvýšit (dvojnásobek) a poklesla spotřeba koksu (na polovinu). Aglomerace umožňuje zpracovávat rudy o malé kusovosti a také různé formy průmyslových odpadů, které se nadají ve VP volně zpracovávat.

Základy procesu spékání rud

Podstatou výroby aglomerátu je ohřev připravené aglomerační vsázky na takovou teplotu, při které se jednotlivá zrna vsázky vzájemně spojují a vytvářejí spečenou pórovitou hmotu – aglomerát. Na mechanismu spojování se podílejí také difuzní děje. Spékání se většinou provádí v klidné vrstvě uložené na roštu. Je to plynule pracující článkový pás, kde jsou jednotlivé články tvořeny aglomeračními vozíky (paletami) s roštovým dnem.

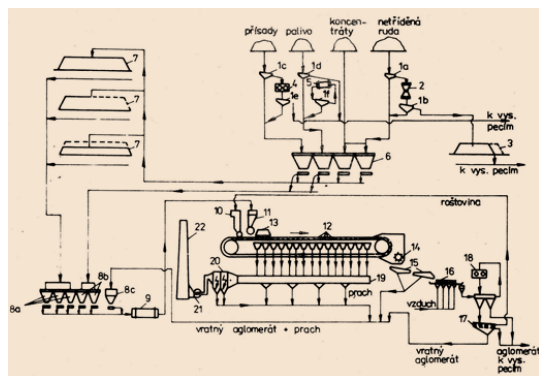
Spékaná směs obsahuje mimo kovonosné části a struskové přísady také rovnoměrně rozptýlené palivo. Spékání začíná zažehnutím paliva v povrchové části vrstvy vnějším tepelným zdrojem a účinkem prosávaného vzduchu hoření pokračuje ve směru proudu vzduchu.

Při podílu paliva 5-7 % se dosahuje teploty hoření 1300-1500 °C. Rychlost, kterou postupuje fronta hoření ve směru proudícího vzduchu, je shodná s rychlostí spékání (obr. 1.7). Provozy aglomerace můžeme rozdělit na studený a teplý provoz. Technologické schéma aglomeračního závodu je na obr. 1.8.



- 1 - pásmo hotového aglomerátu;
2 - pásmo spékání;
3 - pásmo intenzivního ohřevu;
4 - pásmo sušení;
5 - pásmo převlhčení;
6 - pásmo původní směsi; 7 - rošt

Obr. 1.7 Rozdělení vrstvy směsi na jednotlivá pásma



- 1 - třídiče surovin; 2 - drtič rud; 3 - homogenizační sklad kusové rudy; 4 - drtič přísad; 5 - koksový plyn; 6 - zásobníky s dávkovacím zařízením; 7 - homogenizační skládky aglomerační směsi;
8 - denní zásobníky; 9 - míchací a sbalovací buben; 10 - dávkovací zásobník roštoviny; 11 - dávkovací zásobník aglomerační směsi;
12 - palety spékacího pásu; 13 - zapalovací pec; 14 - drtič aglomerátu; 15 - třídič horkého aglomerátu; 16 - chladič aglomerátu; 17 - třídič studeného aglomerátu k získání roštoviny;
18 - drtič nadsítňového aglomerátu; 19 - sběrné potrubí spalin; 20 - odlučovač prachu; 21 - exhauster; 22 - komín.

Obr. 1.8 Technologické schéma aglomeračního závodu

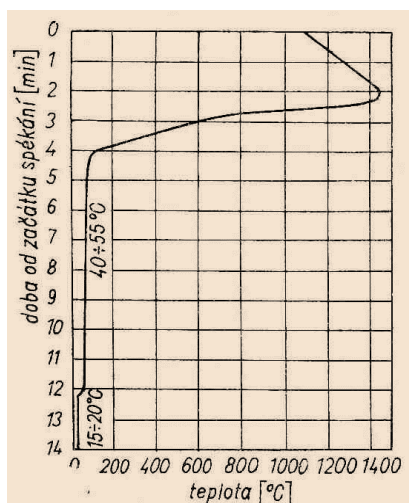
Horní hranice rudy se omezuje obvykle na 60 mm, kusová ruda 10-60 mm, pod 10 mm je tzv. aglomerační ruda. Zásadité přísady kusovosti max. 3 mm a také zrnitost koksu max. 3 mm. Rychlost spékacího pásu musí být řízena tak, aby byl pochod spékání ukončen před přechodem palet z vodorovné do šikmé polohy nad předposlední odsávací komorou spékacího pásu.

Tepelný režim procesu spékání

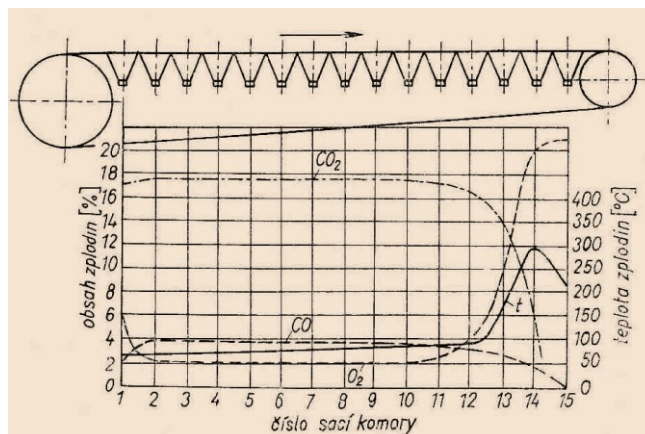
Začátek spékacího procesu je dán vznícením palivových zrn. Zapalovací pec je zavěšena nad spékacím pásem, za podáváním zařízení vsázky. Jako zdroj tepla je nejvhodnější směsný plyn. Pro spolehlivé zapálení na povrchu vrstvy se předpokládá:

- určitý přívod tepla (např. 45 MJ.m⁻² odsávané plochy)
- doba zapalování (např. 40-90 s), podle zrnitosti paliva, vlhkosti směsi aj.
- určitý podtlak (např. 5 kPa) v odsávacích komorách pod zapalovací pecí

Zapalování paliva ovlivňuje pevnost aglomerátu na povrchu a tím množství vratného aglomerátu. V průběhu spékání hoří palivo pouze ve vrstvě 10-30 mm tzv. fronta hoření. Rychlost hoření směrem k roštu je 0,3-0,4 mm.s⁻¹. Pro přebytek vzduchu hoří pevné palivo dokonale na CO₂, minimum na CO. Prochází teplotní vlna vyvolaná hořením paliva a druhá přestupem tepla mezi plynnými zplodinami hoření a vsázkou. Optimální je soulad mezi oběma. Případný nesoulad zvyšuje spotřebu paliva a snižuje výkon. Závislost některých parametrů spékání na hořlavosti paliva je na obr. 1.9 a 1.10.



Obr. 1.9 Průběh teploty ve spékané vrstvě ze studené surové vsázky v závislosti na době od očátku pochodu

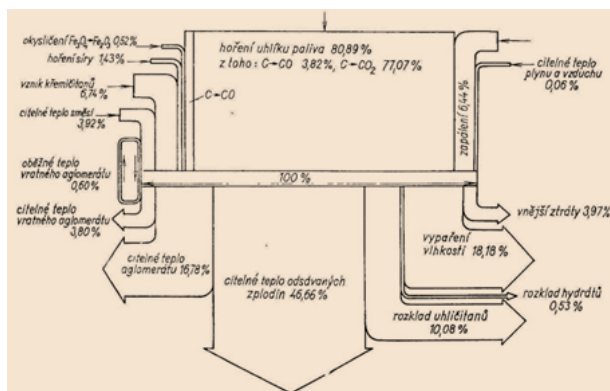


Obr. 1.10 Příklad změn chemického složení a teploty odsávaného plynu v průběhu spékání

Příklad hodnocení tepelných hodnot jednotlivých dějů a procesů je uveden v tepelné bilanci procesu spékání tab. 1.1 na 1 kg aglomerátu a následně stejný příklad v podobě tepelná bilance pochodu spékání při výrobě zásaditého aglomerátu s přísadou 4,4 % vápence do vsázky a s celkovou spotřebou tepla 1 884 kJ na 1 kg aglomerátu na obr.1.11.

Tab. 1.1 Tepelná bilance výroby 1 kg aglomerátu

Položky přívodu a spotřeby tepla	kJ kg ⁻¹	%
Přívod tepla:		
Teplo hoření uhlíku paliva: na CO ₂	1 452,0	77,07
na CO	72,0	3,82
Teplo z vnějšího zdroje (zapalování)	121,3	6,44
Okysličení Fe ₂ O ₄ na Fe ₂ O ₃	9,8	0,52
Hoření síry	27,0	1,43
Teplo vzniku křemičitanů	127,0	6,74
Citelné teplo vzduchu a plynu	1,1	0,06
Citelné teplo vsázky	73,8	3,92
Přívod tepla celkem	1 884,0	100,00
Spotřeba tepla:		
Rozklad uhlíkatů	189,9	10,08
Rozklad hydrátů	10,0	0,53
Vypaření vlhkosti	342,5	18,18
Citelné teplo aglomerátu	316,1	16,78
Citelné teplo vratného aglomerátu	71,6	3,80
Citelné teplo plyných zplodin	879,1	46,66
Vnější tepelné ztráty	74,8	3,97
Spotřeba tepla celkem	1 884,0	100,00



Obr. 1.11 Tepelná bilance pochodu spékání při výrobě zásaditého aglomerátu

Plyndynamika spékané vrstvy

Plynná fáze prochází při spékacím procesu vrstvou aglomerační směsi a aglomerátu. Plyndynamické podmínky ve spékané vrstvě jsou určeny především množstvím, tlakem (podtlakem), rychlostí, teplotou a chemickým složením plynné fáze. Plynná fáze zabezpečuje přísun kyslíku do pásma hoření, transport vody a plyných látek vznikajících při fyzikálně-chemických dějích ve vrstvě a rovněž podstatnou část procesů přestupu tepla.

Prodyšnost zrnité vrstvy můžeme vypočítat

$$\omega = \frac{V}{\tau + A} \quad (1.5)$$

V – množství protlačovaného vzduchu (m³)

τ – čas (s)

A – průřez vrstvy kolmé na proud (m²)

Také můžeme vypočítat tlakovou ztrátu (viz Literatura). Jako příklad můžeme uvést na aglomeračních zařízení práci s pod tlakem 7-14 kPa a množství vzduchu prosávaného vrstvou směsi při spékání 90-120 m³ na 1 m² plochy pásu. Ztráta přísáváním netěsnostmi může být např. 20-50 m³.

Zvyšováním prodyšnosti spékané směsi se významně zvyšuje výkon spékacího zařízení.

Fyzikálně – chemické děje ve spékané vrstvě

Znalost těchto dějů a procesů při spékání v aglomerační směsi je předpokladem dosažení požadované jakosti a ekonomiky výroby aglomerátu. Odstraňování vlhkosti je endotermický proces. Disociace hydrátů a uhlíčanů. Voda vázaná ve formě hydrátů se začíná uvolňovat při teplotách nad 320 °C, proces probíhá intenzivně při vyšších teplotách a k úplnému odstranění se musí dosáhnout teploty kolem 1300 °C.

Redukční a oxidační děje

Souběžně s dehydratací vsázky a disociací uhlíčanů začíná probíhat ve spékané vrstvě i částečná redukce oxidů. Redukční pochody probíhají hlavně v blízkosti zrn paliva při značné koncentraci CO.

Především tyto redukční procesy:

- Fe₂O₃ na Fe₃O₄ a to pomocí CO a tuhým C;
- Fe₃O₄ na FeO a to pomocí CO a tuhým C;
- Mn₃O₄ a to pomocí CO;
- As₂O₅ a FeAsO₄·2H₂O a to pomocí CO na As₂O₃

Nejvýznamnější oxidační procesy:

- C paliva na CO₂ nebo CO; -CO pomocí kyslíku na CO₂; -FeO na Fe₃O₄ a Fe₃O₄ na Fe₂O₃;
- FeAsS kyslíkem na za vzniku As₂O₃; -sloučenin obsahující S.

Odstraňování nežádoucích prvků

Obsah jednotlivých škodlivých příměsí se mění v průběhu spékání a stupeň odstranění se mění na technologických podmínkách spékání.

Síra je v aglomerační vsázce vždy obsažena. Sulfidická forma se při běžné technologii odstraňuje dobře, ale síranová síra se odstraňuje obtížně a to jen částečně.

Na odstranění *arzénu* jsou výhodné podmínky při vysoké měrné spotřebě paliva

Odstraňování *zinku* ze spékané vsázky redukcí ZnO oxidem uhelnatým, nebo uhlíkem končí při teplotách, které jsou vyšší, než je bod varu zinku (907 °C). Jeho pára se potom oxidují kyslíkem i CO₂. Vzniklý ZnO kondenzuje v chladnějších místech vsázky.

Fosfor se prakticky neodstraňuje a přechází do aglomerátu.

Vznik a tuhnutí aglomerační taveniny

V pásmu spékání s nejvyšší teplotou vzniká aglomerační tavenina. Její množství, chemické složení, způsob a rychlost jejího ochlazování určuje vlastnosti aglomerátu a ovlivňuje výkon spékacího zařízení.

Tvorbu prvotní aglomerační taveniny vytváří reakce v tuhém stavu. Jednotlivé částice nemění svůj tvar až do roztavení. Reakce probíhají pouze mezi kontaktovaným částicemi a *hlavním mechanismem reakcí je difúze*.

Množství taveniny se zvětšuje v průřezu směrem k roštu, ale rychlost ochlazování klesá. Tyto rozdíly jsou potom příčinou různé jakosti aglomerátu. Horní vrstva je málo spečená a spodní je příliš natavená a málo redukovatelná.

Řízení a automatizace procesu spékání

Pro řízení celé výrobní technologie procesu spékání je nutná kontrola a vyhodnocování všech článků přípravy aglomerační směsi, vlastního spékání a konečné úpravy.

Odběry vzorků jednotlivých surovin se prováděly pomocí poloautomatických vzorkovačů a chemické rozborů se provádějí analytickými metodami. Dnes jsou již plně automatizované analyzátory, které pracují non-stop (výzkum probíhá např. v TŽ a.s.)

Úroveň hladiny jednotlivých zásobníků jsou vyhodnocovány pomocí dotykových sond, tenzometrických vah anebo jejich kombinací.

1.8.2. Peletizace rud

Obohacování rudných surovin vede k růstu podílů velmi jemnozrnných koncentrátů. Protože při spékání surovin zrnitosti pod 0,1 mm výrazně klesá výrobnost aglomeračních zařízení, hledaly se nové technologie umožňující úpravu kusovosti těchto surovin. Jako nejvhodnější se ukázala technologie výroby pelet, spočívající ve sbalování surovin do tvaru pravidelných kulových sbalků a jejich následném zpevňování.

Zvýšená jemnozrnnost koncentrátů výrazně zvyšuje účinnost obohacovacích zařízení, ale způsobuje potíže při jejich dopravě. Proto jsou peletizační závody obvykle součástí báňského a úpravárenského komplexu.

Technologie spékání a technologie peletizace používají rozdílných zrnitostí surovin, proto si nekonkurují, ale vzájemně se doplňují.

Podstata procesu peletizace

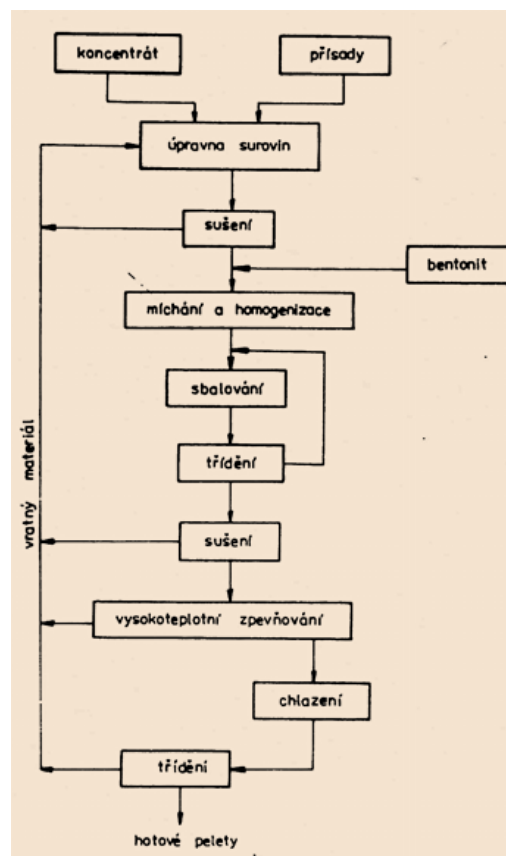
Výrobu železorných pelet je možno rozdělit do dvou základních operací:

- Výroba surových sbalků ve tvaru pravidelných kuliček.
- Zpevňování těchto sbalků.

Podstatou výroby surových sbalků je odvalování optimálně zvlhčených surovin po šikmé ploše. Sbalky vytvořené v první fázi výroby pelet nemají pevnost, a proto není možné jejich použití ve VP.

Tyto pelety se proto musí v další fázi zpevňovat a to nejčastěji vypalováním. To je ohřevem na teplotu 1250 až 1350 °C obvykle v oxidační atmosféře. Peletizační závod zahrnuje obvyčejné mimo vlastních peletizačních zařízení také drtírnu, mlýnici a obohacovací zařízení. Zjednodušené technologické schéma výroby pelet je znázorněno na obr. 1.12.

Koncentráty používané k výrobě pelet obsahují více než 60 % železa a méně než 7 % hlušiny. Proto mají vyrobené pelety v porovnání s aglomerátem vždy vyšší bohatost.



Obr. 1.12 Zjednodušené technologické schéma výroby pelet

Na pevnost sbalků má rozhodující vliv granulometrické složení surovin. Obecně platí, že se vzrůstající jemností částic roste pevnost sbalků. Za suroviny vhodné k peletizaci se považují materiály zrnitosti pod 0,2 mm.

V praxi se používají koncentráty s určitým podílem podstatně větších zrn, ale má být splněna podmínka, že minimálně 60 % zrn sbalované suroviny má rozměr menší než 0,04 mm.

Optimální zrnitost koncentrátu závisí i na jeho druhu, hlavně na obsahu jílových složek, které zlepšují sbalitelnost surovin. Podmínkou vzniku vazebních sil a tvorby surových sbalků je dobrá smáčivost koncentrátu. Většina materiálů používaných ke sbalování je dobře smáčivá. Smáčivost je možné zlepšit přidávkem povrchově aktivních nebo koloidních látek ve formě pojiv, např. bentonitu, nebo vápna a smáčivost může být ovlivněna i vlastnostmi vody používané k vlhčení sbalovaných materiálů.

Výroba surových sbalků

Mechanismu výroby surových sbalků můžeme rozdělit na dvě etapy:

- vznik zárodků sbalků,
- růst sbalků.

Při vlhčení jemnozrné suroviny se tvoří na povrchu jednotlivých zrn tenký vodní film a v místech vzájemného styku zvlhčených zrn vznikají kapalinové (vodní) mastky, které jsou zdrojem adhezních sil.

Pokud se účinněji neuplatní mechanické síly při pohybu vzniklých zárodků po nakloněné ploše, zůstává mezi zrny obalenými vodním filmem uzavřen vzduch, který brání většímu sblížení zrn. Soudržnost zárodků sbalků je v této etapě ještě malá a část se jich znovu rozpadá.

V další etapě dochází k vytlačení přebytečné vody na povrch sbalků a převlhčený povrch je pak zdrojem adhezních sil pro další zrna. Současně s vytlačováním vody se vytlačuje z prostoru mezi zrny i vzduch a dochází ke sblížování zrn. Důsledkem těchto jevů je růst soudržnosti sbalků. Tato fáze sbalování je etapou rychlého růstu sbalků.

Zpevňování sbalků

Praktický význam má v hutnictví železa jen vysokoteplotní zpevňování sbalků tzv. *vypalování*, která se provádí nejčastěji v oxidační atmosféře.

Vysokoteplotní zpevňování sbalků začíná jejich sušením a pokračuje postupným ohřevem na teplotu 1250 až 1350 °C.

Sušení začíná odpařováním vody z povrchu sbalků a transportem vlhkosti z vnitřku sbalků na jejich povrch. Jestliže je rychlost odpařování vody z povrchu sbalků větší než přívod vody na povrch, dochází k odpařování vody i uvnitř sbalků, a tak při velké rychlosti odpařování může porušovat tvar sbalků. *Rychlost odstraňování vody* ze sbalků závisí na tepelné vodivosti surovin, na podmínkách přestupu tepla a na pórovitosti a vlhkosti sbalků.

Při vlastním vysokoteplotním zpevňování probíhají ve sbalcích složité fyzikálně-chemické procesy. Například:

- oxidace magnetitu na hematit, přičemž se uvolňuje značné množství tepla,
- rekrytalizace magnetitu a hematitu,
- disociace hydrátů, případně hematitu a uhličitanů,
- reakce v tuhém stavu,
- vznik určitého množství taveniny za účasti oxidů hlavně z hlušinové části koncentrátů,
- odstraňování nežádoucích prvků, především síry.

Jednotlivé *procesy neprobíhají samostatně*, ale navzájem se silně ovlivňují.

Pevnost pelet závisí na vlastnostech surových sbalků, na druhu a průběhu reakcí probíhajících v tuhém i tekutém stavu, na množství a vlastnostech taveniny a na podmínkách jejího tuhnutí.

Zařízení paletizačních závodů

Druh a kapacita technologických zařízení peletizačních závodů závisí na druhu, množství a vlastnostech vstupních surovin, případně na umístění závodu. Zařízení zabezpečují hlavně následující úkoly:

- úpravu granulometrického složení a vlastností surovin
- homogenizaci složení a vlastností materiálu
- přesné dávkování složek sbalované směsi
- dokonalé promíchání směsi
- vytvoření surových sbalků požadované velikosti a vlastností
- transport surových sbalků k vypalovacímu zařízení
- zpevňování sbalků
- kontrolu jakosti vyrobených pelet.

Součástí peletizačních závodů jsou i provozy zabezpečující údržbu zařízení a dopravu materiálu uvnitř závodu.

Stále větší význam mají zařízení na odstraňování škodlivých prvků ze spalin a odpadních vod.

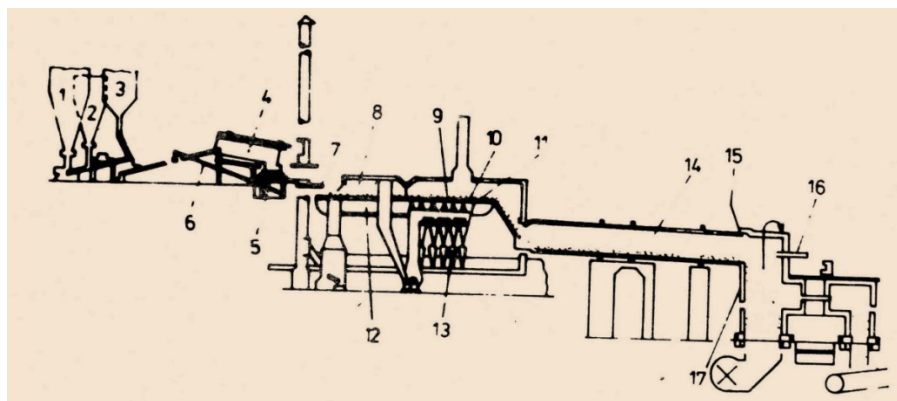
Pro mletí, třídění, homogenizaci a dávkování surovin se používají stejná zařízení jako u spékání železných rud.

Směs určená k peletizaci se *míchá pomocí bubnových, lopatkových nebo šnekových míchaček*. Míchací zařízení mohou být opatřena vlhčícím zařízením.

Sbalování jemnozrnných koncentrátů se provádí ve *sbalovacích bubnech, nebo ve sbalovacích mísách*.

Na obr. 1.13 je znázorněn příklad schématu *kombinovaného vypalovacího zařízení* roštový pás - troubová otáčivá pec (tzv. grate kiln) rozděluje proces zpevňování pelet do tří agregátů.

Sušení a předehřev sbalků se uskutečňuje na přímém roštovém páse, *vypalování* probíhá v otáčivé troubové peci a hotové pelety se v chladiči *ochlazují* prosáváním chladného vzduchu. Systém cirkulace vzduchu a spalin umožňuje pracovat s nízkou spotřebou tepla.



- 1 - zásobník koncentráту;
- 2 - zásobník vápna nebo suché rudy;
- 3 - zásobník bentonitu; 4 - sbalovací buben; 5 - třídění; 6 - dopravník vratného materiálu; 7 - podavač;
- 8 - zóna sušení; 9 - zóna předehřevu; 10 - rošt;
- 11 - předehřívací vzduch; 12 - sušící vzduch; 13 - prach z cyklonů; 14 - rotační pec;
- 15 - výpad chlazený vzduchem; 16 - ohřev pece;
- 17 - prstencový chladič

Obr. 1.13. Schéma zařízení roštový pás - otáčivá troubová pec



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Surové železo
- Přímo redukované železo
- Železné a manganové rudy
- Druhotné suroviny
- Paliva
- Struskotvorné přísady
- Úprava surovin
- Aglomerace
- Peletizace



Příklady otázek k probranému učivu

1. Co je to surové železo?
2. Jaký byl historický vývoj výroby železa?
3. Co tvoří vysokopecní vsázku?
4. Co je to kovnatost?
5. Vysvětlete pojem bazicita.
6. Které palivo při výrobě surového železa je nejpoužívanější?
7. Jaké vlastnosti koksu znáte, uveďte příklady.
8. Jaké jsou vstupní suroviny pro přípravu aglomerátu?
9. Jaké hlavní prvky se snažíme odstranit při aglomeraci železných rud?
10. Jaké hlavní děje lze pozorovat během spékání ve spékané vrstvě aglomerátu?
11. Uveďte postup technologických operací po ukončení spékané vrstvy aglomerátu.
12. Jaké jsou vstupní suroviny pro přípravu pelet?
13. Kde se v současnosti pelety vyrábějí?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

BROŽ, L., *Teoretické základy výroby železa*, SNTL/ALFA, Praha, 1975, 404 s.
BROŽ, L., et al., *Hutnictví železa*. SNTL Praha, 1988, 460 s.
BABICH, A., et al., *Ironmaking*, Aachen, 2008, ISBN 3-86130-997-1, 402 s.

2. Výroba surového železa ve vysoké peci (technologie výroby a základní zákonitosti)



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

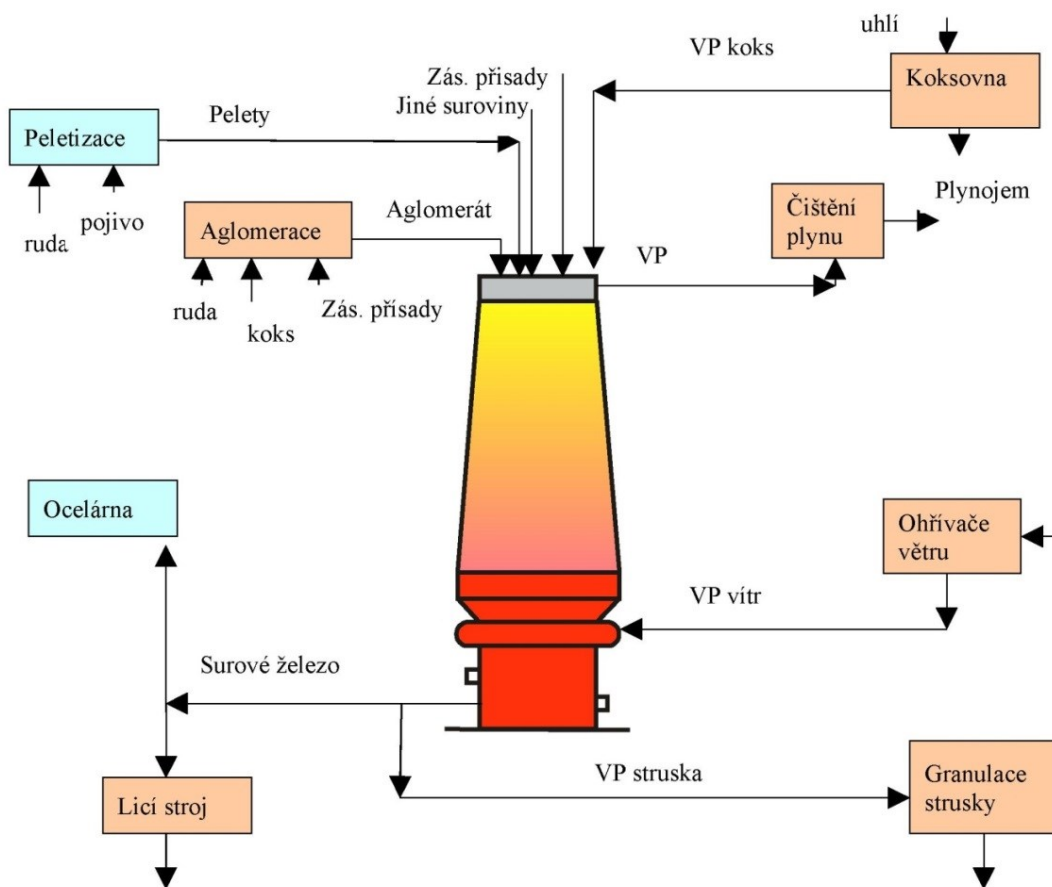
- definovat hlavní části vysoké pece a jejich funkci
- popsat děje probíhající v jednotlivých částech vysoké pece
- popsat přestup tepla ve vysoké peci
- definovat základní teorie redukce; redukční prostředky ve vysoké peci
- vznik strusky a její význam pro vysokopecní pochod
- popsat princip odsiřování ve vysoké peci



Výklad

2.1. Popis vysokopecního závodu

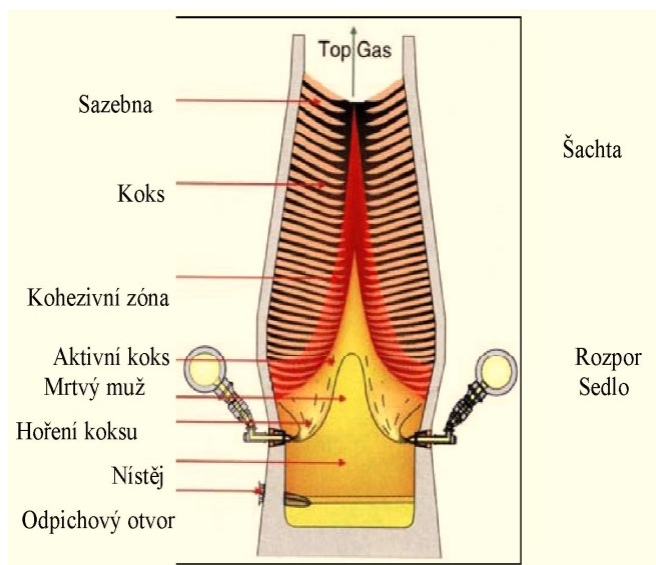
Vysokopecní závod neobsahuje jen provoz vlastních vysokých pecí, ale i množství přípravných a pomocných provozů s relativní samostatností.



Obr. 2.1 Schéma vysokopecního závodu

2.2. Hlavní části vysoké pece, popis a funkce

Profil vysoké pece a její rozměry jsou přizpůsobeny technologii procesu (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Jednotlivé zóny a části vysoké pece

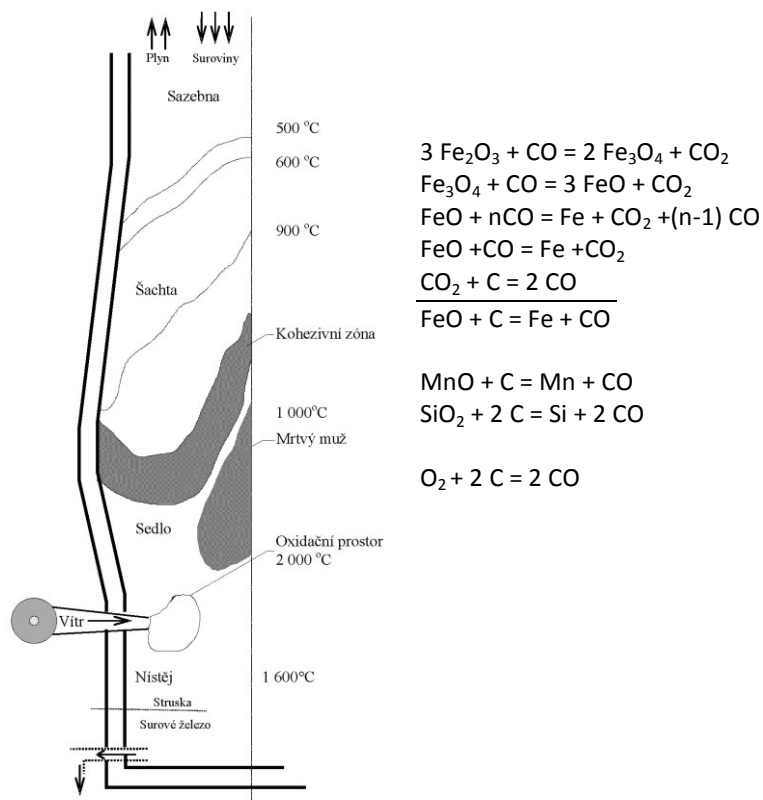
Spodní válcová část profilu se nazývá nístěj. V ní se hromadí surové železo a struska, které se periodicky vypouštějí odpichovými otvory. Do horní části nístěje zasahují výfučny, jimiž se dmýchá horký vítr a přídavná paliva.

Na nístěj navazuje sedlo, které má tvar komolého kužele s horní širší základnou. Tento tvar sedla zabezpečuje potřebný odklon žhavých plynových proudů z oxidačních prostorů od pecní vyzdívky, která by se jinak předčasně zničila.

Pozvolný přechod sedla do šachty zabezpečuje rozpor.

Nejobtímější částí vysoké pece je šachta, která má tvar komolého kužele, případně dvou komolých kuželů. V šachtě probíhá předehřev surovin, rozklad uhličitánů, nepřímá redukce a vyznačuje se kohezivní (*soudržnost*) zónou. Horní část pece se nazývá sazebnou a slouží k plnění pece vsázkou a k odvádění sazebního plynu z pece.

Na obr. 2.3 jsou zobrazeny nejdůležitější reakce probíhající v jednotlivých zónách vysoké pece.



Obr. 2.3 Schéma profilu vysoké pece s vyznačenými technologickými oblastmi

2.2.1. Pochody v oblasti výfučen (oxidační prostory pece)

V rovině asi půl metru pod spodním okrajem sedla jsou po obvodu nístěje rozmístěny výfučny, kterými se pomocí speciálních zařízení vhání do vysoké pece ohřátý vzduch – vysokopecní vítr.

Koks, který společně s ostatními surovinami klesá od sazebný do nístěje, se dostává do oxidačního prostoru před jednotlivými výfučnými, kde dochází k intenzivnímu hoření uhlíku koksu v proudu dmýchaného větru (nejvyšší teploty plynu)



Protože je v nístěji přebytek uhlíku, je oxid uhličitý redukován na oxid uhelnatý a tento produkt Boudouardovy reakce ve vysoké peci má zásadní význam pro redukční oblasti vysoké pece. Oxidační prostory opouští tedy vždy CO jako produkt spalování koksu.



V místech s nedostatkem kyslíku hoří uhlík koksu nedokonale na CO



Dmýchaný vítr obsahuje přirozenou vlhkost a často se i záměrně vlhčí. Při reakci uhlíku koksu s vodní párou vzniká vedle oxidu uhelnatého také vodík, který se stává další složkou redukčního plynu.

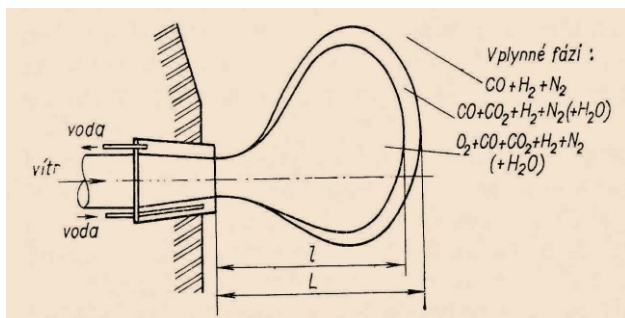


Významné obohacování redukčního plynu vodíkem nastává při injektování uhlovodíkových paliv do nístěje tryskami, umístěnými ve výfučnách. Tím se nahrazuje část koksu a zvyšuje se redukční schopnost plynu, ale nemůže ho nahradit ve funkci „nosné kostry“, proto další výrazné zvyšování množství injektovaného paliva není reálné.

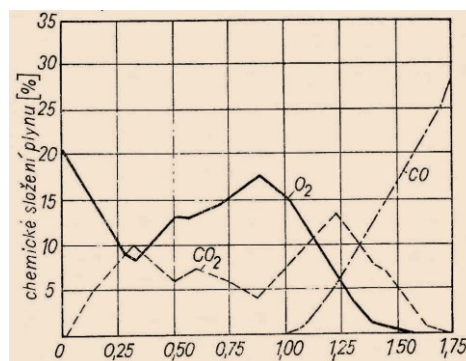
Jak Boudouardova reakce, tak reakce vodíku s uhlíkem koksu jsou reakce silně endotermické a snižují teplotu v dané oblasti

Náklady na koks činí přibližně jednu třetinu celkových nákladů na výrobu surového železa.

Z fyzikálního hlediska je hoření koksu v oxidačních prostorech možno považovat za zplyňování pevného koksu, což uvolňuje prostor ve spodní části vysoké pece pro sestup další vsázky. Nístějový plyn opouštějící oxidační prostory obsahuje kromě CO, H₂, N₂ a SO₂. Na obr. 2.4 je znázorněn oxidační prostor před výfučnou.



Obr. 2.4 Oxidační prostor před výfučnou
l - délka kyslíkového prostoru
L - délka oxidačního prostoru



Obr. 2.5 Chemické složení plynu v oksličovaci oblasti vysoké pece v různých vzdálenostech od ústí výfučny při plném dmýhání
vzdálenost od ústí výfučny (m)

Grafické znázornění na obr. 2.5 chemického složení plynů v okysličovací oblasti vysoké pece v různých vzdálenostech od ústí výfučny při plném dmýchání, vychází z mnoha měření koncentrací jednotlivých plyných složek v různých místech okysličovacích prostorů.

Z diagramu získaného měření vyplývá, že se obsah CO_2 mění nepřímo úměrně se změnou obsahu kyslíku a ztrácí se teprve na hranici kyslíkového prostoru vlivem Boudouardovy reakce. Druhá maxima lze vysvětlit nárazy kusů koksu na relativně nehybnou stěnu okysličovacího prostoru a tím snadnějším porušením adsorpčních sil mezi povrchem paliva a adsorbovanými plyny a to nejen CO_2 a kyslíku, ale také CO .

2.2.2. Proudění plynu a pohyb surovin

Práce vysoké pece je podmíněna neustálým poklesem vysokopecní vsázky a neustálým prouděním redukčních plynů v protisměru. To znamená, že síly působící na částice vsázky směrem dolů musí být větší než síly působící proti poklesu vsázky – kinetická energie plynu, třecí síly a nadnášivá síla koksu ponořeného do surového železa a strusky.

$$G = \rho_m \cdot g \cdot h \quad (2.5)$$

$$V = 0,5 \cdot \rho_g \cdot w_g^2 + T + A \quad (2.6)$$

ρ_m - hustota zrn vsázky; ρ_g - hustota plynu; g - gravitační zrychlení; h - vzdálenost od hladiny zásypu; w_g - rychlost plynu; T - třecí síly; A – vztlaková síla od koksu ponořeného do strusky a surového železa

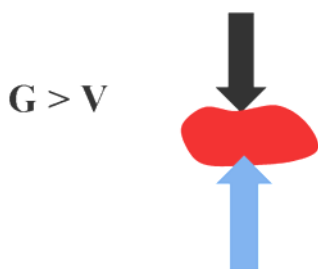
Rozhodující úlohu má kinetická energie plynu, to znamená rychlost proudících redukčních plynů. Schopnost zrnité vsázky propouštět plynou fází se hodnotí obvykle její prodyšností. Protože prodyšnost vsázky ve vysoké peci není možno kontinuálně, s dostatečnou přesností sledovat, nahrazuje se tento parametr obvykle hodnotou ztráty tlaku plynu v určité výšce.

Protože v různých vzdálenostech od osy vysoké pece je různé granulometrické složení vsázky (podíl koksu a rudy), je tam různá mezerovitost a tím různá rychlost proudění pecních redukčních plynů. Důsledkem je i různá rychlost klesání pevné vsázky v různé vzdálenosti v radiálním směru. Vsázka tedy klesá ve vysoké peci v radiálním směru nerovnoměrně. Z technologického hlediska tato nerovnoměrnost má být účelová, má být řízena.

Podle této nerovnoměrnosti rozeznáváme tři typy „chodu“ vysoké pece.

Vnitřní (centrální) chod vysoké pece je takový chod, při kterém plyn proudí a vsázka klesá hlavně v ose pece. U stěn pece je pokles vsázky pomalý.

Vnější (periferní) chod vysoké pece je takový chod pece, při kterém plyn proudí a vsázka klesá hlavně u stěn pece a jen málo v centrální oblasti pece.



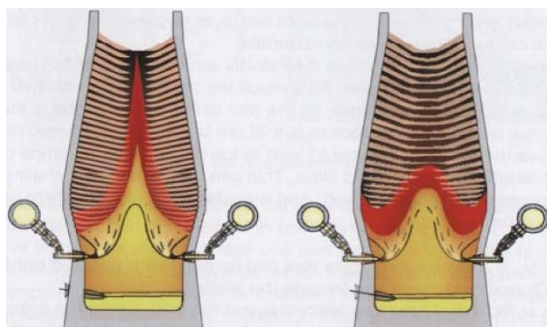
Obr. 2.6 Podmínka průběžného chodu pece

Pravidelný chod vysoké pece je kompromisem mezi vedenými chody pece, rozdělení plynových proudů je účelově rozděleno v radiálním průřezu pece.

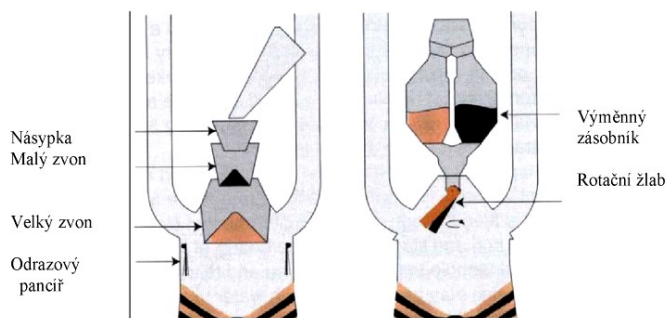
Rozložení plynových proudů ve vysoké peci předpokládá znalost jejich rozložení. Na sazebně vysoké pece (nad vsázkou) se měří teplota a složení plynu v ose pece a v jednotlivých oktantech po obvodu (u stěny pece).

Nístějový plyn opouštějící oxidační prostory má vysokou teplotu (až $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) a obsahuje uhlík ve formě CO (žádný CO_2). V místech, kde plyn proudí rychle, se nestihne ochladit a CO se nestihne redukcí změnit na CO_2 . U periferního chodu

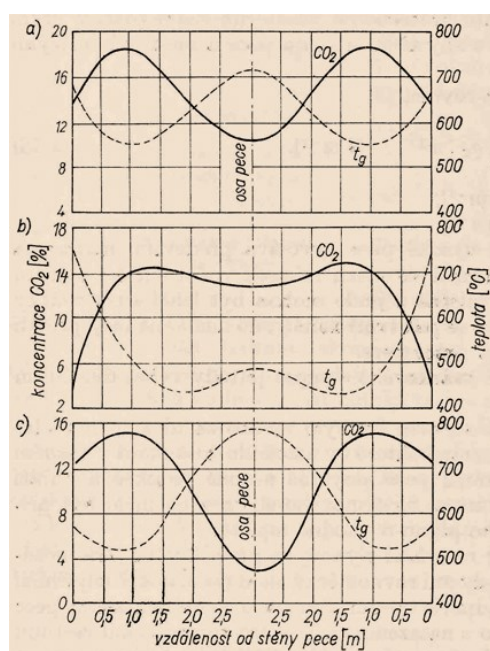
bude tedy na sazebně u stěny vysoká teplota plynu a nízký obsah CO_2 . U centrálního chodu naopak, bude vysoká teplota a nízký obsah CO_2 v osově části pec (obr. 2.7).



Obr. 2.7 Centrální (středový) a periferní (obvodový) chod vysoké pece



Obr. 2.8 Zavážecí systém vysoké pece



Obr. 2.9 Křivky obsahu CO_2 v radiálním směru vysoké pece

Plynové proudy řídíme většinou shora (sypáním). Do míst, kde chceme proudění plynu podpořit, sypeme prodyšnou vsázku (koks). Do míst, kde chceme proudění potlačit sypeme drobnější neprodyšnou vsázku (rudnou část). K řídicím parametrům patří i velikost vsázky, pořadí jednotlivých složek vsázky apod.

Podstatně lepší podmínky pro řízení plynových proudů ve vysoké peci poskytuje bezzvonová sazebná než sazebná zvonová. Plynové proudy se dají řídit i zdola pomocí parametrů vysokopecního větru (obr. 2.8).

Na obr. 2.9 je znázorněn příklad měření koncentrace obsahu CO_2 a teploty v radiálním směru vysoké pece 4 m pod hladinou zásypu.

- při pravidelném chodu pece
- při vnějším chodu pece
- při vnitřním chodu pece

2.2.3. Přestup tepla ve vysoké peci

Redukční plyn opouštějící oxidační prostory s teplotou kolem $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ proudí velkou rychlostí k sazebně a cestou předává své teplo vsázce. Tím se ochlazuje na teplotu, která je vždy vyšší než teplota vnější atmosféry.

Vsázka se ohřívá ze vstupní teploty, která bývá často rovna teplotě vnější atmosféry, na střední teplotu kapalných produktů u výpusti kolem $1450 - 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

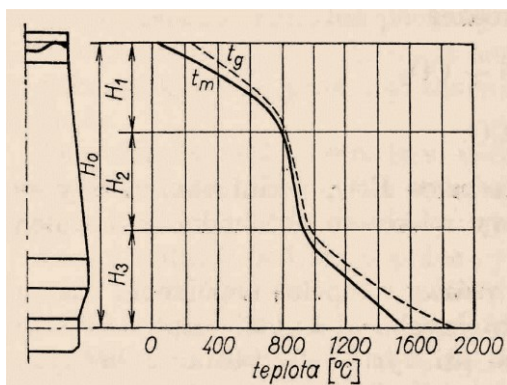
Výpočtem i měřením byl zjištěn průběh teplot znázorněný na obr. 2.10. Z tohoto pohledu k těmto teplotním poměrům lze vysokou pec rozdělit po její výšce na tři části (pásma):

- H_1 – horní pásmo výměny tepla (tepelně přípravné pásmo)
- H_2 – střední pásmo výměny tepla (tepelně neúčinné pásmo, jalové pásmo)
- H_3 – spodní pásmo výměny tepla (výrobní pásmo)

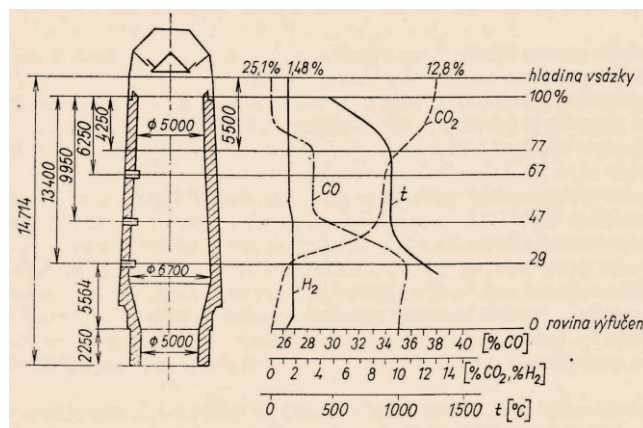
Vysokou pec je tedy možno přirovnat k dvěma výměníkům tepla vzájemně spojeným tepelně neúčinným pásmem.

Přestup tepla ve vysoké peci se vyznačuje těmito zvláštnostmi:

- Teplota na povrchu jednotlivých kusů vsázky je ovlivňována jak vnějším přestupem tepla (z plynu k povrchu kusů), tak i vnitřním (od povrchu kusů dovnitř).
- Vnější přestup tepla se uskutečňuje sáláním, vedením i konvekcí, přičemž podíl těchto způsobů na celkovém přestupu tepla se mění s teplotou.
- Vysokopecní vsázka je granulometricky a kvalitativně nehomogenní, což znemožňuje získat přesné zákonitosti.
- Mění se tvar, velikost i vnitřní struktura kusů, a tím se mění i podmínky pro proudění plynu.
- Mění se také vlastnosti plynné fáze a vznik kapalných fází vytváří velmi složitou protiproudni soustavu.
- Na přestupu tepla se podílejí také stěny vysoké pece s chladicími armaturami.



Obr. 2.10 Průběh teploty vsázky t_m a plynu t_g ve vysoké peci



Obr. 2.11 Teplota a chemické složení plynu ve vysoké peci

Na obr. 2.11 je v podélném řezu znázorněna teplota a chemické složení plynu ve vysoké peci.

2.3. Vypařování vlhkosti a disociace některých látek, redukce oxidů železa

2.3.1. Reakce vodní páry ve vysoké peci a disociace hydrátů.

Volná, hygroskopická voda, která je poutána na povrchu kusů a uvnitř pórů jen slabými silami povrchového napětí je obvykle označována jako vlhkost se odstraňuje snadno zahřátím na teplotu kolem 100 °C.

Chemicky vázaná, hydrátová voda se odstraňuje mnohem obtížněji, neboť jejímu vypařování musí předcházet disociace hydrátů.

Za počátek disociace hydrátů se považuje teplota, při níž disociační napětí hydrátů dosahuje parciálního tlaku vodní páry v plynu, avšak rychlost pochodu je velmi malá. Intenzivní rozklad hydrátů nastává až při teplotě, při níž disociační napětí dosáhne hodnoty celkového tlaku plynu.

Problém disociace hydrátů však značně ztratil na významu zavedením tepelné úpravy rud (aglomerace, peletizace).

Uhličitany mohou být součástí surových rud, ale zejména struskotvorných přísad. Při jejich disociaci ve vysoké peci přicházejí do úvahy tyto reakce:



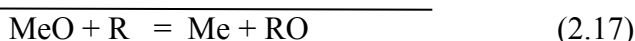
2.4. Základní teorie redukce; redukční prostředky ve vysoké peci

Základními redukovatly ve vysoké peci jsou oxid uhelnatý, uhlík a vodík, které se v průběhu redukčního pochodu oxidují na oxid uhličitý, oxid uhelnatý a vodní páru.

Největší podíl na redukci má CO (40 až 60 %) a nejmenší vodík (3 až 20 %), význam redukce vodíkem vzrůstá při injektování uhlovodíkových paliv.

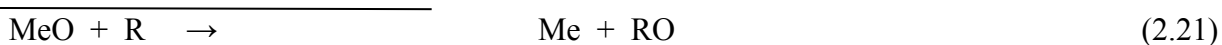
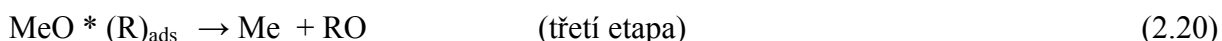
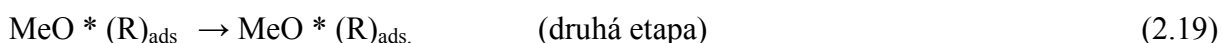
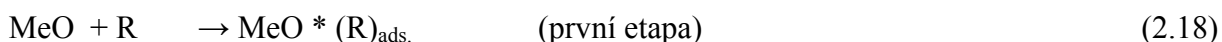
Protože jsou vzniklé produkty z vysoké pece neustále odváděny, nevzniká nebezpečí, že by byla redukce zvrátaná a kov by se ve vysoké peci znovu oxidoval.

Redukční mechanismus se vysvětluje dvěma způsoby. Starší teorie (disociační) vysvětluje mechanismus ve dvou etapách



V první etapě probíhá disociace oxidu a ve druhé etapě je redukováno oxidováno uvolněným kyslíkem.

Druhá **modernější představa mechanismu** (adsorpční) předpokládá tři postupné kroky



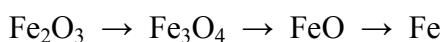
První etapa znázorňuje adsorpci plynného redukovačla na reakčním povrchu oxidu kovu, druhá etapa představuje vlastní průběh redukce a třetí etapa desorpci plynné zplodiny redukce z reakčního povrchu.

Na obtížnost redukce má přímou souvislost i disociační napětí zapříčiněné disociací oxidu. Dá se říct, že čím nižší je při dané teplotě disociační napětí oxidu, tím obtížněji se oxid redukuje.

Vysvětlením je, že disociační napětí oxidu úzce souvisí se změnou volné entalpie, jejíž záporná hodnota je mírou afinity prvku ke kyslíku, proto obtížnost redukce je daná stálostí oxidu v kovu.

Redukce oxidů železa uhlíkem

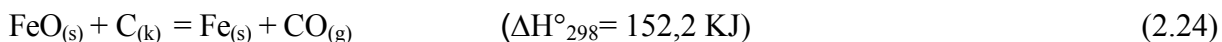
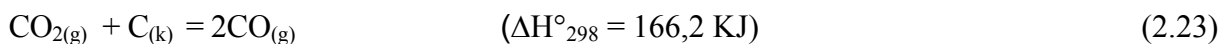
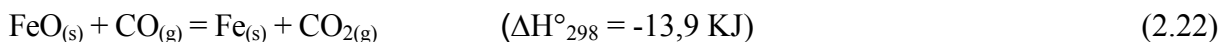
Železorudná vsázka přináší do vysoké pece potřebné množství železa v podobě jeho oxidů nebo jiných sloučenin, které tyto oxidy obsahují. Hlavními složkami železorudné vsázky jsou aglomerát, pelety a kusová ruda. Tyto železorudné suroviny jsou podrobeny redukci. Pořadí redukce oxidů Fe při teplotách vyšších než 570°C



Z oxidů železa jsou v rudách obsaženy jen Fe₂O₃ a Fe₃O₄ Volný FeO se vyskytuje jen jako součást sideritu, v aglomerátu a v peletách v různých vazbách.

V oblasti teplot do asi 800 °C probíhá redukce nepřímá, v rozmezí 800 až 1100 °C probíhají redukce obě a nad teplotou 1100 °C jen redukce přímá.

Přímá redukce tuhých oxidů železa může probíhat prostřednictvím plynné fáze a za součinnosti Budouardovy reakce, jejíž rovnováha závisí jak na teplotě, tak na celkovém tlaku plynu, má výrazný vliv na podíly jednotlivých druhů redukcí na celkovém pochodu



Redukce oxidů vodíkem

Reakce oxidů železa vodíkem jsou analogické reakcím těchto oxidů s oxidem uhelnatým, liší se reakční entalpií aj. Redukční schopnost vodíku se uplatňuje především při vysokých teplotách, avšak jeho účast na redukci se jen málo projevuje změnou chemického složení plynu. Příčinou je, že vzniklá vodní pára reaguje s uhlíkem koksu, takže redukce vodíkem probíhající při vysokých teplotách se projevuje ve svém důsledku jako přímá redukce

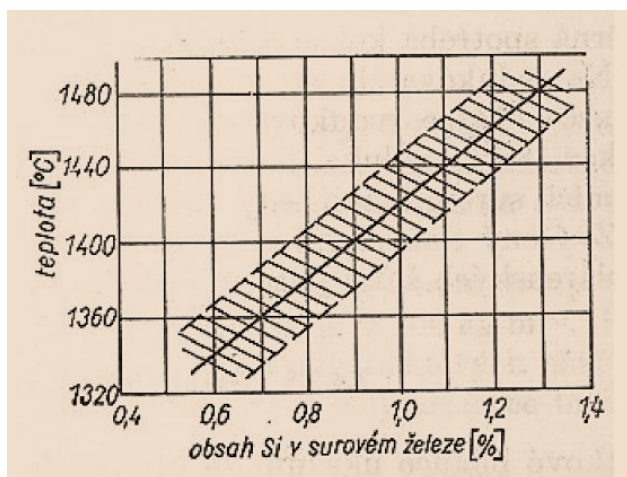


Redukce manganu ve vysoké peci

Mangan je v rudách obsažen jako oxid MnO , MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , dále jako uhličitan MnCO_3 . Tyto oxidy obsahují dále křemičitany a manganaté ferity. Manganaté oxidy se dále člení

- Snadno redukovatelné: MnO_2 a Mn_2O_3 za vzniku Mn_3O_4 a kyslíku.
- Těžko redukovatelné: Mn_3O_4 a zvláště pak MnO jsou oxidy velmi stálými a těžce redukovatelnými.

Přímá redukce manganu z MnO probíhá podobně jako redukce wüstitu za účasti plynné fáze.



Obr. 2.14 Závislost mezi teplotou strusky s obsahem křemíku v surovém železe

Redukce křemíku ve vysoké peci

Část křemíku, který se ve vysoké peci redukuje, vždy přechází do surového železa. Zbytek nevyredukováného křemíku přechází do strusky, kde je jednou ze základních složek. Hlušina železných a manganových rud, až na malé výjimky, obsahuje SiO_2 a taktéž SiO_2 je v popelu koksu. Křemík se rozpouští v železe ve všech poměrech a tvoří silicidy FeSi , Fe_3Si_2 a Fe_2Si_5 . Při vysokých teplotách je stálý pouze FeSi .

Na obr. 2.14 je znázorněna závislost mezi teplotou strusky s obsahem křemíku v surovém železe.

Redukce fosforu

Fosfor obsažený ve vsázce, nejčastěji jako fosforit $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ nebo také jako vivianit $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, přechází z velké části do vyrobeného surového železa. K dosažení požadovaného obsahu fosforu je nutno se zaměřit na volbu vhodné vsázky tak, abychom nepřekročili daný limit.

2.5. Vznik strusky a její význam pro vysokopecní pochod

Oxidy, které se nezredukovaly na kov, tvoří společně s některými dalšími prvky vsázky strusku. Jsou to zejména CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , BaO , malá množství oxidu titanu a železa, oxidy alkalických kovů, vanadu a dalších prvků. Do strusky přecházejí také sírany CaS , MgS , BaS , MnS , Na_2S , K_2S a v případě, je-li ve vsázce chrom, obsahuje struska i jeho karbidy.

Za počáteční teplotu vzniku strusky ve vysoké peci lze předpokládat teplotu začínajícího měknutí vsázky.

Teplotní interval mezi tímto počátkem měknutí vsázky a úplným roztavením není stálý a mění se v závislosti na poměru přítomných látek. Přitom se tvoří nové chemické sloučeniny a tuhé roztoky, které snižují teplotu tání přítomných nebo nově vznikajících látek.

Struska, která se začíná tvořit, se nazývá **primární struska** a jejímu vzniku předchází spékání částečně redukovaného aglomerátu. Toto spékání nemá jen fyzikální povahu, neboť se už během něj tvoří nové chemické sloučeniny nebo tuhé roztoky. Primární struska se vyznačuje vysokým obsahem FeO , popř. MnO . Obsah MnO je závislý především na jeho množství ve vsázce. Rozložení teplot a tedy i oblastí vzniku primární strusky může být velmi různé podle druhu vyráběného surového železa, mineralogického složení surovin, objemu pece, teploty dmýchaného větru a dalších technologických podmínek.

Primární struska postupně klesá vsázkou do oblastí s vyššími teplotami a její viskozita se snižuje. Přechází do těsnějšího styku se žhavým koksem, dokončuje se redukce železa a rozpouští se zbylé množství SiO_2 , CaO , MgO a Al_2O_3 . Tím se mění chemické složení strusky a zvyšuje se její objem.

Při *nejvyšších teplotách* se z ní redukuje také mangan, fosfor a křemík, avšak v oblasti výfučen do ní přechází popel ze shořelého koksu. V těchto místech se struska také přechodně obohacuje FeO a dalšími oxidy kovů (z okysličovacích oblastí), které jsou později znovu redukovány. Takto se neustále mění složení i vlastnosti strusky, která se proto nazývá **přechodová struska**.

Konečná struska pak musí mít takové chemické složení a fyzikální vlastnosti, aby byla schopna co nejdokonaleji odsířit surové železo, zabezpečila dokonalou redukcí železa a vysoký stupeň redukce manganu a také, aby snadno vytékala z pece. Tato struska obsahuje obvykle mezi 0,5 % až 0,8 % FeO .

Pro práci vysoké pece je důležitá tzv. samoregulační schopnost strusky. Její princip spočívá v tom, že když struska má vysoký obsah FeO a MnO , má nízkou viskozitu (vysokou tekutost), rychle stéká do níže pece, nestačí se ohřát proudícím plynem a její viskozita je relativně nižší. V důsledku toho se rychlost tečení strusky zpomalí. Naopak, když je obsah FeO a MnO nízký, struska stéká pomalu, má čas se ohřát a v důsledku nižší viskozity ztéká rychleji.

Vlastnosti vysokopecní strusky

Z chemických vlastností vysokopecní strusky je nejdůležitější její zásaditost, která bývá vyjadřována jednoduchým nebo rozšířeným vztahem

$$P_1 = \frac{w_{(\text{CaO})}}{w_{(\text{SiO}_2)}} \quad (2.28)$$

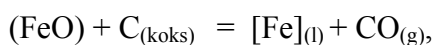
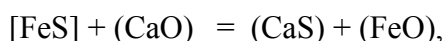
$$P_2 = \frac{w_{(\text{CaO})} + w_{(\text{MgO})}}{w_{(\text{SiO}_2)} + w_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}} \quad (2.29)$$

kde P_1 , P_2 je hodnota bazicity strusky,
 w - hmotnostní zlomek dané složky ve strusce.

Zásaditost neboli bazicitu je možno také definovat jako poměr zásaditých a kyselých složek (oxidů) strusky. Hodnota zásaditosti se obvykle pohybuje v rozmezí 0,9 až 1,2 a celkový obsah těchto čtyř základních oxidů ve vysokopecní strusce bývá obvykle kolem 95 hmotnostních %.

2.6. Odsiřování ve vysoké peci

Odsiřování surového železa tedy začíná současně s jeho nauhličováním a probíhá až do okamžiku odpichu. K největší míře odsíření ale dochází převážně v nístěji vysoké pece pod výfučnami, kdy kapičky surového železa procházejí vrstvou strusky nebo v místě styku vrstvy surového železa se struskou. Železo ve vysoké peci odsiřují látky, které mají vyšší afinitu k síře než železo. Jsou to zejména CaO a MgO. Reakci odsíření je možné napsat ve vztahu



Výsledná reakce je nazývána hlavní odsiřovací reakcí ve vysoké peci a její rovnovážná konstanta má tvar:

$$K_a = \frac{a_{\text{Fe(l)}} \cdot a_{(\text{CaS})} \cdot p_{\text{CO(g)}}}{a_{[\text{FeS}]} \cdot a_{(\text{CaO})} \cdot a_{\text{C(koks)}}}, \quad (2.30)$$

kde a je aktivita dané složky
 $p_{\text{CO(g)}}$ - parciální tlak CO (Pa).



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Vysokopecní závod
- Hlavní čisti vysoké pece, šachta, rozpor, sedlo, nístěj
- Boudouardova reakce
- Oxidační prostory pece
- Proudění plynu a pohyb surovin
- Přestup tepla ve vysoké peci
- Vypařování vlhkosti a disociace některých látek, redukce oxidů železa
- Základní teorie redukce, redukční prostředky ve vysoké peci
- Vznik strusky a její význam (primární, přechodová, konečná)
- Odsiřování ve vysoké peci

**Příklady otázek k probranému učivu**

1. Jakou funkci má nístěj?
2. Jakou funkci má šachta?
3. Jakou funkci má rozpor a sedlo?
4. Jakou funkci má nístěj?
5. Co je to Boudouardova reakce?
6. Jakou úlohu plní oxidační prostory pece (VP)?
7. Čím je podmíněna práce vysoké pece?
8. Jaké jsou poměry přestupu tepla ve VP?
9. Vysvětlete funkci vypařování vlhkosti a disociace některých látek, uveďte příklady.
10. Čím je dána redukce oxidů ve VP?
11. Jaké druhy strusek rozeznáváme v průběhu výroby surového železa?
12. Jaké jsou možnosti odsiřování surového železa ve VP?
13. Napište základní vztahy pro odsiřování surového železa ve VP.

**Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu**

KRET. J., Teorie železářských pochodů, Studijní opora předmětu, VŠB-TU Ostrava, 2008, 119 s.

BROŽ, L., Teoretické základy výroby železa, SNTL/ALFA, Praha, 1975, 404 s.

BROŽ, L., et al., Hutnictví železa. SNTL Praha, 1988, 460 s.

BABICH, A., et al., Ironmaking, Aachen, 2008, ISBN 3-86130-997-1, 402 s.

3. Produkty vysokých pecí, současné ekologické aspekty výroby surového železa, alternativní způsoby výroby surového železa



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Definovat jednotlivé druhy surových želez
- Definovat rozdíly mezi surovými železy určených pro specifické použití
- Popsat ekologické aspekty při výrobě surového železa
- Definovat škodlivé látky při výrobě aglomerátu
- Definovat škodlivé látky při výrobě pelet
- Definovat recyklaci odpadů v hutním závodě
- Popsat výrobu surového železa mimo vysokou pec



Výklad

3.1. Druhy surových želez

Pod pojmem surové železo se rozumí slitina železa a uhlíku s obsahem uhlíku vyšším 2,11 %, která obsahuje prvky v množství stejném nebo nižším než je uvedeno v normě.

V České republice v současnosti platí norma ČSN EN 10001 (420041), která je identická s EN 10001/1990 a je vydána se souhlasem CEN. Surové železo je určeno k dalšímu zpracování v tekutém stavu na ocel nebo litinu. Surové železo je dodáváno buď v tekutém stavu, nebo v tuhém stavu ve formě housek nebo jiných podobných výrobků, popřípadě ve formě granulátu.

Podle chemického složení se surová železa dělí na *nelegovaná* a *legovaná*. Nelegovaná surová železa se podle dalšího zpracování rozděluje na surová železa ocelářská, surová železa slévářská a další nelegovaná surová železa.

Ocelářská surová železa se dále dělí na surová železa s nízkým obsahem fosforu a s vysokým obsahem fosforu.

Slévářská surová železa se dělí na železa obyčejná, pro která se nedoporučuje užívat různé tradiční názvy jako železa s nízkým, středním či vysokým obsahem fosforu, hematit, Cleveland apod., ale zkratky daných normou jako Pig-P1 Si, Pig-P3 Si, Pig-P6 Si, Pig-P12 Si a Pig-P17 Si, dále na železa s kuličkovým grafitem, železa s kuličkovým grafitem a vyšším obsahem manganu a na železa s nízkým obsahem uhlíku.

Legovaná surová železa se dělí na zrcadlovinu a další legovaná železa.

Na českých vysokopecních závodech se v praxi ještě stále užívá tradičního dělení surových želez na surová železa ocelářská, slévářská a speciální.

Orientační složení ocelářského surového železa:

- C - 4,5 %
- Mn - pod 1 %
- Si - pod 1 %
- S - pod 0,03 %;
- P - pod 0,2 %

V jednotlivých výrobních závodech se vyráběné surové železa dále dělí na jakostní třídy podle obsahu síry, například

Třída I - $S < 0,01$; Třída II - $S < 0,02$; Třída III - $S < 0,03$

Podniková norma dále obvykle určuje maximální obsah dalších prvků podle výrobního sortimentu podniku. Například Cr, P, Cu, Mn, Ti apod.

Orientační složení slévářského surového železa:

- C - 4,3 %
- Mn - pod 1 %
- Si - 1,6 – 4,2 %
- S - pod 0,03 %;
- P - pod 0,3 %

Dále se vyrábějí „slévářské speciály“ studené, nebo teplé podle požadovaného obsahu Si, nebo Mn. Často se vyrábí nízkofosforaté slévářské surové železo – hematit, které má velmi nízký obsah fosforu (do 0,15 %). Ojediněle se ve vysokých pecích vyrábí feromangan.

V možnostech vysokopecních závodů je dodávat surová železa podle požadavků odběratelů. Speciální požadavky na jakost surového železa však vyžadují speciální složení vysokopecní vsázky, což se projeví v ceně vyráběného surového železa.

Základní technicko-ekonomické ukazatele výroby surového železa

Mezi základní technicko-ekonomické ukazatele výroby surového železa patří ukazatele výrobní, spotřební a nákladové. Protože však cena vyrobeného surového železa se řídí i jeho jakostí, patří i rovnoměrnost chemického složení a teploty železa mezi technicko-ekonomické ukazatele.

V tab. 3.1 je znázorněno rozdělení a označení surových želez podle chemického složení dle evropské normy.

Tab. 3.1 Rozdělení a označení surových želez podle chemického složení dle evropské normy

1	2		3	4	5	6	7	8	9	
Č.	Druhy surových želez			%C _{celk.}	%Si	%Mn	%P	%S _{max}	Ostatní	
	Označení		Zkratka							
1.1	nelegovaná	Železa ocelářská	s nízkým obsahem fosforu	Pig-P2	(3,3 až 4,8)	< 1,0 ²⁾	0,4 až 6,0 (0,5 až 1,5)	≤ 0,25	0,06	
1.2			s vysokým obsahem fosforu	Pig-P20	(3,0 až 4,5)		≤ 1,5	1,5 až 2,5	0,08	
2.1		Železa slévárenská	4)	Pig-P1 Si	(3,3 až 4,5)	1,0 až 4,0 ²⁾ (1,5 až 3,5)	0,4 až 1,5 ²⁾	≤ 0,12	0,06	5)
2.2				Pig-P3 Si				> 0,12 až 0,5		
2.3				Pig-P6 Si				> 0,5 až 1,0 (≥ 0,5 až 0,7)		
2.4				Pig-P12 Si				> 1,0 až 1,4		
2.5				Pig-P17 Si				> 1,4 až 2,0		
3.1		Železa slévárenská	s kul. grafitem	Pig-Nod	(3,5 až 4,6)	< 3,0 ²⁾	< 0,1	< 0,08	0,03	5) 6)
3.2			s kuličkovým grafitem a vyšším Mn ²⁾	Pig-Nod Mn						
3.3			s nízkým obsahem uhlíku	Pig-LC						
4.0			další neleg. žel.	Pig-SPU	7)					
1		2		3	4	5	6	7	8	9
Č.		Druhy surových želez			%C _{celk.}	%Si	%Mn	%P	%S _{max}	Ostatní
	Označení		Zkratka							
5.1	Legovaná	zrcadlovina	Pig-Mn	(4,0 až 6,5)	max. 1,5	> 6,0 až 30,0 ²⁾	≤ 0,30 (≤ 0,20)	0,05	3)	
5.2		další leg. železa	Pig-SPA	8)						

¹⁾ Čísla mimo závorky jsou určující pro rozdělení surových želez. Čísla v závorkách uvádějí orientační meze, v nichž se zpravidla vyskytují skutečné obsahy daného prvku.

²⁾ V důsledku rozdělení podle obsahů daného prvku se druhy surových želez zpravidla dále dělí na různé jakosti.

³⁾ Pro jiné legovací prvky není stanoven žádný minimální obsah. Nicméně ale podle druhu použitých surovin může např. surové železo neúmyslně obsahovat jiné prvky, než jaké jsou uvedeny ve sloupcích 4 až 8, a to v procentuálním objemu, který může dosáhnout pro určité prvky až 0,5%. Takovéto nahodilé obsahy prvků nejsou rozhodující pro rozdělení surového železa.

⁴⁾ Pro tyto druhy želez se často používá nejrozumnější termíny jako „s nízkým obsahem fosforu, se středním obsahem fosforu, s průměrným obsahem fosforu, s vysokým obsahem fosforu, normální hematit a semi-hematit, Cleveland, apod.“, a často s různým významem. Nedoporučuje se používat tyto termíny na mezinárodní úrovni a jako označení používat výhradně zkratky uvedené ve sloupci 3.

⁵⁾ Používá se zpravidla pro perlitickou litinu s kuličkovým grafitem nebo pro temperovanou litinu.

⁶⁾ Tyto jakosti surového železa jsou kromě jiného charakterizovány nízkým obsahem prvků, které narušují tvorbu kuličkového grafitu nebo tvorbu karbidů, podle toho, k jakému účelu je surové železo určeno.

⁷⁾ Tento druh zahrnuje surová železa, která nepatří ke druhům 1.1 až 3.3 ani 5.1 nebo 5.2.

⁸⁾ K „dalším legovaným surovým železům“ patří:

- a) surová železa s obsahem Si mezi 4,0 až 8,0%
 - b) surová železa s obsahem Mn mezi 6,0 až 30,0%, který netvoří zrcadlovinu (viz. druh 5.1)
 - c) surová železa, v nichž alespoň jeden prvek, uvedený ve sloupcích 4 až 8, dosahuje specifikovaného minimálního obsahu
 - d) surová železa, v nichž alespoň jeden z níže uvedených prvků dosahuje uvedenou výši obsahu (viz. poznámka 3)
- Cr > 0,3 až do 10%
 Mo > 0,1
 Ni > 0,3
 Ti > 0,2
 V > 0,1
 W > 0,1
- } až do součtu celkového obsahu do výše 10%, uvedeného v tabulce 1 pro „jiné legury.“

3.2. Ekologické aspekty výroby surového železa

3.2.1. Škodlivé látky při výrobě surového železa

Přesná exaktní definice škodlivých látek při výrobě surového železa není možná. Stejná látka může být v některých formách škodlivá v jiných ne (např. vliv chrómu na zdraví člověka). Rovněž může stejná látka působit různě v různých fázích technologického procesu (např. alkálie škodí vyzdívce a koksu, ale snižují viskozitu strusky). Některé látky nečiní při výrobě surového železa žádné potíže (např. fosfor), ale se považují za škodlivinu z důvodů narušování ocelářských pochodů následujících po výrobě surového železa. Škodlivost jednotlivých prvků a sloučenin ve vysokopecní výrobě se musí posuzovat komplexně na základě znalostí teorie výroby surového železa.

Škodlivé látky je možno rozdělit do následujících skupin:

1. Látky, které působí nepříznivě (škodí) tím, že narušují průběh technologických procesů. Vysokopecní vsázka obsahuje řadu prvků, které ve formě různých sloučenin narušují průběh chemických, fyzikálních a tepelných procesů při výrobě surového železa. Typickými škodlivinami tohoto typu jsou sloučeniny narušující vyzdívku vysoké pece a způsobující vznik nasazenin a následných technologických poruch. Další látky zhoršují vlastnosti taveniny (viskozita, teplota tavení), nebo způsobují degradaci vysokopečního koksu.

2. Látky, které snižují jakostní parametry výrobků. Do této skupiny patří látky, které nepříznivě ovlivňují chemické složení surového železa a strusky, jejich teplotu a fyzikální vlastnosti, hlavně viskozitu a teplotu tavení. Hlavně však zhoršují vlastnosti vyrobeného surového železa pro jeho další zpracování na ocelárnách, nebo ve slévárnách.

3. Látky, které poškozují životní prostředí a přírodu. V jednotlivých fázích výroby surového železa dochází k úniku škodlivých látek do prostředí, které znečišťují ovzduší, půdu a vodu. Tyto látky potom fyzikálně, chemicky, nebo biologicky poškozují životní prostředí.

4. Látky, které přímo poškozují, nebo jinak nepříznivě, ovlivňují zdraví člověka. Tyto látky by bylo možné zařadit i do skupiny 3. K poškozování zdraví může dojít buď přímo, přímo při obsluze technologických zařízení, nebo nepřímo znečišťováním prostředí.

3.3. Aglomerace

Aglomerace anebo spékání železných rud, je zahřívání prachové aglomerační směsi (rudná část, palivo, přísady) na takovou teplotu, že dojde k natavení povrchu jednotlivých zrn vsázky a vzniklá tavenina vytvoří mezi zrny kapalinové můstky, které po ztuhnutí zajistí vznik pevného pórovitého materiálu - aglomerátu.

Celkově je možno aglomeraci rozdělit na tzv. studený úsek zahrnující výklopníky surovin, drcení, mletí třídění, skládky a homogenizaci surovin. Teplý úsek zahrnuje skladování a dávkování surovin, jejich míchání a předpeletizaci, vlastní spékací pás s příslušenstvím, drcení, třídění a chlazení vyrobeného aglomerátu. Patří sem i odsávací soustava s čištěním spalin.

Studený úsek znečišťuje životní prostředí většinou jen tuhými prachovými emisemi, které mají lokální charakter a spíše představují zdroj zhoršení pracovního prostředí než významný zdroj znečišťování atmosféry.

Teplý úsek aglomerace je hlavním zdrojem znečišťování životního prostředí při výrobě surového železa a je příčinou, že aglomerace je považována za největšího znečišťovatele v rámci celého hutnictví (bez energetiky).

Množství tuhých znečišťujících látek vypouštěných do ovzduší závisí kromě technologických faktorů hlavně způsobem a účinností odlučovacího zařízení.

Staré, mechanické odlučovače prachu - multicyklony, které se v minulosti používaly, nebyly schopny vyčistit spaliny z počáteční hodnoty znečištění 1 až 3 g.m⁻³ pod hodnotu 300 mg.m⁻³ spalin. V současnosti používané elektrostatické odlučovače prachu většinou bez problémů plní emisní limit, který je pro tuhé znečišťující látky 100 mg.m⁻³. Stejný limit platí i pro plyny na výstupu z elektrostatických odlučovačů chlazení aglomerátu. V současnosti začíná platit emisní limit 50 mg.m⁻³, který klasické elektrostatické odlučovače prachu dosahují jen s velkými potížemi. Moderní aglomerační provozy se opatřují speciálními tkaninovými filtry, které čistí aglomerační spaliny na hodnoty pod 20 mg.m⁻³. Současný emisní limit pro obsah CO v aglomeračních spalinách je 6000 mg.m⁻³.

Další škodlivou látkou produkovanou při spékání je SO₂. Síra je do procesu spékání vnášena hlavně palivem (koksem), v menší míře ostatními složkami vsázky. V průběhu spékání se síra oxiduje až z 90% a přechází do spalin. Současný emisní limit je 400 mg SO₂ na m⁻³ spalin.

Plnění předpokládaného zpřísnění emisních limitů bude pro české aglomerační provozy za současných technických a technologických podmínek velkým problémem.

Tuhé odpady vznikající při výrobě aglomerátu nejsou ekologickým problémem. Asi 20 až 40 % vyrobeného aglomerátu má zrnitost pod 6,3 mm a není vhodný pro vysokou pec. Tento tzv. vratný aglomerát se po třídění plně vrací do aglomerační vsázky. Taktéž materiál zachycený v odlučovačích prachu ze spalin a z chlazení aglomerátu se plně recykluje. Naopak, do aglomerační vsázky se přidává značné množství různých odpadů z hutnických i jiných technologií ve formě odprašků, kalů nebo strusky.

3.4. Peletizace

Peletizace je úprava kusovosti jemnozrnných materiálů sbalováním do tvaru kuliček. Přitom se zásadně mění i vlastnosti sbalovaných materiálů. Vsázka pro peletizaci neobsahuje palivo ani při vysokoteplotním zpevňování. Jako paliva se obvykle používá zemního plynu.

Peletizace, jako kompletní technologie se v současnosti v České republice průmyslově nepoužívá (dovážejí se pelety ze zahraničí).

3.5. Vysokopecní výroba

Vysokopecní provoz znečišťuje životní prostředí podstatně méně než příprava vysokopecní vsázky. Vysoká pec i ohřívače větru jsou konstruované uzavřené, jako tlakové nádoby, proto jsou možnosti emisí omezené.

Tuhé prachové emise vznikají hlavně při manipulaci se vsázkovým materiálem, tj. při dopravě, skladování, třídění a dávkování surovin. Tyto prostory jsou odprašovány mechanickými, nebo elektrostatickými odlučovači. Dalším zdrojem prachových i plynných emisí je sazebná vysoká pec.

Bezzvonová i zvonová sazebná obsahuje prostor, který je střídavě spojený s atmosférou a s pecním prostorem.

Produkce vysokopecního plynu může dosahovat až 2000 m³ na tunu vyrobeného surového železa a obsah prachu při výstupu z pece je až 30 gramů na 1 m³ plynu. Celkové množství vysokopecního plynu, které unikne sazebnou do atmosféry, se odhaduje na 0,1 až 0,4 % vyrobeného plynu. Protože vysokopecní plyn obsahuje víc než 20 % CO, musí být ventily pro odfuk opatřené spalovacím zařízením.

Odlévárna vysoké pece je dalším zdrojem tuhých emisí. Při vypouštění surového železa a strusky vznikají nad žlaby tepelné vzduchové proudy, které unášejí tuhé a plynné emise. Moderní vysokopecní závody mají žlaby zakryté s odsáváním plynů a následným odlučováním prachu.

Na licím stroji se tekuté surové železo odlévá do tvaru housek, které se dále expedují po železnici. Při tomto procesu vznikají vlivem tepelných vzduchových proudů též tuhé prachové emise. Emisní limit pro tuhé znečišťující látky ve vysokopecním provozu je $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Plynné emise při ohřevu vysokopecního větru jsou typické pro spalovací procesy. Jako palivo se používá směsného plynu. Obsah CO_2 , CO , SO_2 a NO_x v plynu opouštějícím komín ohřívачů větru závisí na podílu koksárenského plynu, na teplotě větru a technologických parametrech.

Odpadní vody ve vysokopecní výrobě surového železa vznikají při chlazení vysoké pece, při čištění vysokopecního plynu a při granulaci strusky. Na chlazení vysoké pece o užitečném objemu 2400 m^3 a horkovětrných armatur se spotřebuje až 3000 m^3 vody za hodinu. Ohřátá voda se chladí v chladicích věžích, filtruje se a znovu se používá. Odparné chlazení podstatně snižuje spotřebu vody, vyžaduje však chemickou úpravu vody.

Čištění vysokopecního plynu probíhá většinou ve 3 stupních. *První* stupeň je suchý, v prašníku a nepotřebuje vodu. *Druhý* stupeň ve vodních pračkách a *třetí* stupeň ve Venturiho pračkách spotřebuje 5 až 6 m^3 vody na 1000 m^3 plynu. Použitá voda se musí upravovat v usazovacích nádržích a částečně i chemicky.

Tekutá vysokopecní struska o teplotě asi 1450°C se granuluje většinou mokřím způsobem, kdy se horká struska lije do vody a prudkým ochlazením dochází k její granulaci. Znečištěná voda obsahuje nerozpustné látky, které se musí odstranit. Při granulaci dochází k značné ztrátě vody odpařením, rozstříkáním a přechodem do granulátu. Tyto ztráty vody dosahují až 1 m^3 na tunu strusky. V důsledku zvýšení bohatosti vysokopecní vsázky v posledních letech poklesl měrný výskyt strusky z $600 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ na asi 430 kg strusky na tunu vyrobeného surového železa.

Produktem čištění vysokopecního plynu jsou kromě vyčištěného plynu dva druhy odpadu.

Vysokopecní výhoz je produktem hrubého čištění plynu v prašníku, kde se zachytí až 70 % prachových částic. Jedná se o suchý prachový odpad s poměrně vysokým obsahem uhlíku a nízkým obsahem škodlivin (Pb, Zn, Cd atd.). Veškerý výskyt vysokopecního výhozu se bez problémů zpracovává na aglomeraci.

Dalším odpadem je *vysokopecní kal*, který je produktem polojemného a jemného čištění vysokopecního plynu. Vysokopecní kal obsahuje vyšší množství škodlivin, hlavně zinku, olova, kadmia a alkálií. Z tohoto důvodu se vysokopecní kal recykluje jen částečně.

Moderní trendy ve výrobě surového železa spočívají ve snižování celkové energetické náročnosti procesu a hlavně v náhradě koksu jinými palivy. V současnosti je to hlavně dmýchání prachového uhlí do výfucen vysoké pece, které může nahradit až 200 kg koksu na 1 tunu surového železa.

3.6. Recyklace odpadů v hutním závodě

Suroviny, paliva a různé přísady obsahují škodlivé látky, které nepřecházejí do výrobku a jsou zachycovány při čištění plynů a vod, nebo přímo v rafinačních technologiích (strusky).

Technologicky nedokonalé technologické postupy jsou příčinou, že při čištění se zachytává i značné množství užitečného kovu. Přirozenou snahou je vrátit užitečný kov zpět do technologického cyklu a škodliviny koncentrovat v množství a formě, která dovoluje jejich zpracování v huti, nebo v jiných oborech průmyslu.

Recyklace plyných škodlivin se provádí buď změnou jejich skupenství (např. transformací oxidů síry na sádro), nebo změnou jejich formy na méně škodlivou (dospálení CO a uhlovodíků na CO₂ a vodní páru).

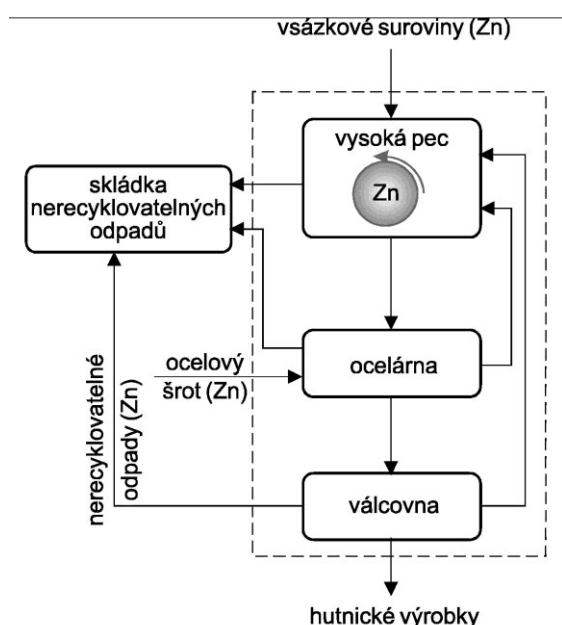
Největším problémem hutnické výroby jsou tuhé odpady. Vznikají většinou v technologickém cyklu (strusky), nebo při čištění odpadních plynů a vod (odprašky a kaly). Strusky s obsahem užitečného kovu (železa) se částečně vracejí na začátek technologického cyklu, ostatní se využívají většinou ve stavebnictví.

Nevhodné odpady se proto skladují na skládkách nerecyklovatelných odpadů, které představují další zdroj znečišťování vzduchu a vod. Odpadů na takových skládkách je v České republice z minulosti obrovské množství, které se stále zvětšuje.

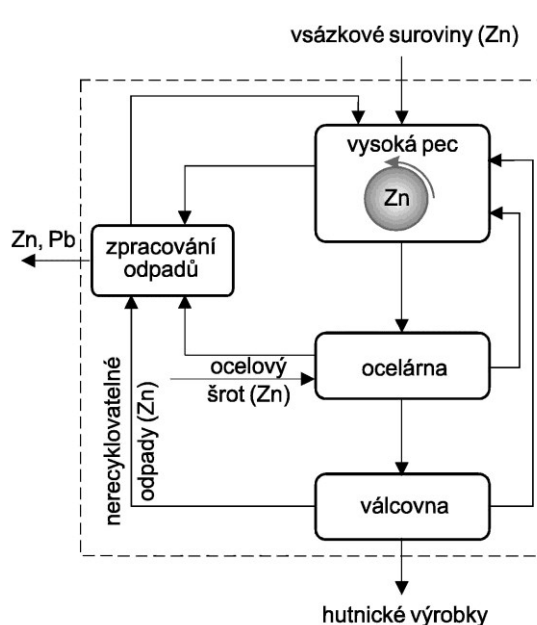
3.6.1. Možnosti recyklace odpadů v hutním závodě

Do hutního podniku se dopravují různé suroviny přírodního charakteru, nebo výrobky a polovýrobky, které obsahují kromě žádané substance i škodlivé látky. Látky mohou být škodlivé z důvodu, že narušují technologické procesy, nebo jakost hotového produktu, nebo z důvodu, že znečišťují životní prostředí a ohrožují zdraví lidí. Výrobky produkované hutním podnikem obsahují těchto škodlivých látek jen velmi malé množství. Z tohoto pohledu je zřejmé, že v prostorách hutních podniků musí docházet ke značné kumulaci těchto látek. V posledních desetiletích byla ve světě patrná výrazná snaha o recyklaci těchto látek uvnitř podniku. Neustálý přísun nových surovin se škodlivinami logicky znemožňuje nekonečnou recyklaci škodlivých látek. Typickým příkladem prvku, který způsobuje velké potíže při recyklaci ve výrobě železa je zinek. Na příkladu zinku je možno demonstrovat koloběh a kumulaci škodlivin při výrobě surového železa. Ostatní škodlivé látky se při recyklaci chovají podobně, nebo ještě složitěji (např. alkalické sloučeniny).

Na obr. 3.1 je znázorněný současný stav distribuce škodlivin v hutnictví železa na příkladu zinku.



Obr. 3.1 Klasický způsob koloběhu tuhých odpadů obsahujících Zn v hutním podniku



Obr. 3.2 Koloběh tuhých odpadů v moderním hutním podniku

Současným řešením, kterým se z technologických procesů zinek (nebo jiná škodlivina) odstraňuje, je skládka nerecyklovatelných odpadů, která představuje nebezpečí poškozování životního prostředí. Takovéto řešení je z dlouhodobého hlediska nekoncepční, a neperspektivní.

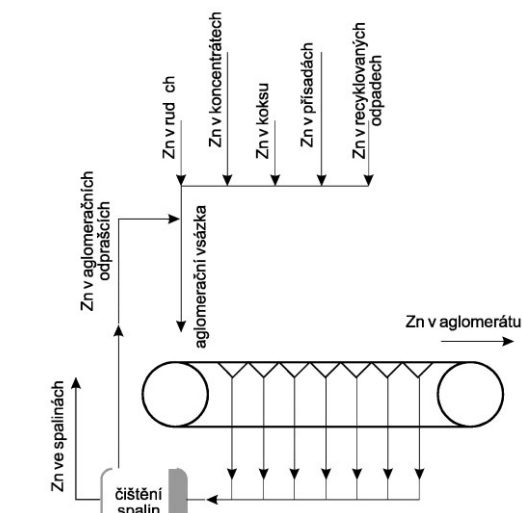
Perspektivním řešením je náhrada skládky nerecyklovatelných odpadů závodem, který pyrometalurgickým, nebo jiným (chemickým) procesem oddělí škodliviny (zinek) od základní hmoty odpadů na obr. 3.2.

Získaný koncentrát odpadu na bázi neželezných kovů se využije v technologiích na výrobu neželezných kovů (Zn, Pb aj.), železitý koncentrát se vrátí do procesu výroby železa.

3.6.2. Recyklace na aglomeračním provozu

Jemnozrnné odpady se recyklují většinou přes aglomerační provozy, je potřeba této technologii věnovat zvýšenou pozornost. Na obr. 3.3 je znázorněno, jak malá část odpadů, v našem příkladu zinku, odchází v důsledku nedokonalého čištění spalin komínem do ovzduší, většina odpadů však přechází do aglomerátu a vstupuje do vysoké pece. Uvedena skutečnost neplatí pro síru, kde asi 90 % odchází do ovzduší.

Výroba aglomerátu jako základního komponentu vysokopecní vsázky je tedy sice nepoužívanější technologií na zpracování hutních odpadů, ale nepředstavuje koncepční řešení problému. Část škodlivých prvků se při spékání odstraní, ale jejich přechod do atmosféry je ekologicky škodlivý. Systém zředění škodlivin na hodnoty, které jsou ještě přípustné platnými normami, je principiálně nesprávný. Výroba aglomerátu je však stále jednou z mála technologií, které jsou v oblasti zpracování jemnozrnných kovonosných materiálů používány a je proto potřeba se spékáním i nadále výzkumně zabývat.



Obr. 3.3 Koloběh zinku v aglomeračním provozu

3.6.3. Recyklace ve vysoké peci

Vysokopecní vsázka (s obsahem zinku) se při poklesu postupně ohřívá a zinek se redukuje uhlíkem. Situaci komplikuje skutečnost, že bod varu zinku je nižší, než je teplota redukce a vyredukovaný zinek se okamžitě odpařuje a vrací se s plynem do horních, chladnějších oblastí vysoké pece. Je oxidován pomocí CO_2 a kondenzuje na povrchu jednotlivých kusů vsázky, se kterými znovu klesá do oblastí vysokých teplot. Opět se redukuje a proces se opakuje. Takto cirkulující množství zinku se postupně zvětšuje o množství přicházející s novou vsázkou.

Samotná redukce a oxidace, odpařování a kondenzace zinku (nebo jiného odpadu) má nepříznivý ekonomický a ekologický dopad. Redukce oxidů zinku a jeho odpařování jsou endotermické děje, které odebírají teplo ve střední části vysoké pece. Teplo se při zpětné oxidaci a kondenzaci v horní části znovu uvolňuje, není již však možné jeho využití, jen dochází k ohřevu vysokopecního plynu odcházejícího z vysoké pece. Tyto procesy zvyšují měrnou spotřebu koksu, s příslušnými ekonomickými i ekologickými důsledky. Podobnou cirkulaci prochází i jiné odpady například Pb a Cd.

Část zinku kondenzuje na drobných zrnech vsázky, která jsou odnášena plynem ven z prostoru pece. Množství kondenzovaného zinku je úměrné povrchu materiálu, proto nejvíce zinku obsahuje nejjemnější materiál. Tato část zinku končí většinou ve vysokopecních kalech, v menší míře ve vysokopecním výhozu. Další část zinku kondenzuje na povrchu vyzdívky vysoké pece, vniká do jejích pórů a způsobuje intenzivní opotřebení žáruvzdorného materiálu.

Opotřebení vyzdívky vytváří podmínky pro vznik nasazenin s obsahem zinku. V případě, že vstup zinku je větší než 120 až 150 gramů na tunu vyrobeného surového železa, vznik nasazenin

způsobuje velmi vážné poruchy chodu vysoké pece. Nasazeniny se buď samovolně, nebo technologickými zásahy uvolňují a klesají do roztavené hmoty.

Při odpichu je potom zinek strháván vypouštěným železem a uniká do atmosféry ve formě tzv. bílých dýmů. Podobně se chová i olovo a další škodliviny.

Z uvedených skutečností vyplývá, že není reálnou možností plná recyklace vysokopecních a ocelářenských kalů prostřednictvím vysoké pece a je potřeba hledat cesty jak odstranit tyto kovy z metalurgického cyklu a využít je.

Prvním krokem k řízení obsahu škodlivin v jednotlivých technologických procesech je znalost vstupních hodnot škodlivin přinášených jednotlivými surovinami a recyklovanými odpady.

3.7. Výroba surového železa mimo vysokou pec

Historie přímé a tavné redukce

Jednostupňová, přímá výroba železa z rud je historicky klasickou, nejstarší technologií výroby kujného železa. V posledním období je patrný určitý návrat k této technologii z důvodů ekologických a z důvodů jakosti vyráběného produktu. K vývoji alternativních způsobů výroby železa vedla celá řada příčin. Nejzávažnější je nutnost úpravy železných rud aglomerací a užití kvalitního metalurgického koksu.

Z pohledu konkrétního a detailního členění se jedná především o následující:

- uplatnění levnějších energetických zdrojů a redukčních činidel než je metalurgický koks (např. zemní plyn, uhlí),
- vyloučení koksovny a aglomerace z výroby železa (ekologie, ekonomika),
- možnost ekonomického provozu i menších výrobních jednotek,
- u některých alternativních technologií je možno zpracovávat přímo prachové rudy,
- neustále klesající množství a kvalita šrotu vyžaduje stále naléhavěji náhradu ve formě železné houby nebo karbidu železa.

3.7.1. Základní principy přímé a tavné redukce

Jako způsoby přímé výroby jsou označovány ty technologické postupy, při kterých redukce železa z jeho nositelů probíhá z pevného stavu (při teplotě nižší, než teplota tavení) a výrobek je taktéž v pevném stavu. Produkt takových pochodů - zejména u kusových rud - připomíná svým silně pórovitým stavem mořskou houbu a byl proto nazván „*železná houba*“. Tento produkt obsahuje ještě také všechny hlušinové složky, neboť zde nedochází k oddělení v roztaveném stavu jako u vysoké pece. *Redukce u přímých způsobů výroby železa probíhá při teplotách 700-1000 °C, neboť je nutno respektovat měknutí rud resp. slinování jemných částic.*

Železná houba

DRI (direct reduced iron), HBI(hot briquetted iron)

Stupeň metalizace = $(\text{Fe}_{\text{metalické}} / \text{Fe}_{\text{celk}}) \times 100 [\%]$

Železná houba je v důsledku redukčních pochodů velmi pórovitá. Při kontaktu s atmosférou v horkém stavu dochází k reoxidaci. V důsledku velkého specifického povrchu, který působí jako katalyzátor při štěpení vodní páry ve vzduchu na plynný vodík a kyslík, vzniká nebezpečí exploze vodního plynu. Jako ochranná opatření se užívají

- ochlazení v inertní nebo redukční atmosféře,
- briketování za horka,

- dávkování za horka do elektrických obloukových pecí,
- velmi krátké skladování nebo transport (reoxidace na vzduchu).

3.7.2. Procesy tavné redukce SRI (SMELTING REDUCTION IRON)

Technologie tavné redukce jsou po technologiích přímé výroby železa z rud další skupinou technologií, představujících skutečnou alternativu vysoké pece. Jedná se o výrobu tekutého kovu bez použití koksu a bez vysoké pece.

V průběhu svého staletého vývoje byl vysokopecní proces technicky, energeticky i výkonnostně optimalizován. Přetrvávají však konstrukčně-technické a technologické nedostatky a tím je podporován rozvoj alternativních technologií vyrábějících tekuté surové železo, nezbytné pro převládající konvertorový pochod výroby oceli.

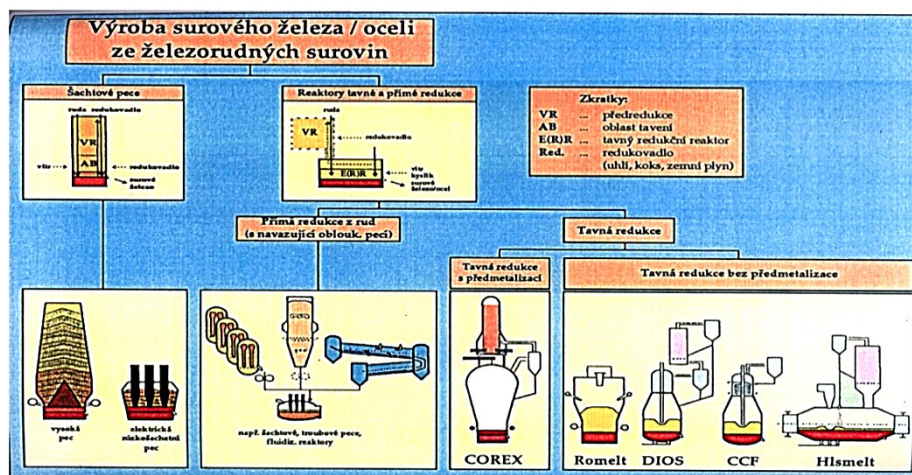
Překonání základního problému současné vysokopecní výroby může zabezpečit jen takové nové technologické pojetí výroby železa, které bude založeno na úplném vyloučení koksu z technologického pochodu.

Rozdělení pochodů tavné redukce:

a) podle typu reaktoru

- šachta (slouží většinou jen pro předredukci)
- tavíci a zplyňovací reaktor s vířivou vrstvou COREX
- cyklon (CCF)
- nístěj (Romelt)
- ležatý i stojatý konvertor (Hismelt, DIOS)

Názvem tavné redukce jsou označovány pochody zahrnující spojení mezi *tavným reaktorem*, kde probíhá zbytková redukce oxidů železa z kapalně fáze a vzniká redukční plyn a mezi *předredukčním reaktorem*, kde se tento plyn uplatňuje při předredukci oxidů železa v protiproudu. Výsledný produkt je v tekutém stavu (surové železo, HM). Systematické rozřazení všech redukčních pochodů užívaných k výrobě železa je uvedeno na obr. 3.4.



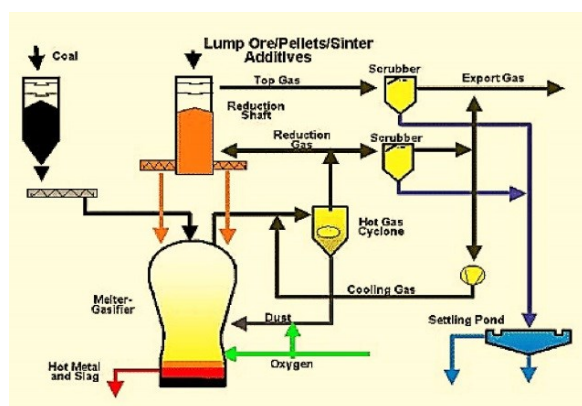
Obr. 3.4 Příklady a rozdělení redukčních procesů ze surovin

Redukční pochody ve vysoké peci jsou typické vsázením kusové železonošné vsázky a rozlišením pracovního prostoru pecního agregátu na „suchou“ a „mokrou“ oblast. Vsázka, ze které v peci vzniká surové železo a struska, sestupuje ze suché do mokré oblasti, je postupně natavována a produkty tavení protékají přes koksové „lože“ do nístěje. Předredukce a konečné doredukování probíhají v jednom reakčním prostoru. Některé příklady a rozdělení redukčních procesů (výroba surového železa / oceli) ze surovin jsou znázorněny na obr. 3.4.

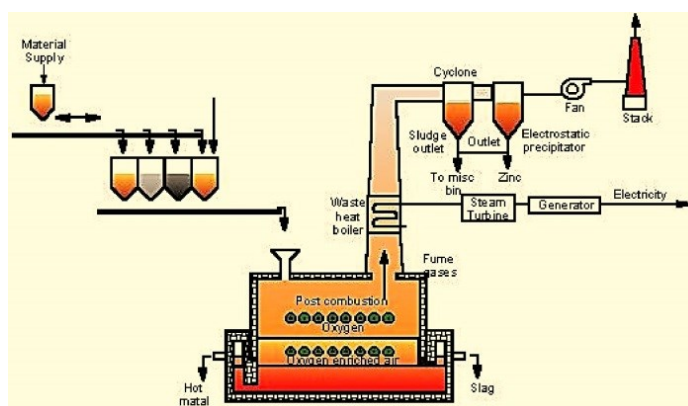
Přímá výroby železa z rud o jediném výrobním agregátu (reaktoru) - například MIDREX - jsou charakteristické, že vysoký stupeň metalizace vyráběné železné houby je zabezpečován redukčním plynem, připraveným z plynu zemního mimo vlastní výrobní reaktor. Vyrobená železná houba či brikety jsou později, jak již bylo uvedeno, bez přímé časové návaznosti zpracovávány v elektrických pecích na ocel. Pro pochody tavné redukce je naopak charakteristické, že předredukce se uskutečňuje redukčním plynem, vyrobeným ve vlastním tavném reaktoru výrobního agregátu.

Dnes se *pochody tavné redukce* obvykle člení na pochody s předmetalizací a pochody bez předmetalizace. V tavných reaktorech technologií bez předmetalizace probíhá tavení, rozhodující část redukce oxidů železa a dodatečné spalování plynných produktů této redukce. Uvedené dospalování probíhá obvykle pouze z části, aby byla zachována možnost využít částečně dospalovaného plynu pro alespoň dílčí předredukci vstupních železonošných surovin.

Na obr. 3.5 je znázorněno schéma procesu – COREX, (SRI). Schéma procesu – ROMELT (SRI) znázorňuje obr. 3.6.



Obr. 3.5 Schéma procesu – ROMELT (SRI)



Obr. 3.6 Schéma procesu – ROMELT (SRI)

3.7.3. Perspektivy vysokopecní výroby surového železa

Hlavním trendem vývoje vysokopecní výroby posledních let je snižování měrné spotřeby koksu. Kromě zavádění automatizace, zlepšování konstrukce vysokých pecí a úrovně řízení procesu, vede k tomuto cíli hlavně zvyšování množství injektovaných náhradních paliv (náhrada koksu). V současnosti je to hlavně náhrada koksu prachovým uhlím. Náhrada koksu injektovanými náhradními palivy má však hranice v množství koksu, který musí plnit funkci nosné kostry.

Zvyšování množství uhlovodíkových náhradních paliv však přináší značný pokles teploty v oxidačních prostorech vysoké pece. Tento pokles se musí kompenzovat obohacováním vysokopecního větru kyslíkem. Kyslík zároveň zvyšuje výrobnost vysoké pece.

Tento trend může vést až k tzv. *kyslíkové (bezdušikové) vysoké peci* (OBF). Zatím se nepodařilo u bezdušikové vysoké pece zvládnout řízení tepelného stavu pece. Existuje návrh na tzv. vybilancovanou vysokou pec (BBF), které je obsah kyslíku ve vysokopecním větru kolem 50 %.

Intenzivně rozvíjenou technologií je použití redukčního plynu z transformace CO na CO₂ ve vysokopecním plynu. Redukční plyn (CO) se fouká do spodní části šachty vysoké pece. Do klasických výfuků se může dmýchat kyslík (odpadají ohřívače větru).

Současné technologie injektáže velkého množství náhradních paliv do nístěje, způsobují snížení koksových vrstev v šachtě pece, což vede ke snížení prodyšnosti této části pece. Ke kompenzaci této skutečnosti se může použít technologie, při které se spolu s injektovaným uhlím vhání i prachové oxidy železa (rudné části vsázky). Vyrovnávají se tak poměry v šachtě pece. Protože s uhlím je možno injektovat i prachové zásadité přísady, přesouvá se značná část vsázky

do výfučen vysoké pece. Může se snižovat výška pece a vzniká agregát dost odlišný od klasické vysoké pece.

Některé hutní závody používají injektáž plastů v prachovém stavu do níže vysoké pece. Plasty jsou skoro čisté uhlovodíky (minimum popela a vody), problémy jsou s obsahem chloru a dopravou plastů do oxidačních prostorů.

Z dalších technologií se kromě různých vodíkových technologií intenzivně vyvíjí redukce železných rud pomocí mikrovlnného záření. Pomocí tohoto záření se pevná vsázka ohřívá současně v celém objemu, což výrazně urychluje tepelné a chemické procesy.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Druhy surových želez
- Ekologické aspekty výroby surového železa (sur. Fe)
- Ekologické aspekty aglomerace a peletizace
- Ekologické aspekty vysoké pece
- Recyklace odpadů při výrobě sur. Fe
- Výroba sur. Fe technologií mimo vysokou pec
- Základní principy přímé a tavné redukce
- Perspektivy vysokopeční výroby sur. Fe



Příklady otázek k probranému učivu

1. Jak se dělí surová železa podle chemického složení?
2. Čím se odlišují ocelářská a slévárenská surová železa?
3. Jaké je rozdělení škodlivých látek při výrobě surového železa (sur. Fe)?
4. Co jsou to „emise“?
5. Co emisní limit? Jaký je v současnosti pro aglomerační provoz?
6. Popište tok tuhých znečišťujících látek v hutním podniku.
7. Popište možnosti recyklace odpadů při výrobě sur. Fe?
8. Které složky vsázky přinášejí při výrobě sur. Fe nejvíce škodlivých látek?
9. Vysvětlete cirkulaci a kumulaci zinku ve vysoké peci.
10. Jak se čistí aglomerační spaliny?
11. Jak se čistí vysokopeční plyn?
12. Jaký je základní princip výroby přímé a tavné redukce?
13. Uveďte základní perspektivy vysokopeční výroby sur. Fe.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

KRET. J., Škodliviny při výrobě surového železa, VŠB-TU Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0552-9, 84 s.
HERČÍK, M., 111 otázek a odpovědí o životním prostředí, Montanex Ostrava, 2004, ISBN 80-248-1073-5, 150 s.
KRET. J., Teorie železářských pochodů, Studijní opora předmětu, VŠB-TU Ostrava, 2008, 119 s.

4. Význam a použití oceli v soudobé společnosti. Základní výrobní technologie v kyslíkových konvertorech.



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní výrobní technologie v kyslíkových konvertorech
- popsat výrobu v kyslíkových konvertorech pochodem
- popsat základní zařízení kyslíkových konvertorů
- popsat uspořádání kyslíkové konvertorové ocelárny



Výklad

4.1. Význam a použití oceli v soudobé společnosti

- nezastupitelný materiál v řadě odvětví
- vysoce recyklovatelný (55%, plasty pouze 10%)
- nezatěžuje životní prostředí
- velmi inovativní materiál

Vlastnosti oceli úzce souvisí s chemickým složením a tepelným zpracováním oceli

- ✓ pevnost
- ✓ houževnatost
- ✓ obrobiteľnosť
- ✓ tváriteľnosť
- ✓ korozivzdornost, leštitelnost
- ✓ tepelná a elektrická vodivost

4.1.1. Statistika výroby oceli

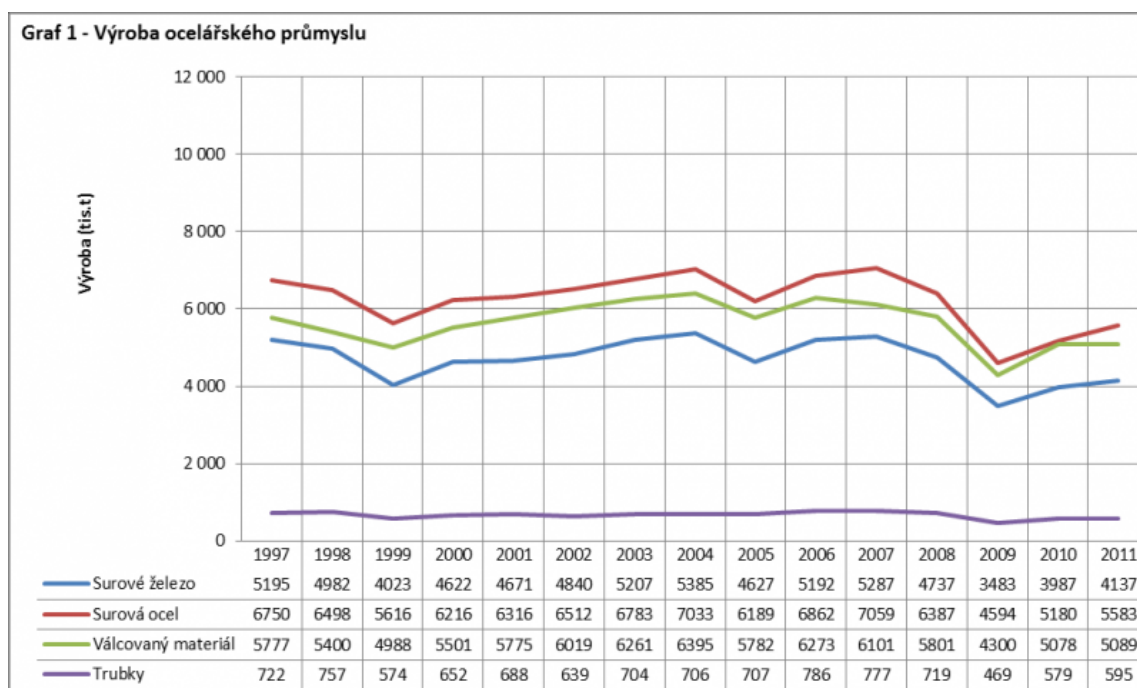
V roce 2010 bylo na světě vyrobeno 1 414 milionů tun oceli. Zdaleka nejvíce oceli bylo vyrobeno v Číně – 626,7 milionů tun, tedy 44,3 % světové produkce. Pokud je považována za celek, druhá je Evropská Unie – 172,9 (12,2 %); v rámci států EU pak bylo nejvíce oceli vyrobeno v Německu – 43,8 (tedy skoro čtvrtina produkce EU). Z celosvětového hlediska pak dalšími byly Japonsko a Spojené státy americké. Pro srovnání České republiky bylo vyrobeno 5,2 milionů tun, což jí zařadilo do první čtyřicítky producentů.

V roce 2013 bylo na světě vyrobeno více než 1,6 mld. tun oceli. Produkce oceli v Asii vzrostla o šest procent; z toho v Číně, která je největším producentem, se výroba zvýšila o 7,5 % na 779 milionů tun. Japonsko jako světová dvojka zaznamenalo nárůst o 3,1 % na 111 milionů tun, což bylo první zlepšení za poslední tři roky. V Evropě a USA produkce klesla o dvě procenta.

Česká republika

V České republice bylo v roce 2010 vyrobeno 5,2 milionů tun oceli, což bylo více než v roce 2009, kdy následkem ekonomické krize dosáhla výroba oceli v České republice historického minima 4,6 milionů tun. Největším výrobcem oceli je ArcelorMittal Ostrava, následovaný Třineckými železárnami a Evraz Vítkovice Steel.

Tab. 4.1 Statistika výroby ocelářského průmyslu v České republice



Tab. 4.2 Výroba oceli v České republice

Výroba surové oceli v České republice v milionech tun																						
rok	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
výroba	10,7	10,1	8,0	7,3	6,8	7,1	7,2	6,5	6,8	6,5	5,6	6,2	6,3	6,5	6,8	7,0	6,2	7,1	6,4	4,9	4,6	5,2

4.2. Historie vzniku výrobní technologie v kyslíkových konvertorech

Ve zkráceném pohledu můžeme připomenout stručnou historii výroby železa a oceli do období nástupu kyslíkových pochodů.

V 19. století se začíná používat ve vysokých pecích jako palivo koks. První koksová vysoká pec byla uvedena do provozu ve Vítkovicích v roce 1836. Koksové vysoké pece byly již agregáty s velkým výkonem.

Moderní technologii ve zkujňování přináší vynález Bessemerova konvertoru v roce 1855.

Další vývoj směřoval k nové výrobní technologii v Siemens-Martinských pecích, která byla uvedena do provozu v roce 1864. Vysokých teplot plamene se dosahovalo předehřevem vzduchu i topného plynu v regeneračních komorách.

Následně v roce 1878 uvádí Thomas do provozu zásaditou vyzdívku pro konvertory a zkujňování oceli pod zásaditou struskou na bázi oxidu vápenatého.

Výroba ušlechtilých ocelí je na začátku 20. století, zaváděna do elektrických pecí.

V roce 1902 je uvedena do provozu první oblouková pec (Heroult) a následně ve stejném roce první indukční pec (Kjellin).

V první polovině 20. století dominují ve výrobě oceli Siemens-Martinské pece a konvertory dmýchané vzduchem.

Nové požadavky vývoje moderní techniky vedly k rozvoji elektrometalurgie.

V roce 1952 byl uveden do provozu kyslíkový konvertor dmýchaný horem, pochod LD v Linci, Rakousko. Byla zahájena výroba oceli pomocí plynného kyslíku a tím byl zahájen nástup kyslíkových pochodů.

V 60. letech směřoval další vývoj moderní technologie výroby oceli k přesunu vedení některých metalurgických reakcí z pece do pánve a nastal tím rozvoj sekundární (mimopecní) metalurgie.

V České republice jsou v současné době tři výrobci, kteří disponují kyslíkovými agregáty. Ve firmě ArcelorMittal a.s. jsou tři tandemové pece.

Třinecké železářny a.s. provozují dva kyslíkové konvertory pochodem LD. Dnes po řadě modernizačních úprav konstrukce a technologie konvertorů můžeme spíše pojmenovat celosvětově, že pracují pochodem BOF.

Evraz Vítkovice Steel a.s. provozuje dva spodem dmýchané kyslíkové konvertory pochodem OXYVIT, což je dnes celosvětově v podstatě pochod OBM.

4.3. Výroba v kyslíkových konvertorech

V současné době jsou kyslíkové konvertory jako stěžejní výrobní agregáty vedeny do zpracování surového stavu oceli o daném chemickém složení a teplotě oceli. Finální zpracování oceli se přesouvá na zařízení sekundární metalurgie.



Obr. 4.1 Konvertor ve fázi ohřevu kovového odpadu

Základní vsázku kyslíkového konvertoru tvoří surové železo, kovový odpad interního výskytu

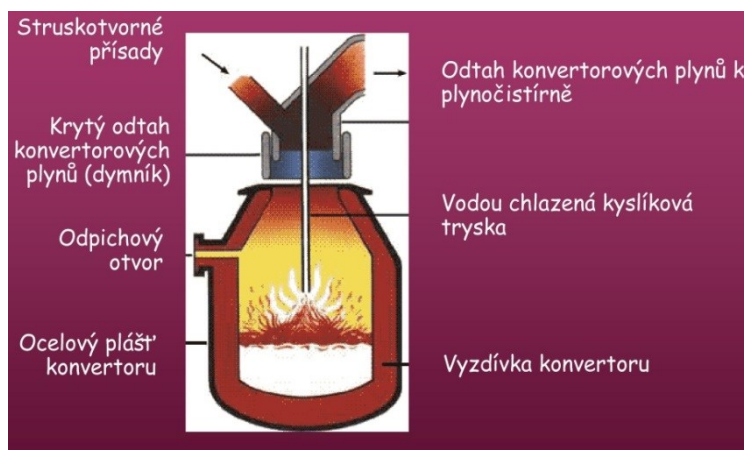


Obr. 4.2 Konvertor ve fázi nalévání surového železa

a externě nakupovaný kovový odpad a struskotvorná přísada vápno anebo dolomitické vápno. Obr. 4.1 znázorňuje konvertor ve fázi ohřevu kovového odpadu. Na obr. 4.2 je znázorněn konvertor ve fázi nalévání surového železa.

Vzhledem k tepelným poměrům v kyslíkovém konvertoru jsou požadavky na kvalitu surového železa zaměřeny především na křemík v optimálním obsahu 0,6-0,8 %. Jeho vyšší obsah způsobuje potíže hladkého průběhu ve fázi dmýchání kyslíku a také zhoršuje podmínky pro odfosfoření. Obsah Mn v surovém železe je vzhledem ke konečnému obsahu po ukončení dmýchání optimální 0,5-0,8 %. Z pohledu vysokopevní výroby je však zájem, aby byl nižší. Výsledek je kompromis, který je zanesen do technických podmínek dodávek surového železa.

Protože ztráty železa jsou přímo úměrné hmotnosti strusky, tak je požadován co nejnížší obsah fosforu v surovém železe, většinou nepřevyšující 0,15 %. Taktéž obsah síry je žádoucí co nejnížší, pokud nemá ocelárna zařízení pro odsířování sur. Fe (např. Třinecké železářny a.s.). Většinou jsou v technických podmínkách o dodávkách, surového železa rozdělena do jednotlivých tříd (ty jsou cenově odstupňovány), kde je limitující právě obsah síry.



Obr. 4.3 Hlavní součásti kyslíkového konvertoru

Množství zpracovaného kovového odpadu je dáno při standardních technických podmínkách konvertoru chemickým složením surového železa a jeho teplotou, tepelnému stavu vyzdívky a vyráběné jakosti oceli. Významný vliv na spotřebu kovového odpadu má také způsob a intenzita chemického ohřevu tj. vsázka nauhličovadla před začátkem dmýchání kyslíku. Spotřeba kovového odpadu bývá většinou 20-30 % a jeho regulace závisí mimo výše uvedeno také na současných

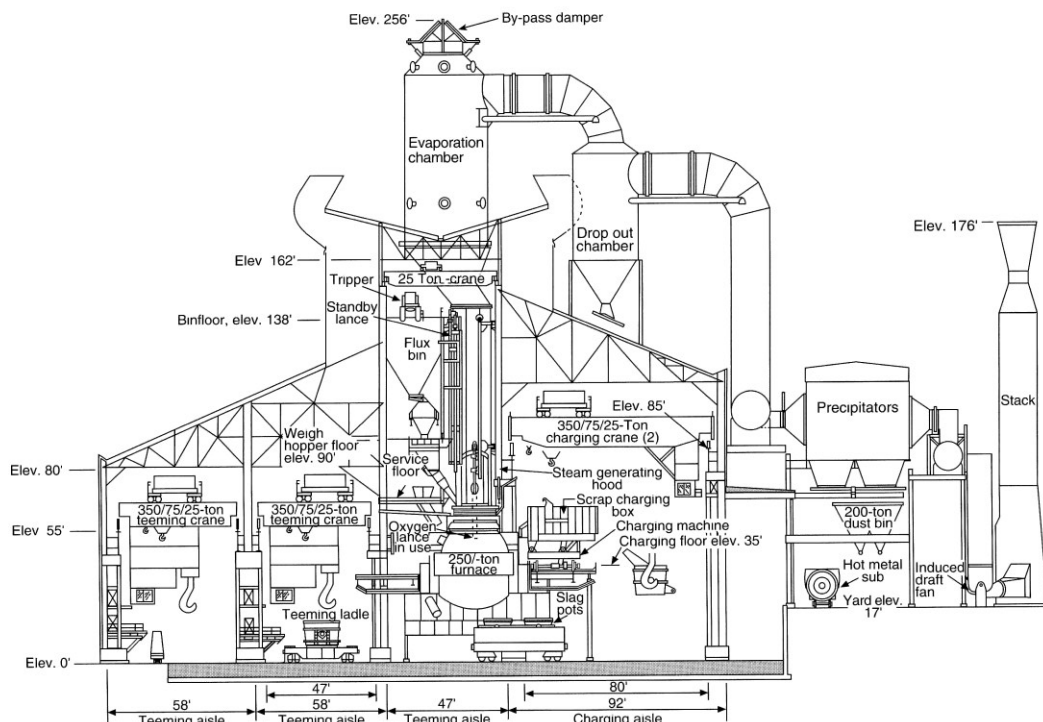
cenách nakupovaného kovového odpadu a surového železa. Na obr. 4.2 jsou znázorněny schematicky hlavní součásti kyslíkového konvertoru.

4.3.1. Některá základní zařízení kyslíkových konvertorů

Podstatou pochodu L-D je zkujňování surového železa s nízkým obsahem fosforu (povětšinou do 0,3 %) a to foukáním kyslíku tryskou, umístěnou v ose bazicky vyzdřeného konvertoru na hladinu tekutého kovu. Čistota kyslíku je předepsána min. 98,5 % a standardně se dodává minimálně 99,0 %, tlak dmýchaného kyslíku se pohybuje zpravidla od 0,9-1,5 MPa. Spotřeba kyslíku je dána použitou technologií a většinou bývá 50-60 Nm³.t⁻¹ oceli. Proud kyslíku musí mít dostatečnou kinetickou energii, aby kyslík mohl proniknout nejen vrstvou strusky, ale i do požadované hloubky kovové lázně. Dynamický účinek kyslíkového proudu spolu s oxidací uhlíku zajišťuje intenzivní promíchávání lázně a tím příznivé podmínky pro rychlý průběh zkujňovacích reakcí.

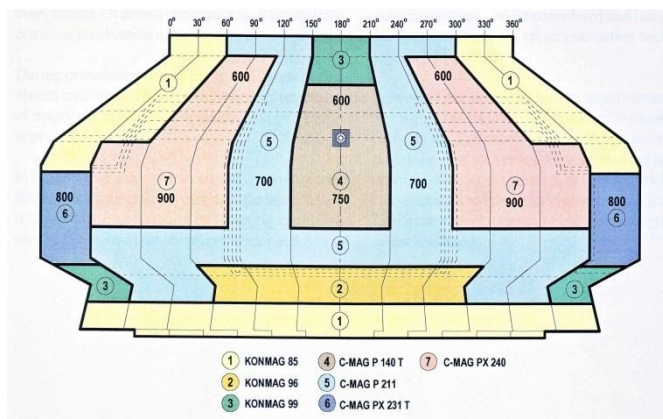
Proud kyslíku při proniku do kovové lázně vytváří tzv. reakční zónu, kde teplota lázně dosahuje až 2500 °C. V této oblasti dochází k oxidaci železa a zčásti i doprovodných prvků. Vznikající kysličník železnatý zčásti reaguje s doprovodnými prvky, zčásti přechází do strusky a kovové lázně. Změnou polohy trysky a tlakem přiváděného kyslíku lze regulovat polohu a objem reakční zóny a tudíž i obsah FeO ve strusce.

Na obr. 4.3 je znázorněno uspořádání konvertorové ocelárny.



Obr. 4.3 Uspořádání konvertorové ocelárny

Konstrukce trysky bývá nejčastěji tří a víceotvorová. Konstrukce je ocelová a hlavová část, která je nejvíce tepelně zatěžována, bývá pro lepší odvod tepla ze slitiny mědi. Tryska je chlazená vnitřním rozvodem v konstrukci tlakovou vodou.



Obr. 4.4 Pásmová vyzdívka sázecí strany konvertoru

k této vyzdívce se sestavuje pracovní vyzdívka, která je ve styku s tekutým kovem a struskou v konvertoru. V současnosti se vyzdívky kyslíkových konvertorů realizují většinou z vysoce jakostních magnezitových materiálů. Délky jednotlivých „kamenů“ mohou mít délku v některých pozicích 650-750 mm. Obsah MgO bývá vyšší než 98 % s minimálním zbytkovým obsahem kyselých a jiných oxidů. Jejich skladba se sestavuje do tzv. pásmových vyzdívek. Na obr. 4.4 je

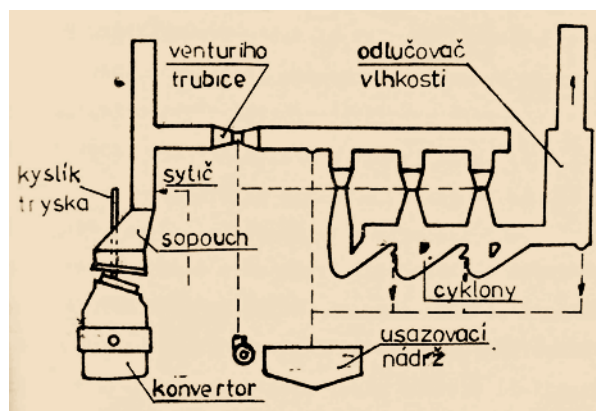
Doba dmýchání kyslíku bývá standardně kolem 15 min. a celková doba tavby je dána mimo jiné například mezitavbovou údržbou vyzdívky. Většinou bývá kolem 45 minut.

Konstrukce vyzdívky konvertoru začíná na vrstvě tepelné izolace většinou tenkého plátového charakteru na bázi SiO₂, dále na základní magnezitové vyzdívkě standardní kvality, která slouží pro tepelnou izolaci a jako poslední ochrana před protavením ocelového pláště nádoby konvertoru. Teprve

příklad vyzdívky sázecí strany kyslíkového konvertoru. Barevné odlišení značí různou specifickou kvalitu žáruvzdorného materiálů, která je dána jednotlivými pozicemi vyzdívky v různých exponovaných místech nádoby kyslíkového konvertoru. Běžně dosahované životnosti těchto vyzdívek byly kolem 1800-2500 taveb. V současnosti se realizují různé metody nahazování stěn konvertoru směsí strusky a MgO koncentráty při ještě dalším obohacování konvertorové strusky MgO v průběhu dmýchání kyslíku do obsahů ve strusce kolem 10 i více procent. Životnosti nádoby konvertoru se potom zvyšují i více než dvojnásobek původních.

Významnou součástí zařízení kyslíkových konvertorů jsou *plynočistiřny konvertorových plynů*. Čištění plynů se provádí způsobem mokrým anebo elektrostatickým. V České republice mají konvertory zařízení pro mokré čištění plynů. Princip zařízení je založen především na funkci Venturiho odlučovačů, které pracují na principu zrychlení prachu v plynu. V zúženém místě Venturiho trubice, kde plyn a prachové podíly dosahují největší rychlosti, naráží obě média na proud vody, ostříkovaném tryskami ve směru kolmém na proud plynu. Protože částice prachu jsou velmi jemné, tak se může zařadit ještě druhý odlučovač. Konečné odstraňování sraženého prachu u zachycených kapek vody vyřeší cyklony. Na obr. 4.5 je znázorněn příklad schéma mokrého čištění konvertorových plynů.

Původní prezentovaný předpoklad, že elektrostatické čištění dosahuje vyšší parametry, je dnes v podstatě překonán. Současný limit daný zákonem 50 mg.m^{-3} prachových látek po vyčištění konvertorového plynu odváděných do ovzduší bude snížen na 20 mg.m^{-3} . Jednotlivé hutní provozy mají připraveny projekty anebo realizují pomocí současné techniky (prvky měření a regulace, výpočetní technika aj.) rekonstrukci stávajících plynočistiř s mokrým čištěním.

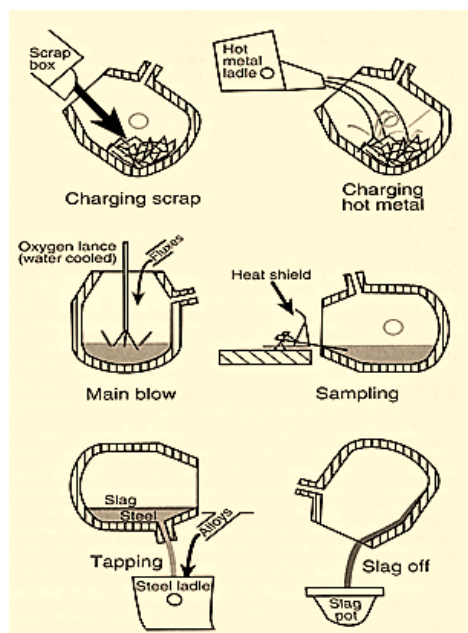


Obr. 4.5 Schéma mokrého čištění konvertorových plynů

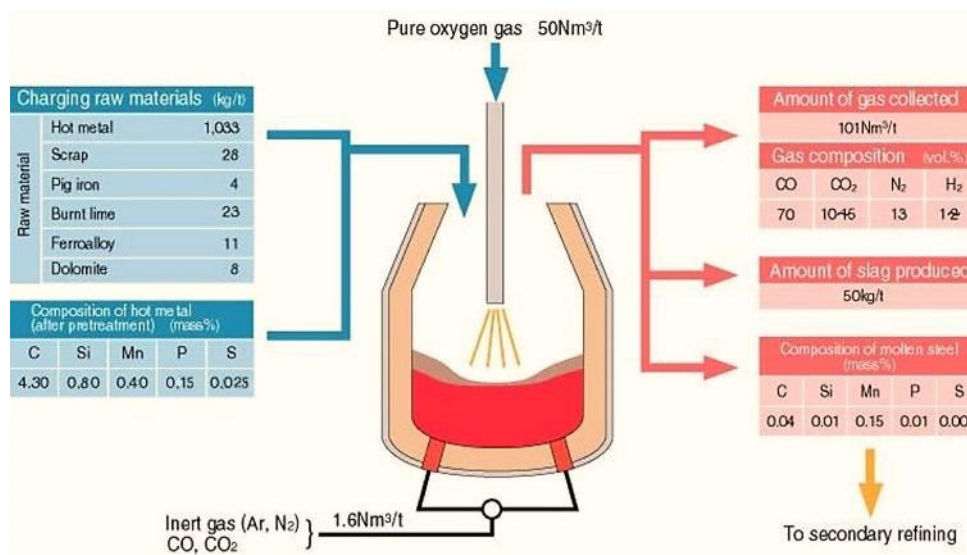
4.3.2. Výrobní technologie kyslíkových konvertorů

Na obr. 4.6 jsou znázorněny výrobní fáze kyslíkového konvertoru. Shora dolů - fáze sázení kovového odpadu, následuje fáze nalévání surového železa, dále dmýchání kyslíku a sypaní struskotvorných přísad, nauhličovadla aj., Ukončením dmýchání kyslíku se provede odběr předzkoušky kovu ponorným vzorkovačem a změří se teplota oceli. Při souhlasných parametrech se provede odpich oceli do lící pánve a následně se vyleje konvertorová struska do struskové mísy. Po ukončení odpichu, pokud se neprovádí meztavbová oprava například vyzdívky, tak je konvertor opět připraven na další tavbu.

Na obr. 4.7 je uveden příklad základní bilance vyrobené tavby v kyslíkovém konvertoru. Vlevo nahoře je uvedena bilance kovových a nekovových přísad a dole je analýza surového železa. Vpravo nahoře je bilance vybrané analýzy konvertorového plynu a dole je konečná analýza oceli po ukončení dmýchání kyslíku a další měrné spotřeby plynů a materiálů.



Obr. 4.6 Výrobní fáze v kyslíkovém konvertoru

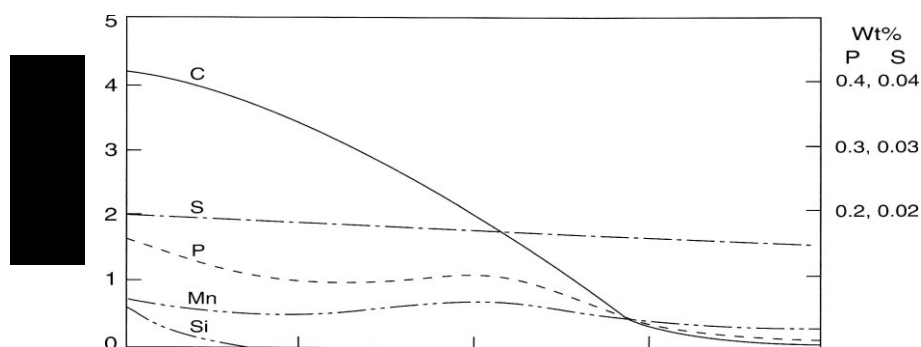


Obr. 4.7 Balance tavby v kyslíkovém konvertoru

4.3.3. Časový průběh oxidace doprovodných prvků v kyslíkovém konvertoru

Oxidační pochody v lázni kyslíkového konvertoru probíhají především stykem roztaveného kovu a okysličující plynné fáze, dále reakcí mezi roztavenou struskou a roztaveným kovem a reakcí mezi kyslíkem rozpuštěním v kovové lázni a příslušnými doprovodnými prvky, včetně železa.

Pokud se týká změn chemického složení kovu, strusky a teploty během zkujňovacího pochodu v kyslíkovém konvertoru, dochází na počátku procesu k intenzivní oxidaci křemíku a manganu, přičemž okysličování uhlíku a fosforu je v této fázi pochodu pozvolnější. Později v souvislosti s rychlým ohřevem lázně, rychlosti oduhličení a odfosfořování vzrůstá, přitom maximálních hodnot dosahuje přibližně v polovině zkujňovací doby. V závěru dmýchání rychlost oduhličení opět klesá. Prakticky v první třetině zkujňovací doby obsah křemíku klesne na nulovou hodnotu, přičemž obsah manganu v posledních dvou třetinách doby foukání se udržuje v určité rovnovážné koncentraci mezi kovem a struskou.



Obr. 4.8 Průběh tavby v kyslíkovém konvertoru při LD pochodu

4.3.4. Reakce probíhající v kyslíkovém konvertoru

oxidace uhlíku – oduhličení



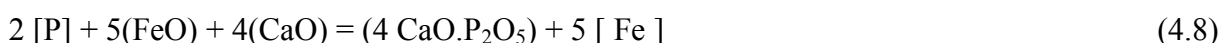
oxidace křemíku



oxidace manganu



odfosfoření

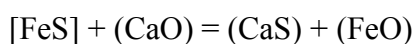


Ze vztahu vyplývají podmínky pro dobré odfosfoření taveniny za předpokladu

$$[\%P] = \left(\frac{a_{\text{CaO}} \cdot a_{\text{P}_2\text{O}_5}}{K_p \cdot a_{\text{FeO}}^5 \cdot a_{\text{CaO}}^4} \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

- nízká aktivita tetrafosforečnanu vápenatého ve strusce (produkt odfosfoření)
- vysoká hodnota rovnovážné konstanty - relativně nízká teplota
- vysoká aktivita CaO a FeO ve strusce - tzn. určitá oxidační schopnost a zásaditost strusky, existuje tedy optimální poměr obou oxidů

odsíření



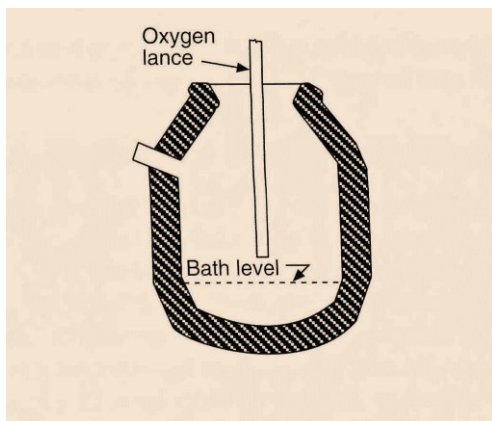
Ze vztahu vyplývají podmínky pro dosažení dobrého odsíření oceli za předpokladu

$$[\%S] = \left(\frac{a_{(\text{FeO})} \cdot a_{(\text{CaS})}}{K_S \cdot a_{(\text{CaO})}} \right) \quad (4.12)$$

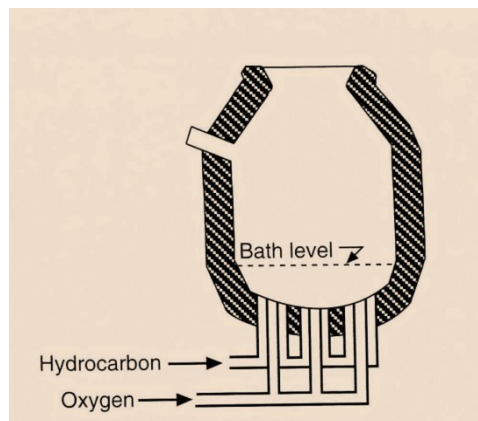
- vysoké aktivity (CaO) ve strusce
- nízké aktivity (CaS) a (FeO) ve strusce
- vyšší teploty, která napomáhá procesu odsíření, neboť se zlepšují kinetické podmínky pro průběh reakcí (asimilace vápna ve strusce apod.).

4.3.5. Hlavní typy kyslíkových konvertorů

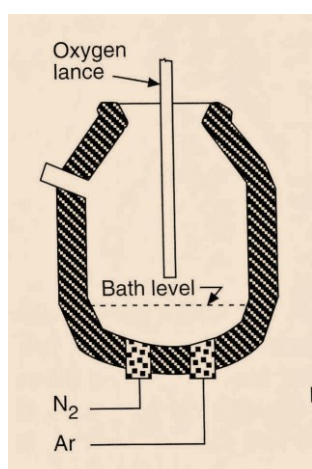
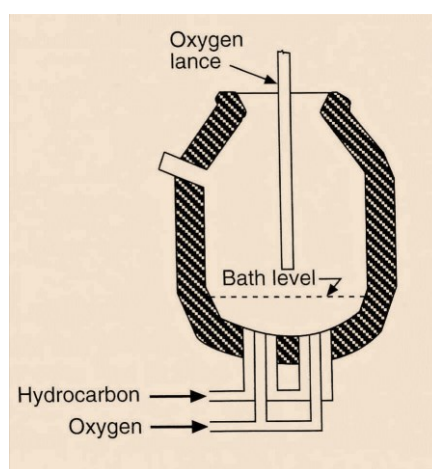
Vývoj technologie v oblasti kyslíkových konvertorů přináší některé konstrukční změny, ve snaze najít progresivnější funkce výrobních pochodů, které jsou také současně umožněny vývojem prvků v oblasti keramických materiálů, prvků měření a regulace a výpočetní techniky. Na obr. 4.9 – 4.12 jsou znázorněny schémata hlavních typů konvertorů.



Obr. 4.9 Schéma procesu LD (BOF)



Obr. 4.10 Schéma procesu OBM

Obr. 4.11 Schéma procesu LD (BOF)
s půdním čerčenímObr. 4.12 Kombinace procesu BOF a OBM,
kombinace dmýchání

Spodem dmýchaný konvertor

Při tomto procesu se kyslík dmýchá do konvertoru tryskami (dmyšny), které jsou umístěné ve dně konvertoru. Trysky je nutné chladit současnou injektáží uhlovodíkového plynu (metan, propan), který se tepelně rozkládá a odnímá část exotermického tepla vznikajícího v reakční zóně. Tento pochod je většinou doplněn dospalovacími tryskami stacionárními anebo dospalovací tryskou mobilní.

Řízení konvertorového procesu

Statický model řízení provede pomocí výpočet základních parametrů vsázky, množství kyslíku, množství legujících přísad aj. Podle těchto parametrů je potom zahájena výroba tavby.

Dynamický model řízení je statický model se zpětnou vazbou, pomocí které se provádí korekce např. množství kyslíku podle skutečných parametrů tavby jako teplota, chemické složení lázně, chemické složení konvertorových plynů aj. Podle výchozích parametrů statického modelu je zahájena výroba tavby a následně v průběhu výroby jsou prováděny korekce výchozího výpočtu parametrů podle skutečného stavu výroby.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Kyslíkový konvertor
- Zařízení kyslíkových konvertorů
- Výrobní technologie kyslíkových konvertorů (KK)
- Časový průběh oxidace doprovodných prvků KK
- Reakce probíhající v KK
- Hlavní typy KK



Příklady otázek k probranému učivu

1. Jaké základní komponenty tvoří vsázka kyslíkového konvertoru (KK)?
2. Jaká je podstatou výrobní technologie pochodu L-D?
3. Jaká je podstatou výrobní technologie pochodu OBM?
4. V jakém rozsahu se musí pohybovat čistota kyslíku pro dmýchání v KK?
5. Jaký je časový průběh oxidace základních prvků v KK?
6. Jaké jsou podmínky pro odsíření v KK?
7. Jaké jsou podmínky pro odfosfoření v KK?
8. Jaká je funkce statického a dynamického modelu řízení výrobního procesu KK?
9. Podle kterého prvku je sledována kvalita surového železa pro kyslíkové konvertory a jaký je jeho optimální obsah?
10. Jaká je optimální koncentrace manganu v surovém železe pro použití v kyslíkových konvertorech?
11. Jaká je optimální koncentrace křemíku v surovém železe pro použití v kyslíkových konvertorech?
12. Co je základní podstatou dosažení vysoké životnosti vyzdívky konvertoru?
13. Základem dosažení optimální taveniny v KK je přesné zastavení dmýchání kyslíku na konci fáze dmýchání. Pokud dojde k delšímu dmýchání (tzv. přefoukání), jaký to má vliv na stav taveniny?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

PARMA, V., *Ocelářství II.*, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1984, 188 s.

FRUEHAN, R. et al., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, Pittsburgh, 1998, ISBN 0-930767-02-0, p. 767.

5. Základní výrobní technologie v elektrických obloukových pecích a možnosti jejich intenzifikace.



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat základní funkce EOP
- popsat princip a základní části EOP
- popsat technologie vedení tavby v EOP
- vysvětlit princip výroby vysokolegovaných oceli v EOP
- definovat možnosti intenzifikace výroby oceli v EOP



Výklad

Ocel se vyrábí z kovového odpadu a dalších a dalších kovových a nekovových přísad, tavení probíhá pomocí tepla uvolňovaného elektrickými oblouky, které vznikají mezi grafitovou elektrodou a kovovou vsázkou.

5.1. Rozdělení elektrických obloukových pecí (EOP)

Napájené střídavým proudem (AC)

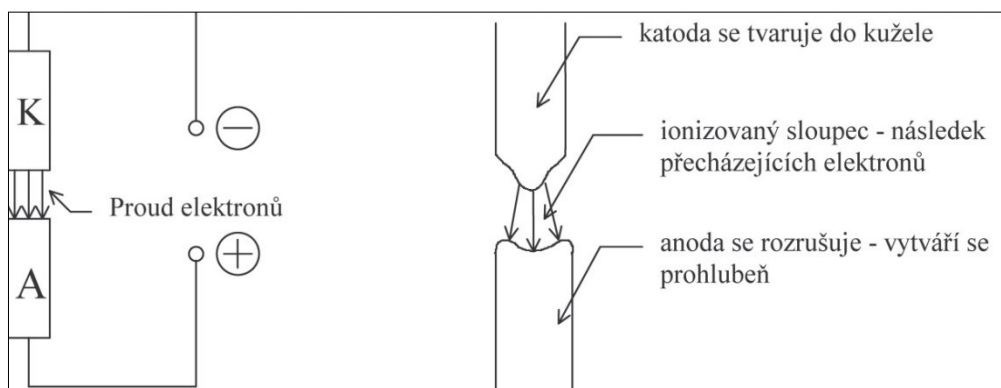
- s přímo působícím obloukem
- s nepřímo působícím obloukem

Napájené stejnosměrným proudem (DC)

- s půdní elektrodou nebo elektrodami
- obloukové pece s nevodivou nístějí

Vznik elektrického oblouku

Po uzavření elektrického okruhu, nastává termická emise elektronů z katody, následují srážky elektronů s molekulami a atomy plynů, prostor mezi elektrodami se ionizuje a vzniká „vodivá cesta“ a následně elektrický oblouk-zvláštní stav hmoty-plazmy. Na obr. 5.1 je zobrazeno schéma vzniku elektrického oblouku elektrické obloukové pece.



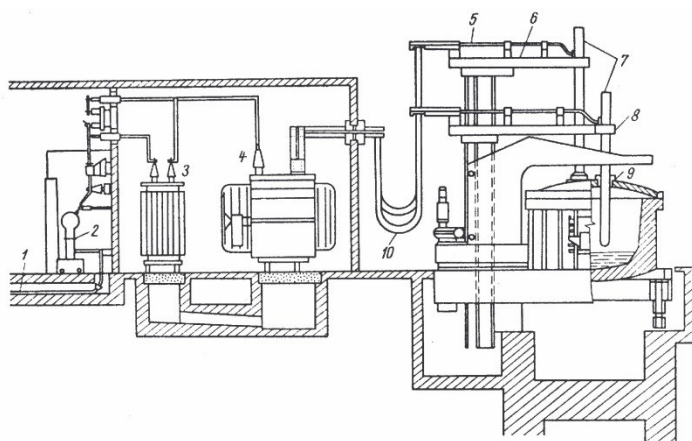
Obr.5.1. Schéma vzniku elektrického oblouku EOP

Pro průchod proudu obloukem (tzv. hoření oblouku) je zapotřebí, aby napětí U_0 mezi čely elektrod tj. grafitovou elektrodou a povrchem kovové vsázky bylo větší nebo alespoň rovno hodnotě tzv. zápalného napětí.

5.2. Elektrické obloukové pece s přímo působícím obloukem

V České republice jsou provozovány v hutních provozech pouze elektrické obloukové pece s přímo působícím obloukem.

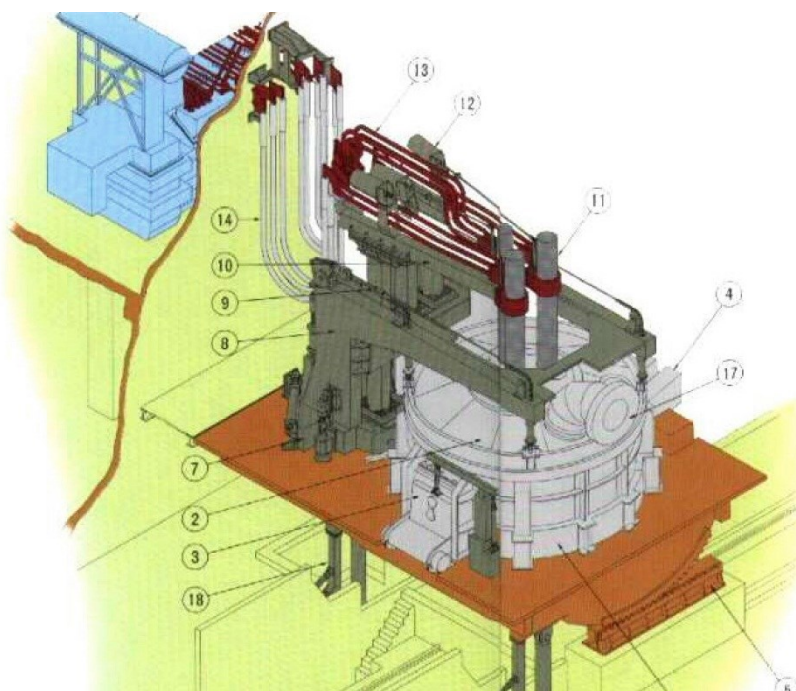
Hlavní části elektrické obloukové pece



Obr. 5.2 Hlavní části elektrické obloukové pece (EOP)

- 1-vedení VN,
- 2-hlavní vypínač,
- 3-tlumivka,
- 4-pecní transformátor,
- 5-pásovina Cu,
- 6-ramena elektrod,
- 7-elektrody,
- 8-držák elektrod,
- 9-chladicí kroužky,
- 10-měděné ohebné lana

Prostorové spořádání elektrické obloukové pece



Obr. 5.3 Prostorové uspořádání EOP

5.2.1. Funkce jednotlivých součástí EOP

- transformátor - mění napětí sítě na napětí EOP (100 až 500V),
- tlumivka - stabilizuje hoření oblouku, tlumí proudové nárazy, chrání transformátor,
- krátká síť - přivádí sekundární napětí na elektrody, je nutná dostatečná dimenze sítě,
- elektrody - grafitové, tvorba oblouků pro tavení, důležitým hodnotícím parametrem je spotřeba elektrod v kg/t vyrobené oceli (1 až 5 kg/t),
- regulace elektrod - udržuje optimální proudonapěťové poměry na oblouku, regulace pomocí délky oblouku.

5.2.2. Technologie vedení tavby v EOP

- dvoustrusková technologie - tavba se skládá z údobí tavení vsázky, oxidačního údobí a redukčního údobí
- jednostrusková technologie - tavba má údobí tavení, oxidační a dohotovení - tavba tedy probíhá bez redukčního údobí
- přetavba - po tavení následuje přímo redukční údobí
- Výše uvedené výrobní technologie jsou základní, další jsou například technologie pro výrobu vysokolegovaných ocelí, korozivzdorných ocelí, ocelí na odlitky aj.

5.2.3. Průběh tavby v EOP

- fáze sázení vsázky - pomocí sázecích košů
- fáze tavení vsázky - max. příkon oblouků, částečný průběh metalurg, reakcí
- fáze oxidační - intenzifikace tavení vsázky, použití plynného kyslíku, kyslíkopalivových hořáků, předehřevem kovové vsázky v ohřívacích komorách
- fáze redukční, dohotovení a odpich

Úlohy oxidačního údobí tavby

- oxidace fosforu - odfosfoření
- oxidace dalších doprovodných prvků - především Si, Mn, a Cr
- oxidace uhlíku – vyvolání uhlíkového varu, oduhličení
- snížení obsahů plynů - N_2 , H_2
- částečné snížení obsahu síry
- snížení obsahu nekovových vměstků

Úlohy redukčního údobí tavby

- dezoxidace oceli
- odsíření oceli
- nalegování lázně a konečná úprava chemického složení
- úprava teploty lázně na odpichovou teplotu
- konečná desoxidace oceli a vytvoření optimálního složení strusky v závěru tavby
- odpich taveniny

5.2.4. Výroba vysokolegovaných ocelí v EOP

Při oxidaci vysokochromové taveniny železa plynným kyslíkem se oxiduje přítomný uhlík na CO a chrom v tavenině na Cr_3O_4 (za jiných podmínek na Cr_2O_3) podle vztahu (5.1) a (5.2). Oba dílčí vztahy, oxidace uhlíku a chromu jsou reakcemi exotermickými. Za určitých teplotních podmínek probíhá přednostně oxidace uhlíku na CO, uhlík potom může redukovat i vzniklé oxidy Cr_3O_4 podle vztahu (5.3).



Z rovnovážné konstanty lze vyjádřit vztah pro obsah uhlíku v tavenině

$$[\%C] = \frac{f_{\text{Cr}}^{3/4} \cdot [\%Cr]^{3/4} \cdot p_{\text{CO}}}{f_{\text{C}} \cdot K_{\text{C,Cr}}} \quad (5.4)$$

Ze vztahu (5.4) můžeme provést zjednodušeně rozbor hlavních termodynamických činitelů ovlivňujících výsledný obsah uhlíku v tavenině při určitém obsahu Cr.

Obsah uhlíku po oxidační rafinaci dosáhneme tím nižší, čím bude

- nižší koeficient aktivity chrómu
- nižší obsah chrómu ve výsledné tavenině
- nižší parciální tlak CO v plynné atmosféře
- vyšší koeficient aktivity uhlíku v lázni
- vyšší hodnota rovnovážné konstanty

5.3. Stejnosemné elektrické obloukové pece

Vybavení elektrické části stejnosměrné obloukové pece

- pecní transformátor
- diodový nebo tyristorový usměrňovač na sekundární straně transformátoru
- tlumivky
- grafitová elektroda (katoda - je připojena na záporný pól usměrňovače)
- půdní elektroda (anoda - je připojena na kladný pól usměrňovače)
- regulace elektrody

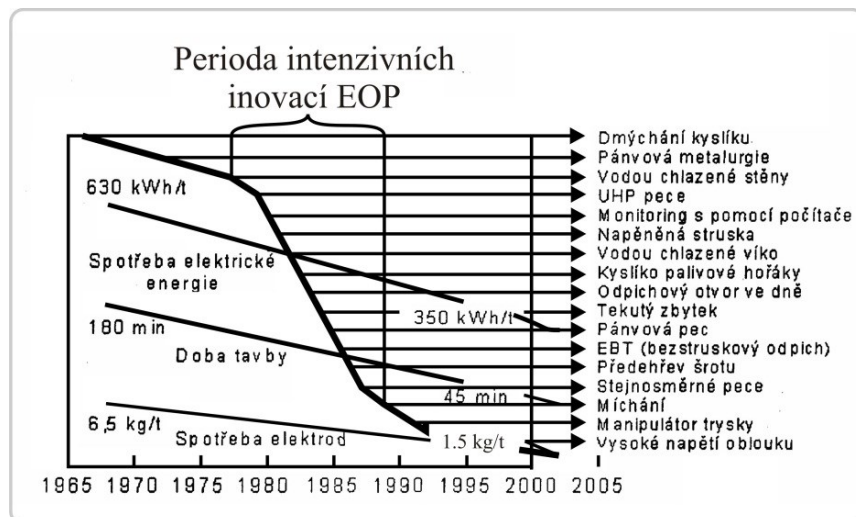
Výhody stejnosměrných pecí

- nižší spotřeba elektrod (o 40 - 60 %)
- nižší spotřeba elektrické energie (o 5 - 10 %)
- stabilnější hoření oblouku
- menší hodnotu „flicker effect“ (50 %)
- menší úroveň hlučnosti (95 -> 85 dB)
- nižší spotřeba žáruvzdorného materiálu (o 5 -10 %)
- intenzivnější míchání lázně v nížeji pece

5.4. Možnosti intenzifikace výroby oceli v elektrických obloukových pecích

Na rozdíl například od standardně vybavených EOP ve slévárnách, jsou EOP ocelářského typu většinou vybaveny moderním zařízením včetně sekundární metalurgie, které jim umožňuje dosahovat vysokých výkonů a vyrábět vysoce jakostní sortiment ocelí s vysokou přidanou hodnotou.

Vhodnou návratnost i velkých investic mohou mít v zavádění intenzifikačních opatření v hutních ocelárnách na elektrických obloukových pecích do zařízení pecí a jejich technologie, při výrobách oceli ve stech tisících a vyšších.



Obr. 5.4 Trendy vývoje elektrických obloukových pecí

Elektrické obloukové pece nové konstrukce a vybavení jsou dnes hutnickým agregátem určeným pro hromadnou výrobu oceli

Postupný vývoj intenzifikace EOP v jednotlivých vývojových trendech s jejich dopadem na spotřebu elektrické energie, celkovou dobu tavby a spotřebu grafitových elektrod je znázorněn na obr. 5.4.

5.5. Soudobé vývojové trendy ve výrobě oceli v EOP

Nové konstrukční prvky EOP, které byly vyvinuty v posledních letech, měly cíl:

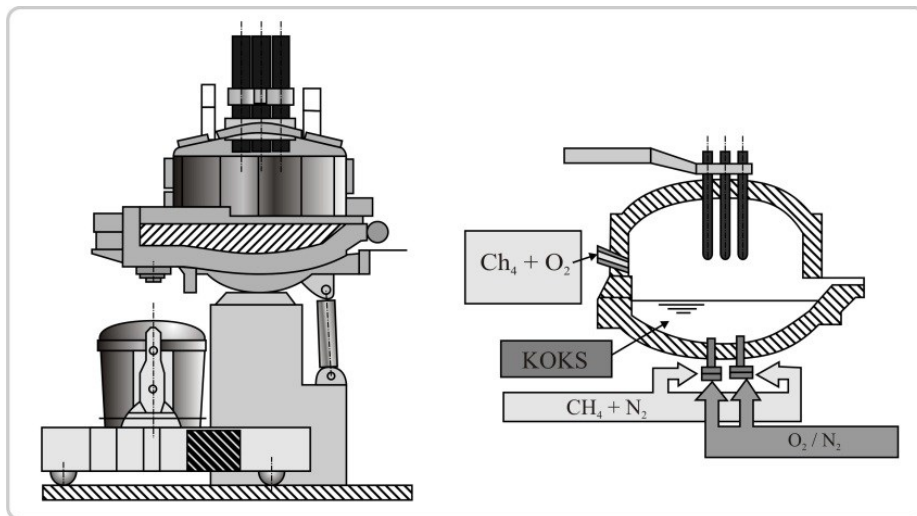
- zvýšit jakost vyráběné oceli
- snížit výrobní náklady – zejména u malých EOP
- optimalizovat použití energie – snížit spotřebu primární elektrické energie a zvýšit flexibilitu ve volbě energie
- snížit emise a hlukost při výrobě elektrooceli

Základní principy, které jsou v současné době u těchto nově vyvíjených postupů používány, lze shrnout do následujících opatření:

- využití tepla odcházejících spalin (pecních plynů) pro předehřev vsázky (ocelového odpadu),
- použití uhlíku a kyslíku, oxidace uhlíku jako dalšího zdroje energie v EOP,
- využití dospalování CO v pecním prostoru nebo v předehřívací komoře ocelového odpadu,
- částečná náhrada elektrické energie, energií z kyslíko - palivových hořáků.

Zavedení moderních postupů sekundární metalurgie zásadně ovlivnilo změny v konstrukci a výrobní technologii EOP. Obloukové pece pracující v tandemu s pánvovou pecí slouží pouze jako tavicí agregát, ve kterém se provádí oduhličení a odfosfoření. Oxidační struska při zavedení půdního odpichu zůstává v peci. Tím se vytváří vhodné podmínky pro hluboké odsíření a dezoxidaci oceli v pánvi. Doba tavby je limitována pouze rychlostí ohřevu kovu na odpichovou teplotu.

Konstrukční změny prováděné v poslední době u moderních obloukových pecí mění zcela profil celé obloukové pece. Na obr. 5.5 je příklad schématického znázornění soudobých konstrukcí EOP.



Obr. 5.5 Schématické znázornění soudobých konstrukcí EOP, vlevo pec s půdním odpichem, vpravo pec s hořáky, zařízením na napěněnou struku a půdními dmyšnými

Konstrukční změny prováděné v poslední době u moderních obloukových pecí mění zcela profil celé obloukové pece. Některé nové zajímavé konstrukční varianty, které způsobily významnou změnu konstrukce obloukové pece, jsou v několika případech uvedeny níže.

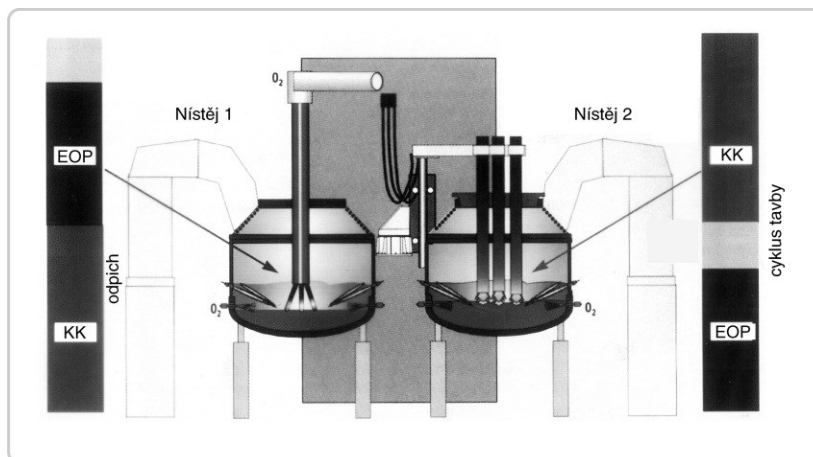
Pochod CONSTEEL byl vyvinut firmou Intersteel Technology. Veškerá vsázka, tedy ocelový odpad, je plynule dodávána do EOP pomocí vibračního dopravníku procházejícího předehřívacím tunelem. Ten je dlouhým až 16 m a je vyhříván pomocí spalín z EOP a hořáků na zemní plyn. Teplota předehřevu vsázky je až 700 °C (obvykle cca 500 °C). Spotřeba elektrické energie se v EOP pohybuje v rozmezí 315–390 kWh.t⁻¹. EOP uvedeného typu pracují např. v USA, Japonsku, Itálii, Thajsku aj.

Pochod KES (Klockner Electric Steel) představuje snahu o podstatné vylepšení výrobního pochodu, sjednocujícího výhody kombinovaných konvertorových technologií a výhody výroby v EOP. Podstata této technologie spočívá na třech základních principech

- dmýchání plynného kyslíku
- injektáž fosilních paliv
- dospalování vznikajících pecních plynů, bohatých na CO

V porovnání s konvenční EOP aplikace KES pochodu podstatně snižuje spotřebu elektrické energie a to až o 130 kWh.t⁻¹ tekutého kovu. Celková spotřeba elektrické energie pak činí cca 280 kWh.t⁻¹ oceli. Spotřeba kyslíku kolem 70 Nm³.t⁻¹ oceli. Doba tavby se zkracuje na 50 minut, čímž se výrobnost EOP zvýší o více než 30 %. KES pochod se uplatňuje například v Japonsku a Itálii.

FUCHSOVA šachtová pec byla vyvinuta firmou Fuchs Systemtechnik ve spolupráci s Danish Steel Works. Předehřívací šachta, umístěná nad EOP, dovoluje plynulé sázení předehřáté vsázky do pracovního prostoru pece. Předehřívání se uskutečňuje odcházejícími spalínami z pece nebo za použití kyslíko-palivových hořáků. Uvedený pochod umožňuje zvýšit výrobnost pece o 20 % při spotřebě: elektrické energie v EOP 350 kWh.t⁻¹ oceli, 30 Nm³.t⁻¹ kyslíku. Pec tohoto typu o kapacitě 100 t je vybavena například transformátorem 80 MVA a šesti kyslíko-palivovými hořáky s každým o výkonu 6 MW.



Obr. 5.6 Schéma postupně probíhajících operací v obou nístějích dvounístějové EOP

Významných výsledků bylo dosaženo na *dvounístějové* („*TWIN*“) EOP, např. CONARC fy. Mannesmann či ARCON fy. Concast, pracující střídavě tak, že v jedné nístěji probíhá tavení vsázky pomocí elektrického oblouku a odpadní plyny (spaliny) jsou vedeny do druhé nístěje, ve které se předehřívá vsázka. Schéma je zobrazeno na obr. 5.6. Předehřívání vsázky je obvykle intenzifikováno doplňkovými hořáky na zemní plyn a kyslík. Použití dvounístějových pecí umožňuje snížení spotřeby el. energie až o 35 % a zkrátit také celkovou dobu tavení o 20 %.

Jedním z vývojových směrů v konstrukci elektrických obloukových pecí jsou pece pracující se stejnosměrným proudem, stejnosměrné pece.

Stejnoseměrné (DC) EOP byly vyvinuty v polovině 80. let. Jejich výhody měly spočívat v podstatně nižší spotřebě drahých grafitových elektrod, dále nižší hlučnosti a menším negativním působením na veřejnou energetickou síť, tzv. „flickerefekt“.

Současné přínosy DC EOP jsou však nižší, než se původně předpokládalo.

Pec DC EOP COMELT byla vyprojektována firmou Voest Alpine Industriebau. Pec tohoto typu se vyznačuje použitím zpravidla čtyř šikmo orientovaných elektrod, vstupujících bočně do pracovního prostoru pece a předehřívací šachtou pro vsázku, umístěnou nad vlastní EOP. Pecní systém je tvořen dvěma integrovanými jednotkami:

- sklopné pece
- předehřívací šachty, která může být bočně odsunuta např. pro účely údržby

Šikmo orientované grafitové elektrody se do pracovního prostoru pece zasouvají otvory v boční stěně. Vznikající plyny o vysoké teplotě procházejí ocelovým odpadem v peci a poté také celým sloupcem ocelového odpadu (vsázky) v předehřívací šachtě.

Předehřevem odpadu s pomocí doplňkových hořáků a dospalováním CO se ušetří až 120 kWh.t^{-1} vyrobené oceli. Současně se zkracuje doba tavení až na 40 minut. V porovnání s klasickou DC EOP se uvádí také snížení hlučnosti o 10 až 15 dB.

Pochod CONTIARC byl vyvinut firmou Mannesmann Demag Hüttentechnik (MDH) a je dalším postupem s plynulým sázením „stoprocentně“ předehřáté vsázky. DC EOP je vybavena předehřívací šachtou, kterou sestupuje ohřátá vsázka do pracovního prostoru pece. Šachta je umístěna na nesklopné peci pevně, což zajišťuje nízké tepelné ztráty netěsnostmi oproti sklopným pecím podobné konstrukce. Grafitová elektroda je umístěna ve vnitřním prostoru šachty. Pec je také vybavena kyslíko-plynovými hořáky na zemní plyn.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Rozdělení elektrických obloukových pecí (EOP)
- Elektrická oblouková pec s přímo působícím obloukem
- Jednotlivé výrobní fáze EOP
- Dvoustrusková technologie
- Jednostrusková technologie
- Přetavba
- Stejnosemné obloukové pece
- Možnosti intenzifikace EOP
- Pochod CONSTEEL
- Pochod KES
- FUCHSOVA šachtová pec
- dvounístějové („TWIN“) EOP



Příklady otázek k probranému učivu

1. Jaké je rozdělení elektrických obloukových pecí (EOP)
2. Které typy EOP jsou v České republice používány?
3. Jaký je princip funkce elektrické obloukové peci s přímo působícím obloukem
4. Popište hlavní části zařízení EOP.
5. Vyjmenujte jednotlivé výrobní fáze EOP.
6. Jaká je funkce dvoustruskové technologie?
7. Jaká je funkce jednostruskové technologie?
8. Co je to přetavba?
9. Jaké jsou výhody stejnosměrné obloukové pece a jaké je současné realitě jejich využívání?
10. Jaké jsou možnosti intenzifikace EOP?
11. Čím je charakteristický výrobní pochod CONSTEEL?
12. Čím je charakteristický výrobní pochod KES?
13. Popište, jak pracuje dvounístějová „TWIN“ EOP?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

MICHÁLEK K., *Elektrometalurgie a výroba feroslitin*, Studijní opora předmětu, VŠB- TU Ostrava, 2008, 185 s.

ŠENBERGER, J., STRÁNSKÝ, K., BŮŽEK, Z., ZÁDĚRA, A., KAFKA, V., *Metalurgie*, VUTIUM, VUT Brno 2008, ISBN 978-80-214-3632-9, 310 s.

FRUEHAN, R. et al., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, Pittsburgh 1998, p. 767, ISBN 0-930767-02-0, p. 767.

6. Význam, funkce a technologie mimopecního zpracování oceli



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- budete seznámeni s pojmem sekundární metalurgie
- ujasníte si pojmy metod sekundární metalurgie
- budete znát metalurgické možnosti některých postupů sekundární metalurgie
- pochopíte metody sekundární metalurgie provozované při atmosférickém tlaku
- budete znát technologie sekundární metalurgie provozované při sníženém tlaku
- budete znát kombinované technologie sekundární metalurgie provozované při sníženém tlaku



Výklad

Pojem sekundární metalurgie (SM) v sobě zahrnuje značný počet variant a typů technologických procesů, které probíhají mimo tavicí agregát. V pecních agregátech probíhá fáze tavení, případně fáze oxidace. Další fáze redukce a dohotovení probíhají již v některém zařízení sekundární metalurgie. Cílem je možnost zvýšení výrobnosti tavicího agregátu a vytvoření lepších podmínek například pro hlubokou dezoxidaci, modifikaci oceli nebo její odsíření.

Před výběrem a realizací vhodné varianty prvku SM je nezbytné provést podrobnou analýzu současného stavu technologie výroby oceli a konečného sortimentu výrobků a jakostí ocelí.

Vznik sekundární metalurgie

- ✓ potřeba snížení výrobních nákladů na výrobu oceli
- ✓ zvyšování jakosti oceli, dosažení jakostních parametrů, kterých nelze dosáhnout v peci
- ✓ příprava oceli na odlévání ZPO, přesné chemické složení, nízký interval odlévacích teplot

Výrazné snížení nákladů

- ve výrobním agregátu - tavení, odfosfoření, zkrácení doby tavby na výrobním agregátu, přesunutí do lící pánve
- zvýšení výrobnosti agregátu
- snížení spotřeby žáruvzdorného materiálu
- snížení množství dezoxidačních a legujících přísad, řízená desoxidace a přesné legování na spodní hranici technologického předpisu
- použití levnějších uhlíkových feroslitin

Zvýšení jakosti

- ❖ zvýšení homogenity tekuté oceli
- ❖ snížení obsahu rozpouštěných plynů, dusíku a vodíku
- ❖ snížení obsahu nekovových vměstků
- ❖ modifikace nekovových vměstků
- ❖ přesné legování oceli
- ❖ hluboká desoxidace
- ❖ hluboké odsíření oceli

Vliv zařízení plynulého odlévání ZPO

- ✚ růst nároků na dodanou lící teplotu v mezipánvi (MP) $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ✚ snížení obsahu síry běžně pod 0,01 % (podle jakosti oceli)
- ✚ výroba super čistých ocelí, dosažení parametrů síra=5 ppm, kyslík=5 ppm, dusík=14 ppm, H=1 ppm

Další směry rozvoje technologie mimopecní rafinace

- nové způsoby ohřevu tekuté oceli, SS oblouk, plazmový ohřev, elektrostruskový ohřev, kyslíko - palivové hořáky, indukční ohřev
- účinné odstraňování pecní strusky
- účinné míchání (Ar, indukční, uhlíková reakce)
- optimalizace vyzdívek pánví (cena, životnost aj.)
- široký sortiment syntetických strusek a dalších nekovových přísad, legujících přísad, aj.
- nové prvky měření a regulace, analytické přístroje - okamžitá analýza oceli, strusky, výpočetní technika aj.

Rozdělení prvků z hlediska výroby a rafinace oceli

Afinita prvku ke kyslíku - vázání na kyslík - přechod do strusky

- prvky s vysokou afinitou ke kyslíku
Ca, Mg, Al, Zr, Ti, Si, V
- prvky, které se rozdělují mezi strusku a kov, jejich afinita ke kyslíku se blíží afinitě k železu
Mn, P, S, Cr
- prvky, které mají nižší afinitu ke kyslíku než železo
W, Co, Mo, Sn, Ni, Cu, As, Sb

Plyny v oceli

- N, H, O

N, H - můžeme předpokládat, že jsou v tavenině železa přítomni v atomární podobě

Princip:

- 1) Difúze N_2 , H_2 k mezifázovému rozhraní + adsorpce (povrchové zachycení)
- 2) Disociace (termická) na atomy
- 3 Desorpce + difúze do objemu kovu

6.1. Metody sekundární metalurgie

Existuje celá řada různých technologických prvků SM. Některé jsou již překonány dalšími moderními prvky vývoje v této oblasti. Základní rozdělení metod SM probíhajících mimo tavící agregát, které se nejčastěji provádí, ze kterých jsou pochody realizovány:

Postupy probíhající za atmosférického tlaku

- AP (Argon Pouring)

- IP (Injection Process)
- SL (Scandinavian Lancers)
- LF (Ladle Furnace) - pánvová pec
- AOD (Argon Oxygen Decarburisation)

Postupy probíhající ve vakuu

- VD (Vakuum Degassing)
- VOD (Vakuum Oxygen Decarburisation)
- VAD (Vakuum Arc Degassing)
- ASEA-SKF
- RH (Rührstahl Heraeus)

Postupy bez přehřevu kovu

- Proces IP, AP, SL, VD

Postupy s přehřevem kovu

- Proces LF, VAD, AOD, VOD, ASEA-SKF

Tavenina se v pánvi nebo konvertoru ohřívá buď chemickými exotermickými reakcemi, nebo elektrickým ohřevem.

Při chemickém ohřevu se nejčastěji využívá reakčního tepla oxidace hliníku, křemíku a uhlíku.

Při legování oceli do pánve nebo větších tepelných ztrátách se pro kov používá zpravidla elektrický ohřev, při kterém se využívá nejčastěji jako zdroje tepla elektrického oblouku, stejného principu jako třífázová elektrická oblouková pec.

Výše uvedené rozdělení je dnes již spíše formální a vychází z historie vzniku jednotlivých pochodů. *V současné době se jednotlivé metody na stávajících zařízeních kombinují a dále se rozvíjejí.* Základní popis jednotlivých metod sekundární metalurgie je uveden v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Popis základních metod sekundárního zařízení

Postup SM	Popis	Označení	Přínos
Dmýchání inertních plynů	Dmýchání argonu (N ₂) příp. dmýchání pod aktivní struskou	AP	teplotní a chemická homogenizace, částečná rafinace oceli, odsíření.
Přidávání přísad do tekuté oceli	Dmýchání prachových přísad (CaO, Ca apod.)	SL, TN, IP	snížení O a S, modifikace vměstků a zvýšení mikročistoty, částečně legování.
	Zavádění speciálních plněných profilů	SCAT	
Ohřev oceli pod aktivní struskou	Kov je ohříván a promícháván s aktivní struskou	LF	teplotní a chemická homogenizace, snížení obsahu S, modifikace vměstků, legování.
Vakuové zpracování oceli	V komoře	RH, DH	rychlé oduhličení, snížení obsahu vodíku
	V proudu - během odpichu - během lití		snížení obsahu vodíku příp. dusíku, omezení sekundární oxidace
	S přehřevem pod aktivní struskou	ASEA-SKF, VAD	hluboké odsíření, snížení obsahu vměstků a jejich modifikace, teplotní a chemická homogenizace, legování
Oxidační vakuování	V lici pánvi	VOD	hluboké oduhličení (použití u Cr ocelí), snížení obsahu H, N hluboké odsíření, legování.
Oxidace směsí Ar - O	V konvertoru	AOD	
Oxidace směsí H ₂ O - O	V konvertoru	CLU	

Metalurgické možnosti některých metod sekundární metalurgie

Zařízení SM je zejména ve velkých ocelárnách základním předpokladem pro zvyšování výrobnosti tavicích agregátů, jakými jsou EOP a kyslíkové konvertory. Aplikace SM umožňuje výrobu takových značek ocelí, které jsou klasickými postupy výroby oceli i na EOP ekonomicky nepřijatelné anebo zcela nevyrobitelné. Do technologie SM patří v současnosti velké množství jednotlivých pochodů a jejich různých kombinací, které umožňují dosažení velice nízkých obsahů nežádoucích prvků například kyslík, síra, vodík, dusík aj., případně zaručují ekonomické zpracování a výrobu vysokolegovaných ocelí. Použití jednotlivých pochodů SM je znázorněno v tab. 6.2, kde je uvedena jejich stručná charakteristika a metalurgické možnosti jednotlivých pochodů SM.

Jednotlivé postupy SM dávají odlišné metalurgické možnosti. Využití prvků SM je stěžejní zejména v ocelárnách a hutních provozech (ve slévárnách ve velmi omezené míře), kde se zpracovávají velké objemy jak nelegovaných tak i vysoce legovaných materiálů. Jejich aplikací je možno dosáhnout výrazného snížení zpracovacích nákladů, což vede v odůvodněných případech i k zavádění velice finančně náročných zařízení sekundární metalurgie.

Tab. 6.2 Metalurgické možnosti některých postupů SM

postup mimopecní rafinace oceli		snížení obsahu				teplotní a chemická homogenizace	přesné legování	řízená dezoxidace	zvýšení mikročistoty	modifikace vměstků	ohřev oceli
		C	S	H	N						
Dmýchání inertních plynů	AP	n	n	č	č	a	č	n	č	n	n
Přidávání přísad do tekuté oceli	IP,SL, TN	n	a	n	n	a	a	a	a	a	n
Ohřev oceli pod aktivní struskou	LF	n	a	n	n	a	a	a	a	n	a
Vakuové zpracování oceli	RH, DH	a	č	a	č	a	a	a	č	n	n
	VAD, ASEA-SKF	a	a	a	č	a	a	a	a	n	a
Oxidační vakuování	VOD	a	n	a	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí Ar-O	AOD	a	č	č	č	a	a	a	a	č	č
Oxidace směsí H ₂ O-O	CLU	a	č	č	č	a	a	a	č	č	č

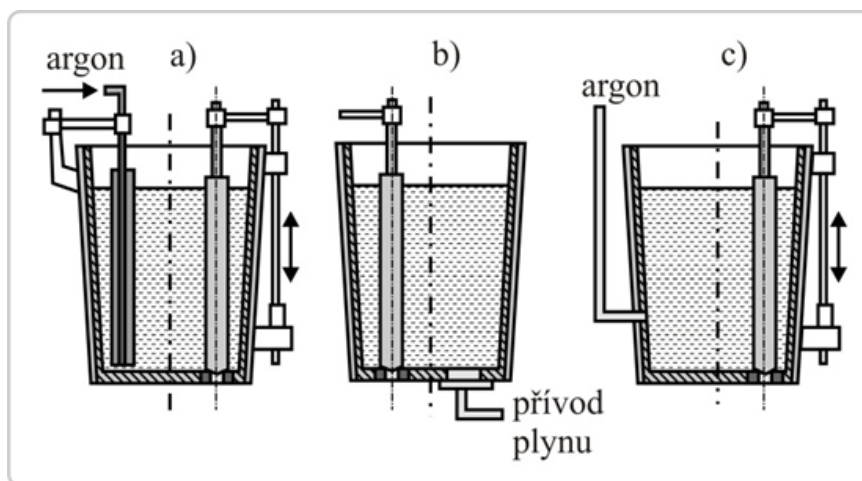
Pozn.: a – ano, n – ne, č – částečně

6.1.1. Metody sekundární metalurgie provozované při atmosférickém tlaku

Metody sekundární metalurgie při atmosférickém tlaku jsou prováděny buď v pánvi, nebo v konvertoru. Mezi nejrozšířenější metody uskutečňované v pánvi patří rafinace kovu inertním plynem, případně kombinace s dmýcháním prachových přísad nebo injektáží pomocí plněného profilu, pánvová a konvertorové pochody AOD a CLU.

Rafinace kovu inertními plyny

Dmýchání inertního plynu do taveniny označovaného jako **AP** (Argon Pouring) je nejjednodušším pochodem SM. Jako inertní plyn se používá argon a v některých případech se dmýchá také dusík. Uvedené plyny jsou za daných podmínek považovány za inertní. Dmýcháním inertního plynu je dosahováno především teplotní a chemické homogenity kovu v pánvi. Inertní plyn se dmýchá přes keramickou tvárnici. Některé způsoby umístění tvárnice anebo trysky v lici pánvi jsou znázorněny na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Způsoby dmýchání inertního plynu do LP

Argon ve formě bublin představuje v tavenině atmosféru, ve které je nulový parciální tlak vodíku a dusíku. Plyn, například vodík v lázni a v plynné atmosféře (bublina argonu) se snaží dostat do rovnovážného stavu a to tím, že vodík difunduje z oceli do bublin argonu, kde asociuje na molekuly a společně s bublinou argonu je vynášen z taveniny. Tento proces se ukončí v okamžiku, kdy parciální tlak vodíku v plynné atmosféře bude odpovídat dané koncentraci vodíku v tavenině, tedy v okamžiku ustavení rovnováhy mezi plynnou směsí a taveninou, za předpokladu, že bublina Ar s vodíkem setrvá v tavenině dostatečnou dobu. Rychlost vyplouvání bublin závisí na jejich velikosti. Předpokladem vysoké účinnosti odplynění je dosažení malé velikosti bublin rozptýlených v co největším objemu lázně. Teoreticky lze dmýcháním argonu snížit obsah vodíku a dusíku v tavenině. Snížení obsahu dusíku je však možné až při velkém objemu dmýchaného plynu a v praxi se o této technologii neuvažuje.

Pro podmínky termodynamické rovnováhy plynné fáze v bublině Ar a taveninou lze celkový tlak v bublině vyjádřit jako součet parciálních tlaků argonu a odstraňovaného plynu (H, N). Tlak v bublině je současně roven součtu vnějšího tlaku nad taveninou a ferostatického tlaku, závislého na vzdálenosti bubliny od hladiny. Na základě Boyle-Mariottova zákona ($p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$), lze vyjádřit poměr objemů odstraňovaného plynu a argonu poměrem jejich relativních parciálních tlaků

$$\frac{dV_{X_2}}{dV_{Ar}} = \frac{{}^r p_{X_2}}{p - {}^r p_{X_2}} \quad (6.1)$$

kde V_{X_2} je objem plynu odstraňovaného z kovu při odplynování [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$],

V_{Ar} je objem dmýchaného argonu [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$],

${}^r p_{X_2}$ je relativní parciální tlak odstraňovaného plynu v bublině argonu [Pa],

p je celkový tlak plynů (Ar, H, N) v bublině [Pa].

Objem odstraňovaného plynu lze vyjádřit pomocí úbytku obsahu plynu v kovu

$$dV_{X_2} = -\frac{22,4}{M_{X_2}} d[X] \quad (6.2)$$

kde M_{X_2} je molekulová hmotnost rozpuštěného plynu [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$],

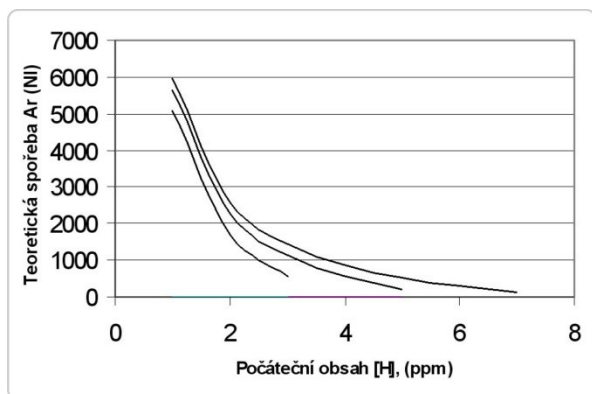
$[X]$ je obsah rozpuštěného plynu v kovu [%].

Z doporučené literatury můžeme uvést vztah pro výpočet o množstvích dmýchaného argonu nutného pro snížení zvoleného obsahu vodíku

$$V_{\text{Ar}} = \frac{22,4}{M_{\text{X}_2}} \cdot p \frac{K_X^2}{f_X^2} \left(\frac{1}{[\text{X}]} - \frac{1}{[\text{X}_0]} \right) \quad (6.3)$$

kde K_X je rovnovážná konstanta pro reakci přechodu vodíku nebo dusíku z plynné fáze do taveniny
 f_X - aktivitní koeficient vodíku nebo dusíku

Z této rovnice lze určit, že na snížení obsahu vodíku rozpuštěného v oceli se spotřebuje tím více argonu, čím nižší je jeho počáteční obsah před dmýchání.



Obr. 6.2 Vliv množství dmýchaného argonu na obsah vodíku v oceli

U nelegovaných ocelí na odlitky je z hlediska vzniku bublin v odlitcích považován za kritický obsah vodíku v oceli odlité do pánve vyšší než 7 ppm. V ocelářské praxi bylo několikrát ověřeno, že u nelegovaných ocelí s obsahem manganu nad 0,8 % byl tento kritický obsah vodíku obdobný 7 – 8 ppm.

Grafická forma vztahu (6.3) při $t = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 101\,325\text{ Pa}$ a $f_H = 1$ je znázorněna na obr. 6.2.

Použití dmýchání argonu v pánvi na snížení obsahu vodíku v oceli může být podle teoretického rozboru účinné jen v případě snižování jeho vysokých obsahů. Použití uvedené technologie na

dosahování nízkých obsahů vodíku, například pod 3 ppm je možné jen při poměrně vysokých spotřebách argonu cca 2 až 3 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ oceli. *Vzhledem k velkému poklesu teploty lázně v pánvi během dmýchání a velké spotřeby argonu je snížení obsahu vodíku oceli podle výše uvedeného rozboru v pánvi pod hodnotu cca 4 ppm v podstatě vyloučeno.*

Pro snížení obsahu dusíku v tavenině jsou podmínky méně příznivé, než je tomu u vodíku. Vzhledem k zhoršené difúzi dusíku v tavenině (řádově menší hodnota difúzního koeficientu D u dusíku než u vodíku) se proto během dmýchání argonu jeho obsah prakticky nemění. Nižší odplynovací schopnost dusíku oproti vodíku za jinak stejných podmínek při potřebě podstatně většího množství argonu, což souvisí s rozdílnou molekulovou hmotností dusíku ($M_{\text{N}_2} = 28\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) a vodíku ($M_{\text{H}_2} = 2\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

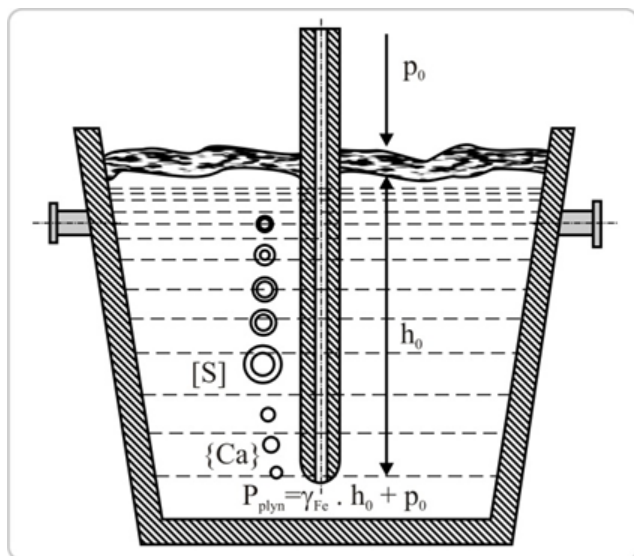
Bubliny argonu, které procházejí kovem, zároveň přispívají k flotaci vměstků. Jednotlivé vměstky se usazují na plynových bublinách a jsou tak vynášeny z kovu do strusky, kde jsou následně adsorbovány. Tím se do značné míry například zlepšuje zabíhavost oceli.

Injektáž prachových přísad tryskou

Prvky SM využívající injektáže prachových přísad jsou například metoda SL (Scandinavian Lancers), pochod TN (Thussen Niederrhein) nebo pochod IP (Injection Process). Tryskou se obvykle dmýchají do oceli v lící pánvi mleté feroslitiny obsahující vápník, silikokalcium, prachové vápno, případně také nauhličovadla, nebo běžné feroslitiny aj.

Zařízení je určeno především k odsíření, kde se používá injektáže zejména prachového vápna. Při dmýchání vápníku, případně feroslitiny obsahující vápník, ke dnu lící pánve vede zvýšený metalostatický tlak k růstu teploty varu vápníku. Z částice feroslitiny se vápník v lázni odpařuje a vzniká bublina vápníku. Na povrchu bubliny reaguje vápník se sírou. Při vyplouvání bubliny

vápníku roste s klesajícím metalostatickým tlakem její objem. Současně se však objem bubliny zmenšuje tím, že se plynný vápník reakcí se sírou mění na sulfid vápenatý. V ideálním případě se všechen vápník během vyplouvání bubliny přemění na CaS. Změna objemu bubliny při vyplouvání oceli v pánvi je schematicky znázorněna na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Schématické znázornění odsíření prostřednictvím bublin vápníku

Výrazné snížení obsahu síry je dosaženo zejména tím, že v okolí částice prachového vápna je radikálně snížena aktivita kyslíku, což umožňuje také dosáhnout vysokého stupně odsíření.

U tohoto pochodu SM dochází k růstu obsahu plynů, zejména vodíku. Růst obsahu vodíku a dusíku je způsoben také zvýšenou odpichovou teplotou, neboť během odsířování dochází k poklesu teploty kovu (60-100 °C) v závislosti na hmotnosti taveniny.

Zařízení tohoto typu se v posledním období spíše nerealizují. Tyto výrobní pochody se řeší například v rámci komplexnějších zařízení sekundární metalurgie, LF-VD apod.

Injektáž pomocí plněného profilu

Plněný profil je tenkostěnná trubička z ocelového plechu s nízkým uhlíkem, obvykle o průměru 6 až 20 mm vyplněná prachovou náplní, například SiCa, FeCaAl, Al, C, mletými feroslitinami aj. Průměr plněného profilu se volí podle hmotnosti tavby a také podle typu zaváděcího zařízení plněného profilu do LP. Pro pánve o hmotnosti tekutého kovu 4 až 8 t se používá profil o průměru cca 8 mm. Profil je veden přes poháněcí kladky podavače a vodící ocelovou trubici do pánve. Plněný profil je během celé injektáže postupně odvíjen z cívky. Rychlost profilu je volena tak, aby se plášť profilu roztavil až po dosažení dna pánve a náplň profilu se rozpouštěla co nehlouběji.

Nejčastější použití plněných profilů je k modifikaci vměstků na typ Ib pomocí SiCa, kde využití vápníku není vyšší než 50 % a také pro injektáž hliníku.

Pánev určená pro injektáž plněných profilů je upravena na homogenizační dmýchání inertního plynu. Injektáží plněného profilu obsahujícího vápník předchází dezoxidace oceli hliníkem. Při výrobě nelegovaných ocelí lze dosáhnout v LP aktivity kyslíku až 2 ppm.

Profily plněné jinými feroslitinami nebo legurami se používají ke korekci chemického složení oceli a k legování prvků s vysokou afinitou ke kyslíku, případně také ke korekci obsahu uhlíku.

V průběhu těchto typů mimopecního zpracování oceli v LP za atmosférického tlaku bez ohřevu, klesá bez ohřevu velice rychle její teplota. Vysoké odpichové teploty vedou ke zvýšenému opotřebení vyzdívek pecí a LP, také ke zvýšení naplynění zpracovávaného kovu, zejména zvýšení obsahu vodíku a celkově k vyšším výrobním nákladům.

Pánvová pec

Často používaným prvkem SM v ocelárnách je pánvová pec LF (Ladle Furnace). Zavedení ohřevu kovu v lící pánvi předpokládá plně vytížené výrobní agregáty s poměrně rovnoměrným odběrem kovu. Pánvové pece jsou agregáty s třífázovým přehřevem kovu elektrickým obloukem. Obvykle dosahuje rychlost ohřevu taveniny kolem 5 °C/min. Pro zajištění teplotní a chemické

homogenity lázně je během celé úpravy kovu dmýchán inertní plyn argon anebo dusík. Dmýchání probíhá zpravidla přes porézní tvárnici umístěnou ve dně lící pánve.

Elektrický ohřev pánvové pece vyžaduje, aby byla pánve osazena šoupátkovým uzávěrem, který se shora zasypává zpravidla chromitovým pískem.

Pánvová pec slouží k přesunu fáze redukční a fáze dohotovení z EOP anebo konvertoru do LP. Pro dosažení co nejnižšího obsahu síry během redukce v pánvi jsou LP pro pánvové pece vyzděny dolomitickými, magnezitovými, korundovými stavivý, případně z litého žárobetonu. Pec slouží pouze jako agregát, jehož cílem je intenzivní roztavení vsázky, oxidace uhlíku a fosforu kyslíkem. Po dosažení požadované odpichové teploty následuje odpich. Odpíchnutá ocel je neuklidněná a zbavená pouze oxidační strusky, což umožňuje v LP dosažení nízkého obsahu vodíku.

V LP se provádí dezoxidace kovu a tvorba nové, silně zásadité rafinační strusky. Při vlastním zpracování oceli probíhá dmýchání argonu, což zlepšuje podmínky pro odsíření a zároveň také podporuje flotační účinek vměstků, čímž se zlepšuje zejména tekutost oceli. Většinou se během celé úpravy kovu provede odsíření, homogenizace teploty a chemického složení. Předností LF je také možnost velice přesného dolegování. Užší rozpětí obsahu jednotlivých prvků, dosahované na pánvové peci, umožňuje při legování na dolní hranici obsahu prvku dané normou, především u legujících feroslitin například FeV, FeNb ale také FeCr aj. snížit náklady na tavbu.

Nejčastěji jsou používány třífázové obloukové pánvové pece. Stejnosemnné pánvové pece, pracující na principu stejnosemnné elektrické obloukové pece nejsou příliš rozšířeny a v ČR nepracují.

Technologie AOD

Výrobní technologie označovaná v zahraničí jako AOD (Argon Oxygen Decarburisation), pracuje v duplexu s EOP nebo kyslíkovým konvertorem. Během dmýchání kyslíku dochází k exotermickým reakcím, které slouží ke krytí tepelných ztrát, a proto není nutné přehřátí taveniny před vlastním zkujňováním v AOD konvertoru. Použití AOD je výhodné zejména při zpracování vysokolegovaných korozivzdorných ocelí, kde se dosahuje nízkých obsahů uhlíku až pod 0,03 %, při vysokém využití chromu až 95 %. Podstata tohoto systému je ve společné dmýchání kyslíku a argonu do kovu v konvertoru, kde dochází ke snižování parciálního tlaku oxidu uhelnatého.

Dosahované obsahy vodíku 2 – 3 ppm a dusíku kolem 60 ppm jsou přibližně o třetinu až o polovinu nižší než obsahy dosahované při běžné technologii na EOP anebo v kyslíkových konvertorech.

Teplotní a chemická heterogenita lázně způsobená dmýcháním argonu umožňuje také provést konečné dolegování na zúžený interval požadovaného chemického složení oceli. Dmýcháním argonu lze přesně řídit také požadovanou odpichovou teplotu taveniny. U ocelí legovaných dusíkem je možné dmýchat místo argonu dusík a ocel tak současně legovat dusíkem.

Ocel vyrobená v konvertoru má ve srovnání s ocelí vyrobenou na EOP anebo v kyslíkovém konvertoru nízký obsah vodíku, kyslíku, nízký obsah síry a vysokou čistotu.

Technologie CLU

Výrobní zařízení pochodu CLU (podle závodu Creusot Loire z Francie a Udelholmu ze Švédska) je obdobné zařízení AOD. Tento duplexní pochod je určen podobně jako pochod AOD zejména k oduhličení vysokolegovaných chromových a chromniklových ocelí.

Vsázka se natavuje na EOP a vlastní rafinace, především oduhličení taveniny se uskutečňuje v konvertoru, do kterého je pomocí trysek umístěných ve dně nádoby dmýchána směs kyslíku a vodní páry.

Zařízení pochodu CLU je v podstatě stejné jako zařízení AOD, slouží ke zpracování vysokolegovaných korozivzdorných ocelí. Výhodou tohoto procesu jsou nižší náklady na plynné médium a vyšší životnost vyzdívky konvertoru.

6.1.2. Technologie SM provozované při sníženém tlaku

Výrobní procesy sekundární metalurgie, probíhající za sníženého tlaku, bývají souhrnně označovány jako vakuová metalurgie. Snížením celkového tlaku nad taveninou je možné dosáhnout v oceli velmi nízkých obsahů uhlíku. Uhlík ve vakuu je schopen redukovat všechny oxidy a kyslík odstranit z oceli ve formě oxidu uhelnatého. Vakuovou metalurgií lze dále získat ocel o vysoké oxidické čistotě s nízkým obsahem síry, vodíku a dusíku. Pochody za sníženého tlaku probíhají v lázni LP umístěné ve vakuovaném prostoru (kesonu).

Postupy SM provozované při sníženém tlaku bývají někdy také dále členěny podle možností ohřevu upravovaného kovu. Technologie, které to umožňují, jsou například VOD, kombinované způsoby VAD, ASEA–SKF anebo ryze ocelářský způsob RH.

Všechny postupy sekundární metalurgie pracující za sníženého tlaku využívají jevu, kdy snižováním celkového tlaku dochází k růstu afinity uhlíku ke kyslíku. Vzhledem k vysoké afinitě uhlíku ke kyslíku se za dostatečně vysokých teplot stává velice silným dezoxidačním prvkem, což umožňuje dosahovat velice nízkých aktivit kyslíku na konci vakuování, také redukovat za běžných tlaků jinak velice stabilní oxidy a zvyšovat tím oxidickou čistotu taveniny.

Technologie VD

Klasická technologie SM pracující za sníženého tlaku je proces VD (Vakuum Degassing). LP se zaváže do vakuovaného prostoru – kesonu. Keson se uzavírá hermeticky utěsněným víkem. Následně se celý prostor pomocí paroproudých vývěv vakuuje. Ocel se během vakuování udržuje při tlaku až 2 – 4 kPa a v hlubokém vakuu až 30 - 50 Pa, po dobu podle vyráběné jakosti oceli, například 15 - 20 min.

Předchozí uvedené metody SM, pracují se silně dezoxidovaným kovem, například IP, AP nebo LF jsou doprovázeny růstem obsahu dusíku a zejména vodíku.

V praxi se proto často kombinují pochody LF, IP, AP s technologií VD. V důsledku zvýšené dezoxidační schopnosti uhlíku se při vyšších teplotách mohou také vyredukovat i stabilnější oxidy rozptýlené v tavenině ve formě vměstků, čímž se zvyšuje celková oxidická čistota oceli. Na zvýšení účinnosti odplynění a oduhličení a homogenizace oceli se během celé úpravy kovu provádí dmýchání argonem dnem LP. Po dezoxidaci je možné také ocel v kesonu dolegovat.

Proces VD je využíván také při výrobě vysokolegovaných korozivzdorných ocelí, kde je možno dosáhnout nízkého obsahu uhlíku kolem 0,03 % při vysokém využití chromu ze vsázky. V průběhu vakuování je možné také provést hluboké odsíření až pod 10 ppm, což je usnadněno vysokým stupněm dezoxidace oceli. Během dmýchání argonu dochází jednak k tepelné a chemické homogenizaci a jednak se zlepšují podmínky pro přechod nekovových vměstků do strusky.

Technologií VD je možné získat silně dezoxidovaný kov s nízkým obsahem plynů, nízkým obsahem síry a vysokým stupněm mikročistoty.

Nevýhodou je, že pro absenci vedlejšího zdroje tepla je nutné před vlastním vakuováním provést přehřátí kovu v závislosti na velikosti používané pánve a vyráběné jakosti oceli v některých případech, u menších pánví, až o více než 150 °C.

Technologie VOD

Technologie využívající při vakuování ohřev v lici pánvi je proces VOD (Vakuum Oxygen Decarburisation). Podstata spočívá v oduhličování tekuté oceli kyslíkem v pánvi, umístěné ve vakuovaném kesonu. Technologie je obdobná procesu VD, doplněnou o trysku na dmýchání kyslíku na hladinu kovu. Pochod VOD je výhodný zejména pro výrobu vysokolegovaných chromových a chromniklových ocelí s nízkým obsahem uhlíku.

Je to duplexní pochod, který se používá hlavně v kombinaci s EOP. Vzhledem k exotermickým reakcím probíhajícím během úpravy kovu v kesonu jsou odpichové teploty u vysokolegovaných korozivzdorných ocelí pouze okolo 1570 °C.

Během oxidace se udržuje v kesonu tlak 2 až 4 kPa. Při dmýchání kyslíku se nejprve oxiduje křemík při současném zvyšování teploty lázně. Jakmile se jeho obsah poklesne na cca 0,2 %, tak začíná se oxidovat i uhlík. Při kritickém obsahu uhlíku (0,04 - 0,1 %), který je závislý na teplotě, intenzitě dmýchání kyslíku, intenzitě promíchávání taveniny a tlaku v kesonu, kdy se výrazně snižuje oduhličovací rychlost a přestává se dmýchat kyslík. Dalším snížením tlaku až pod 100 Pa, při současném dmýchání argonu, dochází vlivem vysoké aktivity kyslíku v lázni i ve strusce k další reakci kyslíku s uhlíkem. Tato závěrečná operace probíhá zpravidla 5 – 15 minut. Tím je jednak dosaženo dalšího oduhličení až pod 0,01 % C a dále také dochází k dezoxidaci oceli. Po oxidaci kyslíkem se zvyšuje teplota lázně až do úrovně 1750 °C. Uhlík v oceli během oxidace redukuje oxidy chromu, čímž se jednak zvyšuje čistota oceli, ale také i využití chromu z vsázky. Během oxidace je možné také snížit obsah vodíku a dusíku až o 70 %.

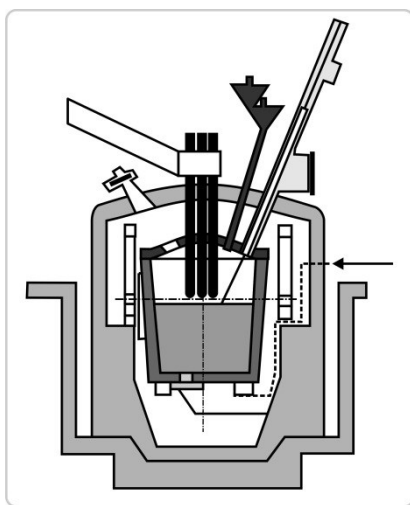
V následujícím redukčním údobí, se provádí dezoxidace oceli. Taveninu je možné také odsířit a dolegovat.

Oproti oxidaci v EOP probíhá oxidace na zařízení VOD při nižší teplotě, propal chromu je nižší a také i výsledné obsahy uhlíku jsou podstatně nižší. Ocel má současně vyšší oxidickou čistotu a lepší korozní odolnost.

Tento pochod označovaný jako „Vakuvit“ byl instalován v určité době například ve Vítkovických železárnách.

Kombinované technologie sekundární metalurgie provozované při sníženém tlaku

Umístění jednotlivých pochodů do jednoho kombinovaného zařízení je sice investičně značně



Obr. 6.4 Schéma zařízení VAD

náročné, ale z pohledu nákladovosti výhodnější, než stavebnicový systém, který realizuje postupně jednotlivé prvky SM na jednotlivých agregátech. Jako příklad uvedeného uspořádání může sloužit pochod VAD nebo ASEA-SKF. Kombinované zařízení umožňují provést všechny metalurgické operace vyjma tavení na jednom zařízení. Zařízení tohoto typu je vhodné pouze pro zpracování značných objemů tekutého kovu, především pro ocelárny.

Technologie VAD

Kombinovaný pochod VAD (Vakuum Arc Degassing) umožňuje současně s vakuováním oceli provádět také ohřev tekutého kovu elektrickým obloukem. Schéma zařízení je znázorněno na obr. 6.4. Metalurgické možnosti jsou obdobné pochodu VOD. Zařízení VAD tedy umožňuje výrobu oceli o vysoké sulfidické a oxidické čistotě, kdy lze současně velice přesně nastavit jak chemické složení, tak i výslednou aktivitu kyslíku. Použití vakua umožňuje obdobně jako u VOD výrazně snížit obsah jak vodíku, tak i dusíku. Výhodou tohoto procesu je, že teplo na krytí tepelných ztrát nevzniká jen

v průběhu exotermických reakcí, ale také použitím elektrického ohřevu. Ekonomické přínosy oproti pochodům bez použití elektrického ohřevu jsou potom ve všech oblastech výrobních nákladů, na které negativně působí potřebné přehřátí taveniny. Zařízení může být také doplněno o trysku na injektáž prachových přísad, podavač plněných profilů a kyslíkovou trysku aj.

Technologie ASEA-SKF

Kombinovaným prvkem SM podobné konstrukce jako je VAD je pochod ASEA-SKF. Tento systém je kromě vakuového systému a ohřevu elektrickým obloukem navíc vybaven indukčním mícháním lázně v lici pánvi. Metalurgické možnosti tohoto pochodu jsou obdobné jako u pochodu VAD.

6.1.3. Speciální pochody SM pro velké objemy zpracovávaného kovu s využitím vakua

V ocelárnách a velkých slévárnách oceli jsou používány některé další zařízení vakuového zpracování. Využití těchto zařízení SM je ekonomické pouze při zpracování velkých objemů oceli. Jejich použití je ekonomicky odůvodněno při úpravách tekutého kovu v řádu statisíců a milionů tun ročně. Jsou to například zařízení typu RH - vakuové odplynění oceli oběžným způsobem, DH - vakuové odplynění oceli zdvižným způsobem, vakuové odplynění oceli v proudu aj. V současnosti je v ČR využíváno pouze modernizované zařízení SM typu RH (TŽ a.s.)

6.1.4. Speciální metalurgické pochody a zařízení

Speciální metalurgické pochody a zařízení můžeme nazvat speciální aplikace některých metalurgických pochodů nebo tavicích agregátů, kterými nejsou slévárny oceli běžně vybaveny. Některá ze zařízení jsou v ČR v současnosti používána jako například *elektrostruskové přetavování* nebo *vakuové indukční pece*, které jsou v současnosti budovány anebo jsou středem zájmu některých výzkumných organizací.

Dále jsou především ve výzkumných organizacích používány další typy speciálních tavicích agregátů jako například *elektronová pec*, *plazmová pec* aj.



Shrnutí pojmů kapitoly

- sekundární metalurgie (SM)
- rozdělení metod sekundární metalurgie
- metalurgické možnosti sekundární metalurgie
- sekundární metalurgie provozované při atmosférickém tlaku
- sekundární metalurgie provozované při sníženém tlaku
- kombinované technologie sekundární metalurgie
- speciální metalurgické pochody a zařízení SM



Příklady otázek k probranému učivu

1. Jaké jsou hlavní výhody zavedení sekundární metalurgie
2. Jaký význam má zařízení SM ve vztahu k plynulému odlévání oceli?
3. Uveďte příklady rozdělení prvků podle afinity ke kyslíku.

4. Popište princip přechodu H_2 a N_2 do oceli.
5. Které metody sekundární metalurgie jsou nejrozšířenější?
6. Jaké jsou metalurgické možnosti nejrozšířenějších metod sekundární metalurgie?
7. Které metody sekundární metalurgie při atmosferickém tlaku jsou nejrozšířenější a jaká je jejich funkce?
8. Které metody sekundární metalurgie při sníženém tlaku jsou nejrozšířenější a jaká je jejich funkce?
9. Které kombinované metody sekundární metalurgie při sníženém tlaku jsou nejrozšířenější a jaká je jejich funkce?
10. Které metody SM probíhají bez přehřevu kovu?
11. Které metody SM probíhají s přehřevem kovu?
12. Jaké možnosti jsou při dmýchání Ar porézní tvárnici ve dně LP na snížení obsahu vodíku a dusíku?
13. Vyjmenujte speciální metalurgické pochody a zařízení, která jsou provozována v ČR.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ŠENBERGER, J., STRÁNSKÝ, K., BŮŽEK, Z., ZÁDĚRA, A., KAFKA, V.,
Metalurgie, VUTIUM, VUT Brno 2008, ISBN 978-80-214-3632-9, 310 s.

LEVÍČEK, P., STRÁNSKÝ, K., *Metalurgické vady ocelových odlitků*, SNTL, Praha
1984, 269 s.

FRUEHAN, R. et al., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, Pittsburgh 1998,
p. 767, ISBN 0-930767-02-0, p. 767

7. Základní charakteristika odlévání oceli, procesy probíhající při tuhnutí oceli. Segregace, vady ingotů. Plynule odlévání oceli, jeho technologické a ekonomické výhody, hlavní součásti zařízení



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Popsat průběh a hlavní fáze krystalizace oceli
- Popsat způsoby odlévání oceli
- Detailně popsát způsoby, výhody a nevýhody lití oceli do kokil a zařízení pro tuto technologii
- Detailně popsát způsoby, výhody a nevýhody plynulého lití oceli a zařízení pro tuto technologii
- Definovat jednotlivé vady ocelových litých výrobků



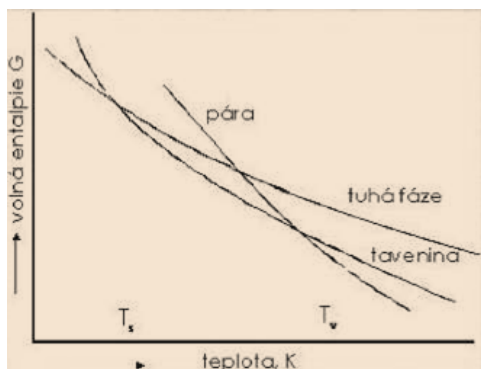
Výklad

Odlévání oceli představuje důležitou součást výrobního procesu. Převážná část vyrobené oceli je v současné době odlévána na zařízeních plynulého lití a menší část je odlévána do kokil na ingoty. Poměrně malá část oceli je odlévána ve slévárnách především do pískových forem na ocelové odlitky.

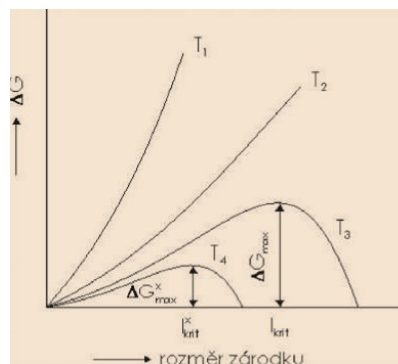
Krystalizace oceli

- Proces nukleace
- Homogenní nukleace
- Heterogenní nukleace
- Dendritický růst krystalů

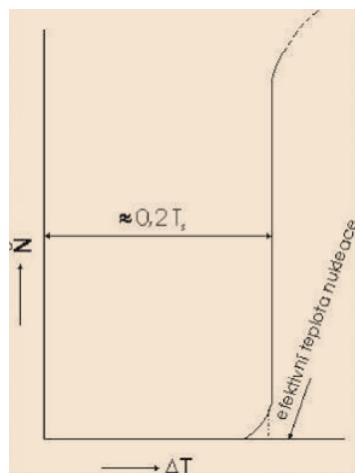
Z uvedeného vyplývá, mají-li být krystalizační zárodky nové fáze stabilní a mají-li mít možnost dalšího růstu, musí vykazovat větší rozměr, než je rozměr kritický lkrit. Všechny krystalizační zárodky s menším rozměrem než kritickým se v tavenině znovu rozpouštějí. Zárodek kritické velikosti je v rovnováze s taveninou.



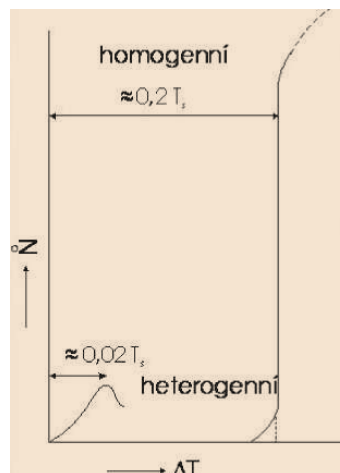
Obr. 7.1 Závislost volné entalpie na teplotě při změně skupenství (tep. tavení, tep. varu)



Obr. 7.2 Změna volné entalpie při tvorbě krystalizačních zárodků



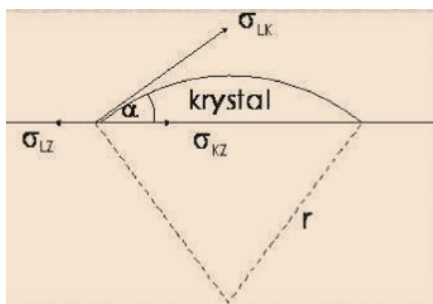
Obr. 7.3 Počátek růstu homogenního zárodku v závislosti na přechlazení (rychlost růstu zárodků na přechlazení)



Obr. 7.4 Závislost růstu homogenního a heterogenního zárodku na přechlazení

Pro podmínky *homogenní nukleace* je z obr. 3 zřejmé, že v tomto případě je třeba dosáhnout přechlazení $0,2 T_s$, což v praktických podmínkách znamená 250 až 300 °C. Takový stupeň přechlazení je v praktických podmínkách nedosažitelný.

Heterogenní nukleace - zárodky krystalů se tvoří na tuhých částicích, které byly přítomny v tavenině před dosažením jejího kritického přechlazení. Při krystalizaci ocelových ingotů jde vždy o heterogenní nukleaci. Příčinou je přítomnost velkého počtu cizích částic (vzniklé krystaly, endogenní a exogenní vměstky). Heterogenní nukleace je snazší a nastává při mnohem menší hodnotě přechlazení, rovnající se přibližně $0,02 T_s$, tedy asi desetkrát menší než u nukleace homogenní. Vzniku zárodků napomáhají kromě toho nerovnosti na povrchu kokily, které se z hlediska nukleace chovají podobně jako cizí částice v tavenině.

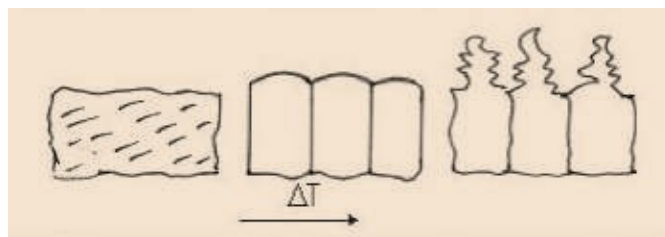


Obr. 7.5 Schéma růstu heterogenního zárodku

- σ_{LK} - povrchové napětí mezi taveninou a krystalem
- σ_{LZ} - povrchové napětí mezi taveninou a heterogenním zárodkem
- σ_{KZ} - povrchové napětí mezi krystalem a heterogenním zárodkem

Dendritický růst krystalů

Ocel krystalizuje dendriticky. Dendritická struktura vyniká v případě, jestliže tavenina v blízkosti fázového rozhraní má záporný teplotní gradient. Rychlost růstu dendritů závisí na stupni přechlazení. Ve směru podélném rostou dendrity až stokrát rychleji než ve směru příčném. Růst dendritů se přerušuje při spojení s jiným dendritem.



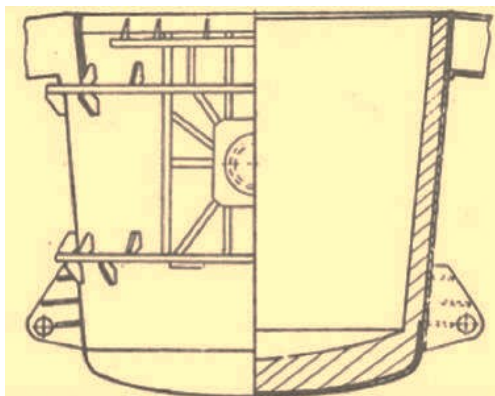
Obr. 7.6 Schématické znázornění rozhraní mezi krystaly a taveninou

Po malých stupních přechlazení vzniká rovinná struktura, následně pak buněčná struktura. Dendrity vznikají až při vysokých stupních přechlazení.

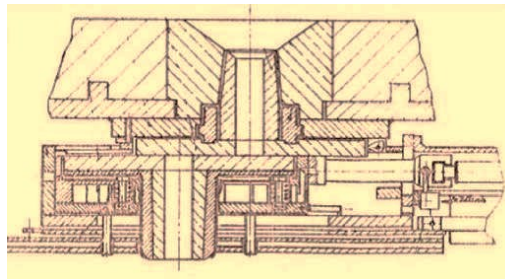
Licí pánev

Je nádoba kruhového či eliptického průřezu, zhotovená z ocelového plechu o tloušťce 25 až 40 mm (podle hmotnosti tavby), vyzděná žáruvzdorným materiálem. Vyzdívky pánví se v současné době provádějí buď z bazických nebo vysocehlinitých žárumateriálů. Objem pánve odpovídá objemu oceli, vyráběné v základním výrobním agregátu zvětšenému o reakční prostor, který je nejvýše potřebný pro zařízení sekundární metalurgie. Schéma licí pánve je znázorněno na obr. 7.6.

Licí pánev je také opatřena vyzděným víkem, zabráňujícím rozstříku oceli a především tepelným ztrátám.



Obr. 7.6 Schéma licí pánve



Obr. 7.7 Řez sestavy šoupátkového uzávěru

Licí pánve (LP) mají ve spodní části dna upevněný šoupátkový mechanismus na výtakovém otvoru licí pánve, pomocí kterého je regulovaná licí anebo výtaková rychlost oceli.

Mechanismus je tvořen horní výlevkou, horní deskou, spodní deskou a spodní výlevkou. Řez je znázorněn na obr. 7.7.

7.1. Způsoby odlévání oceli

- Odlévání do kokil
- Plynulé odlévání oceli

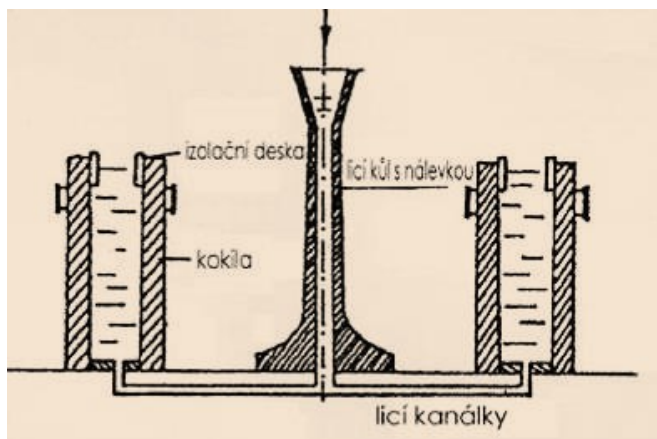
7.1.1. Odlévání do kokil

Tekutá ocel vyrobená v ocelářských agregátech je po odpichu, dezoxidaci a dalším mimopecním zpracování odlévána (odlitky, ingoty nebo plynule lité odlitky) a dále zpracovávána ve válcovnách anebo kovárnách.

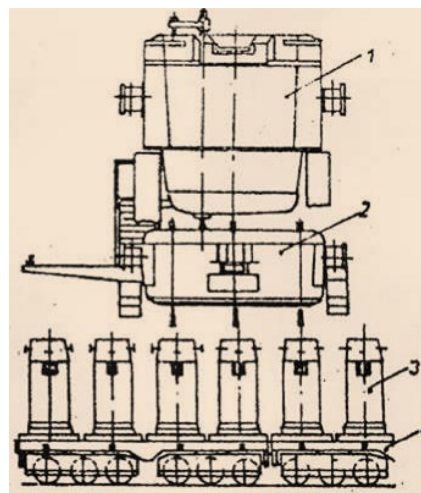
Po nalití oceli do kokily případně do krystalizátoru, dochází k bezprostřednímu styku tekutého kovu s chladnou stěnou kokily anebo krystalizátoru, což má za následek pokles teploty oceli a počátek její krystalizace.

Tradičním postupem odlévání oceli do litinových forem - kokil se odlévá v současné době v ČR cca 9 % celkové vyrobené oceli, 90 % pak na zařízení plynulého odlévání. Podíl oceli na ocelové odlitky je v ČR kolem 1,5 %, do zbývajících objemu se odlévají kovářenské ingoty.

Pro odlévání do kokil slouží dvě základní metody. Odlévání spodem je pro velké kovářenské ingoty z pohledu kvality povrchů a vnitřní čistoty oceli nezastupitelné (obr. 7.8). Odlévání horem, které je znázorněno na obr. 7.9 (navíc přes mezipánev).



Obr. 7.8 Schéma odlévání oceli spodem



Obr. 7.9 Schéma odlévání oceli horem

7.1.2. Plynulé lití oceli

Cíl plynulého lití oceli

- zvýšení výtěžku oceli
- zvýšení jakosti odlitků (kontislitků)
- zvýšení výrobnosti ocelárny
- snížení nákladů na výrobu oceli aj.

Nutné předpoklady pro provoz plynulého lití oceli (ZPO)

Příprava oceli na odlévání pomocí sekundární metalurgie

- přesné chemické složení,
- nízký interval odlévacích teplot $\pm 3^\circ\text{C}$,
- snížení obsahu síry a fosforu (pro ZPO, P+S max. 0,015 %).

Zajištění návaznosti technologických kroků

Přednosti plynulého odlévání

Racionalizace potřeby živé práce

- umožněná vypuštěním výrobních mezioperací a podstatně lepšími podmínkami pro automatizaci technologie

Vyšší úroveň kultury práce

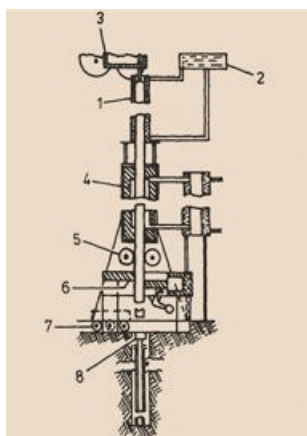
- výrazné snížení podílu fyzicky namáhavé práce u zaměstnanců odlévárny s perspektivou možnosti využití lidské práce jen k řízení, regulaci a kontrolní činnosti

Zvýšení úrovně bezpečnosti práce na odlévárně

Zlepšení podmínek pro systematické zvyšování kvality finálního produktu snížením, resp. vyloučením subjektivních vlivů na jakost výroby

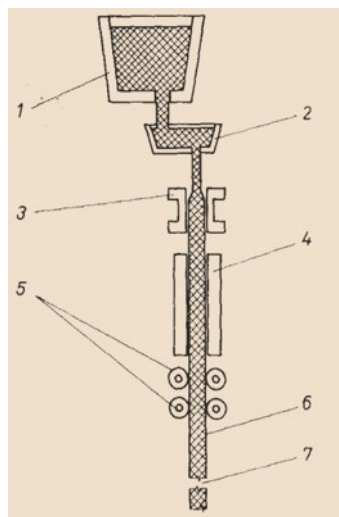
Historie vývoje konstrukce ZPO

- A) Německý patent z r. 1884
- B) Padesátá léta 20. století



A) Německý patent z r. 1884

1-krystalizátor,
2-primární ochlazování,
3-pohyblivá lici nádoba,
4-sekundární ochlazování,
5-výtažné válečky,
6-řezací zařízení,
7-odebírací zařízení,
8-hydraulicky poháněná
výtažná tyč.



B) Padesátá léta 20. století

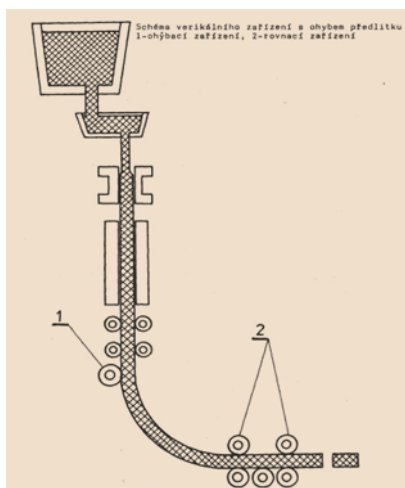
1-pánev;
2- mezipánev;
3-krystalizátor;
4-sekundární chlazení s
vodící klecí;
5-tažná stolice;
6-předlitek;
7-dělicí zařízení.

Obr. 7.10 Vertikální stroj pro plynulé liti s průběžným krystalizátorem a dvěma chladicími systémy podle

Obr. 7.11 Schéma klasického vertikálního zařízení

C) Vertikální zařízení s ohybem předlitku

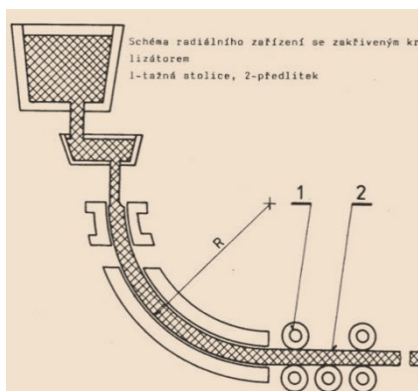
D) Schéma radiálního zařízení se zakřiveným krystalizátorem



C) Vertikální
zařízení
s ohybem
předlitku

1-ohýbací
zařízení

2-rovnací
zařízení



D) Schéma
radiálního
zařízení
se zakřiveným
krystalizátorem

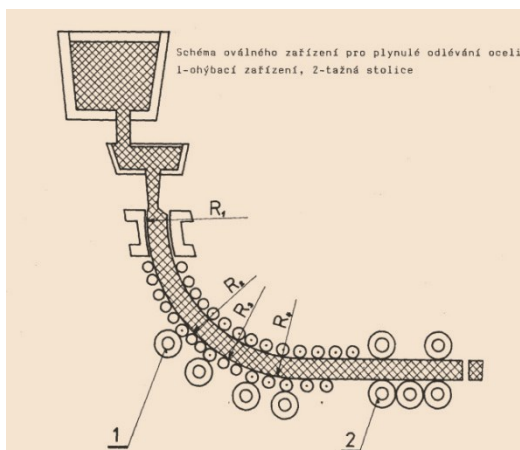
1-tažná stolice

2-předlitek

Obr. 7.12 Vertikální zařízení s ohybem předlitku

Obr. 7.13 Radiální zařízení se zakřiveným krystalizátorem

E) Oválné zařízení



E) Oválné zařízení

1-ohýbací
zařízení

2-tažná stolice

Obr. 7.14 Oválné zařízení plynulého odlévání oceli

Definování základních pojmů

Rychlost lití

Rychlost, kterou opouští předlitek krystalizátoru a je závislá

- průřezu předlitku a jeho rozměrech
- jakosti oceli
- přehřátí oceli
- rychlosti přenosu tepla z předlitku do chladicí vody
- pevnost kůry v oblasti metalurgické délky
- podepření kůry po výstupu z krystalizátoru

Metalurgická délka

Hloubka kapalně fáze, která je pro úplné ztuhnutí průřezu předlitku na daném lícím stroji k dispozici, případně, na niž bude projektovaný lící stroj dimenzován.

Výtěžek

Ukazatel charakterizující využitelnost tekuté oceli při její přeměně na ZPO v předlitek. Získáme jej vydělením hmotnosti vsázky schopných či použitelných předlitků hmotností tekuté oceli přivezené v lící pánvi.

Lící formát podle průřezu předlitků

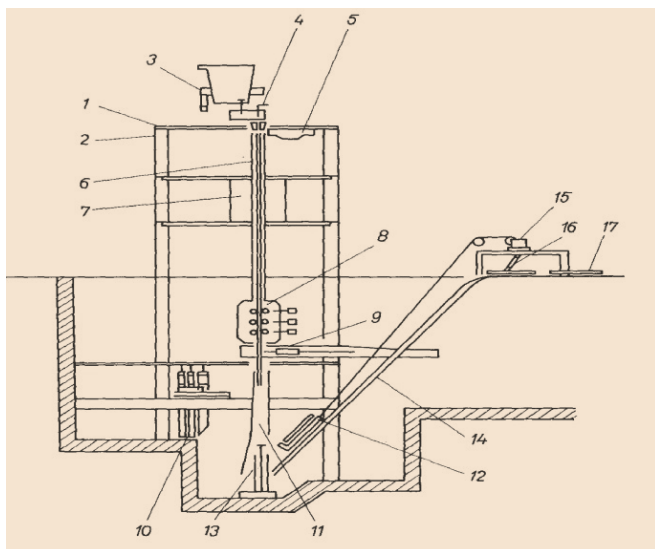
- bramový, šířka slitku je několikanásobně větší než tloušťka
- blokový, nejčastěji čtvercový průřez případně do poměru šířka/tloušťka 1,5 a také kruhové průřezy
- sochorový, čtvercové průřezy v rozmezí od 100 do 180 mm

Další pojmy

- lící výkon, kolik kg oceli je odlito za minutu na jednom lícím proudu)
- doba lití (doba nezbytná pro odlití jedné tavby dané hmotnosti)
- časové využití aj.

7.1.3. Členění ZPO a jejich charakteristiky

Vertikální zařízení plynulého odlévání



- 1 — pracovní plošina ZPO; 2 — nosná ocelová konstrukce;
 3 — stacionární lící stojan s váhacím zařízením;
 4 — mezipánvový vůz s mezipánví pro čtyři lící proudy;
 5 — pohon oscilačního zařízení krystalizátoru;
 6 — vedení předlitku s vodicími válečky a kluznicemi;
 7 — chladicí komora s tryskovými chladicími sekcemi;
 8 — tažná stolice s hydraulickým přitlakem válců;
 9 — hydraulické nůžky 16 MN s kyvným závěsem a hydraulickým vyvažováním;
 10 — zaváděcí vůz s boxy pro třídičnou startovací tyč;
 11 — zařízení pro spouštění a sklápění dělených předlitků;
 12 — vůz šikmého výtahu s válečkovou dráhou;
 13 — hydraulický zvedák pro podávání dílů startovací tyče a předlitku; 14 — skipová dráha šikmého výtahu;
 15 — poháněcí stanice šikmých výtahů čtyř lících proudů;
 16 — hnací přitlačný válec k odvádění předlitku na válečkový dopravník;
 17 — válečkový dopravník lícího proudu

Obr. 7.15 Svislý řez vertikálním zařízením plynulého odlévání

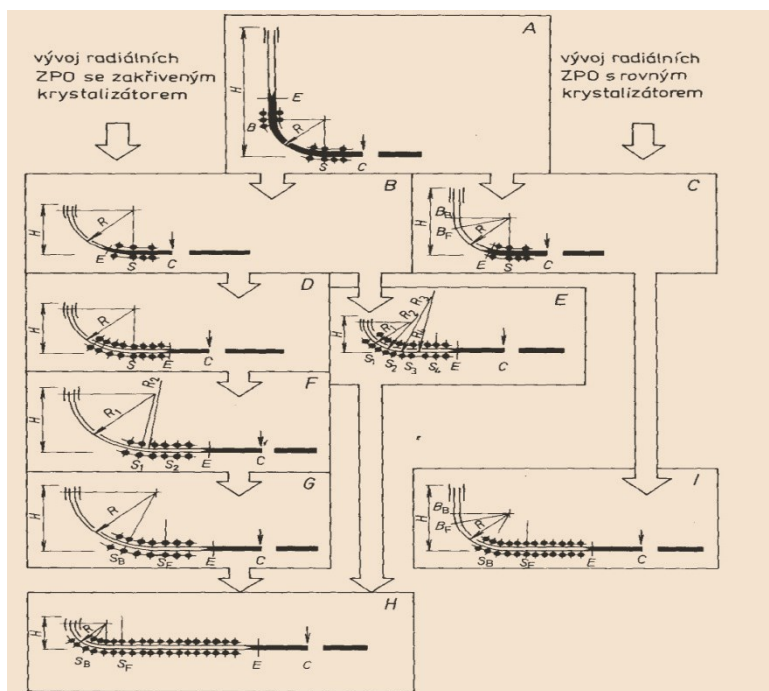
Výhody

- Relativně menší nároky na čistotu tekuté oceli.
- Snadnější dosažení mikročistoty materiálu předlitku v důsledku snadnějšího vyplouvání vměstků svislým tekutým jádrem předlitku.
- Menší počet faktorů, které na ZPO ovlivňují výslednou jakost předlitku.
- Předlitek nevyžaduje rovnání u standardních typů ZPO.
- Menší plošné nároky pro instalaci ZPO v provozní budově ocelárny v důsledku menší zastavěné půdorysné plochy.
- Snadnější kontrola a seřizování souososti zařízení lícího stroje na technologické ose.
- Snadnější výroba a renovace Cu-desek krystalizátorů rovného typu pro bramy a bloky bez velké závislosti na specializovaných výrobcích.
- Snadnější výroba Cu-trubkových vložek krystalizátorů rovného typu.
- Nižší měrné náklady na měď pro používání deskových krystalizátorů rovného typu pro bramy a bloky.

Nevýhody

Omezení lící rychlosti dané omezenými možnostmi stavební výšky (tím i omezenou metalurgickou délkou).

- Malé možnosti zvyšování lících výkonů.
- Velké nároky na stavební výšku.
- Vyšší stavební investiční náklady na provozní budovu a základy pro technologická zařízení.
- Omezené možnosti výstavby v provozních budovách stávajících oceláren.
- Větší rozměry a hmotnost válečkových vedení předlitku v důsledku vyššího ferostatického tlaku.
- Složité strojní zařízení pro odběr a dopravu dělených předlitku (u klasického typu).
- Složité a ne vždy spolehlivé strojní zařízení pro zavádění, spojování a rozpojování startovacích tyčí.
- Vyšší poruchovost a nižší provozní jistota strojního zařízení v důsledku většího počtu diskontinuálních operací.
- Obtížnější a zdlouhavější údržba a opravy zařízení umístěného nad sebou, prováděná ve ztížených pracovních podmínkách.

Radiální zařízení plynulého odlévání

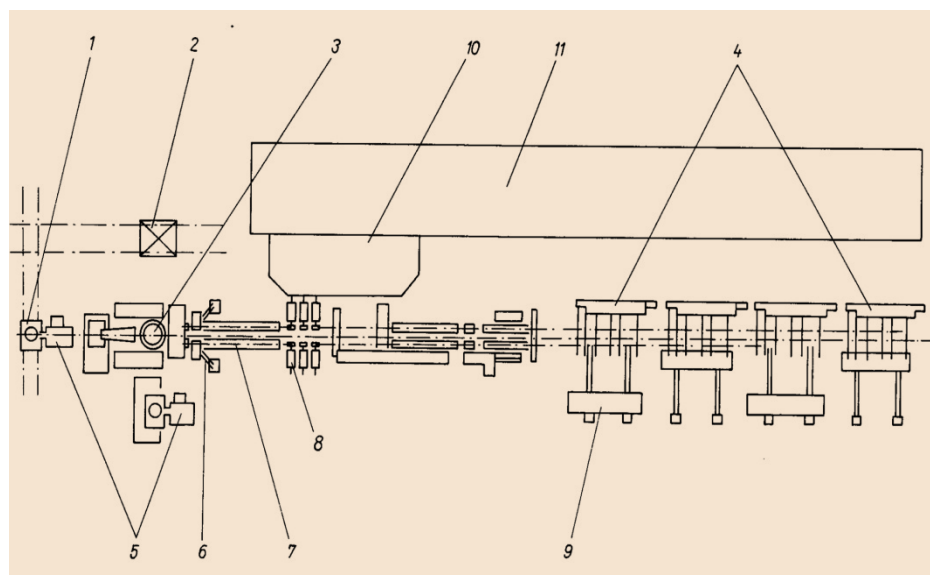
Obr. 7.16 Schéma vývoje radiálního ZPO

Výhody

- Možnost dosahovat vysokých licích výkonů využíváním velkých metalurgických délek, tj. odléváním při velké délce tekutého jádra při vyšších rychlostech lití.
- Menší nároky na stavební výšku a nižší stavební investiční náklady na provozní budovu a základy technologického zařízení ve srovnání s vertikálním ZPO.
- Možnost výstavby i v nižších provozních budovách stávajících oceláren.
- Jednodušší strojní zařízení pro dělení a dopravu předlitků.
- Nižší poruchovost a vyšší provozní jistota strojního zařízení v důsledku dělení a dopravy předlitků prováděných převážně v horizontální rovině s omezením počtu diskontinuálních operací.
- Snadnější obsluha a údržba zařízení v důsledku převažujícího plošného uspořádání.

Nevýhody

- Pro zajištění předlitků s vysokou vnitřní čistotou se vyžaduje adekvátní mimopecní úprava oceli před odléváním, to platí zejména pro radiální ZPO se zakřiveným krystalizátorem.
- Vyšší plošné nároky pro instalování ZPO v provozní budově ocelárny v důsledku větší zastavěné plochy ve srovnání s vertikálním ZPO.
- Obtížnější kontrola a seřizování soustřednosti zařízení licího stroje na licím oblouku.
- Výroba Cu desek a Cu trubkových vložek krystalizátorů u ZPO se zakřiveným krystalizátorem, vyžaduje dražší výrobní zařízení, větší závislost na specializovaných výrobcích.
- Vyšší měrné náklady na měď při používání deskových krystalizátorů zakřiveného typu, při výrobě bram a bloků na ZPO.

Horizontální zařízení plynulého odlévání

- 1 - převáděcí vůz mezipánve;
 2 - jeřáb pro převoz mezipánve;
 3 - lící pánev;
 4 - příčné dopravníky;
 5 - ohřev mezipánve;
 6 - indukční míchače;
 7 - spojovací valník;
 8 - tažné stolice;
 9 - vychlazovací kontejner;
 10 - řídicí kabina;
 11 - elektroobjekt;

Obr. 7.17 Příčný řez HZPO ŽBC

Výhody:

- Zařízení plynulého odlévání má malou stavební výška - nižší investiční náklady.
- Přímé spojení mezipánve s krystalizátorem a malý ferostatický tlak, není nutné rovnání odlévaných sochorů.
- Dobrý přístup k zařízení (údržba).

Nevýhody:

- Relativně vysoké provozní náklady (speciální keramika).
- Nízká životnost krystalizátorů.
- Technicky náročný reverzní oscilační pohyb odlévaných sochorů včetně pálicího stroje.
- Nemožnost odlévám lících formátů větších průměrů.

7.1.4. Jednotlivé součásti zařízení ZPO**Otočný lící stojan**

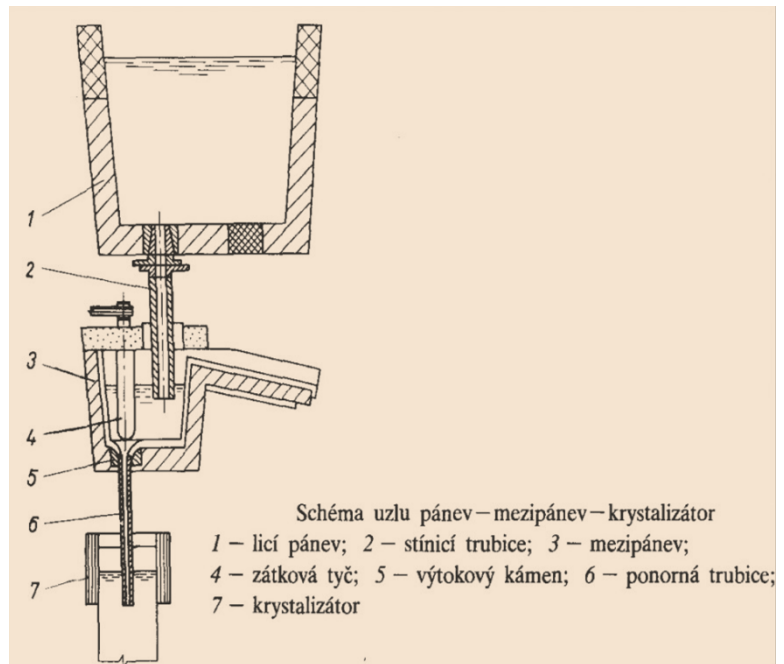
Je využíván k manipulacím s lícími pánvemi nad lící plošinou ZPO za účelem trvalého doplňování oceli do mezipánve z periodicky přivážených lících pánví.

Je tvořen dvěma rameny různého konstrukčního uspořádání. Pohon je zajišťován většinou vysokotlakovým hydraulickým agregátem.

Mezipánve

V technologickém toku je zařazena mezipánve mezi lící pánev a krystalizátor. Plní základní funkce, které jsou uvedeny včetně znázornění celého technologického uzlu na obr. 7.18.

- umožňuje regulaci hmotnostního toku tekuté oceli do krystalizátoru
- snižuje ferostatický tlak tekutého kovu
- zrovnoměrní rychlost lícího proudu
- minimalizuje rozstřík oceli
- zrovnoměrní teplotu odlévané oceli
- odstraňuje turbulenci lícího proudu
- odděluje ocel od strusky



Obr. 7.18 Schéma uzlu lící pánve, mezipánve a krystalizátor

Další důležité funkce mezipánve ZPO jsou v rozdělení oceli na jednotlivé lící proudy, v regulaci hmotnostního toku oceli do krystalizátorů tj. řízení rychlosti odlévání, v homogenizaci odlévané oceli, v zajištění zásoby oceli při výměně pánve, v separaci části nekovových vměstků aj.

Způsoby lití oceli na ZPO

Otevřené lití

- kalibrované výlevky

Uzavřené lití (soustava ponorných výlevky a zátkových tyčí)

- náporové výlevky
- beznáporové výlevky

Krystalizátor

Představuje primární oblast chlazení. Je intenzivně chlazen vodou, což umožňuje odvod 10 až 30 % veškerého tepla vznikajícího předlitku.

Rozeznáváme formáty kruhové, čtvercové, pravoúhlé, předprofily a polygonální.

Typy krystalizátorů

Blokový

- dobrý chladicí účinek, nízké náklady; do průřezu předlitku 160 mm

Deskový

- také běžně nastavitelný, možnosti opracování stěn; průřezy předlitku nad 130 mm

Trubkový

- tenkostěnné, jen dvakrát opracovatelné

Oscilace krystalizátoru

V průběhu lití krystalizátor osciluje, aby se zabránilo přilepování utuhlé lící kůry vznikajícího předlitku k jeho stěnám. Podporuje mazací účinek a odtržení předlitku od stěn krystalizátoru.

Oscilace se pohybuje v různých rozsazích 100 až 500 kmitů za minutu, ale také až 600 nebo 700. Obecně platí, že čím vyšší frekvence oscilace, tím lepší povrchová kvalita předlitku.

Mazání krystalizátorů brání reoxidaci, adsorpci nekovových vměstků, zlepšuje odtrhávání a tím kvalitu povrchu předlitku. Rozeznáváme typy

- licí prášky (uzavřené lití)
- oleje řepkového typu (otevřené lití)

Chlazení krystalizátoru

- primární chlazení zajišťuje funkci krystalizátoru
- sekundární chlazení zajišťuje pomocí kalibrovaných trysek vodní, nebo vodovzdušná směs
- chladicí rošt, chladník, chladícím médiem je zde vzduch, zařízení je umístěno za dělicím systémem předlitku

Dělicí zařízení předlitků

- hydraulické nůžky se používají na předlitky menších rozměrů
- kyslíkopalivové hořáky

Dělicí zařízení se při dělení pohybuje spolu s děleným předlitkem. Po oddělení předlitků se provádí automatické označení každého kusu materiálu.

7.2. Vady předlitků

7.2.1. Tvarové vady předlitků

Zkosení průřezu

Průřez předlitku by neměl mít tvar lichoběžníku, či kosočtverce, pokud se nejedná o specificky tvarovaný krystalizátor

Ke zkosení průřezu může dojít například v důsledku nerovnoměrnosti chlazení tuhnoucího předlitku.

Vyborcení a vborcení

Vyborcení a vborcení stěn předlitku může být způsobeno

- nadměrně opotřebovaným krystalizátorem
- nesouosými válečky v sekundární zóně chlazení
- nalepeninami na válečku

7.2.2. Povrchové vady předlitků

Vady povrchu vznikají z důvodu:

- rozstříku oceli
- nepravidelného stoupání oceli v krystalizátoru
- nevhodného licího prášku
- nízké teploty oceli

Výronek

Výronek vzniká v průběhu tažení nebo odlévání. Místně se protrhne licí kůra, ocel vyteče až na krystalizátor anebo také v nižších chladících segmentech. V hutnické praxi se nazývá také průval.

Příčiny jsou většinou

- nedokonalým mazáním krystalizátoru
- vysokou licí teplotou

Strusková místa

Strusková místa se většinou vyskytují se na povrchu předlitku v jeho rozích. Vznikají například v důsledku používání nevhodného licího prášku.

Oscilační vrásky

Oscilační vrásky jsou jemné rýhy na povrchu předlitku (vlnky). Čím je větší frekvence, tím se nacházejí blíže u sebe.

Jsou ovlivnitelné

- licím práškem
- teplotou oceli

Rýhy na povrchu

Příčinou vzniku rýh na povrchu je mechanické poškození předlitku. Například poškozené ložisko tažného anebo vodícího válečku předlitku zařízení.

Vyskytují se

- na plochách i hranách
- příčné i podélné

Necelistvosti

Vzniknou, když bráníme dilataci, při nadměrném obsahu škodlivých prvků (P, Cu, S, As, Sb), při nerovnoměrném chlazení (ohyb, krůt). Vyskytují se v rozích i ve středu předlitku.

Rozeznáváme

- trhliny
- příčné i podélné
- na hranách i na plochách

7.2.3. Vnitřní vady předlitků

Bubliny

Bubliny rozeznáváme v ocelářství jako povrchové nebo jemně pod povrchové. Podle příčiny vzniku rozeznáváme

- vodíkové, při zvýšeném výskytu vodíku oceli
- CO, v polouklidněných ocelích

7.3. Historie a současnost výrobců oceli na zařízení plynulého odlévání v České republice

První ZPO bylo postaveno v Poldi Kladno,
v r. 1980 vertikální: výrobce Vítkovice n. p., 4 lící proudy
Provoz byl ukončen v r. 1993 těsně po generální opravě zařízení.

Třinecké železářny a.s.
v r. 1990 ZP01: blokové radiální výrobce CLESIM, 5 lících proudů
v r. 1994 ZP02: sochorové radiální výrobce CONCAST, 2x 4 lící proudy

Nová Huť a.s.
v r. 1993 ZP01: sochorové radiální výrobce Mannesman-Demag, 6 lících proudů
v r. 1997 ZP02: bramové radiální výrobce Vest Alpine, jednoproudé
v r. 1999 ZP03: sochorové radiální výrobce CONCAST, 6 lících proudů

Vítkovice Steel a.s.
v r. 1995 ZPO: bramové radiální, výrobce Mannesman-Demag, Vest Alpine, Vítkovice Steel, jednoproudé s přestavitelným krystalizatorem of-line ve třech tloušťkách

V České republice se vyrábí na ZPO více než 90 % oceli. Hutní firmy, které provozují jednotlivé typy kontilit, tvoří tato produkce z jejich celkové výroby:

- ✓ ArcelorMittal – 100 % výroby oceli
- ✓ Třinecké železářny – 95 % výroby oceli
- ✓ Evraz Vítkovice Steel – 100 % výroby oceli

7.3.1. Perspektivy odlévání na ZPO

- tenkých bram 20-60 mm
- pásů bez dalšího předehřevu válcování za studena na fólie 0,3 mm
- tenkých pásů 5 mm, rychlost až 15 m.min⁻¹
- fólií (0,3 mm), rychlost nad 30 m.min⁻¹

Obecně se jeví žádoucí odlévání co nejtenčích plechů s maximálními rychlostmi.



Shrnutí pojmů kapitoly

- Krystalizace
- Homogenní a heterogenní nukleace
- Krystalizace
- Odlévání do kokil
- Plynulé lití oceli (ZPO)
- Tvarové vady předlitků
- Povrchové vady předlitků
- Vnitřní vady předlitků
- Perspektivy odlévání na ZPO

**Příklady otázek k probranému učivu**

1. Jaký je rozdíl mezi homogenní a heterogenní nukleací?
2. Který způsob vzniku zárodků se uplatňuje v reálných podmínkách tuhnutí kovů a slitin?
3. Jakým způsobem krystalizuje ocel?
4. Vysvětlete způsob odlévání oceli spodem a horem
5. Jakou funkci plní mezipánve?
6. Jaké jsou přednosti plynulého odlévání oceli?
7. Definujte pojem rychlost lití.
8. Definujte pojem metalurgická délka.
9. Definujte pojem výtěžek oceli.
10. Jaké znáte lící formáty podle průřezu odlitku?
11. Uveďte základní charakteristiku vertikálního zařízení ZPO.
12. Uveďte základní charakteristiku radiálního zařízení ZPO.
13. Uveďte základní charakteristiku horizontálního zařízení ZPO.
14. Jaká je funkce mezipánve ZPO?
15. Jakou funkci plní oscilace krystalizátoru?
16. Jaké známe vady předlitků?

**Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu**

- PARMA, V., *Ocelářství III.*, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1985, 192 s.
- BAŽAN, J., *Plynulé lití oceli*, Učební text VŠB-TU Ostrava, 2006, 51 s.
- ŠMRHA, L., *Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů*. SNTL Praha, 1983, 305 s.
- BOHM, Z. et al., *Plynulé odlévání oceli*, SNTL Praha 1992, 443 s.

8. Základy tváření kovů

8.1. Rozdělení tvářecích procesů



Čas ke studiu: 60 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Objasnit výjimečnost technologií tváření oproti podobným technologiím.
- Rozdělit technologie tváření.
- Definovat základní pojmy z oblasti tváření



Výklad

Vymezení pojmu tváření

Technologie, které mění tvar polotovaru, se souhrnně označují jako tvarování:

- Odlévání
- **Tváření** (forming, plastic working, deformation)
- Obrábění
- Svařování
- Prášková metalurgie

Tváření je tedy jednou z uvedené množiny technologií. Má však mezi nimi výsadní postavení. Kromě tvaru výrobku, lze touto technologií výrazně ovlivňovat **mikrostrukturu** kovů a tím i jeho **mechanické vlastnosti**.

K přednostem tváření patří:

- sériová až hromadná výroba,
 - vysoká produktivita práce,
 - hospodárné využití kovu,
 - zlepšení struktury a mechanických vlastností kovu,
 - zvýšená životnost součástí vyrobených tvářením,
- nízká hmotnost tvářených součástí.

8.1.1. Rozdělení technologií tváření

Podle toho zda body tvářeného tělesa ležící v jednotlivých rovinách zůstanou v těchto rovinách, nebo se dostanou do jiné roviny rozdělujeme **tváření plošné** (rovinné) a **objemové** (hutnické).

Objemové (hutnické) (solid, flow forming)

- Válcování
- Kování
- Tažení (drátů)
- Protlačování
- Speciální metody

Plošné (strojírenské)

- Lisování plechů
- Ohýbání
- Tažení (plechů)
- Stříhání apod.

❑ Charakteristika základních tvářecích pochodů

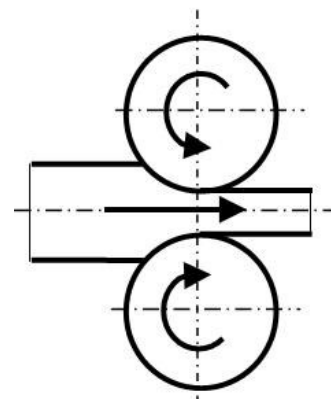
8.1.2. Válcování (rolling)

Válcování náleží ke spojitým procesům tváření. Tváření kovu se děje postupně v mezeře mezi otáčejícími se válci, v tzv. **pásmu deformace**. Podle vzájemné polohy **provalku** a **válců** válcování dále dělíme:

Podélné válcování (longitudinal rolling)

Schéma podélného válcování je na **Obr. 8.1**. Válce jsou poháněny ve směru šipek, vtáhnou kov mezi sebe a stlačují jej na výšku, přičemž se vývalek výrazně prodlužuje a také dochází k menšímu našíření.

Podélné válcování je jedním z nejrozšířenějších způsobů tváření kovů. Odhaduje se, že až 95 % veškeré vyrobené oceli je v průběhu výroby válcováno. Podle typu vývalku (**tvárové vývalky** – kolejnice, štetovnice, tyče, profily, dráty; nebo **ploché vývalky** – plechy a pásy) podélné válcování dále dělíme takto.



Obr. 8.1. Schéma podélného válcování

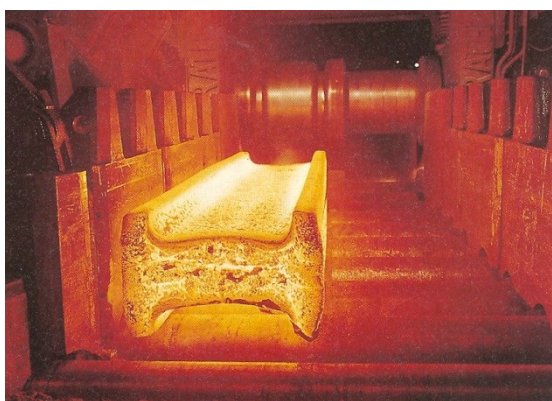
Podélné válcování na hladkých válcích

Příkladem podélného válcování na hladkých válcích je válcování pásů a plechů.

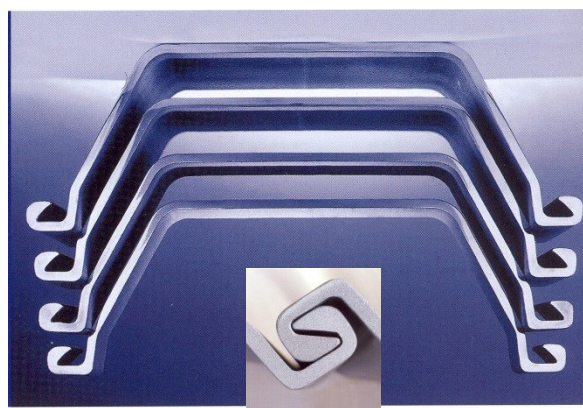
Podélné válcování na kalibrovaných válcích

Příklad podélného válcování na kalibrovaných válcích je uveden na **obr. 8.2**. V popředí obrázku vidíte tvarový vývalek po průchodu **válcovací stolicí**, v pozadí pak válec se speciálními zářezy, zářez na horním a spodním válci potom tvoří tzv. **kalibr**. Na **obr. 8.3** je uveden příklad dlouhého vývalku **štetovnice**, která se používá při výkopových pracích v sybkém materiálu, nebo např. na říčním či mořském dně. Každé dvě štetovnice se dají navzájem spojit tzv. **zámkem** (viz detail **obr. 8.3**.), výsledný spoj je v podstatě vodotěsný. Vlastních zářezů (kalibrů) může být na válci víc podle technologických potřeb (viz **obr. 8.4**).

Zvláštním případem podélného válcování je válcování kroužků.



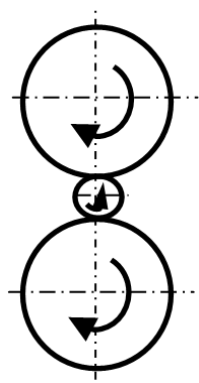
Obr. 8.2. Válcování tvarových předvalků



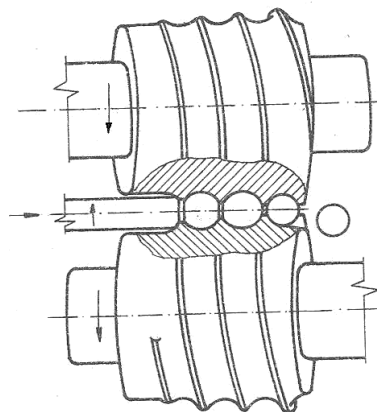
Obr. 8.3. Štetovnice, v detailu spojení dvou štetovnic pomocí zámku



Obr. 8.4. Kalibrované válce se třemi kalibry pro výrobu Z šetovnic



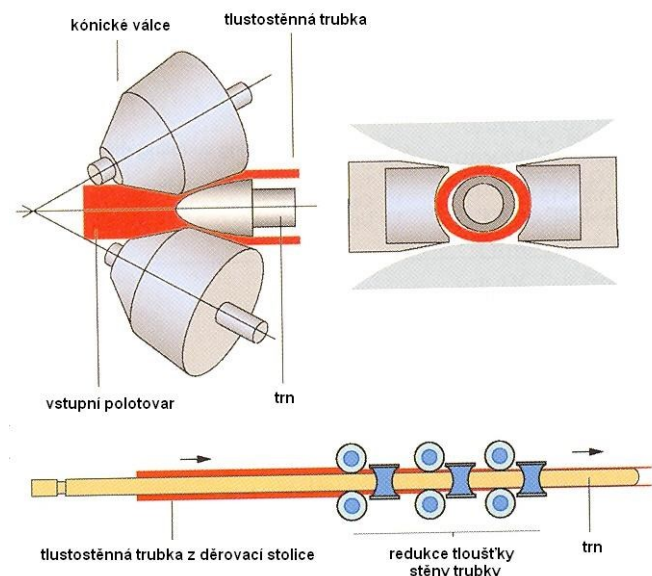
Obr. 8.5. Schéma příčného válcování



Obr. 8.6. Válcování mlecích koulí

Kosé válcování

Kosé válcování je zvláštním případem příčného válcování. Mechanismus plastické deformace je zde obdobný. Osy pracovních válců však nejsou rovnoběžné, ale mimoběžné. Provalek tak nejen rotuje, ale díky mimoběžnosti válců postupuje vpřed ve směru své podélné osy. Tento způsob válcování se využívá při válcování **bezešvých trubek** (viz **obr. 8.7.**). Je to jeden z nejrozšířenějších způsobů výroby dutých polotovarů.



Obr. 8.7. Válcování na děrovací stolici (bezešvé trubky), vlevo schéma, vpravo pohled na výstupní stranu

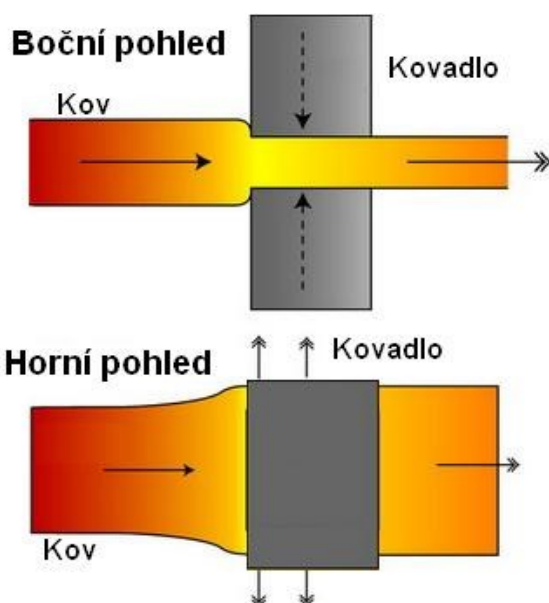
Kování (forging)

Kování je zvláštním druhem plastické deformace, kdy se kov přetržitě tváří pohybujícím se nástrojem, přičemž nabývá požadovaného tvaru, výhodné mikrostruktury, příznivé makrostruktury a vysokých hodnot mechanických vlastností. Tím jsou výkovky předurčeny pro služby v nejnáročnějších provozních podmínkách, kde se kromě naprosté spolehlivosti vyžaduje i nízká hmotnost součástí.

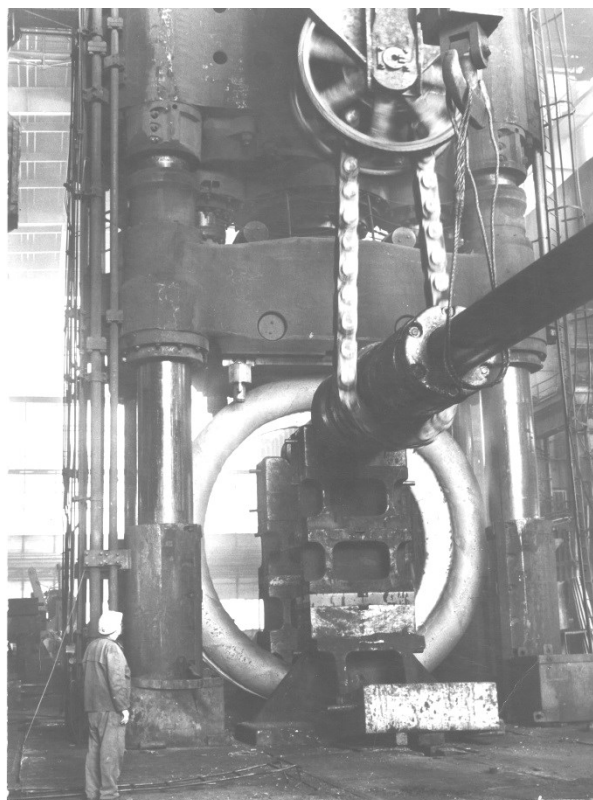
Kování se dělí takto:

Volné kování (open die forging)

Volným kovááním se prostřednictvím nástrojů univerzální povahy – **kovadel** – zhotovují tvarově jednoduché volné **výkovky** o hmotnosti až 600 t. Volné výkovky se vyznačují nerovným, silně zokrujeným povrchem s velkými přídávky na obrábění a rozměrovými úchytkami. Uplatňuje se především v kusové a malosériové výrobě. Na **obr. 8.8.** je schéma jedné z mnoha operací volného kování – prodlužování. Na **obr. 8.9.** vidíme historickou fotografii kování prstence ve Škodě Plzeň. Vpravo dole si povšimněte stojícího kováře, jehož postava vám dá lepší představu o měřítku fotografie.



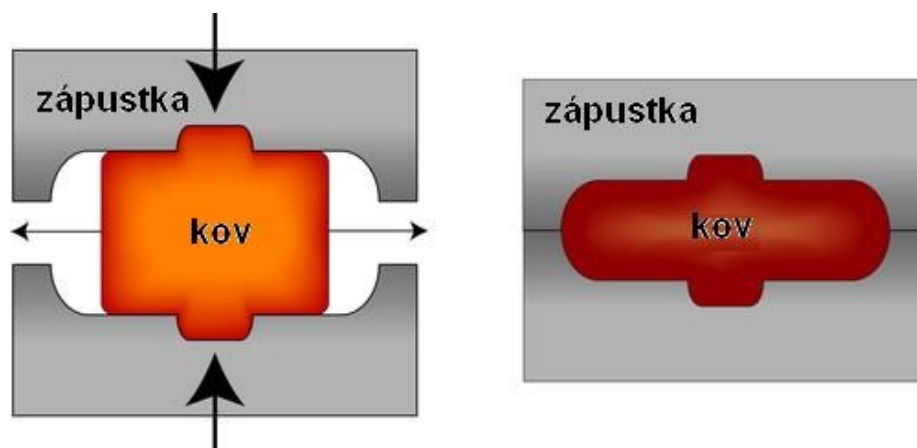
Obr. 8.8. Schéma prodlužování



Obr. 8.9. Historická fotografie kování prstence ve Škodě Plzeň

Zápustkové kování (die forging)

Zápustkovým kovááním se rozumí tváření v jednoúčelových nástrojích – **zápustkách** – které dávají kovu požadovaný, převážně velmi složitý tvar. Malé přídávky na obrábění, značná rozměrová přesnost a dokonalý povrch zápustkových výkovků omezují výrazně podíl obrábění při jejich přeměně na hotové strojní součásti. Roste podíl výkovků, které se již dále nemusí obrábět. Hmotnost výkovků nepřesahuje 2 t. Hlavní rozsah zaznamenalo zápustkové kování ve 2. dekádě 20. století s rozvojem automobilismu, který si vyžádal velké série rozměrově stejných součástí, (Ford T). Příklad zápustkového kování rotačně symetrického výkovku v uzavřené zápustce je uveden na **obr. 8.10.**



Obr. 8.10. Schéma zápustkového kování

Tváření předkovků na kovacíh válcích (reducer rolling, roll forging)

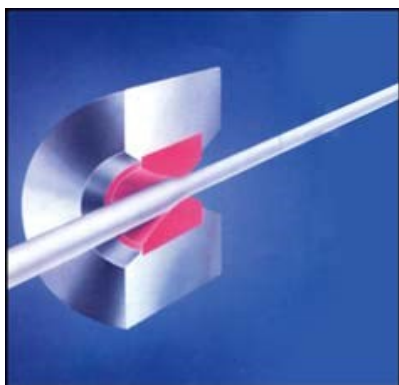
Kovací válce jsou nezbytným doplňkovým tvářecím strojem, na němž se s vysokou výkonností zhotovují předkovky, a to především pro klikové kovací lisy, kde nelze uskutečnit některé přípravné operace (prodlužování a rozdělávání). Kovací válce slouží většinou ke zhotovování podlouhlých předkovků s podélně proměnným průřezem pro zápustkové výkovky v sériové výrobě. Nahrazuje předkování v postupových zápustkách a lze na něm též vyrábět jednoduché hotové výkovky.

Tažení drátu (wire drawing)

Výchozí polotovár, vesměs kruhového průřezu, se táhne otvorem nástroje (**průvlakem**), jehož průměr je menší než průměr výchozího polotovaru, při tom se zmenšuje příčný průřez a zvětšuje délka (schéma viz **obr. 8.11.**). Zařízení, které se používá k tažení se nazývá drátotah (viz **obr. 8.12.**). Tažením se dosáhne přesných rozměrů a tvarů, zlepšují se jakost povrchu a mechanické vlastnosti.

Tažení se používá především pro výrobu:

- drátů menších průměrů než 5 až 6 mm,
- drátů a tyčí s průměrem nad 5 až 6 mm pro dosažení požadovaných rozměrových, tvarových nebo mechanických vlastností.



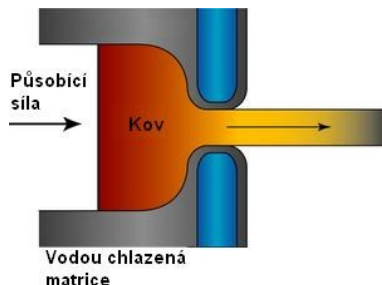
Obr. 8.11. Schéma tažení drátu průvlakem



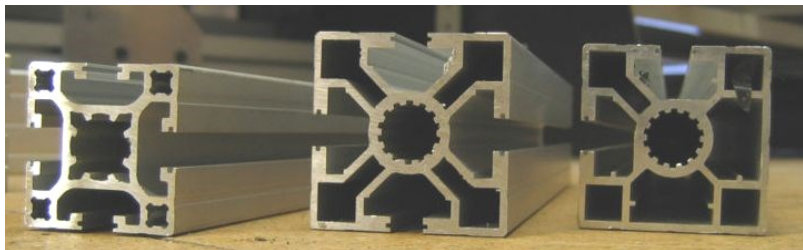
Obr. 8.12. Drátotah

Protlačování (extrusion)

Prostřednictvím dopředně se pohybujícího **průtlačníku** se výchozí polotovár (nejčastěji kruhového průřezu), protlačuje otvorem v pevně upnuté **průtlačnici**, čímž se získá **protlaček** o menším příčném průřezu. Schéma dopředného protlačování je na **obr. 8.13**. Typickým rysem této technologie je velmi složitý průřez (viz **obr. 8.14**).



Obr. 8.13. Schéma tažení drátu průvlakem



Obr. 8.14. Příklady protlačovaných profilů

Speciální metody objemového tváření

- Superplasticita, izotermické tváření
- Drobené a kumulativní deformace
- Tváření prášků
- Hydrostatické protlačování
- Hydrodynamické mazání
- Tváření vysokými rychlostmi a energiemi
- Tváření s ultrazvukem
- Tváření nepevným nástrojem
- ECAP, DECAP, ARB
- a další



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Tváření jako jedna z technologií tvarování je výjimečné tím, že kromě tvaru mění i mikrostrukturu součástí. V rámci tohoto kurzu se budeme věnovat hutnickému (objemovému) tváření, kam patří (podle objemu výroby) tyto technologie: válcování, kování, tažení drátu a protlačování

8.1.3. Rozdělení tváření podle tvářecí teploty

Podle chování kovu během tváření se rozlišuje **tváření za tepla** a **za studena**, přičemž za hranici mezi těmito způsoby tváření se považuje **rekrytalizační teplota** (nebo také **teplota nulové rekrytalizace**) $T_R = \text{cca } 0,4 T_T$ (T_T je teplota tání kovu v Kelvinech).

Tváření za studena

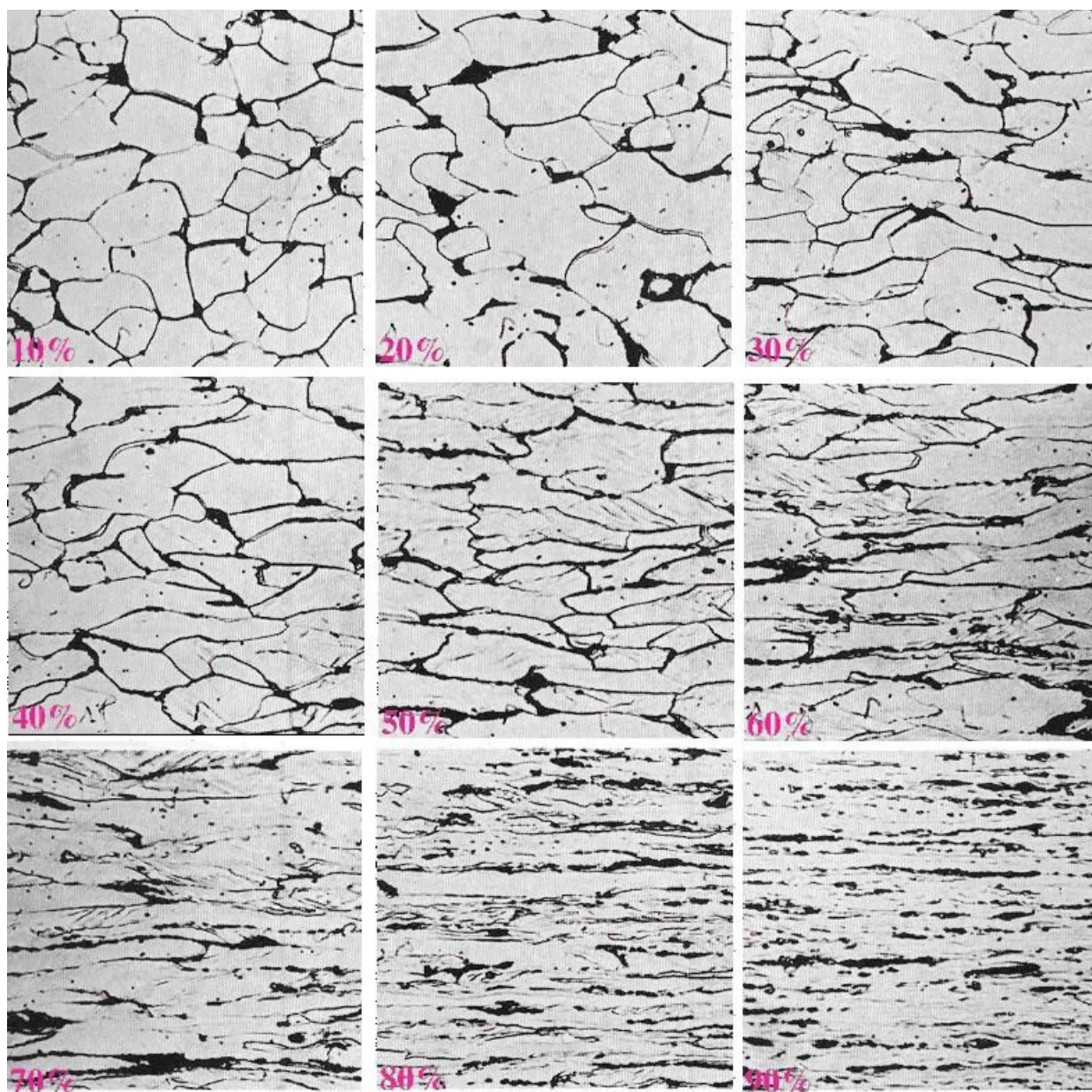
Při válcování nebo tažení za studena dochází k protažení zrna ve směru hlavní deformace. Objem zrna se však nemění (viz **obr. 8.15**). Protože jsou potlačeny **uzdravovací procesy**

(**rekrytalizace** a **zotavení**) dochází vlivem vyčerpávání příznivě orientovaných skluzových systémů a protínání dislokací, kvůli jejich zvýšenému počtu ke **zpevňování** kovu.

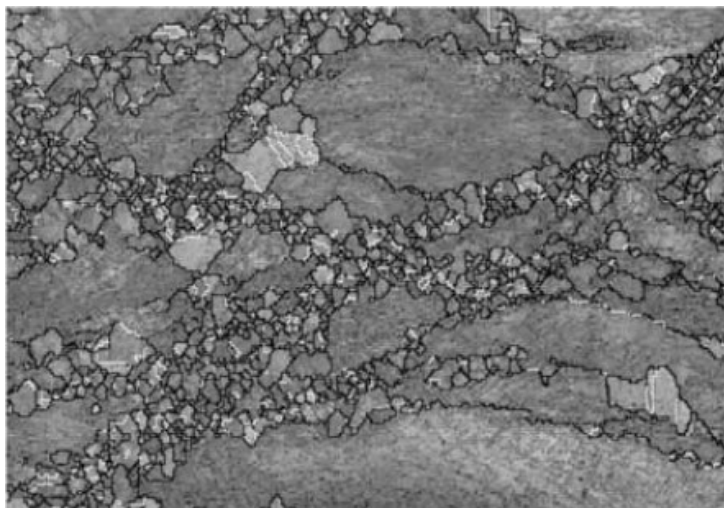
Tváření za tepla

Při tváření za tepla dojde po překročení kritické deformace k nukleaci a růstu nových zrn (**rekrytalizace**). Počáteční stádium dynamická rekrytalizace (DRX) je zachyceno na **obr. 8.16**. Můžeme vidět původní velké protažené (deformované) zrno a na jeho hranicích nová polyedrická rekrytalizovaná zrna. Při rekrytalizaci dochází k výraznému zjemnění zrna, což má následně velmi příznivé dopady na **tvařitelnost** kovu.

Vliv tváření za tepla a za studena na výsledné vlastnosti kovu, uvádí **tabulka 8.1**. Povšimněte si hlavně rozměrů, povrchové kvality a mechanických vlastností tvářených výrobků.



Obr. 8.15. Vývoj mikrostruktury feritické oceli při válcování za studena v závislosti na velikosti deformace



Obr. 8.16. Projev dynamické rekystalizace, zárodky nových (rekystalizovaných) zrn na hranici původního deformovaného zrna

Tabulka 8.1. Vliv tváření za tepla a za studena na výsledné vlastnosti kovu

Vlastnost		Tváření	
		Za studena	Za tepla
Rozměry		Nejmenší tloušťka téměř neomezena: fólie $\geq 0,0015$ mm dráty $\geq 0,005$ mm	Nejmenší tloušťka omezena teplotními ztrátami pásy $\leq 0,8$ mm dráty ≤ 5 mm
Rozměrová přesnost		Vysoká	Nižší následkem rozdílného smršťování z dotvářecí teploty.
Povrchová jakost		Lepší následkem použití maziva	Horší v důsledku zokujení a omezené použitelnosti maziva.
Průřezový profil		Jednoduché tvary	Velmi složité tvary následkem příznivého toku kovu
Struktura	zrno	Výrazně protažené	Polyedrické následkem uzdravovacích procesů
	velikost zrna	Nezměněna	Závislá na velikosti deformace a dotvářecí teplotě
	textura	Při vysokém stupni protváření výrazně orientovaná	Sotva patrná
Zpevnění		Značné	Vesmíš eliminováno uzdravovacími procesy
Vnitřní pnutí		Vysoké	Žádné
Strukturně nezávislé vlastnosti: E , c , β		Slabě pozměněny	Nezměněny
Strukturně závislé vlastnosti: R_m , R_e , A , Z , KC		Značně zvýšeny Značně sníženy	Téměř nezměněny

□ Důležité definice



- **Tvařitelnost (formability)** – schopnost materiálu snášet plastické deformace za určitých podmínek tváření až do porušení soudržnosti.
- **Metalurgická tvařitelnost** – vyjadřuje vliv metalurgických činitelů na tvařitelnost za daných termomechanických podmínek.
- **Technologická tvařitelnost** – vyjadřuje vliv dané technologie tváření na pravděpodobnost vzniku trhliny. Je ovlivněna především stavem napjatosti a vnějším třením. Pokud hovoříme o tvařitelnost pro nějakou konkrétní technologii můžeme použít pojmy: válcovatelnou, kovatelnost, tažitelnost apod.

- **Plastičnost (plasticity)** je schopnost materiálu se plasticky deformovat v rozsahu deformací od počáteční do mezní (mírou plasticity je stupeň deformace, kterého se dosáhne za různých termomechanických podmínek do okamžiku porušení soudržnosti). Počáteční plastičnost vyjadřuje přechod od pružného do plastického stavu. Mezní plastičnost odpovídá podmínkám vzniku prvních trhlin.
- **Deformace (strain)** - změna tvaru tělesa. Těleso mění tvar v důsledku působení síly. Silové působení mění vzájemné polohy atomů, ze kterých se těleso skládá. V případě, že se po odstranění působící síly těleso vrátí do původního tvaru, mluvíme o pružné (elastické) deformaci. V důsledku působení sil může rovněž dojít k nevratným změnám v poloze atomů tělesa. V takovém případě mluvíme o plastické deformaci.
- **Termomechaniční činitelé** výrazně ovlivňují např. uzdravovací procesy. Patří k nim teplota, deformace, deformační rychlost (rychlost přírůstku deformace) a historie tváření.



Otázky k probranému učivu

1. Čím se odlišuje tváření od zbývajících technologií tvarování?
2. Která technologie tváření je z hlediska objemu produkce nejvýznamnější?
3. Která slova charakterizují volné kování?
 - a. Speciální nástroje, kusová výroba, velké přídavky na obrábění.
 - b. Speciální nástroje, hromadná výroba, malé přídavky na obrábění.
 - c. Univerzální nástroje, kusová výroba, velké přídavky na obrábění.
 - d. Univerzální nástroje, hromadná výroba, zokružený povrch
4. Co je to kalibr při válcování tvarové oceli?
5. Jaký je rozdíl mezi kolejnicí a kolejemi?
6. Vyjmenujte výhody tváření oproti ostatním technologiím.
7. Co je to rekrytalizace?
 - a. Vznik a růst krystalů kovu z taveniny.
 - b. Vznik a růst krystalů nové fáze při fázové přeměně.
 - c. Vznik a růst krystalů stejné fáze.
8. Co jsou tmavé oblasti na fotografii mikrostruktury na **obr. 8.15**.?
 - a. Vady krystalů.
 - b. Hranice zrn.
 - c. Nekovové vměstky.
9. Při DRX vzniká polyedrické zrno. Co je to polyedr?
10. Co je to rekrytalizační teplota?
11. Jaký je rozdíl mezi tvařitelností a plastičností?
12. Čím daná technologie ovlivňuje pravděpodobnost vzniku trhliny při tváření?
13. Jaký je rozdíl mezi pružnou a elastickou deformací?
14. Jak definujeme počáteční plastičnost?



Úlohy k řešení

1. Pomocí nástroje kreslení programu MS WORD nakreslete schéma podélného válcování.
2. Pomocí nástroje kreslení programu MS WORD nakreslete řez průvlakem, při tažení drátu.
3. Pomocí internetu zjistěte, kdo v ČR vyrábí štetovnice, kolejnice, pásy a plechy.
4. Pomocí internetu najděte alespoň 3 zápusťkové kovárny v Severomoravském kraji.
5. V životní velikosti načrtněte kolejnici v řezu.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., *Tváření oceli*. SNTL, Praha 1988, ISBN 04-408-88

ŽÍDEK, M., KUŘE, F., *Válcování*, skripta VŠB-TU Ostrava, 1983, 1. vydání

SOMMER, B., *Technologie tváření kovů*, skripta VŠB-TU Ostrava, 2003, 2. vydání, ISBN 80-248-0263-5

GINZBURG, V., B., *Steel-Rolling Technology, Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel. 1989, ISBN 0-8247-8124-4

PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. upr. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

ŽÍDEK, M., *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Aleko, Praha, 1995, ISBN 80-85341-45-X

DOBRZANSKI, A. L., *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*, WNT, Gliwice-Warszawa, 2006, ISBN 83-204-3249-9

8.2. Ohřev kovů



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování této kapitoly budete umět:

- Definovat tvářecí teploty.
- Navrhnu horní a dolní tvářecí teploty ocelí.
- Objasnit vliv tepelných vlastností ocelí na technologii ohřevu.
- Vysvětlí procesy, které vedou k nežádoucím průvodním jevům ohřevu.
- Poskytnout přehled o způsobech ohřevu.
- Diskutovat o výhodách a nevýhodách běžně používaných typů pecí.



Výklad

Úvod

Ohřevem se v nejkratším možném čase dosahuje tvářecí teploty, a to bez ohrožení povrchové a vnitřní jakosti ohřívaného tělesa při omezení, popř. úplném potlačení průvodních jevů ohřevu v podobě opalu a oduhličení.

Ohřevem se zvyšuje **tvařitelnost** a snižuje **deformační odpor**, což má příznivý vliv na energetickou náročnost tváření, životnost tvářecích nástrojů a produktivitu tváření. Zvyšováním teploty se rozvíjejí i **difúzní pochody** (homogenizace lící struktury, rozpouštění precipitátů), jimiž, se zlepšuje jakost ohřívaného kovu. Snižuje se i hustota mřížkových poruch, což má příznivý vliv na jakost hranic zrn.

Tvářecí teploty



Pojmy k zapamatování

Tvářecí teplota (TT) – obecná teplota, při níž je polotovar tvářen

Horní tvářecí teplota (HTT) – nejvyšší teplota, měřená v peci, na niž lze polotovar ohřát

Počáteční tvářecí teplota (PTT) – teplota, při níž se polotovar začíná tvářet

Dolní tvářecí teplota (DTT) – nejnižší přípustná teplota tváření

Dotvářecí teplota (DT) – skutečná teplota polotovaru na konci tváření.

Teoretický interval tvářecích teplot (TITT) $\langle DTT, HTT \rangle$

Skutečný interval tvářecích teplot (SITT) $\langle DT, PTT \rangle$

□ *Horní tvářecí teplota HTT*

Při jejím stanovení je třeba zvážit dva protichůdné jevy:

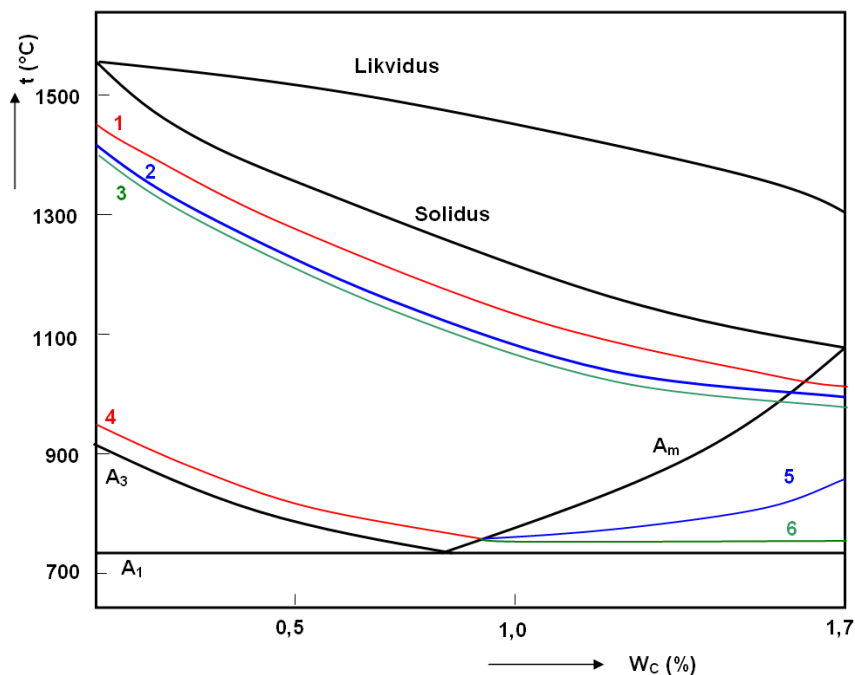
- s rostoucí teplotou se zlepšuje tvařitelnost a klesá deformační odpor,
- s rostoucí teplotou se zintenzivňuje oxidace a oduhličení povrchových vrstev, roste náchylnost k růstu zrna a riziko přehřátí a spálení oceli.

HTT kopíruje křivku solidu v takové vzdálenosti, aby bylo zaručeno, že za žádných okolností nedojde k jejímu překročení

□ *Dolní tvářecí teplota DTT*

DTT se volí podle těchto zásad:

- Ocel musí vykazovat dostatečnou tvařitelnost.
- Deformační odpor musí být v souladu s energosilovými veličinami tvářecího stroje.



Obr.4.4. Zjednodušená část diagramu Fe-Fe₃C s vyznačenými horními a dolními tvářecími teplotami.
 1 - rychlostní ohřev; 2 - polotovary s licí strukturou; 3 - polotovary s tvářenou strukturou; 4 - podeutektoidní oceli;
 5 - nadeutektoidní oceli s nižší tvařitelností; 6 – nadeutektoidní oceli s vyšší tvařitelností

Je třeba si uvědomit, že vlastnosti tvářené oceli jsou výsledkem kombinace DTT, velikosti deformace v posledním úběru e_n nebo velikosti kumulované deformace e_k , pokud již mezi úběry nedochází k úplné rekrystalizaci, a následného ochlazování. Zvláště přesné dodržení dolní tvářecí teploty vyžadují jednofázové oceli a tlustší polotovary, u nichž je tváření jediným postupem k dosažení požadovaných vlastností v konečném výrobku. Vzhledem k rozdílným vlastnostem feritu a cementitu se určuje zvláště pro oceli podeutektoidní a zvláště pro oceli nadeutektoidní.

Podeutektoidní oceli

Ukončení tváření vysoko nad A_{r3} vede k úplné rekrystalizaci a k následnému hrubnutí zrna.

Tváření mezi A_{r3} a A_{r1} nelze doporučit kvůli dvoufázové struktuře ($\alpha + \gamma$), což kromě zhoršené tvařitelnosti vede k řádkovitosti a zvýrazňuje anizotropii mechanických vlastností. Výjimkou jsou pružinové oceli, kde se dotvářením pod teplotou A_{r3} zlepšuje mez pružnosti a mez kluzu. Doporučení: $A_{r3} < \text{DTT} < (A_{r3} + 50) \text{ (}^\circ\text{C)}$

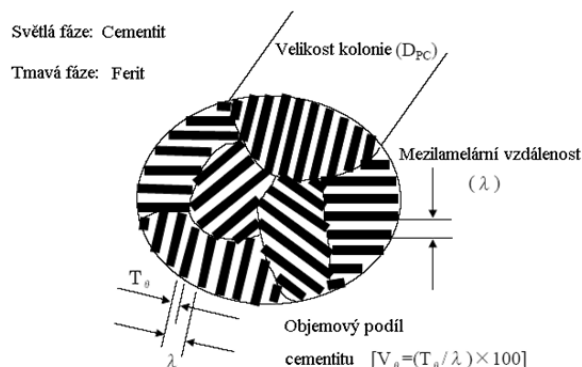
Nadeutektoidní oceli

Nelze tvářet pouze v homogenní oblasti austenitu γ , a to z těchto důvodů:

- úzký interval tvářecích teplot znemožňuje tváření v jednofázové oblasti (austenit),
- vysoké DT vedou ke vzniku hrubozrnné struktury,
- deformačním účinkem nerušené ochlazování by vedlo k vyloučení cementitu na hranicích původních austenitických zrn v podobě nežádoucího síťoví (viz **obr. 8.17.**),
- pod teplotou A_{r1} se hrubozrnný austenit mění na hrubělamelární perlit (viz **obr. 8.18.**).



Obr.8.17. Perlit a proeutektoidní cementit na hranici původních austenitických zrn



Obr. 8.18. Mikrostrukturní faktory perlitu



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Horní tvářecí teplotu volíme tak, abychom zajistili nízký deformační odpor a dobrou tvařitelnost ocelí, aniž by došlo k nadměrnému opalu, oduhličení či k přehřátí a spálení oceli. Prakticky HTT kopíruje křivku solidu, více se k ní můžeme přiblížit při ohřevu ocelí v litém stavu a při rychloohřevu. Dolní tvářecí teplota: u podeutektoidních ocelí se volí tak, aby tváření neprobíhalo ve dvoufázové oblasti ferit + austenit. U nadeutektoidních ocelí to však nejde zajistit a jsme nuceni tvářet dvoufázovou strukturu tvořenou austenitem a sekundárním cementitem. Pokud nám to deformační odpor oceli dovolí, tváříme těsně nad teplotou A_1 . Pokud je deformační odpor příliš vysoký, musíme dokončit tváření za vyšších teplot. K zabránění vzniku nežádoucího cementitického síťoví po hranici původního austenitického zrna je vhodné aplikovat zrychlené ochlazování.

8.3. Fyzikální základy ohřevu



Pojmy k zapamatování

Sdílení tepla vedením, prouděním a zářením, hustota tepelného toku, součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita, hustota, součinitel teplotní vodivosti, teplotní roztažnost, tepelná pnutí, rychlost ohřevu, doba ohřevu

Fyzikální základy ohřevu tvoří soubor vybraných fyzikálních veličin a vlastností kovů, které rozhodují o zdárném průběhu ohřevu, a jejich teplotní závislosti.

Přenos energie z oblastí o vyšší teplotě do oblastí chladnějších se označuje jako **sdílení tepla**. Rozlišujeme tři základní způsoby, a to sdílení tepla vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací).

Sdílení tepla vedením souvisí s tepelným pohybem a vzájemným energetickým působením molekul, iontů a elektronů. Teplo se přenáší vedením nejen v tuhých, ale i v kapalných a plynných látkách, ovšem u tuhých neprůzračných těles je jediným mechanismem sdílení tepla.

Sdílení tepla prouděním je možné pouze v proudícím prostředí. Pohybující se tekutina při tom předává nebo odebírá teplo z povrchu okolních těles (tuhých i kapalných).

Sdílení tepla zářením se uskutečňuje elektromagnetickým vlněním. Tepelná energie tělesa se mění na elektromagnetické vlnění, které se šíří prostorem, je pohlcováno povrchy jiných těles, kde se opět promění v energii.

OHŘEV: sálání, proudění, vedení $\rightarrow f(\lambda, \rho, c)$,

□ *Součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)*

Představuje množství tepla v Joulech, které projde mezi body vzdálenými 1 metr za 1 s, je-li rozdíl jejich teplot 1 Kelvin.

Charakteristickou vlastností kovů je dobrá vodivost tepla a elektřiny. Vedení elektřiny se uskutečňuje pomocí elektronů. Na vedení tepla se podílí jak elektrony, tak vlastní mřížka kmitáním atomů. Protože kmitající atomy jsou vzájemně spojeny vazebnými silami, ovlivňuje kmitání jednoho atomu atomy v jeho okolí, což se navenek projevuje jako vedení tepla.

Tepelná vodivost je u čistých kovů nejvyšší (u železa $\lambda \approx 75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), kdežto přísadovými prvky se snižuje.

Obecně platí: $\lambda = f(M, t)$

Součinitel tepelné vodivosti se snižuje zhuštěním mřížkových poruch, jímž se vyznačuje struktura litá, tvářená za studena či zakalená. Pozoruhodný je vliv teploty, podle něhož se oceli rozdělují do tří skupin, v nichž se součinitel tepelné vodivosti se vzrůstající teplotou:

- výrazně snižuje (nizkokuhlíkové a nízkolegované oceli),
- snižuje nevýrazně nebo se vůbec nemění (středně legované oceli),
- mírně zvyšuje (vysokolegované oceli).

Nad teplotou 900 °C se součinitel tepelné vodivosti všech druhů ocelí ustaluje na hodnotě $25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Vliv λ na ohřev

$\uparrow \lambda \Rightarrow \downarrow \tau, \Delta t$

Větší součinitel tepelné vodivosti znamená menší teplotní spád mezi povrchem a jádrem zahřívaného tělesa, tím i menší tepelná pnutí a kratší dobu ohřevu.

□ *Měrná tepelná kapacita c ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)*

Množství tepla v J, které je potřeba dodat látce o hmotnosti 1 kg, aby se ohřála o 1 K.

$c = f(t) \quad \uparrow c \Rightarrow \uparrow \tau$

Vliv chemického složení je nepatrný, s teplotou měrná tepelná kapacita stoupá až k maximu, které je při teplotě přeměny $\alpha \rightarrow \gamma$. Větší měrná tepelná kapacita prodlužuje dobu ohřevu a zvyšuje tak jeho energetickou náročnost.

□ *Hustota ρ (kg.m^{-3})*

Hustota je nejnižší u čistých kovů, např. pro železo $\rho = 7880 \text{ kg.m}^{-3}$.

$\rho = f(M, t) \quad \uparrow \rho \Rightarrow \uparrow \tau$

Větší hustota prodlužuje dobu ohřevu a zvyšuje jeho energetickou náročnost.

□ *Součinitel teplotní vodivosti a ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)*

Změna teploty s časem, ke které dochází v teplotním poli ve výrobku při nestacionárním vedení tepla je přímo úměrná tepelné vodivosti λ , ale nepřímo úměrná měrné tepelné kapacitě c

a hustotě ρ . Proto se zavádí veličina, která charakterizuje rychlost změn teploty při ohřevu nebo při ochlazování výrobku. Je to součinitel teplotní vodivosti nebo prostě teplotní vodivost:



Vzorec k zapamatování

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad \uparrow a \Rightarrow \downarrow \tau, \downarrow \Delta t, \downarrow \sigma_{tep} \quad (8.1)$$

Větší součinitel teplotní roztažnosti zkracuje dobu ohřevu a snižuje jeho energetickou náročnost. Z toho plyne vyšší teplotní gradient mezi povrchem a středem polotovaru a z toho plyne vyšší hodnota tepelného pnutí σ_{tep} .

□ Teplotní roztažnost

Za stálého tlaku se s rostoucí teplotou zvětšují délkové rozměry i objem tuhých těles. Poměrná změna délky je charakterizována izobarickým součinitelem délkové roztažnosti, který je funkcí teploty:

Délková roztažnost

$$l_t = [l_0 + \bar{\alpha} \cdot (T - T_0)] \quad (8.2)$$

Objemová roztažnost

$$V_t = [V_0 + \bar{\beta} \cdot (T - T_0)] \quad (8.3)$$

Větší teplotní roztažnost vyvolává větší tepelná pnutí, čelí se tomu snížením rychlosti ohřevu, což je však spojeno se zvýšením energetické náročnosti ohřevu.

□ Tepelná pnutí

Tepelná pnutí vznikají při ohřevu tělesa následkem objemových změn, které jsou důsledkem nerovnoměrného rozdělení teploty v ohřívaném tělese. Pro vznik a důsledky pnutí je obzvláště nebezpečná oblast nízkých teplot (do 550 °C), kdy je ocel v pružném stavu a vznikající pnutí nemůže být eliminováno plastickou deformací. V počáteční fázi ohřevu jsou povrchové vrstvy zahřáté na vyšší teplotu, zvětší svůj objem, jádrové oblasti však tomuto zvětšení brání. Na povrchu tak vzniknou tlaková napětí, v jádrových oblastech tahová.

Pokud se k tomu přidá zbytkové tahové pnutí po předchozím ochlazování, případně v průběhu ohřevu pnutí překrystalizační (hlavně legované oceli), může dojít k porušení soudržnosti materiálu.

□ Rychlost ohřevu v $[K \cdot h^{-1}]$

Rychlost ohřevu závisí především na teplotní vodivosti a dále na vlastnostech ohřívaného materiálu a rozměrech polotovarů. Čím větší je rychlost ohřevu, tím kratší je doba ohřevu, ale tím větší jsou tepelná pnutí v ohřívaném tělese.

Aby se tepelná pnutí udržela v přípustných mezích, doporučuje se zařadit do vstupní fáze ohřívacího režimu tlustých polotovarů předeheť v peci se sníženou sázecí teplotou.

□ Doba ohřevu $t [h]$

Stanovuje se tak, aby se dosáhlo:

- požadované tvářecí teploty,

- nejmenšího tepelného pnutí,
- rovnoměrného prohřátí ($\Delta T < 50 \text{ K}$),
- nízké energetické náročnosti procesu,
- co nejnižší oxidace a oduhličení,
- požadované strukturní změny,
- rozpuštění karbonitridů.

Mnohem náročnější a odpovědnější je stanovení doby ohřevu tlustých těles, k nimž patří především ingoty, a to zejména ve studeném stavu ($t < 550 \text{ °C}$). V takových případech se celý ohřev rozčleňuje do několika na sebe navazujících úseků, z nichž první se vyznačuje sníženou sázecí teplotou pece, čímž se zamezuje vzniku velkých tepelných pnutí v první fázi ohřevu, kdy je ocel v pružném stavu.

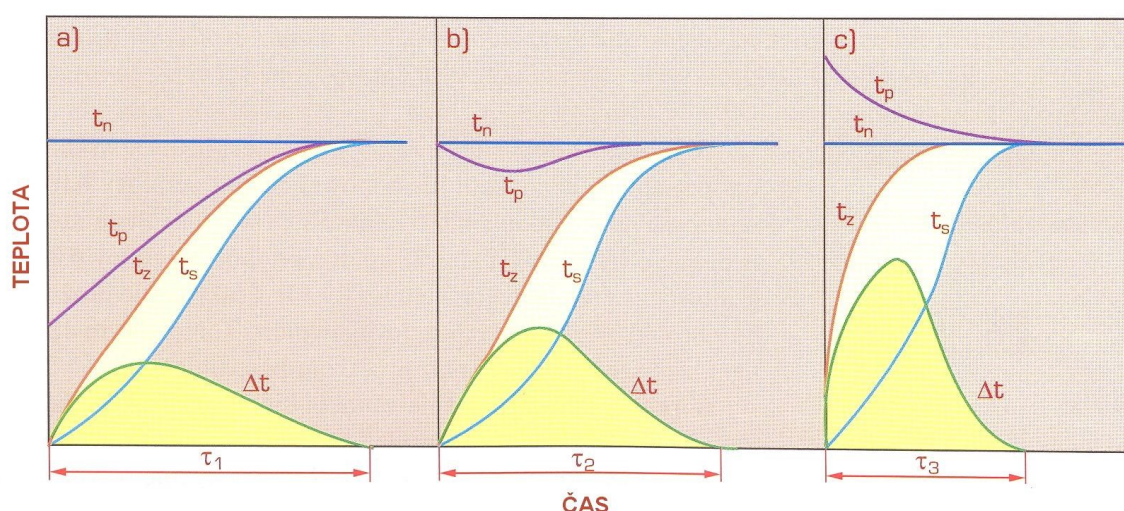
□ Způsoby ohřevu

Při tepelném zpracování se vlastní ohřev výrobku uskutečňuje v pecních zařízeních různými způsoby. Obvykle se celkový ohřev skládá z více fází, jelikož je nutno měnit rychlost ohřevu nebo vyrovnávací fáze během ohřívacího procesu. V podstatě je možno režimy ohřevu výrobků rozdělit do pěti skupin:

1. **pomalý (obr. 8.19. a)** - vsázka je vložena do studené pece a postupně ohřívána. Rychlost ohřevu je malá, vznikají malé rozdíly teplot mezi povrchem a jádrem výrobku. Výrobnost pece je však nízká.

2. **normální (obr. 8.19. b)** - vsázka je vložena do pece vyhřáté na předepsanou teplotu ohřevu, popř. teplotu částečně vyšší. Teplotní spád ve výrobku je vyšší a tím i vyšší teplotní pnutí. Tento způsob je nejvíce využíván v komorových pecích a solných lázních. Zvyšuje se výkon pece.

3. **zrychlený (intenzivní) (obr. 8.19. c)** - využívá část tepelné kapacity pece vyhřáté na teplotu podstatně vyšší než je předepsaná teplota ohřevu výrobku. Po vložení vsázky do pece vznikají velké teplotní rozdíly mezi jádrem a povrchem výrobku.



Obr. 8.19. Teplota pece t_p , teplota povrchu tělesa t_z , teplota středu tělesa t_s a rozdíl teplot mezi povrchem a středem Δt v závislosti na čase při ohřevu polotovaru na teplotu t_n a) pomalý ohřev b) normální ohřev c) zrychlený ohřev

4. **rychlý** - pec je nepřetržitě vyhřívána na teplotu podstatně vyšší, než je teplota požadovaná. Vsázka se vyjímá z pece po dosažení předepsané teploty. Při tomto režimu se dosahuje nejvyšších hodnot vnitřních pnutí, ale také nejvyšší výrobnosti pece.

5. **stupňovitý** - vsázka se předeheje v jednom prostředí (agregátu) a potom přemístí do dalšího prostředí s vyšší teplotou. Ohřev je možno uskutečnit i ve více stupních. Stupňovitý ohřev umožňuje snížit napětí při ohřevu na minimum a tím zamezit deformacím, příp. praskání i u materiálů s nízkou tepelnou vodivostí (vysokolegované ocele).



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Vedení tepla se řídí Fourierovou rovnicí. Na způsob ohřevu mají vliv základní tepelné veličiny: součinitel tepelné vodivosti λ , měrná tepelná kapacita c a hustota ρ . Snížená hodnota λ a zvýšené hodnoty c a ρ vedou k velkým rozdílům teplot mezi povrchem a středem polotovaru. Tento rozdíl v kombinaci s teplotní roztažností způsobuje tepelná pnutí. Nejnebezpečnější jsou tepelná pnutí do teplot 550°C, kdy díky velké hodnotě modulu pružnosti v tahu E probíhá pružná deformace a tepelné pnutí tak zůstává přítomno v materiálu. Nejhorší varianta nastane po rychlém ochlazení a následném rychlém ohřevu, kdy se sečtou kladná vnitřní pnutí, a může dojít ke vzniku trhliny. Aby se zabránilo vzniku kritických vnitřních pnutí, zavádí se v praxi výpočty rychlosti ohřevu a doby ohřevu, které zohledňují materiál, tvar a rozměry polotovaru a způsob uložení v peci. Z toho nakonec vznikají různé způsoby ohřevu: normální, pomalé, zrychlené, rychlé a stupňovité.

8.3.1. Průvodní jevy ohřevu



Pojmy k zapamatování

Opal, okuje, wüstit, magnetit, hematit, oduhličení, přehřátí, spálení

□ Opal

Opal vzniká oxidací povrchových vrstev ohřívaného tělesa v pecní atmosféře obsahující volný kyslík, CO_2 a vodní páru. Množství okují se řídí následujícím vztahem:

$$Z = 49 \cdot \sqrt{\tau} \cdot \exp\left(\frac{-9000}{T}\right) \quad (8.4)$$

Kde τ je čas (s), T je teplota (K)

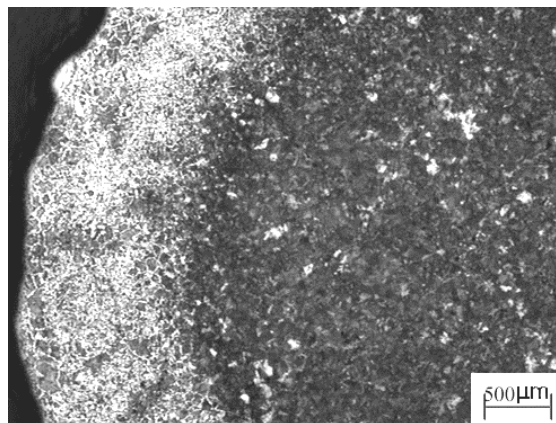
Vzájemný podíl postupně od základního kovu k atmosféře vznikajících oxidů železa, FeO , Fe_3O_4 a Fe_2O_3 se mění s teplotou. Oxidace se urychluje neustálým opadáváním okují z povrchu ohřívaného tělesa následkem rozdílné teplotní roztažnosti okují a základního kovu.

Při následném tváření způsobují okuje na povrchu těles zvýšené tření a tím zhoršují stav napjatosti a způsobují zvýšené opotřebení nástrojů. Zaválcováním okují vznikají povrchové vady.

❑ Oduhličení

Působením CO_2 a vodní páry (především) se ocel oduhličuje (**viz obr. 8.20.**), což se projeví snížením pevnosti, povrchové tvrdosti a dalších vlastností závislých na obsahu uhlíku.

Oduhličení zhoršuje vlastnosti tvářeného polotovaru. Snižuje např. únavovou pevnost lanového a pružinového drátu ve střídavém ohybu a ve svých důsledcích mez únavy pružin a lan. Zvlášť vysoké požadavky na oduhličený povrch jsou kladeny na kolejnicové oceli (oduhličení zvyšuje opotřebení pojezdové hrany kolejnice).



Obr. 8.20. Mikrostruktura válcovaného drátu s 0,7 % C, ve středu drátu je čistě perlitická struktura v oblastech blízko povrchu je feritická struktura s perlitickým sít'ovím na hranici původního austenitického zrna.

❑ Přehřátí a spálení

Přehřátí oceli nastává při dlouhodobém ohřevu na horní tvářecí teplotu, kdy hrubne austenitické zrna. Hrubé austenitické zrna má nepříznivý vliv na tvařitelnost materiálu. Trhliny se rády šíří po hranici zrna (**obr. 8.21.**), čím hrubší zrna, tím kratší dráhu musí trhlina urazit. Následky tohoto stádia lze odstranit normalizačním žíháním případně tvářením s malým stupněm deformace. Toto stádium označujeme jako přehřátí bez ovlivnění hranice zrn.

Druhé stádium, přehřátí s ovlivněním hranic zrn, trvale znehodnocuje ocel. Za příčinu se považuje síra,

kteřá se pod teplotou solidu rozpouští v oceli a difunduje na hranice zhrublého austenitického zrna s nižší povrchovou energií. Při následném ochlazování se síra vylučuje na hranicích austenitického zrna v podobě sulfidů, které ve zvýšené koncentraci oslabují soudržnost feritického sít'oví, čímž se snižují plastické vlastnosti oceli.



Obr. 8.21. Šíření trhliny po hranici zrna

Při ohřevu na teploty blízké teplotě solidu může nastat spálení oceli, což znamená její úplné znehodnocení následkem natavení hranic zrn. Případné nečistoty, které v průběhu ohřevu nadifundovaly na hranice zrna sníží jejich teplotu tání a ke spálení oceli pak může dojít i za teplot výrazně pod teplotou solidu.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Za zvýšených teplot se velmi daří všem procesům, které jsou řízeny difúzí. Patří mezi ně i nežádoucí průvodní jevy ohřevu: opal – difúze kyslíku do oceli za vzniku okují, oduhličení – difúze uhlíky pryč z oceli za vzniku oduhličené vrstvy na povrchu, přehřátí bez ovlivnění hranic zrn – difúze železa v železe, která způsobí migraci hranic zrna a tím zhrubnutí zrna, přehřátí ovlivněním hranic zrn – difúze nečistot a příměsí na hranice zrna, kde způsobí oslabení hranice zrna, snížení teploty tání hranice zrna a následně spálení oceli.

8.3.2. Typy ohřevu

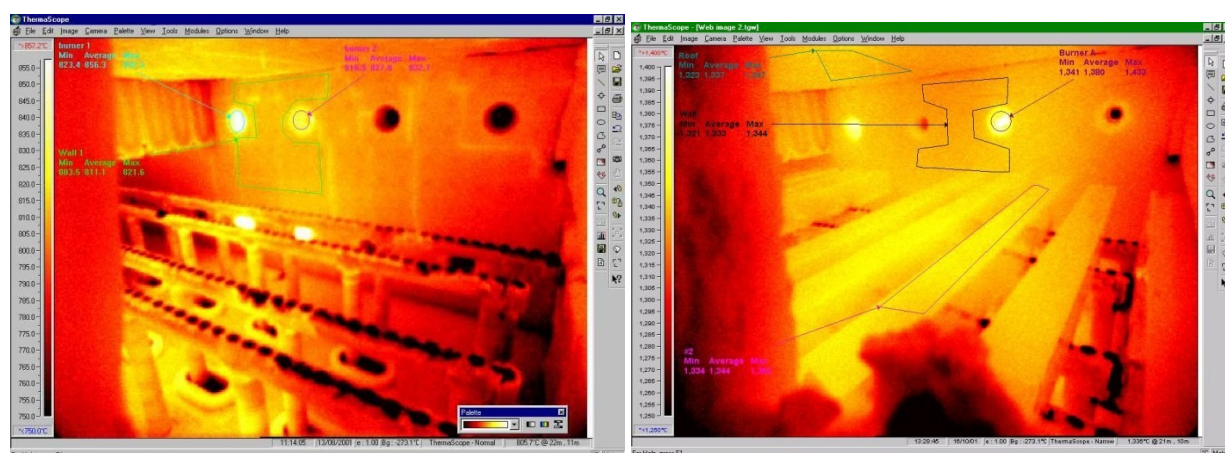


Pojmy k zapamatování

Plynový ohřev, měrný elektrický odpor, elektrický odpor, indukce, vířivé proudy, účinnost ohřevu, rychlostní ohřev, ochranná atmosféra

□ Plynový ohřev

Plynový ohřev má pro energetickou bilanci hutního průmyslu stále prvořadý význam. Rozsáhlé použití topných plynů je dáno vhodnými vlastnostmi, potřebnými v hutnické technologii, z nichž můžeme uvést hlavně dokonalé spalování s malým přebytkem vzduchu, rovnoměrné rozložení teplot v pracovním prostoru pece, příznivá kontrola a automatizace spalovacího procesu (viz **obr. 8.22.**), možnost předejít topných plynů a snadná doprava.



Obr. 8.22. Pohled do pracovního prostoru plynové pece pomocí termovize. Můžeme vidět umístění jednotlivých hořáků a řetězový dopravník. Vlevo prázdná pec, vpravo naložená pec

□ Ohřev elektrickým proudem

Prochází-li vodičem elektrický proud, narážejí pohybující se elektrony na atomy vodiče v rovnovážných polohách a předávají jim část své kinetické energie. Rozkmitání atomu se projeví vzrůstem teploty vodiče. Jedná se o nejrychlejší způsob ohřevu polotovarů malých tloušťek. Vysoká rychlost ohřevu je umožněna tím, že teplo vzniká uvnitř ohřívaného polotovaru. Výhody ohřevu elektrickým proudem:

- Nízké zokuzení.
- Přesné dodržení horní tvářecí teploty.
- Snadná mechanizace a automatizace.
- Výrazné zlepšení pracovních podmínek a životního prostředí.

Rozlišujeme:

Nepřímý odporový ohřev: Proud teče topnými spirálami (velká délka, malý průměr a speciální materiál se zvýšeným měrným elektrickým odporem, které se v důsledku toho ohřívají a následně předávají teplo vnitřnímu prostoru pece.

Přímý odporový ohřev: proud prochází přímo polotovarem.

Účinnost přímého odporového ohřevu velmi silně závisí na poměru délky tělesa k jeho průřezu. Ohřev el. proudem se uplatňuje při výrobě svařovaných trubek, při zápusťkovém kování,

kdy ohřívací zařízení bývá s výhodou vestavěno přímo do tvářecího stroje. Velmi úspěšně se přímý odporový ohřev využívá při ohřevu taženého drátu (velká délka, malý průřez) před tepelným zpracováním (patentování, žíhání).

Indukční ohřev

Kolem vodiče, jímž prochází střídavý elektrický proud, se vytváří magnetické pole, které mění svou velikost a směr. Jestliže do magnetického pole vložíme kovové těleso, indukuje se v něm elektromotorická síla, jejímž působením začne tělesem procházet proud – těleso se zahřívá. Jedná se o nejrychlejší způsob ohřevu vůbec.

Induktor je zhotoven z měděné trubky, kterou protéká voda, kvůli chlazení (viz **obr. 8.22.**). Indukční vířivé proudy nepronikají do polotovaru rovnoměrně, hustota proudu klesá směrem ke středu polotovaru exponenciálně (využití při povrchovém kalení).



Obr. 8.22. Induktor

❑ Rychlostní ohřev

Teoretické propočty i praktické zkušenosti naznačují, že při ohřevu tenkých polotovarů v peci vyhřáté nad teplotu 1 400 °C, se uplatňuje až z 80 % sálání, rychlost ohřevu se díky tomu blíží indukčnímu ohřevu. To vše bez rizika vzniku vnitřních pnutí. Typické je to, že průřez komory pece je jen o něco větší než průřez polotovaru. Tímto způsobem se dosahuje podstatné zvýšení výkonnosti ohřívacích pecí za současného snížení opalu a téměř úplného omezení oduhličení. Rychlostně ohřívána ocel je jemnozrnnější, proto vykazuje lepší tvařitelnost. Vzhledem k nebezpečí přehřátí a spálení oceli musí být provoz pece řízen spolehlivou automatikou včetně samočinného vypínání sázecího zařízení.

❑ Ohřev v ochranném prostředí

Používá se k ohřevu drobnějších polotovarů pro protlačování a zápusťkové kování, a to v případě zprísněných nároků na povrchovou jakost a rozměrovou přesnost. Ochranné prostředí bývá vesměs plynné (ochranné atmosféry) a kapalné (roztavené sklo a soli), nebo lze využít vakua.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Nejpoužívanějším způsobem ohřevu je ohřev plynový. Je to jednoznačně dáno cenou. Ve speciálních případech najde uplatnění také ohřev elektrickým proudem, ať už přímý nebo nepřímý odporový ohřev nebo indukční ohřev. Výhodou je rychlost ohřevu, přesnější řízení ohřevu a možnost použití ochranné atmosféry. Tyto způsoby ohřevu však nelze použít vždy, např. přímý odporový ohřev je ideální pro dráty, ale pro polotovary s kratší délkou a větším průřezem prudce klesá jeho účinnost.

8.3.3. Ohřívací pece



Pojmy k zapamatování

Pece: hlubinné, strkací, pokulovací, krokové, s rotační nístějí, komorové s vodorovnou nístějí, s výjezdnou nístějí,

Rozumí se tím pece, v nichž se ohřívají výchozí polotovary před tvářením. I když je lze rozdělit podle mnoha kritérií, přidržíme se v dalším výkladu především jejich účelu, podle něhož se člení na ohřívací pece ve válcovnách, válcovnách trubek a kovárnách.

❑ *Ohřívací pece ve válcovnách*

Hlubinné pece (soaking pit furnace)

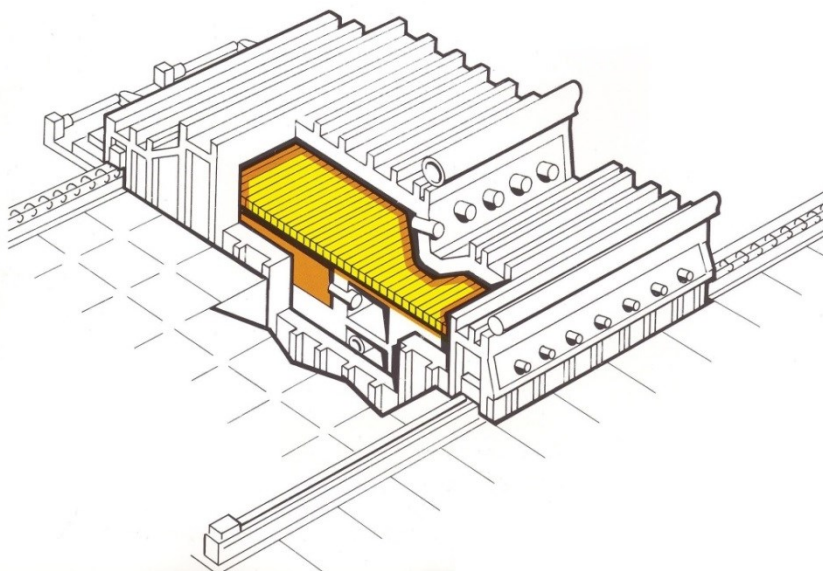
Jsou určeny převážně pro ohřev ingotů, které se válcují na blokovně. Název charakterizuje jejich umístění pod úroveň podlahy. Skládají se z několika komor, v nichž se ingoty ustavují ve svislé poloze (viz **obr. 8.23.**). Pece se vyhřívají na teplotu 1 350 až 1 400 °C. Na jednu pec se dvěma až čtyřmi komorami po 12 až 16 ingotech se dosahuje roční výkonnosti až 300 000 t.

Strkáci pece (pusher furnace)

Jedno z nejpoužívanějších technických řešení pro ohřev předvalků, bram a bloků. Výhledově budou nahrazovány krokovými pecemi. Jedná se o průběžnou pec (viz **obr. 8.24.**), kdy pohyb polotovarů v peci je zajišťován tlačkami (viz **obr. 8.25.**), které posouvají polotovary po lyžinách v peci. Nevýhodou takového systému je, že může docházet k poškození povrchu polotovarů, intenzita ohřevu se snižuje díky tomu, že se polotovary navzájem dotýkají, zvyšuje se množství opalu, díky tomu, že okuje díky nárazům polotovaru na sebe opadávají. Výhodou je pak nižší cena oproti pecím krokovým.



Obr. 8.23. Hlubinná pec s manipulátorem



Obr. 8.24. Schéma strkáci pece

Pece bývají rozděleny do pásem s rozdílným teplotním režimem. Např. u 3 pásmové pece slouží první pásmo (předehřívací) k omezení tepelných pnutí v počáteční fázi ohřevu. V druhém pásmu (ohřívacím) se dosahuje vysokou ohřívací rychlostí HTT na povrchu polotovaru, ve třetím pásmu (vyrovnávacím) se zajišťuje minimálního teplotního gradientu mezi povrchem a středem. U těchto pecí se dosahuje měrné spotřeby tepla cca 1 540 kJ.kg⁻¹.

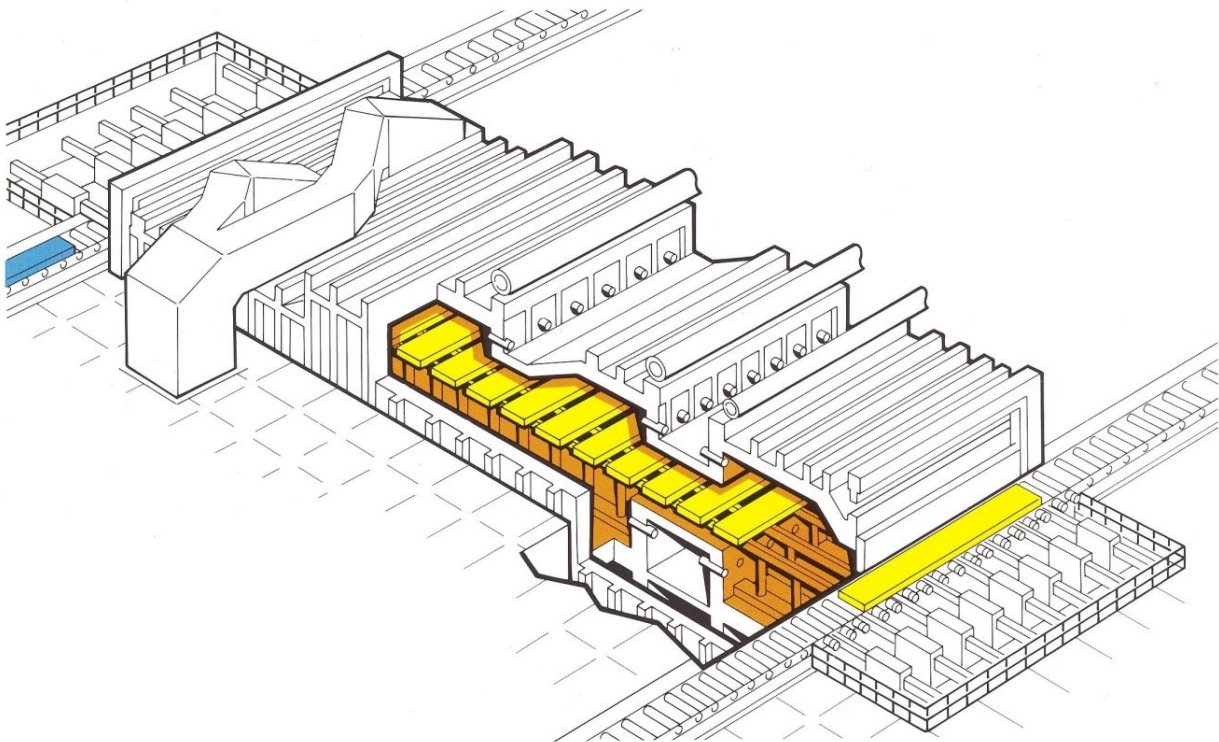


Obr. 8.25. Vstupní strana strkací pece; Válcovna těžkých profilů Evraz Vítkovice Steel; vlevo: příjezd bram po válečkovém dopravníku, vpravo natlačení bram tlačkou.

Krokové pece (walking beam furnace) (obr. 8.26.)

Přes vysoké pořizovací náklady ve srovnání se strkacími pecemi o stejném výkonu se začínají čím dál tím častěji uplatňovat pro ohřev předvalků a bram. Oproti strkacím pecím mají mnoho výhod:

- z polotovarů se neuvolňují okuje a nezanášejí nístěj,
- snadné vyprázdnění pece při poruchách válcovací tratě,
- pružná regulace krokování (důležité při změně sortimentu),
- snížení opalu v důsledku zvýšení rychlosti ohřevu a nenarušování vrstvy okují,
- snížení poškození povrchu polotovarů,
- všestranný ohřev a z toho plynoucí zkrácení doby ohřevu.



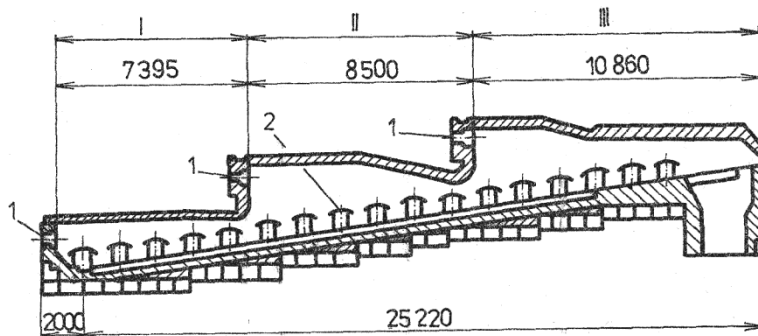
Obr. 8.26. Schéma krokové pece

❑ Ohřívací pece ve válcovnách trubek

Jejich zvláštnost spočívá v tom, že se v nich ohřívají polotovary kruhového průřezu, nebo duté předvalky.

Pokulovací pece

Zvláštní případ strkací pece s mírně nakloněnou nístějí, po níž se pokulují ohřívání polotovary (viz **obr. 8.27.**). Velkou nevýhodou tohoto typu pecí, je potřeba velkého množství pracovníků, kteří dlouhými tyčemi pokulují polotovary po nístěji (viz **obr. 8.28.**). Poslední pec tohoto typu byla odstavena v roce 2005 ve válcovně trub Vítkovice (dnes Třinecké železářny, a.s.).



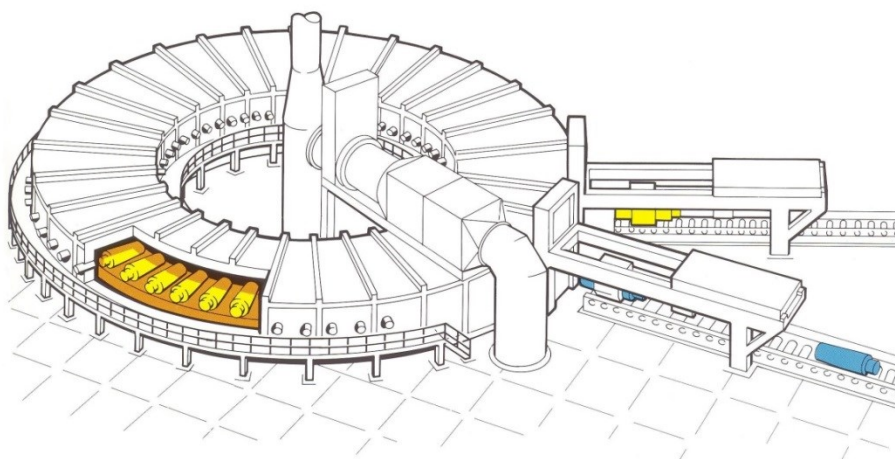
Obr. 8.27. Schéma pokulovací pece



Obr. 8.28. Práce pokulovačů

Pec s otočnou nístějí (Rotary hearth f.)

Vyznačuje se plně automatizovaným provozem. Jedná se o průběžnou pec s prstencovým uspořádáním s několika pásmy ohřevu. Nístěj se pohybuje nepřetržitě nebo přetržitě s jednotlivými posuvy 2 až 8° (viz **obr. 8.29.**).



Obr. 8.29. Schéma pece s otočnou nístějí

❑ Ohřívací pece v kovárnách

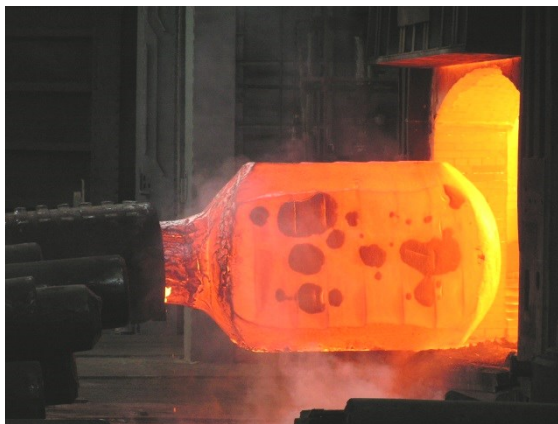
Pokud se liší od pecí ve válcovnách, tak je to způsobeno mnohem širším hmotnostním rozmezím ohřívání polotovarů (od několika dekagramů do 250 t) a značně proměnlivým charakterem výroby (kusová, malosériová až hromadná výroba).

Pec s vodorovnou nístějí (viz **obr. 8.30.**).

Ohřev drobných polotovarů pro volné a zápusťkové kování. Může mít více komor, z nichž se jedna používá pro předehřev polotovarů.

Pec s výjezdnou nístějí (bogie-hearth f.) (viz obr. 8.31.).

Nezbytné vybavení těžkých kováren, kde slouží k ohřevu ingotů a předkovků. Nístěj má podobu masivního, žáruvzdorným zdivem chráněného vozu (proto též název vozová pec).



Obr. 8.30. Pec o vodorovnou nístějí - Vítkovice Heavy Machinery



Obr. 8.31. Pec s výjezdnou nístějí



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Pec se dělí podle účelu. Ve válcovnách se používají hlubinné, strkací a krokové pece. Nejdražší ale nejšetrnější k polotovarům jsou pece krokové (menší uvolňování okují, snadné vyprázdnění pece, pružná regulace, menší poškození povrchu a všestranný ohřev. Ve válcovnách trubek jsou zastaralé pokulovací pece nahrazovány peci s otočnou nístějí. V kovárnách pro lehčí výkovky používáme pece s vodorovnou nístějí a pro těžší výkovky pece s výjezdnou nístějí.



Otázky k probranému učivu

1. Které protichůdné jevy musíme uvážit při stanovení horní tvářecí teploty?
2. Jak ovlivňuje obsah uhlíku horní tvářecí teplotu a interval tvářecích teplot?
3. Podle jakých zásad se volí dolní tvářecí teplota?
4. Jak se liší dolní tvářecí teplota u podeutektoidních a nadeutektoidních ocelí?
5. Nadeutektoidní oceli se tváří ve dvoufázové oblasti, jaké? Jak tato skutečnost ovlivňuje tvařitelnost?
6. Jaké znáte způsoby vedení tepla? Které z nich se uplatňují při ohřevu před tvářením?
7. Definujte součinitel tepelné vodivosti? Vysvětlete jednotku.
8. Jak součinitel tepelné vodivosti ovlivňuje ohřev kovů?
9. Definujte měrnou tepelnou kapacitu? Vysvětlete jednotku.
10. Jak měrná tepelná kapacita ovlivňuje ohřev kovů?
11. Napište vztah mezi hustotou a hmotností materiálu.
12. Jak hustota ovlivňuje ohřev kovů?
13. Co je to teplotní roztažnost kovů? Jak ovlivňuje technologii ohřevu?

14. Co je příčinou vzniku tepelných pnutí při ohřevu kovů?
15. Jak souvisí tepelné pnutí s teplotní roztažností a tepelnou vodivostí?
16. Proč jsou legované oceli náchylnější na porušení soudržnosti při ohřevu?
17. Jaké znáte způsoby ohřevu?
18. Nakreslete křivku ohřevu nízkolegované oceli a vysokolegované oceli.
19. Co jsou to okuje a kdy vznikají?
20. Jak ovlivňují okuje následné tváření materiálu?
21. Čím se projevuje oduhličení oceli?
22. Jak z mikrostrukturního snímku eutektoidní oceli poznáte, že došlo k oduhličení?
23. Co se v oceli děje při přehřátí?
24. Jak souvisí velikost zrna s tvařitelností?
25. Jak můžete uzdravit ocel v prvním stádiu přehřátí?
26. Co je to spálení oceli, jak k němu dochází?
27. Jaké znáte způsoby ohřevu. Uveďte jejich výhody a nevýhody?
28. Jaký je rozdíl mezi přímým a nepřímým odporovým ohřevem?
29. Z jakého materiálu se vyrábějí topné spirály? A proč vlastně mají podobu spirály?
30. Jaké polotovary se hodí pro přímý odporový ohřev?
31. Objasněte princip indukčního ohřevu.
32. Kdy se používá ohřev v ochranném prostředí?
33. Jak dělíme ohřívací pece podle účelu?
34. Jak přišly ke svému jménu a na co se používají hlubinné pece?
35. Jaké jsou výhody a nevýhody strkacích pecí?
36. Jak je zajištěn pohyb polotovarů ve strkacích pecích?
37. Které pece lze souhrnně označit jako průběžné?
38. Jaké jsou výhody a nevýhody krokových pecí?
39. Vysvětlete princip pokulovací pece.
40. Jaký typ pece nahradil ve válcovnách trubek pokulovací pec?
41. Jaké typy pecí se používají v kovárnách?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., *Tváření oceli*. SNTL, Praha 1988, ISBN 04-408-88

RÉDR, M., PŘÍHODA, M., *Základy tepelné techniky*. SNTL, Praha 1991, ISBN 04-413-91

SOMMER, B., *Technologie tváření kovů*, skripta VŠB-TU Ostrava, 2003, 2. vydání, ISBN 80-248-0263-5

9. Rozdělení válcovacích tratí



Čas ke studiu: 180 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Rozdělit válcovací tratě podle různých hledisek.
- Popsat a nakreslit schéma válcovací tratě.
- Orientovat se v moderních trendech při stavbě válcovacích tratí.



Výklad

9.1. Úvod



Pojmy k zapamatování

Válcovací trať, válcovací stolice, spojitá výrobní linka, pracovní a opěrný válec, jednosměrné a vratné válcování, duo, trio, kvarto, sexto, dvanácti a dvacetí válcová stolice, universální stolice

Hlavní výrobní jednotkou válcovny je válcovací trať (VT), která zahrnuje ucelený vzájemně provázaný soubor strojů a strojních součástí, dopravních a manipulačních mechanismů, pecí a ohřívacích systémů, zařízení pro chladnutí, rovnání a povrchovou úpravu vývalků.

Rozdělení válcovacích tratí podle:

- druhu vývalku a průměr pracovních válců,
- konstrukce válcovací stolice a počet válců ve stolici,
- způsob otáčení válců,
- uspořádání válcovacích stolic.

9.1.1. Rozdělení VT podle konstrukce válcovací stolice a počet válců ve stolici

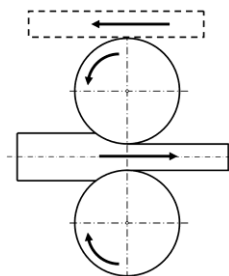
Konstrukce válcovací stolice se volí v závislosti na počtu pracovních i opěrných válců. Válcovací stolice mohou mít válce uloženy vodorovně, svisle a šikmo.

Dvouválcové stolice — dua

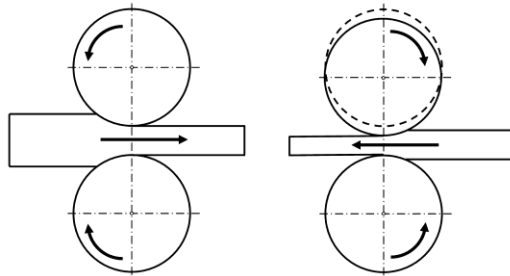
Válcovací stolice tohoto druhu jsou nejrozšířenější. Mají dva vodorovně uložené válce. Válcovacím motorem jsou hnány buď oba válce (horní i spodní), nebo pouze jeden válec (obvykle spodní a horní válec se otáčí vlivem tření o válcovaný provalek). Podle směru otáčení válců jsou stolice **jednosměrné**, nebo **vratné** — reverzní.

U jednosměrné stolice duo (viz **Obr. 9.1.**) mají oba válce stále stejný směr otáčení. Provalek vchází mezi válce vždy z přední strany stolice a po každém průchodu se musí vracet zpět na přední stranu.

U vratné stolice duo se směr otáčení válců mění po každém průchodu provalku mezi válci (viz **Obr. 9.2.**). Je velmi rozšířená a používá se pro válcování ingotů na předvalky, pro válcování těžkých profilů a tlustých plechů.



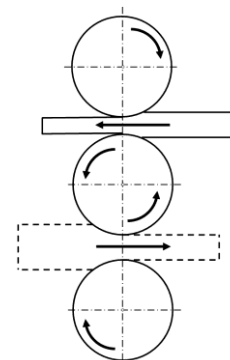
Obr. 9.1. Jednosměrné duo



Obr. 9.2. Schéma válcování na vratném duu

Tříválcové stolice — Tria

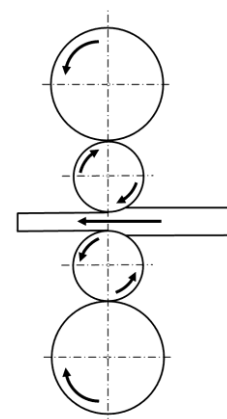
Jsou to stolice se třemi vodorovně uloženými válci. Válce v těchto stolicích se otáčejí **stále jedním směrem** (viz **Obr. 9.3.**). Jsou značně rozšířeny, protože v těchto stolicích lze válcovat s větším počtem kalibrů než u stolic duo. Provalek se válcuje v jednom směru mezi spodním a středním válcem a v opačném směru mezi středním a horním válcem. U tria je poháněn přímo pevně uložený střední válec. Spodní a horní válec jsou poháněny převodem a zpravidla stavitelné. Slouží pro válcování tvarových vývalků a sochorů kalibrovánými válci.



Obr. 9.3. Trio

Čtyřválcové stolice — Kvarta

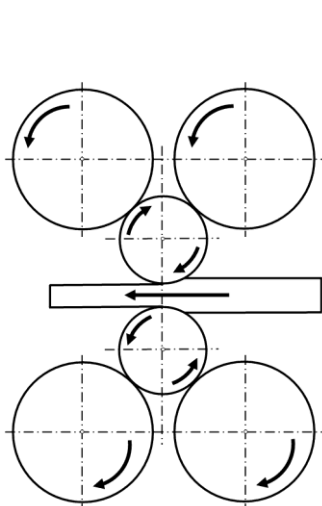
Pracovní stolice má čtyři vodorovné válce uložené v jedné svislé rovině (viz **Obr. 9.4.**). Dva válce (vnitřní) jsou pracovní a dva válce (vnější) jsou opěrné. Význam opěrných válců je v možnosti použít vyšších válcovacích sil a snížit průhyb pracovních válců. Malé průměry pracovních válců dovolují kromě většího prodloužení provalku i možnost dosáhnout příznivějších rozměrových odchylek tloušťky. Pracovní stolice válce kvarto jsou hnané, opěrné válce vlečené. Stolice kvarto se používá pro válcování plechu, pásové oceli za tepla i za studena. Používá se jako jednosměrná nebo vratná válcovací trať.



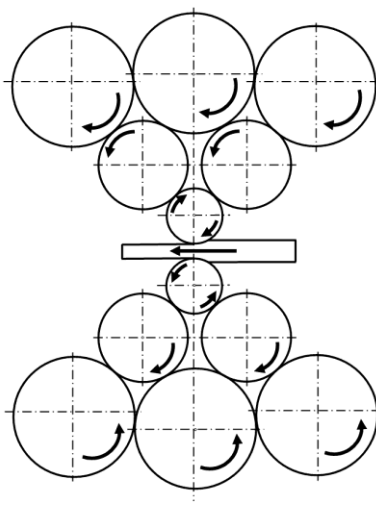
Obr. 9.4. Kvarto

Mnohoválcové stolice

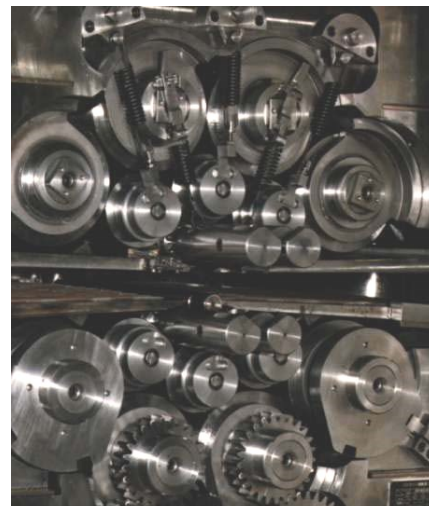
Staví se s šesti (viz **Obr. 9.5.**), sedmi, dvanácti (viz **Obr. 9.6.**) a dvaceti (viz **Obr. 9.7.**) vodorovně uloženými válci. U všech uvedených stolic jsou vždy jen dva válce pracovní, ostatní opěrné. Poháněny bývají zpravidla pracovní válce a opěrné jsou vlečeny. Používají se pro válcování velmi tenkých plechů, pásů a fólií.



Obr. 9.5. Šesti válcová stolice (sexta)



Obr. 9.6. Dvanácti válcová stolice

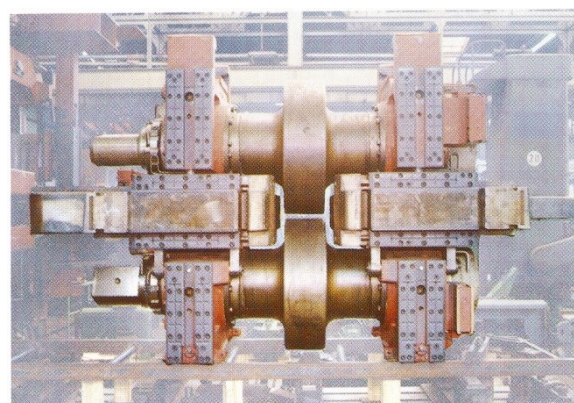


Obr. 9.7. Dvaceti válcová stolice (Kobelco)

Univerzální stolice

Tyto stolice mají kromě vodorovně uložených válců ještě **válce uložené svisle**. Svislé válce přechují provalet z bočních stran, čímž se vytvoří boční stěny, přesné úhly a ostré hrany. Bývají uloženy z přední strany stolice, méně již ze zadní strany, ale také i z obou stran. Univerzální stolice se používají pro válcování bram, široké a tvarové oceli.

Pro válcování širokopřírubových nosníků jsou svislé válce uloženy ve stejné rovině s osami válců uložených vodorovně. Poháněné jsou pouze válce vodorovné (viz **Obr. 9.8.**).



Obr. 9.8. Univerzální stolice pro válcování širokopřírubových nosníků

Stolice speciální konstrukce

Mají šikmo uložené válce a používají se při výrobě bezešvých trubek

9.1.2. Rozdělení VT podle způsobu otáčení válců

- **Jednosměrné** – válce se stále otáčejí jedním směrem, což znamená jednodušší pohon s uplatněním setrvačníku (střední a jemná tvarová ocel, dráty, pásy).
- **Vratné** – (reverzní), směr otáčení válců se mění po každém průchodu, což klade zvýšené požadavky na pohon (plechy, střední až těžké tvarové vývalky).

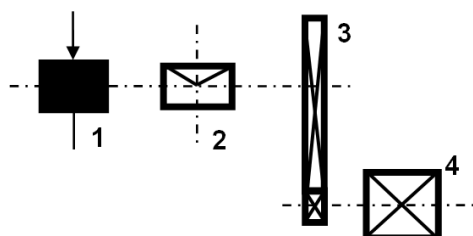
Rozdělení VT podle uspořádání stolic

VT s jednou stolicí

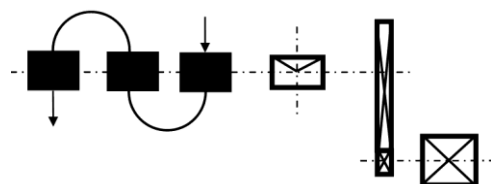
Válcovací trať se skládá z pracovní stolice (1), stolice ozubených válců (2), reduktoru (3) a motoru (4) (viz **Obr. 9.9.**). K traťím tohoto druhu patří tratě předvalkové (bloková, slabing), tratě duo, trio i kvarto pro válcování plechu, univerzální tratě atd.

VT s pracovními stolicemi v ose

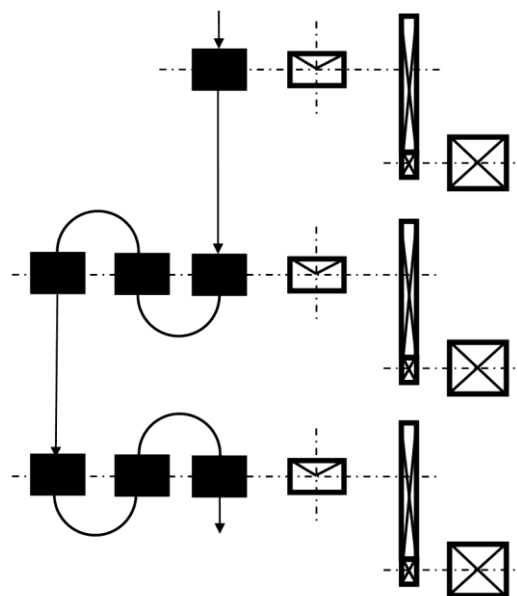
Pracovní stolice těchto tratí jsou uspořádány v jednom (viz **Obr. 9.10.**), dvou, třech (viz **Obr. 9.11.**) i více pořadích, přičemž každé pořadí má samostatný pohon nebo v některých případech mají i dvě pořadí společný pohon od jednoho motoru. Tyto tratě se používají pro válcování drátu, tenkých plechů a také pro válcování tvarových vývalků.



Obr. 9.9. VT s jednou stolicí



Obr. 9.10. Se stolicemi v ose (v jednom pořadí)



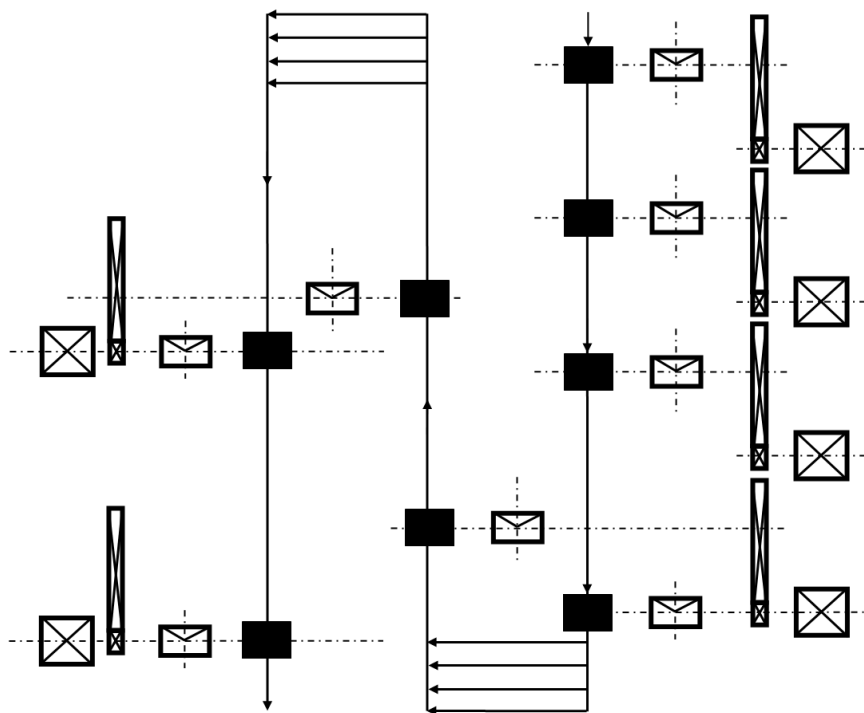
Obr. 9.11. Se stolicemi v ose (ve třech pořadích)

VT průběžné

U těchto tratí prochází provalek válcovací stolicí pouze jednou s volným výběhem před vstupem do další stolic. Podle toho musí být postaveno tolik jednosměrných válcovacích stolic, kolik je třeba průchodů k vyválnování hotového vývalku. Pro zkrácení délky válcovací tratě se pracovní stolice stavějí v několika **paralelních** (přesazených) řadách, jak je vidět u přesazené tratě typu **cross-country** (viz **Obr. 9.12.**) nebo v **šachovnicovém provedení**. Tyto tratě se pro svou vysokou výrobnost používají k válcování tvarových vývalků.

VT polospojité

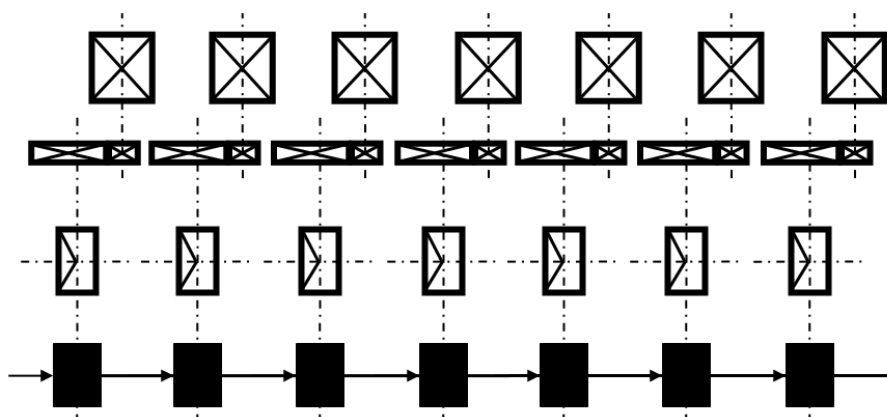
Tyto tratě se skládají ze dvou skupin stolic: ze spojitěho pořadí - I a II a průběžného uspořádání - III (mnohdy také uspořádání pracovních stolic v ose - vedle sebe). V první skupině (I a II) se provalek válcuje spojitě a současně se nachází v několika stolicích. Ve druhé skupině stolic (III) probíhá válcování ve volných smyčkách. Polospojité tratě se používají pro válcování jemných tvarových vývalků a drátu.



Obr. 9.12. VT přesazená (cross-country)

VT spojité

Jsou vyvrcholením vývoje válcovacích tratí. Pracovní stolice těchto tratí jsou uspořádány **za sebou** (viz Obr. 9.33.). Vzdálenost mezi stolicemi je menší než délka válcovaného provačku, takže se provaček současně válcuje v několika stolicích. Spojité válcovací tratě mohou být hnány buď společným motorem převody ozubených kuželových kol, nebo má každá stolice vlastní motor. Spojité válcovací tratě se používají pro válcování sochorů, plechů, pásů a také pro válcování středních a jemných tvarových vývalků. Použití automatizačních prvků během válcovacího procesu umožňuje velkou výkonnost. Na těchto tratích se dosahuje vysokých válcovacích rychlostí (až 50 m.s^{-1}).



Obr. 9.13. VT spojitá

9.1.3. Rozdělení VT podle druhu vývalků a průměru pracovních válců

□ VT pro válcování předvalků a tvarových vývalků



Předvalky

Bloky – čtvercového nebo přibližně čtvercového průřezu ($b/h \leq 1,4$), se zaoblenými hranami a straně čtverce od 140 do 360 mm

Sochory – čtvercového nebo přibližně čtvercového průřezu ($b/h \leq 1,4$), se zaoblenými hranami a straně čtverce od 40 do 130 mm

Bramy – obdélníkového průřezu ($b/h \geq 1,4$), o šířce $b = 400$ až 1500 mm a tloušťce $h = 110$ až 350 mm

Ploštiny – obdélníkového průřezu ($b/h \geq 1,4$), v podstatě lehčí bramy, o šířce $b = 180$ až 350 mm a tloušťce $h = 6$ až 30 mm

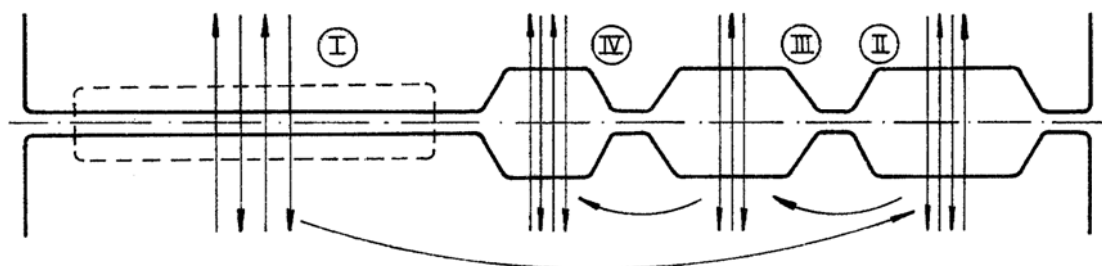
Předvalky pro bezešvé trubky a výkovky v podobě sochorů kruhového průřezu a průměru $d \leq 320$ mm.

- Blokovna (blooming mill) a slabingy – těžké předvalkové tratě, $D = 1\,000$ až $1\,350$ mm, na těchto tratích se válcují z ingotů nebo PLP předvalky (bloky, bramy, tvarové předvalky).
- Sochorové tratě, $D = 450$ až 800 mm, vývalky jsou určeny pro další zpracování na středních a jemných tratích.
- Těžké (vratné provedení, $D = 700$ až 950 mm, sortiment: kolejnice, nosníky, pražce, štetovnice atd.).
- Hrubé ($D = 650$ až 900 mm, sortiment: hrubé tyčové a tvarové vývalky).
- Střední ($D = 400$ až 600 mm, sortiment: střední tyčové a tvarové vývalky).
- Jemné ($D = 250$ až 400 mm, sortiment: jemné tyčové a tvarové vývalky).

Blokovny

Pro válcování na blokovně je příznačné postupné zhutňování hrubé dendritické struktury tělesa velkého průřezu poměrně malými úběry v úzkém rozmezí vysokých tvářecích teplot při výrazně nerovnoměrné deformaci. Válcovací pochod se rozděluje na dvě fáze. V první fázi jemnějšího tváření nastává především rozrušení hrubé lící struktury a její zhutňování v důsledku svaření vnitřních necelistvostí.

Válce blokovny mají vesměs 3 až 5 skříňových kalibrů a hladkou, nekalibrovanou část (viz **Obr. 9.14.**), takže v každém z těchto kalibrů se válcuje několika průchody, přičemž velikost úběru se mění stavěním horního válce.



Obr. 9.14. Postup válcování na blokovně

Slabiny

Slabing je méně obvyklá předvalková trať jednoúčelového významu, určená výlučně k válcování bram z ingotů. Válcuje se na univerzální válcovací stolici, která má kromě páru vodorovných válců ještě pár válců svislých, umístěných před vodorovným duem nebo za ním, přičemž všechny válce jsou hladké, bez kalibrů.

Sochorové tratě

Sochorové tratě navazují bezprostředně na blokovnu, a to s využitím entalpie bloků o straně 300 až 400 mm. Válcují se na nich především sochory čtvercového a kruhového průřezu, které se dále používají jako výchozí polotovary pro válcování tvarových vývalků a drátu. V menší míře se na sochorových tratích válcují i ploštiny. Starší tratě se stavěly v otevřeném provedení, kdežto moderní tratě se vyznačují spojitým uspořádáním s těmito charakteristickými znaky:

- střídání válcovacích stolic s vodorovnými a svislými válci, jímž se vylučuje mechanicky i časově náročné hranění provalku mezi jednotlivými stolicemi,
- samostatný pohon každé válcovací stolice s automatickou regulací otáček, což zjednodušuje seřízení a kalibraci válců,
- vyšší rozměrová přesnost sochorů,
- rozšíření sortimentu o kruhové sochory,
- zavedení automatického zjišťování a odstraňování povrchových a vnitřních vad jak při válcování, tak i v úpravě sochorů,
- nucené chlazení sochorů z doválcovací teploty přispěje k zachování plynulého toku materiálu a k omezení nároků na skladovací plochy.

S výrobou plynule litých sochorů bude klesat význam sochorových tratí, které si podrží své opodstatnění jen v závodech s širokým výrobním programem tvarových vývalků a dále v závodech, které zpracovávají legované oceli vyžadující vysoký stupeň protváření.



Tvarové vývalky

1. tvarové vývalky jednoduchého tvaru:

- a) kruhová ocel $d = 5,5$ až 210 mm (dodávaná v tyčích i ve svitcích),
- b) čtvercová ocel o straně $a = 6$ až 150 mm (tyčová i ve svitcích),
- c) plochá ocel o šířce $b = 11$ až 200 mm a tloušťce $h = 5$ až 60 mm,

2. tvarové vývalky složitějšího tvaru:

- a) I a U ocel, štetovnice,
- b) kolejnice, pražce, drobné kolejivo,
- c) úhelníky rovnoramenné i nerovnoramenné, T ocel,
- d) šestihránná ocel o straně 7 až 72 mm (tyčová i ve svitcích),

3. tvarová ocel pro zvláštní účely (důlní profily, tyče na autokola, ocel roštnicová, úsečová, okenní, obručová, betonářská atd.).

9.1.4. Válcování těžkých tvarových vývalků

Patří k nim kolejnice o metrové hmotnosti nad 20 kg.m^{-1} ocel ($h = 180$ až 500 mm), U ocel ($h = 160$ až 400 mm) rovnoramenné a nerovnoramenné úhelníky, štetovnice, širokopřírubové nosníky aj.

Válcují se na těžkých válcovacích tratích o průměru válců 700 až 900 mm v otevřeném nebo přesazeném uspořádání.

Na zvláštních univerzálních tratích jejichž stolice mají průměr válců $1\,100$ až $1\,450 \text{ mm}$, se válcují širokopřírubové nosníky s rovnoběžnými přírubami ($h = 160$ až $1\,000 \text{ mm}$, $b = 490 \text{ mm}$). Širokopřírubové nosníky se vyznačují při stejných užitných vlastnostech až o 15% nižší metrovou hmotností, což přináší i nemálo výhod při jejich konstrukčním uplatnění (viz **Obr. 9.15.**)

Většina technologických operací je na soudobých těžkých tratích mechanizována, takže jejich výkonost dosahuje až $1,5 \text{ Mt}$ ročně.



Obr. 9.15. Širokopřírubové nosníky připravené na stavbu mostní konstrukce

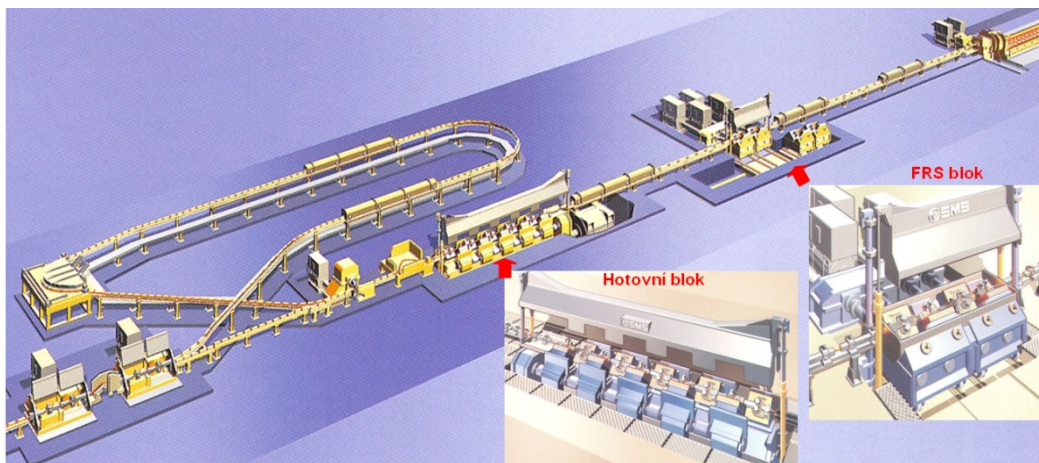
9.1.5. Válcování hrubých, středních a jemných tvarových vývalků

Polotovarem jsou válcované nebo plynule lité bloky a sochory v těchto rozměrech:

- jemné tratě: 50×50 až 125×125 , $l = 9\,000$ až $10\,000 \text{ mm}$,
- střední tratě: 80×80 až 170×170 , $l = 6\,000$ až $9\,000 \text{ mm}$,
- hrubé tratě: 150×150 až 300×300 , $l = 4\,500$ až $6\,000 \text{ mm}$.

□ VT pro válcování drátu

Drát se válcuje na spojitě válcovací trati pro válcování drátu (finální průměr drátu $d = 5$ až 20 mm , průměr válců $D = 200$ až 300 , u hotovnic i 150 mm). Stolice jsou nejčastěji duo. Uspořádání jednožilové VT je na **Obr. 9.16.**



Obr. 9.16. Spojitá jednožilová drátotrat'

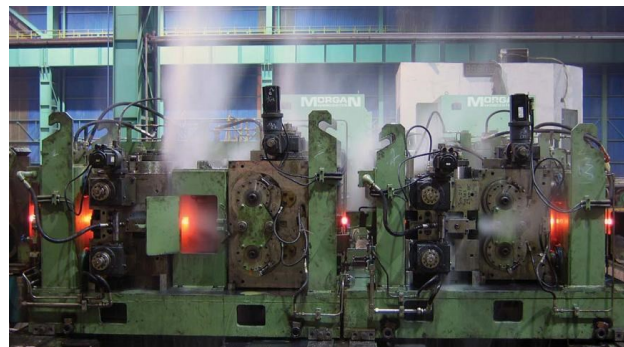
Kontislitky a sochory jsou po ohřevu v krokové peci válcovány na přípravném, předválecím a středním pořadí. Následně je provalek přiváděn pomocí smyčky do CL dvoustolice s letmo uloženými válci a pak do hotovního bloku. Pro zlepšení tolerancí drátu je na konci deformačního cyklu zařazen FRS blok (Flexible Reducing Sizing).

Přípravné, předválecí a střední pořadí

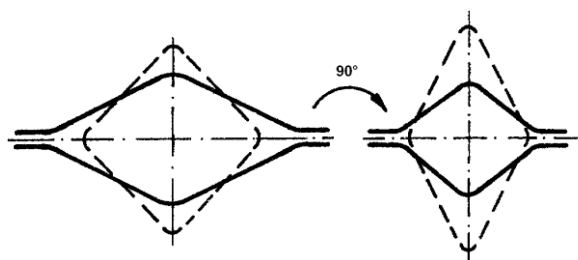
V současné době se v těchto pořadích nejčastěji používají duo stolice, v uspořádání buď horizontál-vertikál (viz **Obr. 9.17.**), nebo jsou stolice pouze horizontální a dochází ke zkručování provalku (viz **Obr. 9.18.**). V předválcovacím pořadí převládají skříňové kalibry se zaoblenými rohy. Ve středních pořadích jsou převážně kalibrační řady kosočtverec-čtverec (viz **Obr. 9.19.**) a čtverec-ovál (viz **Obr. 9.20.**).



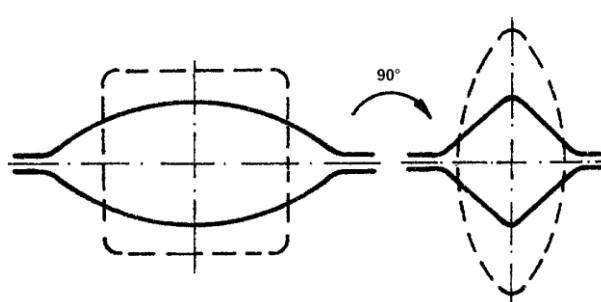
Obr. 9.17. Přípravné pořadí –HV stolice (Emirates steel)



Obr. 9.180. Střední pořadí se zkručováním provalku (Morgan)



Obr. 9.19. Kalibrační řada kosočtverec-čtverec



Obr. 9.20. Kalibrační řada čtverec-ovál

Hotovní pořadí - válcovací bloky

Dříve se pro doválcování pořadí používaly systémy horizontálního-vertikálního válcování, ale ty byly limitovány výstupní rychlostí. Řešením byl vývoj válcovacích bloků. Jedná se pevně spřažené stoličky, poháněné jedním pohonem. Postupně byly vyvinuty tyto systémy **Koks**, **Schloeman** a v dnešní době nejpoužívanější **Morgan**.

Řízené ochlazování drátu

Důvodem k vývoji a zavedení řízeného ochlazování byl přechod od válcování drátu na otevřených tratích s výstupní rychlostí asi 9 m.s^{-1} k válcování na spojitých tratích s výstupní rychlostí nad 30 m.s^{-1} . Tím se zvýšily doválcovací teploty z 850°C asi na $1\,000^\circ\text{C}$.

Zvýšení doválcovacích teplot a hmotnosti svitků by způsobilo vznik hrubozrnné, nerovnoměrné struktury a nadměrnou tvorbu okují. Hlavní požadavky na řízené ochlazování:

- snížení množství okují při jejich lepší mořitelnosti,
- dosažení vhodné struktury s vysokou tvařitelností při tažení za studena.

□ VT pro válcování tlustých plechů

Tlusté plechy

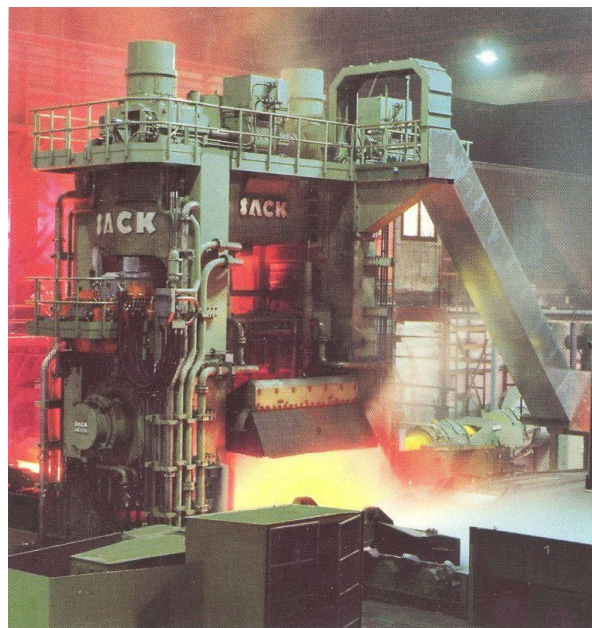
Hranice mezi tlustými a tenkými plechy je podle tloušťka 3 mm. Podíl tlustých plechů ve většině průmyslově vyspělých zemí stoupá. V poslední době se zvětšuje spotřeba tlustých plechů zejména na stavbu lodí, dálkové energovody, klasickou a jadernou energetiku. Tloušťka je běžná v rozmezí od 3 do 60, popř. 100 mm. Plechy větších tlouštěk se vyrábějí zpravidla podle zvláštních dodacích podmínek. Pro výrobu velkokapacitních jednotek v chemickém průmyslu a zařízení komponent jaderných elektráren se dodávají plechy do tlouštěk 300 mm. Nejmenší válcované šířky jsou zpravidla 1 000 až 2 000 mm, největší pak 5 300 mm. Je snaha válcovat vývalky větších šířek a užší plechy vyrábět podélným dělením. Průměrná délka plechu je v rozmezí 20 až 30 m. Na novějších tratích dosahují délky až 50 m.

Výrobní zařízení

Tlusté plechy se válcují na tratích s jednou stolicí nebo dvěma stolicemi za sebou (tandemové uspořádání), anebo na polospojitéch a spojitých širokopásových tratích, jejichž výrobní možnosti jsou však omezeny na lehčí plechy ($h < 35$ mm, $b < 2\,200$ mm). Stolice, a tím i trať pro válcování tlustých plechů se charakterizuje délkou těla válce L .

Jednostolicové tratě staršího provedení jsou vybaveny vratnou stolicí duo nebo trio, vyznačují se nižší roční výrobností (30 až 150 kt), omezeným výrobním programem (plechy menší tloušťky a šířky), sníženou povrchovou jakostí plechu (předválcování i doválcování se děje mezi týmiž válci) a nerovnoměrnou tloušťkou plechu po šířce (především u stolic duo následkem průhybu válců). Novější jednostolicové tratě se vybavují výlučně stolicí kvarto.

Příznačným rysem moderní stolice kvarto je vysoká tuhost, jíž se dosahuje velkým průřezem stojiny stojanu, velkým průměrem opěrných válců, popřípadě předpětím stojanů. Velká válcovací síla pak umožňuje dosáhnout větších průchodových úběrů i za nižších doválcovacích teplot, což usnadňuje zavedení řízeného válcování při vysoké výkonnosti tratě. Na **Obr. 9.21.** vidíte příklad válcovacích stolic firmy SMS Sack, 3,7 m stolice Thyssen Stahl, Duisburg.



Obr. 9.21. 3,7 m kvarto (Thyssen Stahl, Duisburg)

Dvoustolicové tratě jsou investičně náročnější, ale vyznačují se vysokou roční výrobností (až 2,5 Mt) a všestranně lepšími vlastnostmi plechu (vyšší povrchová jakost, rovnoměrnější tloušťka, dokonalejší protváření jádrové oblasti). Prvá stolice (**předválcovací**) je duo, trio nebo (dnes výlučně) kvarto, druhá stolice (**hotovní**) je zásadně kvarto.

Zvláštnosti při válcování tlustých plechů

Válcování tlustých plechů se vyznačuje těmito zvláštnostmi:

- velký povrch vývalku vede, především u tenkých plechů ($h < 15$ mm), k rychlejšímu chladnutí během válcování, takže doválcovací teploty mohou v některých případech klesnout těsně pod A_{r1} ,

- válcování na hladkých válcích s tvrdým povrchem má příznivý vliv na povrchovou jakost plechu,
- válcuje se bez hranění, což zvyšuje nebezpečí zaválcování okují a tvorby vad na bočním povrchu;
- vzhledem k velké šířce plechu je **šíření takřka zanedbatelné**,
- nerovnoměrný průběh chladnutí povrchu a jádra, především u tlustších plechů ($h > 40$ mm),
- nerovnoměrná deformace po tloušťce plechu může vést k menšímu protváření jádrové oblasti,
- následkem velké stykové plochy a zvýšeného deformačního odporu vzniká při válcování značná válcovací síla proměnlivé velikosti, takže dosažení rovnoměrné tloušťky plechu vyžaduje mimořádná opatření (opěrné válce, klenutí válců, řízený protiohyb válců aj.).

□ VT pro válcování pásů

Pásky jsou rozhodujícím výrobkem z plochých vývalků, výrobkem, který se v převážné části dále zpracovává válcováním za studena (75 %) a ve zbývající části (25 %) se používá přímo v podobě plechů, pruhů a svitků, které se získávají podélným a příčným dělením za tepla vyválcovaných pásů.

Z jakostního hlediska představují hlavní podíl (až 85 %) pásky z nízkouhlíkových ocelí (0,25 hm. % C) pro rozmanité konstrukční účely, obalovou techniku a hluboké tažení, zatímco zbývající podíl představují pásky s obsahem uhlíku vyšším než 0,25 hm. %) a z legovaných ocelí (dynamové, transformátorové, korozivzdorné aj.).

Výrobní zařízení

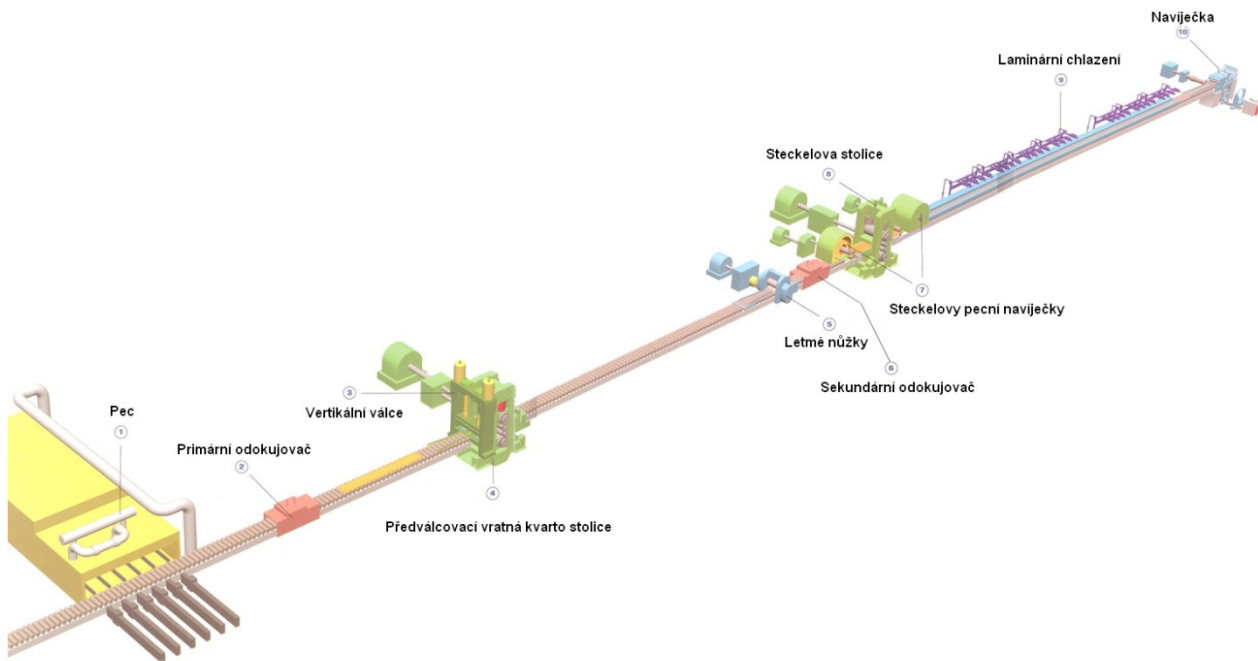
Pro válcovací tratě se volí nejčastěji uspořádání **spojité** nebo **polospojité**, čímž se dosahuje nejvyšší výrobnosti (viz **tabulka 9.1.**). V některých případech se válcuje na stolicích zvláštní konstrukce, jako je např. **Steckelova** nebo **planetová stolice**.

Steckelova válcovací trať

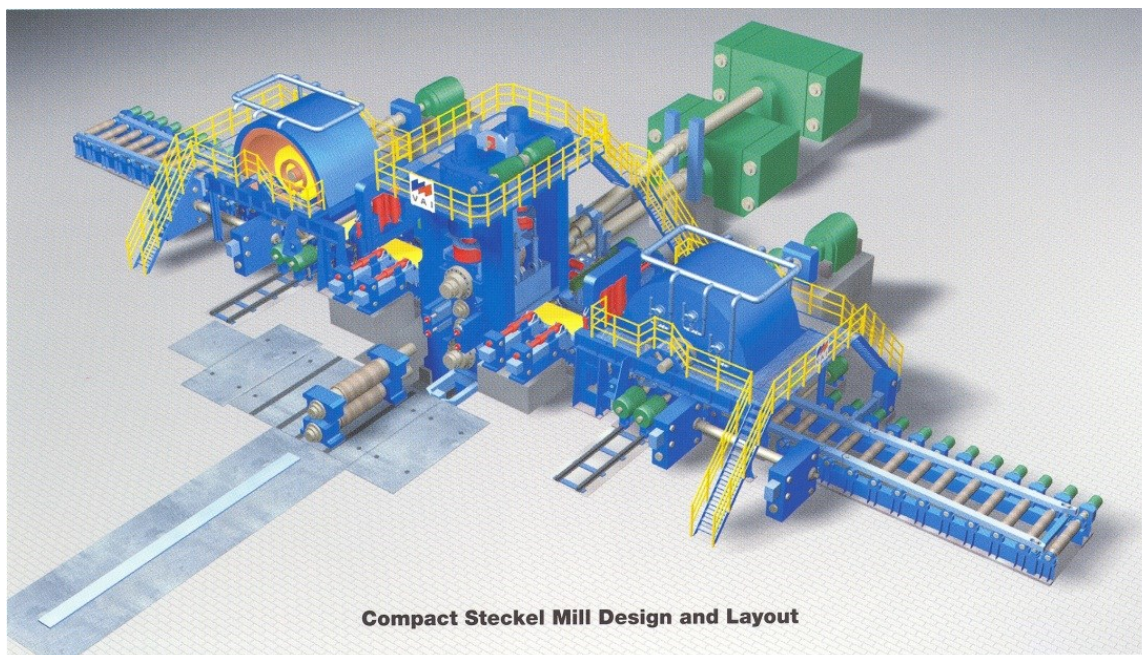
Schéma tratě je na **Obr. 9.22**. Po výstupu z pece (1) prochází brama odokujovačem (2) a vstupuje do předválcovacího pořadí (4) s vertikálními válci (3), po rozválcování putuje provalek přes letmé nůžky (5) a sekundární odokujovač (6) na Steckelovu stolicí (8) (viz **Obr. 9.23.**) se dvěma pecními navíječkami (7), zde se pás se válcuje vratně na kvarto stolicí, pokud tloušťka pásu klesne pod cca 13 mm, tak se rozvalek zavádí do pecních navíječek umístěných před a za stolicí. Minimální tloušťka je cca 1 mm. Po ukončení válcování následuje laminární chlazení (9) a nakonec navíjení svitků (10). Výhodou těchto tratí oproti spojitým válcovnám jsou nižší investiční náklady a možnost válcovat v přesnějším teplotním intervalu. Nevýhody: nižší povrchová jakost pásů, větší opal a nižší výrobnost.

Tabulka 9.1. Základní charakteristiky VT pro válcování pásů

Druh tratě	Výrobnost (Mt.rok ⁻¹)	Válcovací rychlost (m s ⁻¹)	Největší šířka pásu (mm)
Spojité	4 až 6	30	2 200
Polospojité	2	30	2 200
Steckelova	0,6	10	1 800
Planetová	0,25	1	1 320



Obr. 9.22. Steckelova válcovací trať



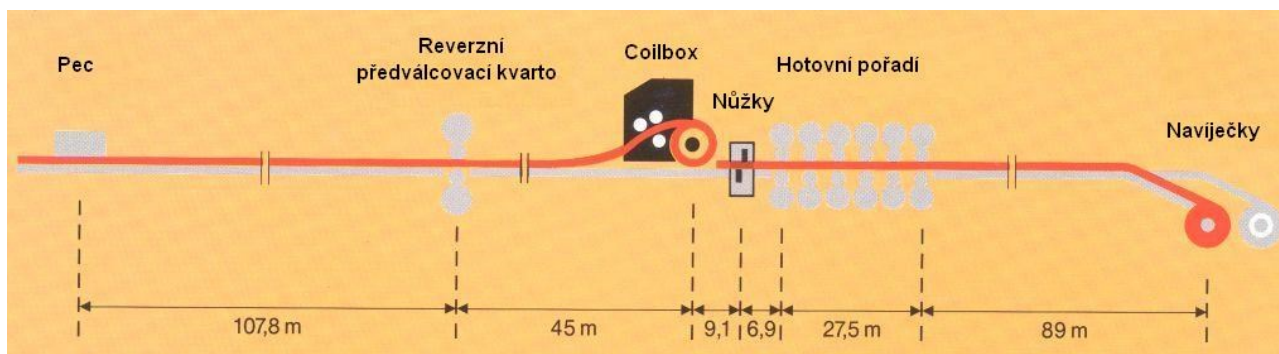
Obr. 9.23. Steckelova válcovací stolice kvarto s pecními navíječkami (VAI)

Spojité válcovna pásů

Spojité válcovny pásů můžeme rozdělit podle kontilitého vstupního polotovaru na válcovny používající tradiční kontilité bramy a válcovny využívající tenké bramy z tloušťkami od 45 do 70 mm. To umožní z výrobního procesu vyřadit předválcovací pořadí.

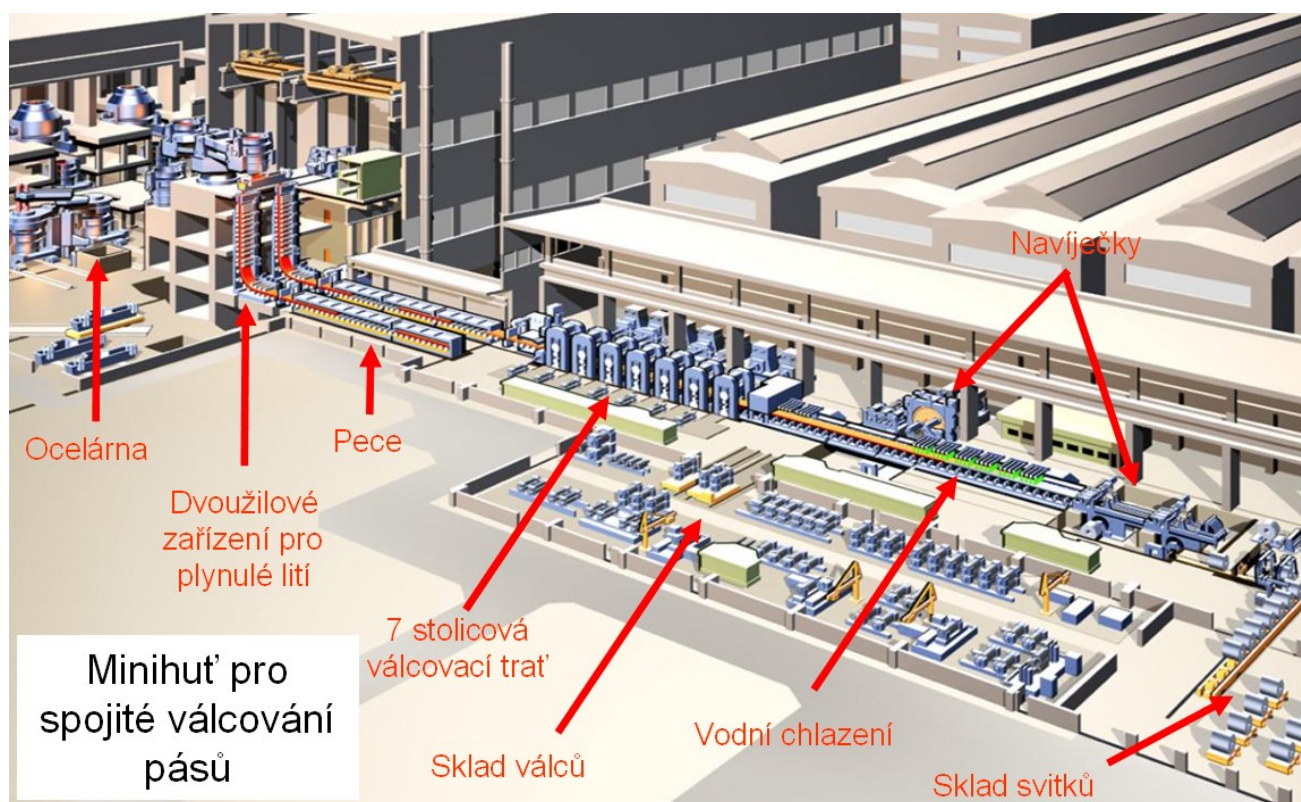
Tradiční spojitá trať začíná pecním úsekem s třemi až pěti ohřívacími pecemi (strkací, dnes lépe krokové). V pěti válcovacích stolicích prvního pořadí (univerzální kvarta) se válcuje průběžně, neboť při větší tloušťce provalku ($h > 25$ mm) nelze dosáhnout spolehlivé regulace tahu mezi jednotlivými stolicemi.

Na výběhový úsek prvního pořadí o délce až 110 m navazuje druhé, hotovní pořadí, a to letnými nůžkami (odstřižení předního konce provalku), vodorovným lamačem okují a šesti stolicemi kvarto v těsném uspořádání. Výběhový úsek lze výrazně zkrátit použitím coilboxu (viz Obr. 9.24.).



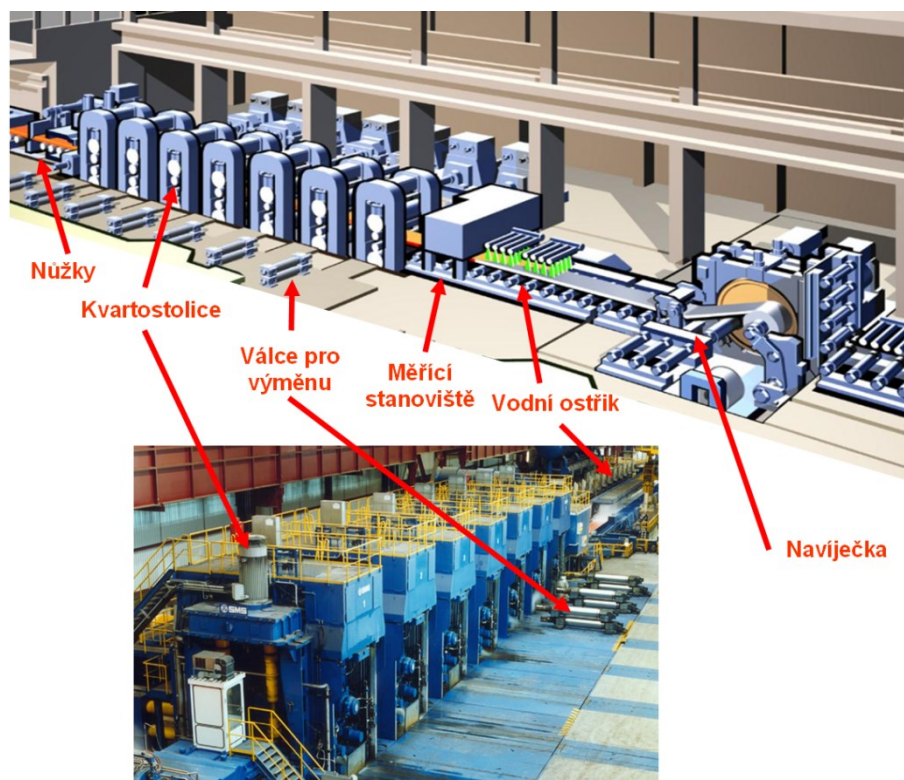
Obr. 9.24. Schéma tratě s předválcovacím pořadím a coilboxem

Moderní spojitá trať firmy SMS Demag. Kombinace sekundární metalurgie, plynulého lité a spojitého válcování pásu za tepla se označuje zkratkou CSP (viz Obr. 9.25.). Zvláštností je lité ve dvou žilách a dvě pece pro vyrovnání teplot.



Obr. 9.25. Spojitá válcovna pásů SMS Demag

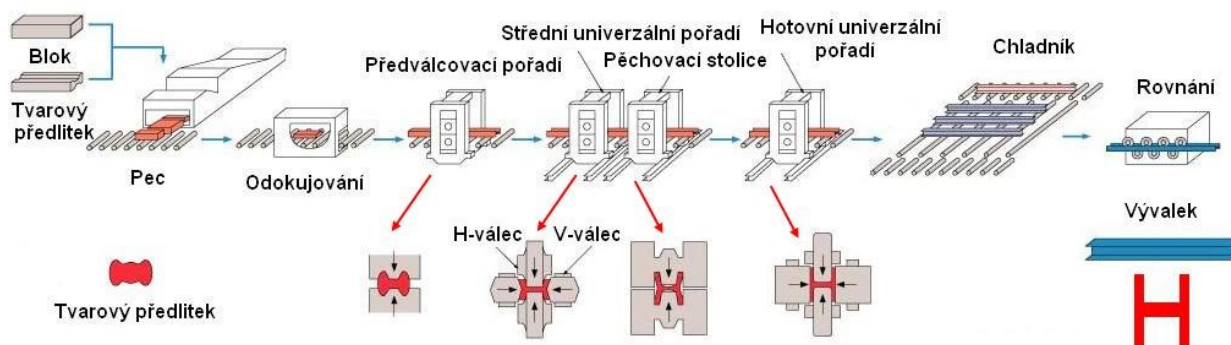
Následuje hotovní pořadí (viz **Obr. 9.26.**), které začíná letnými nůžkami (odstřížení předního konce provalku), následuje sedm stolic kvarto v těsném (tandemovém) uspořádání. Za poslední stolicí je umístěno měřicí centrum. Ve výběhovém úseku, dlouhém 100 až 200 m, je zařízení pro řízené ochlazování (ostřík tlakovou vodou, vodní mlhou či laminární chlazení), na něž navazují svinovačky, a rozsáhlé úpravny. Roční výroba přesahuje 1 Mt/rok.



Obr. 9.26. Spojité 7 stolicové hotovní pořadí válcovny pásů SMS

□ *VT univerzální – pro válcování široké oceli s pravoúhlým průřezem*

Pro zvýšení hospodárnosti výroby se širokopřírubové nosníky I, IPE, IPB válcují na univerzální válcovací trati (trať obsahuje vertikální i horizontální válce). Vstupem pro tyto tratě jsou bloky, nebo tvarové či lité předvalky. Schéma tratě je uvedeno na **Obr. 9.27.** Předválcovací pořadí je tvořeno jednou vratnou stolicí duo. Střední univerzální pořadí a pýchovací duo stolice pracují v tandemu vratně. V hotovním pořadí se provede poslední úběr. Výhodou této tratě je, že lze na středním a hotovním pořadí válcovat na jedné soupravě válců široký sortiment nosníků s různým poměrem šířky přírub k tloušťce stojiny.



Obr. 9.27. Proces válcování širokopřírubového H nosníku

□ VT pro válcování bezešvých trubek

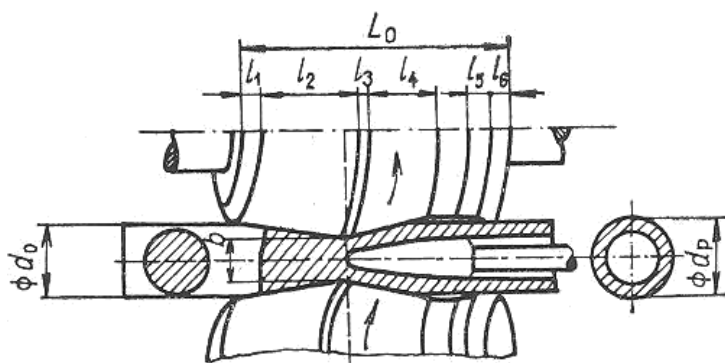
1. Válcování na tratích s poutnickými stolicemi - Mannesmannův způsob

Skládá ze dvou základních operací:

1. kosého válcování tlustostěnných předvalků ve válcové děrovací stolici mimoběžně uloženými válci,
2. poutnického válcování dutého předvalků na poutnické stolici postupem podélného periodického válcování.

Výchozím materiálem pro děrování jsou buď ingoty kruhového průřezu pro trubky o větším průměru než 109 mm, nebo válcované kruhové sochory pro trubky menších průměrů.

Děrování kosým válcováním probíhá tak, že ingot nebo sochor rovnoměrně zahřátý na válcovací teplotu se po nastředění vsune mezi souhlasně se otáčející válce děrovací stolice (viz **Obr. 9.28.**, l_1 délka vyváděcího a středícího kužele, l_2 délka děrovacího kužele, l_3 délka válcovitého přechodu, l_4 délka kužele příčného válcování, l_5 délka kalibračního kužele, l_6 délka hladicí části). Účinkem příčného tlaku válců se v rotujícím tvářeném provalku vyvolávají napětí, která vedou k porušení soudržnosti kovu ve středové části provalku. Pohyb provalku se děje ve šroubovici následkem mimoběžnosti os válců, úhel sklonu válců k ose děrování a bývá v rozmezí 3 až 6°.



Obr. 9.28. Schéma děrování na válcové děrovací stolici



Obr. 9.29. Výstup z děrovací stolice

Vyválcovaný dutý předvalek má přibližně stejný vnější průměr jako výchozí ingot nebo sochor (viz **Obr. 9.29.**). Dutý tlustostěnný předvalek postupuje po válečkovém dopravníku k **poutnické stolici** (pilger mill), kde se po vsunutí trnu kruhového průřezu o délce poněkud větší než dutý předvalek válcuje na hotový rozměr trubky.

2. Válcování na tratích s automatikem - Stiefelův způsob

Základními výrobními operacemi při válcování trubek na tratích s automatikem jsou:

1. děrování kosým válcováním buď na
 - válcové děrovací stolici s mimoběžně uloženými válci, nebo na
 - kotoučové děrovací stolici s letmo uloženými kotouči, nebo na
 - děrovací stolici s hříbovitými letmo uloženými válci (velmi málo používané);
2. podélné válcování dutých předvalků na automatiku na trubky požadované tloušťky stěny;
3. příčné válcování na hladicí stolici pro hlazení vnějšího a vnitřního povrchu trubky;
4. podélné válcování v kalibrovací stolici pro dosažení přesného vnějšího průměru trubky.

Charakteristickým znakem technologie válcování trubek na tratích s automatikem je poměrně značný stupeň deformace na děrovací stolicí, což vyžaduje již protvářený výchozí materiál (kruhové sochory).



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Válcovací tratě se dělí podle různých kritérií. Podle konstrukce stolice rozeznáváme dua, tria, kvart, sexta a víceválcové stolice, podle směru válcování pak jednosměrné a vratné stolice. V ČR je běžné dělení podle typu vývalku: předválcové tratě, tratě pro válcování těžkých, hrubých, středních a jemných tvarových vývalků. Tratě pro válcování drátu, plechů, pásů a trubek. K vybavení válcovací tratě patří: pece dopravníky a manipulátory, odokujovací zařízení, stolice, řízené a volné ochlazování (chladníky), pily a nůžky pro dělení provalků, měřicí zařízení atd.



Otázky k probranému učivu

1. Jaké jsou hlavní kritéria, podle kterých rozdělujeme válcovací tratě?
2. Jaké znáte typy konstrukcí válcovacích stolic?
3. Jak se dělí stolice podle počtu válců?
4. Jaké jsou výhody válcování na duo stolicích?
5. Co je hlavní výhodou stolic trio?
6. K čemu se používají kvarto stolice a v čem vidíte jejich největší výhody?
7. Kolik válců mají a k čemu se používají mnohoválcové stolice?
8. Co je to univerzální stolice? Uveďte příklady použití.
9. Nakreslete schéma válcovací tratě s jednou stolicí.
10. Popište uspořádání tratě se stolicemi v ose.
11. Čím se liší tratě průběžné od spojitých?
12. Popište spojitou válcovací trať? K čemu se používá?
13. Jak dělíme tratě podle druhu vývalků?
14. Jaký je rozdíl mezi blokem a bramou, a blokem a sochořem?
15. Čím se vyznačují moderní sochorové tratě?
16. Jaké znáte tvarové vývalky? Načrtněte z každé kategorie dva zástupce.
17. Co patří do sortimentu válcoven těžkých tvarových vývalků?
18. K čemu se používají širokopřířubové nosníky?
19. Vysvětlete, proč se kolejnice považuje za jeden z nejnáročnějších vývalků?
20. Popište uspořádání tratí pro válcování drátu.
21. Co se myslí pod pojmem řízené ochlazování drátů? Jaké můžeme očekávat benefity při zavedení řízeného ochlazování drátů?
22. Jak jsou definovány tlusté plechy?
23. Jaké typy výrobních zařízení se používají pro válcování tlustých plechů?

24. Proč se při válcování tlustých plechů klade velký důraz na tuhost pracovních stolic?
25. Jaké maximální šířky plechů se vyráběje ve světě a v ČR?
26. Jaké znáte základní typy válcovacích tratí pro válcování pásů za tepla.
27. Jaké se vyrábějí maximální šířky pásů?
28. Popište Steckelovu válcovací trať. Jaké jsou výhody a nevýhody této konstrukce?
29. Čím se liší tradiční a moderní spojitá trať pro válcování pásů za tepla?
30. Co je to colibox?
31. Popište moderní spojitou trať pro válcování pásů za tepla.
32. Jaké minimální tloušťky pásů lze válcovat za tepla?
33. Popište univerzální trať pro válcování širokopřírubových nosníků.
34. Jaké existují způsoby válcování bezešvých trubek?
35. Popište Mannesmannův způsob válcování trubek.
36. Popište způsob válcování trubek na trati s automatikem.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., Tváření oceli. SNTL, Praha 1988, ISBN 04-408-88
- SOMMER, B., Technologie tváření kovů, skripta VŠB-TU Ostrava, 2003, 2. vydání, ISBN 80-248-0263-5
- ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., Tváření oceli. SNTL, Praha 1988, ISBN 04-408-88
- ŽÍDEK, M., KUŘE, F., Válcování, Skripta VŠB, Ostrava, 1983,
- GINZBURG, V., B., *Steel-Rolling Technology, Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel. 1989, ISBN 0-8247-8124-4
- ČIŽIKOV, J., M., *Prokatnoje proizvodstvo*, gntilčcm, Moskva 1958

10. Kování



Čas ke studiu: 180 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Vysvětlit rozdíly mezi volným a zápustkovým kováním pomocí charakteristických znaků obou procesů
- Popsat strukturu a makrostrukturu kovářských ingotů
- Vysvětlit vliv kování na strukturu a vlastnosti výkovků
- Schematicky nakreslit a popsat základní operace volného kování
- Rozlišovat mezi přípravnými a dokončovacími dutinami zápustek a vysvětlí funkci výronku při zápustkovém kování
- Popsat stroje a nástroje pro kování

10.1. Úvod



Pojmy k zapamatování

Volné kování, zápustkové kování, stupeň volnosti tvářeného kovu

Kováním se zpracovává pouze cca 5 % celkové výroby oceli, bez výkovků si však nelze představit současnou výrobu veškerého strojírenství.

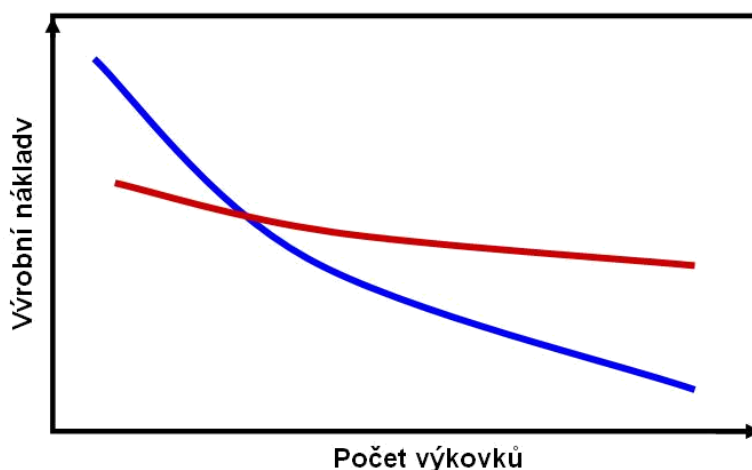
Hmotnost výkovků se pohybuje od desítek gramů (zápustkově kované součásti strojů) až po 600 t (volně kované rotory turbín).

Podle způsobu tváření (**stupňů volnosti** tvářeného kovu) rozlišujeme:

Volné kování kdy pomocí jednoduchých univerzálních nástrojů na lisech a bucharech zhotovujeme tvarově jednoduché součástky. Povrch výkovků bývá nerovný, s velkými přídávky na opracování. Kusová a malosériová výroba.

Zápustkové kování poskytuje výkovky s vysokou rozměrovou přesností a s bezvadným povrchem i při značné složitosti průřezu i u osově nesymetrických součástí. Jedná se vždy o hromadnou až sériovou výrobu. Existuje limitní počet výkovků, od kterého se již nevyplácí vyrobit zápustky.

Není vždy jednoduché rozhodnout, zda danou součást vyrobit jako volný nebo zápustkový výkovek. Graf na **obr. 10.1.** poskytuje vhodné vodítko pro takovou rozvahu. Je tedy zřejmé, že od určitého počtu vyrobených kusů je ekonomičtější používat specializované nástroje – zápustky.



Obr. 10.1. Závislost výrobních nákladů na počtu vyrobených výkovku pro **volné** a pro **zápustkové** kování



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Výkovky jsou velmi důležitým polotovarem pro mnoho odvětví strojírenství. Můžeme je vyrobit buď volným kovááním, nebo s omezením stupně volnosti toku kovu zápustkovým kovááním. Rozhodujícím faktorem je množství výkovku a výrobní náklady.

10.2. Výchozí materiály pro kování



Pojmy k zapamatování

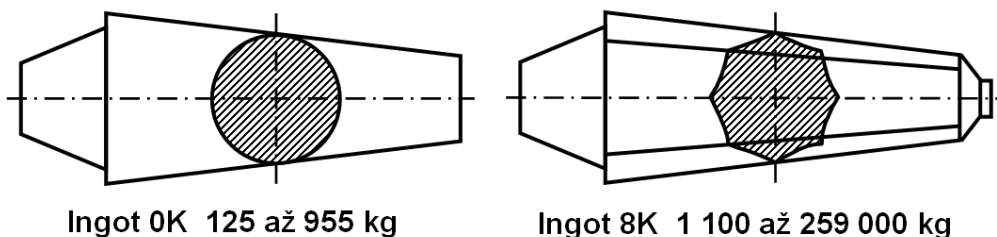
Ingot, licí kůra, dentrity, segregace, vycezeniny, vločky, staženiny (lunkr),

Pro volné kování to jsou: kovářské ingoty, tvářené polotovary (bloky, sochory) a plynule lité předlitky.

Kovářské ingoty se liší od ingotů pro válcování:

- průřezem (většinou mnohoúhelníkový),
- jakostí (uklidněná ocel),
- hmotností (až 600 t).

Kovářský ingot je většinou určen pro konkrétní výkovek (podle hmotnosti viz **obr. 10.2.**). Ostatní výchozí materiály (bloky, sochory, tyče, ...) se musí dělit na tzv. špalky, přířezy či nápichy.



Obr. 10.2. Kovářské ingoty

10.2.1. Struktura kovářských ingotů

Následkem selektivity tuhnutí vzniká v ingotu vždy určitá **fyzikální a chemická nestejnorodost**. Rozlišujeme různé oblasti ingotu:

1. **Licí kůra** podobě velmi tenké vrstvy neuspořádaných rovnoosých dendritů. Následkem rychlého ochlazení neobsahuje žádné segregace a svým chemickým složením se blíží průměrnému složení ingotu.

2. **Pásno sloupkovitých dendritů** výrazně protažených ve směru největšího tepelného toku, tj. kolmo na stěny ingotu. Toto pásno, zvané též pásno transkrystalizace, má značný význam při kování ingotu, protože zde mohou v počáteční fázi kování vzniknout trhliny.

3. Střední pásno globulitických zrn stržených vlastní vahou a tepelnými proudy do tvaru pyramidy ve spodní části ingotu. Toto pásno je celkem prosto vycezenin, ale na druhé straně také chudší na uhlík. Krystaly v tomto pásnu rostou zcela náhodně a směrem k hlavě se obohacují uhlíkem a vměstky.

4. Pásno nejmenší homogenity v oblasti podélné osy ingotu, bohaté u větších ingotů na menší či větší **dutiny**.

5. **Hlava ingotu** se staženinou (**lunkrem**).



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Výchozími materiály pro kování jsou vedle válcovaných či litých bloků, sochorů a tyčí také ingoty. Ingoty vykazují charakteristické oblasti z různou makro a mikrostrukturou. Vyskytuje se v nich řada jevů, které zhoršují (převážně plastické) vlastnosti. Při tváření (v případě velkých ingotů pak výhradně při kování) musíme volit takový stupeň protváření, aby došlo k přeměně licí struktury na strukturu protvářenou, dynamicky zrekrystalizovanou, a aby došlo ke svaření vnitřních necelistvostí.

Vliv kování na strukturu a vlastnosti výkovků



Pojmy k zapamatování

Stupeň prodlužování, stupeň pěchování, stupeň prokování, vláknitost



Obr. 10.3. Makrostrukturní snímek řezu výkovku háku s dobře rozpoznatelnou vláknitostí

Změna makrostruktury

Ingot se nejčastěji kove takovým způsobem, že se postupně zmenšuje příčný průřez a délka se zvětšuje. Tato operace se nazývá prodlužování.

Kováním se lící struktura postupně rozrušuje, hrubé dendrity se drobí a protahují spolu s nekovovými vměstkami a produkty likvace ve směru hlavní deformace, čímž vzniká charakteristická **vláknitost** (viz **obr. 10.3**). Současně se tlakovým svarem scelují vnitřní nečistosti, což se projevuje zvýšením hustoty oceli a zlepšením jejích plastických vlastností. Vysoká kovácká teplota podporuje difúzní děje, a tím i částečnou homogenizaci oceli, již se zmírňuje především dendritická segregace.

□ *Změna mikrostruktury*

Kováním se ovlivňuje i **velikost zrna**, a tím i výsledné mechanické vlastnosti oceli. Turbulentní charakter deformace napomáhá průběhu rekrystalizace, tj. růstu nového zrna na místo zrna deformovaného, které je vždy jemnější. Pokud dokončíme kování blízko dolní tvářecí teploty a/nebo použijeme zrychlené ochlazování zůstane jemné zrno zachováno.

Jestliže makrostrukturu oceli lze ovlivňovat výlučně kovááním, tak na mikrostrukturu s výjimkou jednofázových ocelí lze působit jak kovááním, tak následným tepelným zpracováním.

□ *Změna mechanických vlastností*

Mechanické vlastnosti se posuzují ve dvou charakteristikách: M_R — pevnostní vlastnosti (pevnost v tahu R_m a mez kluzu R_e) a M_{pl} — plastické vlastnosti (tažnost A , zúžení Z a vrubová křehkost KC).

Pevnostní vlastnosti se kovááním v podstatě nemění, kdežto plastické vlastnosti se zlepšují, přičemž ve směru podélném jsou vyšší než ve směru příčném.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Kovááním se mění makrostruktura a mikrostruktura výkovku a díky tomu i jeho mechanické vlastnosti. Kováním se rozrušuje lící struktura za vzniku charakteristické vláknitosti. Také dochází ke zcelování vnitřních nečistostí. Kováním také ovlivňujeme velikost zrna. Pokud je kování vedeno vhodným způsobem (nízká dokovací teplota) vyvoláme zjemnění zrna díky rekrystalizaci. Bez nežádoucího zhrubnutí rekrystalizovaného zrna. Mikrostrukturu lze měnit i např. normalizačním žháním. Důsledkem zjemnění zrna a zavaření dutin pórů je zvýšení plastických vlastností výkovku. Pevnost se prakticky nemění.

10.2.2. Volné kování



Pojmy k zapamatování

Pěchování, prodlužování, děrování, osazování, prosazování, přesazování, ohýbání, zkrucování, záběr, délka záběru, průchod, hranění

Volné kování je složitý tvářecí pochod skládající se z mnoha samostatných, naprosto rozdílných operací, které se uskutečňují na tvářecích strojích a nástrojích víceúčelové povahy. I když je nejstarším tvářecím pochodem (první kovové předměty ze zlata jsou staré 8 000 let!), stále se vyvíjí, takže mu patří nejen současnost, ale své místo si nesporně udrží i v nejbližší budoucnosti.

Charakteristické znaky volného kování

K přednostem volného kování patří:

1. získání výkovků s nesrovnatelně lepšími plastickými vlastnostmi než u odlitků (kováním se totiž mnohé defekty lící struktury odstraňují, čímž slábne jejich vrubový účinek);
2. turbulentní charakter deformace, jímž se zabezpečuje rozrušení dendritické struktury při menších úběrech než při ostatních způsobech tváření (válcování, protlačování)
3. výroba výkovků požadovaných vlastností o velké hmotnosti (až 600 t) a velkých rozměrech, což je jinými výrobními technologiemi nemožné nebo neúčelné;
4. nižší energetická náročnost tvářecích strojů proti zápusťkovému kování, neboť kovací nástroje nepůsobí vesměs na celý objem kovaného polotovaru najednou;
5. použití víceúčelových tvářecích strojů a nástrojů snižuje výrobní náklady výkovků, a tím přispívá k ekonomickému opodstatnění volného kování při kusové a malosériové výrobě;
6. značná úspora kovu a vysoká výrobnost ve srovnání s obráběním.

Přehlédnout nelze i některé nevýhody volného kování, především pak:

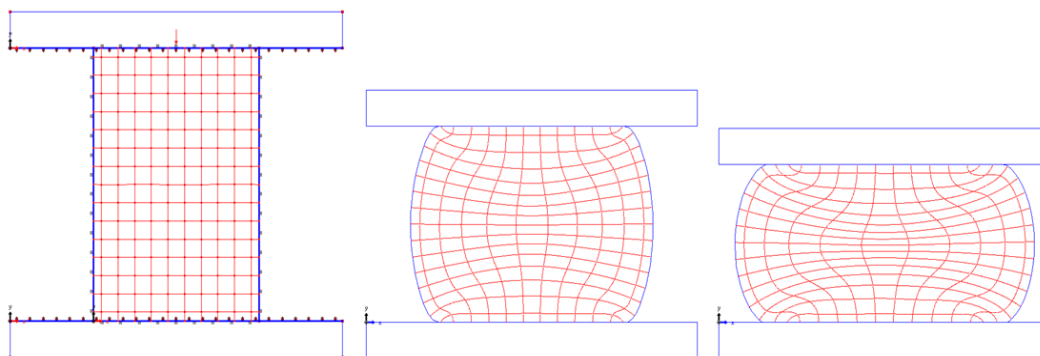
1. nízkou výrobnost ve srovnání se zápusťkovým kování;
2. značné materiálové přídavky na povrchu volných výkovků (u největších výkovků až několik desítek milimetrů!), které se při dalším obrábění mění v kovový odpad;
3. omezenou tvarovou složitost volných výkovků;
4. značné ztráty kovu;
5. potřebu vysoce kvalifikovaných pracovníků.

❑ Základní kovářské operace volného kování

Pěchování (upsetting)

Vede ke zmenšení výšky a ke zvětšení rozměrů kovaného polotovaru v rovině kolmé na směr pohybu tvářecího stroje. Jeho účelem je zhotovit výkovky o velkém příčném průřezu, zvýšit stupeň prokování, snížit anizotropii mechanických vlastností, dosáhnout radiálního průběhu vláken. Uplatňuje se též jako přípravná operace před prodlužováním a děrováním.

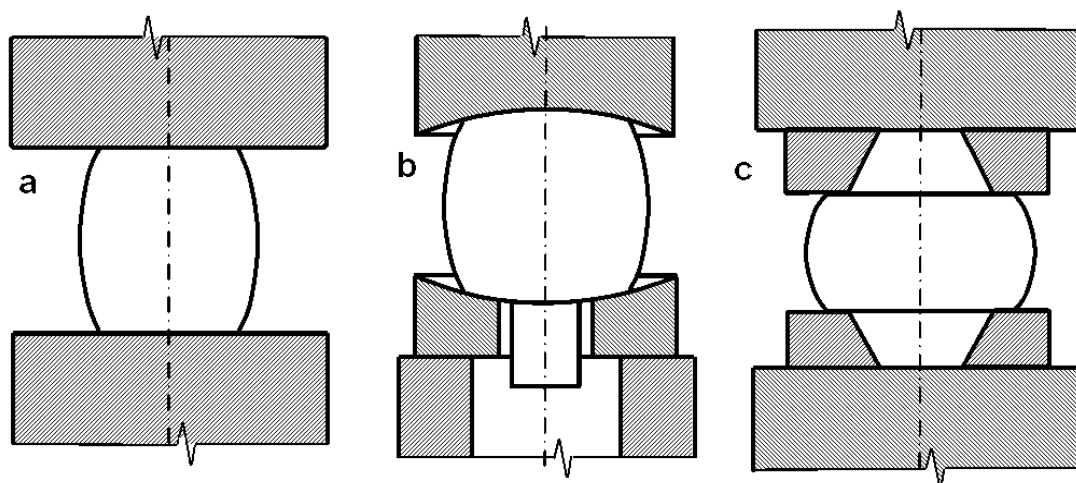
Pro pěchování je příznačný nerovnoměrný průběh deformace (viz **obr. 10.4.**), jehož vnějším příznakem je soudkovitost napěchovaného polotovaru. V obvodových oblastech pěchovaného polotovaru se tak vyvolávají přídatná tahová napětí, která mohou u nízkotvařitelných ocelí vyústit ve vznik podélných povrchových trhlin.



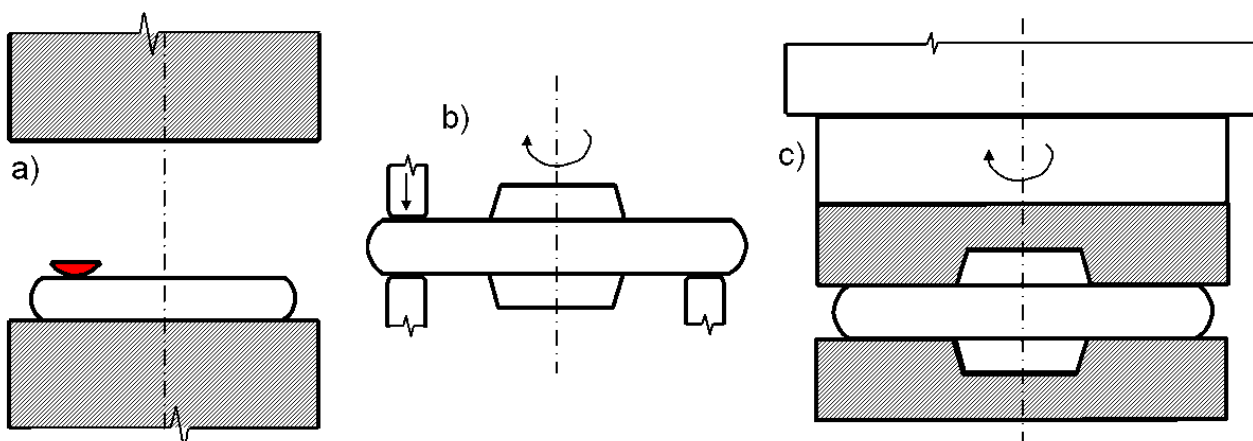
Obr. 10.4. Matematické modelování: Deformace čtvercové (Lagrangeovy) sítě v jednotlivých časových krocích pěchování odhaluje místa největší intenzity deformace. Zleva doprava: počáteční stav, deformace 25%, deformace 50 %

10.2.3. Základní způsoby pěchování

Na **obr. 10.5.** jsou uvedeny různé způsoby pěchování. U výkovků kotoučů a desek o velkém průměru a malé tloušťce se po pěchování zařazuje některý z následujících způsobů **rozkování** (viz **obr. 10.6.**).



Obr. 10.5. Pěchování **a)** rovnými deskami, **b)** tvarovými deskami, **c)** v přípravcích



Obr. 10.6. Pěchování desek **a)** příložkou, **b)** rovnými kovádky, **c)** úzkým tvarovým kovádkem

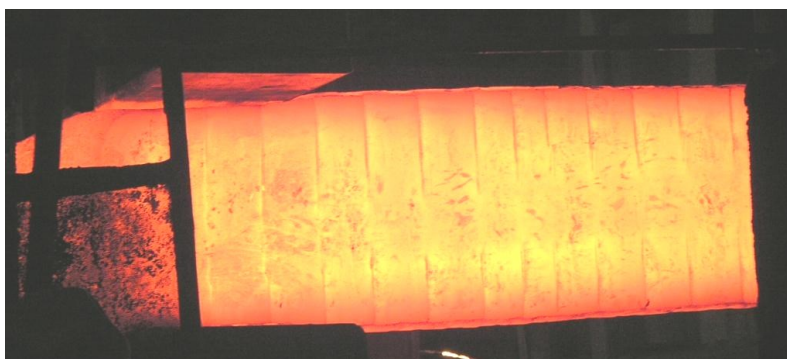
Prodlužování (drawing out, fullering)

Je to nejrozšířenější kovářská operace, při níž se zmenšuje příčný průřez polotovaru a jeho délka výrazně vzrůstá. Prodlužuje se na rovných a tvarových kovádlech. Zjednodušeně lze na prodlužování pohlížet jako na sled po sobě následujících pěchování, při nichž je šíření omezeno **tuhými konci**, tj. oblastmi, které přímo navazují z obou stran na pásma deformace.

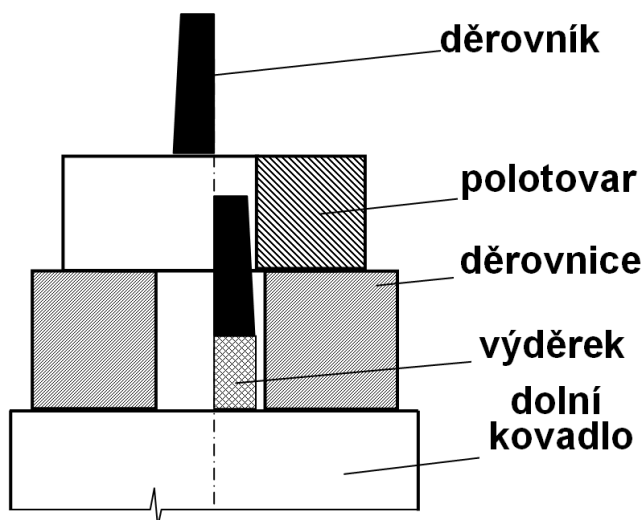
Na začátku záběru působí kovádla na polotovar po určité délce záběru. O délku **záběru** se polotovar posouvá ve směru své podélné osy po každém záběru. Několik po sobě následujících záběrů pokrývajících celou délku prodlužovaného polotovaru je **průchod** a řada po sobě následujících průchodů prokládaných **hraněním**, tj. otáčením polotovaru kolem jeho podélné osy, tvoří pak v nejjednodušší podobě náplň prodlužování. Použitá délka záběru l_z je na výkovku obvykle dobře čitelná (viz **obr. 10.7.**).

Děrování (piercing, holing, punching)

Prostřednictvím této operace se dosahuje ve výkovku průchozí díry (viz **obr. 10.8.**). I při děrování je nutné rovnoměrné prohřátí výchozího polotovaru, aby děrovací trn ne vybočil z jeho svislé osy. Předkovek určený k děrování se má napěchovat na nejmenší přípustnou výšku (viz **obr. 10.9.**), čímž se sníží odpad a zjednoduší děrování. Při děrování polotovarů vykovaných z ingotů se postupuje tak, aby se méně jakostní podhlavová část ingotu vytlačila do odpadu. Pracovní plochy děrovacího trnu se pokrývají mazivem, čímž se snižuje děrovací síla a usnadňuje se pozdější vytažení trnu.



Obr. 10.7. Stopy kovádky na výkovku dávají představu o délce záběru



Obr. 10.8. Schéma děrování, vlevo před, vpravo po

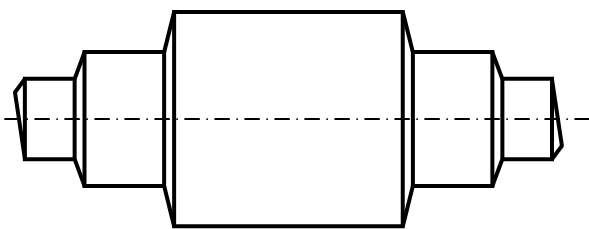


Obr. 10.9. Děrování (ŠkodaPlzeň)

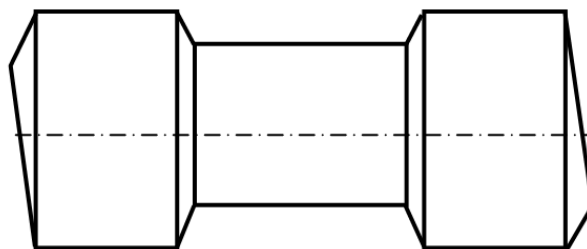
Osazování (stepping), prosazování (necking, reduction swaging)

Zvláštní případy prodlužování vymezených částí výkovku. Osazuje se na koncových částech, vzniká osazení (viz **obr. 10.10.**), prosazuje ve středových částech, vzniká prosazení (viz **obr. 10.11.**), ve zvláštním případě mohou vzniknout příruby.

Podstatou obou operací je vymezení úseků, jejichž průřez se má zmenšovat. Děje se tak nejčastěji zatlačením příložky, čímž vznikne drážka, která jednoznačně oddělí část k prosazování nebo k osazování od zbývající části výkovku (notching).



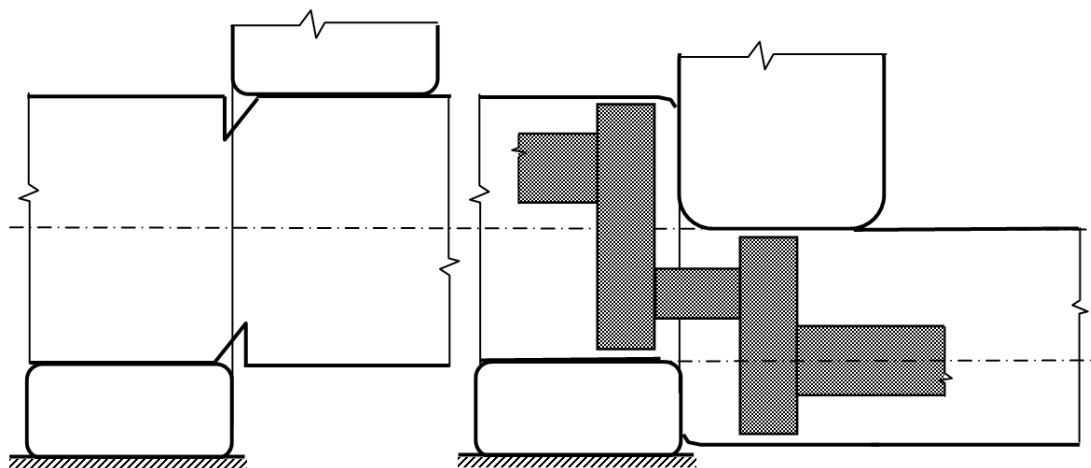
Obr. 10.10. Osazený výkovek



Obr. 10.11. Prosazený výkovek

Přesazování (offseting)

Příčné přemístění vymezeného objemu výkovku, přičemž podélná osa vzniklého přesazení je rovnoběžná s podélnou osou zbývajících částí (viz **obr. 10.12.**). Je nepostradatelnou operací při kování zalomených hřídelů.



Obr. 10.12. Schéma přesazování, tmavě je vyznačena budoucí kliková hřídel

Sekání (cutting off)

Sekání se užívá k dělení výchozího materiálu na jednotlivé polotovary, ale častěji k oddělování přebytečného a odpadového materiálu od výkovků. Záměrně úzký nástroj, sekáč, vytváří tak štíhlé pásmo deformace, že v něm převládají přídatná tahová napětí, která vedou k žádoucímu porušení soudržnosti.

Ohýbání (bending)

Ohýbání je důležitou doplňkovou operací při výrobě háků, kotev, třmenů, táhel, pák apod.

Zkrucování (twisting)

Zkrucováním se rozumí pootočení části výkovku vzhledem k sousední části kolem společné osy o určitý úhel. Je nezbytnou doplňkovou operací při dokončování klikových hřídelů, vidlic a dalších výkovků, jejichž jednotlivé úseky se ková jednodušším postupem v jedné rovině, a poté se zkroutí do požadované polohy.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Výhodami volného kování je, že získáme výrobek s lepší mikrostrukturou než např. při odlévání, je to dáno turbulentním charakterem deformace, která účinněji rozrušuje litou strukturu. Energetická náročnost volného kování je relativně nízká a ve srovnání s obráběním uspoříme mnoho materiálu. Výkovky mohou dosahovat hmotnosti až 600 t, ale musí být vyrobeny se značnými materiálovými přídávky s omezenou tvarovou složitostí. Při výrobě dochází ke značným ztrátám kovu (např. okujením) a potřebujeme vysoce kvalifikované pracovníky. Volné kování se skládá z mnoha operací: přechování, prodlužování, děrování, osazování, prosazování, přesazování, sekání, ohýbání a zkrucování. Měli byste umět načrtnout každou operaci a navrhnout sled operací pro potřeby kování např. ojnice nebo klikové hřídele.

10.3. Zápustkové kování



Pojmy k zapamatování

Zápustka, dutina otevřená a uzavřená, přípravná a dokončovací, výronek, přeložka, výrobnost

Zápustkové kování nachází využití všude tam, kde je potřeba **velkého množství** tvarově shodných součástí (kolejová vozidla, letadla, zemědělské stroje, zámečnické a zemědělské nářadí, lékařské nástroje atd.).

□ Charakteristika zápustkového kování

Při zápustkovém kování nemá tok kovu zdaleka tolik stupňů volnosti jako při kování volném. Je omezen stěnami dutiny jednoúčelového, nejméně dvoudílného nástroje - zápustky

K **přednostem** zápustkového kování patří:

1. vysoká **výrobnost**, která je desítky až stovky výkovků za hodinu, na automatických linkách i přes 1 000 výkovků za hodinu;

2. zhotovení **tvarově členitých výkovků** (viz **obr. 10.13.**) s minimálními materiálovými přídávky (v některých případech zcela bez přídávky anebo s přídávky jen na některých, funkčně nejnáročnějších plochách), vysokou rozměrovou přesností (u výkovků kalibrovaných za studena dosahují mezní úchytky rozměrů $\pm 0,1$ a někdy až $\pm 0,05$ mm!) a dokonalou povrchovou jakostí (zejména při uplatnění bezokujového ohřevu); 3. **hospodárnější** využití kovu (ve srovnání s volným kováním, litím nebo obráběním);

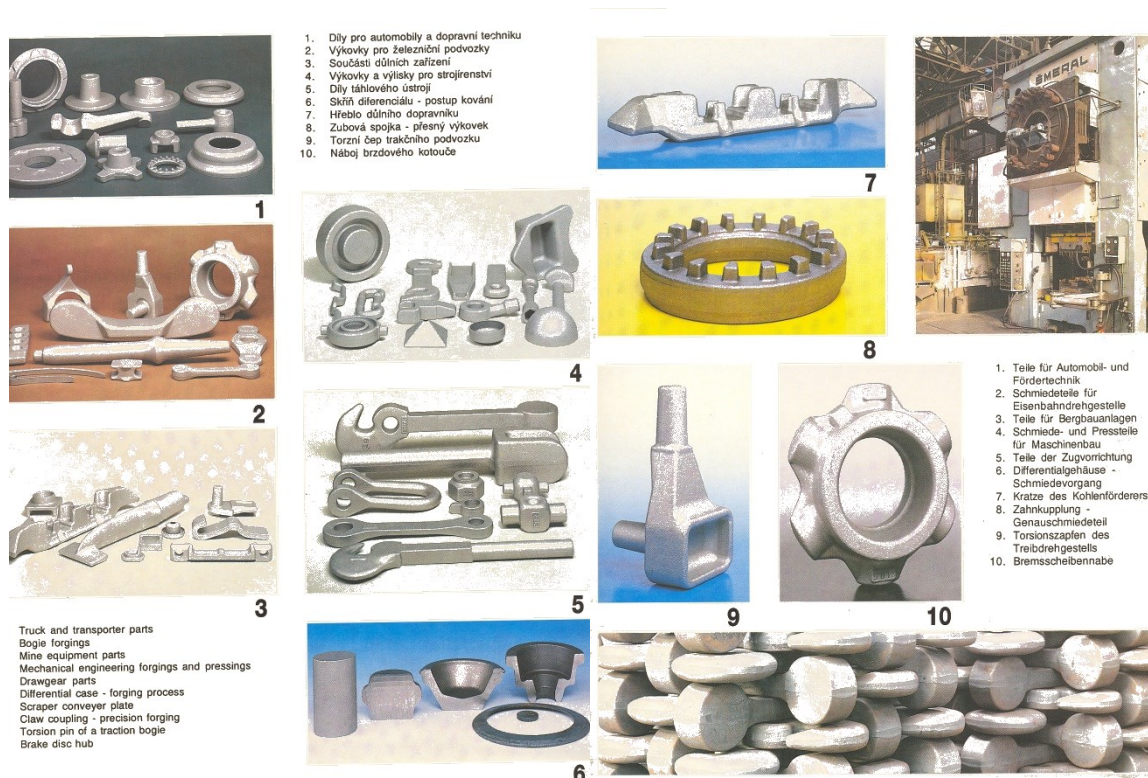
4. **nižší nároky na kvalifikaci** kováře, kterého je možno poměrně rychle zaučit.

Současně však nelze přehlédnout i některé méně **příznivé znaky** zápustkového kování:

1. **hmotnostní a rozměrové omezení** výkovků (většina zápustkových výkovků spadá do hmotnostní kategorie 0,5 až 30 kg, výjimečně se kovou výkovky o hmotnosti až 3,5 t);

2. značná **energetická náročnost** zápustkového kování (v zápustkové dutině se kove celý objem výkovku najednou);

3. potřeba jednoúčelového, a tím i velice **drahého nástroje**, který má výrazný vliv na výslednou cenu zápustkového výkovku, a tím i na ekonomické opodstatnění této technologie.



Obr. 10.13. Portfolio zápusťkových výkovků

□ Vstupní polotovary:

Jednoduché výkovky: nejčastěji válcované tyče, pro rozměrově přesné výkovky pak tažené tyče.

Složitější výkovky: předkovky vyrobené volným kovááním, kovááním na kovacíh válcích či periodickým válcováním.

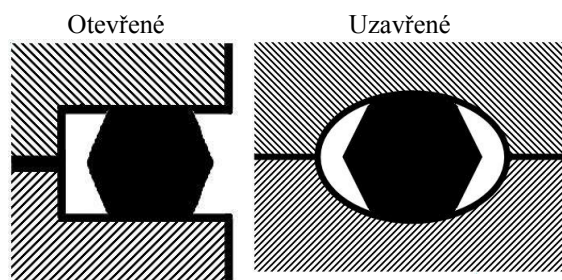
□ Přípravné dutiny

Kování v **přípravných** dutinách (viz **obr. 10.14.**) je doprovázeno vždy určitým **nedostatkem** materiálu. Porušení této podmínky má za následek vytvoření nežádoucího výrobku, s následným nebezpečím vzniku přeložky v dokovací dutině.

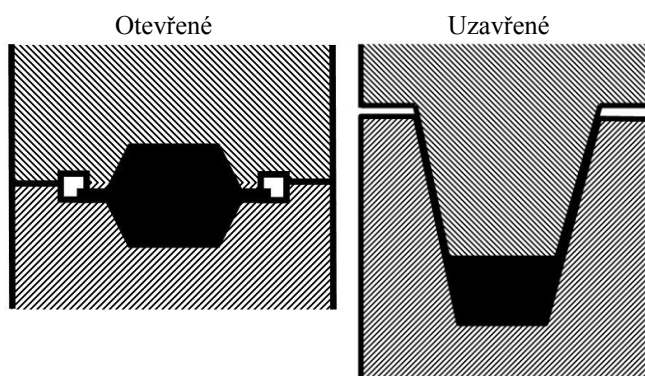
□ Dokončovací dutiny

Charakteristickým znakem otevřených dokončovacích zápustek (viz **obr. 10.15. vlevo**) je výronková drážka, do které odtéká přebytečný kov v podobě **výronku**.

Do uzavřených dutin se vkládá polotovar o stejném objemu, jako má hotový výkovek. Tato technologie se však dá použít pouze pro jednoduché rotačně symetrické výkovky, za předpokladu zvýšení rozměrové přesnosti vstupních polotovarů (viz **obr. 10.15. vpravo**).



Obr. 10.14. Přípravné dutiny

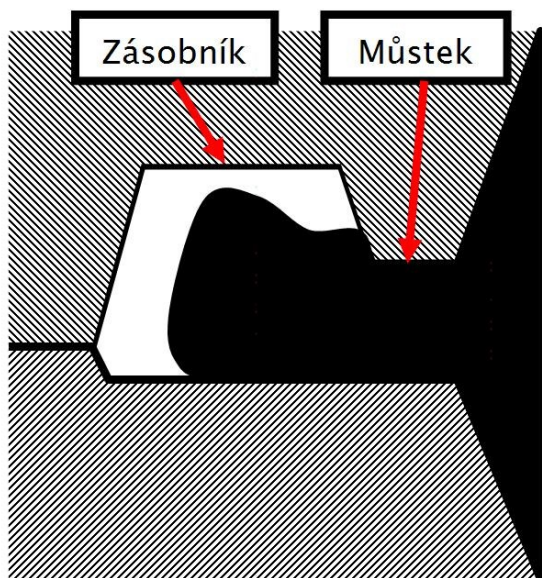


Obr. 10.15. Dokončovací dutiny

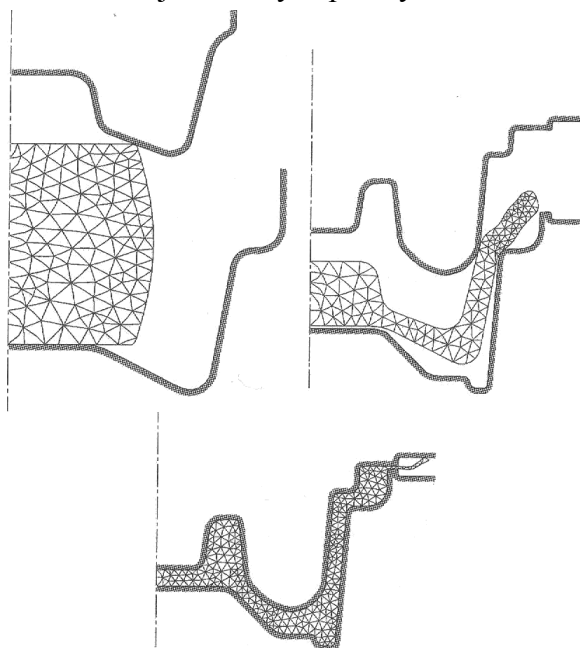
□ *Výronek (flash)*

Výronek (viz **obr. 10.16.**) sice představuje materiálovou ztrátu (10 až 30 %), avšak současně plní některé významné úkoly:

- Těsně před semknutím zápustky musí výronek svým tvarem, především velmi velkou plochou (což vede ke zvýšení deformačního odporu), zvýšit odpor proti vytékání kovu ze zápustkové dutiny. Kov potom teče do uzavřených přírub (viz **obr. 10.17.** třetí operace).
- Ve výronku se vyrovnávají objemové rozdíly výchozího polotovaru (i rozdíly způsobené opotřebením zápustky).
- Výronek též působí jako tlumič rázů mezi dosedajícími díly zápustky.



Obr. 10.16. Výronek v řezu



Obr. 10.17. Matematické modelování: Postup zápustkového kování, začátek druhé operace v uzavřené zápustce, začátek a konec třetí operace v otevřené zápustce.

Σ

Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Předností zápustkového kování je výrobnost, možnost kovat velmi tvarově složité výkovky, hospodárnější využití kovu oproti volnému kování či obrábění, nižší nároky na kvalifikaci kováře. Díky tváření celého objemu polotovaru najednou je zápustkové kování velmi energeticky náročné, což je jedním z důvodů hmotnostního a rozměrového omezení výkovků. Vlastní zápustka slouží jen jednomu účelu a je relativně drahá. Vstupními polotovary jsou vývalky jednoduché či složité výkovky. V zápustkách rozeznáváme přípravné a dokončovací dutiny, které mohou být otevřené či uzavřené. Uzavřené dokončovací dutiny jsou charakterizovány výronkem, který díky své velké ploše brání kovu vytékat ze zápustky (podívej se na kapitolu deformační odpor a zákon toku cestou nejmenšího objemu) a díky tomu je možno vyplnit každou skulinu zápustky. Také chrání zápustky před rázy a vyrovnává objemové rozdíly polotovaru.

10.4. Stroje pro kování



Pojmy k zapamatování

Buchar, lis, kovací soubor, manipulátor, Gallův řetěz,

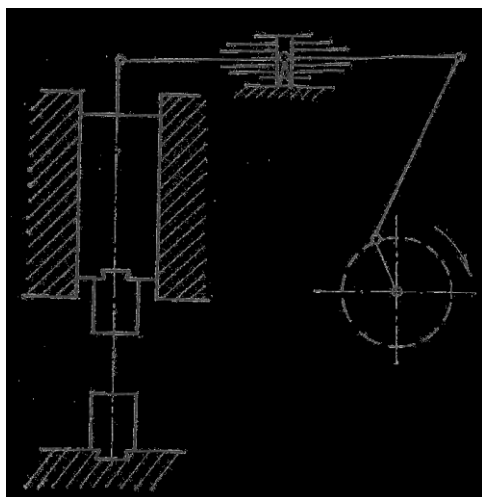
Podle charakteru práce se dělí na **buchary**, u nichž se využívá pohybové energie padajícího beranu působícího na tvářený kov rázem, a na **hydraulické lisy**, které zpracovávají kov klidným tlakem vyvíjeným kapalným médiem v hydraulickém systému lisu.

□ Bucharý

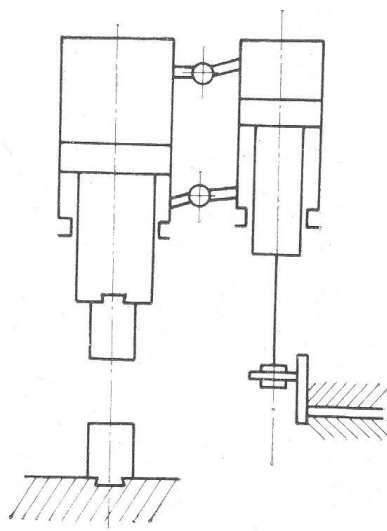
Padající beran bucharu působí na kov při každém úderu určitou rázovou energií, kdežto lis silou. Na bucharu se kov deformuje každým úderem, kdežto lis přestane vykonávat práci, jestliže jeho síla je menší než deformační síla.

Výkovky velkého průřezu se nemají kovat na bucharu, protože jím nelze dosáhnout rovnoměrného a dokonalého prokování v celém objemu výkovku. Na začátku kování je totiž zdvih beranu malý, a tím i nízká rázová energie, na konci kování je tomu opačně.

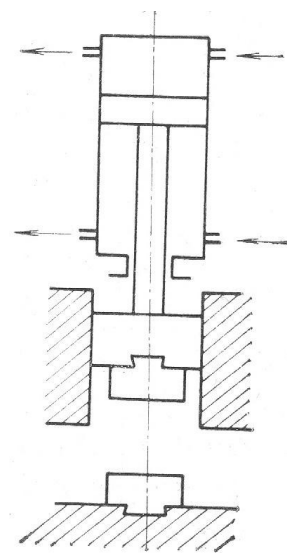
Bucharý pro volné kování se dělí na pružinové, pneumatické a parovzdušné. Nástin činnosti jednotlivých typů bucharů přináší **obr. 10.18. Pružinový buchar**: výstředník s ojnicí mění otočný pohyb na pohyb vratný, jež se přenáší na druhý konec dvouramenného svazku listových pružin, tím se urychlí pohyb beranu. **Pneumatický buchar**: pohon obstarává stlačený vzduch, hmotnost beranu až 1 000 kg, využívá tlaku a podtlaku. **Parovzdušný buchar**: médium – pára nebo vzduch se nad a pod píst přivádí pomocí šoupátkového mechanismu.



Pružinový buchar



Pneumatický buchar:

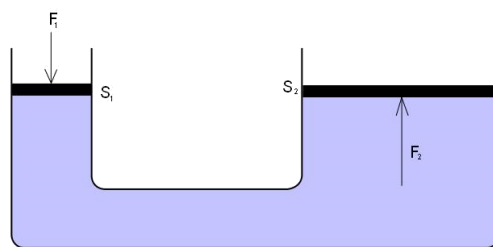


Parovzdušný buchar

Obr. 10.18. Nástin činnosti jednotlivých typů bucharů

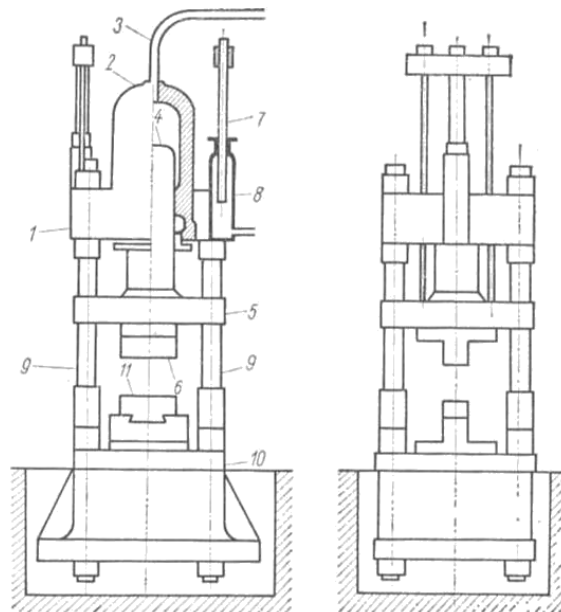
□ *Hydraulické lisy*

Činnost hydraulických lisů, které se stavějí o síle až 180 MN, vychází z Pascalova zákona (tlak kapaliny v uzavřené nádobě je ve všech směrech stejný) a ze známé skutečnosti, že kapaliny jsou sice nestlačitelné, ale tlak přenášejí. Ve dvou válcových nádobách je uzavřena kapalina (viz **obr. 10.19.**). Písty jsou pohyblivé a mají plochy o obsahu S_1 a S_2 . Na píst o ploše S_1 působíme silou F_1 , která je kolmá k pístu. Tato síla vyvolá v kapalině tlak $p = F_1/S_1$. Na píst s obsahem S_2 tak působí tlaková síla F_2 . Síly, které na písty působí, jsou ve stejném poměru jako obsahy průřezů obou pístů, tedy: $F_2/F_1 = S_2/S_1$.



Obr. 10.19. Princip hydraulického lisu.

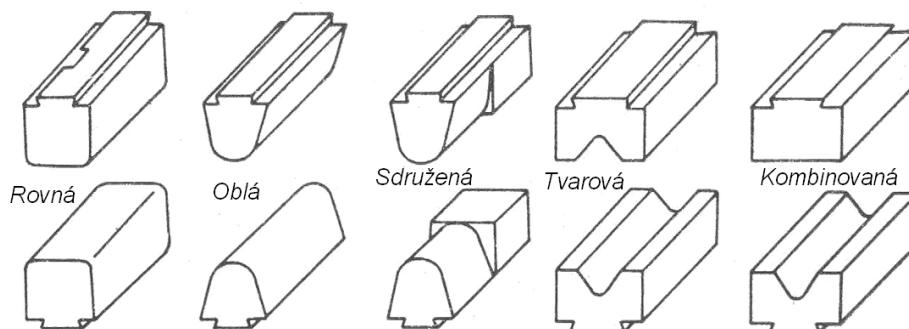
Schéma hydraulického lisu je na **obr. 10.20.** Na horním příčniku umístěný pracovní válec 2 je spojen potrubím 3 se zdrojem vysokotlaké kapaliny (upravená voda, olej). Při pracovním chodu působí tlak kapaliny na plunžr 4, který uvede do pohybu pohyblivý příčník 5, na němž je upnuto horní kovadlo 6. Pohyblivý příčník se zvedá prostřednictvím plunžrů 7, které se vysouvají z pomocných válců 8 umístěných po stranách horního příčniku. Sloupy 9 jsou pevně vetknuty do horního příčniku 1 a dolního příčniku 10, na němž spočívá dolní kovadlo 11.



Obr. 10.20. Schéma hydraulického lisu.

□ *Pomocná zařízení pro kování*

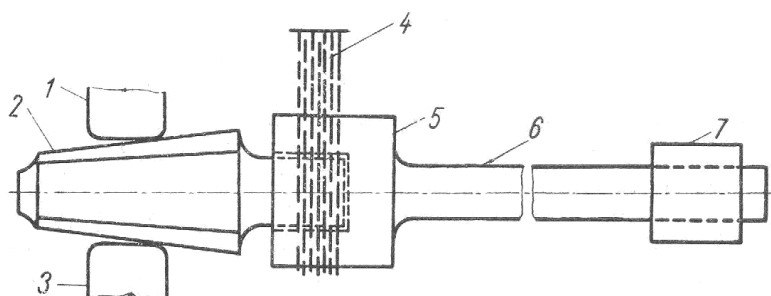
K základním nástrojům patří různě tvarovaná **kovadla** (viz **obr. 10.21.**).



Obr. 10.21. Typy kovadel

Pomocné nástroje a zařízení usnadňující **manipulaci** s výchozím polotovarem při kování. Patří k nim různé druhy kleští, používané při kování menších výkovků na bucharech, a speciální, na jeřábu zavěšené kleště k dopravě ingotů a kovaných polotovárů.

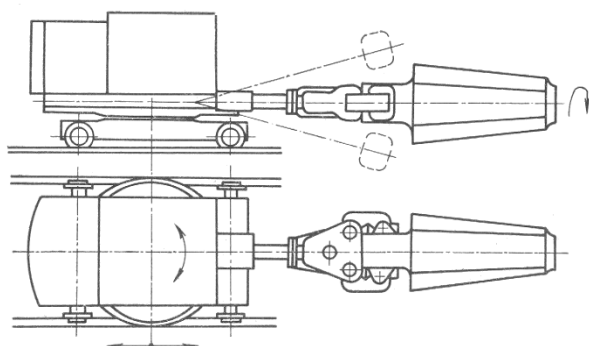
Manipulace s těžšími ingoty a polotovary (viz **obr. 10.22.**) se děje za pomoci dlouhého vahadla 6, do jehož objímky 5 se zasouvá manipulační čep ingotu 2 (viz **obr. 10.23.**). Vahadlem, a tím i kovaným polotovarem otáčí prostřednictvím Gallova řetězu 4 elektricky poháněné otáčedlo zavěšené na jeřábu. Správné vyvážení celé zavěšené sestavy zajišťuje protizávaží 7, které se nasouvá na volný konec vahadla. Dokonalejším pomocným zařízením je kovací manipulátor (viz **obr. 10.24. a 25.**).



Obr. 10.22. Manipulace pomocí vahadla a Gallova řetězu



Obr. 10.23. Transport výkovku do pece (Vítkovice Heavy machinery)



Obr. 10.24. Schéma kovacího manipulátoru



Obr. 10.25. Kovací manipulátor, Žďas, a.s.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Kovářské operace se provádějí na bucharech a na lisech. Buchar tváří materiál pomocí kinetické energie, lis působí silou, která je vyvozována pomocí hydrauliky. Ke kování se používají různé typy univerzálních kovadel. K manipulaci s výkovkem pak slouží kleště, vahadlo zavěšené na Gallově řetězu nebo manipulátory.



Otázky k probranému učivu

1. Jaký podíl mezi tvářenými výrobky zaujímají výkovky?
2. V jakém rozmezí hmotnosti se pohybují výkovky?
3. Vyjmenujte hlavní rozdíly mezi zápusťkovým a volným kovááním.
4. Na základě čeho se rozhodnete zda použijete volné či zápusťkové kováání?
5. Jaké polotovary se používají v kovárnách?
6. Jakých hmotností dosahují nejtěžší ingoty?
7. Popište technologii výroby ingotu. Co je to hlava a pata ingotu?
8. Charakterizujte mikrostrukturu ingotu.
9. Proč sloupcovité dendrity rostou kolmo na stěnu kokily?
10. Co je to segregace?
11. Jak vzniká ve výkovcích vláknitost?
12. Jak lze vláknitost odstranit?

13. Jak se nazývá operace, kterou se zvětšuje délka ingotu?
14. Jak se mění hustota oceli při kování ingotů?
15. Jakým měřitelným parametrem lze charakterizovat mikrostrukturu výkovků?
16. Jakým mechanismem dojde ke zjemnění zrna při kování?
17. Jaký vliv kování na mechanické vlastnosti oceli?
18. Vyjmenujte rozdíly mezi volným a zápusťkovým kováním.
19. Proč je volné kování účinnější při rozrušování lité struktury než válcování.
20. V čem je volné kování lepší než obrábění?
21. Vyjmenujte nevýhody volného kování oproti zápusťkovému kování
22. Definujte pěchování
23. Jak vzniká soudkovitost?
24. Jaké jsou důsledky nerovnoměrnosti deformace při pěchování?
25. Proč je zapotřebí upravit před pěchováním čelní plochy polotovaru?
26. Napište základní způsoby pěchování.
27. Která operace je silově náročnější, pěchování nebo prodlužování téhož ingotu? Proč?
28. Která operace je časově náročnější, pěchování nebo prodlužování téhož ingotu? Proč?
29. Kdy bude větší hloubka proniku při prodlužování rovnými kovádky tyče čtvercového nebo kruhového průřezu? Vysvětlete pomocí náčrtku.
30. Co je to osazování?
31. Co je to prosazování?
32. Co je to přesazování?
33. Jaké výkovky se vyrábí ohýbáním?
34. Popište způsob kování klikové hřídele velkého lodního motoru.
35. Co způsobilo rozvoj zápusťkového kování?
36. K čemu se používá zápusťkové kování?
37. Jaké jsou přednosti zápusťkového kování?
38. Jaké jsou nedostatky zápusťkového kování?
39. Jaké výrobky se vyrábějí zápusťkovým kováním?
40. Jaké jsou požadavky na zápusťky?
41. Jaké se používají vstupní polotovary pro zápusťkové kování?
42. Jaké znáte dokončovací dutiny?
43. Co je to výronek?
44. Jaké jsou funkce výronku?
45. Jaké znáte typy strojů pro kování?
46. Nakreslete závislost rychlosti kovádky na čase bucharu a hydraulického lisu.
47. Jaké jsou výhody a nevýhody kování na bucharu?
48. Jaké znáte konstrukční řešení bucharů?
49. Vysvětlete princip hydraulického lisu.
50. Co řadíme mezi pomocná zařízení pro kovářny?
51. Jaké znáte typy kovádel?
52. Jak lze při kování manipulovat s polotovarem?
53. Co je to Gallův řetěz?
54. Co je to kovací soubor?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., *Tváření oceli*. SNTL, Praha 1988, ISBN 04-408-88

HAŠEK, V., a kol., *Kování*, SNTL, Praha, 1965, ISBN 04-233-65

DYJA, H., et al, *Modelowanie procesów kucia swobodnego*, Wydawnictwo wipmifs, Częstochowa 2004, ISBN 83-87745-52-9

DRASTÍK, F., *Kovářství*, SNTL, Praha, 1963, ISBN 04-205-63

DRASTÍK, F., *Kovářské stroje a technologie kování*, SNTL, Praha, 1961

Kolektiv autorů, *Lisování a kování v ČSSR a SSSR*, SNTL, Praha, 1961

BRJUCHANOV, A.N., REBELSKIJ, A.V., *Zápustkové kování – díl III*. SNTL, Praha, 1956

NAJUKOS, W., FABEL, D.C., *Forging handbook*, AMS, Cleveland, Ohio, 1948

SEMIATIN, S. L, *ASM handbook - Volume 14A, Metalworking: Bulk Forming*, Semiatin, S. L. © 2005; 2009 ASM International, ISBN 978-0-87170-708-6

Svaz kováren: ČR www.skcr.org

Časopis Kovárenství: <http://www.kovarenstvi.cz/>

11. Tváření za studena



Čas ke studiu: 180 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Vysvětlit mechanismy odstraňování okují z polotovarů
- Rozdělit sortiment pásů válcovaných za studena.
- Popsat klíčové technologické aspekty válcování za studena.
- Rozdělit sortiment drátů tažených za studena.
- Popsat základní principy práce tažných stolic.
- Popsat základní principy protlačování



Výklad

11.1. Povrchové úpravy před tvářením za studena



Pojmy k zapamatování

Wüstit, magnetit, hematit, moření, křehkost po moření, nosič maziva, borax

□ Okuje

Vstupním polotovarem pro tváření za studena jsou pásy, dráty nebo tyče válcované za tepla. Tento materiál, stejně jako materiál po tepelném zpracování bez použití ochranné atmosféry, má povrch pokryt vrstvou okují, která vzniká při styku s kyslíkem ze vzduchu při vyšších teplotách. Okuje jsou v uhlíkových ocelích tvořeny na sebe navazujícími vrstvami, lišícími se navzájem váhovým poměrem železa a kyslíku, v pořadí **wüstit** – FeO , **magnetit** Fe_3O_4 a **hematit** – Fe_2O_3 (viz **tab. 11.1.**). Tyto názvy vám určitě nejsou neznámé, jedná se o **železné rudy**. Je zajímavé, že slučování železa s kyslíkem je vlastně obrácený pochod než ten, kterým bylo železo z těchto rud získáno. Železo se tak vrací do původního stavu.

Okuje rozlišujeme **primární** (vznikají při ohřevu před tvářením za studena (před vlastním tvářením jsou odstraněny např. vysokotlakým ostřikem) a okuje **sekundární**, které vznikají buď během válcování (opět bývají průběžně odstraňovány ostřikem před vstupem do válců) nebo při ochlazování na okolní teplotu (tyto okuje na vývalcích zůstávají a odstraňují se až před tvářením za studena).

Tab. 11.1. Vybrané vlastnosti oxidů železa v okujové vrstvě

Název oxidu	Obsah O_2 (hm. %)	Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Barva	Odstranění okují	
				v kyselinách	mechanicky
FeO - wüstit	22,27	5,9 až 6,0	šedočerná	velice snadné	obtížné
Fe_3O_4 - magnetit	27,64	4,6 až 5,3	černá	obtížné	snadné
Fe_2O_3 - hematit	30,05	5,1 až 5,25	červenohnědá, červenošedá	velice obtížné	snadné

❑ *Odstraňování okují*

Rozeznáváme dva základní způsoby odstranění sekundárních okují:

- chemické (moření),
- mechanické (lámání, tryskání, kartáčování).

Kromě odokujování se před tvářením za studena provádějí další operace jejichž účelem je zajistit kvalitní lesklý povrch finálního výrobku (odmašťování, nanášení nosiče maziva).

11.1.1. **Chemické odokujování – moření (pickling)**

Jedná se o pochod, při němž jsou okuje vystaveny, chemickému, mechanickému a tepelnému působení. Jedná se o velice složitý a komplexní pochod. Z 90 % je prováděno v kyselině sírové a chlorovodíkové.

Z chemického hlediska je moření vlastně rozpouštění oxidů, které tvoří vrstvu okují a současně i vlastního kovu v kyselinách.

Při reakci kyseliny a okují vznikají volné anionty železa a voda, s kyselinou ovšem reaguje i samotné železo za vzniku **vodíku**.

Při vlastním moření vodík napomáhá odtrhávání hůře rozpustných okují, po moření se však vyšší koncentrace vodíku v oceli projeví:

- Vznikem puchýřů – atomární vodík se v matici kovu sloučí do molekulární formy, děje se tak v místě bublin, ale častěji v místě výskytu např. zaválcovaných okují. Zvyšování tlaku plynného vodíku v takovéto dutině (např. při ohřevu) vede ke vzniku puchýřů.
- Vadami způsobenými unikajícím vodíkem – při zahřátí materiálu (např. zinkování, nebo při vytváření smaltových povlaků) má nedifundovaný vodík snahu unikat z materiálu a narušovat vznikající povlak.
- Zhoršením mechanických vlastností – interstiticky rozpuštěný vodík zvyšuje pevnost a snižuje tažnost oceli, tomuto jevu se říká vodíková křehkost (křehkost po moření).

Atomární vodík lze z materiálu odstranit žiháním při teplotách od 100 do 400 °C, nebo ponořením materiálu do vařící vody. Jeli však vypuzování H příliš rychlé, může to vést např. ke snížení pevnosti v ohybu.

11.1.2. **Povrchová úprava po moření**

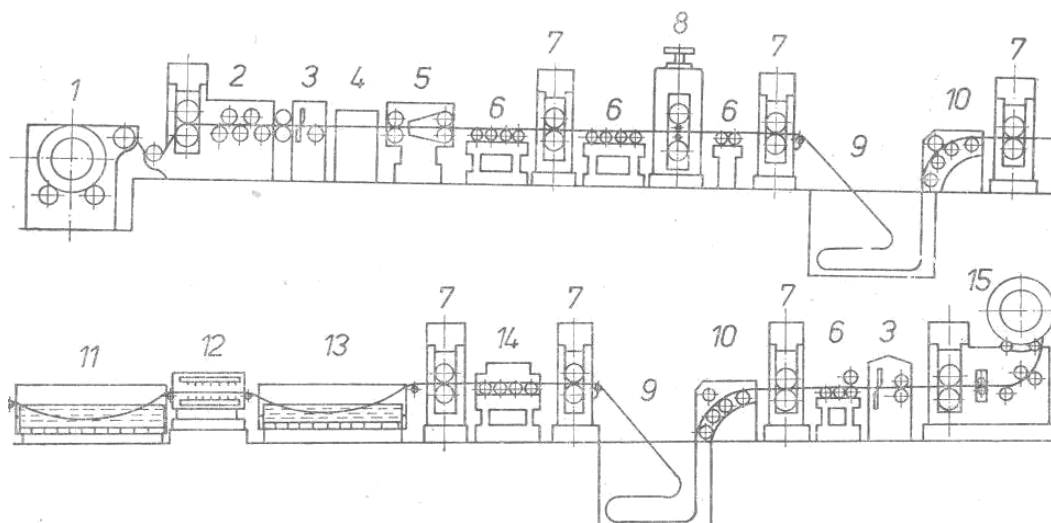
Na moření navazuje v různých technologických variantách povrchová úprava s cílem neutralizovat zbytky kyselin, odstranit z povrchu zbytky solí železa a vytvořit povlak s funkcí nosiče maziva, zabezpečující dobrý průběh plastické deformace, odpovídající jakost povrchu a malou spotřebu energie, nízké opotřebení nástrojů (válců, průvlaků, matic) a maziva.

Technologická zařízení k moření

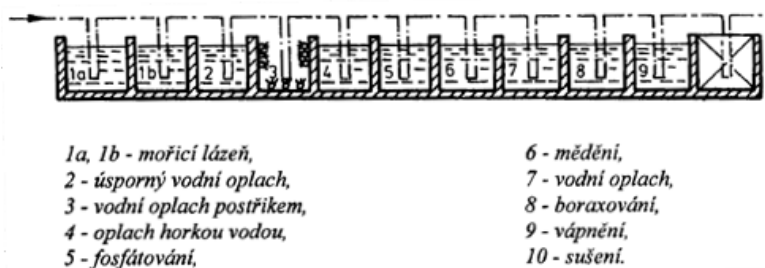
Typ technologického zařízení závisí na druhu moření, geometrickém tvaru a uspořádání materiálu (svitek, závit, žíla), na navazujících úpravách odokujovaného polotovaru, na stupni mechanizace a automatizace a předpokládaném zpracování odpadů.

Zařízení k diskontinuálnímu moření jsou aplikovány na svitky drátu či pásu, kontinuální pochody pro zpracování drátu a pásu v žilách, smyčkách nebo závitech. Schéma průběžné mořicí linky na pásy je na **obr. 11.1.**, kde 1) odvíječka, 2) válečková rovnačka s lamačem okují, 3) ostřihovací nůžky, 4) svářečka, 5) obrobení svaru, 6) válečkový dopravník, 7) tažné válce, 8) válcovací stolice, 9) smyčková jáma, 10) rovnací válečky, 11) mořicí vany, 12) oplach studený, 13)

oplach teplý, 14) sušení, 15) navíječka. Na **obr. 11.2.** je schéma moření drátů ve svitcích (fotografie provozu je na **obr. 11.3.**) .



Obr. 11.1. Schéma průběžné mořicí linky na pásy



Obr. 11.2. Mořicí linka na svitky drátu-schéma



Obr. 11.3. Mořicí linka na svitky drátu

11.1.3. Mechanické odokujování

V praxi se uplatňují tyto dva způsoby:

- ohýbání (nejčastěji) drátu v žilách s následným mechanickým čištěním povrchu (kartáčování),
- tryskání



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Při ochlazování polotovarů po tváření za tepla, vznikají na jeho povrchu sekundární okuje v pořadí od oceli k okolnímu prostředí: wüstit, magnetit a hematit. Tyto okuje se liší nejen chemickým složením, ale také mechanickými vlastnostmi, wüstit se snadno rozpouští kyselinami zatímco magnetit a hematit se snadno odstraňují mechanicky. Moříme nejčastěji v kyselině sírové a chlorovodíkové, rychlost moření se zvýší zvýšíme-li koncentraci, teplotu nebo při aplikaci vibrací. Při moření se do materiálu difúzí dostává vodík a způsobuje zkrěhnutí materiálu. Po moření se aplikuje oplach, sušení (žíhání pro odstranění křehkosti po moření) a nános nosiče maziva.

11.2. Válcování za studena



Pojmy k zapamatování

Anizotropie, hlubokotažnost, bombírování, průhyb a zploštění válců, protiohyb válců,

Převážná část vyrobených pásů válcovaných za tepla přichází k dalšímu zpracování do válcoven za studena.

Jeho hlavním účelem jsou dosažení menší tloušťky pod 1,2 až 2,0 mm, zúžení tloušťkových tolerancí podél a napříč válcovaného pásu, zvýšení povrchové jakosti, dosažení potřebných rozmanitých kombinací pevnostních a plastických vlastností, speciálních fyzikálních a užitných vlastností (směrové **anizotropie**, **elektromagnetických vlastností**, **hlubokotažnosti** apod.), zlepšení stejnorodosti struktury a mechanických vlastností tenkých plechů a pásů, vytvoření podmínek pro nanášení speciálních kovových a nekovových povlaků atd.

Přehled vyráběného sortimentu pásů válcovaných za studena

Ocelové pásy válcované za studena se vyrábějí v obdobných šířkách a hmotnostech svitků jako pásy válcované za tepla, tj. až do max. šířek kolem 2 000 mm, v některých speciálních případech se však válcují za studena i velmi úzké pásy předem z podélně dělených pásů širších, válcovaných za tepla nebo za studena. Maximální tloušťky vyráběných pásů válcovaných za studena obvykle nepřesahují 2,0 až 6,0 mm, převážnou část rozměrového výrobního sortimentu tvoří pásy válcované za studena o tloušťkách pod 2,0 mm, vyrábějí se pásy o minimálních tloušťkách běžně 0,10 až 0,50 mm, obzvlášť tenké pásy i o tloušťkách několika setin, popřípadě tisícín mm.

Jakostní sortiment vyráběných ocelových pásů válcovaných za studena je obdobný jako u pásů válcovaných za tepla a zahrnuje velkou škálu různých druhů ocelí tříd 10 až 17 a 19.

Oceli válcované za studena se vyrábějí a dodávají buď v pásech (ve svitcích), nebo jako finálně rovnané a příčně dělené pruhy nebo tabule, a to buď ve stavu žíhaném, nebo zpevněném za studena různým stupněm celkové deformace. Pásy z kalitelných ocelí s vyšším obsahem uhlíku válcované za studena se dodávají také zušlechtěné kalením s následným popouštěním.

Pásy válcované za studena a zušlechtěvané pásy se dodávají s různou úrovní povrchové jakosti od neupravených běžných povrchů po válcování a tepelném zpracování, přes povrchy upravené válcováním za studena, broušením, popřípadě leštěním (povrchy lesklé i matné) až po povrchy barevně kolorované (modře nebo žlutě), používané u zušlechtěných pásů.

Pásy válcované za studena s lesklým nebo matným povrchem, vhodným k pokovování a nanášení různých povlaků, se mohou vyrábět a dodávat například jako pozinkované, poolověné, pochromované, poměděné, poniklované, pohliníkováné, dále jako plastované, lakované, barevně desénované (pásy z korozi-vzdorných ocelí) apod.

Válcovací tratě a stolice pro válcování za studena

Mezi základní a nejvýznamnější typy válcovacích stolic patří stolice duo, klasické kvarto, kvarto s bočně podepřenými válci (systém MKW), šestiválcové stolice systému HC (high crown) a dvacetiválcové stolice systému Sendzimir.

Všechny tyto stolice mohou pracovat jako vratné nebo průběžné, ve druhém případě jednotlivě jako samostatné tratě nebo v tandemovém uspořádání dvou až šesti stolic za sebou.

Vratné tratě mají před stolicí a za stolicí navíjecí a dovíjecí bubny, které jsou u průběžných tandemových tratí před první a za poslední stolicí.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Hlavním účelem válcování za studena je dosažení tloušťky pod 1,2 až 2 mm, zpřesnění rozměrových tolerancí a zvýšení povrchové jakosti. Někdy také usilujeme o změnu pevnostních, plastických, ale i speciálních fyzikálních vlastností. Pásky za studena se vyrábějí v šířkách kolem 2 m, ale mohou se válcovat i velmi úzké pásy. Maximální tloušťky se pohybují do 6 mm, nejběžněji se pak vyrábějí pásy tlouštěk 2 až 0,1 mm. Pro válcování pásů se používají stolice kvarto, sexto, dvanácti a dvacetiválcové. Větší počet válců se volí pro zvýšení tuhosti stolice a tím i zpřesnění rozměrových tolerancí pásu.

11.3. Tažení drátů a tyčí



Pojmy k zapamatování

Patentovaný a nepatentovaný drát, patentování, průvlak, tažná stolice, drátotah přímotažný, akumulární a se skluzem, mazací soustava

❑ Základní rozdělení ocelových tažených drátů

Dělení z výrobního hlediska:

a) **Nepatentovaný:** nízkouhlíkové oceli s hmotnostním podílem C max. 0,2 %,

1) tažením zpevněný:

polotvrdý: pevnost 450 až 600 MPa,

tvrdý: pevnost 450 až 1 000 MPa,

pružinově tvrdý: pevnost 1 000 až 1 300 MPa;

2) žíhaný:

„na černo“ (zokujený povrch),

„na bílo“, „na modro“ (bez přístupu vzduchu),

„na lesklo“ (v ochranné atmosféře).

b) **Patentovaný:** uhlíková ocel (C od 0,2 do 0,9 %)

1) tažením zpevněný,

2) po tažení žíhaný,

3) po tažení zušlechtěný,

4) po tažení napouštěný.

c) **Dráty z legovaných ocelí** (konstrukční, nástrojové, korozivzdorné, žárovzdorné).

Dělení z hlediska provedení povrchu:

Dráty mohou být taženy za sucha nebo za mokra s povrchem bez úpravy nebo s úpravou (pozinkování, pocínování, pomědění, pohliníkování, pomosazení, lakování, smaltování, pokrytí plastem atd.).

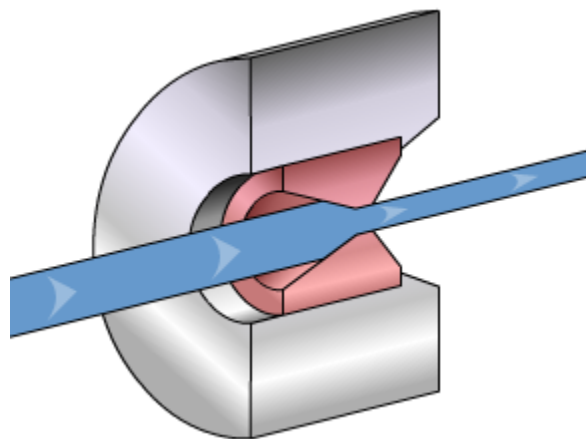
Dělení podle tvaru průřezu:

kruhový,

tvarový, vyrobený buď v tvarových průvlacích, nebo válcováním kruhového drátu za studena ploštěním).

11.3.1. Teorie tažení

Tváření ocelového drátu za studena tažením je charakterizováno plastickou deformací, probíhající průchodem drátu kuželovým otvorem, **průvlakem** (viz **obr. 11.4.**), přičemž dochází k prodloužení drátu ve směru hlavního působícího napětí a zmenšování plochy příčného průřezu tvářeného drátu za současného zvyšování pevnosti, meze pružnosti a průtažnosti, tvrdosti a snižování jeho plastických vlastností, ku příkladu prodloužení a zúžení. Plastická deformace při tažení drátu probíhá za takových teplot, při nichž tvářením vyvolané zpevnění drátu zůstává zachováno.



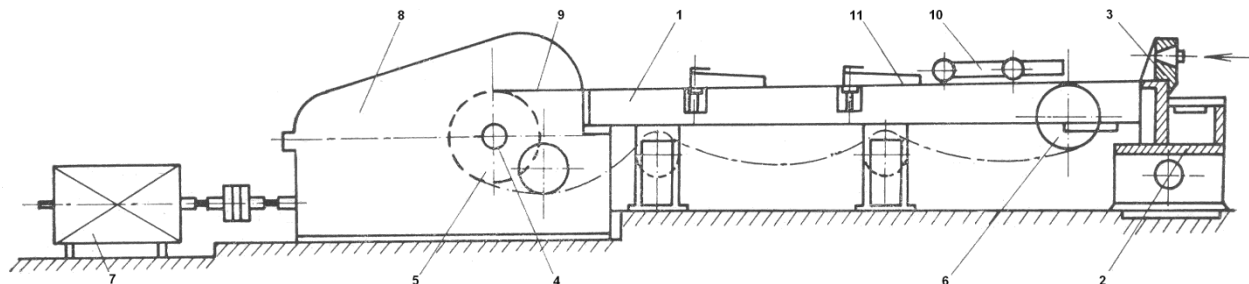
Obr. 11.4. Průběh deformace při tažení

11.3.2. Tažné stolice

Tažné stolice se dělí na stolice s přímočarým pohybem materiálu (řetězové nebo hřebenové) a stolice s navíjením taženého materiálu (jednoprůchodové nebo víceprůchodové).

Stolice s přímočarým pohybem

Tyto stolice se používají k tažení tyčí, trubek a tvarových výrobků omezených délek. Nejčastěji se používají řetězové tažné stolice, které se vyrábějí jako jednotažné nebo vícetažné stroje. Tažná stolice má rám z ocelových nosníků, po němž se pohybuje tažný vozík. Na tažném vozíku je klešťové zařízení s tažnými čelistmi a unášecím hákem. Po zaklesnutí unášecího háku do řetězu sevrou čelisti hrot tyče nebo trubky a protahují jej průvlakem. Schéma stolice je na **obr. 11.5.**, kde: 1 – rám stolice; 2 – stojan; 3 – průvlak; 4 – hnací hřídel; 5 – pohánecí kolo; 6 – napínací kolo; 7 – pohánecí motor; 8 – převodovka; 9 – nekonečný řetěz; 10 – tažný vozík; 11 – hák



Obr. 11.5. Schéma stolice s přímočarým pohybem

Rozhodující vliv na výkonnost mají kromě tažné síly délka stolice a tažná rychlost. Tažná rychlost starých stolic je kolem $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, nejnovějších až $130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Snaha zvýšit výkonnost a snížit předváhu vede k prodlužování tažných stolic, ke zvyšování tažných rychlostí a zvětšování počtu současných tahů (až 10). Délka dosahuje až 60 m. Stolice mohou být opatřeny tzv. zatlačovacího zařízením, které přední konce tyčí v délce asi 200 mm protlačí přímo průvlakem pomocí hydraulických čelistí, takže tyče se nemusí hrotovat. Stolice jsou vybaveny tlakovým mazacím zařízením, které umožňuje mazání průvlaku během tváření.

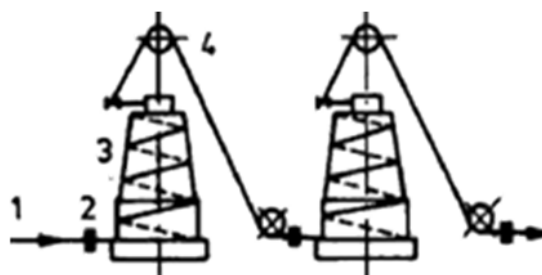
Použití řetězu jako tažného elementu není při vysokých rychlostech a měnící se zátěži výhodné, proto se začíná používat tažných lan nebo hydraulických pístů. Moderní automatizované stolice mohou vytahovat 3 000 až 4 000 m polotovarů za hodinu.

Stolice s navíjením taženého drátu

Tyto stolice lze rozdělit podle konstrukce na:

- akumulční,
- přímotažné,
- s klínovou drážkou,
- pracující se skluzem drátu.

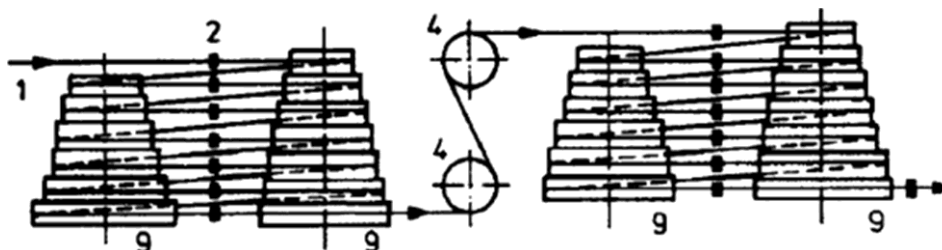
U **akumulačních drátotahů** pracujících se zásobou drátu na bubnech jsou jednotlivé tažné bubny konstantního průměru, přičemž jejich otáčky se v závislosti na prodloužení drátu úměrně zvětšují. Drát je veden z jednoho taženého bubnu přes průvlak k následujícímu tažnému bubnu systémem rotujících kladek. Na každém tažném bubnu je dostatečná zásoba drátu k vyrovnání malých diferencí v rychlosti a aby se přitom drát nepřetrhl, navinuje se na předcházející tažný buben vždy více drátu než na buben následující. (viz **obr. 11.6.**, kde: 1 – drát; 2 – skříňka s průvlakem; 3 – tažný buben; 4 – převáděcí kladka).



Obr. 11.6. Schéma akumulčního drátotahu

U **přímotažných drátotahů** je poměr průtažné rychlosti drátu a obvodové rychlosti tažného bubnu roven 1. Tento vztah je zajištěn automatickou regulací otáček tažného bubnu. Na každém tažném bubnu musí být při tažení nejméně tolik závitů drátu, aby byla třením dosažena potřebná tažná síla.

Vícetahové **drátotahy se skluzem** pracují tak, že je drát veden mezi dvěma průvlakami přes tažné kotouče. Na tažném kotouči je drát 1 až 3 krát ovinut. Třením, vznikajícím mezi drátem a povrchem tažného kotouče, se vyvozuje potřebná tažná síla. Drát probíhá průvlakem vzrůstající rychlostí, čehož se dosáhne obvykle stupňovitým uspořádáním kotoučů (viz **obr. 11.7.**, kde: 1 – drát; 2 – skříňka s průvlakem; 4 – převáděcí kladka; 9 – odstupňované tažné kotouče). Obvodová rychlost jednotlivých tažných kotoučů na sebe navazujících je volena tak, aby každý tažný kotouč mohl odvést více drátu, než může přijmout následující průvlak. Obvodová rychlost tažného kotouče mezi dvěma průvlakami přesahuje o 3 až 5 % rychlost drátu probíhajícího těmito průvlakami. Poměr rychlostí drátu k obvodové rychlosti kotouče je menší než 1, popř. roven 1 a nazývá se koeficientem skluzu.



Obr. 11.7. Princip drátotahu pracujícího se skluzem

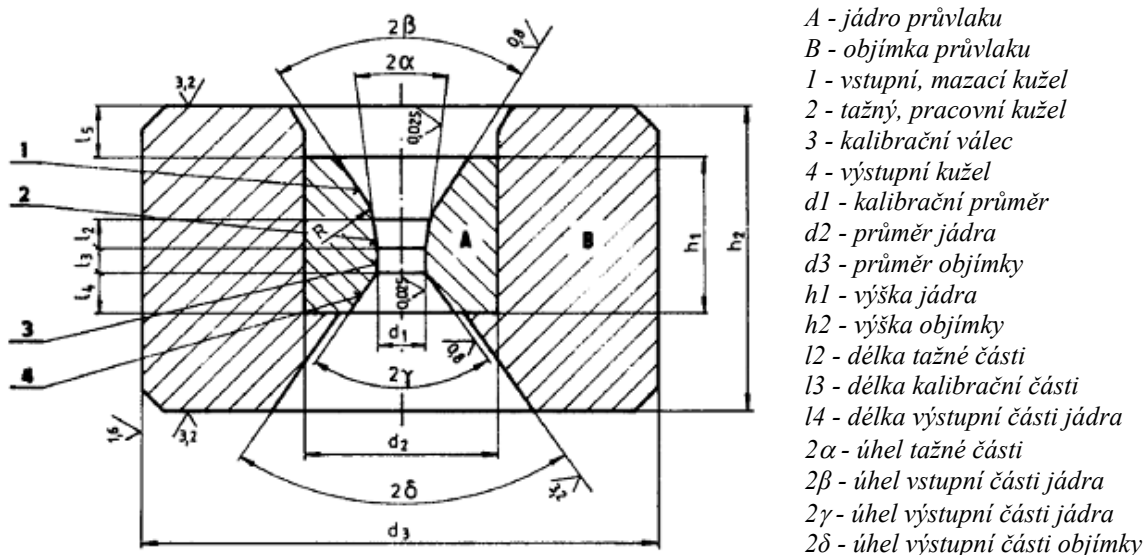
□ Průvlaky

Průvlak je základním nástrojem používaným v procesu tažení ocelového drátu. V průvlaku probíhá proces plastické deformace taženého drátu, která je vyvolaná společným působením tlaku v průvlaku a tažné síly na drát vyvozené tažným strojem.

Průvlak tvoří 2 části - **jádro** a **objímka** (viz obr. 11.8.). Specifikace průvlaků se provádí podle materiálu jádra. Rozeznáváme průvlaky **tvrdokovové** (karbid wolframu WC), průvlaky z **monokrystalických a polykrystalických diamantů**, průvlaky z jiných materiálů (kámen).

□ Maziva

Celkový průběh procesu tažení ocelového drátu a jeho výsledných vlastností po tažení je ovlivněn řadou činitelů, jako např.: rychlost tažení, velikost tažné síly, teplo uvolněné při plastické deformaci, historie tváření, atd. Je tedy zřejmé a praxí dokázané, že při procesu tažení působí současně několik faktorů, které je problematické ustálit v jejich optimální působnosti a tím tedy efektivně navrhnout způsob nejvýhodnější technologie výroby drátu.



Obr. 11.8. Schéma průvlaku

Jedním z početné řady činitelů významně ovlivňující průběh tažení je mazivo a jeho vhodná aplikace a složení.

Členění maziv

Podle chemického složení:

- minerální oleje
- emulze
- rostlinné oleje
- tuhé uhlovodany
- mýdla
- maziva s plnidly
- živočišné tuky
- konzistenční maziva

Podle způsobu použití v praxi:

- maziva tuhá
- maziva polotuhá
- maziva kapalná

Podle technologie tažení:

- maziva pro tažení za sucha
- maziva pro tažení za mokra



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Tažený drát se z výrobního hlediska dělí na patentovaný, nepatentovaný a z legovaných ocelí. Patentování je speciální způsob tepelného zpracování, který v drátě zajistí jemnělamelární perlit, používá se proto u ocelí s obsahem uhlíku nad 0,2%. Mezi výrobky z taženého drátu najdeme i ty na jejichž vlastnosti jsou kladeny požadavky špičkové jakosti (lana, kordy, pružiny, jehly, atd.). Při tažení je drát protahován otvorem průvlatku tak, že se postupně zmenšuje jeho průřez a zvětšuje jeho délka. Tažení probíhá na tažných stolicích ať přímočarých nebo s navíjením drátu na buben. Průvlatky musí být otěruvzdorné, jako materiál jádra se proto používá karbid wolframu nebo polykrystalický či monokrystalický diamant. Tažení je mezi procesy tváření necitlivější ke zhoršeným podmínkám tření, proto je této problematice věnována velká pozornost.

11.4. Protlačování

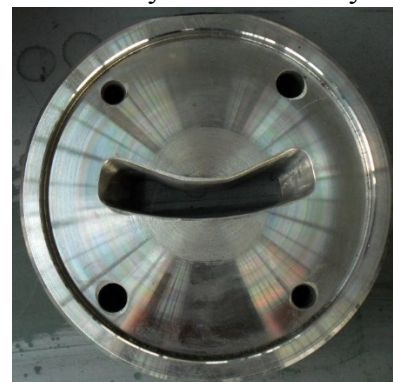


Pojmy k zapamatování

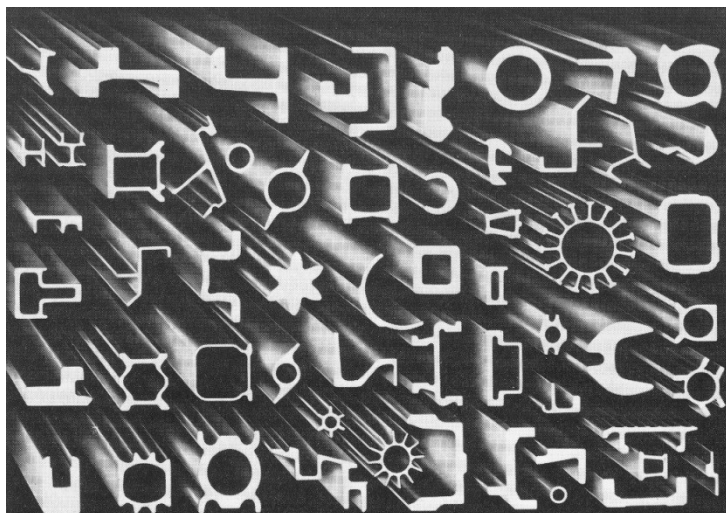
Protlačování dopředné a zpětné, průtlačnice, matrice

Průtlačné lisování, protlačování, je technologický proces, při němž kov, uzavřený v **průtlačnici** a vystavený všestrannému tlaku je přiveden do plastického stavu, takže vytéká otvorem **matrice** (viz **obr. 11.9.**), uzavírající průtlačnici, v požadovaném tvaru příčného průřezu hotového výrobku. Tímto způsobem lze vyrábět jak profilové tyče velmi složitých tvarů a obrysů, tak profilové tyče duté. Trubky kruhového průřezu, vyráběné výtlačným lisováním, patří podle principu výrobního procesu rovněž mezi duté profilové tyče, kde je využito technologie průtlačného lisování.

Protlačování má široké použití při výrobě zejména takových profilů, které nelze vzhledem ke složitosti průřezu vyrábět válcováním, tažením nebo zakružováním. Je velmi rozšířeno při tváření neželezných kovů, kde je možno tuto technologii využít pro jejich zpracování **za studena**. Ale používá se i pro zpracování ocelí a těžkovtavitelných slitin, kde se technologický proces uskutečňuje **za tepla**. Pro plastické vlastnosti vhodný stav



Obr. 11.9. Matrice



Obr. 11.10. Průřezy protlačovaných profilů

napjatosti umožňuje zpracovávat i kovy a jejich slitiny za normálních podmínek křehké, které nelze ani kovat, ani válcovat, ani táhnout. Pro protlačování ocelí se používají lisy o lisovací síle 300 až 120 000 kN. Tvar profilových tyčí (viz **obr. 11.10.**) při protlačování určuje tvar otvoru matrice, kterou lze snadno vyměňovat. Proto se protlačovací lisy hodí pro výrobu profilů v malých sériích, čímž se vhodně doplňuje i výrobní program válcovacích tratí a tažírén.

11.4.1. Způsoby protlačování

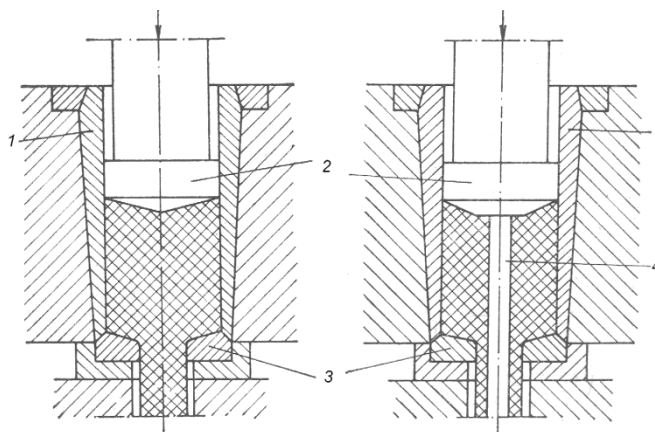
V technologické praxi se používají dva základní způsoby průtlačného lisování kovů: **dopředné protlačování** a **zpětné protlačování**. Ale používá se i kombinace obou způsobů. Uspořádání lisů pro dopředné protlačování umožňuje výrobu profilových tyčí větší délky, než je tomu u lisů pro zpětné protlačování.

Dopředné protlačování

Princip protlačování plných tyčí je patrný z **obr. 11.21 vlevo**. Špalek kruhového průřezu, vložený do průtlačnice 1, se průtlačníkem 2 nejdříve napěchuje tak, aby průtlačnici zcela vyplnil. Při dalším pohybu průtlačníku je kov vystaven všestrannému tlaku s největší napětíovou tlakovou složkou v osovém směru, uvede se do plastického stavu a je vytlačován otvorem matrice 3 jako plná profilová tyč ve směru pohybu průtlačníku.

Při výrobě duté profilové tyče (viz **obr. 11.21 vpravo**), např. trubky, se napěchovaný špalek nejdříve vyděruje trnem 4, který prochází průtlačníkem 2, přičemž se tento trn zastaví v takové poloze, že mezi ním a obrysem pevné matrice 3 je mezera, kterou kov při dalším pohybu průtlačníku vytéká jako dutá profilová tyč.

U těžkovaritelných kovů a slitin, např. u vysokolegovaných austenitických ocelí, se výchozí špalek vyděruje předem (na samostatném lisu nebo vyvrtáním) a po ohřátí se dále zpracuje na protlačovacím lisu. Trn procházející průtlačníkem a matricí vymezuje jen vnitřní obrys profilové tyče.

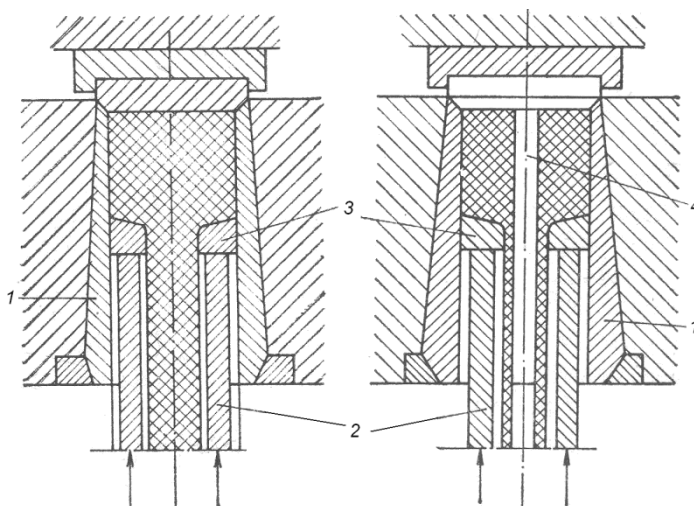


Obr. 11.21. Schéma dopředného protlačování, **vlevo** plných tyčí, **vpravo** dutých tyčí

Zpětné protlačování

Princip zpětného protlačování je na **obr. 11.22 vlevo**, který znázorňuje protlačování plných tyčí. Výchozí materiál, opět kruhového průřezu, vložený do průtlačnice 1, je vystaven tlaku od průtlačníku 2, který působí na pohyblivou matrici 3. Tímto tlakem se kov vytlačuje matricí proti směru pohybu průtlačníku.

Zpětným protlačováním lze též vyrábět duté profilové tyče (viz **obr. 11.22 vpravo**). Princip je znázorněn na pravém obrázku. Proti zpětnému protlačování plných tyčí je u dutých tyčí nutný ještě trn 4, který vytváří vnitřní obrys dutiny tyče.



Obr. 11.22. Schéma zpětného protlačování, **vlevo** plných tyčí, **vpravo** dutých tyčí



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

Protlačování je technologie, při které je kov uzavřen v průtlačnici a je přiveden průtlačníkem do plastického stavu, takže vytéká otvorem matrice. Díky všestrannému tlaku je tak možno vyrábět tyče velmi složitých průřezů a to jednou tvářecí operací. Díky tomu se však zvyšuje deformační odpor kovu a tím i energosilové podmínky tváření, proto je zapotřebí lisů o síle až 120 MN. Běžně se používají dva způsoby protlačování: dopředné a zpětné. Zpětné protlačování je silově méně náročné než dopředné. V obou případech je potřeba zajistit dostatečné mazání stykových ploch.



Otázky k probranému učivu

1. Jaké se okuje dělí podle chemického složení?
2. Co jsou primární a co sekundární okuje? Jak se odstraňují primární okuje?
3. Proč nám vadí primární okuje a proč sekundární?
4. Jaký je vliv teploty a doby setrvání na této teplotě na množství okují?
5. Vysvětlete podstatu moření a porovnejte s mechanickým odokujením.
6. Kdy při moření vzniká vodík?
7. Jaká jsou negativa a jaká pozitiva vývinu vodíku při moření?
8. Jak lze snížit obsah vodíku, který se dostane do oceli při moření?
9. Jaká je funkce nosiče maziva?
10. Jaké znáte konstrukce mořících linek?
11. Na čem je založena podstata lámání a otryskávání okují?
12. Jak lze eliminovat množství okují na drátě po ohýbání?
13. Proč se válcují pásy za studena?
14. Jaká operace předchází vlastnímu válcování za studena?
15. Jaké tloušťky obvykle mají pásy válcované za studena?
16. Jakých maximálních šířek se obvykle vyrábějí pásy za studena?
17. V jaké podobě se dodávají oceli válcované za studena?
18. Jaká jsou omezení dvou stolice při válcování za studena?
19. Co je hlavní předností stolic kvarto proti stolicím duo?
20. K čemu slouží mezilehlé válce u stolic sexto?
21. Jaké průměry pracovních válců mívají obvykle 20 válcové stolice?
22. Jak dělíme dráty z výrobního hlediska?
23. Co je to patentování?
24. Jakou mikrostrukturu má patentovaný drát za studena?
25. K čemu se při tažení drátu používá žihání?
26. Jakým způsobem můžeme chránit povrch drátu před působením vnějších vlivů?
27. Co je to průvlak?

28. Jak se jmenuje část průvzlaku, ve které dochází k vlastní deformaci?
29. V které části průvzlaku dosahuje podélné tahové napětí svého maxima?
30. Jaký je rozdíl mezi tažnou stolicí s přímočarým pohybem a s navíjením?
31. Popište základní části tažné stolice-drátotahu.
32. Nakreslete schéma průvzlaku.
33. Z jakého materiálu se vyrábí průvzlaky?
34. Jaké znáte typy maziv?
35. K čemu slouží hrotovací zařízení?
36. K čemu se nejčastěji používá průtlačné lisování?
37. Jaké znáte způsoby protlačování?
38. Nakreslete schéma dopředného protlačování plných tyčí.
39. Nakreslete schéma zpětného protlačování plných tyčí.
40. Při jakém způsobu protlačování je nejnižší tření?
41. Jaké maziva se používají při protlačování za tepla?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., *Tváření oceli*. SNTL, Praha 1988, ISBN 04-408-88
- ŽÍDEK, M., KUŘE, F., *Válcování*, skripta VŠB-TU Ostrava, 1983, 1. vydání
- GINZBURG, V., B., *Steel-Rolling Technology, Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel. 1989, ISBN 0-8247-8124-4
- MARCOL, J., *Tažený ocelový drát - 1 a 2 díl*, ŽDB 1996
- ENGHANG, P., *Steel wire technology*, Materialtechnik HB, 2008, ISBN 91-631-1962-5
- KNAP, F., KRUZEL, R., CIEŚLAK, Ł., *Ciągnienie drutów, prętów i rur*, Politechnika Częstochowska, prace dydaktyczne, Metalurgia nr. 36, 2004, ISBN 83-87745-17-0
- Wire Forming Technology International*, www.wireformingtech.com
- Wire Journal International*, official publication of the Wire association international, www.wirenet.org
- FELDMANN, H.D., *Protlačování oceli*, SNTL, Praha, 1962, ISBN 04-266-62

12. Význam slévárenství, příprava formy, výroba forem a jader



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat stručný vývoj slévárenství
- popsat přípravu modelů
- definovat základní složky forem a jader a jejich rozdělení
- definovat jednotlivé způsoby přípravy forem a jader
- popsat progresivní technologie výroby odlitků



Výklad

12.1. Vývoj slévárenství

Jednu z nejkratších cest umožňující přechod od surovin k výrobku je technologie odlévání, kdy je výrobek vytvářen přímo z roztavené kovové slitiny.

Způsob výroby součásti nebo předmětu, při kterém se roztavený kov nebo jiný roztavený materiál vlije do formy, jejíž dutina má tvar a velikost budoucího výrobku se nazývá odlévání. Výrobek vzniklý ztuhnutím tekutého kovu ve formě nazýváme odlitkem. Odlitek může být někdy hotovým výrobkem – součástí, nebo se ještě dále mechanicky obrábí.

Pokud konstruktér řeší výrobu součástí odléváním, potom může ve velmi krátké době uskutečnit svoje představy, přičemž proti jiným výrobním technologiím má *podstatně větší volnost v tvarování výrobku*. Odléváním lze dokonce zhotovit výrobky takového tvaru, které by nebylo možné vyrobít žádným jiným způsobem. Výroba součástí odléváním umožňuje skoro ideální přizpůsobení tvaru výrobku jeho využití a často i spojení několika součástí do jediného celku. Při obrábění odlitků vzniká asi 10 až 60 % odpadu, kdežto při obrábění tvářených materiálů dosahuje množství odpadu až 80 %.

V některých odvětvích výroby, zvláště pak ve strojírenství, patří výroba součástí odléváním mezi přední výrobní technologie a u některých strojírenských oborů tvoří odlitky dokonce převážnou část hmoty výrobku.

Příklad podílu odlitků na celkové hmotnosti výrobků, v porovnání s jinými polotovary, je znázorněn pro vybrané strojírenské obory v tab. 12.1.

Tab. 12.1 Poměrné zastoupení polotovarů [%] v konstrukci strojírenských výrobků

Typ polotovaru	Obráběcí stroje	Parní turbíny	Spalovací motory	Jeřáby	Automobily
Tvářená ocel	19	44	19	79	5
Odlitky z oceli	1,5	16	3,8	13,5	-
Odlitky z litin	73	20	68	4,5	13
Odlitky ze slitin Al			1		5
Výkovky	5	16,5	7	1,8	13
Výlisky z plechu	-	0,2	0,4	0,1	42
Neželezné kovy	0,5	-	0,3	0,1	2
Ostatní materiál	1	3,3	0,5	1	20

Hmotnost odlitků může být velmi různá. Odléváním lze zhotovit součásti o hmotnosti od několika desetin gramu až po několik stovek tun, o tloušťce stěn od deseti do stovek milimetrů a to z nejrůznějších kovových materiálů (které ovšem musí být slévateľné), takže *lze vyhovět i těm nenáročnějším požadavkům konstruktérů*. Je však nutné, aby byli odběratelé odlitků seznámeni alespoň se základy slévářské technologie, a to především proto, že použitá technologie podstatně ovlivňuje vlastnosti výrobku i náklady na výrobu.

Slévářská výroba má velmi dlouhou historii a vznikla přibližně asi 2000 až 2500 let před naším letopočtem. Její vznik byl podmíněn objevem kovu s poměrně nízkou teplotou tavení – bronz (cínového a arzénového) a je tedy úzce spjato s dobou bronzovou.

Bronzové období se ve slévářství udrželo až do konce renesance, tj. asi do počátku 17. století. Z bronzu (slitina Cu+Sn) se vyráběly odlitky více či méně jako umělecká díla (sochy, chrámové dveře apod.), zvony a děla. Kromě bronzu se v menší míře používalo i cínu.

Dalším materiálem pro výrobu odlitků byla *litina* (slitina Fe+C+ další prvky). Litinu bylo možné využít až se zavedením dmýchadel ve vysokých pecích a dosažení tak vysoké teploty, že se železo redukováno z rud vysoko nauhličilo, a tím se snížil jeho bod tavení natolik, že se z pece vypouštělo tekuté.

První litinové odlitky se sice objevují již koncem 14. století, ovšem podstatného rozšíření doznalo odlévání litiny teprve v 16. a 17. století, a to nejprve pro dělové koule a dělové hlavně. Teprve později bylo použito litiny pro obecné účely, především pro odlitky kamen a jako umělecké odlitky. V 18. století nabyly velké proslulosti české podbrdské slévárny (např. Komárov).

Největší rozvoj odlévání litiny spadá do druhé poloviny 19. století, a to především proto, že rozvíjející se průmysl a stavebnictví našly v litině materiál, který měl na tehdejší dobu velkou pevnost a který se velmi snadno přizpůsobil všem tvarovým požadavkům. Potom je 19. století také vyvrcholením přechodu slévářství z uměleckého řemesla na strojírenský obor a slévárny vznikaly především v blízkosti strojírenských závodů, jako oddělení strojíren nebo hutí.

Velkou důležitostí zde měl vynález *kuplovny* (r. 1794 Wilkinsonem), která učinila slévárny nezávislými na hutích a umožnila vyrábět litinu vyšší jakosti.

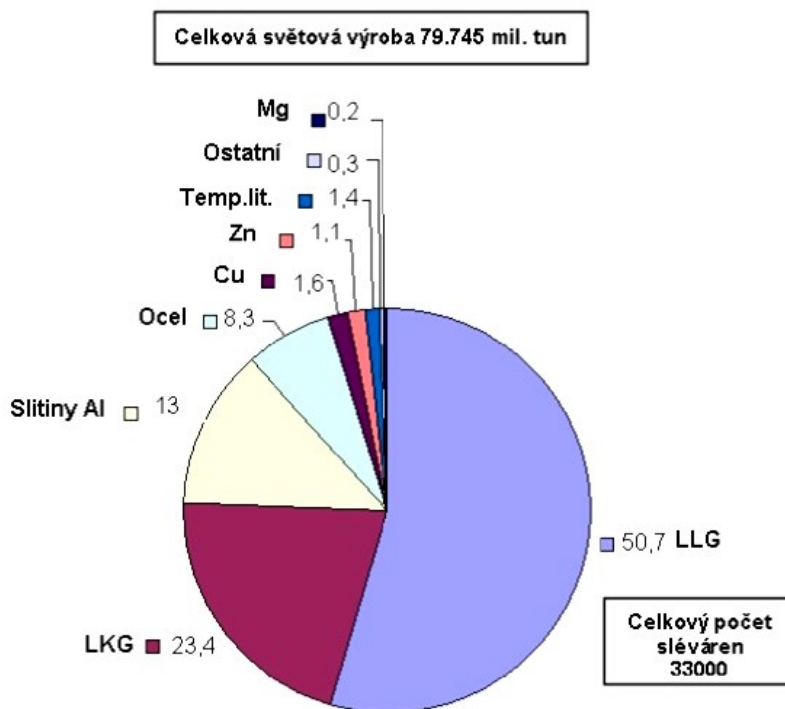
Brzy se však ukázalo, že šedá litina (litina s lupínkovým grafitem) nestačí svými vlastnostmi pro nejnáročnější odlitky (děla, zbrojní zařízení) a proto se po objevu nových metod výroby plávkové oceli (konvertory, siemens-martinské pece) započalo s výrobou především *těžkých ocelových odlitků* (Plzeň, Vítkovice).

Začínající velkovýroba ve strojírenství indukovala počátkem 20. století i velkovýrobu ve slévářství. Slévářství se rozštěpilo na kusovou výrobu, která pokračovala ve staré řemeslné tradici a na sériovou výrobu, kde se stále více uplatňovaly nové výrobní stroje a technologie vedoucí až k *automatizovaným výrobním linkám* s produkcí až 400 forem za hodinu. Snaha po stále větší hospodárnosti pak vedla ke zrušení drobných řemeslných sléváren a k vytváření velkých sléváren s produkcí 100 000 t ročně i více.

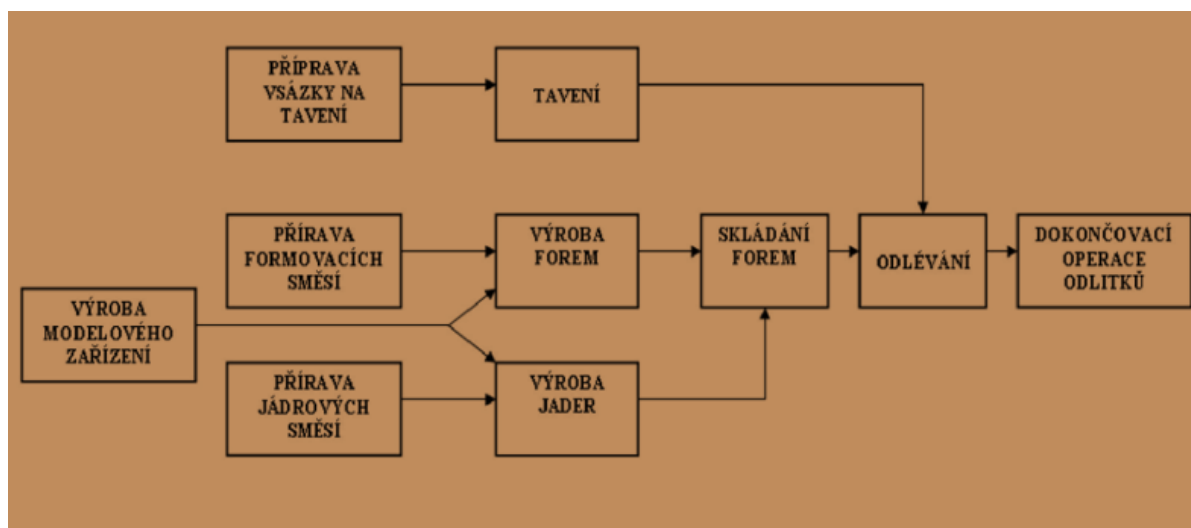
S výrobou odlitků ze *slutin lehkých neželezných kovů* (Al, Mg) bylo započato teprve počátkem 20. století, přičemž mohutným impulsem byl rozvíjející se automobilový a letecký průmysl. Poměrně nízká tavicí teplota těchto kovů umožnila zavedení trvalých kovových forem, přičemž se kov odléval nejdříve ručně a plnil formu vlastní hmotností. Pozdější vývoj vedl ke vzniku tlakového lití.

Mohutným rozvojem prošlo slévářství v letech po druhé světové válce. Následně se tempo rozvoje zpomalilo a to jednak v souvislosti s podstatným poklesem výroby odlitků hromadné spotřeby a hutních odlitků (kokily, potrubí, litinové radiátory) a dále ve spojení s transformací českého průmyslu po roce 1989 a s celosvětovou tendencí přecházet od těžkých jednoduchých odlitků na odlitky složité, tenkostěnné, s velkou přesností a hladkostí povrchu.

Česká republika byla například v roce 2002 na sedmém místě v Evropě s produkcí 440 tisíc tun vyrobených odlitků. Na obr. 12.1 je znázorněna celosvětová produkce odlitků dosáhla v roce 2004 objemu 79,7 mil. tun, přičemž ve slévárnách v České republice v posledních letech výroba kolísá kolem půl milionu tun. Z obr. 12.1 můžeme dále vyčíst, že převládá výroba litinových odlitků, která tvoří 75 % tj. litina s lupínkovým grafitem LLG a litina s kuličkovým grafitem LKG. Následně opět jako příklad můžeme uvést, že v roce 2007 (kolem 200 sléváren) vyrobila Česká republika 580 tisíc tun odlitků tj. 0,8% světové výroby. V současnosti po období dlouhé recese budou výroby částečně nižší.



Obr. 12.1 Světová výroba odlitků



Obr. 12.2 Schéma technologického toku výroby ve slévárně

Ve slévárnách se vlastní výroba člení do několika základních činností a následně do jednotlivých výrobních fází. Základní schéma je znázorněno na obr. 12.2.

12.2. Příprava formy

12.2.1. Výroba modelů

Modelové zařízení (model a jaderníky) je nutné pro zhotovení formy, jehož pomocí se dosáhne žádaných tvarů odlitku. Odlitky odléváme převážně do netrvalých, jednorázových forem (z pískové nebo keramické směsi) nebo do forem trvalých (kovové kokily). Kromě toho existují i polotrvalé formy. Do těchto forem lze odlít více než 1 kus, ale po každém odlití forma potřebuje určitou úpravu.

Při odlévání do netrvalých forem je nutný model odpovídající svým tvarem vnějšímu povrchu odlitku, který se vytvoří jeho zaformováním a opětovným vytažením z formovací směsi (model je pozitiv, forma negativ a odlitek opět pozitiv zmenšený o smrštění). Vnitřní dutiny odlitku se vytvoří jádrem, která je nutno zhotovit ve zvláštních jadernících.

Při odlévání do trvalých forem odpadá výroba modelu a dutina formy se vytváří mechanickým obráběním přímo z kovu, takže tvoří negativ a odlitek je pozitiv zmenšený o smrštění. Modely, jaderníky a trvalé formy se vyrábějí v modelárnách, které často bývají součástí slévárenských závodů. Základními podklady pro výrobu modelového zařízení jsou postupový výkres a objednávka.

Podle zvolené technologie, objednaného množství odlitků a předepsaných požadavků (přesnost, hladkost) se volí materiál modelového zařízení. Pro malá množství odlitků a nenáročné požadavky se používá modelových zařízení ze snadno obrobitelných materiálů (např. dřevo), které však mívají krátkou životnost.

12.2.2. Příprava formovacích materiálů pro výrobu jednorázových pískových forem

I když odlévání do trvalých forem, zejména u neželezných kovů nabývá stále více na významu, zůstává odlévání do netrvalých, jednorázových forem převažující technologií. Netrvalé formy se zhotovují z formovacího materiálu a jsou po odlití odlitku znehodnoceny.

Základní pojmy

Formovací materiály obvykle tvoří tři složky: *ostřiva*, *pojiva* a *přísady*. Podle původu se rozeznávají *formovací materiály přirozené* (přírodní), které se používají prakticky v takovém stavu, v jakém se nalézají v přírodě (s úpravou vlhkosti a zrnitosti) a *formovací materiály syntetické*, které se připravují uměle z jednotlivých složek.

Podle způsobu použití se pak formovací materiály dělí na *modelové směsi* a *výplňové směsi*. Modelovými směsmi se při výrobě formy obkládá model. Přicházejí do přímého styku s roztaveným kovem, a proto musí být velmi jakostní. Výplňovými směsmi se pak doplňuje zbývající volný prostor v rámu.

V některých slévárnách ocelí a litin a ve slévárnách neželezných kovů se pro zvýšení produktivity práce používají *jednotné směsi*, tj. směsi stejných vlastností, které slouží zároveň jako modelová i jako výplňová směs.

12.3.Suroviny pro přípravu formovacích směsí

12.3.1. Ostřiva

Ostřivo tvoří základní kostru formovacího materiálu a skládá se ze zrn větších než 0,02 mm. V podstatě určuje základní vlastnosti směsi, především spěchovatelnost, prodyšnost a chemickou i tepelnou odolnost proti roztavenému kovu.

Jako ostřivo se nejčastěji používá *křemen* (oxid křemičitý – SiO_2), který je hlavní součástí přirozených písků. Tento materiál má kyselý charakter a je v přírodě nejvíce dostupný a náklady na jeho získávání jsou proti jiným ostřivům nejnižší. Čistý křemen má teplotu tavení kolem 1700°C, vlivem nečistot (živec, vápenec, oxidy železa) se tavicí teplota značně snižuje. Nevýhodou křemene je neplynulá, diskontinuální (neplynulá) tepelná dilatace. Diskontinuita dilatační křivky je způsobena modifikačními změnami křemene. Velké objemové změny nastávají při ohřevu nad teplotu 573 °C, při které dochází ke změně modifikace $\beta \rightarrow \alpha \text{SiO}_2$.

Šamotový lupek se vyrábí vypalováním vysoce žárovzdorných břidličnatých jílu (lupků) v rotačních pecích při teplotách nad 1100 °C. Mísením a tříděním získáme ostrohranné umělé ostřivo, které má plynulou dilatační křivku. Obvykle se používá šamotu s odolností proti žáru vyšší než 1710 až 1730°C. Je velmi drahý a vyplatí se jen pro tepelně a mechanicky namáhané formy (těžké ocelové odlitky). Chemicky má neutrální charakter.

Korund je skoro čistý oxid hlinitý ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) – vzniklý přetavbou v elektrické peci (elektrokorund). Je vysoce stálý a neutrální povahy. Má také bod tavení nad 2000 °C, ale je velmi drahý, takže se používá jen ve speciálních případech. Jeho uplatnění je spíše v žárovzdorných nátěrech a v ostřivech skořepinových forem.

Magnezit je představitelem bazických materiálů a je tvořen oxidem hořečnatým (85 % MgO). Má teplotu tavení nad 2500 °C. Používá se pro formy na ocelové odlitky s vysokým obsahem manganu, které se s křemenným pískem značně spékají.

Z materiálů na bázi *uhlíku* (grafit, drcené elektrody) se zhotovují jen velmi namáhaná místa nebo polotrvalé formy, které vydrží s menšími opravami více odlítí.

Chromit – pro slévárenské účely se používají chromity keramické, které mají nižší obsah chromu a vyšší obsah hliníku. Chromitové ostřivo má obsahovat minimálně 45 až 48 % Cr_2O_3 a maximálně 12 % Fe. Chromitové ostřivo je velmi rozšířené ve slévárnách ocelových odlitků, protože brání penetraci kovu do formy.

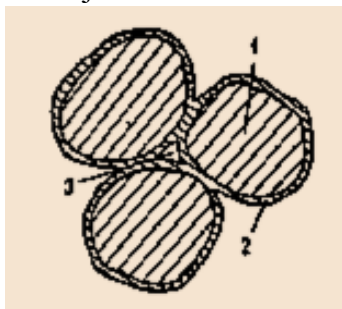
Zirkoniové ostřivo – představuje směs ZrO_2 , SiO_2 a ZrO_2 . Měrná hmotnost ostřiva se pohybuje od 4560 do 4720 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ v závislosti na kombinaci jednotlivých složek. V přírodě se vyskytují vzácně a jsou proto při použití ve slévárenství velmi nákladné. Proti křemenným pískům mají řadu předností: minimální tepelnou dilataci, vysokou tepelnou vodivost a vysokou chemickou stálost.

Olivín – olivínový písek je materiál sopečného původu s vysokým obsahem Mg. Je neutrální až slabě zásadité povahy, má teplotu tání 1870 °C a nižší tepelnou dilataci než křemenné ostřivo, s téměř lineárním průběhem.

12.3.2. Pojiva

Pojivo je látka nebo směs látek tvořící pojivovou soustavu formovací směsi, která se jemně rozprostře po jednotlivých zrnech ostřiva a váže je dohromady.

Pojivo dodává formovací směsi pevnost za syrova (vaznost) i plastičnost nutné pro formování, pevnost po vytvrzení (vysušení), i za vysokých teplot při lití. Obvykle se pojiva dělí na *anorganická* a *organická*.



Obr. 12.3 Schéma formovací směsi,
1-ostřivo, 2-pojivo, 3-póry

Podle druhu použitého pojiva se také podle historického vývoje rozlišují formovací směsi čtyř generací

Směsi I. generace - využívají jílových, anorganických pojiv. Začaly se používat již v raném stadiu slévárenství jako přirozené formovací písky.

Směsi II. generace snížily fyzickou námahu a hlukovou zátěž obsluhy. Rozšířily se v polovině 20. století s rozvojem hromadné výroby odlitků a v této souvislosti se začalo hovořit o chemizaci slévárenské výroby. K přípravě směsi se používají anorganická i organická pojiva. Přes nesporné výhody jsou tyto směsi problematické v souvislosti se vznikem škodlivých emisí a vzniklé odpadní písky jsou zařazeny jako nebezpečné odpady.

Směsi III. generace prakticky pracují bez pojiv, protože k výrobě formy využívají fyzikálních principů - magnetismus, vakuum, zmrazování. Z hlediska ochrany životního prostředí se jedná o bezodpadové technologie, ale dosud se používají jen pro určité typy odlitků.

Směsi IV. generace využívají k pojení písku mikrobiologické procesy. Zatím jsou využívány jen ojediněle, ale z hlediska vývoje slévárenství se jeví jako velmi perspektivní.

Z anorganických pojiv se nejčastěji používají *jíly*, méně častěji *vodní sklo* a *cement*.

Jílová pojiva patří k nejrozšířenějším slévárenským pojivům, protože jsou ekonomicky dostupné. Vlivem vysokých vazných sil dodávají formovacím směsím dobrou pevnost za syrova i za sucha.

Podle struktury se rozlišují jíly *kaolinitické*, *illitické* a *montmorillonitické*.

Důležitou součástí formovacích směsí s jílovými pojivy je volná (molekulová) voda, která umožňuje rozvinout plastické vlastnosti jílu při vytváření vaznosti směsi.

Kaolinitické jíly mají vysokou žárovzdornost, ale dosahují poměrně malou vaznost. Do směsi se jich přidává až 20 %. Používají se pro formy na velmi těžké ocelové odlitky a jsou základem šamotových formovacích směsí.

Illitické jíly jsou hlavním pojivem přirozených formovacích písků.

Jíly montmorillonitické jílové materiály obsažené především v bentonitech (75-80% montmorillonitu). Při malém obsahu vody (do 4 %) dávají velmi vysokou pevnost za syrova (vaznost).

Vodní sklo se přidává do směsi v množství 3 až 8 %. Je to v podstatě vodný roztok křemičitanu sodného ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$), jehož vytvrzení se dosáhne buď plynným oxidem uhličitým nebo vysušením studeným nebo teplým vzduchem. Tyto druhy směsí označujeme jako směsi s ovládaným ztužováním a zkráceně se jím začalo říkat chemicky tvrzené „CT“ směsi.

Na rozdíl od toho existují samotvrdnoucí směsi (se samovolným ztužováním), u kterých vytvrzovací reakce probíhá mezi vodním sklem a tvrdidlem (kapalným nebo práškovým). Tuto roli

sehrává např. přídavek asi 5 až 7% bentonitu (vazné CT směsi) nebo cement. Kapalná tvrdidla jsou esterového typu, při jejichž použití lze podstatně snížit obsah vodního skla ve směsi (na 2 až 3 %).

Cement se jako pojivo dnes používá zřídka.

Z organických pojiv dnes jsou to *umělé pryskyřice*. Dávají vysoké pevnosti po vysušení nebo vytvrzení směsi a mají velmi dobrou rozpadavost po odlití (termodestrukce pojiva) a proto se používají hlavně jako jádrové směsi.

Umělé pryskyřice jsou moderními slévárenskými pojivy. Vytvrzují se buď krátkým vytvrzením za tepla při teplotě asi 180 až 200 °C (takzvaná metoda horkého jaderníku – „Hot Box“) nebo chemicky za studena (metoda studeného jaderníku – „Cold Box“).

Nejčastěji se používá pryskyřic fenolformaldehydových, močovinoformaldehydových a furanových.

Při výrobě jader dnes tvoří převažující technologii. Jejich nevýhodou jsou určitá omezení z hlediska ochrany životního prostředí, protože při jejich vytvrzování a hlavně během tepelné destrukce po odlití vznikají zdraví škodící zplodiny.

12.3.3. Přísady

Do formovacích materiálů se někdy přidávají další přísady, kterými se mají zlepšit určité vlastnosti. V podstatě jde o látky *uhlíkaté*, *neplastické* a *plastifikátory*.

Uhlíkaté látky (nejčastěji mleté černé uhlí – letek) se přidávají do bentonitových formovacích směsí na syrové formy pro litinové odlitky. K vysvětlení mechanismu jejich působení ve směsi existuje několik teorií. Zjednodušeně lze říci, že při odlévání dochází k jejich pyrolýze a vzniklé pyrolýzní produkty brání kovu proniknout mezi zrna písku a tím zlepšují povrch odlitku.

Neplastické látky (křemenná moučka, šamotová moučka,) jsou velmi jemné a vyplňují mezery mezi zrny formovacích písků. Tím se sice zlepšuje povrch odlitku, ale klesá prodyšnost formy.

Plastifikátory (dextrin, glukóza, sulfíťový louh) zlepšují plastické vlastnosti směsí a také jejich prodyšnost. Sacharidy zároveň zmenšují osychání formovacích směsí. Kromě toho existuje i určitá skupina přísad pro zlepšení rozpadavosti směsí s anorganickými pojivy.

12.3.4. Pomocné látky

Pomocné látky nejsou přímo obsaženy ve formovacích materiálech, ale používají se při výrobě nebo úpravě forem a jader.

Jsou to *dělicí prostředky*, *lepidla*, *postříky* a *nátěry*.

Dělicí prostředky (separátory) mají chránit povrch modelového zařízení a usnadnit vyjímání modelu z formy nebo jádra z jaderníku apod.

Nejčastěji se používá čistého petroleje nebo zaprašovacích prostředků, grafit, vápenec, lykopodium aj.

Lepidla slouží ke skládání složitějších jader z jednotlivých částí. Nejčastěji se používá roztoku dextrinu, sulfíťového výluhu nebo vodního skla.

Postříky mají zpevnit povrch forem nebo jader a zabránit osychání. Jsou to většinou vodné roztoky sulfíťového výluhu nebo akrylátové pryskyřice.

Nátěry (barvidla) jsou vodné nebo organické suspenze z vysoce žárovzdorných materiálů a dalších přísad, které se nanášejí na povrch formy nebo jádra poléváním, máčením, nástřikem nebo natíráním štětcem.

12.4. Příprava formovacího materiálu

Ani přirozený formovací písek nelze většinou používat bez úpravy a syntetické formovací směsi se připravují výhradně přímo ve slévárně.

Suroviny na výrobu formovacích směsí se navážejí do slévárny na sklad (písek se často suší). Nejdůležitější částí úpravy formovacího materiálu je mísení, při kterém se písek rovnoměrně promíchává s pojivem, přísadami a vodou. K mísení formovacích směsí se nejčastěji používá kolových mísičů s diskontinuálním mícháním na 500 až 1000 kg formovací směsi.

V poslední době se rozšiřují mísiče pracující nepřetržitě. Pro větší výkony je to buď několik *kolových mísičů* propojených za sebou, nebo *mísič kyvadlový*. Takto se připravují bentonitové formovací směsi.

Pro směsi vytvrzované chemickými procesy (vodní sklo a organická pojiva) se používá *žlabových mísičů* se dvěma šneky nebo *ramenových mísičů*.

Po odlití se na vytloukacích roštech oddělí z odlitků a z formovacích rámu písek, který se jako vratný písek dopravuje zpět do úpravny.

12.5. Vlastnosti formovacích směsí a jejich zkoušení

Při výrobě forem a jader, s jejich manipulací, při odlévání, chladnutí a vytloukání musí formovací materiály vyhovět různým požadavkům.

Ke standardním zkouškám formovacích směsí patří stanovení vlhkosti, *pevnosti směsi v tlaku za syrova* (vaznost), *prodyšnosti* a *pevnosti v tahu* nebo *ohybu* po vysušení nebo vytvrzení. Dále můžeme stanovit spěchovatelnost, ztrátu žíháním směsi, *obsah vyplavitelných látek*, *sypnou objemovou hmotnost* atd. U ostřiv je nejdůležitější charakteristikou jejich *granulometrická skladba*.

12.6. Výroba forem a jader

12.6.1. Netrvalé formy

Při výrobě netrvalých forem se různými postupy zhotovuje z formovací směsí otisk modelu – forma. Po odlití kovu se forma teplem znehodnotí a formovací materiál se buď vyveze jako odpad nebo se vrací zpět do výrobního cyklu jako vratný písek nebo regenerát. Ten se upravuje a znovu použije jako plnohodnotná formovací směs.

V praxi se využívají tři typy regenerace a to *mechanická*, *chemická* a *tepelná*.

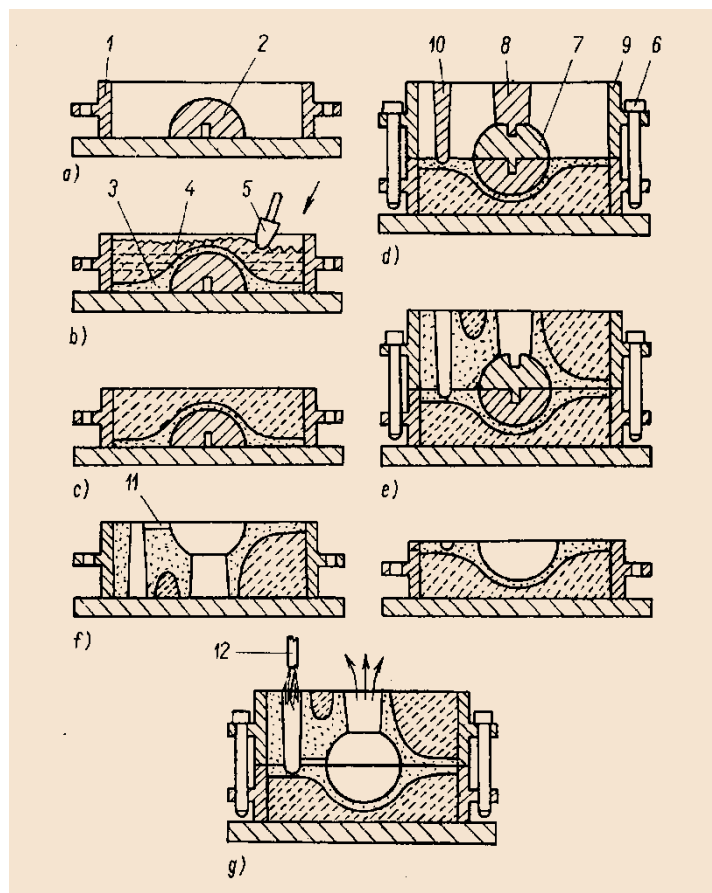
Formy se vyrábějí ručně nebo pomocí různých strojů.

Ruční formování

Ruční formování je nejčastější způsob při kusové výrobě odlitků. Slévač vykonává většinu prací ručně pomocí jednoduchého nářadí, mezi něž patří ruční nebo pneumatické pěchovačky k upěchování směsi ve formovacím rámu, lopaty, síta, bodce k píchání průduchů do formy a další. Forma se pěchuje postupně po vrstvách tak, aby forma měla po výšce rovnoměrnou tvrdost.

Formovací rámy

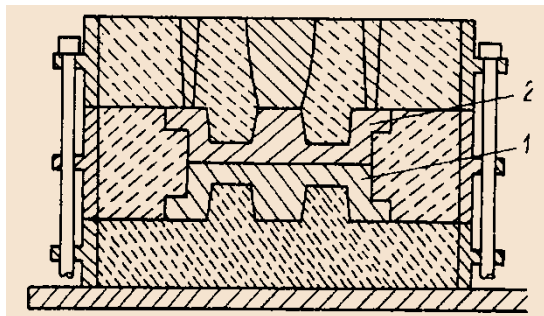
Pokud se používá netrvalých forem, je třeba určité nosné a vyztužovací konstrukce, která je většinou vytvořena formovacím rámem. Při vytváření formy se jednotlivé rámy na sebe skládají, přičemž většina forem je složena ze dvou rámu (vršek a spodek).



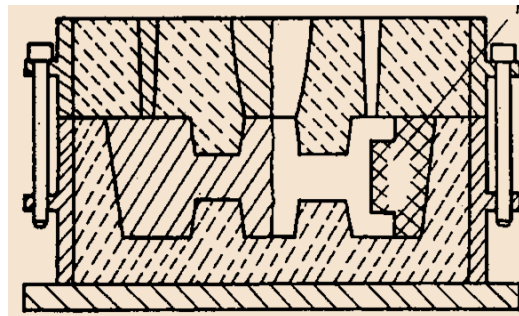
Obr. 12.4 Schéma formování do dvou rámu

1- spodní rám, 2- spodní část modelu, 3-modelový písek, 4-výplňový písek, 5-pěchovačka, 6-zaváděcí kolíky, 7- vrchní část modelu, 8- náliť, 9- vrchní rám, 10- vtokový kůl, 11- zářezy, 12- tryska se stlačeným vzduchem

položí spodní rám a zaformuje. Po obrácení obou složených rámu se přiloží rám vrchní a forma se zaformuje (obr. 12.5). Pak se vyjmou náliťky a vtoky, forma se rozebere, dělený model vyjme a forma se ošetří a zase složí k odlévání. Obr. 12.6 znázorňuje stejný odlitek vyráběný do dvou formovacích rámu, ale používá se k tomu nepravých jader. Vnější tvary odlitku se v tomto případě vytváří jádry.



Obr. 12.5 Schéma formování do tří rámu
1- spodní část děleného modelu, 2- vrchní část děleného modelu



Obr. 12.6 Schéma formování s nepravým jádrem
1- nepravé jádro

Rámy mají mít malou hmotnost při dobré tuhosti. Obvykle se zhotovují ze šedé litiny a jsou vylehčeny ventilačními otvory, které zároveň slouží pro odvod plynů z formy při odlévání.

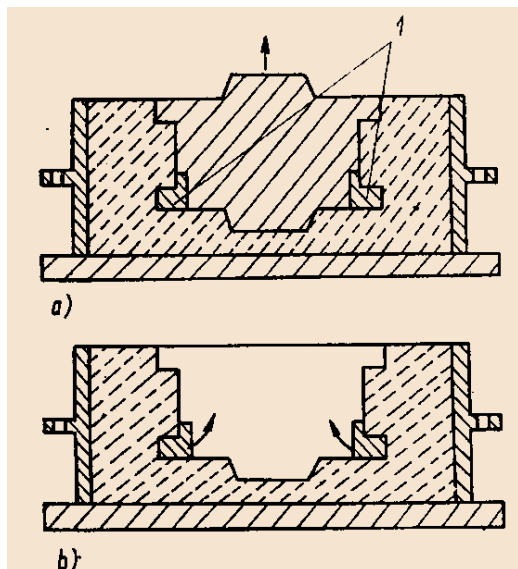
Při skládání rámu na sebe je zapotřebí velké přesnosti, aby nedošlo k přesazení jednotlivých částí formy. Proto musí být stykové plochy rámu pečlivě obrobena. Přesného vedení jednoho rámu proti druhému se dosáhne zaváděcími kolíky.

Formování v rámech na model

Při formování v rámech na model se nejčastěji používá formování ve dvou rámech na dvojdílný model. Při kusové výrobě odlitků je nejjednodušším způsobem ruční výroba formy. Příklad formování do dvou rámu je znázorněn na obr. 12.4. Některé tvarově složité odlitky se vyrábí do *tří a více rámu*. Formování do tří rámu začíná prostředním rámem, pak se prostřední rám obrátí, na něj se

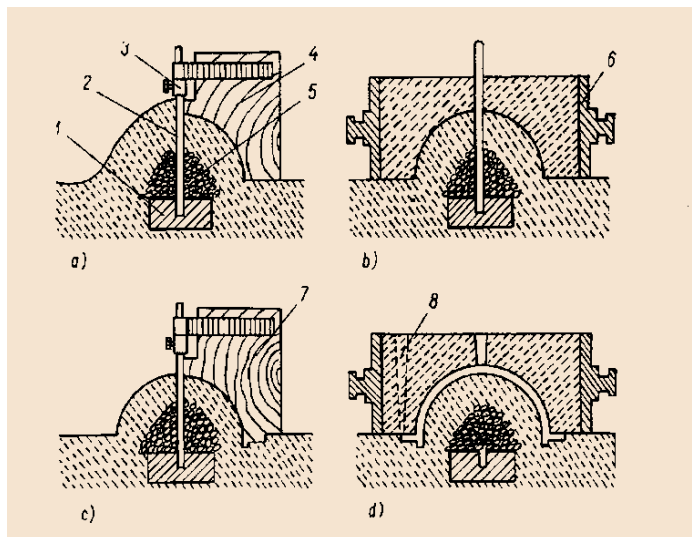
U velmi složitých odlitků se někdy celá forma skládá z jader buď do ráků, nebo do betonové jámy (kesonu). Takový postup se nazývá formování do země a je typický pro výrobu forem pro velké a masivní odlitky.

Formy pro nepříliš složité odlitky lze místo formování do tří ráků nebo použití nepravých jader formovat i na snímání, kdy je model dělen tak, aby bylo možno jednotlivé části postupně vytahovat z formy jako volné díly modelu. Příklad tohoto způsobu formování je na obr. 12.7.



Obr. 12.7 Schéma formování na snímání

a) vlastního modelu, b) vyjímání volných součástí + volné části



Obr. 12.8 Schéma rotačního šablonování

1- botka, 2- vřeteno, 3- stavěcí kroužek, 4- šablona, 5- koksové lože, 6- vrchní rám, 7- šablona spodní části, 8- vtoková soustava

Šablonování

Pokud je možné vyrobit tvar odlitku posuvem nebo rotací obrysové čáry, používá se pro kusovou výrobu forem nebo jader pro větší odlitky šablonování. Podle pohybu šablony rozeznáváme šablonování rotační a rovinné. Na obr. 12.8 je znázorněn příklad rotačního šablonování.

Rovinným šablonováním se zhotovují nerotační tvary odlitků. Šablony se posouvají po vodících lištách, přičemž šabloně, která „obkročuje“ tvar odlitku se říká kroček.

Při výrobě pískových forem je možná i kombinace formování na model se šablonováním. Tímto postupem lze zhotovit i velmi náročné tvary odlitku.

Strojní formování

Velmi rozšířenou metodou při sériové a hromadné výrobě odlitků je strojní formování. Výhodou je, že převážná část namáhavé práce je vykonávána strojem, takže lze dosáhnout většího výkonu při menší kvalifikaci obsluhujících. Dále jsou formy pevnější, přesnější a stejnoměrněji upěchované. Modely jsou rozdělené a každá polovina modelu je upevněna na formovací desce. Protože výměna formovacích desek je obtížná, pracují buď dva formovací stroje spolu, z nichž jeden formuje vršek druhý spodek formy nebo stroje se dvěma deskami, které vyrábí současně vršky i spodky forem. Strojní formování se provádí opět pomocí ráků anebo metodou bezrámového formování. Využívají se lisovací stroje, střešovací stroje, stroje se střešováním a dolisováním, stroje pro impulsní formování, foukací a vstřelovací stroje, metání písku pomocí pískometu.

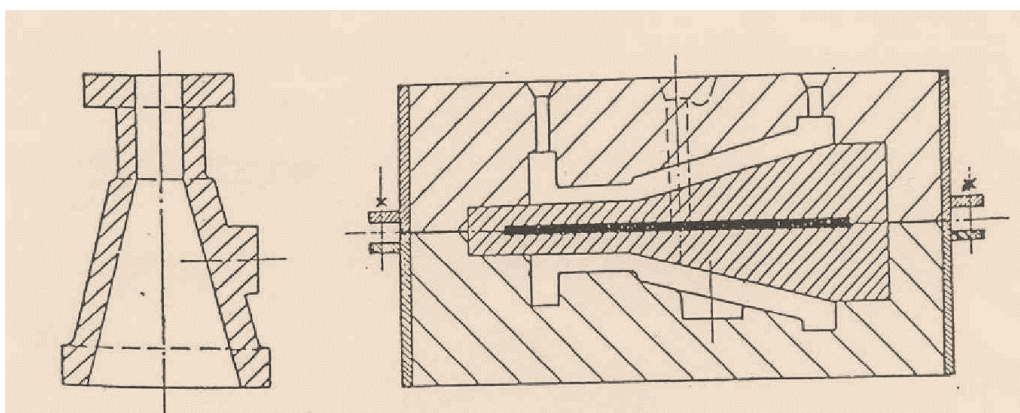
Výroba jader

Pokud má mít odlitek otvory nebo dutina, potom používáme k jejich vytvoření jader, která do formy vkládáme. K upevnění jádra ve formě slouží *známky*. Jádra se ukládají do známkových loží formy. Ačkoli se jádra používají většinou pro vytvoření vnitřních tvarů odlitku (pravá jádra), lze někdy vytvořit i vnější povrch odlitku pomocí jader nepravých.

Jádra jsou obvykle nejvíce namáhanou částí formy, a proto musí být vyrobeny z velmi jakostního materiálu. Zvláště pečlivě je třeba dbát na jejich odplynění a zajištění proti prasknutí. Velmi důležitou vlastností jader je jejich dobrá rozpadavost po odlití a vychladnutí odlitku tak, aby se mohl vzniklý znehodnocený písek dostat beze zbytku ven i ze složitých dutin odlitků.

Jádra se vyrábí podobně jako formy strojně a u kusové a malosériové výroby ručně.

Jádra se vyrábí většinou v jadernících. Jaderníky jsou obvykle ze stejného materiálu jako model formy, protože se předpokládá stejné opotřebení.



Obr. 12.9 Výroba dutého odlitku pomocí jádra tradiční technologií

Jako příklad je na obr. 12.9 znázorněna výroba dutého odlitku pomocí jádra tradiční technologií, kde je jádro uchyceno ve dvou známkách a má kovovou výztuhu.

Pro výrobu jednoduchých jader jsou jaderníky obvykle dvoudílné, zajištěné kolíčky proti posunutí a sevřené svorkou. Složený jaderník se postaví na desku a shora vyplní jádrovou směsí. Strojní výroba jader využívá lisování, vibrace, střešení, foukání, vstřelování, metání nebo kombinaci těchto způsobů.

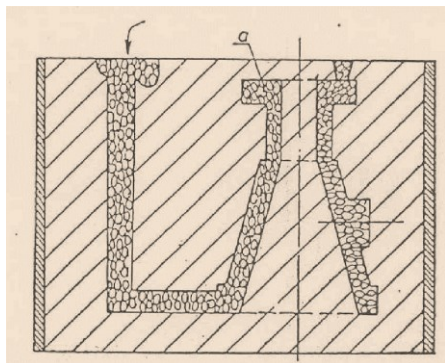
Pevnost jader je určena druhem použité formovací směsi a způsobem jejího zhuštění nebo vytvrzení. U velkých a těžkých jader se do nich při jejich výrobě vkládají kovové výztuhy.

Rozkladem pojiv a vypařováním vlhkosti vznikají při lití v jádře plyny a páry, které se soustřeďují ve středu jádra a musí být vyvedeny ven mimo formu. K tomu slouží průduchy a odvětrávací kanálky.

12.6.2. Další postupy výroby forem a odlitků

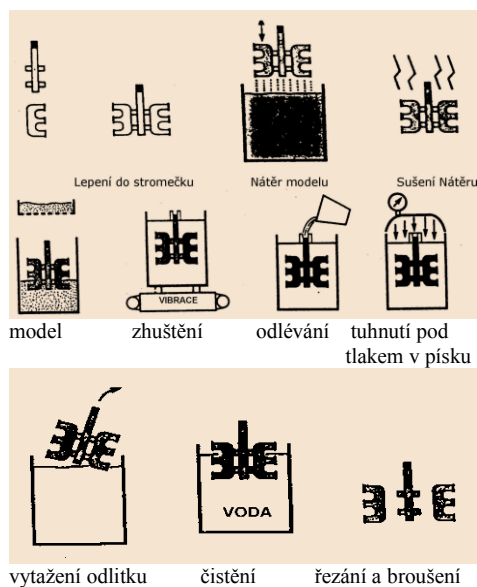
Formování na spalitelný model

Při běžném formování tzv. plné formy na spalitelný model se zhotoví model odlitku z pěnového polystyrénu a zaformuje se buď přechováním nebo do samotvrdnoucí směsi. Na rozdíl od předchozích způsobů výroby však zůstává ve formě až do odlévání. Stykem s roztaveným kovem při lití se model spálí (odpaří se) a kov vyplní vzniklou dutinu.



Obr. 12.10 Výroba odlitku z obr. 7 pomocí technologie s odpařitelným modelem

odlije přesný tvar odlitku s přídavkem na smrštění. Model se z obalu odstraní buď vytavením, nebo rozpuštěním ve vařící vodě, čímž vznikne forma.



Obr. 12.11 Postup výroby odlitku při použití odpařitelných polystyrenových modelů

způsob odlévání, kdy kov se nalévá do formy obdobným způsobem jako u pískových forem.

Do kovových forem lze vyrábět i duté odlitky. V tomto případě se do formy zakládají buď písková jádra, nebo u jednoduchých dutin jádra kovová.

Výroba trvalých forem se provádí mechanickým obráběním, což vyžaduje značné úsilí a náklady, které dosahují až statisíce korun. Použití kovových forem je proto ekonomicky ospravedlněno jen u hromadné výroby.

12.7.1. Tlakové lití

Vysoká ochlazovací rychlost kovových forem zhoršuje zabíhavost slitin a tím i možnost získat tenkostěnné odlitky. Jednou z cest, jak zvýšit zabíhavost, je zvětšení rychlosti kovu při plnění formy. Při tlakovém lití se na roztavenou slitinu krátce působí

Odlévání na odpařitelný model je však také využíváno v moderní velkosériové výrobě a je známo pod anglickým názvem *Lost Foam*. Princip této výrobní technologie vyplývá z obr. 12.10. Má řadu společných prvků s technologií přesného lití, které využívá vytavitelný model pro zhotovení 1 ks odlitku.

Přesné lití s vytavitelným (voskovým) modelem

Patří mezi nejstarší slévárenské technologie, i když se v období průmyslové revoluce na ni zapomnělo a až v moderní době získal dnešní podobu tzv. přesného lití, která umožňuje odlévat i složité díly bez obrábění na čistý tvar. Ze snadno tavitelného materiálu (vosk) se do kovové formy vstříkne nebo rozpuštěním ve vařící vodě, čímž vznikne forma.

Metodou přesného lití lze dosáhnout vynikající přesnosti a hladkosti odlitku, takže odlitky potřebují jen minimální obrobení.

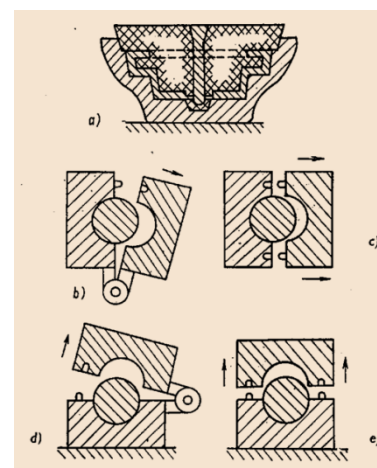
Zvlášť výhodně se uplatňuje metoda přesného lití u nesnadno obrobitelných materiálů nebo u součástí velmi složitého tvaru.

Typickými příklady jsou lopatky nebo celé věnce pro spalovací turbíny, řezné nástroje z rychlořezných kovů, součásti šicích a textilních strojů, zbraní, měřicích zařízení apod.

12.7. Trvalé formy

Kovové formy (kokily) mohou být dělené a nedělené a jak ukazuje obr. 12.12 s horizontální nebo vertikální dělicí rovinou.

Jedná se o gravitační

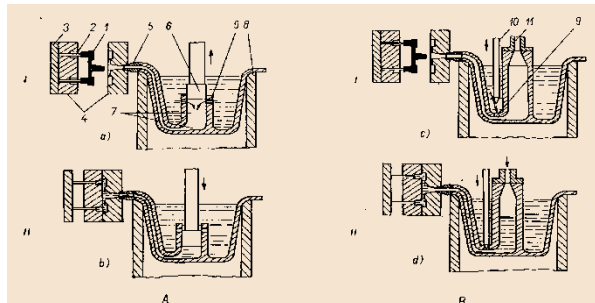


Obr. 12.12 Způsoby rozebírání kokil

a) nedělené kokily, b), c) kokily s vertikálním rozebíráním (pohled shora nebo z boku), d), e) kokily s horizontálním rozebíráním

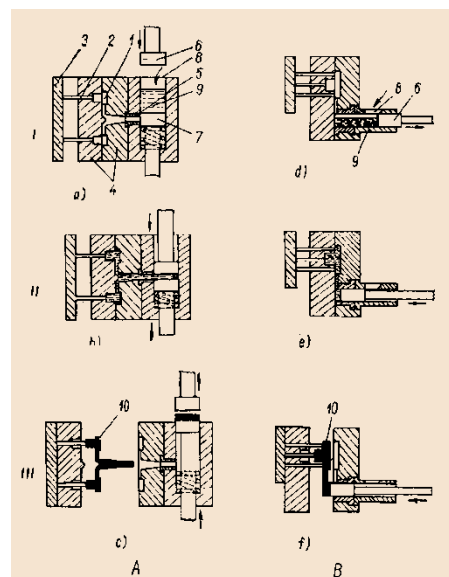
jednostranným vysokým tlakem (6 až 40 MPa), čímž se uvede do prudkého pohybu (až 80 m/s) a rychle naplní formu.

Stroje pro lití pod tlakem - podle základního principu rozeznáváme stroje s teplou tlakovou komorou a stroje se studenou tlakovou komorou.



Obr. 12.13 Schéma tlakového lití s teplou komorou

A) vstřikováním pístem, B) vstřikováním stlačeným vzduchem. (I - plnění komory a vyjímání odlitku, II - vstřik), 1- odlitek, 2- vyhazovače, 3- vyhazovací deska, 4-forma, 5- vstřikovací tryska, 6-píst, 7- komora, 8- kelímek, 9- plnicí kanálky, 10- uzavírací tyč, 11- přívod stlačeného vzduchu



Obr. 12.14 Schéma tlakového lití se studenou komorou
A) vertikální, B) horizontální (I - plnění komory, II - vstřik, III - vyjímání odlitku); 1- dutina formy, 2- vyhazovací deska, 4- forma, 5- vstřikovací tryska, 6- vstřikovací píst, 7- protipíst, 8- plnicí otvor, 9-dávka slitiny, 10- odlitek.)

Stroje s teplou komorou (obr. 12.13) mají vysokou výrobnost a jejich chod lze plně automatizovat.

Tlaková komora je však neustále udržována na teplotě roztavené slitiny a je vystavena koroznímu působení. Těmto účinkům je zvlášť silně vystaven píst a vodící pouzdro pístu. Proto se strojů s teplou komorou používá především pro *lití nízkotavitelných slitin* (zinku, olova, cínu).

Stroje se studenou komorou (obr. 12.14) mají tlakovou komoru zcela oddělenou od udržovací pece a kov se vstřikuje výhradně pístem.

Vhodným zařízením (dávkový lžice, dávkový stroj) se krátce před vstřikem naplní komora roztaveným kovem, přičemž množství nalitého kovu musí odpovídat velikosti odlitku a velikosti komory.

Oblast využití tlakového lití

Slitiny pro tlakové lití musí mít co nejužší interval tuhnutí, dostatečnou pevnost při vyšších teplotách, aby snesly bez porušení manipulaci za tepla a nejvyšší zabíhavost při nízkých přehřátích nad teplotou tavení.

Zvlášť vhodné jsou slitiny zinku s teplotou tavení od 400 do 430 °C a to nejčastěji slitiny zinku s hliníkem (kolem 4 %) a slitiny zinku a hořčíkem.

Zinek použitý k výrobě slitiny musí mít velmi vysokou čistotu (99,99 %). Jejich nevýhodou je velká hmotnost.

Slitiny hliníku mají velký sklon k oxidaci, která je u tlakového lití zvlášť nebezpečná, protože při vstřikování dochází k intenzivnímu styku mezi odlévanou slitinou a vzduchem. Přesto je dnes tlakové lití slitin hliníku převažující výrobní technologií, která se prosadila především v automobilovém průmyslu.

Kvalita odlitků ze slitin hliníku byla tlakovým litím dosažena teprve po vynálezu strojů se studenou komorou.

Slitiny hořčíku se rovněž snadno oxidují, ale i u nich se tlakové lití v poslední době používá stále více.

Ze slitin mědi jsou odlévány především mosazi pro svou nízkou tavicí teplotu. Tlakové lití slitin železa nedoznalo i přes mnohé výzkumné projekty většího rozšíření.

Litím pod tlakem lze dosáhnout velmi malých tloušťek stěn odlitků, zvláště pak u krátkých žeber (u slitin zinku až 0,8 mm, slitin hliníku 1,0 mm, slitin hořčíku 1,3 mm a slitin mědi 1,5 mm). Odlitek má velmi jemnozrnnou lící kůru o tloušťce asi 2 mm, která má vynikající vlastnosti. Pod touto kůrou bývá materiál pórovitější, a proto nemají být odlitky lité pod tlakem pokud možno obráběny, což je usnadněno jejich vynikající přesností hladkostí.

Čím větší je tloušťka stěn odlitku, tím větší je sklon k pórovitosti a zhoršení jakosti materiálu. Při tlakovém lití lze také do odlitku pevně zalít předměty z jiných kovů – „zálitky“ (tyče, šrouby, pouzdra, matice apod.).

V odlitcích litých pod tlakem je v pórech uzavřen vzduch (až 8 %), takže je nelze tepelně zpracovávat kalením, protože při ohřevu by se roztavením ohřátého vzduchu odlitek deformoval. Tepelné zpracování s ohřevem do 200 °C je však možné. Využití kovu podle velikosti odlitku bývá od 70 do 95 %. Zařízení na výrobu litím pod tlakem je velmi drahé.

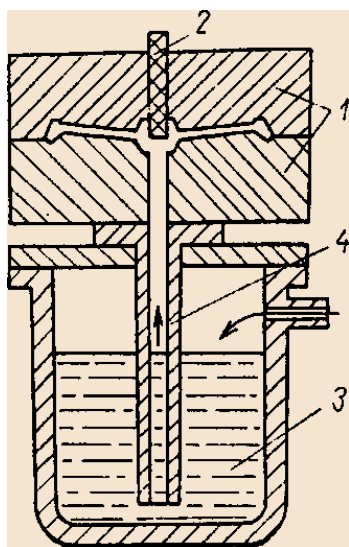
12.7.2. Nízkotlaké lití

Obdobný způsob lití pod tlakem s teplou komorou připomíná nízkotlaké lití. Odlišnost je však v rychlosti plnění (asi 0,5 m/s) a použitém tlaku (do 0,3 MPa). Charakteristické je umístění formy, která se nasazuje těsně nad kelímek s roztaveným kovem (obr. 12.15).

Nejprve se velmi nízkým tlakem vzduchu 0,02 až 0,06 MPa vytlačuje na hladinu v kelímku kov trubkovou tryškou do formy.

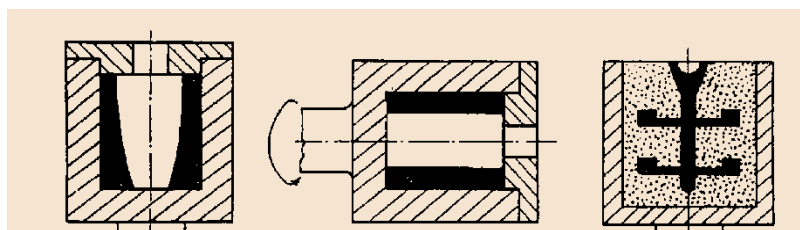
Jakmile se forma z větší části naplní, zvýší se tlak vzduchu na plnou hodnotu a setrvá se na ní tak dlouho, dokud odlitek neztuhne.

U nízkotlakého lití prakticky odpadá vtoková soustava a nálitky, takže využití tekutého kovu obvykle převyšuje 90 %.



Obr. 12.15 Schéma nízkotlakého lití.

1- forma, 2- jádro, 3- roztavená slitina, 4- keramická trubka.



Obr. 12.16 Schéma odstředivého lití.

a) s vertikální osou rotace, b) s horizontální osou rotace, c) nepravého (4) odlitky)

12.7.3. Odstředivé lití

Odstředivé lití slouží k odlévání kovu do rotující formy. Pokud je geometrická osa odlitku přibližně totožná s osou rotace, mluvíme o pravém odstředivém lití a to buď *vertikálním* (s vertikální osou rotace – obr.12.16a) nebo *horizontálním* (s horizontální osou rotace – obr.12.16b). V opačném případě mluvíme o nepravém odstředivém lití (obr.12.16c) nebo o odstředování. Vlivem odstředivé síly je kov tlačěn na stěnu formy, odkud začíná tuhnout. Při odstředivém lití jakost odlitku závisí na odstředivé síle, která je určena poloměrem otáčení, počtem otáček za minutu a měrnou hmotností odlévané slitiny. Pro daný odlitek a určitou slitinu lze prakticky ovlivňovat jen počet otáček. Je-li počet otáček malý, nedosáhne se potřebného tvaru a hladkosti povrchu, při velkém počtu otáček vzrůstá vlivem velkých sil nebezpečí trhlin.

Hlavními výhodami odstředivého lití je vysoké využití kovu (nad 90 %), snížená spotřeba nebo úplné odstranění jader, zlepšené mechanické vlastnosti a jakost odlitku i vyšší produktivita práce.

Nevýhodou je, že vlivem odstředivé síly se značně zvyšuje gravitační odměšení (likvace), takže odstředivě lité odlitky mají větší nerovnoměrnost chemického složení. Tento způsob výroby je výhodný pro lité válce k tváření kovů, kde těžší legující prvky se soustřeďují (odměšují) ve vnější povrchové vrstvě. Gravitační likvací se zabráňuje především tím, že se používá slitin s nízkým intervalem tuhnutí.

Množství odlitků odlévaných odstředivě nepřevyšuje u jednotlivých druhů slitin obvykle 3 až 4 % z celkové výroby.

12.7.4. Plynulé (kontinuální) lití

Plynulé lití je způsob odlévání, při kterém jsou rychlost odlévání a tuhnutí totožné, tj. kolik kovu se za jednotku času nalije do formy (krystalizátoru), tolik se ho z formy vysune nebo vytáhne.

Podle tvaru krystalizátoru se odlévají buď tyče, profily, ploštiny, plechy, dráty aj.

Plynulé lití se používá především ve slévárnách hutnického charakteru.

Odlitky odlévané plynulým litím mají jemnozrnnější strukturu a proto lepší mechanické vlastnosti.

Výrobní zařízení jsou však většinou značně nákladná a náročná na kvalifikaci obsluhy.



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Odlitek
- Model
- Forma
- Jádro
- Jaderník
- Ostřivo
- Pojivo
- Přísady
- Příprava formovacího materiálu
- Vlastnosti formovacích směsí
- Výroba forem a jader
- Lití do trvalých forem

- Přesné lití
- Tlakové lití
- Odstředivé lití
- Plynulé lití



Příklady otázek k probranému učivu

1. Popište historický vznik odlitku, proveďte jeho současnou charakteristiku.
2. Vysvětlete pojem model odlitku.
3. Jaké druhy forem pro odlévání odlitků rozeznáváme?
4. Vysvětlete pojem jednorázová písková forma.
5. Jaké základní složky formovacích směsí pro výrobu jader a forem známe?
6. Jakým způsobem se provádí příprava formovacího materiálu?
7. Vyjmenujte standardní zkoušky pro hodnocení jakosti formovacích směsí?
8. Jaký způsob formování se aplikuje pro sériovou výrobu a proč?
9. Popište příklad ručního formování a strojního formování.
10. Jakou funkci plní jádra, vyjmenujte nejdůležitější požadavky pro jejich výrobu.
11. Popište princip výrobní technologie na spalitelný model.
12. Uveďte stručný popis výrobní technologie přesného lití s vytavitelným modelem.
13. Vysvětlete pojmy trvalá forma.
14. Uveďte základní charakteristiku vysokotlakového lití, nízkotlakového lití, odstředivého lití a plynulého lití.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ELBEL, T., *Průmyslové technologie I.*, Učební text VŠB-TU Ostrava, 2006, 37 s.

JELÍNEK, P., *Slévárství*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1992, 224 s.

CAMPBELL, J., *Castings*, University of Birmingham, 2005, ISBN 0-7506-4790-6, 337 p.

13. Základy slévárenských pochodů, tavení a odlévání kovů, apretace odlitků.



Čas ke studiu: 120 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat způsob krystalizace a tuhnutí
- popsat zabíhavost slitin a kovů a plnění formy
- definovat objemové změny slitin a kovů při tuhnutí a v pevném stavu
- popsat plynový režim kovu a formy
- popsat vtokovou soustavu a její jednotlivé části
- definovat a popsat jednotlivé tavící agregáty používané ve slévárenské technologii
- popsat kontrolu jakosti odlitků, nejrozšířenější vady odlitků a možnosti jejich oprav



Výklad

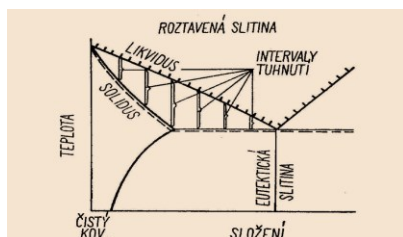
13.1. Základy slévárenských pochodů

Pro vypracování správného výrobního postupu odlitku je důležitá znalost pochodů probíhajících ve slévárenské formě a v odlitku. Hlavní pochody, které určují kvalitu odlitků:

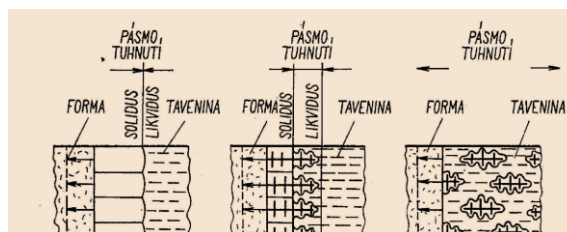
- způsob krystalizace a tuhnutí
- zabíhavost a plnění formy
- smršťování při tuhnutí
- smršťování v pevném stavu
- plyny v kovu a ve formě

13.1.1. Způsob krystalizace

Po odlití roztavené slitiny do formy se tekutý kov odvodem tepla stěnami formy ochlazuje. Následně po dosažení teploty slitiny určité hodnoty, začne kov krystalizovat. Teplota, při které začíná slitina krystalizovat, se nazývá teplota likvidu a teplota, při které je krystalizace ukončena je teplotou solidu. Tyto teploty se mění s obsahem přísadových prvků (u slitin železa s obsahem uhlíku). Spojnice bodů těchto teplot tvoří křivku likvidus a solidus. Rozdíl teplot mezi likvidem a solidem je interval tuhnutí. Čisté kovy a eutektické slitiny tuhnou při jedné teplotě (mají nulový interval tuhnutí), většina slitin však má širší nebo užší interval tuhnutí (Obr. 13.1.)



Obr. 13.1 Závislost teploty počátku a konce tuhnutí na chemickém složení slitiny



Obr. 13.2 Schéma krystalizace při různých intervalech tuhnutí zleva a) progresivní tuhnutí b) dvoufázové tuhnutí c) objemové tuhnutí

Růst krystalů kovu probíhá především ve směru odvodu tepla. Podle šířky intervalu tuhnutí slitiny rozeznáváme tuhnutí progresivní, tuhnutí dvoufázové a tuhnutí objemové. Schematicky jsou intervaly tuhnutí znázorněny na obr. 13.2.

Množina bodů, ve kterých slitina tuhne naposled, se nazývá tepelnou osou. Její poloha závisí na tvaru odlitku a způsobu odvodu tepla. Tepelná osa se nemusí vždy shodovat s geometrickou osou a platí, že je odchýlena od osy geometrické ve směru menšího i většího odvodu tepla (obr. 13.3).

Pro sledování postupu tuhnutí odlitků existují jednoduché vztahy, podle kterých můžeme vypočítat dobu úplného ztuhnutí odlitku (v tepelné ose) a postup natuhávání kovu od stěny odlitku. Pro dobu tuhnutí platí známý Chvorinovův vztah:

$$\tau = k(R)^2 \quad (13.1)$$

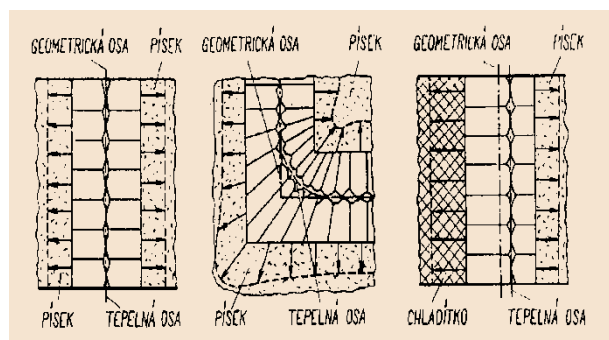
kde, τ -doba úplného ztuhnutí odlitku [s], R -relativní tloušťka (modul) odlitku [m], k -konstanta tuhnutí,

$$R = \frac{V}{S} \quad (13.2)$$

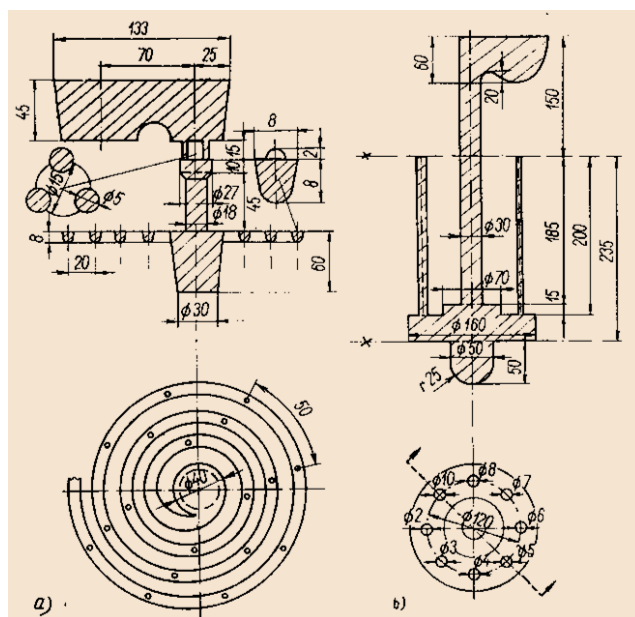
kde, V -objem kovu v odlitku [m³], S -ochlazovaný povrch odlitku [m²].

Velikost krystalů a jejich tvar jsou značně ovlivněny způsobem odvodu tepla. Čím větší je odvod tepla, tím jemnější jsou krystaly a lepší mechanické vlastnosti slitiny. Proto se dává přednost odlitkům z kovových forem (kokilové liti, tlakové liti) před odléváním do forem pískových. Ale i u odlitků litych do pískových forem vzniká na místě styku s formou vrstvička jemných krystalů – licí kůra, která má lepší mechanické vlastnosti než střed stěny.

S rostoucí tloušťkou stěny odlitku klesá rychlost ochlazování, a proto tlusté stěny mají horší mechanické vlastnosti než stěny tenké. Krystalizaci slitin lze ovlivňovat umělým zásahem, tj. vnášením krystalizačních zárodků – očkovaním.



Obr. 13.3 Posuv tepelné osy při rozdílných podmínkách tuhnutí



Obr. 13.4 Zkoušky zabíhavosti a) spirálová, horizontální; b) tyčková, vertikální

13.1.2. Zabíhavost a plnění formy

Není fyzikální vlastností kovu, jako je například viskozita a povrchové napětí, ale je to technologická vlastnost. Vyjadřuje schopnost slitiny zaplnit formu a udává se obvykle jako délka odlitého kanálu určitého průřezu za zvolených licích podmínek. Používají se k tomu různé odlévací zkoušky. Příklady zkušebních odlitků zabíhavosti jsou zobrazeny na obr. 13.4.

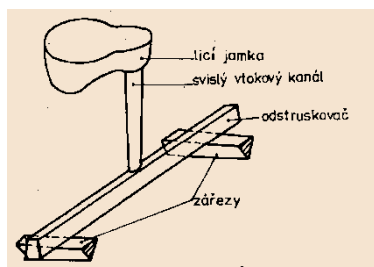
Zabíhavost není jednoznačně určena jen druhem slitiny, ale závisí i na materiálu formy a způsobu odlévání, celkovou délku zaběhlého kovu můžeme vypočítat, ale musí být pro určité licí podmínky zkouškami ověřena.

Pro zaplnění dutiny formy tekutým kovem se zhotovuje ve formě vtoková soustava, která se skládá

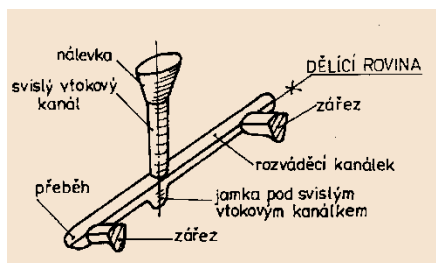
- vtoková (licí) jamka,
- vtokový kanál (kůl),
- dopadová jamka,
- odstruskovač (lapač strusky, struskovák),
- zářezy.

Na obr. 13.5 je znázorněna v axonometrickém pohledu vtoková soustava pro odlitky ze šedé litiny (LLG). Vtoková soustava pro ocelové odlitky na obr. 13.6 se liší tvarem vtokové jamky a místo odstruskovače má rozváděcí kanál.

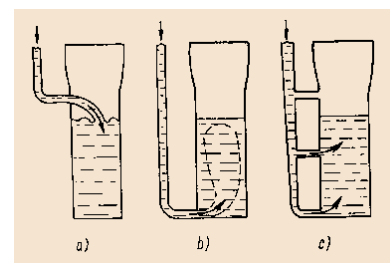
Mimo základní tvar vtokové soustavy rozlišujeme podle zaústění zářezů do dutiny formy vtoky horní, spodní a etážové, které jsou znázorněny na obr. 13.7.



Obr. 13.5 Vtoková soustava pro odlitky ze šedé litiny



Obr. 13.6 Vtoková soustava pro ocelové odlitky



Obr. 13.7 Zaústění zářezů do formy
a) lití horem, b) lití spodem, c) etážové lití

Do vtokové jamky se nalévá z pánve roztavený kov.

Vtokový kanál (kůl) bývá většinou kruhového průřezu. Vtokový kanál se směrem dolů poněkud zužuje, aby sledoval tvar volně padajícího proudu kovu.

Odstruskovač (struskovák) rozvádí tekutý kov od vtokového kanálu do jednotlivých zářezů a dále slouží i k zachycení nečistot. Pro zlepšení odstraňování strusky a makroskopických vměstků (zadobeniny, rozplavený písek) se v poslední době používají keramické filtry, které se vkládají mezi odstruskovač a zářezy nebo přímo do zářezů. U ocelových odlitků, u kterých se kov odlévá do forem z pánví se spodní výpustí a struska zůstává na její hladině, není nutné zařazovat do vtokové soustavy odstruskovač a funkci rozvádění kovu plní rozváděcí (licí) kanály.

Zářezy spojují odstruskovač s formou.

13.1.3. Smršťování kovu při tuhnutí

Chladnutí slitin je doprovázeno zmenšováním jejich objemu – smršťováním. K tomu dochází v důsledku změny měrné hmotnosti (hustoty) slitiny ρ , která s klesající teplotou roste.

Protože platí zákon zachování hmoty, musí se změna rostoucí hustoty projevit při ochlazování odlitku zmenšováním jeho objemu.

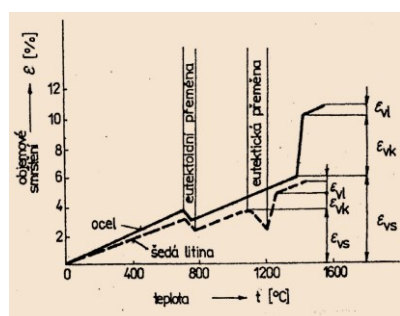
Rozlišujeme smršťování roztavené slitiny ε_{vl} , smršťování při tuhnutí ε_{vk} a smršťování v pevném stavu, ε_{vs} . Na obr. 13.8 je znázorněn průběh smršťování oceli a litiny. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma materiály spočívá ve způsobu krystalizace, kdy u litin při vylučování grafitu z taveniny dochází k předsmršťovacímu roztažení. Výsledkem pak je celkově nižší lineární smrštění litinových odlitků (1%) proti ocelovým odlitkům (2 %).

Pro slévarenskou technologii je nedůležitější smršťování při tuhnutí, které je příčinou staženin a smršťování v pevném stavu, které je příčinou vnitřního pnutí, deformací a prasklin.

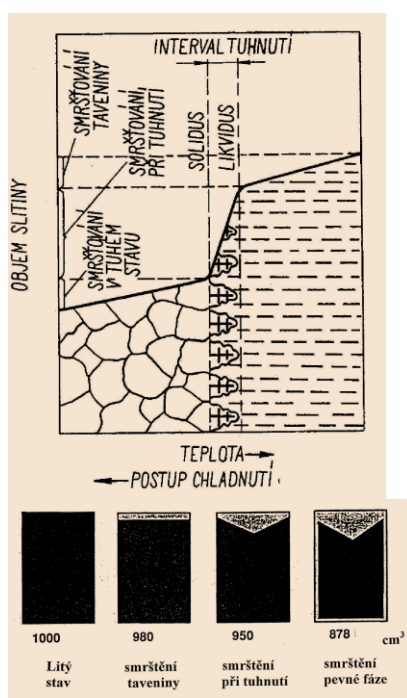
Smrštění (stahování) při tuhnutí je závislé na materiálu odlitku, způsobu tuhnutí, formě a konstrukci odlitku. Rozdíl mezi objemem tekutého kovu před tuhnutím a pevného kovu po ztuhnutí je nazýván *staženinou* (obr. 13.9). Staženina je dutina v odlitku, která vzniká úbytkem slitiny při tuhnutí. Větší část jejího povrchu má obnažené dendritové skelety. Na její tvar a umístění má rozhodující vliv způsob odvodu tepla. Staženiny se tvoří v tepelném centru litého útvaru. Kromě staženin rozlišujeme i *řediny* neboli řídká místa, což jsou malé staženiny patrné pouhým okem na řezu nebo lomu odlitku.

Pochod tvorby staženin a ředin v odlitcích nazýváme stahováním. Abychom doplnili úbytek objemu při tuhnutí, musíme do formy nalít větší objem tekuté slitiny, než je objem odlitku. Zásobník tekutého kovu, ze kterého se doplňuje úbytek objemu, se nazývá nálipek a je třeba, aby se staženina soustředila v nálitku.

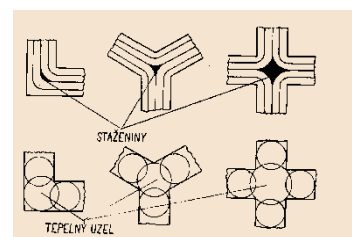
V místech, kde je proti okolním stěnám nashromážděn kov, tuhne roztavená slitina později. Jsou to často prostory, ve kterých se stýká několik stěn, a nazýváme je *tepelné uzly*. V těchto místech se tvoří staženiny (obr. 13.10).



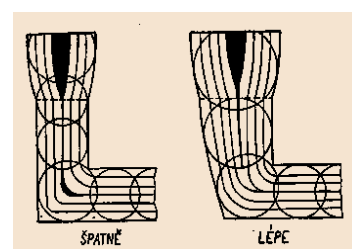
Obr.13.8 Průběh smršťování oceli a litiny



Obr. 13.9 Vliv teploty na objem slitin



Obr. 13.10 Charakteristické tepelné uzly

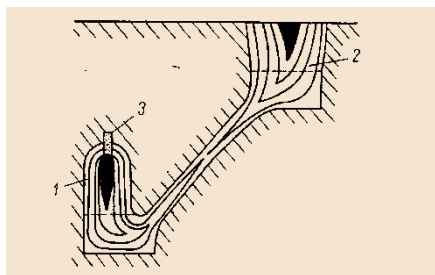


Obr. 13.11 Úprava tvaru odlitku k zajištění dobrého doplňování

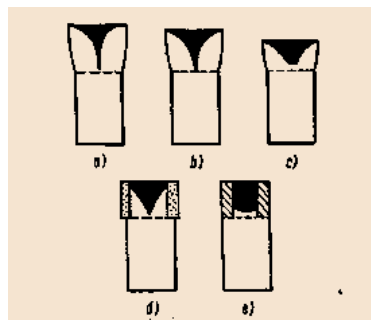
Přibližnou pomůckou k rozpoznání tepelných uzlů je *metoda vepsaných koulí*. Do průřezu stěny odlitku se ve výkresu vepíší koule (tj. ve dvojitěm rozměru o průměru kružnice) a místo s největší kružnicí je tepelný uzel, který se řeší technologickým přídavkem (klínem).

U slitin s širokým intervalem tuhnutí může dojít k tvorbě mikrostaženin, jestliže jednotlivé rostoucí dendrity uzavřou ostrůvky tekuté slitiny. Při tuhnutí ostrůvků roztaveného kovu se pak tvoří drobné vnitřní staženiny.

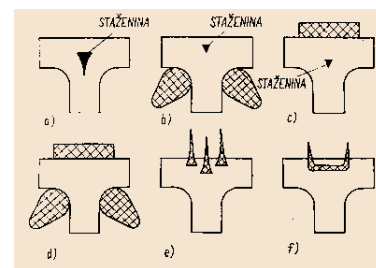
Má-li být dosaženo zdravého odlitku (obr. 13.11), musí jeho tuhnutí postupovat od nejvzdálenějších míst tepelnou osou až do nálitku, který má ztuhnout jako poslední.



Obr. 13.12 1- uzavřený nálietek,
2- otevřený nálietek,
3- atmosférické jádro



Obr. 13.13 Tvary staženin u nálitku
a) neošetřeného, b) zasypaného
popílkem, c) zasypaného
exotermickým přípravkem, d) s
izolačním obkladem,
e) exotermickým obkladem



Obr. 13.14 a) bez chladítka,
b) vnější tvarové, c) vnější
ploché, d) vnější ploché a tvarové,
e) vnitřní (podkováky), f) vnitřní
(skoby)

Nálitky a chladítka

Nálietek jakožto zásobník tekutého kovu musí ztuhnout jako poslední. Musí být umístěn tak, aby zajistil dobré doplňování tekutým kovem do určité oblasti odlitku (oblast dosazování).

Podle uspořádání rozeznáváme *nálitky otevřené*, které vyúsťují do horní plochy rámu a *nálitky zavřené*, které jsou skryté ve formě (obr. 13.12).

K prodloužení doby tuhnutí nálitku bez zvětšování jeho rozměrů se používá *izolačních* nebo *exotermických zásypů a obkladů* (obr. 13.13). Objem staženiny zůstává přitom sice stejný, ale mění se její tvar.

Některé tepelné uzly v odlitku lze pro jejich odlehlost jen velmi obtížně napojovat na otevřené nálitky a napojení na místní uzavřené nálitky by bylo velmi nákladné. V takových případech odstraňujeme tepelný uzel zvýšeným ochlazováním roztaveného kovu pomocí *chladítek* (obr. 13.14). Podle umístění rozeznáváme *chladítka vnější* (umístěná na povrchu odlitku) a *chladítka vnitřní* (umístěná uvnitř odlitku).

13.1.4. Smršťování kovu v pevném stavu

Příčinou vzniku vnitřního pnutí je smrštění v pevném stavu, dále popřípadě trhlin, prasklin nebo deformace odlitku. Lineárním smrštěním dojde ke změně – zmenšení rozměrů odlitku.

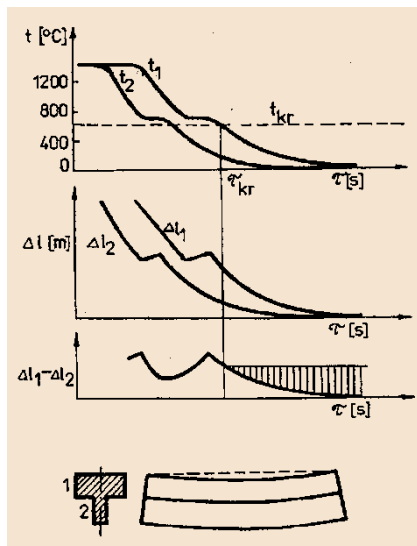
Celkové lineární smrštění odlitku v % se obvykle volí 1 % pro šedou litinu a cínový bronz, 1,5 % pro mosaz a slitiny hliníku a 2 % pro bílou litinu a ocel.

O příslušnou hodnotu smrštění se musí pak zvětšit rozměry modelu. Rozměry modelu se taktéž zvětšují o přírůstek na obrábění.

Odporem formy, jader apod. proti smršťování (vnějšími silami) vzniká v odlitku smršťovací napětí, které v mnohých případech vyvolává v odlitku trhliny (za vysokých teplot). V oblasti

vyšších teplot, kdy je materiál plastický a nemá pružnost, uvolňuje se *vnitřní napětí* trvalou deformací rozměrů.

Pokud jeho hodnota převyší pevnost slitiny za tepla, vznikají trhliny (s oxidovaným povrchem).



Obr. 13.15 Vznik deformací při smršťování odlitku

Chladnutím odlitku s rozdílnou tloušťkou stěn nebo u masivního odlitku (válce, šaboty aj.) vzniká v oblasti teplot pružně-plastických deformací a později v oblasti zcela pružných deformací, při existenci teplotního gradientu, vnitřní tepelné napětí, které se v průběhu ochlazování odlitku až do normálních teplot zvyšuje. Pokud převyší pevnost v tahu, vznikají praskliny (s kovově čistým povrchem). Vznik pnutí v odlitku je zjednodušeně znázorněn na obr. 13.15.

Kromě vnitřního napětí způsobeného nerovnoměrným ochlazováním odlitku v pevném stavu existuje ještě transformační napětí způsobené fázovou přeměnou v pevném stavu při které se přeměnou fáze $\gamma \rightarrow \alpha$ Fe zvětšuje objem. Typickým příkladem je pnutí ve slitinách železa.

Vnitřní napětí v odlitcích je velmi nebezpečné, protože vede k deformacím (zvláště při obrábění), snižuje možnost namáhat odlitek (vnitřní pnutí se přičítá k vnějšímu napětí) a je příčinou předčasného porušení odlitku vznikem prasklin.

Tepelné napětí (pnutí) v odlitku můžeme vypočítat

$$\pm \sigma = E \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (13.3)$$

kde σ - napětí [MPa], α - součinitel tepelného lineárního smrštění [K^{-1}], E - modul pružnosti kovu [MPa] a ΔT - rozdíl teplot ve dvou místech odlitku [K].

Proti vzniku vnitřního pnutí se bráníme vhodnou konstrukcí odlitku (možnost neškodného uvolnění vnitřního pnutí, rovnoměrné tloušťky stěn, plynulé přechody), vhodnou slévarenskou technologií (poddajné formy, včasné uvolnění odlitku z formy, zpevnění ohrožených míst žebry) a pomalým rovnoměrným ochlazováním odlitku.

Pokud přes všechna opatření vnitřní pnutí v odlitku vznikne, je možno je odstranit buď přirozeným uvolněním - stárnutím (tj. dlouhodobým skladováním, nejlépe při vystavení odlitku povětrnostním vlivům) nebo žiháním na odstranění vnitřního pnutí.

13.1.5. Plyny v kovu a ve slévarenské formě

Pod pojmem plyny v kovu a ve formě při odlévání rozlišujeme několik současně probíhajících jevů

- Rozpouštění plynů v tekutém kovu.
- Tvorba plynů ve formě.
- Proudění plynů k povrchu odlitku.
- Odvod plynů z dutiny formy.
- Vnikání plynů do tekutého kovu.
- Pohyb plynů v tekutém kovu.
- Vylučování plynů z tekutého kovu.

Za určité teploty mohou roztavené kovy a slitiny rozpouštět určité množství plynu.

Čím je teplota vyšší, tím obvykle větší množství plynu může být v tavenině rozpuštěno. Rozpustnost plynu klesá při ochlazování taveniny a výrazně se snižuje v okamžiku tuhnutí.

Takto z taveniny vylučované plyny mají atomární charakter a asociují v molekulární vazbu. Jsou to hlavně plyny CO, N₂ a H₂.

Rozpouštění plynu v čistém železe se vyznačuje přesným splňováním Sivertsova zákona, což lze vzhledem k Henryho zákonu popsat vztahem

$$[\%X] = K_X \cdot \sqrt{p_{X_2}} \quad (13.4)$$

kde, [%X] je rovnovážná koncentrace uvažovaného plynu atomárně rozpuštěného v kovu; p_{X_2} je parciální tlak plynu v molekulární formě v plynné atmosféře nad roztaveným kovem a K_X je rovnovážná konstanta rozpouštění plynu

Zákon lze slovně formulovat tak, že množství plynu atomárně rozpuštěného v kovu je úměrné druhé odmocnině z parciálního tlaku tohoto plynu v molekulární formě v plynné atmosféře nad hladinou roztaveného kovu. Tento zákon pak využíváme při odstraňování plynů rozpuštěných v tavenině. Pokud je kov zcela tekutý a má malou viskozitu, je uvolňování plynů z kovu snadné. K usnadnění úniku plynů lze použít mechanických prostředků, např. míchání, často se využívá snížení parciálního tlaku plynu nad hladinou (vakuové extrakce nebo při vhánění inertního plynu do taveniny).

Plyny rozpuštěné v kovu mohou způsobit vznik bublin, což jsou dutiny na povrchu nebo i uvnitř odlitku s hladkým povrchem.

Kromě plynů rozpuštěných v kovu (endogenní bubliny), působí na vznik bublin i plyny tvořící se z materiálu formy při plnění formy kovem (exogenní bubliny). Velmi nebezpečná je vlhkost formovacích směsí a zejména syrové formy vyvíjející značné množství páry. Rovněž organická pojiva a přísady přítomná ve formovací směsi se rozkládají a tvoří oxidy uhlíku a uhlovodíky.

K odstranění plynů, páry a vzduchu z pískové formy nestačí pouze samotná prodyšnost formovací směsi. Proto se ve formě vytváří kanálky pro odvod plynů, které se nazývají výfuky a průduchy.

Výfuky se jakožto hlavní kanálek pro odvod plynů umístí vždy v nejvyšším bodě odlitku. Na rozdíl od průduchů se výfuky prolévají kovem a mohou sloužit i ke kontrole plnění formy a někdy také jako nálitky. Výfuk odvádí plyny pouze z určitého úseku formy.

K tomu, aby se dosáhlo dobrého odvzdušnění, musí mít forma další odvzdušňovací kanálky – průduchy.

Průduchy se kromě forem vytváří i v jádrech a společně tvoří odvětrávací soustavu dutiny formy. Vytváří se propichováním formy (jádra) nad modelem ocelovým bodcem o průměru 3 až 12 mm a propichují se do hloubky 5- 20 mm nad modelem. Průduchy se dělají z vnější strany, kdy je model ještě ve formě. Na rozdíl od výfuků se průduchy neprolévají kovem. U kovových forem se průduchy vytváří frézováním a vrtáním.

13.2. Tavení a odlévání kovů

Slévárenská technologie pracuje zásadně s tekutým kovem, který se musí vyrobit tavením a následným ohřátím na vyšší teplotu, než je teplota tavení.

Taveninu potřebného složení vyrábíme roztavením vsázky, kde kovová část vsázky je obvykle složena z vlastního vratného materiálu (nálitky, části vtoků, výfuky), struskotvorných surovin, externího odpadu, popřípadě slitinových přísad.

Nekovová část vsázky je tvořena struskotvornými přísadami (vápenec, vápno apod.) a u šachtových pecí i palivem.

Některými tavíci pochody nelze příliš ovlivnit složení nataveného kovu, proto je třeba pečlivě třídit a navazovat jednotlivé suroviny podle chemického složení vsázky, dbát o jejich správnou kusovost a povrchovou čistotu.

Tavící pece mohou být vytápěny palivy pevnými (koks, antracit), plynými (zemní plyn), kapalnými (mazut) nebo elektrickou energií. Podle konstrukce a ohřevu vsázky obvykle rozlišujeme ve slévárnách pece:

- kuplovny,
- elektrické indukční pece,
- elektrické obloukové pece,
- konvertory,
- rotační plynové pece,
- kelímkové odporové a palivové pece,
- plamenné pece,
- šachtové plynové pece.

13.2.1. Kuplovny

Kuplovny pracují výhradně ve slévárnách litiny. Schéma kuplovny s předpecím je znázorněno na obr. 13.16. Současné kuplovny pracují ve slévárnách podle konstrukce jako studenovětrné s různým stupněm intenzifikace výrobního procesu a horkovětrné, také s technologií různého stupně intenzifikace výrobního procesu. Jejich provoz je z pohledu ekonomiky provozu přizpůsoben vlastnímu týdennímu režimu výroby slévárny.

13.2.2. Elektrické indukční pece a elektrické obloukové pece

Elektrické indukční pece a elektrické obloukové pece jsou dnes hlavními výrobními agregáty ve slévárnách oceli a litiny.

Z konstrukčního hlediska lze *elektrické indukční pece* rozdělit

- ✓ Pece kanálkové
- ✓ Pece kelímkové – na síťovou frekvenci.
 - středofrekvenční
 - vysokofrekvenční

Kanálkové elektrické indukční pece se používají ve slévárnách litiny a neželezných kovů jako pece udržovací. Jsou napájeny proudem o síťové frekvenci. Princip ohřevu kovu nedovoluje při výrobě oceli použít tyto pece jako tavící a jejich měrný elektrický výkon je rovněž omezen. Ve slévárnách oceli se nepoužívají.

Vysokofrekvenční elektrické indukční kelímkové pece jsou používány jako pece laboratorní pracující se vsázkou několika gramů až několika set gramů. Používají se k tavení většiny technických kovů.

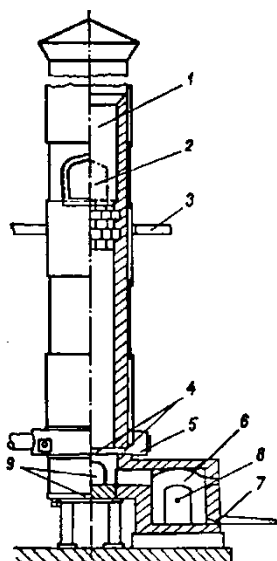
Středofrekvenční elektrické indukční pece kelímkové pece (EIPK) se stavějí nejčastěji od několika desítek kilogramů až po hmotnost tavby přes 25 tun (obr. 13.17). Menší pece 40 až 250 kg jsou běžné ve slévárnách přesného lití. Ve slévárnách oceli jsou EIPK využívány zejména pro odlévání odlitků střední a malé hmotnosti zejména na formovacích linkách.

Elektrické indukční pece na síťovou frekvenci byly často instalovány ve slévárnách litiny, kde slouží jako pece udržovací, na ohřev tekuté litiny roztavené v jiném agregátu i jako pece tavící.

Stavějí se od hmotnost 1 t až do 80 t. Ve slévárnách oceli se používají jen zřídka. Pece pracují nejlépe s tekutým zbytkem 25 až 75 %.

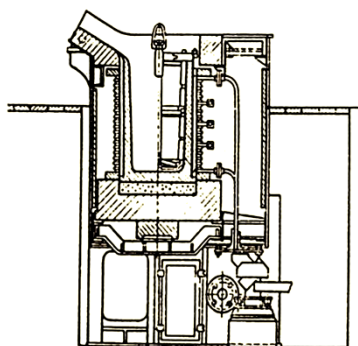
V **elektrických obloukových pecích** hoří elektrický oblouk mezi grafitovými elektrodami (nepřímý ohřev) nebo elektrodami a vsázkou (přímý ohřev), který dosahuje teploty až 4000 °C. Pece s nepřímým ohřevem se používají pro tavení slitin mědi, pece s přímým ohřevem na tavení ocelí a zřídka i litiny.

Slévárenské elektrické obloukové pece se téměř výhradně používají pro tavení oceli. Mohou zpracovávat kovovou vsázkou s vysokým obsahem fosforu a síry. Omezeně se používají pro výrobu litiny, což vyžaduje nauhličení tavby. Mohou být provozovány přerušovaně a zajistit taveninu s vysokou teplotou (obr. 13.18).

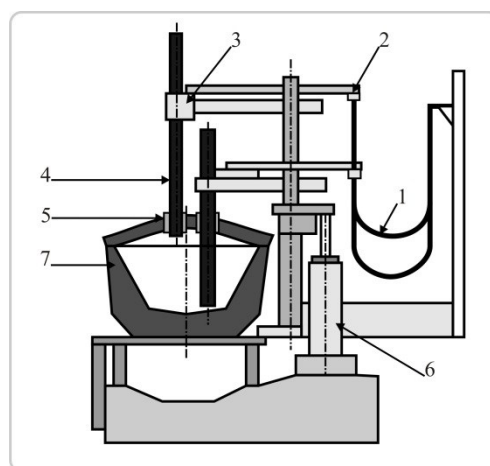


Obr. 13.16 Schéma kuplovy s předpecím

1-šachta, 2- sázecí otvor, 3-sázecí plošina, 4-dyšna, 5-větrovod, 6-předpec, 7-odpichový otvor pro litinu, 8- odpichový otvor pro strusku, 9-vstupní otvor



Obr. 13.17 Schéma elektrické indukční pece kelímkové středofrekvenční



Obr. 13.18 Schéma elektrické obloukové pece

1-měděná lana, 2-ramena držáků elektrod, 3-měděná pásovina, 4-grafitové elektrody, 5-chladiče víka pece, 6-hydraulický držák elektrod, 7-nádoba pece

Dosahují značné tepelné účinnosti až 80 %. EOP je připojena na síť 22 kV a pecní transformátor transformuje elektrickou energii na 100 – 220 V. Instalovaný příkon pecního transformátoru bývá 300 - 600 kVA.t⁻¹. Pro natavení 1t oceli se počítá s teoretickou spotřebou 380 kWh.t⁻¹. Skutečná spotřeba EOP včetně ohřátí lázně na 1600 °C je vyšší, 460-800 kWh.t⁻¹ taveniny v závislosti na kapacitě pece, spotřebě tekutého kovu, rafinačních postupech, teplotách odpichu aj. Doba tavení je dána především při standardním stavu technickým vybavením EOP a vyráběným sortimentem taveniny. Typický čas tavení může být v EOP od 1 do 4 hodiny.

13.2.3. Konvertory

Konvertory jsou jako primární výrobní agregáty výhradně ocelářského charakteru. V oblasti sekundární metalurgie pracuje v zahraničí jako pochod označovaný **AOD** (Argon Oxygen Decarburisation), který pracuje v kombinaci (duplexu) s EOP nebo kyslíkovým konvertorem. Během dmýchání kyslíku dochází k exotermickým reakcím, které slouží ke krytí tepelných ztrát, a proto není nutné používat přehřátí taveniny před vlastním zkujňováním v AOD konvertoru. Použití

AOD je výhodné zejména při zpracování vysokolegovaných korozivzdorných ocelí, kde se dosahuje nízkých obsahů uhlíku (také pod 0,03 %) při vysokém využití chrómu ze vsázky (až 95 %). Podstata tohoto systému je ve společné dmýchání kyslíku a argonu do kovu v konvertoru, kde dochází ke snižování parciálního tlaku oxidu uhelnatého.

13.2.4. Rotační plynové pece

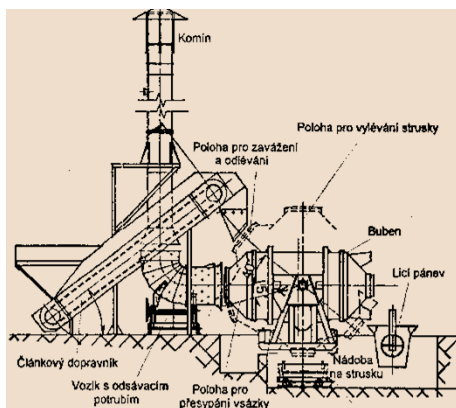
Rotační plynové pece se používají ve slévárnách neželezných kovů. Tradičním zdrojem energie byly olejové hořáky. Vývoj oxidačních plynových hořáků umožnil zavedení výroby litiny v rotačních pecích za použití relativně většího množství ocelového odpadu a grafitu jako nahličovała.

Rotační pec sestává z horizontální válcové nádoby (obr. 13.19), ve které je ohřívána kovová vsázka oxidačním hořákem, umístěným na jedné straně pece. Pro generování potřebného tepla se používá zemní plyn s čistým kyslíkem. Kouřové plyny opouštějí pec opačnou stranou. Naklápěcí mechanismus dovoluje, aby byla pec zvednuta v určitém úhlu nebo do vertikální polohy. Tato poloha se používá pro zavážení pece pomocí okovu s odklopným dnem, článkovým dopravníkem (pro větší výkony) nebo vibračním žlabem.

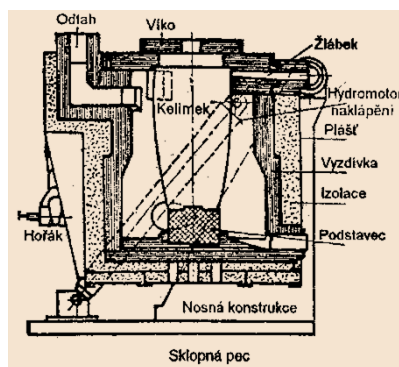
Vertikální poloha se také používá pro opravu nebo obnovu vyzdívky.

Šikmá poloha slouží pro zavážení a odebrání tekutého kovu. Po naplnění bubnu kovovou vsázkou dojde k naklonění bubnu v opačném směru, aby se vsázka rovnoměrně rozprostřela. Ve všech polohách je možné bubnem současně otáčet.

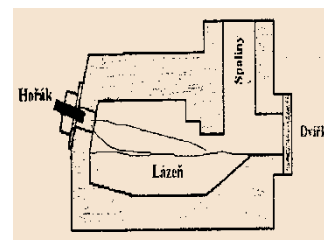
Během ohřevu a tavení se pec pomalu otáčí a dovoluje tak přenos a rozvod tepla. Pecní atmosféra je řízena poměrem vzduch (kyslík): palivo. Cyklus tavení rotační pece trvá od 90 minut do několika hodin. Pro plynulou výrobu litiny se instalují 2 - 4 rotační pece, ve kterých se taví postupně.



Obr. 13.19 Rotační plynová pec



Obr. 13.20 Sklopná kelímková pec



Obr. 13.21 Řez plamennou stabilní pecí

13.2.5. Kelímkové odporové a palivové pece

Kelímkové odporové a palivové pece se používají pouze pro tavení neželezných kovů. Sklopné kelímkové pece se pro odebrání nataveného kovu naklápějí ručně nebo dálkovým ovládáním hydraulického mechanismu (obr. 13.20). Ze stabilních pecí se odebírá tavenina ručními pánvemi. Pro většinu neželezných kovů je důležité, aby plamen a spaliny palivových pecí nebyly v kontaktu se vsázkou.

Z důvodu nepřímého ohřevu (přes stěny kelímku) nedochází k naplnění spaliny nebo plynem. Konfigurace se stranovým odtahem spalin se používá zejména pro tavení slitin Al. Pec

s otvory pro únik spalin ve víku se používá pro tavení bronzu. Řízení teploty brání oxidaci a odpařování kovu. Kelímkové pece se používají pro výrobu malého množství nataveného kovu, většinou < 500 kg na dávku a pro malé výrobní kapacity.

13.2.6. Plamenné pece

Plamenné pece mají přímé vytápění. Horký vzduch a zemní plyn se spaluje. Plamen je hnán nad kov (taveninu) a spaliny se z pece odtahují. Příklad plamenné pece v řezu je na obr. 13.21. Plamenná pec nachází své hlavní uplatnění při tavení velkého množství neželezných kovů.

Je to žáruvzdorně vyžděná obdélníková nebo kruhová pec, která je vyhřívána hořáky namontovanými ve víku nebo ve stěně. Používají se různá paliva a přídavné palivové oxidační plynové hořáky ke zvýšení rychlosti tavení. Pece jsou částečně utěsněny. Zajišťují odsávání během odpichu a sázení.

Pec může být konstruována v mnoha konfiguracích podle druhu kovu a použití. Různá jsou provedení nístěje a bočních stěn pro specifické účely tavení s tryskami pro intenzifikaci plyny. Plamenné pece mohou být sklopné.

Účinnost tavení plamenné pece není obvykle velká, z důvodu nízkého převodu tepla z hořáku. Může zlepšit v praxi obohacením kyslíkem nebo použitím kombinací plynů.

Tyto pece se používají pro tavení v dávkách, k rafinaci, a udržování různých materiálů. Velké plamenné pece mají značnou rychlost tavení.

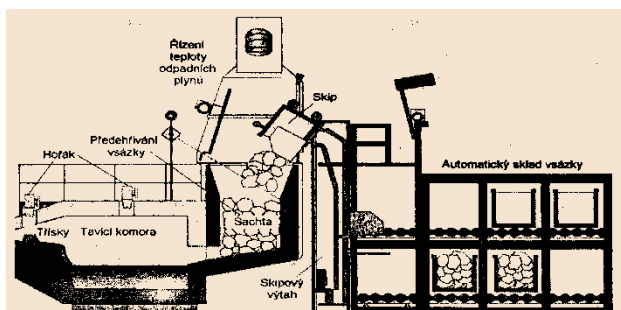
Mohou manipulovat s kusovou vsázkou, ale její přímý kontakt s plamenem vede k vysokým ztrátám kovu, naplynění a výraznému znečištění oxidy. Řízení teploty je také obtížné. Tyto potíže mohou být překonány praktickými zkušenostmi. Například stěry mohou být odstraněny použitím některých tavidel a moderní hořáky snižují problémy s řízením teploty.

Po odpichu, filtraci a odplynění se může přistoupit k další úpravě, protože kov je převezen do udržovacích pecí.

13.2.7. Šachtové plynové pece

Šachtové plynové pece (obr. 13.22) jsou průběžné tavící pece s vysokým tavicím výkonem od 0,5 t do 5 t Al za hodinu. Mají udržovací kapacitu do 50 t.

Z důvodu pomalého předehtřívání je vsázka před zahájením tavení v peci dobře vysušena. Proto je pec velmi vhodná pro slitiny Al z důvodu sníženého rizika naplynění vodíkem. Pro udržovací funkci je změna slitiny obtížná. Typická je jednoduchá vertikální koncepce se sběrnou nístějí (uvnitř nebo vně pece), hořákem na spodním konci a sázecím systémem na vrcholu.



Obr. 13.22 Šachtová tavící pec pro tavení slitin Al

Hořáky jsou obvykle plynové. Mají regulaci pro oxidační nebo redukční atmosféru v peci. Kontinuální monitorování oxidem CO nebo vodíkem se provádí pro každý hořák v řadě. Pecní plyny se odsávají a čistí. Někdy se používá dodatečné spalování k rozkladu uvolněného CO, oleje, organických látek nebo dioxidů. Aby se zajistilo dodatečné spalování v horní úrovni šachty nebo na špici pece, nad tavicím pásmem se přivádí dodatečný kyslík.

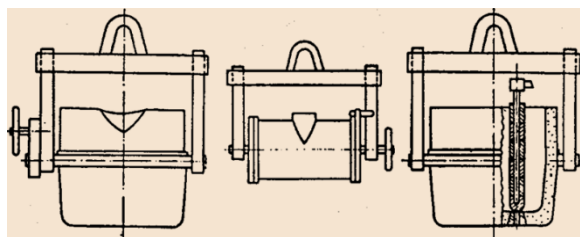
Taví se čistá vsázka. Je-li do pece zavážen zaolejoovaný kov, prochází mezi horní oblastí a hořáky teplotním gradientem. Nízká teplota může vytvářet mlhu částečně spáleného organického materiálu.

Šachtová pec se rovněž používá pro předehřívání vsázkového materiálu před tavením. Kvůli složité konstrukci a obtížné obnově žárovzdorné vyzdívky se pec používá pouze pro kovy s nízkým bodem tavení.

Životnost vyzdívky může být od 4 do 8 let. Moderní typy pecí s počítačem řízeným systémem hořáků, dosahují měrné spotřeby 650 kWh.t^{-1} nataveného Al (při 720°C).

13.2.8. Odlévání taveniny

Odlévání taveniny ve slévárnách se provádí z licích pánví, které slouží k dopravě a odlévání kovu do formy. Ve starých slévárnách se kov naléval do ručních pánví až do 60 kg tekutého kovu, které nesli jeden nebo dva slévači přes slévárnu k formě. Dnes se ruční odlévání používá jen pro



Obr. 13.23 Závěsné licí pánve

- zleva a. hrncová s horní výpustí,
b. bubínková s horní výpustí,
c. hrncová se spodní výpustí

dávkování menších množství kovů při kokilovém lití nebo tlakovém lití z udržovacích pecí. Větší množství kovu se dopravuje jeřábem, na visuté drážce nebo licími vysokozdviznými vozíky. Pánve mají tvar hrnce nebo bubínku (obr. 13.23) a kov se odlévá buď hore naklopením pánve pomocí kola a šnekového převodu například neželezné kovy, šedá litina aj., nebo spodem. Menší pánve jsou vydusány žárovzdornou hmotou, větší pánve většinou vyzděny žárovzdornou vyzdívkou. Před použitím je nutno pánve předehřát.

Ve slévárnách oceli se používají zpravidla pánve se spodní výpustí a zátkovým uzávěrem. Ocel se odlévá z LP výlevkou, která se uzavírá zátkovou tyčí a je ve spodní části ukončena grafitovou hlavou. Obr. 13.23c znázorňuje pohled na zátkový mechanismus s uzávěrem a výdusku LP.

Ekonomicky nenáročné zařízení a snadné zhotovení jsou hlavní výhodou zátkového uzávěru. Zátková tyč je tvořena ocelovou kulatinou se závitem na spodním konci, na který je našroubována grafitová hlava. Její kvalita je dána odlévanou jakostí oceli. Většinou je grafitová hlava vyrobena ze šamotu a 30 % grafitu. Nad grafitovou hlavou jsou navlečeny šamotové trubky, mezi sebou utěsněné žárovzdorným jílem. Prostor mezi kulatinou a trubkami je zaplněn zásypem z křemičitého písku. Celá takto sestavená sestava se nazývá licí kůl. Grafitová hlava uzavírá výtokový kámen-výlevku, která je zazděna do dna pánve. Výlevka je obvykle vyrobena z jakostního šamotu.

Moderní slévárny, které jsou v přímé návaznosti na ocelárny a mohou využívat zařízení sekundární metalurgie (pánvová pec, keson aj.) nemohou pracovat se zátkovým uzávěrem, ale musí mít instalovaný na spodní vnější čísti licí pánve šoupátkový uzávěr.

13.3. Čištění a apretace odlitků

Odlitek musí po odlití vychladnout na takovou teplotu, aby snesl další manipulaci. Potřebná doba chladnutí závisí na materiálu odlitku, jeho hmotnosti a tvaru a materiálu formy. Teprve potom lze odlitek (nazývaný obvykle surový odlitek) vyjmout z formy, což je poměrně snadné u forem trvalých. U netrvalých forem musíme zařadit zvláštní operaci nazvanou uvolňování z formy.

Uvolňování odlitků z formy

Vychladnuté odlitky lze uvolnit z formy buď nárazy (vytloukáním) nebo tahem či tlakem (vytahování či vytlačování). Při ručním vytloukání se na rám nebo na odlitek tlouče kladivem.

Mechanického vytloukání lze dosáhnout vibrátory nebo na střešacím roštu. Vytahování nebo vytlačování se používá zejména při odlévání do trvalých forem a lze ji mechanizovat a robotizovat.

Hrubé čištění odlitků

Vytloukáním se sice dosáhne odstranění převážné části formovacího materiálu, ale na odlitku často zůstává ještě připečený písek a většinou nejsou odstraněny zbytky jader. Hrubé čištění odlitků se provádí ručně pneumatickými kladivy nebo v čistících bubnech a komorách. V těchto zařízeních dochází k odstranění připečeného a jádrového písku omíláním nebo častěji metáním ocelových nebo litinových broků tzv. tryskání.

Odstraňování vtoků a nálitků

Hrubě očištěné odlitky je třeba zbavit vtoků, nálitků a výfuků. Postup, který k tomu použijeme, závisí na použitém materiálu odlitku. U drobných odlitků z neželezných kovů se vtoky a nálitky nejčastěji odřezávají na okružních pilách. U šedé litiny, která je křehká lze vtoky a nálitky odstraňovat ulamováním. U ocelových odlitků musíme používat řezání kyslíko-acetylenovým hořákem nebo kyslíkem v kombinaci se zemním plynem.

Dočišťování a konečná úprava odlitků

Při dočišťování se upravuje konečný vzhled a rozměry odlitků tak, aby byly dodrženy rozměry a jejich vzhled. Tyto operace se často provádí ručně osekáváním nebo dobrušováním.

Na závěr se ještě může provádět další tryskání jemným tryskacím prostředkem. Odlitky ze slitin železa se natírají základním nátěrem proti korozi.

Tepelné zpracování odlitků

Odlitky se často ve slévárnách tepelně zpracovávají.

Protože je tepelné zpracování samostatnou disciplínou materiálových věd, nebude zde tepelné zpracování samostatně rozebíráno.

13.4. Kontrola, vady odlitků a jejich opravování

Po očištění se odlitek kontroluje, přičemž se nejprve provádí povrchová, vizuální kontrola a pak se odlitek proměří. V některých případech požaduje zákazník i prověření vnitřní jakosti nedestruktivními zkouškami. Na zvlášť litých nebo přilitých vzorcích se z každé tavby (nebo i kusu) kontroluje chemické složení a mechanické, popřípadě i fyzikální vlastnosti.

Jako vadu odlitku označujeme odchylky (neshody):

- vzhledu,
- tvaru,
- rozměru,
- hmotnosti,
- struktury,
- celistvosti (homogenity) a
- sjednaných podmínek a norem.

Přípustné vady nejsou na závadu použití odlitků a musí být buď výslovně povoleny anebo nesmí být alespoň výslovně zakázány.

Nepřípustné vady jsou obvykle jmenovitě uvedeny a jejich výskyt znamená neshodný výrobek a tzv. zmetkování.

Opravitelné vady jsou takové vady, které lze vhodnými způsoby odstranit dodatečnými operacemi, které slévárna provádí na své náklady.

Pro klasifikaci vad odlitků byly vypracovány různé systémy. Poměrně jednoduchou klasifikaci, která vycházela z mezinárodního atlasu vad, obsahuje doposud platná norma ČSN 42 1240, která rozlišuje celkem sedm kategorií vad odlitků ze slitin železa.

Vady odlitků ze slitin železa, jejichž rozdělení do sedmi tříd vad a skupin vad, spolu s klasifikací, s vysvětlením hlavních příčin a s návrhy na jejich prevenci ve slévárenské výrobě, uvádí také Elbel. Jeho základní uspořádání seznamu tříd, skupin a vad odlitků je zobrazeno v tab. 13.1.

Tab. 13.1 Třídění slévárenských vad na třídy, skupiny a druhy vad

Třída vad	Název třídy vad	Supina vad	Název skupiny vad	Počet druhů
100	Vady tvaru rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu	8
		120	Chybějící část odlitků s lomem	3
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar	4
		140	Nedodržení hmotnosti odlitků	-
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny	3
		220	Zálupy	3
		230	Nárosty	4
		240	Výronky	-
		250	Výpotky	-
		260	Zatekliny	3
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku	7
		280	Vady povrchové ochrany odlitku	-
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny	3
		320	Praskliny	-
		330	Porušení souvislosti mechanickým poškozením	2
		340	Porušení souvislosti nespojením kovu	2
400	Dutiny	410	Bubliny	5
		420	Bodliny	-
		430	Odvařeniny	3
		440	Staženiny	6
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost	2
		520	Nekovové vměstky	6
		530	Makrosegregace a vycezeniny	4
		540	Broky	-
		550	Kovové vměstky	-
		560	Nevyhovující lom	-
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny	3
		620	Vměstky	-
		630	Nesprávná velikost zrna	-
		640	Nesprávný obsah strukturních složek	-
		650	Zatvrdlina, zákalka	-
		660	Obrácená zákalka	-
		670	Oduhličení povrchu	-
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury	-
700	Vady chemického složení a vlastností odlitků	710	Nesprávné chemické složení	-
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností	-
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností	-
		740	Nevyhovující homogenita odlitku	-



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Solidus
- Likvidus
- Krystalizace
- Vtoková soustava
- Zabíhavost
- Metoda vepsaných koulí
- Neshodné odlitky
- Nálitky a chladítka
- Smršťování kovu
- Plyny v kovu a ve formě
- Tavicí agregáty
- Čištění a apretace odlitků
- Vady odlitků



Příklady otázek k probranému učivu

1. Jakou teplotu definujeme jako likvidus?
2. Jakou teplotu definujeme jako solidus?
3. Čím se může teplota likvidu i solidu pro danou slitinu měnit?
4. Jakým směrem lze předpokládat růst krystalů během krystalizace?
5. Vyjmenujte základní prvky vtokové soustavy
6. Ve kterých místech odlitku lze předpokládat vznik staženiny?
7. Vysvětlete a popište průběh smršťování při tuhnutí.
8. Vysvětlete funkci náleků a chladítek.
9. Vysvětlete a popište průběh smršťování v pevném stavu.
10. Vysvětlete pojem plyny v kovu a ve slévárenské formě.
11. Popište funkci slévárenské pece kuplovny.
12. Popište funkci elektrické indukční pece.
13. Popište funkci elektrické obloukové pece.
14. Popište funkci konvertoru a rotační plynové pece ve slévárnách.
15. Popište funkci kelímkové odporové a palivové pece.
16. Popište funkci plamenné a šachtové pece.
17. Vysvětlete pojmy čištění a apretace odlitků.
18. Uveďte příklady vad odlitků.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ELBEL, T., *Průmyslové technologie I.*, Učební text VŠB-TU Ostrava, 2006, 37 s.

JELÍNEK, P., *Slévárství*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1992, 224 s.

CHRÁST, J., *Slévárenská zařízení*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2006, ISBN 80-7204-456-7, 256 s.

CAMPBELL, J., *Castings*, University of Birmingham, 2005, ISBN 0-7506-4790-6, 337 p.

14. Základní slitiny pro výrobu odlitků ze železných a neželezných kovů



Čas ke studiu: 120 minut



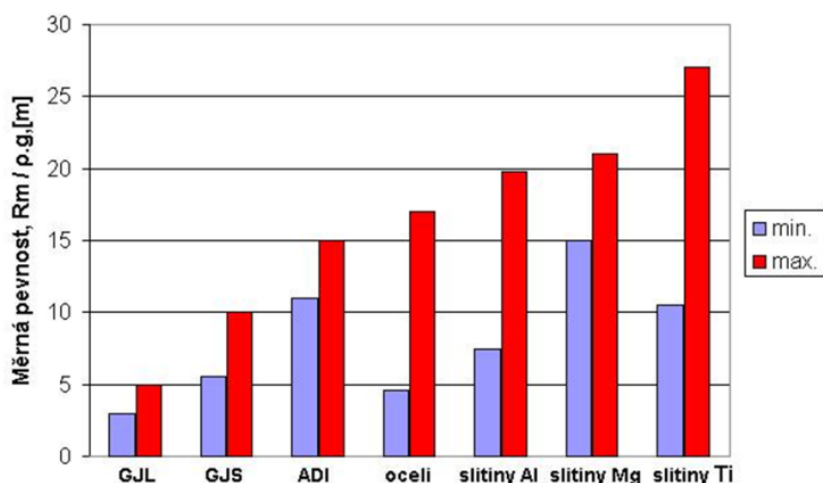
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní slitiny pro výrobu odlitků ze slitin železných kovů
- definovat základní slitiny pro výrobu odlitků ze slitin neželezných kovů
- popsat dělení jednotlivých skupin slitin na základě chemického složení
- popsat specifické aplikace jednotlivých slitin



Výklad

Téměř všechny slitiny lze používat pro výrobu odlitků a dosáhnout mechanických vlastností blízkých tvářeným materiálům. Podle statistických údajů se nejvíce odlitků se na světě vyrábí z litiny a to z litiny s lupínkovým (GJL) a litiny s kuličkovým grafitem (GJS). Porovnáme-li je s jinými materiály podle konstrukčních hledisek a vztáhneme-li jejich pevnost v tahu k součinu měrné hmotnosti a gravitačního zrychlení, získáme „měrnou pevnost“. Znázornění hodnot běžných materiálů je na obr. 14.1. Vysoké hodnoty měrné pevnosti jsou především u slitin lehkých kovů a také materiálu ADI, což je izotermicky zušlechťená litina s kuličkovým grafitem. Na druhé straně nejrozšířenější a tradiční materiál šedá litina (GJL) má měrnou pevnost nejnižší.



Obr. 14.1 Pevnost v tahu různých materiálů na odlitky vztažená na jejich měrnou pevnost

14.1. Slévárenské slitiny železa s uhlíkem

14.1.1. Základní charakteristika

Technické slitiny železa s uhlíkem používané ve slévárenské praxi obsahují vždy kromě uhlíku další kovové i nekovové prvky, které pocházejí jednak ze surovin používaných k jejich výrobě - *prvky doprovodné*, jednak jde o prvky přidávané do slitin úmyslně - *prvky přidavné, legovací*.

14.1.2. Rozdělení slitin železa s uhlíkem

Podle množství uhlíku lze rovnovážný diagram železo - karbid železa (Fe- Fe₃C) rozdělit technické slitiny železa s uhlíkem do dvou skupin a to na oceli a litiny.

V případě ocelí nepřevyšuje obsah uhlíku hodnotu 2% (teoreticky 2,11%). S ohledem na obsah tohoto prvku je možné oceli dále dělit

- podeutektoidní obsahující do 0,8 % uhlíku
- eutektoidní s obsahem uhlíku 0,8 %
- nadeutektoidní s obsahem uhlíku 0,8 až 2 %

Litiny, které mají obsah uhlíku vyšší než 2%, lze dále rozdělit

- podeutektické s obsahem uhlíku 2 až 4,3 %
- eutektické s obsahem uhlíku 4,3 %
- nadeutektické s obsahem uhlíku nad 4,3 %

Hodnota 4,3 % platí pro metastabilní soustavu Fe – Fe₃C, u stabilní soustavy Fe - C je uvažována hodnota 4,26 %.

V závislosti na obsahu legovacích prvků (tj. na stupni legování) můžeme slitiny železa s uhlíkem rozdělit na skupiny

- nelegované - obsahují pouze doprovodné prvky a výrobně nutné množství přísadových prvků, u oceli na odlitky se používá místo výrazu „nelegované oceli“ výrazu „uhlíkaté oceli“,
- nízkolegované - obsahují kromě doprovodných prvků a výrobně nutného množství přísadových prvků určité množství legovacích prvků, přičemž součet jejich středních obsahů nepřesahuje hodnotu 5 hm. %
- vysokolegované - obsahují kromě doprovodných prvků a výrobně nutného množství přísadových prvků zvýšené množství legovacích prvků, přičemž součet jejich středních obsahů je větší než 5 hm. %.

14.2. Oceli na odlitky

Oceli na odlitky jsou obdobou odpovídajících typů tvářených ocelí. Jejich složení je však většinou modifikováno ke zlepšení slévárenských vlastností (obvykle je zvýšen obsah uhlíku, manganu a křemíku).

Pro dosažení žádoucí struktury a vlastností ocelových odlitků nelze samozřejmě počítat s příznivým vlivem tváření jako u výkovků, ale jen s možnostmi, které dává tepelné zpracování.

V současné době se oceli na odlitky (obdobně jako oceli pro tváření) vyrábí v převážné míře v pecích elektrických. V případě elektrických pecí se pro hmotnější odlitky používá pecí obloukových, u méně hmotných odlitků pecí indukčních.

14.2.1. Uhlíkové (nelegované) oceli

Obsahují 0,1 až 0,6 % C; 0,3 až 0,9 % Mn a 0,2 až 0,5 % Si.

Mechanické vlastnosti těchto ocelí ovlivňuje v převážné míře uhlík. Jejich meze pevnosti v tahu se pohybují od 370 do 840 MPa.

Struktura oceli je dána obsahem uhlíku a tloušťkou stěn odlitku. Při středních obsazích uhlíku je podstatný podíl feritu tvořen Widmannstattenovým feritem jehlicového či deskového tvaru.

Litá struktura je značně heterogenní a vlastnosti odlitku se liší v jeho různých průřezích.

Zrovnoměrnění struktury a zlepšení mechanických vlastností se dosahuje tepelným zpracováním. Nejčastějším TZ uhlíkových ocelí je normalizační žíhání s popouštěním. Vyrábí se z nich součásti mostních konstrukcí, strojních zařízení a armatur, vesměs pro pracovní teploty do 400 až 450 °C.

14.2.2. Nízkolegované oceli

S ohledem na chemické složení, tedy druh a množství legujících prvků, se tyto oceli vyznačují určitými charakteristickými vlastnostmi, jako je například otěruvzdornost, žárovevnost, odolnost vůči vyšším tlakům a namáhání.

Mez pevnosti v tahu po zušlechtění dosahuje hodnot 600 až 1300 MPa. Navíc přísady některých legujících prvků například Mo, Cr, které zvyšují prokalitelnost oceli, takže lze zušlechtovat na požadovanou pevnost mnohem větší průřezy (tloušťky stěn), než při použití uhlíkových ocelí.

Pro zlepšení vlastností ocelí se používají různé přísadové prvky (do 3-5 %). Příkladové prvky působí jednak na rovnovážné podmínky mezi jednotlivými fázemi a jednak působí na kinetiku fázových přeměn. Mění rovněž fyzikální vlastnosti oceli a chemickou odolnost.

Přítomností přísadových prvků se oblasti stability těchto fází rozšiřují nebo snižují. Podle toho můžeme rozlišovat prvky na austenitotvorné nebo feritotvorné.

Austenitotvorně působí kromě C i dusík, mangan a nikl

Feritotvorné prvky tvoří Cr, Mo, W, V, Ti, Co, Si a Al.

Kromě toho rozlišujeme i karbidotvorné prvky, které rozšiřují stabilitu cementitu – Mn, Cr, Mo a W.

Naproti tomu prvky zvětšující nestabilitu cementitu označujeme jako grafitotvorné, Si, Ni, Co a Al.

14.2.3. Vysokolegované oceli

Do této skupiny patří žárovzdorné, žárovevné, otěruvzdorné a korozivzdorné oceli, legované především chromem, manganem a niklem, případně křemíkem, molybdenem, wolframem a vanadem.

Žárovevné oceli

Na výrobu žárovevné oceli do 700 °C se používá austenitická chromniklová ocel (10/18; 18/11).

Nad 750 °C jsou vhodné oceli s vysokým obsahem Cr a přísadou Ni, aby byla zajištěna austenitická struktura a zamezilo se vytváření fáze σ . Uhlík u těchto ocelí je pod 0,03 %. Ocel se žíhá při teplotě 1150 °C a po rozpouštěcím žíhání se zařadí prodleva na teplotě 480 °C, při níž se austenit přemění na martenzit. Dosahuje se tak pevnosti až 1000 MPa při teplotách 80 až 400 °C.

Na speciální účely a nejvyšší pevnosti za tepla, pro pracovní teploty až do 1050 °C, se používají slitiny Ni, NiCo nebo Co.

Korozivzdorné oceli

Na součásti vodních turbín, armatury a chemický průmysl jsou vhodné nerezavějící oceli s min. obsahem 12 % Cr.

Jsou to oceli feriticko-karbidické (26 až 30 % Cr, 1 % C) perliticko-martenzitické (13 až 17 % Cr, 0,1 až 0,25 % C); austenitické (18 % Cr, 8 % Ni, max. 0,1 % C).

Otěruvzdorné oceli.

Na namáhání otěrem jsou vhodné manganové oceli. Představitelem může být Hadfieldova ocel, která obsahuje 1,2 až 1,5 % C, 12 až 17 % Mn, 0,5 % Si, v litém stavu má austenitickou strukturu, prostoupenou karbidy manganu, které způsobují křehkost odlitků. Po tepelném zpracování (TZ) se získá čistě austenitická struktura, která je vysoce houževnatá a charakteristická tím, že u ní dochází k zpevnění za studena mechanickým namáháním za provozu. Tvrdost je pak 50 HRC. Odolnost proti opotřebení lze ještě zvýšit přísadou 2 % Cr.

Nemagnetické oceli.

Musí splňovat tyto podmínky:

- nepatrnou relativní permeabilitu,
- dobrou pevnost,
- dobrou obrobitelnost a odolnost proti korozi.

Poněvadž u slitin Fe je nemagnetickou strukturou austenit, je nutné, aby tato struktura byla zachována až do normálních teplot. Používá se k tomu Mn a Ni. Existují 3 hlavní skupiny nemagnetických ocelí:

- ✓ Manganová ocel (Hadfieldova), která zpevňuje vysokými tlaky a proto je špatně obrobitelná.
- ✓ Chromniklová manganová ocel s 0,22 až 0,25 % C, 8 % Cr, 5 % Ni, 8 % Mn, která má dobré slévárenské vlastnosti a dobře se obrábí.
- ✓ Chromniklová austenitická nerezavějící ocel s chemickým složením 18 % Cr, 10 až 14 % Ni, 0,8 % Mn a 0,8 % Si.

Magnetické oceli.

Oceli na výrobu trvalých magnetů se vyznačují velmi nízkým obsahem C (pod 0,08 %). V současnosti se téměř výlučně volí oceli typu Al-Ni, Al-Cr-Ni nebo známá slitina Al-Ni-Co, která obsahuje 9 až 13 % Al, 12 až 17 % Co, 2 až 6 % Cu, 18 až 24 % Ni. Tyto slitiny nelze tvářet za studena ani za tepla, proto konečných rozměrů musí být dosaženo již odléváním nebo broušením.

14.3. Litiny

Základní rozdělení litin vychází ze strukturního hlediska, podle něhož rozlišujeme litiny grafitické (stabilní soustava Fe-C) s grafitickým eutektikem a karbidické (metastabilní soustava Fe-FeC) s cementitickým eutektikem.

Vznik grafitického, případně cementitického eutektika je ovlivněn v první řadě chemickým složením litin a dále pak podmínkami tuhnutí (zejména rychlostí ochlazování).

Do první skupiny litin grafitických, patří:

šedá litina - litina s lupínkovým grafitem (LLG) - mezinárodní značení EU - GJL.

tvárná litina - litina s kuličkovým grafitem (LKG) - mezinárodní značení EU - GJS.

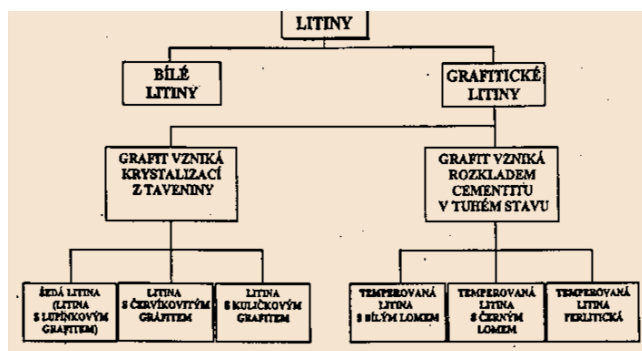
Ke grafitickým litinám náleží také temperovaná litina, jejíž grafit vzniká rozkladem cementitu v tuhém stavu.

Do druhé skupiny, to znamená karbidických (s cementitickým eutektikem), patří litina bílá. Za přechodový typ lze považovat tvrzenou litinu, která obsahuje grafitické i cementitické eutektikum.

14.3.1. Grafitické litiny

Grafitické litiny patří k nejstarším avšak doposud nejpoužívanějším konstrukčním materiálům. Mají buď veškerý uhlík, nebo jeho převážnou část vyloučenou jako grafit a neobsahují volný cementit. Mají výhodné slévárenské vlastnosti a postupným zdokonalováním technologie výroby dosáhly také velmi dobrých vlastností užitných. V porovnání s ocelí mají grafitické litiny mnohé přednosti, např. menší měrnou hmotnost (o cca 8 až 10 %), lepší obrobitelnost a třecí vlastnosti, větší tlumicí schopnost a menší vrubovou citlivost. U litin s příznivým tvarem grafitu (tvárná litina, temperovaná litina) lze dosáhnout dobrých mechanických vlastností ocelí. U litin lze také měnit jejich vlastnosti změnou struktury základní kovové hmoty - matrice a to pomocí volby rychlosti ochlazování odlitku, legováním nebo i tepelným zpracováním.

Struktura grafitických litin je tvořena základní kovovou hmotou, v níž je přítomen grafit. Vlastnosti těchto litin ovlivňuje jak druh matrice, tak tvar, velikost, množství a rozložení částic grafitu. Grafit se může v těchto litinách vyskytovat jako lupínkový, červíkovitý, vločkový nebo kuličkový.



Obr. 14.2 Rozdělení litin

Grafit rozložený v základní kovové hmotě litiny snižuje efektivní nosný průřez odlitku. Při namáhání odlitku dochází ke vzniku místních koncentrací napětí, jehož špičky mohou (podle geometrie částic grafitu) 10 krát až 20 krát převýšit hodnotu jmenovitého napětí. Nejsilněji se vrubový účinek grafitu projevuje u šedé litiny, v níž je vyloučen ve tvaru hrubých lupínků.

Nejvýhodnější je kuličkový grafit v tvárné litině nebo vločkový grafit

v temperované litině, neboť v takovýchto případech nejméně porušuje spojitost matrice a působí také nejmenším vrubovým účinkem.

Šedá litina - litina s lupínkovým grafitem

Litiny s lupínkovým grafitem jsou poměrně levným konstrukčním materiálem s dobrými technologickými vlastnostmi (především slévatelností). Pokud jde o mechanické vlastnosti, vyznačují se velmi nízkou plasticitou a houževnatostí, což souvisí s přítomností lupínkového grafitu v základní kovové hmotě těchto litin. Pevnější většinou jsou to podeutektické slitiny, jejichž chemické složení bývá obvykle 2,5 až 4,0 % C; 1,7 až 2,5 % Si; 0,5 až 1,0 % Mn; 0,2 až 0,6 % P; max. 0,15 % S.

Nejdůležitější přísadou u těchto litin je křemík, jehož obsah volíme podle rychlosti chlazení (tloušťce stěny) odlitku. Tenkostěnné odlitky vyžadují vyšší obsah křemíku, který svým grafitizačním účinkem kompenzuje vliv manganu, popř. síry (karbidotvorné prvky) atd.

Pro posouzení účinku křemíku a dalších prvků na koncentraci uhlíku v eutektiku a na podíl a hrubost grafitu v matrici litiny, se používá uhlíkový ekvivalent C_e nebo stupeň eutektičnosti S_c . Obě kritéria byla sestavena v podobě jednoduchých empirických vztahů a slouží k rychlému stanovení typu litiny.

Uhlíkový ekvivalent C_e bývá vyjádřen vztahem

$$C_e = \%C_c + 0,3 (\%Si + P) \quad (14.1)$$

Stupeň eutektičnosti S_c bývá vyjádřen vztahem

$$S_c = \frac{\%C_c}{4,26 - 0,3(\%Si + \%P)} \quad (14.2)$$

Specifikaci litin podle takto zjištěných hodnot lze provést následujícím způsobem

Tab. 14.1 Typ litin podle výpočtu C_e a S_c

$C_e < 4,26$	$S_c < 1$	litina podeutektická
$C_e = 4,26$	$S_c = 1$	litina eutektická
$C_e > 4,26$	$S_c > 1$	litina nadeutektická

Očkovaná šedá litina

Ze vztahů mezi chemickým složením a vlastnostmi litiny vyplynulo, že se pevnost litiny s lupínkovým grafitem zvyšuje s klesajícím stupněm eutektičnosti nebo uhlíkovým ekvivalentem. Litiny s nižším S_c nebo C_e mají však sklon k tvorbě cementitického eutektika a také je zhoršena jejich zabíhavost. Pro zvýšení grafitizační schopnosti se taková litina očkuje grafitizační přísadou, což bývá nejčastěji ferosilicium (FeSi) nebo silikokalcium (SiCa) vhodné zrnitosti.

Účinkem očkovačla je podněcována krystalizace grafitu, tavenina tuhne při menším přechlazení. Výsledkem tohoto procesu jsou jemnější lupínky grafitu navíc rovnoměrně rozložené v průřezu odlitku.

Ve srovnání se „základní“ litinou s lupínkovým grafitem (šedou litinou) má očkovaná šedá litina řadu předností, mezi které patří zejména stejnoměrná struktura v různých průřezích odlitku a lepší mechanické vlastnosti kovu.

Tvárná litina - litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Litina s kuličkovým grafitem je v podstatě vysoce jakostní grafitická litina, v jejíž základní kovové hmotě je grafit vyloučen ve tvaru kuličkovém již v litém stavu. Vyrábí se jako slabě podeutektická až nadeutektická, tzn. že její chemické složení bývá v mezích: 3,2 až 4,0 % C; 1,8 až 3,0 % Si; 0,2 až 0,8 % Mn.

Příznivého (kuličkového) tvaru grafitu se dociluje nejčastěji zpracováním taveniny hořčíkem, případně niklem, v kombinaci s vápníkem a kovy vzácných zemin. Tomuto procesu říkáme modifikace.

Na natavenou výchozí vsázku pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem jsou kladeny značné požadavky. Tavenina musí mít především nízký obsah fosforu a síry. Obsah fosforu, který silně snižuje houževnatost, může být max. do 0,08 až 0,10%. Obsah síry může být max. 0,02 až 0,05%, čímž se vytvoří příznivé podmínky pro modifikaci (při vyšším obsahu se síra váže na hořčík a tvoří nerozpustný MgS).

Pokud se týká slévárenské technologie, nejsou v případě litiny s kuličkovým grafitem dána jednoznačná doporučení týkající se především otázky nálitkování, provedení vtokové soustavy a polohy odlitku ve formě. Zejména v otázce nálitkování je nutno brát zřetel na celou řadu faktorů, jako je konstrukční řešení (tvar a modul) odlitku, jeho chemické složení, lící teplota a tuhost formy, které v některých případech umožňují beználtkové odlévání.

Bílá litina

Struktura tohoto druhu vzniká všeobecně při nižším obsahu grafitotvorných prvků (obsah Si v rozmezí 0,5 až 1,2%) a zvýšeném obsahu karbidotvorných prvků v litině nebo při vyšší rychlosti tuhnutí taveniny ve formě.

Vyrábějí se z ní jednoduché odlitky, které mají mít vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení, například lopatky pískometů nebo metacích tryskačů, rošty, mlecí desky apod. Jejich tvrdost je možno ještě zvýšit kalením.

Temperovaná litina

Tato litina se vyrábí tepelným zpracováním (temperováním bílé litiny). Temperovaná litina je dosti pevný, houževnatý a dobře obrobitelný konstrukční materiál, vhodný zejména pro středně namáhané odlitky menší hmotnosti převážně do několika kg s tloušťkou stěny od 3 do 30 mm. Svými vlastnostmi se blíží tvárné litině.

Podle převládajícího pochodu a rozsahu grafitizace cementitu lze u odlitků z bílé litiny získat tepelným zpracováním tři druhy temperované litiny:

- ✓ temperovanou litinu s černým lomem (feritická struktura)
- ✓ temperovanou litinu s bílým lomem (perlitická struktura)
- ✓ temperovanou litinu perlitickou.

Tvrzená litina

Výroba odlitků z tvrzené litiny je založena na ovládnutí krystalizace při tuhnutí odlitku. Cílem je dosáhnout v určité hloubce od povrchu odlitku takové rychlosti ochlazování, aby byla potlačena tvorba grafického eutektika a tuhnutí probíhalo podle metastabilního systému Fe – Fe₃C (bílá litina). Zbylá část průřezu (jádro) tuhne při menší rychlosti ochlazování za vzniku grafického eutektika.

Zvýšení rychlosti ochlazování povrchové vrstvy se dosahuje použitím kovových chladítek v příslušné části líce formy. Příkladem použití tvrzené litiny jsou válce hladké i profilované pro válcovací stolice nebo drtiče, průvlakové desky apod.

Legovaná litina

Přísadou legujících prvků se zpravidla u litinových odlitků sleduje zlepšení mechanických vlastností nebo dosažení výhodnějších vlastností fyzikálních. Poměrně značný počet legovaných litin lze rozdělit do čtyř základních skupin

- ✓ litiny se zvýšenými mechanickými vlastnostmi,
- ✓ litiny odolné proti opotřebení,
- ✓ litiny žárovzdorné,
- ✓ litiny korozivzdorné.

V případě požadavků na zvýšení mechanických vlastností se obvykle jedná o nízkolegované nebo legované grafické litiny. Jako legovací přísady se v těchto litinách vyskytují nejčastěji chrom (do 1 %), molybden (do 0,8 %), nikl (do 3 %) a vanad (do 0,5 %).

Zdrojem jejich vysoké odolnosti proti opotřebení jsou jednak tvrdé speciální karbidy, jednak martenzitická matrice. Jako legujících prvků se v tomto případě používá chrom, nikl, mangan, molybden a vanad.

Zlepšení žárovzdornosti se dosahuje především přísadou křemíku, chromu nebo hliníku.

Korozivzdorné litiny jsou legovány niklem, chromem a mědí, popř. křemíkem. Používá se například grafitická litina s austenitickou matricí s obsahem 12 až 16 % Ni, až 5 % Cr a 5 % Cu.

14.4. Slévárenské slitiny neželezných kovů

Neželezné kovy a slitiny je možno rozdělit do dvou hlavních skupin

- ✓ těžké neželezné kovy a slitiny
- ✓ lehké neželezné kovy a slitiny

Toto rozdělení vychází z měrné hmotnosti jednotlivých kovů a slitin, kdy hranici mezi výše uvedenými skupinami tvoří hodnota $4,5 \cdot 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tj. měrná hmotnost titanu.

Největší pozornost je věnována slitinám hliníku, které představují významný podíl na celosvětové výrobě odlitků a jejich význam stále roste. Tento trend můžeme zaznamenat i v České republice.

14.4.1. Slitiny mědi

Slitiny mědi se rozdělují na dvě velké skupiny, bronzы a mosazi.

Bronzy jsou slitiny mědi s cínem, olovem, hliníkem, antimonem nebo křemíkem. *Mosazi* jsou slitiny mědi se zinkem.

Cínové bronzы

Obsah cínu se pohybuje v širokých mezích od 0,15 do 20 %. Se stoupajícím obsahem Sn roste pevnost a tvrdost cínového bronzу, ale klesá tažnost. Mezi cínové bronzы patří i materiál na odlévání zvonů - zvonovina s 10 až 20 % Sn.

Cínové bronzы mají široký interval tuhnutí, například při obsahu 10 % Sn je až 150 °C.

Tím mají cínové bronzы horší slévárenské vlastnosti - zabíhavost, sklon k objemovému tuhnutí a tvorbě ředin v odlitcích. U cínových bronzů je důležitou operací při jejím zpracování dezoxidace, ke které se používá fosfor. Cínové bronzы mohou obsahovat i zinek, který zlepšuje jejich mechanické vlastnosti. Olovo zlepšuje třecí vlastnosti a obrobiteľnost.

Červené bronzы

Jsou to rovněž slitiny Cu a Sn, ale obsahují větší množství zinku a olova, které zlepšuje jejich zabíravost. Nejznámější je slitina obsahující 5 % Sn, 5 % Zn a 5 % Pb. Vysoký obsah 85 % Cu dává slitině charakteristické červené zabarvení. Červené bronzы se používají na odlitky armatur vodních a plynových agregátů a v chemickém průmyslu. Jsou nejvíce používanou slitinou mědi.

Olověné bronzы

Olověné bronzы se používají především na výrobu namáhaných kluzných ložisek. Lze je rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří cínový bronz 5 % Sn a 4 až 11 % Pb. Do druhé skupiny patří slitina s 20 až 65 % Pb.

Hliníkové bronzy

Jsou velmi často používaným materiálem pro svou nižší cenu, protože obsahují pouze 0,2 % deficitního cínu. Dále však mají také výborné mechanické vlastnosti, dobré třecí vlastnosti a schopnost odolávat korozi. Obsahují 8 - 11 % Al, 0,5 - 2,5 % Mn, 1 - 5,5 % Ni a 2 - 5,5 % Fe. Do skupiny bronzů také patří křemíkové bronzy, beryliové bronzy a antimonové bronzy.

Mosazi

Mezi mosazi řadíme všechny slitiny mědi se zinkem, ve kterých je více než 15 % Zn. Mohou se používat jako slitiny binární nebo i s dalšími přísadami jako Si, Pb, Al, Fe, Mn, Ni.

Na odlitky se používají slitiny s 30 až 40 % Zn. Zinek zlepšuje pevnost a tvrdost slitiny, ale snižuje podobně jako Sn tažnost, ale ne tak významně. Zinek má nižší teplotu varu (900 °C), než je teplota tavení mosazi a proto se Zn při tavení vypařuje z lázně. To vede k propalu Zn a vzniklý ZnO („bílý dým“) škodlivě působí na lidský organismus. Mosazi se používají na strojní součásti, které musí odolávat korozi (ventily, armatury) a v elektrotechnickém průmyslu.

14.4.2. Slitiny zinku

Slitiny zinku se používají převážně na výrobu odlitků při tlakovém lití. Známe jejich použití na rámy kancelářských strojů, páčky a kování v automobilech, součásti domácích přístrojů a při výrobě hraček. Slitinu Zn s 1 až 4 % Al a 0,3 až 0,5 % Cu je možné poniklovat nebo pochromovat.

14.4.3. Slitiny hliníku

Čistý hliník se pro nízké mechanické vlastnosti používá málo. Důvodem je také vysoká afinita ke kyslíku a tvorba oxidických povlaků, které zhoršují slévárenské vlastnosti. V technické praxi se proto používají slitiny hliníku s Si, Mg, Cu a případně i se Zn a dalšími kovy.

14.4.4. Slitiny hliníku s křemíkem

Tato skupina je nejrozšířenější skupinou slitin hliníku. V praxi se tyto slitiny nazývají siluminy. Hliník tvoří s křemíkem eutektikum při 11, 7 % Si. Podle způsobu použití se připravují siluminy podeutektické, nadeutektické a eutektické. Kromě Si obsahují siluminy i Mg, Cu, Mn a Ni.

Ze siluminů se vyrábí velmi namáhané a složité odlitky automobilového průmyslu jako jsou motorové skříně a hlavy válců spalovacích motorů apod. Z nadeutektického siluminů, který má nízkou tepelnou roztažnost a výborné třecí vlastnosti se vyrábí písty spalovacích motorů.

Interval tuhnutí siluminů se podle chemického složení pohybuje od 695 do 575 °C.

Siluminy se metalurgicky zpracovávají při teplotách 700 až 820 °C a to buď ze slitin prvního tavení, jejichž základem je čistý primární hliník nebo přetavbou ze slitin druhého tavení, jejichž základem je hliníkový odpad a vratný materiál. V obou případech se musí provádět rafinace a modifikace tekutého kovu.

14.4.5. Slitiny hliníku s hořčíkem

Pro slévárenské účely se používají slitiny hliníku s 4,6 až 10,5 % Mg a dále obsahují 0,6 až 0,8 % Si a 0,25 až 0,6 % Mn. Slitiny Al-Mg se používají z důvodu vysoké odolnosti proti korozi a dobré pevnosti za vyšších teplot. Pro díly namáhané za vysokých teplot. To je předurčuje k použití jako hlavy válců spalovacích motorů - používá se k tomu slitina Al-Mg 5, která je známá pod názvem *hydronal*. Teplota slitiny při odlévání má být 700 až 720 °C.

14.4.6. Slitiny hliníku s mědí

Tyto slitiny se používají pro práci za zvýšených teplot. Průměrné složení slitiny je 3 až 8,5 % Cu, 0,6 až 0,8 % Si, 1,75 až 2,25 % Ni, dále obsahují menší množství Zn, Fe a Mg.

Slitiny hořčíku

Ve slévárenství se používá jednak čistý hořčík (99,9 %) nebo jeho slitiny s Al a Zr. Známou slitinou je slitina Mg - Al - Zn, vhodná pro letecký průmysl, motory, převodové skříně. Její chemické složení je 7,5 až 9 % Al, 0,2 až 0,8 % Zn, 0,15 až 0,5 % Mn, dále obsahuje Si a Cu. S ohledem na vysokou měrnou pevnost slitin Mg se jedná o moderní materiál, jehož využití v průmyslu se dále zvyšuje.

Při plnění slévárenské formy má sklon k nadměrné oxidaci a k turbulentnímu proudění. Při odlévání těchto slitin (a platí to i pro slitiny Al-Mg s vyšším obsahem Mg) se proud kovu kryje zásypem sirného květu. Hořením síry se vytváří kolem roztaveného kovu ochranná atmosféra, která brání oxidaci taveniny. Někdy se přidává S i do formovací směsi (3 až 10 %).



Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- Doprovodné prvky
- Přísadové prvky
- Nelegované slitiny železa
- Nízkolegované slitiny železa
- Vysokolegované slitiny železa
- Slitiny mědi – bronz, mosaz
- Slitiny zinku
- Slitiny hliníku



Příklady otázek k probranému učivu

1. Jak dělíme technické slitiny železa s uhlíkem podle jeho obsahu?
2. Jak se liší oceli na odlitky od běžných ocelí?
3. Jak dělíme oceli na odlitky podle obsahu doprovodných prvků?
4. Proveďte stručnou charakteristiku vysokolegovaných ocelí na odlitky podle jejich použití.
5. Vysvětlíte pojem struktura grafitických litin.
6. Jaké znáte rozdělení litin.
7. Jak se mění pevnost litiny s lupínkovým grafitem se stupněm eutektičnosti?
8. V čem spočívá účinek očkovačů?
9. Jak můžeme rozdělit neželezné kovy a slitiny, uveďte příklady.
10. Čím se odlišuje chemické složení bronzu a mosazi.
11. Jaký proces je nutný při výrobě odlitků z cínových bronzů pro zlepšení jejich slévárenských vlastností?
12. Jaké druhy slitin hliníku s doprovodnými prvky známe, uveďte příklady.
13. Jaký druh slitin na bázi Al se používá pro díly namáhané za vysokých teplot a proč?



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

ELBEL, T., Průmyslové technologie I., Učební text VŠB-TU Ostrava, 2006, 37 s.

ŠENBERGER, J., STRÁNSKÝ, K., BŮŽEK, Z., ZADĚRA, A., KAFKA, V.,
Metalurgie, VUTIUM, VUT Brno 2008, ISBN 978-80-214-3632-9, 310 s.

JELÍNEK, P., Slévárenství. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1992, 224 s.

CAMPBELL, J., Castings, University of Birmingham, 2005, ISBN 0-7506-4790-6, 337 p.