



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HISTORICKÝ VÝVOJ POSTUPU VÝROBY OCELI OD STŘEDOVĚKU

HISTORICAL DEVELOPMENT OF STEEL MANUFACTURING PROCESSES FROM THE MIDDLE
AGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

MARIE ZÁVODNÁ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. JAROSLAV ŠENBERGER,

CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2015

ABSTRAKT

Závodná Marie: Historický vývoj postupů výroby oceli od středověku

Práce byla zpracována v rámci bakalářského studia oboru Strojírenská technologie při Fakultě strojního inženýrství v Brně. Téma bylo vypracováno na základě literatury a přístupných serverů, které se zabývají lineárním rozbohem principem výroby oceli od středověku, problematika ocelářských redukčních a oxidačních pochodů. Současné moderní ocelářské postupy jsou založeny na podobných principech, jako byla založena výroba oceli od objevení železa.

Klíčová slova:

hutnictví, slévárství, železo, pece

ABSTRACT

Závodná Marie: HISTORICAL DEVELOPMENT OF STEEL MANUFACTURING PROCESSES FROM THE MIDDLE AGES

This thesis was written during my bachelor studies of mechanical technology at the Faculty of Mechanical Engineering in Brno. The topic was processed on the basis of professional literature and accessible web servers, which deal with the linear analysis of steel production principles since the Middle Ages and with their issues of steel reduction and oxidation processes. Contemporary modern steel fabrication procedures are based on similar principles to those which have been used for the fabrication of steel since the discovery of iron.

Keywords:

metallurgy, foundry industry, iron, furnace

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÁVODNÁ Marie: *Historický vývoj postupů výroby oceli od středověku*. Brno, 2015. 47 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, ÚST-odbor slévárství. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/>

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Historický vývoj postupů výroby oceli ve středověku vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

.....
Marie Závodná

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

Obsah

ABSTRACT	2
Prohlášení	3
Poděkování	4
1. Hutnictví železa v českých zemích a na Slovensku v době předfeudální a raně feudální	8
1.1. Hutnictví železa v pravěku a v časně době dějinné (do 6. století)	8
1.1.1. Železo a jeho slitiny	13
1.1.2. Význam binárních diagramů železo-uhlík	15
1.1.3. Vlastnosti čistého železa	17
1.1.4. Vliv dalších prvků na binární diagram železo-uhlík	18
1.1.5. Suroviny pro výrobu slitin železa	18
1.2. Hutnictví železa v době Velké Moravy	27
2. Hutnictví železa v českých zemích a na Slovensku za feudalismu	31
2.1. Technologie raně středověkého železářství	31
2.2. Období přímé výroby železa	32
2.3. Období nepřímé výroby kujného železa	35
3. Historický vývoj průmyslové výroby oceli	37
3.1. Složení oceli, základní suroviny pro výrobu oceli	37
3.2. Počátky průmyslové výroby oceli	38
4. Moderní železářské postupy	41
4.1. Výroba surového železa	41
4.2. Základní reakce probíhající ve vysoké peci	42
4.3. Moderní postupy zkujňování a rafinace oceli	43
Závěr – zhodnocení pochodů	45
Seznam obrázků	47

Seznam tabulek	47
----------------------	----

Úvod

Objevení výroby a zpracovávání kovů patří k důležitým milníkům dějin. V pozdější době se právě rozmach hutnictví stal jednou z příčin vypuknutí průmyslové revoluce.

Nejstarší historie zpracování kovů začíná v době kamenné, kdy se objevují první případy využívání kovů, které se nacházejí v přírodě v ryzím surovém stavu.[1]

V následujícím období se začaly kovy získávat redukcí zejména oxidických rud. Jiné typy rud byly na oxidy převedeny pražením.

Redukce se prováděla nejdříve v malé jámě a později v malé peci vytápěných dřevěným uhlím a vyrobené kovy se buďto odlévaly nebo zpracovávaly kování ručně nebo též pomocí vodních hamrů. Prudký rozvoj hutnických technologií je spojen s nástupem průmyslové revoluce, která začala použitím kamenného uhlí místo dřevěného uhlí při výrobě železa.[2]

Kovy jsou významný technický materiál, který se uplatňuje při výrobě nástrojů, šperků a zbraní a k těmto účelům se využívá od prehistorických dob. Jelikož kovové předměty se poměrně dobře zachovaly a archeologové je často nacházejí, daly používané kovy i názvy historickým obdobím. Archeologické nálezy nám umožňují poměrně dobře rekonstruovat postup jejich výroby a zpracování. Naproti tomu písemné zmínky o jejich zpracování, které nacházíme u antických autorů, jsou často nepřesné a plné pověr.

Jako první slitiny byly používány bronzy. Středověk znal 7 kovů. Technicky nejdůležitějším kovem se v následujících stoletích stalo železo. Práce je věnována vývoji technologie výroby železa a oceli do současné výroby.

1. Hutnictví železa v českých zemích a na Slovensku v době předfeudální a raně feudální

1.1. Hutnictví železa v pravěku a v časně době dějinné (do 6. století)

Pravěk

Pravěk je nejstarším a nejdéle trvajícím dějinným obdobím, o které neexistují žádné písemné prameny. Zdrojem současného poznání jsou především archeologické nálezy hmotné pravěké kultury. Období pravěku dělíme podle materiálu, ze kterého si člověk zhotovoval nástroje. Jednotlivé doby jsou dále děleny na starší, střední, mladší a pozdní období. Z hlediska časového zahrnuje pravěká kamenná orientační období od 3milionů let před našim letopočtem do 4. tisíciletí před našim letopočtem.[3]

Starší doba kamenná - paleolit (~ do 10. -8.tisíciletí př.n.l.)

Starší dobou kamennou zvanou paleolit nazýváme nejstarší období dějinného vývoje trvajícím ve střední Evropě orientačně do 10. až 8. tisíciletí př.n.l.



Obrázek 1 -
Věstonická
Venuše

V tomto období ještě neexistují stavby a nedochází ani k obhospodařování půdy, člověk je zcela odkázán na přírodu. Kromě nedávných nálezů pochází z paleolitu rovněž proslulá keramická soška Venuše z Dolních Věstonic (obr. 1). Ve zbytcích pravěkého ohniště o průměru asi 10 m ležela soška společně s kamennými nástroji a zvířecími kostmi. Byla rozlomena na dva kusy ležící asi 10 cm od sebe. Nejprve se nepředpokládalo, že patří k sobě. Po očištění se ukázalo, že se celek podobá ženské postavě. Kromě Venuše byly na místě nalezeny i další keramické plastiky, většinou vyobrazení zvířat.

Podoba sošky: Je 11,5 cm vysoká a v bocích 4,3 cm široká. Použitý materiál je pravděpodobně směsí hlíny a vápence, obdobné drobné plastiky byly přitom většinou zhotovovány z kamene nebo kostí. Zkoumání sošky: V létě 2004 byla soška zkoumána pomocí tomografu ve Fakultní nemocnici u sv. Anny. Do té doby se badatelé čtyřikrát pokoušeli zjistit složení materiálu, z něhož byla vyrobena. Poslední výsledky potvrdily, že plastika je z jemné hlíny smíchané s vodou. Jsou v ní ale navíc i malá bílá zrníčka, což může být vysrážený vápenec nebo úlomky kostí. Žádný z předchozích výzkumů tak jednoznačnou odpověď nedal. Byl také objeven další detail. Na hýždích sošky byl nalezen otisk prstu asi desetiletého dítěte. Další nálezy: Venuše z Dolních Věstonic není ojedinělou ukázkou

umění pravěkých lidí. Jiné plastiky z pálené hlíny jsou známy také ze sousedního Pavlova a z Předmostí u Přerova. Proslulá je rovněž Landecká Venuše (nazývaná také petřkovická) nalezená v roce 1953 na ostravském vrchu Landek.

Tato 4,6 cm vysoká soška z krevele je torzem a nemá hlavu. Její výjimečnost spočívá v netypicky štíhlých proporcích, které milovníkům moderního umění dokonce připomínají kubistickou sochu. Za jednu z nejdokonalejších sošek paleolitu je kromě Věstonické Venuše považována i Willendorfská Venuše z Rakouska. Ve francouzském Lespouque byla zase nalezena Venuše vyrobená z klu mamuta. Obdobné figurky starší doby kamenné spatřily světlo světa i v řadě dalších zemí, například v Německu, v Itálii, na Ukrajině, v Rusku nebo na Slovensku.[3]

Střední doba kamenná –mezolit (~ do 6. tisíciletí př.n. l.)

Střední dobou kamennou zvanou mezolit nazýváme období trvající ve střední Evropě orientačně od 10. až 8. tisíciletí př. n. l. do 6 tisíciletí př.n.l. V obživě nadále převažuje lov a sběr, k obhospodařování půdy a budování obydlí ještě nedochází s výjimkou možných přístřešků. Střední doba kamenná představuje období výrazných klimatických změn. Po poslední době ledové, tj. orientačně kolem 12 000- 10 000 př.n.l., dochází k oteplování a tání ledovců. Nastává tzv. geologická současnost - holocén, s obdobným klimatem jaký je v současné době.[4]

Mladší doba kamenná – neolit (~ do 4. tisíciletí př.n.l.)

Mladší dobou kamennou zvanou neolit nazýváme období trvající u nás cca od 6. do 4. tisíciletí př.n.l. Po období klimatických a dalších změn dochází ke změně způsobu obživy a přechodu k primitivnímu zemědělství a domestikaci zvířat.[4]

Pozdní doba kamenná – eneolit (~ do 2. tisíciletí př.n.l.)

Pozdní dobou kamennou zvanou eneolit nazýváme období trvající ve střední Evropě cca od 4. do 2 tisíciletí př.n.l. Naše území je osídleno řadou pravěkých rodů a vedle společenského uspořádání dochází ke změnám též v oblasti zemědělství. Rovněž období pozdní doby kamenné, zvané též *doba měděná*, je poznamenáno značným přesunem lidských rodů za obživou z důvodu vyčerpanosti půdy. Na našem území se nalézají řada archeologických kultur určených a pojmenovaných podle hrobových nálezů (kultura nálevkovitých pohárů, kultura s kanelovanou keramikou, kultura se šňůrovou keramikou a kultura se zvoncovitými poháry).[4]

Doba bronzová (~ 2. tisíciletí př.n.l. - 8 století př.n.l)

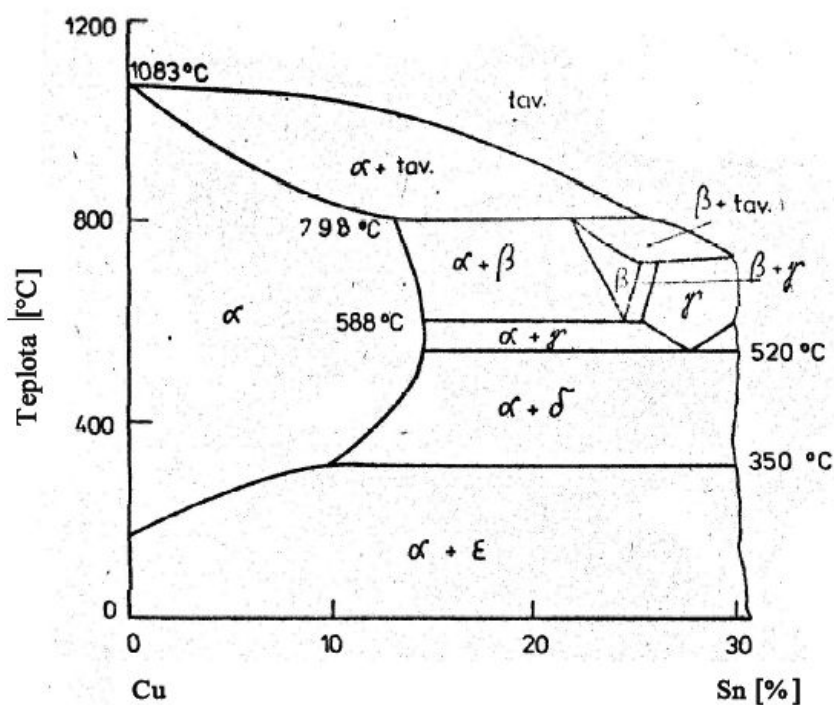
Mladší a starší dobou bronzovou nazýváme období trvajících u nás orientačně od 2. tisíciletí do 8. století př.n.l. Důležitým mezníkem je používání bronzových nástrojů s tímto související zdokonalení obdělávání půdy.

Výroba bronzu odléváním z mědi a cínu se rozšířila do oblasti střední Evropy z Blízkého východu a Středomoří, obývaných řadou vyspělých starověkých kultur. Z těchto důvodů bývá i doba bronzová u nás zařazena do období starověku, přestože jindy je tento výraz spjat pouze s obdobím vzniku a rozvoje prvních civilizací ve výše uvedených oblastech. Časově je starověk vymezen pozdní dobou kamennou (znalost písma) a počátkem středověkého období (stěhování národů a rozpad římské říše). Bronz jako materiál trvanlivější a pevnější než kámen znamená nejen výrobu nových zbraní, ale rovněž nástrojů. Kovové nástroje usnadňují a urychlují osídlovací proces (kácení stromů), výstavbu obydlí i obhospodařování půdy. Zároveň jsou s jeho výrobou spjata rukodělná řemesla (kovotepectví, slévačství) i směnný obchod.

Starší dobu bronzovou u nás charakterizuje únětická kultura, pronikající i do oblastí bez dosavadního trvalého osídlení. Střední dobu bronzovou zastupuje mohylová kultura, pojmenovaná podle mohyl stavěných nad hroby. V období mladší doby bronzové se na našem území vyskytuje řada dalších archeologických kultur, vyznačujících se odlišnými způsoby pohřbívání. Mezi tyto kultury pojmenovávané zpravidla podle míst nalezišť náleží kultura knovízská (žárové hroby i kostrové pohřbívání), milavečská, velatická a kultura lužická (pohřbívání spalováním a zakopáváním popele v urnách do posvátných polí, též tzv. lid popelnicových polí).[4]

Bronz je kovový materiál, slitina mědi a cínu, případně i jiných kovů jako např. hliníku, manganu, olova (kromě zinku, kdy se slitina nazývá mosaz). Starší český název pro bronz je spěš.[5] Bronz v závislosti na chemickém složení umožňuje získat materiály různých vlastností. Na obr. 2 je uveden rovnovážný binární diagram Cu – Sn. Slitiny s nižším obsahem Sn z oblasti tuhého roztoku alfa se vyznačují tvářitelností a houževnatostí. Mají vyšší pevnost než čistá měď. Se zvýšením koncentrace cínu roste tvrdost bronzů, otěruvzdornost a odolnost proti korozi. S rostoucí koncentrací cínu klesá teplota likvidu a zlepšují se slévárenské vlastnosti.[6] Fáze β odpovídá chemickému složení elektronové sloučeniny Cu_5Sn (počet elektronů k počtu atomů je 3 : 2), fáze δ reprezentuje složení Cu_{31}Sn s elektronovou koncentrací 21 : 13 a fáze ϵ Cu_3Sn o elektronové koncentraci 7 : 4. Fáze γ je označována za tuhý roztok.

Při teplotě 588 °C dochází k eutektoidní reakci, kdy se fáze β rozpadá na fáze α a γ . Fáze γ se pak rozpadá pod teplotou 520 °C na ($\alpha + \delta$). Při teplotě nižší než 350 °C a při pomalých rychlostech ochlazování dochází k dalšímu rozpadu na fázi ($\alpha + \epsilon$). V reálných podmínkách ochlazování jsou bronzy tvořeny směsí fáze ($\alpha + \delta$). Je nutno mít na zřeteli, že v důsledku širokého teplotního intervalu mezi solidem a likvidem jsou bronzy náchylné k likvacii. Při vyšší rychlosti ochlazování je možno pozorovat výraznou dendritickou strukturu. [7]



Obrázek 2: Část binárního diagramu Cu-Sn

Zvláštním druhem bronzy je dělovina, slitina mědi a 10 % cínu určená k výrobě houževnatých odlitků dělových hlavní historických zbraní. Jinou zvláštní slitinou je také zvonovina určená pro výrobu kostelních zvonů.[3]

Doba železná (~ 8. století př.n.l - 0)

Mladší a starší dobu železnou nazýváme obdobím trvající na našem území cca od 8.století př.n.l. do přelomu letopočtu. Důležitým mezníkem je výroba železných nástrojů. Pokračuje zdokonalování zemědělství na principu trojpolního systému i rozvoj řemesel a obchodu. Starší doba železná je na značné části evropského území ve znamení halštatského stylu (podle pohřebiště Hallstatt v dnešním Rakousku), přičemž naše území zůstává nadále rozčleněno do několika kulturních okruhů. Mladší doba železná, nazývaná podle naleziště La Tene (dnešní Švýcarsko) dobou laténskou, je ve střední Evropě období Keltů. Na našem území se Keltové

objevují asi ve 4. století př.n.l. a jako ostatní kmeny obsazují nejúrodnější oblasti země. Později zde budují svá opevněná hradiště, často v lokalitách staršího pravěkého osídlení. Pro keltské hradiště se opět vžilo pojmenování římského původu – oppidum. Na území keltského kmene bylo stavěno několik oppid různé velikosti představující náboženské obchodní, správní i vojenská centra zároveň. Keltové ovládají řadu řemesel (kovářství, hrnčářství) i obchod (využití kola a tepovou). S tímto souvisí rovněž znalost hrnčářského kruhu. [4]

Získávání surovin

Železo je sice druhým nejhojnějším kovem na zemi (po hliníku), ale vyskytuje se téměř výhradně jako příměs hornin či minerálů-železných rud. Nejdříve začali lidé zpracovávat meteorické železo. Vzhledem k vzácnosti a nevhodnosti k výrobě nástrojů bylo využíváno spíše pro svůj symbolický význam- jako zhmotněné poselství z nebes. Ze železných rud zpracovávali lidé v pravěku magnetovec, krevele a nejčastěji málo kvalitní, ale nejdostupnější bahenní rudy (hnědele nebo limonity). Ty se nacházely v dostatečném množství v každém regionu. Proto, když lidé pronikli do tajů výroby železa, nebyli závislí na jeho dovozu z velkých vzdáleností. Železné rudy lidé po dlouhou dobu získávali sběrem či povrchovou úpravou.[4] Důlní činností se rozumí namáhavé dobývání železných rud ražením jednoduchých jam a štol s použitím naprosto primitivních železných nástrojů a přírodních činitelů. Na území ČR není doložen žádný případ hloubkové důlní činnosti, ale zato máme bezpečně potvrzenou těžbu v místech povrchových oxidačních pásem nebo železorudných výchozů. Dokladem této povrchové těžby jsou rozměrné jámy, nejstarší archeologicky doložené z období laténu.[5]

Hutnictví železa

Výroba železa z rudy byla náročným procesem. Hlavním důvodem je vysoký bod tání železa (1535°C), kterého nebylo možno technologiemi, jež lidé v pravěku znali, dosáhnout. Nejprve bylo nutné železnou rudu roztřídit, rozdrtit a upravit pražením v mělkých jamách. Potom hutníci vsazovali rudu do železářských pecí obr. 3, ve kterých se za vysokých teplot (kolem 1400°C) oddělila většina neželezných součástí rudy (hutnická struska).



Obrázek 3 - Rekonstrukce hutnické dílny vybavené šachtovými pecemi se zahloubenou nístějí

Po skončení tavby byl z pece vyjmut polotovár-železná houba, kterou lidé dále zpracovávali ve vyhřívacích výhních. Zde se opakovaným prokováním zahřáté houby odstraňovaly zbytky strusky. Výsledkem byly železné nebo ocelové lupy. Kvalita železa se značně lišila v závislosti na zkušenostech řemeslníků. Hutnění vyžadovalo značné množství dřevěného uhlí, které se získávalo milířováním.

Některé hutnické dílny překovávaly lupy do tvarově jednotných „ingotů“ (hřiven), které sloužili k vývozu, a často měly funkci před mincovními platidly.[4]

1.1.1. Železo a jeho slitiny

Mechanické vlastnosti slitin železa jsou dány jejich chemickým složením. Velmi výrazně na ně působí zejména uhlík a rozhodujícím způsobem ovlivňuje jejich výslednou strukturu a vlastnosti. Proto znalost vlivu uhlíku ve slitinách má pro studium tepelného zpracování těchto slitin základní důležitost.

Se zvyšováním obsahu uhlíku např. u oceli zvyšuje v určitém rozsahu tvrdost, pevnost a mez kluzu na úkor tvárnosti a houževnatosti. Tepelným zpracováním se však mohou tyto vlastnosti měnit ještě v mnohem větším rozsahu. Podle požadovaných vlastností oceli je třeba zvolit vhodný způsob jejího tepelného zpracování.[8]

Dva základní úkony při tepelném zpracování oceli jsou ohřev a ochlazování tak, aby se dosáhlo požadovaných vlastností.

Čisté železo se vyskytuje v několika alotropických modifikacích. Železem α se nazývá kubická prostorově středěná struktura železa, která je stabilní do teploty 911 °C a nad 1392 °C. Železo α je feromagnetické až do teploty 769 °C, tzv. Curieovy teploty. Nad touto teplotou se někdy označuje jako železo β .

Velikost hrany atomové mřížky železa je závislá na teplotě a v případě nízkoteplotního železa α (β) je maximální rozměr $2,9 \times 10^{-10}$ m. Železo γ je kubická plošně středěná struktura železa, která je stálá mezi teplotami 911 °C a 1392 °C. Železo γ , stejně jako železo β , je již paramagnetické. Hrana atomové mřížky železa γ je větší než u železa α s rozměrem přibližně $3,65 \times 10^{-10}$ m. Vysokoteplotní modifikace železa α (nad 1392 °C) se často označuje jako železo δ . [7]

Běžně používaná ocel obsahuje kromě železa ještě další prvky, z nichž hlavní je uhlík. Atomy uhlíku jsou tak malé, že uhlík může tvořit tzv. mezerové tuhé roztoky. V tuhém roztoku zůstávají atomy železa na svých místech a do „volného“ prostoru v mřížce se vtěsňují atomy uhlíku. Tento tuhý roztok v železe γ se nazývá austenit. Je to základní strukturní součást oceli.

V závislosti na obsahu uhlíku existuje austenit mezi teplotami 723-1492°C. Austenit je tvárný, houževnatý a nemagnetický. Další dvě základní strukturní součásti oceli je ferit a cementit. Ferit v uhlíkových ocelích je tuhý roztok uhlíku v železa α (téměř čisté železo). Ferit je měkký, tvárný a za teplot nižších než 768°C magnetický. Cementit je karbid železa (Fe_3C). Je to velmi tvrdá a křehká chemická sloučenina železa s uhlíkem. U slitinových ocelí mohou některé legující prvky schopné tvořit karbidy, přecházet do cementitu a zastupovat v něm částečně železo. Při větším obsahu těchto prvků v oceli vznikají složitější karbidy.[7]Z výše uvedených fází je tvořena struktura oceli za podmínek blízkých rovnováze. V běžných ocelích se vyskytují běžně následující struktury. Perlit je složen z jemných destiček cementitu a feritu. Protože jednotlivé strukturní složky (ferit, cementit, perlit,...) mají odlišné vlastnosti, jsou výsledné vlastnosti oceli dány složkou, která převažuje. (Tab. 1)[7]

Tab. 1 Vlastnosti strukturních složek

Strukturní složka	Podstata	Vzhled a vlastnosti
Austenit	Tuhý roztok uhlíku v železe γ	Lesklý, světlý, velmi dobře tvárný, houževnatý
Cementit	Karbid železa Fe_3C	Třpytivě bílý, velmi tvrdý a křehký
Ferit	Téměř čisté železo	Světlý, měkký, dobře tvárný
Perlit	Složen z destiček feritu a cementitu	Perleťově lesklý, poměrně pevný, málo tvárný (záleží na hrubosti a tvaru destiček)

Podobně i slitiny železa mohou mít v závislosti na chemickém složení za různých teplot různou krystalickou stavbu. Jejich krystalická stavba se při vhodných změnách teplot ustálí, a to vždy za určitou dobu po dosažení nové teploty. Za této teploty, je pak dále beze změny, tj. v rovnováze. Vzájemná závislost teploty a chemického složení slitiny a druhu její vnitřní stavby se graficky znázorňuje tzv. rovnovážným diagramem.[7]

Poněvadž na vlastnosti oceli má největší vliv obsah uhlíku, vysvětlíme si rovnovážný diagram soustavy slitiny železa a uhlíku obr. 4. Vliv ostatních přísadových prvků nebudeme uvažovat, když jsou rovněž důležité.[8]

Uhlík může být v oceli obsažen buď jako grafit, nebo jako karbid železa Fe_3C . Jsou tedy dva rovnovážné diagramy Fe-C, a to soustava železo-grafit (soustava stabilní) nebo železo-karbid železa (soustava nestabilní). Větší význam má pro oceli soustava železo-karbid železa[7].

Binární diagram stabilní soustavy má praktické využití jen pro slitiny s obsahem uhlíku vyšším než 2 %. Na vodorovné ose rovnovážného diagramu je vynesena koncentrace uhlíku, která vzrůstá zleva doprava. Eutektická krystalizace a eutektoidní rozpad stabilní soustavy probíhají

při nižším obsahu uhlíku a při vyšších teplotách než u metastabilní soustavy. Stabilní soustava Fe – C má význam pro hodnocení struktury litin. Litiny obsahující grafit se na lomu jeví jako šedé, proto jsou také označovány jako tzv. šedé litiny.[7][8]

Pod eutektické litiny obsahují od 2,08 %, (2,11 %) do 4,26 % uhlíku. Obsah uhlíku nad 4,26 % tvoří nad eutektickou litinu.[7]

Krystalizace pod eutektické slitiny:

Při chladnutí slitiny z likvidu nejdříve se začnou vytvářet krystaly austenitu v tavenině – pod větví $A'C'$. Překročením eutektické teploty 1154 °C (čára $E'C'$) se z taveniny vyloučí primární grafit a grafitové eutektikum k již vytvořeným krystalům austenitu. Pod eutektoidní teplotou 737 °C (čára $O'K'$) se austenit rozpadá na grafitový eutektoid, tj. směs feritu a lupínkového grafitu.

Krystalizace eutektické slitiny: Při koncentraci 4,26 % uhlíku vzniká při chladnutí přímo grafitické eutektikum (směs zrn austenitu a grafitu). Austenit se dále rozpadá na ferit a grafit, stejně jako u pod eutektické slitiny.

Krystalizace nad eutektické slitiny:

Z likvidu se překročením větve $C'D'$ tvoří směs krystalů primárního grafitu a taveniny. Primární grafit má nižší objemovou hustotu než tavenina (asi třikrát) a vyplouvá na povrch. Tímto se v tavenině snižuje obsah uhlíku až do eutektické koncentrace 4,26 %, ze které se pod eutektickou teplotou (čára $C'F'$) krystalizuje grafitické eutektikum. Rozpad austenitu vytvoří směs feritu a grafitu. [7]

1.1.2. Význam binárních diagramů železo-uhlík

Rovnovážný diagram železo-uhlík stabilní a metastabilní soustavy je uveden na obrázku 4. Důležité teploty a koncentrace jsou v diagramu označeny velkými písmeny. U stabilní soustavy jsou tato písmena opatřena apostrofem, např.: C' .

V diagramu se vyskytují následující fáze:

Ferit – intersticiální tuhý roztok uhlíku v $Fe\alpha$

Austenit – intersticiální tuhý roztok v $Fe\gamma$

δ (*delta ferit*)- intersticiální tuhý roztok v $Fe\delta$

Cementit – intersticiální chemická sloučenina železa a uhlíku Fe_3C

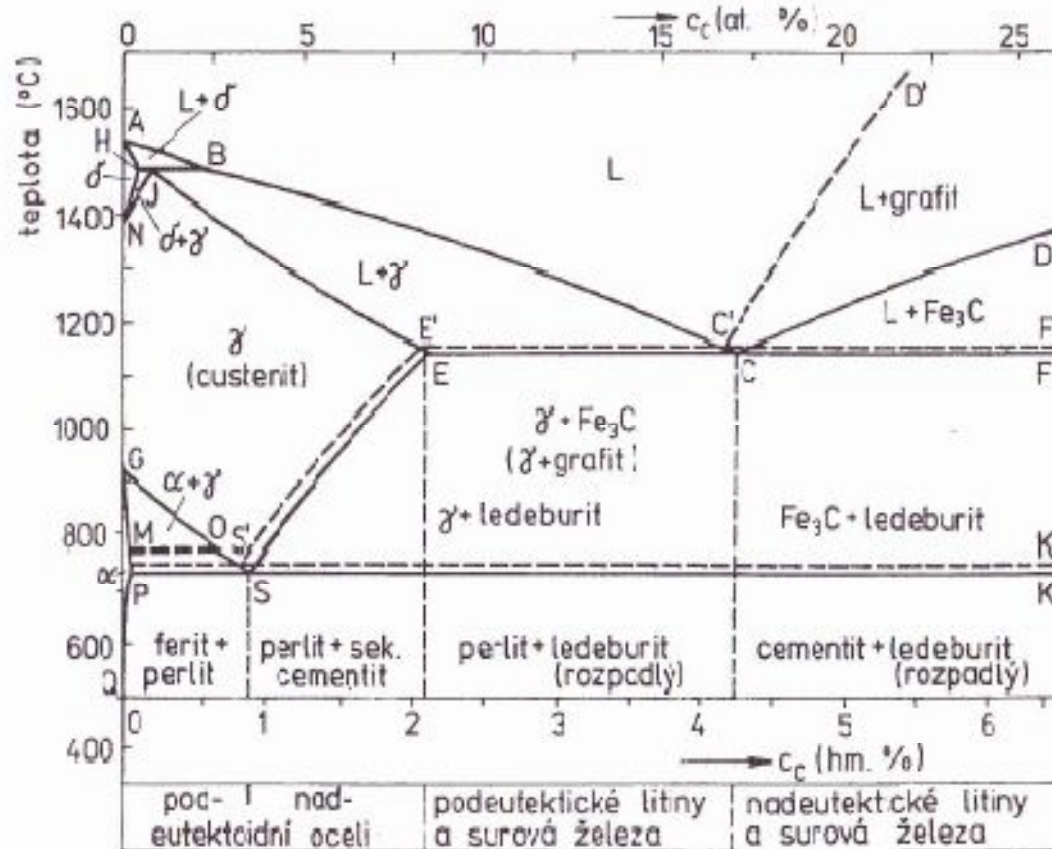
Grafit – uhlík krystalující v šesterečné soustavě

Ledeburit – eutektikum v metastabilní soustavě

(při eutektické teplotě se skládá z krystalů austenitu a cementitu)

Grafické eutektikum – eutektikum ve stabilní soustavě (při eutektické teplotě se skládá z krystalů austenitu a grafitu)

Eutektoid v nestabilní soustavě se nazývá *perlit* a skládá se z feritu a cementitu [14]



Obr. 4: Rovnovážný digram soustava železo-uhlík

Teploty a koncentrace důležitých bodů v diagramu železo-uhlík, jsou uvedeny v tabulce 2:

Tabulka 2: teplota a koncentrace bodů v Fe-C

Teploty bodů a čar ve °C			Koncentrace bodů v % C		
	Soustava metastabilní	stabilní		Soustava metastabilní	stabilní
A	1 538		A	0,00	
H-J-B	1 495		H	0,10	
N	1 394		J	0,16	
E-C-F	1 147	1 154	B	0,51	
G	912		E	2,08	
M-O	770		C	4,30	4,26
P-S-K	727	738	F	6,89	Není stanoven
D	1 227		S	0,77	0,69
			P	0,02	0,018
			Q	10^{-7}	

1.1.3. Vlastnosti čistého železa

Železo se v závislosti na teplotě vyskytuje ve dvou krystalografických modifikacích. Až do teploty 912°C je stabilní modifikace s krystalickou mřížkou krychlovou prostorově středěnou, která se označuje jako modifikace α . Tato modifikace α je feromagnetická až do teploty 760°C, nad touto teplotou ztrácí železo magnetické vlastnosti. Nemagnetická modifikace s krychlovou mřížkou prostorově středěnou se označuje jako modifikace β . V pásmu teplot 912-1392°C má železo krychlovou mřížku plošně středěnou, označovanou jako modifikace γ . Nad tímto pásmem teplot až do teplot tavení nabývá železo opět krystalickou mřížku krychlovou prostorově středěnou, která se nalézá pod modifikací δ . [14]

Při přeměně krychlové mřížky prostorově středěné na krychlovou mřížku plošně středěnou ($Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma$) se mění koordináční číslo z osmi na dvanáct a počet atomů strukturní mřížky ze dvou na čtyři. Atomy v mřížce γ jsou těsněji uspořádány než v mřížce α , proto se při přeměně $Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma$ objem zmenšuje a při přeměně $Fe\gamma \rightarrow Fe\delta$ se objem zvětšuje. [14]

Vlastnosti čistého železa:

Relativní atomová hmotnost	55,874
Teplota tavení	1 539°C
Skupenské teplo tání	15,315 kJ•g•atom ⁻¹
Vzrůst objemu při tavení	2,6%
Bod varu při 0,101 MPa	2 800°C
Měrná hmotnost při 20°C	7,874 g•cm ⁻³
Modul pružnosti v tahu	2,004•10 ⁵ MPa [14]

1.1.4. Vliv dalších prvků na binární diagram železo-uhlík

- Prvky, které se rozpouštějí ve feritu, ovlivňují jeho vlastnosti jako je pevnost, houževnatost, tvrdost: Mn, Si, Cr, Mo, Ni, V
- Prvky s nízkou rozpustností ve feritu se při ochlazování vylučují z tuhého roztoku ve formě nových sloučenin a způsob jejich vyloučení má vliv zejména na houževnatost a pevnost: S, N, O
- Jiné prvky při vyšších teplotách segregují na hranice zrn a působí popouštěcí křehkost např. P, As, Bi, Sb, případně i Sn a Pb. Oddělování podporuje přítomnost Mn a Si, proto je u ocelí pracujících v oblasti popouštěcí křehkosti požadován často minimální obsah Mn a Si
- Prvky ovlivňující velikost lamel cementitu v perlitu: Mn, Si, P, S, O, N, H[14]

1.1.5. Suroviny pro výrobu slitin železa

- ✓ Kovonosné suroviny: dle chemického složení dělíme na:
 - Bezvodé oxidy: (dnes nejvíce používané)
 - a) Hematit (krevel, Fe_2O_3) je tmavě červené barvy a má obsahovat asi 60% železa (obr. 5)
 - b) Magnetit (magnetovec, Fe_3O_4) je magnetický a má obsahovat asi 68% železa (obr. 7)
 - Hydratované oxidy: limonity (hnědele, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) se rozdělují podle obsahu chemicky vázané vody (obr. 6)
 - Uhlíčitany: Siderit (ocelek, FeCO_3), obsahuje pouze 25 až 40% železa (obr. 8)
 - Křemičitany: Chamozit [$(\text{Fe}, \text{Mg})_{15}\text{Al}_{10}\text{Si}_{11}\text{O}_{52} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$] má jako surovina pro výrobu železa malý význam.

Manganové rudy spolu s železnými rudami jako vsázka do vysoké pece. Podobně jako železné rudy se dělí na bezvodé oxidy, hydrantovavé oxidy a uhlíčitany. Výsledkem redukce manganových a železných rud ve vysoké peci je feromangan.

Druhotné suroviny představují odpady z chemického průmyslu a odpady z hutí bohaté na železo.

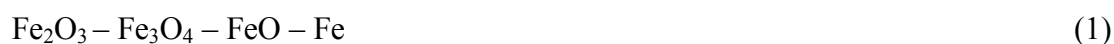
- ✓ Palivo a struskotvorné přísady: Palivem a současně redukčním činidlem ve vysokých pecích je metalurgický koks. Metalurgický koks obsahuje 83 až 91% uhlíku a 6 až 12% popela. Většina rud má kyselý charakter, a proto jsou struskotvorné přísady zásadité. Hlavní

struskotvornou přísadou je vápenec (CaCO_3), dále se používá dolomitický vápenec $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ nebo dolomit.[14]



Obr 5, 6, 7, 8: Charakteristika ukázky železných rud. Zleva doprava – Hematit, Limonit, Magnetovec, Ocelek[5]

Princip výroby železa spočívá v redukci oxidických rud. Po ohřevu dochází k disociaci sloučenin železa. Při teplotách nad $570\text{ }^\circ\text{C}$ je stabilní oxid FeO . Schéma postupného rozkladu kyslíčnicku železa nad $570\text{ }^\circ\text{C}$ lze popsat reakcí (1)



Při teplotách nad $570\text{ }^\circ\text{C}$ lze získat FeO ale výroba železa rozkladem FeO na $\text{Fe} - \text{O}$ v technické praxi není dostupná.

Disociací uhličitánů a hydroxidů železa se rovněž získával oxid železnatý(2)



Podobně lze popsat disociaci hydroxidů. Vzniklé oxidy železa jsou redukovány uhlíkem nebo oxidem uhelnatým (3)



Nebo



Redukce oxidů železa probíhá převážně podle reakce (4). Stejný princip redukce oxidů se zachoval až do dnešní doby a probíhá ve vysoké peci.[6]

Kovářství

Hutnicky vyrobené železo a ocel se staly surovinami pro výrobu nástrojů. Na rozdíl od bronzu neumožňovala používaná technologie, jak bylo výše uvedeno výroba železa v tekutém stavu. Naučili se jej proto zpracovávat kovááním. Základní součástí kovářské dílny byla výheň, kamenná nebo železná kovádlina a kovářské nářadí (kleště, kladivo,...). Vznikla celá řada postupů, kterými kováři tvarovali železo jak za tepla, tak za studena, jako např. vytahování,

kroucení, probíjení nebo spojování [4]. Postupem času se kovářské techniky zdokonalovaly natolik, že kováři dokázali nauhličováním, kalením či popouštěním měnit kvalitu suroviny, kterou měli k dispozici. Skováváním prutů železa a různých ocelí potom dosahovali toho, že jednotlivé části výrobků měli požadované vlastnosti. Železné předměty bývaly zdobeny různými kovářskými technikami, gravírováním nebo taušírováním. Od doby laténské byl kovář přítomen v každé větší osadě. Mezi venkovským kovářem, který zpravidla opravoval poškozené nástroje a vyráběl jednoduché výrobky, a specialistou (např. zbrojířem, nožířem nebo uměleckým kovářem) byl však obrovský rozdíl.[4]

Úprava získané suroviny

Vytěžená ruda musela projít ještě úpravami různého druhu, než se mohla redukovat v železářských zařízeních. Vždy bylo nejdůležitějším krokem při úpravě získané suroviny zbavit rudu veškeré *hlušiny* a rozdrtit rudu na menší části z důvodu lepší redukovatelnosti.

Další důležitou metodou při současném obohacování železné rudy je její pražení. Třídění rudy se provádělo s cílem odstranit ze získané horniny nežádoucí hlušinu (hlinité a kamenité složky). Třídění bylo prováděno jednak ihned na místě těžby nebo až po drcení namísto spotřeby. Drcení rudy se provádělo před samotnou tavbou nebo až po samotném pražení, kdy ruda ztratila svou tvrdost. Velikost drceného koncentrátu je úměrná velikosti výrobního zařízení. Optimální velikost se pohybovala od velikosti lískového ořechu, až po velikost drceného šterku. Některé železárny pracovaly i s rudou rozemílanou téměř na prach, ale v tomto případě hrozí nebezpečí zahlcení a znesnadnění průběhu tavby. Pražení je přípravný proces na principu zahřívání suroviny za přístupu nebo nepřístupu vzduchu.

V současné technologii se pražení provádí s hlavním cílem usnadnit práci samotné peci a zmenšit výrobní náklady. Samotné pražení má několik základních cílů:

- uvolnit uhlík (CO_2) a síru z rud
- usnadnit redukovatelnost hutných a těžce redukovatelných rud
- zlepšit drtitelnost příliš pevných rud

S jistotou nelze říci, zdali staří železáři užívali pražení jako zaběhlou metodu při výrobě železa nebo jen při samotném redukčním pochodu, kdy je ruda v některých případech vystavená podobným účinkům jako při pražení. Pokud k nějakému obohacování rudy docházelo, dělo se tak především cestou mechanické úpravy, než nějakým cíleným tepelným či chemickým působením.[5]

Problematika umělého přívodu vzduchu do pecí

Podmínkou správného průběhu tavby je nutnost neustálého umělého přívodu proudu vzduchu do výrobního zařízení.[6] Kyslík obsažený ve vzduchu zajistil spalování dřevěného uhlí a tím dosažení požadované teploty. Oxid uhličitý se v redukčním pásmu měnil v oxid uhelnatý podle rovnic (5) a (6), který sloužil k redukci oxidů.



U současných hutnických agregátů je uvedený princip stále používán. Jako zdroj uhlíku se ve vysoké peci používá koks a k dmýchání vzduchu složí dmyhadla.

Vzduch byl u starověkých postupů ve většině případů pravděpodobně do pecí přiváděn pomocí různých typů měchů. Bohužel na evropské půdě nejsou žádné evidentní archeologické nálezy měchů, užívaných v pravěkých a středověkých železářských zařízeních pro dodávání proudu vzduchu, ze kterých bychom mohli při rekonstrukci výrobních pochodů vycházet. Inspiraci můžeme hledat u domorodých afrických kmenů, kdy ještě v polovině minulého století pracovaly jejich primitivní železárny s typem bubínkového měchu. Hrncovité měchy byly složeny z keramické a dřevěné nádoby s nabraným vzduchem. Ten byl vyhnán na spodku měchu skrze hlinitý tunel směrem do pece střídavým tlačáním na kožené víko nebo blánu, napnutou přes její vršek. Další možnosti mohou být klapkové harmonikové měchy, které byly zavedeny v Evropě, ale až v období římském, jak ukazuje ikonografie. Některá zařízení mohla pracovat na principu přírodního zdroje vzduchu.[2]

Byla-li pec postavena na příhodném větrném svahu, mohl vzduch do pece proudit většími otvory při dnu zařízení. Byl tak velice jednoduše a bez námahy zajištěn pravidelný přísun vzduchu.

Můžeme se domnívat, že pravěcí hutníci využívali jednoduchého vaku nebo měchu zeseřitých párů zvířecích kůží, kterými střídavě stlačením a zdvihem obstarávali neustálý přísun vzduchu.[5]

Z našeho území je rozvinutá keltská civilizace pravděpodobně vytlačena útoky germánských kmenů v 1. století před naším letopočtem, přičemž nastává období civilizačního propadu.

Vznik umění vyrábět železo z rudy souvisí s praktikami metalurgie mědi a olova v severní Sýrii. Při zpracování siřnkových měděných rud se tam přidávaly do vsázek značné podíly železné rudy jako struskotvorné přísady.

V těchto souvislostech je tím nejvýznamnější nejstarší nález železa na území dnešní Slovenské republiky. Je to malá železná rukojeť dýčky, která se datuje do 15. století př.n. l. Z našich nálezů je třeba upozornit na depot bronzů ze Suchdola u Prahy, který obsahoval bronzový ingot se zatavenou železnou tyčinkou, která se klade zhruba do 12. století př.n.l. O sto až dvě stě let mladší jsou dva další depoty bronzů, již obsahovaly ojedinělé železné předměty – ve skladu z Jenišova, byl železný kroužek a z depotu Maškovic část železného řetízku. V 8. století př. n. l. se frekvence výskytu předmětů z železa, dosud vzácného, ve východní a v západní sféře střední Evropy vyrovnává. První oblast je navíc obohacena některými prvky východního, zakavkazského původu, donesenými pravděpodobně prostřednictvím Kimmeriů. Mezi výrobky z této doby jsou čepele luxusních mečů a dýky s bronzovými jílcí, nože, tu a tam hroty kopí a šperk, vesměs ve tvarech napodobujících typově stejné výrobky bronzové.[5]

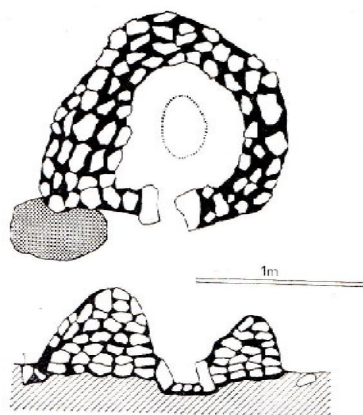
První náznaky těžby a zpracování železné rudy u nás jsou až ze sklonku doby, nazývané halštatskou. Zahrnuje zhruba 7. -6.století př.n.l. a vyznačuje se silicím vlivem jižní Evropy, kde vznikla antická civilizace. Počet železných předmětů v nálezech se zvýšil, ale i nadále to byly zbraně vynikajících jedinců. V inventáři archeologických kultur, jako jsou halštatská mohylová kultura, blanská, slezskoplatenická a kalenderberská kultura, jsou železné meče, dýky, sekeromlaty, hroty kopí a šipek. Mimoto se vyskytuje železný šperk, hlavně spony a náramky, a součástí koňského uzdění i kování náčelnických pohřebních vozů. Nově se objevují se první železné nástroje, jako jsou nože, sekery, několik typů srpů a dlát.[2]

Nejstarším výrobním zařízením byla prostá otevřená výheň s dmychadlem. V části nezasahované vhněným vzduchem se vytvořily podmínky pro redukcí kousků rudy v dřevěném uhlí za poměrně nízké teploty 1200-1300°C. Výtěžek byl minimální, už pro malou kapacitu výhni, a citelně se zmenšoval při nových ohřevech částic železné houby, obsažené ve strusce, a při kování.[2]

Na západním Slovensku byla odhalena výheň, která je popisována, jako širší vypálená mísovitá substrukce se zúženým středem (obr. 9), v jejímž okolí se nacházely kusy železné strusky a hrubě vykované železné lupy s nerovnoměrným obsahem uhlíku.[2]

V Čechách byly objeveny slitky kompaktní železné strusky v jamách halštatsko-laténské sídliště v Praze-Hloubětíně. Jde o typickou dýmařskou strusku plankonvexního tvaru, představující vylitek nějaké výhně; skládala se z 56%FeO, asi 11% Fe₂O₃ a 20% SiO₂. Podle nových poznatků ukazuje takový odpad na výrobu železa s velmi nízkým obsahem uhlíku.

Kovářská činnost byla zachycena přímo u hutnického objektu ve Smolenicích, kde byly zjištěny polotovary nožů a předběžně svařovaného železa a ocelové strusky.[2]



Obr. 9 - Železářský výhňový objekt z halštatského hradiště Molpír u Smolenic na západním Slovensku

Další objev, který stojí za zmínku, uskutečnil blanenský lékař a archeolog Jindřich Wankel, nazývaný pro své zásluhy také otcem moravské archeologie. Objev se nachází v údolí mezi Adamovem a Křtinami, ve střední části Moravského krasu. Tímto nálezem je kovářská dílna, která byla při archeologickém výzkumu objevena při jedné ze stěn jeskyně. Vstupní část Býčí skály představuje starou výtokovou Jeskyni Jedovnického potoka. Pro člověka byla přístupná už od starší doby kamenné, a to od vchodu do velké prostory Před síně, až do Býčí neboli Šenkův sifón se zdrojem vody, která ani v tehdejších podmínkách nezamrzala.[2]

Nálezy z kovářské dílny: sada kovářských kladiv, kovadlina, kleště a polovina železné hřivny z jeskyně Býčí skála na Moravě patří k vzácným evropským dokladům o počátcích kovářského řemesla.[3]



Obr. 10 - Bronzová figurka býčka z jeskyně Býčí skála

Jedním z předmětů výzkumu v Před síně jeskyně Býčí skála byla zřejmě figurka býčka obr. 6. Na sošce je možné dokumentovat použití železa v době, kdy bylo ještě vzácné. Celé tělo býčka je odlité z bronzu, pouze ozdobné prvky jsou ze železa. [3] Hliněné jádro při odlévání je patrné

trojúhelníkovým otvorem ve spodní části na břicho figurky. Soška býčka je 10,1 cm dlouhá a 11,3cm vysoká, s rourovitým otvorem v hlavě. Kromě figurky býčka vzbuzoval velký zájem železný dutý prstenec (obr. 7). Prsten, který z geometrického hlediska představuje dutý prstenec-anuloid, má vnější průměr 43mm, vnitřní průměr 20mm, hmotnost prstenu je 22g.



Obr. 11 - Halštatský prsten z jeskyně Býčí skála

Hutnické dílny svérázného typu pochází ze západního okolí Prahy pravděpodobně z doby laténské možná mladší. Z větší části jsou kovářské odpady, slitky okují a křemičitých látek; některé z nich nelze dnes identifikovat, ale z řady nalezišť jsou k dispozici hutnické strusky jakožto odpad přímé výroby železa, anebo přímo zbytky hutí a metalurgických pecí.

Pokud jde o české země, je známo přes dvě desítky lokalit s nálezy laténské železné strusky a sedm lokalit se zbytky pecí, jež lze použít k zjišťování rázu hutnického chodu.

Hutnická dílna z katastru obce Chýně u Unhoště náleží do pozdní doby laténské. Jde o tři jámové dílny, pravděpodobně kdysi překryté střechou, v nichž byly umístěny redukční pece jednoho typu se zahloubenou nístějí, hl. 48-52cm, průměr vždy kolem 30cm, výška šachty kolem 60cm. Jedna z okrouhlých jam (průměr asi 200cm) měla dvě protilehlé umístěné pece, další dvě jámy, s průměrem kolem 3m, měly po 4 hutnických pecích, umístěných v jedné části jámy, a po jedné vyhřívaje vždy v protilehlém pólu dílny. Vyhřívací zařízení se podobalo peci, mělo však široké sázecí otvory, skloněné šikmo z vnitřku dílny. Nálezy hliněných bloků s otvory svědčí o používání měchů k přívodu vzduchu do pecí.[2]

Jiný ráz měla huť objevená u Kostomlat na Nymbursku. Skládá se ze tří pecí ve volném terénu, tedy nikoliv v dílenské jámě; dvě z pecí byly sdružené. Všechny měly zahloubené nístěje a jejich šachty byly vypracovány z hlinitopísčitého podloží (průměr šachet v hrdle nístěje kolem 36cm, hloubka nístěje 20-24cm, zachovaná výška šachty přes 50cm). V těsné blízkosti pecí bylo podlouhlé ohniště o rozměrech 46x18cm, s hloubkou 24cm, který svým rázem i výplní souviselo s provozem pecí. Byla to vyhřívací výheň k zpracování železné houby nebo lup. Pece pocházejí z období z mladé doby laténské v Čechách.[2]

Přestože ve srovnání se starším historickým obdobím se v mladší a pozdní době laténské objem výroby železa pronikavě zvýšil, přece jen ráz hutnických pracovišť ukazuje, že metalurgie železa byla dosud malovýrobou, provozovanou v omezeném měřítku.[2]

V objevených hutnických dílnách se setkáváme s vyvinutým typem metalurgické pece. Jde o naleziště dílen v Mšenci, Chýni taktéž z doby laténské. Pec se zahloubenou nístějí, se vyznačovala nízkou válcovitou nebo kónickou šachtou, postavenou ze žáruvzdorné hlíny, nebo vypracovanou z podloží a opatřeným výmazem tak, že vyčnívala 60-80cm nad okolní terén. Pec měla kotlovitou nístěj o průměru asi 35cm, zahloubenou 45-50cm pod úroveň. U paty nadzemní šachty byla zasunutá cihla s otvorem o průměru 2-3cm, která sloužila jako výfučna od měchu. V prostoru nad dmychadlem se odehrával metalurgický proces, nístěj pod úrovní dmychadla sloužila jako recipient strusky. Konstrukce pece se zachovalou šachtou je možno vidět v Podbořanech.[2]

Ve Vyklicích na Ústecku byla nalezena kulovitá pec, nejspíše jediná tohoto druhu. Podle dochovaných údajů šlo o hliněnou kupoli se spodním průměrem 65cm a s komínovitě zúženou kychtou o průměru 26cm. Kopule byla zřejmě vytesána a vymazána v mohylovitém bloku jílu, svou koncepcí připomínají milíř. Má se za to, že v některých se metalurgický pochod soustřeďoval do několika ohnisek poblíž vzduchových forem, z jiných se mohla dařit i výpust strusky.[2]

Charakteristika dýmařského procesu

V Evropě dávní hutníci odcházeli na jaře do hor, kde si obstarali rudu a dřevěné uhlí a postavili si jednoduchý přístřešek, pod nímž prováděli redukci. Na podzim se vrátili se svými výrobky do nížiny. Po celý starověk a středověk se železo vyrábělo tzv. dýmařským procesem. Pec tvaru džbánu vysoká asi jeden metr se dole zaplnila slámou a roštím, nad to se sypaly vrstvy dřevěného uhlí a rud. Z boku se přes výfučnu dmychal do pece vzduch. Tyto pece sestávaly jako nadzemní, se zahloubenou nístějí nebo jako tzv. vtesané pece, které se budovaly ve vhodném břehu. Redukce probíhala při 1300 – 1350 °C, při této teplotě se roztavila struska, která protekla dolů, vyredukované železo však vytvořilo železnou houbu prostoupenou struskou. Pece byly původně hliněné a sloužily pouze pro jednu tavbu, při níž se vyrobilo několik kilogramů nanejvýš několik desítek kilogramů železa. Později se rozměry pecí zvětšovaly. Pece už byly z kamene (pískovce), vymazávaly se vhodným jílem. Na konci středověku se taky začaly přidávat struskotvorné přísady.[1]

Rudou pro středověké hutě na vrchovině byly hematity, které se spolu s dřevěným uhlím z místních porostů (nejčastěji buk, dub, bříza) vsázely do dýmařských pecí. Šlo o agregáty s

plochou nístějí a hliněnou šachtou. K jejich rekonstrukci přispěly půdorysy a fragmenty stěn. Pece měly vnitřní průměr 10–40 cm a byly vysoké přes 1 m. Tekutá struska se vypouštěla odpichovým kanálem, který byl zpravidla vyložen kameny. Vlastním produktem byla železná houba, která vytvářela lupu. Tu bylo nutné vyhřívat a zbavovat strusky, ale na běžných hutištích v kraji se vyhřívací výhň neuvádějí. Je odhadnuto, že na jednom hutišti s 25t strusky se mohlo získat z 30–40 t rudy a 5–15 t železa. Na stavbu pecí se spotřebovalo asi 2,5 t jílu.[2]

Hlavní vliv na vlastnosti železa (oceli) má obsah uhlíku. Výrobní pochod bylo nutné vést takový způsobem, aby se vyredukované železo nauhličilo. Rozpustnost uhlíku v železe při pokojové teplotě je zanedbatelná a proto tvoří uhlík s železem karbid. Reakci nauhličení popisuje rovnice (1)



Tuhý roztok železa s uhlíkem se nazývá ferit a rozpustnost uhlíku ve feritu při 20 °C je nižší než 10⁻⁷%. Vzniklý karbid železa (cementit) tvoří s feritem strukturní složku nazývanou perlit. Obsah perlitu ve struktuře rozhoduje o pevnosti a tvrdosti oceli.[11]

V 14. stol. se hutě začínaly stěhovat do nižších poloh na vodních tocích, kde se stavěly hamry a kde se zakládaly první dřevouhelné vysoké pece. Výzkumy v uvedeném kraji poskytly nejen zásadní terénní údaje o starých hutích, ale také množství vzorků, které byly podrobeny analytickým procedurám. Základem starověkých hutnických strusek je fayalit (Fe₂SiO₄).

V pojednání se dochází k závěru, že v místních hutích se produkovalo nízkouhlíkové, poměrně měkké, ale kvalitní železo. Hutnický kraj náležel k zemím panským majetkům šlechtických rodů, zejména hrabat a byl zdrojem jejich nezanedbatelných příjmů. Profesionální hutníci byli poddaní.[6]

Hutnictví železa v době římské

Po změně letopočtu zkušenosti v kovářství přetrvávají podle silně zažitého vzoru keltských řemeslníků. Redukce železa byly prováděny v několika typech zařízení, které byly rozděleny na čtyři typy:

- Tuklatský typ – hutnická pec se zahroubenou nístějí, která je pokračováním laténského
- Podbabský typ – vylepšená varianta předchozího typu pece se šachtou vysokou až 1 m
- Loděnický typ – nadzemní šachtová pec bez zahroubené nístěje
- Slánský typ – zemní kuželovitá pec s umělým přívodem vzduchu [6]

1.2. Hutnictví železa v době Velké Moravy

Typickým příkladem je velkomoravská huť nalezená v Želechovicích u Uničova, pro kterou hutníci těžili na severní Moravě křemitou hematit-magnetitovou rudu. Další ložiska se nacházela na Drahanské vrchovině, které byly chemogenního původu, a tvořil je především goethit s limonitem. Kromě rudy byla však velká i spotřeba dřevěného uhlí, což mohlo vést ke změně skladby lesních porostů. Důležitý byl i výběr hmot na tvorbu pecí. Většinou se používal jííl mísený s pískem, dosahující potřebné žáruvzdornosti.

V Moravském krasu se stal snadno dostupným materiálem kaolinický jííl. Pece se vyznačují jedním důležitým prvkem konstrukce, jíž je podkovovitá dutina v zadní stěně šachty, která spolu se sklonem násypné části šachty pece zlepšovala přímou výrobu ocele v peci. Železo se posunutím do dutiny ocitlo z dosahu oxidujícího proudu vzduchu, a tak se mohlo snáze nauhličovat v klidnějším a dostatečně žhavém prostředí. Širokým otvorem vpředu se dle předpokladů odpichovala struska a během první fáze tavicího procesu tento otvor zřejmě sloužil i pro mohutný přívod vzduchu pro předehřátí pece. Po uzavření otvoru se dále vzduch vhněl zadní týlovou formou.

V Želechovicích bylo odkryto 24 železářských pec. Tyto pece byly datovány do 8. až na počátek 9. století. Pece typu Želechovice (obr. 22) ovšem měly jednu nevýhodu a to, že nebyly schopné dalšího vývoje, neboť u nich nebylo možné zvýšit kapacitu tavného prostoru.

Vestavěné pece s tenkou hrudí, tímto termínem lze označit typ zapuštěný ze tří stran do rostlé hlíny. Pouze přední část je vymodelována z plastického jíilu. Tato pec se vyznačuje hned několika výhodami zároveň. Nejenže měla velmi dobré tepelné vlastnosti díky celkovému zabudování do země, ale také bylo snadné obnovit výmaz této pece díky formovému otvoru ve spodní části pece. Měla i možnost odpichu strusky při tavně, což lze označit za poměrně pokročilý způsob vedení hutnického procesu. Tekutost strusky závisela jednak na teplotě, ale i na chemickém složení rudy či váhovém poměru rudy s palivem. Při vyšším poměru paliva k rudě vznikaly strusky s nižším obsahem železa, které nebyly tekuté. Jelikož se žádné struskotvorné přísady nepřidávaly, tak nejvhodnější bylo přisazovat rudu a palivo v poměru 1:1.[2].

Přítomnost vysokého obsahu FeO ve strusce a nízká teplota dovovala odfosfoření železa, kterou můžeme popsat schematickou rovnicí (8).



Na vysoký obsah fosforu ve struskách z uvedené doby upozornil Stránský [9]. Po zahájení výroby tekuté oceli (plávkové oceli) Bessemerovým postupem k odfosfoření uvedený způsobem nedocházelo a postup neumožňoval zpracovat fosforaté rudy. [6]

Co do objemu výroby byly počátky slovanského železářství zřejmě skromné. V hmotné kultuře 6. a 7. století se setkáváme nejčastěji s drobnými předměty ze železa. Jsou to nože, průbojníky, ocílky, udice, kování vědérek, hřeby nebo hroty šipek a kopí.

V kovářském zpracování lze postřehnout pozvolné pronikání pokrokových metod v konstrukci čepelí, v používání ocelových lamel navařovaných na ostří, v tepelném zpracování. Tyto vyspělejší techniky jsou doloženy metalografickými rozbory předmětů nejstarších slovanských kultur. Nicméně pro studium samých počátků metalurgie železa a její technologie a pro posouzení rázu hutnických zařízení je dost málo pramenů.[2]

Dosud nejsou známy žádné hutě, které by bylo možné spojovat s dobou příchodu Slovanů.

Na konci 8. století v době velkého politického a hospodářského rozmachu, se výrazně zvýšila potřeba železa a bylo nutné hledat nové zdroje železné rudy a dostatek dřeva pro milířování. Slovanské hutnictví železa se projevuje stejným typem pecí i hutí jako v Moravském krasu.[2] V hutích střední části Moravského krasu se objevují dva nové typy pecí. Jedním typem je vestavěná pec s tenkou hrudí, druhým typem je nadzemní pec šachtová s mělkou nístějí a velkým hrudním otvorem.

Situace se změnila v 9. století, které je charakterizováno hospodářským rozkvětem a expanzitou ve stěně pece.

Dílnu v Moravském krasu mohl řídit jeden člověk. U pecí mohli pod jeho vedením pracovat další muži, kteří obsluhovali měchy a vsazovali do pecí dávky rudy a dřevěného uhlí. V čase těchto taveb jiní pracovníci opravovali vnitřní výmazy pecí, které byly momentálně mimo provoz, a připravovali je k další tavně. Jeden z mužů se musel věnovat zpracování vytaveného houbovitého železa v železnou lupu. Šlo o práci velmi specializovanou, kterou prováděl zřejmě kovář, jemu k ruce bylo zapotřebí dalšího pracovníka, který se staral o provoz kovářské výhně, do níž se dmýchalo pomocí malého měchu. Už z tohoto výkladu je patrné, že pro práci vlastní hutě bylo zapotřebí více pracovníků. K tomu je zapotřebí zmínit a připočítat horníky, uhlíře a podobně.[2]

Rozměry redukčních pecí se zvětšily až později, po poznání možnosti využití energie vodních toků. Vnitřní průměr pecí se pohyboval kolem 50cm, výška šachty se pohybovala do 150cm,

tady je to těžko doložitelné. Jinak je tomu u pecí, které byly vtesány a vestavěny do rostlé zeminy.

Ručně se svářkové železo rafinovalo celá staletí. Přitom velikost výrobku byla omezená. Nadlidskou dřinu odstranil až vynález kovacího stroje – hamru. Kovací stroj zmechanizoval výrobu, čímž umožnil zvýšit její objem. V našich zemích jsou nejstarší zmínky o hamrech z 1. poloviny 14. století. Na potocích a řekách jich ve středověku bývaly stovky. Stavěly se v blízkosti železářských pecí, jejichž produkci dále zpracovávaly. Velká část jich byla v Podbrdském kraji, kde se koncentrovala výroba železa díky všudypřítomné rudě – hematitu (krevelu). Těžila se v Ejpovicích a v malých šachtách po celém kraji. Nízkým redukčním pecím se říkalo „vlčí“ a železné hroudě vzniklé redukcí „vlk“ nebo „lupa“. Podbrdsko nazývali Železným srdcem Království Českého.[2]

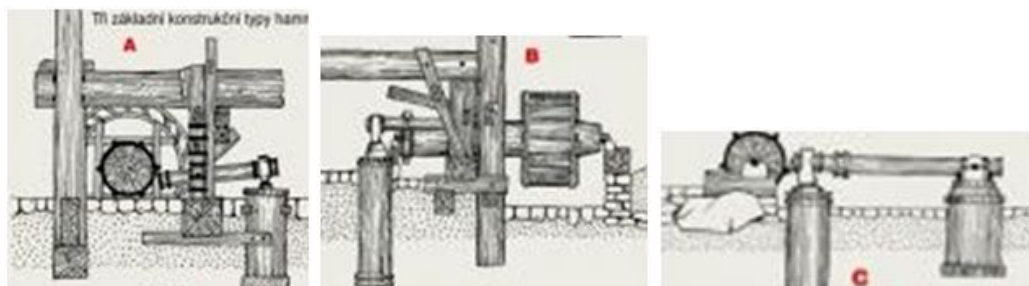
Množství technických názvů pochází z němčiny, i výraz „Hammer“, který v němčině znamená kladivo jako nástroj, také však kovací stroj neboli buchar i budovu, v níž je instalován. Protože hamry byly budovány v těsné blízkosti redukčních pecí, nazýval se tak též celý železářský závod – huť i se zázemím. Vlastnímu stroji se pro jeho nápadnou tvarovou podobu říkalo „kobyly“.[5]

Známe tři konstrukční varianty kovacího stroje: *Chvostový hamr* obr.12. A. je v podstatě dvojzvrtná páka tvořená několikametrovým, masivním dubovým prizmatem, na jehož jednom konci je nasazena ocelová kovací hlava o váze až 300 kg. Hlava spočívá na kovadině. Nad druhým koncem páky, dubového trámu, se otáčí ozubené kolo nasazené na prodlouženém hřídeli kola vodního. Ozuby bývají zpravidla čtyři a jsou rozmístěné po obvodu kola v úhlu po 90 stupních. Když pak ozub na točícím se kole doběhne k trámu, stlačí ho dolů. Tím se konec s kovací hlavou zdvihne, a když ozub trám opustí, kladivo padne zpět svou vahou na kovadinu. Celý proces připomíná „tahání zvířete za ocas“, proto stroj nese poetický název – hamr chvostový. *Hamr s bočním nadhazováním* obr.12. B. je v principu stejný, avšak na rozdíl od prve uvedeného je to páka jednozvrtná, kterou ozub kola pravidelně nadhazuje zespodu, asi v polovině její délky.[9]

Třetí konstrukční variantou je *hamr s čelním nadhazováním* obr.12. C.. Je to rovněž páka jednozvrtná, kde ozub kola nadhazuje „čelo kobyly“. Efekt je u všech tří variant prakticky stejný. Všechny varianty mají společný konstrukční prvek – péro, což je pružný jasanový výřez přitlačující dubový trámec (páku) do polohy, kdy hlava spočívá na kovadině. Tím je dynamický účinek kovací hlavy maximálně zesílen. Dřevo stroje, včetně habrového hřídele a korečkového vodního kola, vydrží maximálně 100 let.

Vodní kolo bylo motorem středověku. O mlýnských kolech jsou zmínky z konce doby římské. Vynálezem raného středověku je vodní kolo na svrchní vodu, tzv. korečkové, které je výkonnější než kolo na vodu spodní. Jako u všech vodních děl, voda se přivádí náhonem z potoka nebo řeky do retenční nádrže (hamerského rybníka).

Budovy hamrů jsou stavěny vždy pod úrovní hladiny, aby bylo možno využít efektu korečkového kola. Nádrž je opatřena propustí – šoupětem, umožňujícím regulaci průtoku vody do koryta (vantroků). Přebytečná voda přepadá kavernou a odtéká zpět do mateřského toku. Vantroky jsou sroubeny z trámů a fošen (nejlépe jedlových) a přivádějí vodu nad jednotlivá kola, jejichž hřídele jsou osazeny v ložiskách (původně dřevěných, později kovových) ve zdech stavby. Vyzděnému dvorku pod korytem, kde se otáčejí kola a kudy odtéká využitá voda, se říká „lednice“. Vantroky pojmu naráz několik desítek tun vody a v jejich dně jsou „okna“, která je možno jednoduchým pákovým mechanismem ovládaným z vnitřku budovy otevřít, aby voda proudila na korečky jednotlivých vodních kol. Byl vynález opravdu revoluční, neboť nahradil práci desítek silných paží v jedné směně.[9]



Obr. 12 Tři základní konstrukční typy kovacího bucharu poháněného vodním kolem: A Chvostový, B Bočně nadhazovaný, C Čelně nadhazovaný

2. Hutnictví železa v českých zemích a na Slovensku za feudalismu

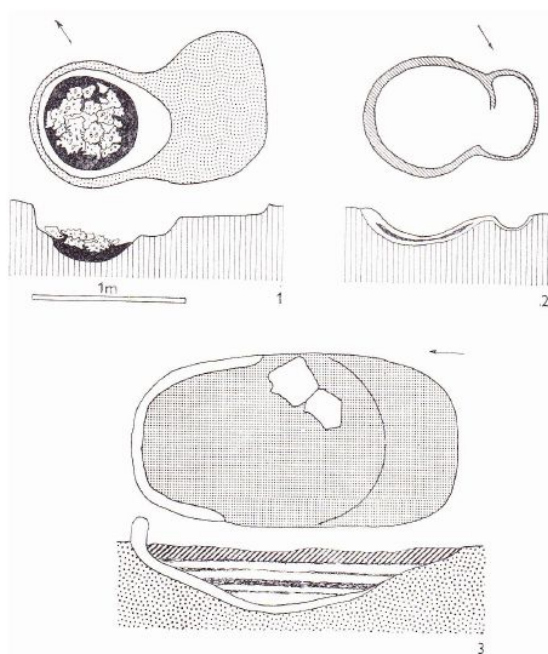
(10. století až 30. léta 19. století)

2.1. Technologie raně středověkého železářství

Hutnická výroba v raném středověku se na jedné straně stávala záležitostí menších společenských jednotek, na druhé straně se stále více koncentrovala do určitých krajů.

Při charakteristice pochodů se proto omezíme jen na několik hlavních rysů. Obecný výskyt typických trubkovitých výfučů z žáruvzdorné keramické hmoty (délka 15cm, světlý průměr cca 20mm) signalizuje užívání nějakého standardního typu měchu, pravděpodobně výkonnějšího. Lepší dmychání umožňovalo poněkud zvýšit teploty, lépe tavit rudu a vypouštět strusku a zvýšit výtěžek železa z jedné tavby. Ani zavádění vápnitých nebo křemičitých struskotvorných přísad nelze prokázat; jediným druhem přísady mohla být – jako ve starších dobách – odpadová struska bohatá na FeO.

Získané železo bylo nutno vyhřívat a zbavovat strusky, tak jako od počátku železářství. Vyhřívací výhňe raného středověku měly buď kotlovitý otevřený tvar a okrouhlý půdorys (průměr 80-100cm, hl.30cm), anebo byly vanovité protáhlé. Aby veškeré železo přešlo do austenitického stavu a aby se struska dobře roztekla, bylo třeba dosáhnout žáru kolem 1100 – 1200°C, proto zařízení muselo pracovat s dmychadlem. Keramické struskové výfučny jsou obvyklým průvodním nálezem i u vyhřívacích dílen (obr. 13). [2]



Obrázek 13- Slovanské a středověké vyhřívací výhňe

Závěrem je třeba poznamenat, že podle metalografického výzkumu středověkých železných předmětů se nyní častěji užívalo velmi tvrdých uhlíkových ocelí pro břité nástroje. Předpoklady pro výrobu omezeného množství oceli přímo v peci zřejmě byly, zbytek byl patrně získáván druhotnou cementací lamel. Mimo to se s ocelí nepochybně obchodovalo a kováři, zejména městští, měli možnost si ji opatřit. Technika rukodělného kovářství, které se začalo rozpadat na specializovaná odvětví (nožířství, nástrojařství, zbrojařství), dosáhla patrně ve 13. století svého vrcholu. Dominuje v ní bezchybné navařování velmi tvrdých ocelí na železný základ nástrojů.[2]

2.2. Období přímé výroby železa

Výhňové redukční pece

K redukci železné rudy v malých výhňích nebo v nízkých šachtových pecích se vystačilo s větrem, vháněným do pece ručními měchy. Stavba i provoz takové pece byly levné, a proto se tento typ udržel patrně po celé období přímé výroby železa, zvláště v odlehlých místech s rudou a dostatkem dřeva, jako pomezích hor. V místních pojmenováváních se však neseťkáváme s výrazem „výheň“.

Při přímé výrobě železa vzniká redukcí rudy kujné železo v těstovitém stavu, ale struska je tekutá. Pochody probíhající při přímé výrobě v peci osvětlilo teprve v posledních letech studium hmotných památek, tj. pecí, strusky, výrobků, uhlí a podobně, a zvláště pokusy v modelech starých pecí. Prokázaly nesprávnost názoru, že ve starých pecích na přímou výrobu vznikalo při nižších teplotách, tj. mezi 700-800°C. Redukční pochod sice začíná při teplotě 400-600°C, ale ke vzniku kujného železa je třeba tekuté strusky, to znamená teplot zpravidla 1200 až 1300°C. Uhlí v peci se spaluje na CO₂ a ten se rozzhaveným uhlím redukuje na CO, který redukuje postupně kysličník Fe₂O₃ na kysličníky nižší a na železo. Tato nepřímá redukce probíhá při teplotách 400-1000°C. Přímá redukce uhlíkem probíhá při teplotách nad 1000°C. Redukce rudy je postupně obtížnější. Snadno proběhne redukce Fe₂O₃ na Fe₃O₄, ale ke vzniku FeO je třeba redukčních plynů s 25% CO a k další redukci na železo plynu nejméně se 70% CO. K nauhličení železa může dojít teprve tehdy, když je většina FeO zredukována na železo. Nepřímou redukcí se některá zrna zredukuje jen na FeO, jiná na železo a některá se mohou nauhličit na ocel nebo struskové železo. Při přímé redukcí, která probíhá v dolní části pece při teplotách nad 1000°C, vznikalo železo, které se nauhličovalo. Ve spodní části pece se zrna vzájemně ovlivňovala, partie bohatší na uhlík mohly redukovat zbylou rudu nebo strusku. Konečná struska, jež vnikala při přímé výrobě, měla bod tání 1000°C. Protože byla tekutá, snadno se z ní oddělovalo železo. Strusky obsahovaly více než 40% železa, většinou jako FeO.

Ruda, ze které se mělo získat železo, musela mít více železa než strusky, tj. nad 40%. Proto musely být rudy pro dýmačskou práci obohacovány a získané strusky byly bohatou surovinou. Vyrobené železo bylo známo svou měkkostí a snadnou svařitelností. Rudy s vysokým obsahem fosforu byly nevhodné, dávaly železo lámavé za studena. Obsah manganu v rudě usnadňoval nauhličení a tím vznik oceli.[10]

Šachtové redukční pece

Rudy horších jakostí byly zpracovávány v šachtových pecích, do nichž se vešlo značné množství rud a uhlí. I v tomto případě byla ruda drcena do velikosti ořechu. Pece měly měchy poháněné vodním kolem, celé zařízení bylo 3-4m vysoké. Vítr byl dmychán do níže pece tak, že forma dmychadla sahala až do středu pece. Ruda se redukovala podle jakosti buď jednou, nebo dvakrát, až se získalo železo, které se dalo kovat bucharem. Někdy se nepodařilo ani při sebepečlivější práci vyrobit měkké železo; příčinou byly nečistoty obsažené v rudě. Podle staré technologické literatury bylo tedy vyráběno železo ze snadno redukovatelných rud ve výhních, z rud chudých a těžko redukovatelných v šachtových pecích.[10]

Vodním kolem poháněné buchary – hamry (obr. 14 a 15) – se u nás prosazují již v 1. polovině 14. století, přestože jsou doloženy až od poloviny století. Zvýšení výroby, které vyžadovala doba, nemohla zajistit šachetní pec s měchy poháněnými vodním kolem, neboť ta se dala nahradit větším počtem výhní, ale vodní buchar čili hamr, neboť umožnil podstatné zvýšení výroby základních železných výrobků.[11]

České prameny neznají šachtovou ani kusovou pec. Naše prameny znají jedinou šachetní pec, a to dýmačku. Nevíme, jaká byla výška dýmačky ani jaký byl vnější a vnitřní tvar. Nebyla asi všude stejná a její tvar ovlivňovala zvláště ruda, která v ní byla zpracována. V každém případě byla česká dýmačka pec šachtová, zděná. V dýmačce se dýmalo železo, spodní část pece se nazývala nístěj, vyzdívala se a vykládala kameny a pískem. Nístěj byla přístupná hrudí pece, která byla v přední stěně pece. Byla hliněná a vylomila se, když se vytahovala hrouda. V této stěně musel být také otvor na vypouštění strusky. U nízkých pecí se vytahovala hrouda horním otvorem pece kleštěmi. V zadní části pece proti hrudí byly měchy. U každé dýmačky byly dva měchy s jednou formou. Měch byl stlačován palci na hřídeli vodního kola a zdvihán pákou; na jednom delším rameni bylo závaží a na kratším rameni řetěz, upevněný na horní desce měchu. K pohonu měchu stačilo malé kolo, k pohonu bucharu bylo třeba kola velkého hamerního. Měchy se mazaly sádlem a často se opravovaly. Hrouda železa (dejl) se nejprve zbavila strusky

kováním a dřevěnými kladivy, pak se kostkovala a rozkovala, tj. rozsekala na menší díly. Kostkovalo se ostrými železy pod bucharem.

Části dejlů se vyhřívaly ve vyhřívačce a vykovávaly na základní tvary železa, jako byly šíny a štafce. Buchar s vyhřívačkou byl zpravidla v samostatné budově, zvané hamr.[11]

K bucharu patřila kovadlina či nakovadlí; byla nasazena na dubový špalek, zvaný štok. I kovadlina se ocelovala, neboť musela být tvrdá a pevná. Štok značně trpěl, a proto byl často vyměňován. Vodní kolo stálo v přístavku zvané lednice. Do hamerní budovy patřil i panšlekl na vykovávání pásků. Častým nářadím byly hamerní kleště, sekáče, stehle železná, lopatky železné, kladívka malá, mlátec, sekáče, nakovadlí velké. Provoz železné hutě byl závislý na stavu vody, která hut' poháněla. Proto se počítalo jen s 35 provozními týdny, např. Stará hut' u Adamova, kde jest písemná zmínka.(obr. 16) [3]



Obrázek 14 a 15: Hamr v Dobříněvsi – menší kladiva

V hutí se zužitkovala i struska. Drtila se, probírala a vybírala se z ní kovová zrna. Struska se drtila ve stupačce čili ve stupání pěcholy, nazývanými pichy; získané železo se nazývalo kladce. Strusky se také podsívaly, tj. upravovaly pro rudní vsázku do redukční pece.

Výrobkem české dýmačky byla hrouda kujného železa. Někde se snad podařilo získat více nahličené tvrdé kujné železo, ale naše prameny nám nedávají sebemenší náznak toho, že by v české dýmačce vzniklo surové železo. [9]

Kusová pec

V kusových pecích v alpských zemích vznikala vedle měkkého kujného železa také ocel a surové železo, které se vypouštělo spolu se struskou. Technologie kusových pecí se vyvíjela tak, že napřed vznikaly malé hrudy – o hmotnosti asi 50kg – měkkého železa a žádného tekutého surového železa, později hrudy tvrdého železa a tekutého surového železa. Konečně

byl technologický postup řízen tak, aby vznikla hrouda a žádné surové železo. Samovolně tak přecházela výroba lup ve výrobu surového železa, a tím také přecházelo vyhřívání lupy, sloužící původně k odstranění strusky, ve zkujňovací pochod. Kusové pece neměly nikde tak velký význam jako v alpských zemích, a proto jinde přecházelo dříve k nepřímé výrobě železa. V našich zemích k tomu docházelo kolem roku 1600.[4]

2.3. Období nepřímé výroby kujného železa

Vysoká pec

První vysokou pec v českých zemích postavil r. 1525 v Králově Dvoře Jindřich Kašpar ze Sartu. Byl zkušený slévač zvláště ve výrobě litinové munice. Zde však dlouho nevydržel a železářnu prodal. Zakoupil strašnickou huť, jen výhně a zde postavil nové do té doby v Čechách nikdy nepoužívané vysoké pece, v nichž taval rudu a sléval housky; těchto housek vyrobil 14kusů týdně a jedna houska vážila zhruba 4 centy. Druhou pec dal postavit mistr Jindřich k vyhřívání železa, z něhož sléval různé umělecké kusy, jako kamna, kotle, hrnce koule a jiné věci. Na místě staré výhně, v nichž byly vykovávány placky na různé malé železné předměty, dal postavit dva hamry, každý s dvěma výhněmi k vykovávání housek na malé předměty, tak je popsána strašická huť. (bohužel památka chátrá, při dnešních dotacích z fondu UNESCO nezůstávají na tuto památku peníze)

Železná huť se skládala z vysoké pece (obr. 23), z jednoho nebo dvou hamrů, ze dvou dtíren, na rudu a na strusku. Hamr sloužil ke zkujňování surového železa a k výrobě tyčoviny, obsahoval proto jednu nebo dvě zkujňovací výhně, buchar poháněný vodním kolem a kovadlinu.

Již první české vysoké pece měly svůj obvyklý tvar: byly to dva komolé čtyřboké jehlany, postavené na sebe většími základnami, rozporem pece; hořejší jehlan se nazýval od počátku šachta a byla vyšší než šířka rozporu. Podstava byla úzká a vysoká, její dolní část od roviny forem se nazývala nístěj. Šachta pece se vyzdívala velkými tesanými kameny, byla obezděna silným zdívkem, které ji také tepelně izoloval.

Pec byla přístupná jen v úrovni podstavy. Staré dřevouhelné vysoké pece musely mít otevřenou hrud', neboť strusky byly husté a působily potíže.

Podstava pece byla na straně odpichu prodloužena mimo pec v otevřené před pecí, které bylo přehrazeno hrázkou; přes ni se přetavovala struska, zatímco tekuté surové železo bylo vypuštěno odpichovým otvorem u paty hrázky.

Hutníci si brzy byli vědomi významu tohoto tvaru podstavy. Během vývoje vysokopeční technologie byly u nás do konce 18. století dosaženy tyto poměry:

Výška pece	5,6-6,8m	7-8,5m	Nad 9m
Výška podstavy	0,96m	1,6m	1,9m

Na podstavě spočívala sedlo-zarážka, která se dělala ze žáruvzdorných tvárnic nebo z kamenů. Později se u nás výška sedla snižovala. To byl důsledek názoru tehdejších odborníků, že široký rozpor a nízké sedlo zastaví hmoty klesající šachtou a umožní prodloužit dobu prodlevu, a tím i náležitou redukci rudy.[1][2]

K dmychání větru do vysoké pece i do výhni se u nás používalo v 1. polovině 17. století kožených měchů; u zkujňovacích výhni se udržely někde až do 19. století. Píšťala měchů byla železná. Kůže se mazaly lojem a mýdlem a přibíjely se k dřevěným deskám hřebíky.

Od poloviny 18. století se začala v železárnách užívat skříňová či truhlová dmychadla. Byly to čtyřboké hranoly, 1-2m vysoké, nahoře otevřené. V nich se pohyboval píst se sacími záklopkami. V 19. století byla skříňová dmychadla nahrazena litinovými dmychadly válcovými. V čelech válců byly záklopkky či ventily sací i výtlačné, které se otvíraly a zavíraly podle pohybu pístu, a buď nasávaly, nebo vypouštěly vítr.[11]



Obrázek 16- Stará huť u Adamova[5]

3. Historický vývoj průmyslové výroby oceli

3.1. Složení oceli, základní suroviny pro výrobu oceli

Ocel je slitina železa s uhlíkem a dalšími kovovými a nekovovými prvky.

Ocel obsahuje:

- prvky žádoucí: úmyslně přidávané do oceli za účelem zlepšení jejich vlastností:

Mn, Si, Cr, W, Mo, V, Ti, Al, Nb a jiné

- prvky nežádoucí, které se do oceli dostávají během metalurgického pochodu a převážně zhoršují její vlastnosti: S, P, H, N, O a jiné

Vodík, dusík a kyslík jsou atomárně rozpuštěné plyny v oceli. Vodík zvyšuje křehkost a snižuje odolnost proti korozi-je vždy nežádoucí. Dusík způsobuje stárnutí oceli-nárůst křehkosti a ztrátu plastických vlastností oceli v důsledku vzniku nitridů v průběhu explotace oceli. Kyslík ve vyrobené oceli je ve formě vměstků a atomárně rozpuštěný. Opět zhoršuje vlastnosti ocelových výrobků.

Při výrobě oceli je kyslík základním oxidačním médiem, které zajišťuje zkujňování surového železa. Oceli obsahují do 2,07 hmot. % uhlíku, litiny obsahují nad 2,07 hmot. % uhlíku. Oceli a litiny patří mezi technické slitiny železa. Oceli jsou v zahřátém stavu kujné, litiny za studena o po ohřevu jsou křehké.[12]

Základní suroviny

Surové železo je produkt zpracování železných rud ve vysoké peci. Ocelářské surové železo obsahuje: C: 4,3-4,6 hmot%,

Mn: 0,5-0,7 hmot.%,

Si: 0,5-0,7 hmot.%,

P: 0,1-3,25 hmot.%,

S: 0,010-0,025 hmot.%

Tato chemická složení surového železa odpovídají vysokým pecím v České republice. Slévárenská surová železa mají vyšší obsah: Si, P, Mn.

Ocelový odpad zanáší do oceli prvky používané k dezoxidaci a legování oceli i tzv. stopové prvky, které zhoršují vlastnosti oceli i v nepatrných koncentracích (As, Sb, Sn, Pb). Ocelový odpad se musí třídit podle přítomných legur. [12]

3.2. Počátky průmyslové výroby oceli

Historicky nejstarší průmyslový způsob výroby oceli představuje výroba oceli v konvertorech: 1855 – Henry Bessemer patentoval technologii výroby oceli foukáním vzduchu do tekutého surového železa dmyšnami ve dně konvertoru s kyselou vyzdívkou. Určujícími složkami procesu byl obsah Si v surovém železe a oxid křemičitý ve strusce. Zkujňované surové železo nemohlo být odsířeno ani odfosfořeno. Vzhledem ke krátké době zkujňování (cca 20minut) byla výrobnost konvertoru (o tonáži až 30t) mimořádně vysoká.[13]

1878 – Sidney Gilchrist Thomas patentoval zásaditou vyzdívku konvertoru. Tato vyzdívka umožňovala odfosfoření a odsíření oceli pomocí bazické strusky, ve které dominantní složkou je oxid vápenatý. Omezující podmínku Thomasova zásaditého pochodu bylo složení surového železa vyžadující vysoký obsah fosforu 1,7 až 2,5hmot. % zajišťující zdroj tepla k ohřevu vsázky, protože obsah křemíku byl v tomto případě limitován. Oxidací fosforu se zlepšila tepelná bilance pochodu, který je oproti Bessemerovu pochodu charakterizován vyšším podílem strusky.

Oba typy konvertorů využívaly jako zkujňovací médium vzduch. Dusík ve vzduchu chladil ústí dmyšen, avšak zvyšoval obsah dusíku v kovu zvláště v případě práce pod zásaditou struskou. Současně dusík zhoršoval tepelnou bilanci tavby, proto konvertory mohly zpracovávat pouze omezené množství ocelového odpadu.[13]

V českých zemích Rakouska-Uherska byl Bessemerův pochod poprvé zaveden v roce 1865 ve Vítkovicích a první Thomasův konvertor byl postaven v roce 1879 ve Vojtěšské huti kladenských železáren.

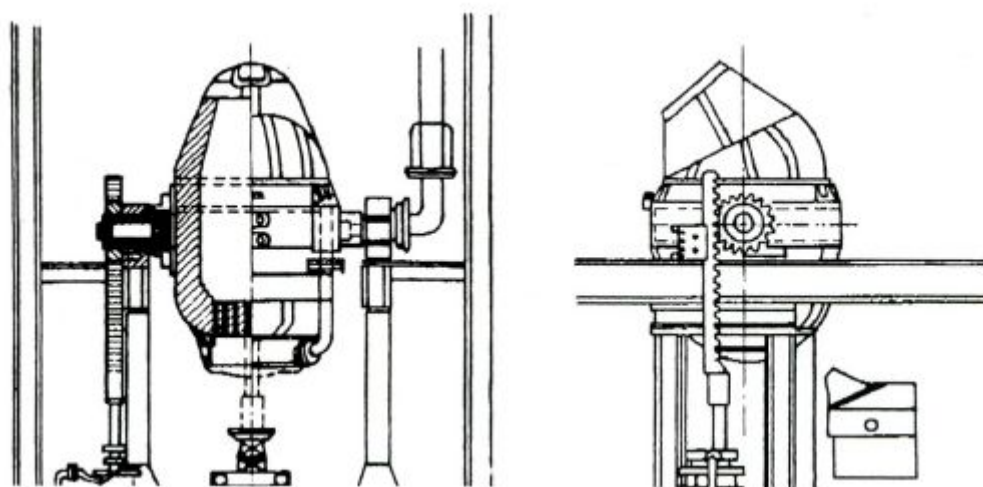
Výroba oceli v Bessemerových konvertorech (obr. 17) byla ve 20. letech minulého století zcela vytlačena Thomasovými konvertory. Poslední tavba na Thomasových konvertorech se uskutečnila v roce 1978 v ocelárně Poldi Kladna.

Vývoj Nístějových pecí, označovan jako Siemens-Martinské, probíhalo současně s prvními konvertory.[13]

1864 – Pierr Emilie Martin spojil své hutnické vědomosti s patentem Fridricha Siemense a použil jeho regenerativní topení k dosažení potřebných teplot i u pecí vyrábějící ocel ze surového železa a ocelového odpadu v plamenné peci. Tyto pece zajišťovaly ohřev vsázky spalováním topných plynů (vysokopecní, koksárenský, generátorový) vzduchem předehtřivaným v generátorech.

Regenerační komora se vyhřála na 1100 až 1300°C teplem spalin odsátých z pece. Po reverzaci směru toku se jak vzduch, tak i topné plyny v regenerační komoře přehřívaly a následně v hořících pece došlo k jejich spalování a uvolněné teplo bylo využito k ohřevu vsázky.

Z počátku se pracovalo v pecích s kyselé vyzděných a po roce 1878 i Siemens-Martinské pece (obr. 18) začaly využívat zásaditou vyzdívku. Nevýhodou těchto pecí v procesu oproti konvertorům byla podstatně delší doba tavby, zpočátku 20 hodin, v průběhu let po intenzifikacích procesu 15 hodin a méně, ale nikdy pod 8 hodin.



Obrázek 17 - Schéma Bessemerova konvertoru

Výhody Siemens-Martinského procesu:

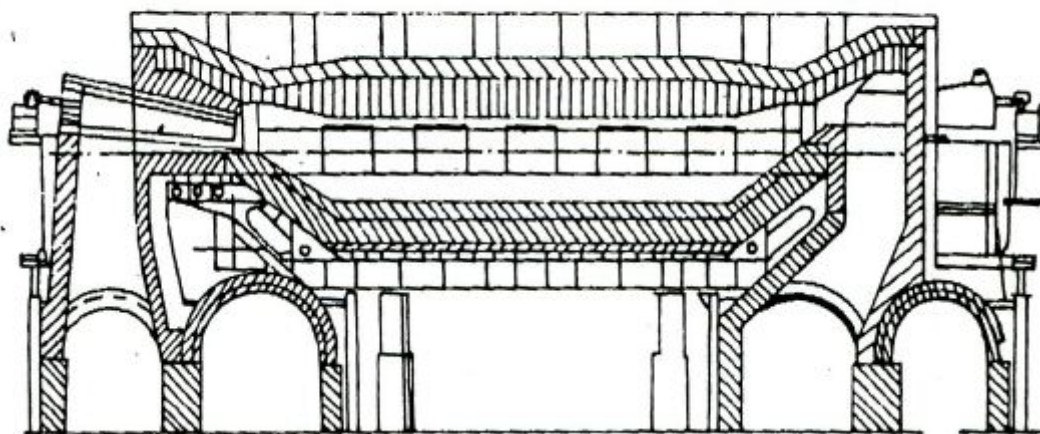
- možnost zpracování libovolného množství ocelového odpadu
- mnohem menší závislost na složení surového železa
- možnost vyrábět i náročné jakosti oceli v době, kdy ještě nebyly známy metody sekundární metalurgie

Proto se stal Siemens -Martinský pochod na konci 19. století a v 1. polovině 20. století úspěšným konkurentem konvertorových pochodů. U nás byl martinský pochod zaveden v roce 1871 ve Vítkovicích a posléze i v ostatních ocelárnách.[13]

1900- Na počátku 20. století se začala při výrobě oceli uplatňovat i elektrická energie v elektrických obloukových pecích (EOP) a současně i v indukčních pecích (EIP). V roce 1901 pomocí elektrického oblouku roztavil výše uhlíkovou ocel Francouz Paul Louis Heroult a současně Ital Stassane. V témže roce Švéd Kjellin zkonstruoval i první indukční pec. Vznik

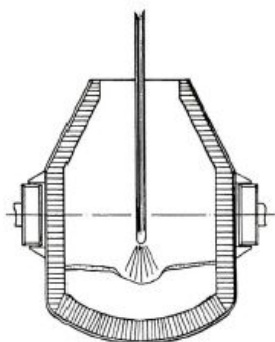
nové technologie souvisel jednak s potřebou zpracovávat stále rostoucí množství ocelového odpadu. Dalším stimulem výroby byla i rostoucí potřeba legovaných ocelí. V českých zemích se začala elektroocel vyrábět v letech 1908-1914 v Poldině huti v Kladně a ve Vítkovicích.

1952- Ke konvertorové oceli se oceláři vrátili na kvalitativně vyšší úrovni v roce 1952, kdy byla uskutečněna první tavba v LD konvertoru. (obr. 19)



Obrázek 18 - Schéma Siemens-Martinské pece

LD proces využívá ke zkujňování oceli čistý kyslík, který je dmýchán pod hladinu lázně horemtryskou umístěnou kolmo v ose konvertoru. V důsledku tohoto nového principu je oblast nejvyšších teplot uzavřena v objemu kovu, a tudíž dostatečně vzdálena od vyzdívky. Dmýchání čistého kyslíku dále umožnilo zvýšit podíl ocelového odpadu ve vsázce cca na 25% a výrazně snížit objem vznikajících spalin i obsah dusíku ve vyrobené oceli. Nezbytnou podmínkou rozvoje kyslíkových pochodů při výrobě oceli je technologicky zvládnutá průmyslová výroba levného čistého kyslíku, což bylo v Evropě splněno již během 2. světové války a i proto se Evropa stala kolébkou kyslíkových pochodů.[13]



Obrázek 19 - Schéma LD konvertoru

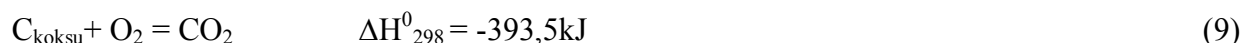
Zužování sedla směrem dolů je v souladu se zmenšováním objemu vsázkových surovin při jejich měknutí a tavení. Těsně pod sedlem v nístěji jsou umístěny výfučny. V prostoru před výfučnami probíhá spalování paliva a nachází se oblast s nejvyššími teplotami ve vysoké peci. Rozšíření profilu vysoké pece nad výfučnami odklání vyzdívku od proudů nejteplejších plynů a tím se dosahuje vyšší životnosti vyzdívky.

Nístěj pece je spodní válcová část, v níž se hromadí surové železo a nad tím struska. Surové železo i struska se vypouštějí odpichovými otvory. Vyzdívka nístěje se zhotovuje z uhlíkových materiálů. Ostatní části pece jsou vyzděny šamotovými tvárnicemi. Podle pracovní teploty se volí jakost šamotu. Pro nejvyšší teploty se volí jakostní vysoce hlinitanové šamoty.[14]

4.2. Základní reakce probíhající ve vysoké peci

Spalování paliva

V oblasti výfučen se spaluje uhlík koksu kyslíkem z předeřátého vzduchu. V prostoru výfučen vysoké pece probíhají následující reakce



V oblasti vzdálenější od výfučen při nedostatku kyslíku probíhají reakce



V důsledku průběhu reakce (11) je veškerý volný oxid uhličitý, mimo pásmo průběhu oxidačních reakcí, přeměn na oxid uhelnatý. Uhlík v koksu a zejména oxid uhelnatý jsou základními redukčními látkami ve vysoké peci.[14]

Termická disociace oxidů

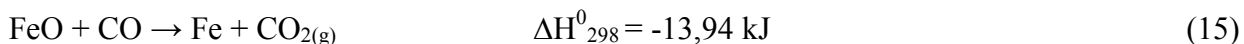
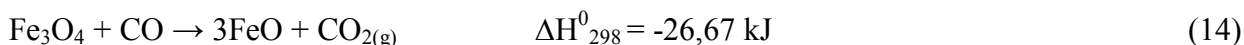
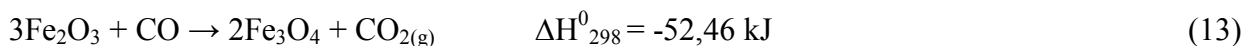
Vyšší oxidy vykazují obecně vyšší disociační napětí a jsou proto méně stálé než nižší oxidy. Pro disociaci oxidů železa při teplotách nad 570°C je možné použít schéma:



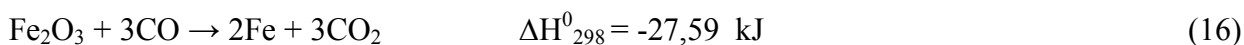
Při teplotách nad 570°C je stabilní pouze FeO, který je redukován uhlíkem nebo CO (disociační napětí FeO odpovídá velmi nízkému parciálnímu tlaku kyslíku).[14]

Redukce oxidů

Přímá redukce oxidů ve vysoké peci uhlíkem koksu je omezena nedokonalým stykem obou tuhých fází. Při teplotách nad 900°C má rozhodující význam redukce oxidů železa oxidem uhelnatým podle reakce:



Oxid uhličitý vznikající při redukčních reakcích reaguje s koksem podle reakce (11) a vzniká opět oxid uhelnatý. Z rovnice (13) a (15) plyne souhrnná reakce redukcí Fe_2O_3 oxidem uhelnatým



Reakce (16) je exotermická. Současně s redukcí oxidů železa probíhá redukce i jiných oxidů, zejména oxidů manganu, křemíku a fosforu. [14]

4.3. Moderní postupy zkujňování a rafinace oceli

surové železo se dále zpracovává v kyslíkovém konvertoru. Mění se chem. sl. sur. Fe – snižuje se obsah C, Si, P, S a upravuje obsah Mn

Zkujňování:

- Cíl procesu: odstranit ze surového železa a ocelového odpadu nežádoucí příměsové prvky (C, Mn, Si, P, S) v takové míře, aby vyrobená ocel měla požadované mechanické a technické vlastnosti
- Odstranění nežádoucích prvků ze vsázky se děje jejich oxidací. Zdrojem kyslíku je nejčastěji plynný kyslík O_2 případně oxidické rudy. Plynný kyslík i oxidické rudy reagují s taveninou i struskou. Výsledkem je oxid železnatý, který je za daných podmínek jedinou stabilní sloučeninou kyslíku a železa.

Produkty oxidace jsou buď plynné (CO), nebo jako oxidy přecházejí do strusky a se struskou jsou odstraněny.

- FeO oxiduje nežádoucí součásti vsázky:
- uhlík: $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ (CO probublává taveninou= uhlíkový var)
- křemík: $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2 \rightarrow$ do strusky
- mangan: $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO} \rightarrow$ do strusky

Desoxidace:

- děj, při kterém zastavujeme uhlíkový var prostřednictvím přidání prvků, které mají vyšší příbuznost k O než má Fe (Pokud nesnížíme desoxidací obsah FeO dostatečně hluboko, proběhne při poklesu teploty reakce: $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO} \rightarrow$ uhlíkový var a ve výrobku jsou buliny)
- uskutečňuje se přidáním FeMn (feromangan), FeSi (ferosilicium) a Al do lázně
- konečné složení oceli se v tavicím procesu dále upravuje přísadou legujících prvků ve formě feroslitin
- CO v tuhnoucí tavenině probublává v počátku tuhnutí do atmosféry. Po ztuhnutí zůstává uzavřen v oceli a tvoří bubliny.

Podle toho, jak hluboko je snížen v oceli obsah FeO, rozdělujeme tvářené oceli na:

- Uklidněné
- zcela zastavena uhlíková reakce
- neuklidněné - vyrábí se bez desoxidace nebo jen s velmi omezenou desoxidací
- polo uklidněné [13]

V současné době se neuklidněné a polo uklidněné oceli prakticky nevyrábí.

Závěr – zhodnocení pochodů

Cílem bakalářské práce bylo seznámení s principy ocelářských pochodů od středověku. Prvotní ocelářské postupy byly založeny na přímé redukci železa z rud. Na stejném principu pracují v současné době hutě produkující před redukované pelety zpracovávané v elektrických obloukových pecích či výrobou surového železa ve vysokých pecích.

Po staletí se udržel postup redukce oxidů železa uhlíkem.

Současná metalurgie oceli využívá nepřímou výrobu oceli z rud, na stejných principech jaké byly zavedeny v 16. Století. Nepřímá výroba oceli z rud je výhodnější z ekonomického hlediska. Princip výroby oceli v současných agregátech je založen na redukci a nauhličení železa s následující oxidací zejména uhlíku a fosforu. V tekuté oceli je odfosfoření zajištěno pod zásaditými struskami a s ohledem na vyšší teplotu lázně je odfosfoření oceli pouze oxidy železa podobně jako ve zkujňovacích pecích 16. století neuskutečnitelné.

Výroba plávkové oceli vedla k neobvyklému zvýšení produktivity práce. Umožnila zavedení výroby legovaných ocelí. Rozdíl je v jakosti oceli. Oceli vyrobené přímou redukcí z rud obsahovaly velké množství oxidů a byly chemicky nehomogenní.

Z pohledu udržitelného rozvoje máme společnosti mnoho co nabídnout.

Ocel je nepostradatelná součást ekonomického růstu, kdy společnost chce dosáhnout lepší kvalitu života. Přidává hodnotu společnosti mnoha způsoby, nejenom přes naše výrobky, ale také nabídkou zaměstnání.

Ocelářské produkty přidávají hodnotu tím, že pomáhají uspokojit potřeby společnosti.

„Vědět mnoho je nebezpečné, vědět málo také.“

Albert Einstein

Literatura:

- [1] PLEINER, R aj.: Dějiny hutnictví železa v Československu, díl. 1. 1. vyd. Praha: Academia, 1984. 295 s.
- [2] PLEINER, Radomír a Jan KOŘAN. Dějiny hutnictví železa: *Od nejstarších Do průmyslové revoluce*. Praha: Československé akademie věd, Praha 1984. ISBN 21-023-85.
- [3] Pravek: doba kamenná. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.pravek.estranky.cz/clanky/doba-kamenna.html>
http://www.archeologienadosah.cz/sites/default/files/zpracovani_kovu_-_zelezo_0.pdf
- [4] Pravek: Doba kamenná, bronzová a železná. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.lidova-architektura.cz/architektura-historie/vesnice-osidleni/pravek.htm>
- [5] <http://www.hornictvi.info/techpam/starahut/starahut.htm>
- [6] Ústní či písemná sdělení doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc
- [7] PACAL, Bohumil; DOLEŽAL, Pavel. *Struktura slitin stabilní soustavy železo – uhlík (Fe – C)* [online]. VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, 2006-11-20, [cit. 2011-07-15].
- [8] 7. Slitiny železa a uhlíku [online]. VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, 2003-01-24, [cit. 2011-07-15].
- [9] STRÁNSKÝ, Karel a Karel STRÁNSKÝ. *Železné hamry a hutě Českomoravské a Dražanské vrchoviny: archeometalurgie objektivem mikroskopu = Secret of early iron: the archaeometallurgy under the microscope*. Vyd. 1. [Brno: Vysoké učení technické v Brně - fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, 2009]., 107 s. Studie z historie techniky a průmyslu. ISBN 978-80-214-3853
- [10] Technické památky: Stará huť u Adamova. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/techpam/starahut/starahut.htm>
- [11] SOUCHOPOVÁ, Věra a Karel STRÁNSKÝ. *Tajemství dávného železa: archeometalurgie objektivem mikroskopu = Secret of early iron: the archaeometallurgy under the microscope*. Vyd. 1. V Brně: Technické muzeum, c2008, 167 s. Studie z historie techniky a průmyslu. ISBN 978-80-86413-54-9.
- [12] ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, c2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [13] <http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Mazancova-Materialy-pro-narocne-TA.pdf>
- [14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.

Seznam obrázků

Obrázek 1:Věstonická Venuše[1].....	8
Obrázek 2:Část binárního diagramu Cu-Sn[12].....	11
Obrázek 3: Rekonstrukce hutnické dílny vybavené šachtovými pecemi se zahloubenou nístějí [2].....	12
Obrázek 4:Rovnovážný diagram stabilní soustavu železo uhlík[13][12].....	16
Obrázek 5: Charakteristika ukázky železných rud-Hematit [3].....	19
Obrázek 6: Charakteristika ukázky železných rud-Limonit [3].....	19
Obrázek 7:Charakteristika ukázky železných rud-Magnetovec [3].....	19
Obrázek 8:Charakteristika ukázky železných rud-Ocelek [3].....	19
Obrázek 9:Železářský výhňový objekt z halštatského hradiště Molpír u Smolenic na západním Slovensku [6].....	23
Obrázek 10:Bronzová figurka býčka z jeskyně Býčí skála [6].....	23
Obrázek 11:Halštatský prsten z jeskyně Býčí skála [6].....	24
Obrázek 12:Tři základní typy kovacího bucharu poháněného vodním kolem[6].....	30
Obrázek 13:Slovanské a středověké vyhřívací pece [6]	31
Obrázek 14:Hamr v Dobříněvsi-menší kladiva [10].....	34
Obrázek 15: Hamr v Dobříněvsi-menší kladiva [10].....	34
Obrázek 16:Stará huť u Adamova[3].....	36
Obrázek 17: Schéma Bessemerova konvertoru [5].....	39
Obrázek 18: Schéma Siemens –Martinské pece [5].....	40
Obrázek 19: Schéma LD konvertoru [5].....	40
Obrázek 20: Schéma vysoké pece [14].....	41

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti strukturních složek [12].....	14
Tabulka 2: Teplota a koncentrace bodů v Fe-C [14].....	17