



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HISTORIE VÝROBY OCELI

HISTORY OF STEELMAKING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID HOUZAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAROSLAV ŠENBERGER,
CSC

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Houzar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Historie výroby oceli

v anglickém jazyce:

History of steelmaking

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Suroviny pro výrobu železa, základní principy železářských technologií, využívání redukčních pochodů k výrobě železa ve starověku, vývoj středověkých železářských technologií, podstata a principy moderních postupů výroby oceli.

Cíle bakalářské práce:

Na základě studia literatury popsat principy výroby oceli a jejich využívání v různých dobách lidských dějin od starověku až po moderní ocelářské technologie.

Seznam odborné literatury:

1. STRÁNSKÝ, K., aj. Železné hamry a hutě - Českomoravské a Dražanské vysočiny. II. část. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2008. 107 s. ISBN 978-80-214-3854-5.
2. SOUCHUPOVÁ, V. a STRÁNSKÝ, K. Tajemství dávného železa. 1. vyd. Brno: Technické muzeum v Brně, 2008. 159 s. ISBN 978-80-86413-54-9.
3. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
4. TURGDOGAN, ET. Fundamentals of steelmaking. 1st. ed. London: The Institute of materials, 1996. 331 p. ISBN 1861250045.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je odbornou rešerší, popisující historii výroby oceli se zaměřením na období od 50. let 20. století po současnost. Stručně byla popsána dávná historie výroby železa a oceli. Dále se práce zabývá rozdělením, složením a strukturou ocelí, principem výroby surového železa a následně byly popsány principy výroby oceli – elektrické pece, kyslíkové konvertory a základní postupy sekundární metalurgie. Je zde i zmínka o metodě přímé výroby železa z rud.

Klíčová slova

Ocel, surové železo, elektrická pec, kyslíkový konvertor, sekundární metalurgie

ABSTRACT

Bachelor's thesis is a technical summary describing the history of steelmaking. It is focused on time period from 1950s to nowadays. There has been mentioned the ancient history of steelmaking and ironmaking. The thesis also deals with kinds, composition and structures of the steel, with principle of making raw iron and also principles of steelmaking – electric furnace, oxygen converter and basic procedures of secondary metallurgy. There is mentioned a direct making of iron from the ore as well.

Key words

Steel, raw iron, electric furnace, oxygen converter, secondary metallurgy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOUZAR, D. *Historie výroby oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Historie výroby oceli vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Dne 16.5.2011

.....
David Houzar

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a své rodině za vytrvalou podporu při studiu.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	8
Cíl práce	9
1 STRUČNÁ HISTORIE VÝROBY ŽELEZA	10
2 ŽELEZO A OCEL	11
2.1 Rozdělení ocelí	11
2.2 Významné legující prvky	12
2.3 Prvky nežádoucí	13
2.4 Plyny v oceli	13
2.5 Struktura oceli	13
3 VÝROBA SUROVÉHO ŽELEZA	15
3.1 Suroviny pro výrobu železa	15
3.1.1 Kovonosné suroviny	15
3.1.2 Palivo	16
3.1.3 Struskotvorné přísady	16
3.2 Vysoká pec	17
4 VÝROBA OCELI	18
4.1 Výroba oceli v elektrických obloukových pecích	19
4.1.1 Vyzdívky EOP	20
4.2 Výroba oceli v elektrických indukčních pecích	20
4.2.1 Princip a stavba EIP	20
4.2.2 Výdusky	21
4.3 Kyslíkové konvertory	21
4.3.1 Stavba kyslíkového konvertoru	22
4.3.2 Pochod OLP	23
4.3.3 Pochod Kaldo	23
4.4 Sekundární metalurgie	23
4.4.1 Rozdělení postupů sekundární metalurgie	24
4.4.2 AOD pochod	24
4.4.3 VD pochod	25
4.4.4 VOD pochod	25
4.4.5 LF pochod	26
4.4.6 RH pochod	26
4.4.7 Rafinace oceli dmýcháním prachových látek	27
4.4.8 Rafinace oceli inertním plynem AP	27
5 PŘÍMÁ VÝROBA ŽELEZA Z RUD	28
5.1 Výroba železné houby	28
5.1.1 Metoda Höganäs	29
5.1.2 Metoda Wiberg	29
5.2 Hrudkování	29
5.3 Fluidizační pochod	29
Závěr	30
Seznam použité literatury	31
Seznam příloh	32

ÚVOD

Ocel slouží člověku již od pradávna a je a zůstane ještě dlouho nejpoužívanějším kovem ve všech průmyslových odvětvích. Množství vyrobené a spotřebované oceli je jedním z měřítek úrovně technické vyspělosti jednotlivých států. První železo bylo zpracováváno již před 4000 lety, kdy se železné rudy redukovaly dřevěným uhlím a vzniklý produkt byl pracně zkujňován kovářským způsobem.

Až ve druhé polovině 19. století zažehla průmyslovou revoluci výroba plávkové oceli v konvertorech, které předcházelo využívání koksu při redukci železných rud ve vysokých pecích.

Další nové metody výroby oceli na sebe nenechaly dlouho čekat: na počátku 20. století se začala využívat elektrická energie v elektrických obloukových a indukčních pecích a konečně v polovině 20. století byl zprovozněn první kyslíkový konvertor, který postupně vytlačil vzduchem dmýchané konvertory a Siemens-Martinské pece. Spolu s kyslíkovými konvertory se postupně začala rozvíjet tzv. sekundární metalurgie, díky které lze dosáhnout vysoké kvality oceli a zvýšení produktivity.

Za zmínku stojí snaha o výrobu oceli z rud bez využívání koksu. Tento způsob je však pro svoji energetickou náročnost využíván omezeně.

CÍL PRÁCE

Cílem práce je studium historie výroby oceli moderními ocelářskými pochody od 50. let 20. století po současnost. Je zde stručně chronologicky popsána historie výroby oceli od prvních pokusů získávání kujného železa, až po moderní technologie výroby vysoce jakostních ocelí.

1 STRUČNÁ HISTORIE VÝROBY ŽELEZA [1] [2] [3]

K redukci oxidů železa postačuje teplota 700 °C. S rostoucí teplotou roste nauhličený redukovaný železo a při teplotách nad 1200 °C se získává surové železo. Nízká redukční teplota umožnila výrobu železa v primitivních pecích u prvních civilizací již před zhruba 4000 lety. Redukce probíhala dřevěným uhlím v pecích „dýmačkách“. Dýmačky byly šachtovité pece vysoké 1 až 2 m, ve kterých se dosahovalo teploty 700 až 1200 °C. Redukcí se získala železná houba, která se svařovala kovářským způsobem v deji, který již sloužil k výrobě železných předmětů. Denní produkce činila řádově 10^1 kg.

První vysoké pece se objevily v 16. století. Byly vytápěny dřevěným uhlím a v důsledku dosažení vyšších teplot bylo vyredukováno z oxidů surové železo, které se dále zkujňovalo ve výhních za přísady okují a železných rud. Spotřeba dřevěného uhlí činila cca 250 % z hmotnosti železa. Ke zvýšení produktivity přispěly pudlovací pece (1784), vytápěné uhlím. Při pudlování se roztavené surové železo promíchávalo s hematitem (Fe_2O_3), jehož vlivem docházelo k oxidaci uhlíku. Teplota v pudlovací peci nebyla dostatečně vysoká k roztavení oceli a produktem pece byla opět železná houba, která se dále zpracovávala kovářím na lisech nebo bucharech. Denní výroba činila až 10^4 kg a spotřeba paliva činila 80 až 90 % z hmotnosti železa. Teprve v 19. století se jako paliva začal používat koks. Koksové pece již byly vysoce produktivní a jejich produktem bylo surové železo, které vyžadovalo nové postupy zkujňování.

Významným vynálezem byl Bessemerův konvertor (1855), který umožnil výrobu plávkové oceli (tzn. v tekutém stavu). Oxidace uhlíku se prováděla profukováním roztaveného železa vzduchem. Tlak dmýchaného vzduchu je tak veliký, že tekutý kov nemůže proniknout do otvorů dna. Teplo uvolněné spalováním příměsí, zejména křemíku, stačí udržet kov v tekutém stavu a kryje spotřebu tepla k průběhu reakcí probíhajících při zkujňování. Vyrobená ocel je tekutá a proto se snadno odděluje od strusky rozdílem měrných hmotností. Tím byla odstraněna jedna z hlavních nevýhod odstraňování strusky kovářským způsobem. Bessemerův konvertor byl vyzděn kyselou vyzdívkou, a proto se v něm nemohlo zpracovávat surové železo bohaté na fosfor. Také zpracování železného odpadu bylo omezené.

Opravdový rozmach výroby oceli přinesl Thomasův konvertor (1879). K jeho vyzdění byla použita zásaditá vyzdívka, umožňující zpracovávat surové železo s obsahem fosforu, jehož spalováním se uvolňovalo potřebné teplo. Proto musí mít surové železo pro Thomasův konvertor obsah fosforu min. 1,7 %.

Další z nových vynálezů byla Siemens-Martinská pec (1864), která umožňovala výrobu oceli z pevné vsázky a dal se v ní využít i ocelový odpad. Teplo potřebné k tavení vznikalo spalováním plynu, který byl společně se vzduchem předeheříván v regeneračních komorách. Tento způsob vytápění umožnil dosáhnout dostatečnou teplotu k přetavování ocelového odpadu. První martinské pece měly kyselou vyzdívku a vsázku tvořilo přibližně 80 % ocelového odpadu a 20 % surové železo. Vsázka bohatá na fosfor se nedala zpracovávat. Teprve zavedení zásadité vyzdívkou (1879) umožnilo vyrábět ocel ze vsázky téměř libovolného složení.

S příchodem 20. století přišla nová éra výroby oceli s využíváním elektrické energie. Byla uvedena do provozu první elektrická oblouková pec (1902) Heroult - Francie, Stassano - Itálie a v téže roce i první elektrická indukční pec Kjellin - Švédsko.

V první polovině 20. století byla ocel vyráběna převážně v Siemens-Martinských pecích a konvertorech, postupně se ale začaly prosazovat pece elektrické.

Zatím posledním významným mezníkem ve vývoji ocelářské technologie byl vynález kyslíkového konvertoru (1952) v Linci v Rakousku. Kyslíkový konvertor díky svým ekonomickým výhodám postupně vytlačil Siemens-Martinské pece a vzduchem dmýchané konvertory. Od 70. let činil objem výroby oceli v kyslíkových konvertorech 70 %. Zbýlých 30 % výroby připadlo na elektrické obloukové pece.

2 ŽELEZO A OCEL [2]

Čisté železo (Fe) je lesklý bílý kov, jehož měrná hmotnost je $7,84 \text{ g.cm}^{-3}$, teplota tavení je $1534 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota varu okolo $2450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Čisté železo je magnetické, na suchém vzduchu za obvyčné teploty stálé. Ve vlhkém prostředí se na povrchu železa tvoří povlak kysličníku a hydroxidu železa tzv. rez. Železo se v ryzím stavu v přírodě nevyskytuje, v podobě sloučenin je však po kyslíku, křemíku a hliníku nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Čisté železo se však pro své nízké mechanické vlastnosti využívá zřídka, například v elektrotechnice. Hlavní význam železa však mají jeho slitiny s ostatními prvky, zejména s uhlíkem.



Obr. 1 Čisté železo [6]

Ocel je slitina železa s uhlíkem a dalšími prvky, o obsahu uhlíku maximálně 2,14%. Uhlík má na vlastnosti oceli nejvýznamnější vliv. Další prvky, které jsou v oceli přítomny, nazýváme legující, například mangan, křemík, nikl, chrom, wolfram a další. Jsou do oceli záměrně přidávány a jejich poměr určuje výsledné vlastnosti oceli. V oceli jsou přítomny i prvky nežádoucí a to zejména fosfor, síra, dusík, kyslík a vodík.

2.1 Rozdělení ocelí [3] [4]

Podle obsahu kyslíku po dezoxidaci tekuté oceli se rozeznává:

- **ocel neuklidněná** – u níž během tuhnutí následkem reakce mezi uhlíkem a kyslíkem dochází k pohybu taveniny,
- **ocel uklidněná** – u níž není proces tuhnutí provázen uhlíkovou reakcí,
- **ocel polouklidněná** – která je na přechodu mezi ocelí uklidněnou a neuklidněnou.

Podle způsobu výroby se rozeznává:

- **Martinská ocel** – vyrobená v Siemens-Martinské peci (v ČR se již nevyrábí),
- **Kyslíková konvertorová ocel** – vyrobená v kyslíkovém konvertoru,
- **Kyslíková tandemová ocel** – vyrobená v tandemové peci,
- **Elektroocel** – vyrobená v elektrické peci,
- **Elektrostruskově přetavená ocel** – vakuově přetavená.

Podle chemického složení oceli dělíme na:

- **nelegované** (uhlíkové) – vlastnosti oceli jsou dány především obsahem uhlíku, ostatní (legující) prvky se úmyslně nepřidávají. Podle obsahu uhlíku se tyto oceli dále dělí na:

- nízkouhlíkové (do 0,25 % C)
- středně uhlíkové (0,26 – 0,60 % C)
- vysokouhlíkové (nad 0,60 % C)
- **nízkolegované** – kde obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku nepřekročí 5%.
- **středně legované** - kde obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku je 5 až 10%.
- **vysoce legované** - kde obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku je vyšší než 10%.

2.2 Významné legující prvky [4]

Jednotlivé prvky jsou v oceli přítomny buď vlivem výrobního postupu a chemického složení různých surovin, nebo jsou úmyslně přidávány ke zlepšení některých vlastností oceli.

Mangan (Mn) – zvyšuje pevnost, tvrdost, houževnatost, tažnost, kalitelnost, zlepšuje odolnost proti opotřebení.

Křemík (Si) – zvyšuje pevnost a tvrdost. Dodává oceli příznivé elektrické vlastnosti a značně zvyšuje pružnost. Hlavní legující prvek pro dynamové, transformátorové a pružinové oceli. Při vyšší koncentraci zhoršuje tažnost, tvařitelnost a svařitelnost.

Nikl (Ni) – významně zlepšuje mechanické vlastnosti oceli, tvařitelnost, kalitelnost, korozivzdornost a žárovečnost.

Chrom (Cr) – zlepšuje mechanické vlastnosti oceli, zejména pevnost, tvrdost a to i při vysokých teplotách, dále kalitelnost, žárovzdornost, korozivzdornost a otěruvzdornost. Zhoršuje svařitelnost.

Wolfram (W) – zvyšuje hlavně tvrdost a zachovává hodnoty mechanických vlastností i při vysokých teplotách. Hlavní legující prvek nástrojových ocelí, zejména rychlořezných.

Molybden (Mo) – zvyšuje pevnost a houževnatost, a to i při zvýšených teplotách, zlepšuje kalitelnost, otěruvzdornost, korozivzdornost a žárovečnost.

Vanad (V) – udržuje příznivé mechanické vlastnosti oceli i při vysokých teplotách. Důležitý legující prvek žárovečných, pružinových a nástrojových ocelí.

Titan (Ti) – zvyšuje tažnost, houževnatost, korozivzdornost, žárovečnost a svařitelnost. Nepatrně snižuje tvrdost.

Kobalt (Co) – zvyšuje žárovečnost a zlepšuje fyzikální vlastnosti oceli. Hlavní legující prvek pro oceli na trvalé magnety, žárovečných a rychlořezných.

Hliník (Al) – v malých množstvích zlepšuje mechanické vlastnosti. Používá se u žárovečných ocelí. U uklidněných ocelí je hliník hlavní dezoxidační přísadou.

Měď (Cu) – v malých dávkách zvyšuje pevnost a odolnost proti atmosférické korozi, při zvýšeném obsahu však zhoršuje houževnatost a tvařitelnost.

Olovo (Pb) – v malém množství zlepšuje obrobitelnost. Používá se u automatových ocelí. S ohledem na životní prostředí se hledá náhrada za Pb.

Bor (B) – zvyšuje pevnost a houževnatost, udržuje mechanické vlastnosti i při vysokých teplotách, zlepšuje kalitelnost.

Niob (Nb) – zlepšuje mechanické vlastnosti konstrukčních svařitelných ocelí, zvyšuje žárovečnost a má příznivý vliv na vlastnosti korozivzdorných ocelí s chromem a niklem.

Tantal (Ta) – působí podobně jako niob.

2.3 Prvky nežádoucí [2] [4]

Mezi hlavní nežádoucí prvky patří fosfor a síra.

Fosfor (P) – všeobecně zhoršuje mechanické vlastnosti a způsobuje lámavost za studena. Ve spojení s mědí však zlepšuje odolnost proti atmosférické korozi.

Síra (S) – zhoršuje mechanické vlastnosti, lámavost oceli za studena i svařitelnost. Vlivu síry na lámavost oceli za studena se však s výhodou využívá u automatových ocelí, u nichž při třískovém obrábění zlepšuje odlamování třísek a tím obrobiteľnost. Síra se do oceli dostává vsázkou a spaliny. Síra je v oceli obsažena převážně jako FeS a MnS, které jsou v tekuté oceli dokonale rozpustné. K odsíření se používá vápník, jenž síru naváže a přechází do strusky.

2.4 Plyny v oceli [2]

Mezi prvky nežádoucí patří také plyny, a to zejména kyslík, dusík a vodík. V oceli mohou tvořit roztoky nebo chemické sloučeniny, více nebo méně rozpustné. Do roztavené oceli se mohou dostávat vsázkovými surovinami a také z okolní atmosféry. Při tuhnutí oceli se pohlcené plyny z oceli vylučují, ale část jich v oceli zůstává a má značný vliv na její vlastnosti, zejména mechanické a technologické. Obsah plynů v oceli lze snížit tříděním a kontrolou vsázkových surovin. Nejúčinnější prostředek k odplynění tavby je energetický var lázně s přísadou suchého, čerstvě vypáleného vápna a suché rudy. Také se využívá slučivosti plynů s určitými legovacími prvky (napr. denitrace titanem), dále inertních plynů, které se prohánějí tekutou ocelí před odpichem, nebo vakuové techniky.

Kyslík (O) – zhoršuje mechanické vlastnosti, především houževnatost, ale také tvařitelnost a svařitelnost. Odstraňuje se dezoxidací.

Dusík (N) – zhoršuje tažnost, zúžení a vrubovou houževnatost a u neuklidněných ocelí je příčinou tzv. stárnutí oceli. Odstraňuje se zejména intenzivním varem. Ovšem u některých ocelí se v kombinaci s dalšími prvky uplatňuje jako legující prvek zvyšující pevnost a mechanické vlastnosti při vyšších teplotách.

Vodík (H) – snižuje houževnatost, vyvolává vznik zvláštních trhlin v oceli (vloček), způsobuje lámavost oceli za červeného žáru, pórovitost a břídlíkatý lom.

2.5 Struktura oceli [4]

Ocel tuhne z tekutého stavu krystalicky, zmenšuje svůj objem a uvolňuje část rozpuštěných plynů. Ochlazování neprobíhá v celém tuhnoucím objemu oceli stejnou rychlostí, takže velikost vznikajících krystalů není po průřezu stejná. V podmínkách rychlého ochlazení vzniká v časové jednotce větší počet krystalů, které si navzájem brání v růstu, naopak v tepelné ose probíhá ochlazování pomalu, vznikající krystaly mají relativně dostatek času k růstu a výsledkem je jejich menší počet a větší rozměry. Krystaly po ztuhnutí nemají přirozené krystalografické roviny, nazývají se proto krystality. Na lomu nebo naleptaném výbrusu se tyto krystality jeví jako zrna, která svým vzhledem a rozměry napovídají o křehkosti nebo houževnatosti oceli. Velikost zrna se po ztuhnutí mění mechanickým zpracováním (tvářením za tepla i za studena) nebo tepelným zpracováním (různými způsoby ohřívání a ochlazování oceli).

Všestrannost a rozsáhlost použití oceli v praxi je dána tím, že se její vlastnosti velmi výrazně mění s teplotou. Jednotlivé prvky se na železo vážou rozdílně podle

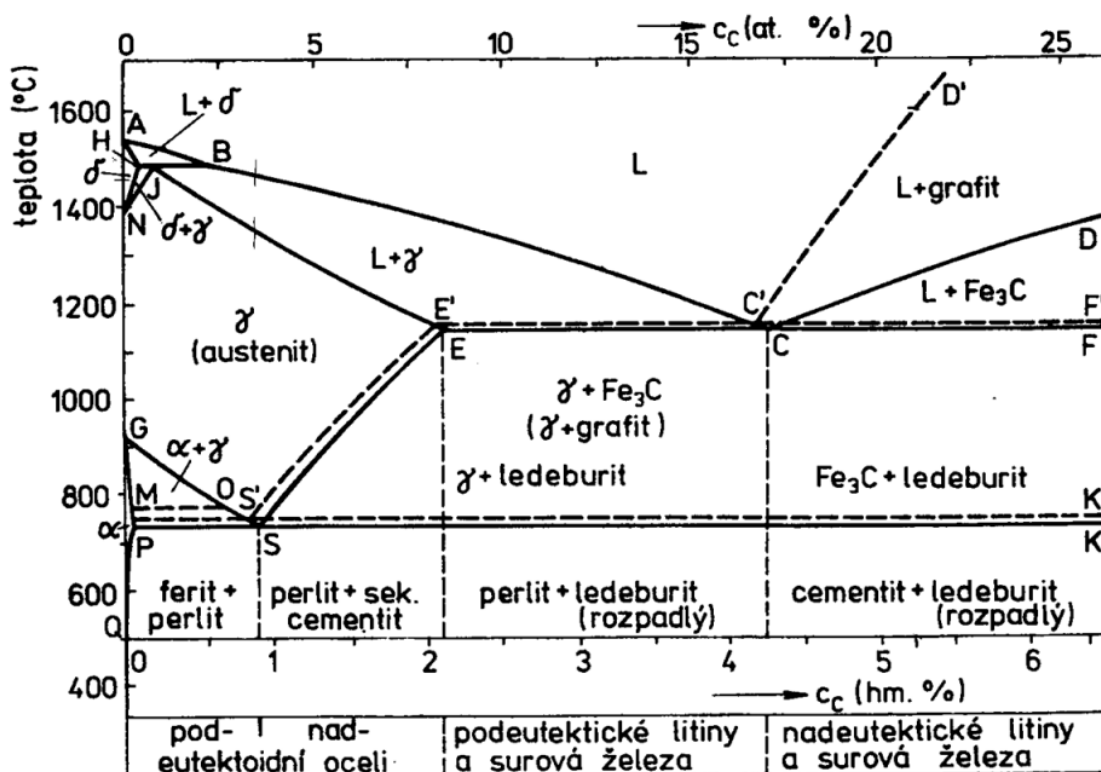
teploty a rychlosti ochlazování. Nejvýznamnějším prvkem v železe je uhlík, jenž významně mění vlastnosti oceli, a to již od velmi nízkých koncentrací. Uhlík je v železe obsažen ve formě grafitu nebo karbidu železa (Fe_3C). Vliv uhlíku na vlastnostech železa vychází ze stavového diagramu Fe - Fe_3C .

Z diagramu je patrné, že s rostoucím obsahem uhlíku klesá teplota tavení železa z 1534 °C u technicky čistého železa, na 1147 °C s hraničním obsahem uhlíku 2,14% C. Diagram znázorňuje hranice rozpustnosti uhlíku v železe při různých teplotách.

V diagramu jsou uvedeny následující struktury a strukturní složky:

Ferit	- intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α , měkký a tvrný
Cementit	- intersticiální sloučenina železa a uhlíku Fe_3C , tvrdý a křehký.
Austenit	- intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ , měkký a tvrný.
Delta ferit	- intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe δ .
Perlit	- směs feritu a cementitu.
Ledeburit	- směs krystalů austenitu a cementitu.

Nad křivkami A-B-C-D se nachází pouze tavenina. Pod těmito křivkami tavenina tuhne v austenit, případně v δFe (pod A-J) a pod křivkami N-J-E se nachází pouze tuhý roztok uhlíku γFe (austenit). Pod křivkami N-J-E se nachází pouze austenit, u něhož pod křivkami G-S-E dochází k překrystalizaci. Při obsahu uhlíku 0,76 % a eutektoidní teplotě 723 °C austenit přechází přímo v perlit. U oceli s nižším obsahem uhlíku se pod křivkou G-S vylučuje z austenitu ferit a při eutektické teplotě se zbytek austenitu mění na perlit a vzniká feriticko perlitická struktura.



Obr. 2 Strukturní diagram Fe - Fe_3C [13]

3 VÝROBA SUROVÉHO ŽELEZA [3]

Surové železo se vyrábí ve vysoké peci redukcí oxidických železných rud uhlíkem. Vysokopecní vsázka se skládá z paliva, železnorudných surovin a struskotvorných přísad v takovém vzájemném poměru, který zaručuje získání určitého množství surového železa o žádaných chemických a fyzikálních vlastnostech. Vsázkové suroviny se postupně zavázejí v přesně vymezených dávkách do prostoru sazební, odkud klesají v protiproudu žhavého redukčního plynu do spodní části pece a procházejí nejdříve změnami v tuhých fázích jako například odstraňování vlhkosti, disociace hydrátů a uhličitánů, redukce vyšších oxidů železa a manganu na jejich nižší oxidy a další. Jakmile se dostanou do oblasti vyšších teplot plynů (nad 1000 °C), začínají měknout a tavit se. Začíná vznikat primární struska bohatá na FeO a MgO. Postupným zvyšováním teploty a působením uhlíku koksu klesá ve strusce obsah FeO a současně v ní vzrůstají obsahy CaO a MgO. Postupně se ze strusky vyredukuje téměř všechno železo (obvykle 99,5 %) a fosfor, kolem 55 % manganu a malá část křemíku. Uhlík přechází do železa od okamžiku, kdy se začalo redukovat a meze rozpustnosti dosahuje až v nížeji, kde také probíhají důležité reakce odsiřování surového železa struskou, která již dosáhla svého konečného chemického složení a nízké viskozity.

3.1 Suroviny pro výrobu surového železa [3]

Vsázka vysoké pece je tvořena kovonosnými materiály, struskotvornými materiály a palivem. Vsázkové materiály se musí vyznačovat optimální kusovitostí, úzkým rozptylem zrnitosti, nízkým podílem jemnozrnných částic a dostatečnou mechanickou pevností. Kovonosné materiály musí mít co největší obsah železa, dobrou redukovatelnost a nízký obsah hlušiny a nežádoucích látek.

3.1.1 Kovonosné suroviny [3]

Kovonosnou část vsázky tvoří železné a manganové rudy, jenž mohou být v podobě přírodních nebo tříděných rud, častěji však jako produkty vysokoteplotní úpravy rud tzv. aglomerát a jako oxidické, samohutné nebo předreduované pelety. Současně se zpracovává také železný vratný materiál jako například žlabiny, zbytky z pánví, rozstřik od licího stroje apod.

Železné rudy rozdělujeme z chemického hlediska na:

Bezvodé oxidy:

- Hematit (krevel) Fe_2O_3 , je tmavě červené barvy, obsahuje okolo 60 % Fe.
- Magnetit (magnetovec) Fe_3O_4 , je magnetický, obsahuje okolo 68 % Fe.



Obr. 3 Hematit [6]



Obr. 4 Magnetit [6]

Hydratované oxidy:

- Limonity (hnědele) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.



Obr. 5 Limonit [6]

Uhličitany:

- Siderit (ocelek) FeCO_3 , obsahuje pouze 25 až 40 % Fe.



Obr. 6 Siderit [6]

3.1.2 Palivo [3]

Účelem paliva je dodávat do vysoké pece potřebné množství tepla a redukční látky, nauhličovat železo až do jeho nasycení a vytvářet zejména ve spodní části pece pevnou kostru, která usnadňuje proudění plynu vsázkou i při teplotách, při nichž rudné suroviny s přísadami měknou a taví se. Ve vysoké peci se používá metalurgický koks. Vyrábí se z černého uhlí, obsahuje 83 až 91 % uhlíku a 6 až 12 % popela. Zrnitost vysokopecního koksu se pohybuje v rozmezí 25 až 80 mm.



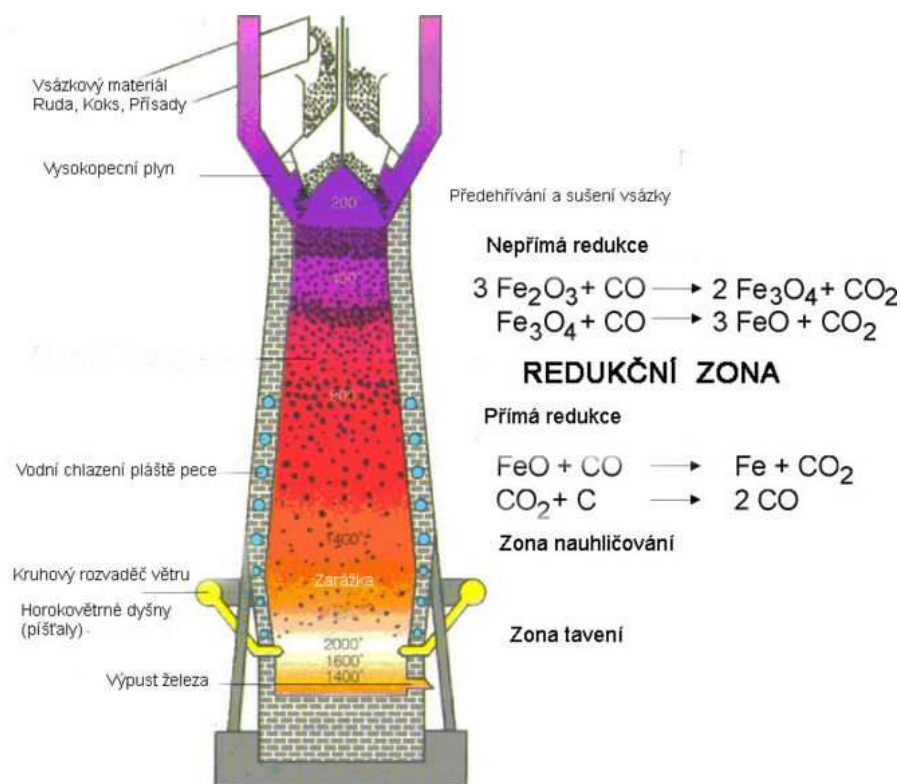
Obr. 7 Vysokopecní koks [12]

3.1.3 Struskotvorné přísady [3]

Účelem struskotvorných přísad je odvádět z vysoké pece nezredukované oxidy a síru v podobě strusky. Protože většina rud má kyselý charakter, jsou struskotvorné přísady zásadité. Nejčastější přísadou je vápenec (CaCO_3), dolomitický vápenec ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), nebo dolomit.

3.2 Vysoká pec [3] [5]

Vysoká pec je šachtovitého tvaru komolého kužele, rozšiřující se směrem k základně a jejíž výška dosahuje až 40 m. Šachta je tvořena ocelovými pláty, vyzdřenými ohnivzdornou vyzdívkou a je chlazena vodou. Na vrcholu šachty je umístěna sazebná, do níž se pomocí zavážecích košů nebo šikmým výtahem zaváží vsázka. Plnicí otvor je uzavřen dvojitým sazebním uzávěrem, který slouží k zavážení pece vsázkovým materiálem a zároveň jej utěsňuje, aby bylo možno odvádět vysokopecní plyn do plynojemu na ohřev dmýchaného větru. Vitr je vzduch ohřátý v ohřívacích Cowper, které jsou vytápěny vysokopecním plynem s přídavkem zemního plynu, na 1000 až 1300 °C a o tlaku 0,2 až 0,5 MPa je kruhovým rozvodem a následně dmyšny zaveden do tavícího prostoru pece. Dmyšny jsou do pece zaústěny v její spodní části zhruba v místě zarážky, která drží pevnou část vsázky. Na dně pece (nístěji) je umístěn odpichový otvor pro výtok roztaveného železa. Nad odpichovým otvorem je umístěn výtokový otvor strusky.



Obr. 8 Schéma vysoké pece [8]

Produkty vysokých pecí jsou surové železo, vysokopecní plyn a struska. Surové železo je hlavní produkt, ostatní produkty jsou vedlejší. Surové železo se odpichuje do pánví nebo do pojízdných mísičů a poté je ještě v tekutém stavu dopravováno do oceláren.

Vysokopecní plyn obsahuje průměrně 16 % CO_2 , 24 % CO , 2 % H_2 , 0,5 % CH_4 a 57 % N_2 . Z hlediska výhřevnosti je málo hodnotným palivem, ale díky jeho množství má v energetické bilanci hutí velký význam (při výrobě 1 t surového železa ho vzniká

1500 až 2400 m³). Po dokonalém odstranění prachu je doplněn koksárenským plynem a používá se jako topný plyn v ohřivačích větru.

Vysokopecní struska je vedlejší produkt. Na 1 t surového železa připadá 200 až 1000 kg strusky v závislosti na bohatosti zpracovávané vsázky. Využití strusky nachází uplatnění především ve stavebním průmyslu při výrobě cementu, či stavebních tvárnic, nebo také šterku. Dále lze strusku využít při výrobě skla, žárovzdorných vláken a po jemném rozemletí také v zemědělství jako umělé hnojivo.

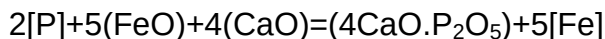
4 VÝROBA OCELI [2]

Ocel je možné vyrábět různými způsoby, které se od sebe dost odlišují, ale mají společné zásady. Základní surovinou pro výrobu oceli je surové železo a ocelový odpad. Dále se používají přísady struskotvorné, oxidační, dezoxidační a legující. Všechny ocelářské pochody probíhají za vysokých teplot, které se získávají buď přeměnou elektrické energie v tepelnou (elektrické obloukové, indukční pece), nebo spalováním doprovodných prvků surového železa (konvertory).

Oxidace - surové železo obsahuje 3,5 až 4,5 % C, který se pro získání kujného materiálu musí snížit pomocí kyslíku. Kyslík se do taveniny dostává z pecní atmosféry dmýcháním vzduchu, nebo kyslíku a přidáváním oksylichujících přísad (železné rudy, okuje). Vznikají oxidy, které vytvářejí spolu se struskotvornými přísadami (vápno, vápenec) strusku, jenž je lehčí než kov a vyplouvá napovrch. Oxid železnatý (FeO) vznikající při oxidaci železa se rozpouští v kovové tavenině a jeho kyslíkem se spalují doprovodné prvky. Při vyhořívání uhlíku vzniká oxid uhelnatý (CO), který probublává kovovou taveninou, strhává s sebou do strusky nečistoty a tavenina se odplyňuje - uhlíkový var.

Odfosfoření – fosfor je v oceli nežádoucí prvek, způsobující její lámavost za studena a snižuje vrubovou houževnatost. Odfosfoření probíhá na mezifázovém rozhraní struska – kov. Odfosfořuje se pod zásaditou struskou, obsahující vysoký obsah vápna a FeO.

Rovnice reakce odfosfoření:



Dezoxidace - protože FeO zůstává v oceli i na konci zkujňování a značně by zhoršoval její mechanické vlastnosti, musí se z oceli odstranit. K dezoxidaci se využívá prvků s větší afinitou ke kyslíku než má železo (křemík, hliník), redukčních syntetických strusek (směs prachového vápna s kazivcem, nebo Al₂O₃), nebo se využívá vakua.

Reakce při dezoxidaci křemíkem:

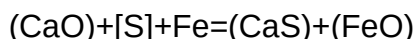


Reakce při dezoxidaci hliníkem:



Odsíření - síra je též nežádoucí a je třeba její obsah v oceli co nejvíce snížit. Odsíření také probíhá na mezifázovém rozhraní struska – kov. Odsíření probíhá pouze pod zásaditými, dobře dezoxidovanými struskami s vysokým obsahem CaO a nízkým obsahem FeO.

Rovnice reakce odsíření:



Legování – prvky mající nízkou afinitu ke kyslíku se mohou do oceli přidávat v kterémkoli údobí, prvky s vysokou afinitou ke kyslíku se přidávají až těsně před odpichem. Legující prvky se do oceli nepřidávají v čisté podobě, ale většinou se leguje feroslitinami, které obsahují jen určité procento legujícího prvku.

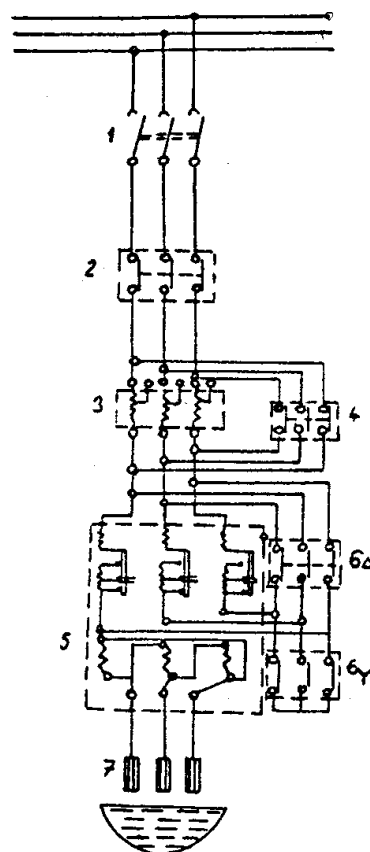
4.1 Výroba oceli v elektrických obloukových pecích [1]

Elektrické obloukové pece jsou v hutích a ve slévárnách oceli nejpoužívanějším tavicím agregátem. Vsázka se taví elektrickým obloukem, který hoří mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Teplota oblouků je 3000 až 4000 °C. Pec je napájena ze sítě vysokého napětí obvykle 22 kV a pecní transformátor transformuje toto napětí na 100 až 220 V u menších a středních pecí, nebo na 600 V u velkých pecí. Proud se vede přes odpojovač 1, hlavní vypínač 2, tlumivku 3, vypínač tlumivky 4 a pecní transformátor 5 na grafitové elektrody 7. Viz. obr. 9.

Tlumivka je do obvodu zapojena jen v období natavování, aby svým indukčním odporem snižovala kolísání na obloucích i v síti. Pecní transformátor je robustní elektrické zařízení, od něhož se odvíjí výkon pece. Pecní transformátor krátkodobě snese přetížení až 100%, výrobce může dovolit přetížení např. po dobu 30 min. o 50%. Transformátory jsou obvykle chlazeny olejem, pro menší výkony vzduchem.

Rychlost roztavení vsázky závisí především na instalovaném příkonu pecního transformátoru a na schopnosti regulace pece instalovaný výkon využít. Instalovaný výkon činí až 1000 kVA.t⁻¹.

Pecní nádoba je svařena z ocelového plechu a je umístěna na kolíbce, která umožňuje naklápění pece pro odlévání kovu. V pecní nádobě je umístěn sázecí a odpichový otvor. Sázecí otvor zakrývají dvířka. Odpichový otvor je umístěn na opačné straně a za



Obr. 9 Schéma napájení obloukové pece [10]

ním je navařen odpichový žlab. Pecní nádoba je zakryta víkem, ve kterém jsou 3 otvory pro grafitové elektrody. Elektrody jsou vyrobeny z vysoce jakostního kalcinovaného petrokoku. Průměr elektrod je dimenzován podle maximálních hodnot proudu a podle jakosti grafitu. U menších pecí do 15 tun se průměr elektrod pohybuje od 250 do 300 mm.

U velkých pecí v hutních provozech jsou instalovány intenzifikované pece s půdním odpichem, kyslíkovou tryskou, kyslíko-palivovými hořáky a provoz pece řídí výpočetní technika.

4.1.1 Vyzdívky EOP [1]

Vyzdívky EOP jsou zásadité nebo kyselé. Zásadité vyzdívky jsou na bázi magnezitu a chrommagnezitu. Pec je vyzděna magnezitovými tvárniciemi o tloušťce cca 300 mm. Nístej pece je vydusána zrnitým magnezitem. Tloušťka dusané vrstvy bývá 150 až 250 mm. Víko pece je obvykle vyzděno dinasovými tvárniciemi. Dinas je kyselý žáruvzdorný materiál na bázi SiO_2 , stabilizovaný CaO . Výhodou zásaditých pecí je možnost zpracovávat šrot s nezaručeným obsahem fosforu a síry. Je možné vyrábět oceli s velmi nízkým obsahem fosforu (max. 0,01 %) a odsířit ocel v peci.

Kyselé pece jsou vyzděny žáruvzdornými materiály na bázi oxidu křemičitého (SiO_2). Výhodou kyselých pecí jsou nižší zpracovací náklady. Nevýhodou je nutnost znát chemické složení vsázky a nemožnost provádět v nich odsíření a odfosfoření oceli.

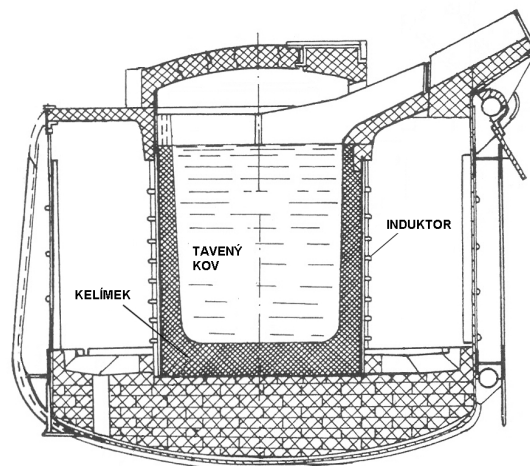
U velkých pecí v hutních provozech jsou stěny a víko sestaveny z vodou chlazených panelů. Půda pece je z vysokojakostních keramických materiálů.

4.2 Výroba oceli v elektrických indukčních pecích [1]

Elektrické indukční pece se používají ve slévárnách oceli. K ohřevu kovu využívají elektromagnetické pole, které vzniká průchodem střídavého elektrického proudu indukční cívkou. Pokud se v magnetickém poli nachází elektricky vodivý materiál (vsázka), indukuje se v něm elektrické napětí, které vyvolává silné vířivé proudy a ty způsobí ohřev vsázky.

4.2.1 Princip a stavba EIP [1]

Napájení indukční pece je zajištěno se sítě vysokého napětí přes pecní transformátor, který napájí měnič frekvence proudem obvykle o napětí 6 kV. Proud je v měniči nejprve usměrněn na polovodičových diodách a poté vyhlazen tlumivkou. Dále se proud vede přes tyristory, kde se vytváří potřebná frekvence a je zpět převeden na střídavý. Na tyristorech lze frekvenci dle potřeby plynule měnit. Za měnič je do obvodu zapojena kondenzátorová baterie, jenž tvoří



Obr. 10 Schéma EIP [10]

oscilační obvod pro kompenzaci indukční zatížení sítě. Tímto proudem je napájen induktor, na němž se indukuje elektromagnetické pole.

Pec sestává z tavícího kelímku, transformátorových plechů, hydraulického sklápěcího zařízení a odsávání. Transformátorové plechy slouží pro odstínění kelímku od induktoru, vedou magnetické pole a tím se snižují ztráty. Aby byla zachována kontinuita výroby, tak se indukční elektrické pece vyrábí se dvěma kelímkami. Jeden kelímek je v provozu, druhý se chladí, bourá, vyzdívá a zůstává v rezervě. U moderních pecí je možné výkon měniče rozdělit tak, že v jednom kelímku probíhá tavba a v druhém se udržuje na teplotě tekutý kov, tzv. systém TWIN-POWER.

4.2.2 Výdusky EIP [1]

Pro výplň kelímku středofrekvenční indukční pece se používají výhradně výdusky a to kyselé, zásadité nebo neutrální.

Kyselé výdusky – jsou na bázi drcených křemenců. Křemence obsahují větší podíl tridymitu a cristobalitu, které mají menší dilatace než vysoce křemenné písky. Žárovzdornost křemenců závisí na jejich čistotě, nejvíce bývá mezi nečistotami zastoupen Al_2O_3 . Také během tavby je výduska ovlivněna struskou bohatou na FeO , kdy snížení jeho obsahu vede ke zvýšení životnosti kyselé výdusky. Životnost kelímku s kyselou výduskou bývá 20 až 30 taveb. Tavení ocelí s vyšším podílem uhlíku (cca 0,5 % C) prodlužuje životnost kelímku z důvodu nižší tavící teploty. Kelímky s kyselou výduskou jsou vhodné pro tavení všech typů korozivzdorných ocelí a pro většinu typů vyráběných odlitků.

Zásadité výdusky - nebo zásadité dusací hmoty jsou vyráběny nejčastěji na bázi MgO , které však za provozu vlivem tepelných dilatací praskají. Proto se přidává Al_2O_3 v poměru $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (20% Al_2O_3), případně $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (20% MgO).

4.3 Kyslíkové konvertory [2]

Myšlenka vyrábět ocel dmýcháním čistého kyslíku na povrch tekutého surového železa pochází již od Bessemera, který si dal tento způsob výroby oceli patentovat v roce 1856. Prakticky tento návrh nemohl vyzkoušet, protože v tehdejší době nebylo možné vyrobit tolik kyslíku. Poprvé byl kyslíkový konvertor uveden do provozu v Rakousku v Linci (1952) a o rok později v Donavicích. Z Rakouska se vynález brzy rozšířil do celého světa a podle názvu měst se výrobní proces nazývá LD pochod.

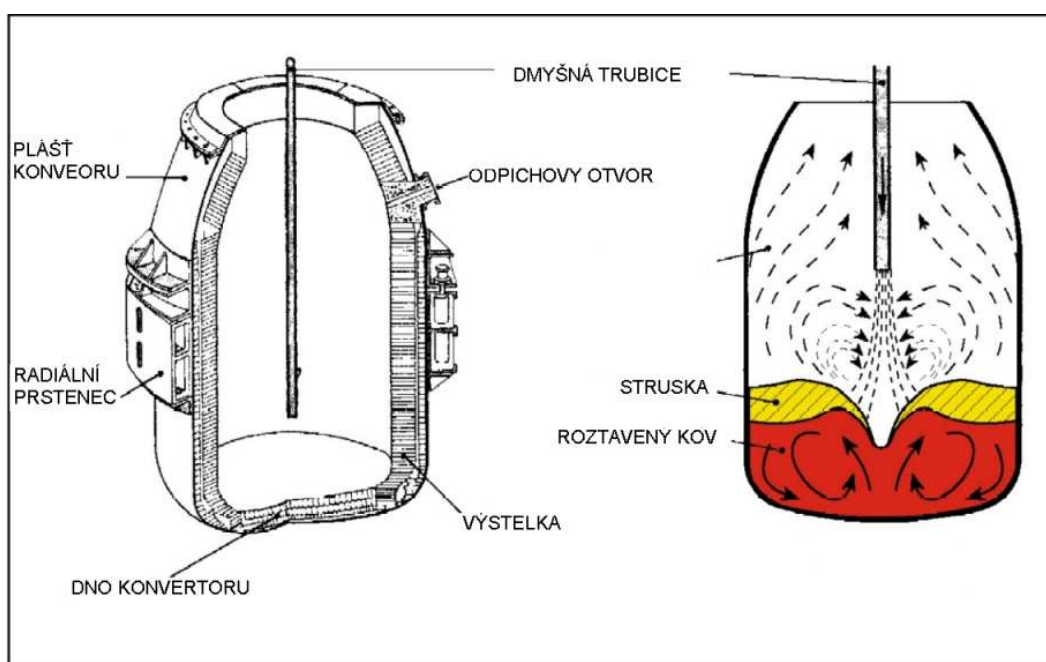
Podstata výroby v kyslíkovém konvertoru spočívá v dmýchání čistého kyslíku o minimální čistotě 99 % a přetlaku 0,6 až 1,5 MPa na povrch lázně pomocí dmyšné trubice. Proud dmýchaného kyslíku proráží vrstvu strusky, zasahuje povrch lázně, proniká jí do určité hloubky a vytváří pásmo, ve kterém probíhají bouřlivé reakce zkujňování. Kyslík okysličuje železo ve vsázce na FeO , který reaguje s příměsemi surového železa. Lázeň se intenzívně pohybuje a promíchává silným vertikálním prouděním proudu kyslíku, rozdílnou měrnou hmotností a teplotou jednotlivých částí lázně a unikáním značného množství CO z lázně. Pohybem lázně se okysličování příměsí rychle rozšiřuje v celém objemu konvertoru. Teplem, uvolněným intenzívním oxidací příměsí surového železa, se teplota lázně v reakčním pásmu zvyšuje na 2500 až 3000 °C. Část oxidu železnatého vytváří v reakčním pásmu s vápnem a

ostatními struskotvornými přísadami velmi reaktivní strusku, která umožňuje vysoký stupeň odfosfoření bez ohledu na obsah uhlíku v lázni. Protože se zkujňuje čistým kyslíkem, nezvětšuje se v oceli obsah dusíku, který u klasických konvertorových pochodů odnáší spolu s ostatními plyny mnoho tepla. Ušetřené teplo lze využít k tavení většího množství ocelového odpadu nebo k redukci železa z rud.

4.3.1 Stavba kyslíkového konvertoru [2]

Těleso konvertoru má horní a dolní část ve tvaru komolého kužele, střední část je válcovitá. Těleso konvertoru může mít odnímatelné dno, popřípadě i horní část. Plášť konvertoru je svařen z ocelového plechu, střední část je zesílena radiálním prstencem a opatřena čepy, na nichž je konvertor zavěšen na sklápěcím zařízení. Sklápěcí zařízení je elektromechanické. V plášti konvertoru jsou rozmístěny termočlánky, kterými se kontroluje teplota v různých místech. Ve vrchní části konvertoru je odpichový otvor, jenž slouží k oddělenému odlévání kovu od strusky.

Vyzdívkou konvertoru je obvykle dvouvrstvá. Vnitřní pracovní vrstva se vyměňuje po každé kampani, vnější vrstva vydrží několik kampaní. Vnější vrstva je z magnezitových cihel, vnitřní vrstva je z cihel dolomitodehtových nebo magnezitodehtových. Mezi oběma vrstvami obvykle bývá výduska z hmoty stejného složení. Dmyšná trubice (tryska), pomocí které je dmýchán kyslík do konvertoru, musí být umístěna přesně v ose konvertoru a nesmí měnit během dmýchání svou polohu chvěním a musí se dát spolehlivě do konvertoru spouštět a zase vytahovat. Trubice je zakončena tryskou. Konstrukce trysky má podstatný vliv na průběh a výsledky zkujňování a je různá podle požadovaného tvaru proudu kyslíku a intenzity jeho dmýchání. Dmyšná souprava je vystavena vysokým teplotám, proto je chlazena vodou.



Obr. 11 Kyslíkový konvertor [7]

4.3.2 Pochod OLP [3]

Pochod LD byl vyvinut pro zpracování surového železa s nízkým obsahem fosforu (P max 0,6 %) a to při použití urychlené tvorby strusky s dostatečným obsahem FeO a volného CaO a její výměnou během tavby. Surová železa s obsahem fosforu 0,9 až 1,6 % P nebylo možné LD pochodem zpracovávat, proto byla vyvinuta technologie OLP (Oxygen Lime Powder).

Uspořádání konvertoru při OLP pochodu je obdobné jako u LD pochodu, ale po celou dobu tavby se společně s kyslíkem dmýchá prachové vápno o zrnitosti 2 mm. Kyslík před vstupem do trysky prochází dispergátorem, z něhož se pak injekčním účinkem nasává vápno. Spotřeba vápna je 11 až 14 % hmotnosti surového železa. Kinetická energie směsi kyslíku je větší než dmýchání samotného kyslíku, proto jeho proud proniká hlouběji do roztaveného kovu a v důsledku velkého reakčního povrchu jemně rozemletého vápna je urychlována tvorba strusky a tím i proces odfosfoření.

4.3.3 Pochod Kaldo [3]

Pochod Kaldo se též používá pro zkujňování surového železa s vyšším obsahem fosforu kyslíkem. Základním zařízením je konvertor, který se otáčí kolem své svislé osy otáčkami do 30 min⁻¹. V pracovní poloze je konvertor nakloněn pod úhlem 17 až 20° od vodorovné osy. Kyslík je dmýchán tlakem 0,3 MPa a nad lázeň je přiváděn pod úhlem 25°. Vzdálenost ústí trysky je okolo 1250 mm od hladiny kovu.

Protože kyslík proniká do malé hloubky roztaveného kovu, probíhá převážná část oxidačních pochodů na povrchu lázně. Následkem intenzivního promíchání kovu se struskou se oxidace doprovodných prvků děje především kyslíkem, přecházejícím do kovu ze strusky.

4.4 Sekundární metalurgie [1] [3]

Sekundární metalurgie, označována také jako metalurgie pánvová nebo mimopecní, se rozvíjela od 50. let 20. století a v současné době je hojně využívána. Díky sekundární metalurgii bylo možné zvýšit kvalitu výrobků, produktivitu práce a snížit spotřebu energie. Princip sekundární metalurgie při výrobě oceli spočívá v přenesení redukčního údobí a fázi dohotovení mimo tavící pec. Tím se zvýší produkce tavícího agregátu a vytvoří se lepší podmínky pro dezoxidaci a odsíření.

Ve slévárnách oceli se jako tavící agregát nejčastěji používá elektrická oblouková nebo indukční pec. Vyrobená ocel se obvykle dezoxiduje v peci a do pánve se odlévá ocel s nízkým obsahem kyslíku. V hutních ocelárnách je v elektrické peci vsázka roztavena a dojde v ní k oduhličení a odfosfoření během tavení. Dále se tekutý kov přelévá do pánve, kde probíhá další fáze redukce a dohotovení. Oxidační struska je zadržována v peci, v pánvi se pak vytváří struska syntetická s nízkým obsahem oxidů železa. Do roztaveného kovu bývá dmýchán inertní plyn, jenž urychluje styk kovu se struskou. Vakuováním oceli lze významně snížit obsah dusíku a vodíku na tak nízké koncentrace, jež klasickou metodou v peci není možné dosáhnout. Při výrobě korozivzdorných ocelí je možné dosáhnout jejich hlubokého oduhličení. Při zpracování oceli pomocí sekundární metalurgie dochází ke ztrátám teploty, proto je potřeba ocel dohřívat. Dohřev probíhá chemickými

exotermickými reakcemi, nejčastěji pomocí reakčního tepla oxidace hliníku, křemíku nebo uhlíku. Při větších tepelných ztrátách je dohřev prováděn elektricky, pomocí elektrického oblouku, v méně častých případech je využívána elektromagnetická indukce. Sekundární metalurgie je používána převážně v ocelárnách, ve slévárnách oceli je její použití ekonomicky nedostupné.

4.4.1 Rozdělení postupů sekundární metalurgie [1]

Pochody sekundární metalurgie v posledních 50 letech nejvýznamněji ovlivnily produktivitu a zejména jakost vyráběné oceli. Zavedení postupů sekundární metalurgie znamená novu historickou etapu v hutnictví oceli.

Pochodů sekundární metalurgie je mnoho (okolo 50 metod). Hlavní rozdělení se provádí podle typu zařízení, ve kterém pochod probíhá (konvertor, pánev), podle tlakových podmínek uvnitř zařízení (atmosférický tlak, vakuum) a zda se provádí s ohřevem kovu nebo bez ohřevu.

Postupy v konvertoru:

- za atmosférického tlaku
 - AOD (Argon-Oxygen-Dekarburization)
 - ASM (Argon-Secondary-Metallurgy)
- ve vakuu
 - VODC (Vakuum-Oxygen- Dekarburization-Converter)

Postupy v pánvi:

- za atmosférického tlaku bez ohřevu
 - AP (Argon-Purging)
 - IP (Injection-Process)
- za atmosférického tlaku s ohřevem
 - LF (Ladle-Furnace)
- ve vakuu bez ohřevu
 - VD (Vakuum-Degassing)
 - RH (Vakuum-Circulation-Process)
- ve vakuu s ohřevem
 - VAD (Vakuum-Arc-Degassing)
 - VOD (vakuum-Oxygen-Decarburization)

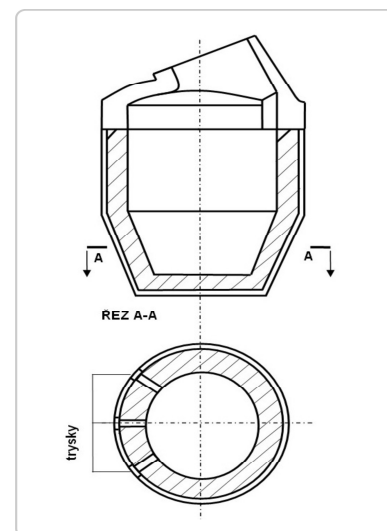
Výše uvedené rozdělení je formální a vychází z historie vzniku jednotlivých pochodů. Jednotlivé pochody se dále kombinují a rozvíjejí. Historický vývoj principů sekundární metalurgie je uveden v příloze č. 1.

4.4.2 AOD pochod [1] [3]

AOD pochod byl vyvinut pro oduhličení vysokolegovaných chromových ocelí. V konvertoru se dmýchá do roztavené lázně směs argonu a kyslíku, při němž dochází ke snížení termodynamické rovnováhy mezi uhlíkem a kyslíkem, v důsledku snížení parciálního tlaku oxidu uhelnatého. Dmýcháním kyslíku též dochází k exotermickým reakcím, a proto není nutné kov dohřívat. Průběh tavby v AOD konvertoru lze rozdělit na oxidační a redukční údobí. Na počátku oxidace, kdy je v lázni vysoký obsah uhlíku, převažuje v dmýchané směsi kyslík, někdy i samotný

kyslík. Se snižováním obsahu uhlíku v tavenině se snižuje obsah kyslíku v dmýchané směsi, až se nakonec dmýchá pouze argon a uhlík redukuje s oxidy chromu – redukční údobí. Při oxidaci je třeba taveninu ochlazovat přidáváním ocelového odpadu a feroslitin, aby teplota nepřesáhla 1650 °C.

Pochod AOD umožňuje výrobu korozivzdorných ocelí s velmi nízkým obsahem uhlíku (až 0,02 % C z původního 1,5 % C), při vysokém využití chromu ze vsázky (využití Cr až 95 %) a vysokého stupně odsíření (až 95 %).



Obr. 12 AOD pochod [9]

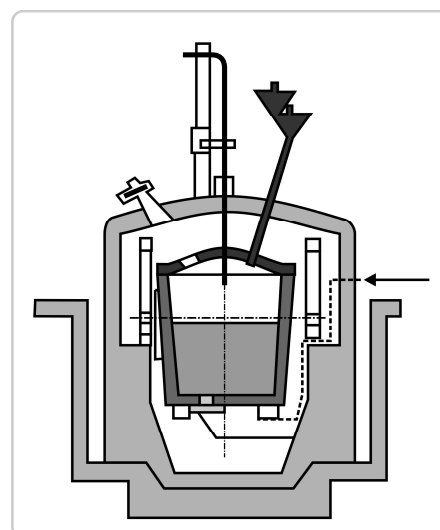
4.4.3 VD pochod [1] [6]

VD pochod se využívá k odplynění oceli a hluboké dezoxidace uhlíkem. Proces probíhá v pánvi umístěné ve vakuovém kesonu, ve němž se udržuje tlak 2,66 až 3,99 kPa (hluboké vakuum) po dobu 10 až 15 minut. Zároveň je ocel prodmýchávána omezeným množstvím argonu, který ještě zlepší podmínky pro odplynění, oduhličení a homogenitu. Při VD pochodu klesne teplota tavby o 60 až 100 °C.

Stavba zařízení se skládá z kesonu, v němž je umístěna pánev s tekutým kovem, jenž je přikryta víkem. Pánev je vyzděna z chrommagnezitových tvárnic. Vstup argonu je umístěn ve dnu pánve. Vakuum se udržuje pomocí paroproudých vývěv a odsávané plyny jsou chlazeny.

4.4.4 VOD pochod [1] [3]

Princip pochodu VOD slouží k oduhličování roztavené oceli kyslíkem a jeho původním použitím bylo hluboké oduhličení vysoko-
legovaných chromových ocelí. Proces je podobný s pochodem VD, s rozdílem dmýchání kyslíku na hladinu kovu. Proces též probíhá v pánvi umístěné ve vakuovém kesonu, ve kterém se udržuje tlak 2,66 až 3,99 kPa (hluboké vakuum). Během oxidace je kyslík dmýchán na hladinu kovu za současného profukování kovu argonem. Na konci oxidace je v tavenině poměrně vysoký obsah kyslíku a aktivita kyslíku ve strusce je také vysoká. Dalším vakuováním, až pod 100 Pa bez dalšího přívodu kyslíku, dosáhneme potřebného oduhličení a částečné dezoxidaci oceli a strusky. Dohotovení tavby probíhá prodmýcháváním taveniny argonem při tlaku v kesonu okolo 40 kPa, kdy uhlík redukuje oxidy chromu a zvyšuje čistotu oceli. Vakuování příznivě přispívá ke snížení obsahu vodíku a dusíku v oceli.



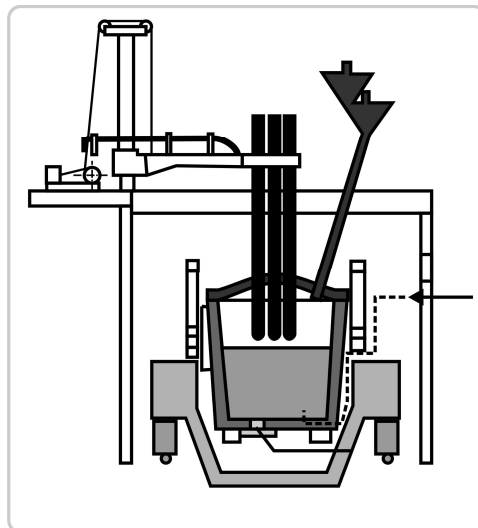
Obr. 13 VOD pochod [9]

Stavba zařízení je shodná se zařízením pro VD pochod s výjimkou přívodu kyslíku na hladinu kovu pomocí vodou chlazené trysky. Ve víku je umístěn zásobník legovacích a chladicích přísad.

Pochodem VOD lze vyrábět vysoce kvalitní korozivzdorné oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku.

4.4.5 LF pochod [1] [6]

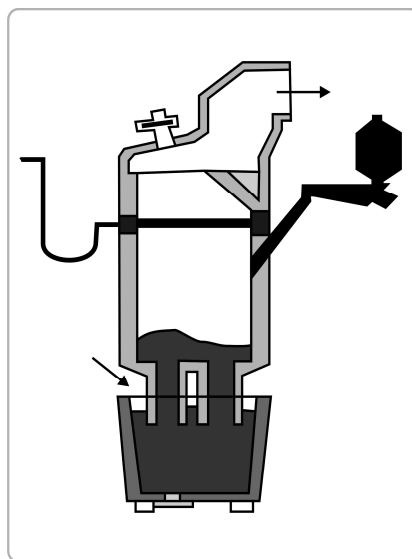
Pochod LF je určen pro ohřev kovu v pánvi. V elektrické obloukové peci se vsázka rychle roztaví a proběhne oxidace uhlíku a fosforu kyslíkem. Po dosažení odpichové teploty následuje odpich neuklidněné oceli do pánve bez oxidační strusky. Touto technologií lze dosáhnout nízkého obsahu vodíku v oceli. V pánvi je kov dohříván stejným způsobem jako v elektrické obloukové peci a probíhá v ní částečná dezoxidace kovu a tvorba silně zásadité rařinační strusky. Pro zajištění teplotní a chemické homogenity kovu je kov po dobu tavby profukován dnem pece přes porézní tvárnici inertním plynem (argon, dusík). Dmýchání argonu také zlepšuje podmínky pro odsíření a zároveň podporuje flotační účinek vměstků, což zlepšuje tekutost oceli. Během úpravy kovu se provede odsíření (až pod 0,003 % S) a je možno ocel velice přesně dolegovat. Pánev je vyzděna zásaditou vyzdívkou a v jejím dně je umístěn šoupátkový uzávěr pro odpich oceli. Během ohřevu kovu v redukčním prostředí roste obsah vodíku a dusíku v oceli. Proto po ohřevu kovu v pánvi často následuje vakuování oceli.



Obr. 14 Pánvová pec LF [9]

4.4.6 RH pochod [1]

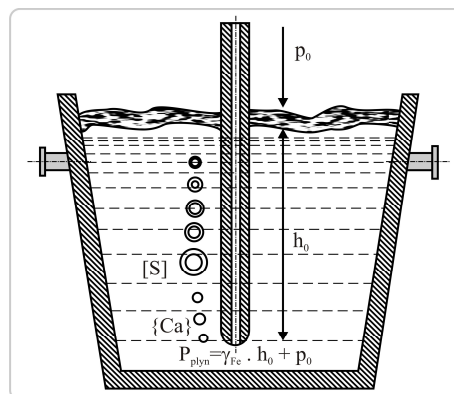
Principem je tzv. cirkulační odplynění ve vakuu. Tento proces je vhodný zejména pro tavby větší hmotnosti, protože je tavba zpracovávána postupně tak, jak kov cirkuluje přes vakuovou komoru. Tekutý kov je z pece nebo pánve postupně nasáván do vakuové komory, kde probíhá samotný proces. Ve vakuové komoře se udržuje vakuum. Vakuová komora je ve spodní části opatřena dvěma trubicemi, které jsou ponořeny do tekutého kovu. Příváděním inertního plynu v místě sací trubice je směs kovu a plynu o menší hustotě podtlakem kontinuálně nasávána do vakuové komory a druhou trubicí vystupuje zpět do pece či pánve. Takto celý objem kovu několikrát projde přes vakuovou komoru. Kov může být ve vakuové komoře přehříván pomocí odporového ohřevu.



Obr. 15 RH pochod [9]

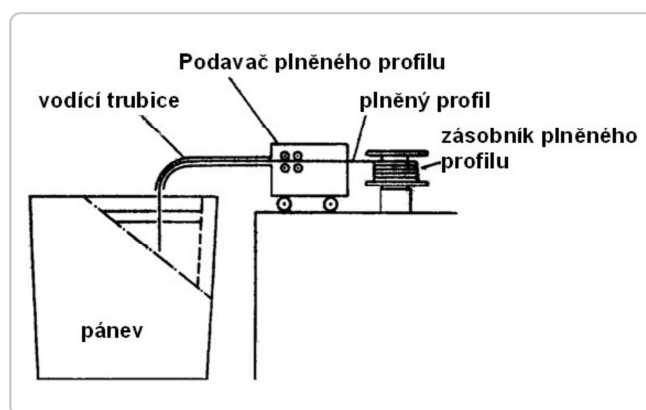
4.4.7 Rafinace oceli dmýcháním prachových látek [3]

Uskutečňuje se při mimopecním zpracování oceli dmýcháním prachových látek, především s cílem snížit obsah síry v oceli. Hlavní složkou směsi je vápno se ztekucujícími látkami obvykle Al_2O nebo CaF_2 , protože vápno má co nejdříve přejít do tekutého stavu. Proces probíhá v pánvi nejčastěji se zásaditou vyzdívkou, jež je přikryta víkem. Prachové vápno je podavačem dmýcháno ze zásobníku tryskou zaústěnou u dna pánve. Nosným plynem bývá argon nebo dusík. Množství plynu a vápna musí být správně regulováno, protože na něm závisí kvalita odsíření. Účinnosti odsíření se dosahuje 80 až 90 %.



Obr. 16 Dmýchání prachových látek [9]

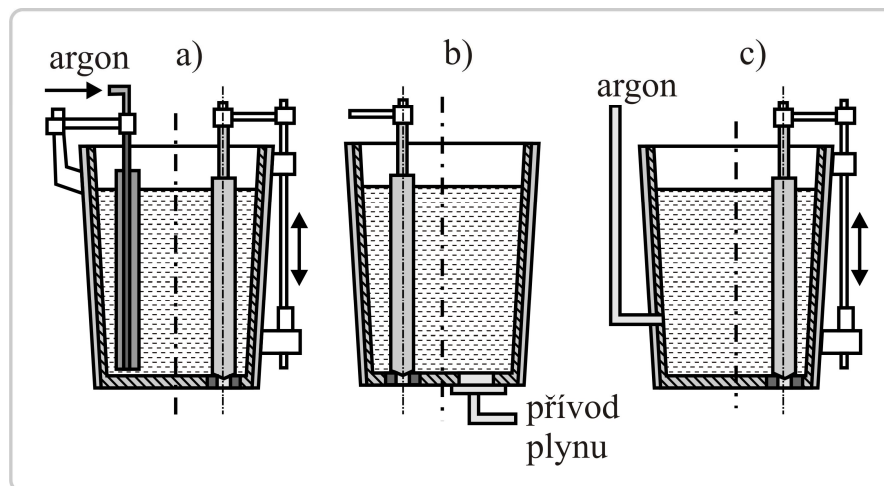
Další možností podávání prachových látek je pomocí plněného profilu. Plněný profil je tenkostěnná trubička z ocelového plechu o průměru 6 až 18 mm, naplněná prachovou náplní – feroslitinami. Průměr trubičky a síla plechu se volí podle hmotnosti tavby. Například pro hmotnost tavby 4 až 8 t se volí průměr profilu 8 mm. Plněných profilů se nejčastěji používá k modifikaci vměstků pomocí vápníku (SiCa).



Obr. 17 Plněný profil [9]

4.4.8 Rafinace oceli inertním plynem AP [2]

Rafinace oceli inertním plynem se provádí za účelem snížení obsahu nežádoucích plynů, ale i nekovových oxidických vměstků. Princip rafinace spočívá v profukování inertního plynu (argonem) lázní. Plyny rozpuštěné v oceli jsou rozdílem parciálních tlaků vázány argonem a odnášeny ven do atmosféry. Nekovové vměstky jsou usazovány na bublinách a jsou odnášeny do strusky. Účinnost odplynění především závisí na způsobu dmýchání plynu, je potřeba co nejmenších bublinek. Toho se nejlépe dosahuje dmýcháním pomocí porézních keramických tvárnic. Keramické tvárnice mají tvar komolého kužele nebo válce. Kuželové tvárnice se používají pro dmýchání plynu dnem nebo boční stěnou pánve, válcovité tvárnice se používají k dmýchání plynu zátkovou tyčí.



Obr. 18 Rafinace inertním plynem [9]

5 PŘÍMÁ VÝROBA ŽELEZA Z RUD [2] [3]

Z důvodu klesající světové zásoby koksovatelného druhu uhlí je v posledních desetiletích snaha nahradit vysoké pece jinými zařízeními, v nichž lze použít dostupnější a levnější paliva. Přímá výroba železa z rud má mnoho společného s původní jednostupňovou výrobou oceli, kdy je výsledkem procesu pouze železná houba. Avšak dnešní nároky na kvalitu oceli jsou s původní jakostí oceli nesrovnatelné. Produkt přímé výroby železa z rud slouží pouze jako meziprodukt, který se na ocel musí dále zpracovávat. Zvláštní význam přímé výroby má především pro rozvojové země, které využívají levných místních zdrojů energie, zejména zemního plynu. Získaná železná houba se vyváží a nebo se zpracovává na ocel. Pro průmyslově vyspělé země je přímá výroba ekonomicky nevýhodná z důvodu vyšší potřeby energie v porovnání s klasickou výrobou, ale používá se jí jako produktu pro výrobu speciálních ocelí.

K odlišení od surového železa a oceli se všechny produkty přímé výroby označují jako „železo“. Produkty se pak dělí podle výše teploty při zpracování na:

- železná houba – teploty pod teplotou tavení železa
- hrudkování – teplota, při níž je železo v těstovitém stavu
- tekutá ocel – teplota vyšší než tání železa

5.1 Výroba železné houby [2]

Železná houba se získává redukcí železných rud v tuhém stavu. Houba je značně pórovitá a má silnou oxidační schopnost. Proto je nutné ji po redukcii slisovat dřív, než dojde ke styku se vzduchem. Houba také obsahuje hlušinu, kterou je nutné odstranit například drcením a magnetickou separací.

5.1.1 Metoda Höganäs [2]

Tato metoda je původem ze Švédska. Princip spočívá v redukcí prachové železné rudy, popřípadě koncentrátu ve svislých uzavřených retortách, mezi nimiž jsou kanály, kterými proudí topné plyny. Retorty se vytápí plynem vznikajícím při redukcí, k němuž se přidává svítiplyn nebo jiný vhodný topný plyn. Redukčním prostředkem je koksový prach, který se střídavě vrství s vrstvami vápence a rudným prachem do retort. Retorty se pak zahřívají topným plynem na 1000 až 1100 °C. Výsledná houba obsahuje 96 až 97 % Fe a lisuje se do válečkovitých briket a používá se pro výrobu speciálních ocelí v elektrických pecích a nebo se drtí pro použití v práškové metalurgii.

5.1.2 Metoda Wiberg [2]

Princip spočívá v redukcí kusové rudy v šachtové peci, do které se spodem přivádí redukční plyn o teplotě 1000 °C, složený z 70 % CO a 25 % H₂. Plyn prostupuje vsázkou, ohřívá ji a redukuje. V polovině výšky pece se 75 % plynu odvádí do elektricky vytápěného regenerátoru naplněným dřevěným uhlím nebo koksem. Plyn obsahující převážně CO₂ se ve styku s žhavým uhlíkem mění na CO a H₂ a vhání se zpět do spodní části pece. Zbytek plynu ohřívá v peci zavezenou rudu a připravuje ji k redukcí. V horní části šachty se plyn mísí se vzduchem, spaluje se a ruda se praží. Výsledná houba z pece vypadává do násypky chlazené vodou a následně ochlazená na cca 200 °C se vypouští do vozík ů.

5.2 Hrudkování [2]

Tohoto postupu je používáno k obohacování chudých železných rud před vsázením do vysoké pece. Princip spočívá v mísení rozemleté rudy s práškovým palivem ve skloněné válcové peci vytápěné levným palivem. Pec se pozvolna otáčí kolem své osy a vlivem teploty a práškového paliva se ruda redukuje a vytváří se struska, chránící vyredukované železo před oxidační atmosférou. Vyredukované železo se vlivem otáčení pece na sebe nabaluje a vytváří se hrudky, které spolu se struskou vycházejí spodní částí pece ven. Ochlazené hrudky se drtí a podstupují magnetickou separaci. Pro svůj vysoký obsah síry se produkt hrudkování dá použít pouze jako vsázka do vysoké pece. Tento proces nachází uplatnění u chudé prachové křemičité rudy, přičemž se následně ve vysoké peci šetří kvalitní palivo. Avšak je to velmi nákladný postup a dnes se nevyužívá.

5.3 Fluidizační pochod [2]

Další z metod nepřímé výroby je fluidizační pochod, využívající velmi čisté prachové koncentráty, kterými prochází ohřívací a redukční plyn. Průchodem plynu dochází ke vznosu (fluidizaci) prachové rudy a je redukována. Jedním takovýmto pochodem je Cyclo-steel vyvinutý v Británii. Pochod probíhá ve zvláštní komoře, v níž je jemně rozemletá ruda a ve vznosu je redukována práškovým palivem, částečně spalovaném kyslíkem. Výsledkem je železný prášek, který se lisuje a používá jako vsázka do ocelářských pecí nebo pro zpracování práškovou metalurgií.

ZÁVĚR

Cílem práce je studium ocelářských pochodů zavedených do výroby po roce 1950. Je zde stručně popsána historie výroby železa, kdy lidé již před 4000 lety vyráběli železo v primitivních šachtovitých pecích tzv. „dýmačkách“. V 16. století se k výrobě surového železa začaly používat vysoké pece, ale redukce probíhala nedostatečně výhřevným dřevěným uhlím. Koks se začal používat až v 19. století a produktem vysoké pece již bylo tekuté surové železo, jež vyžadovalo nové principy zkujňování.

Významným vynálezem byl Bessemerův a následně Thomasův konvertor, v nichž zkujňování surového železa probíhalo dmýcháním vzduchu do taveniny a tím k oxidaci uhlíku. V zápětí byla vynalezena Siemens-Martinská pec a na přelomu 20. století se ocel začala tavit v elektrických pecích.

Po roce 1950 nastává rozvoj zejména kyslíkových pochodů a mimopecní tzv. sekundární metalurgie. Podstatou kyslíkových pochodů je dmýchání čistého kyslíku na povrch lázně, kyslík se dostane do určité hloubky a dochází k reakci zkujňování surového železa (LD pochod). Pro surové železo s vyšším obsahem fosforu byl vyvinut pochod OLP, při němž se spolu s kyslíkem dmýchá prachové vápno a pochod Kaldo, který využívá konvertor nakloněný a otáčející se kolem své osy.

V oblasti sekundární metalurgie jsou popsány základní pochody. Sekundární metalurgie spočívá v přenesení redukčního údobí a fázi dohotovení mimo tavící agregát. Pochodů sekundární metalurgie je mnoho a v základu se dělí na postupy v konvertoru nebo v pánvi, za atmosférického tlaku nebo ve vakuu, s ohřevem kovu nebo bez ohřevu. Základními principy SM je profukování kovu kyslíkem (oduhlíčení), argonem (odplynění), pro účinnější dohotovení je pochod prováděn ve vakuu. Pochod s dmýcháním prachového vápna slouží pro odsíření oceli.

Snahou přímé výroby železa z rud je nahradit koks jinými, levnějšími druhy paliv například zemním plynem. Produktem přímé výroby železa je pouze železná houba, případně železný prášek, jež se dále zpracovávají při výrobě oceli. Metoda je využívána především rozvojovými zeměmi s vlastní produkcí zemního plynu, pro průmyslově vyspělé země je metoda pro výrobu oceli ekonomicky nevýhodná. Výjimkou je použití metody při výrobě železného prášku pro použití v práškové metalurgii.

Za posledních 50 let ocelářský průmysl zažil obrovský nárůst výroby. V roce 2010 bylo ve světě vyrobeno přes 1,4 mld tun oceli, oproti 160 milionům tun vyrobených v roce 1950 (viz. příloha č.1). Za tento nárůst vděčíme jednak novým technologiím výroby oceli (kyslíkové konvertory, sekundární metalurgie) a pak v prvním desetiletí 21. století obrovský nárůst výroby především v Číně, kde bylo v roce 2010 vyrobeno přes 44 % celkové světové produkce (viz. příloha č.2).

Na výrobě oceli se velkou měrou podílí její recyklace a to hlavně z ekonomických důvodů. Náklady na výrobu oceli recyklací jsou až o 75 % nižší, oproti nákladům na výrobu oceli ze surového železa. Recyklováním jedné tuny oceli se ušetří cca 1100 kg železné rudy, 630 kg uhlí a 55 kg vápence. Ocel se většinou recykluje v elektrických pecích nebo kyslíkových konvertorech. V současnosti je 75 % světové produkce oceli vyráběno recyklací.

Ocel je nejvýznamnější a nejvšestraněji používaný materiál, po cementu druhý nejmasověji vyráběný výrobek. Své uplatnění nachází ve všech oblastech průmyslu, je významným materiálem ve stavebnictví, strojírenství, energetice, dopravě a dalších odvětvích průmyslu. V dnešní době bychom se bez oceli neobešli.

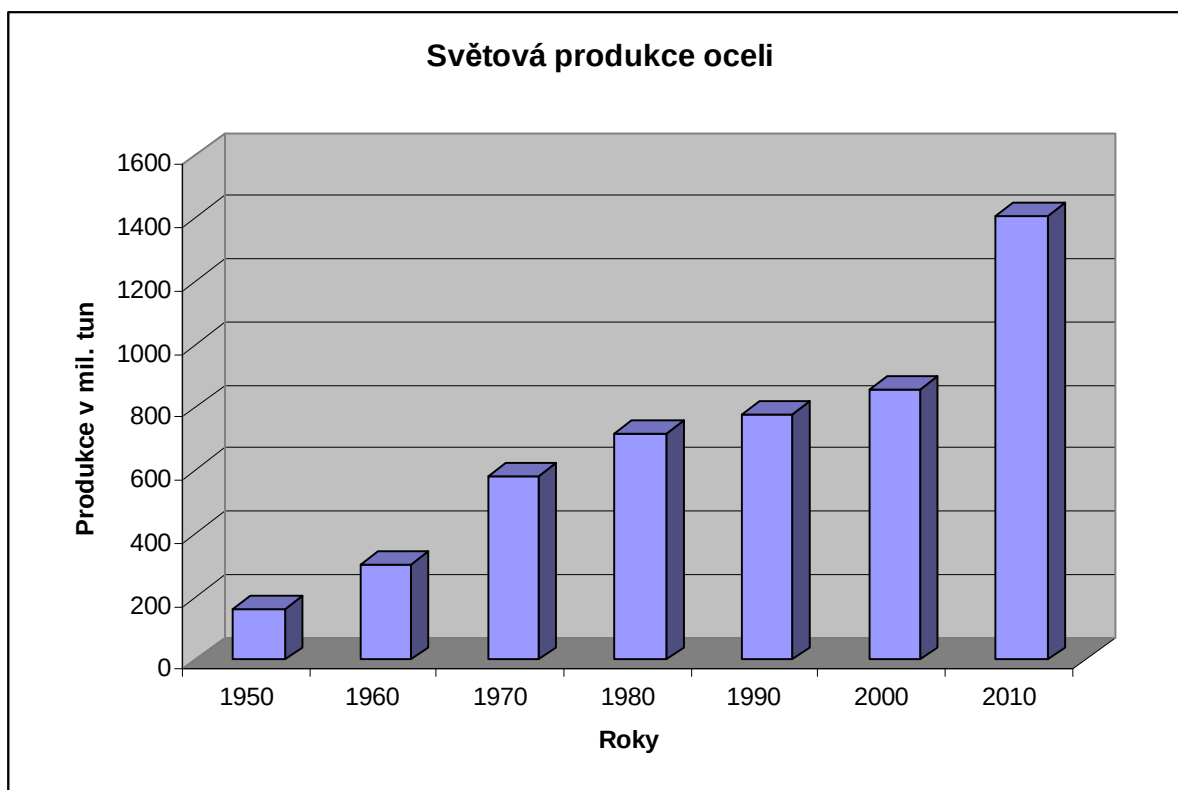
Seznam použité literatury

1. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 150 s. ISBN 80-214-2509-1.
2. KRUMNIKL, František; MAKARIUS, Miroslav; ŠEFFL, Ladislav. *Výroba oceli*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n. p., 1969. 396 s. 04-407-69.
3. BROŽ, Ludvík, et al. *Hutnictví železa*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n. p., 1988. 464 s. 04-405-88.
4. ROHAN, René, et al. *Hutní materiál*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury n. p., 1987. 592 s. 04-406-87.
5. *Cs.wikipedia.org* [online]. 2010 [cit. 2011-02-14]. Vysoká pec. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vysok%C3%A1_pec>.
6. *Cs.wikipedia.org* [online]. 2011 [cit. 2011-03-26]. Železo. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezo>>.
7. *Stahl online.de* [online]. 2010 [cit. 2011-03-26]. Iron and Steel Making. Dostupné z WWW: <http://www.stahl-online.de/images/converter2_66104.jpg>.
8. *Firing.wz.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-03-26]. Výpal keramiky dřevem. Dostupné z WWW: <<http://firing.wz.cz/Zelezoz.htm>>.
9. ŠENBERGER, Jaroslav; ZÁDĚRA, Antonín. *Metalurgie-oceli* [online]. 2010 [cit. 2011-03-27]. Studijní podpory. Dostupné z WWW: <http://metalurgie-oceli.webz.cz/2_11_3.html>.
10. JIRÁSEK, Jakub; VAVRO, Martin. *Geologie.vsb.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-03-27]. Výroba železa. Dostupné z WWW: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html#oceli>.
11. *Worldsteel.org* [online]. 2011 [cit. 2011-03-30]. World Steel Association. Dostupné z WWW: <http://www.worldsteel.org/?action=stats_search>.
12. *OKK Koksovny, a.s.* [online]. 2009 [cit. 2011-04-09]. Metalurgický koks. Dostupné z WWW: <<http://www.koksovny.cz/cz/vyrabime-koks/metalurgicky-koks/>>.
13. *VŠCHT Praha* [online]. 2008 [cit. 2011-04-09]. Metalografie II - teorie. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_2>.

Seznam příloh

- Příloha č. 1 Světová produkce oceli v letech 1950 až 2010
- Příloha č. 2 Světová produkce oceli v roce 2010 v jednotlivých zemích
- Příloha č. 3 Vývoj pochodů sekundární metalurgie

Příloha č. 1 Světová produkce oceli v letech 1950 až 2010 [11]



Příloha č. 2 Světová produkce oceli v roce 2010 v jednotlivých zemích [11]

Pořadí	Země	Mil. t.rok ⁻¹	světové produkce v %
1.	Čína	626,6	44,3
2.	Japonsko	109,6	7,8
3.	USA	80,6	5,7
4.	Rusko	67,0	4,7
5.	Indie	66,8	4,7
6.	Jižní Korea	58,4	4,1
7.	Německo	43,8	3,1
8.	Ukrajina	33,6	2,4
9.	Brazílie	32,8	2,3
10.	Turecko	29,0	2,1
11.	Itálie	25,8	1,8
12.	Taiwan	19,6	1,4
13.	Mexiko	17,0	1,2
14.	Španělsko	16,3	1,2
15.	Francie	15,4	1,1
16.	Kanada	13,0	0,9
17.	Írán	12,0	0,8
18.	Spojené království	9,7	0,7
19.	Jihoafrická republika	8,5	0,6
20.	Belgie	8,1	0,6
21.	Polsko	8,0	0,6
22.	Austrálie	7,3	0,5
23.	Rakousko	7,2	0,5
24.	Egypt	6,7	0,5
25.	Holandsko	6,6	0,5
26.	Česká republika	5,2	0,4
27.	Argentina	5,1	0,4
28.	Saudská Arábie	5,0	0,4
29.	Švédsko	4,8	0,3
30.	Slovensko	4,6	0,3
31.	Kazachstán	4,3	0,3
32.	Finsko	4,0	0,3
33.	Rumunsko	3,9	0,3
34.	Lucembursko	2,6	0,2
35.	Bělorusko	2,5	0,2
36.	Venezuela	2,2	0,2
37.	Katar	2,0	0,1
38.	Řecko	1,8	0,1
39.	Maďarsko	1,7	0,1
40.	Švýcarsko	1,3	0,1

Příloha č. 3 Vývoj pochodů sekundární metalurgie [9]

