

3. TECHNICKÉ SLITINY ŽELEZA

Nejdůležitějším kovem ve strojírenství je železo (Fe). Pod označením Fe rozumíme chemicky čisté železo (prvek). V technické praxi se ovšem používají *technické slitiny železa*. Tyto slitiny obsahují kromě železa další kovy i nekovy. Největší vliv na vlastnosti technických slitin železa má obsah uhlíku (C). V elektrotechnice se technické slitiny železa používají jako konstrukční, magnetický, popř. vodivý materiál.

3.1. ROZDĚLENÍ TECHNICKÝCH SLITIN ŽELEZA

Zpracováním železné rudy, ve vysoké peci získáme *surové železo*. Obsahuje velké množství uhlíku (2 % až 6,7 %), dále síru, fosfor, mangan, křemík a jiné prvky. Velký obsah uhlíku způsobuje velkou tvrdost a křehkost surového železa, takže je nekujné. Určitým technologickým zpracováním surového železa lze dosáhnout toho, že se stane kujným.

Podrobnější přehled o druzích technických slitin železa je v tab. 3.1.

3.2. PŘEHLED VÝROBY SUROVÉHO ŽELEZA

3.2.1. Surovinové zdroje

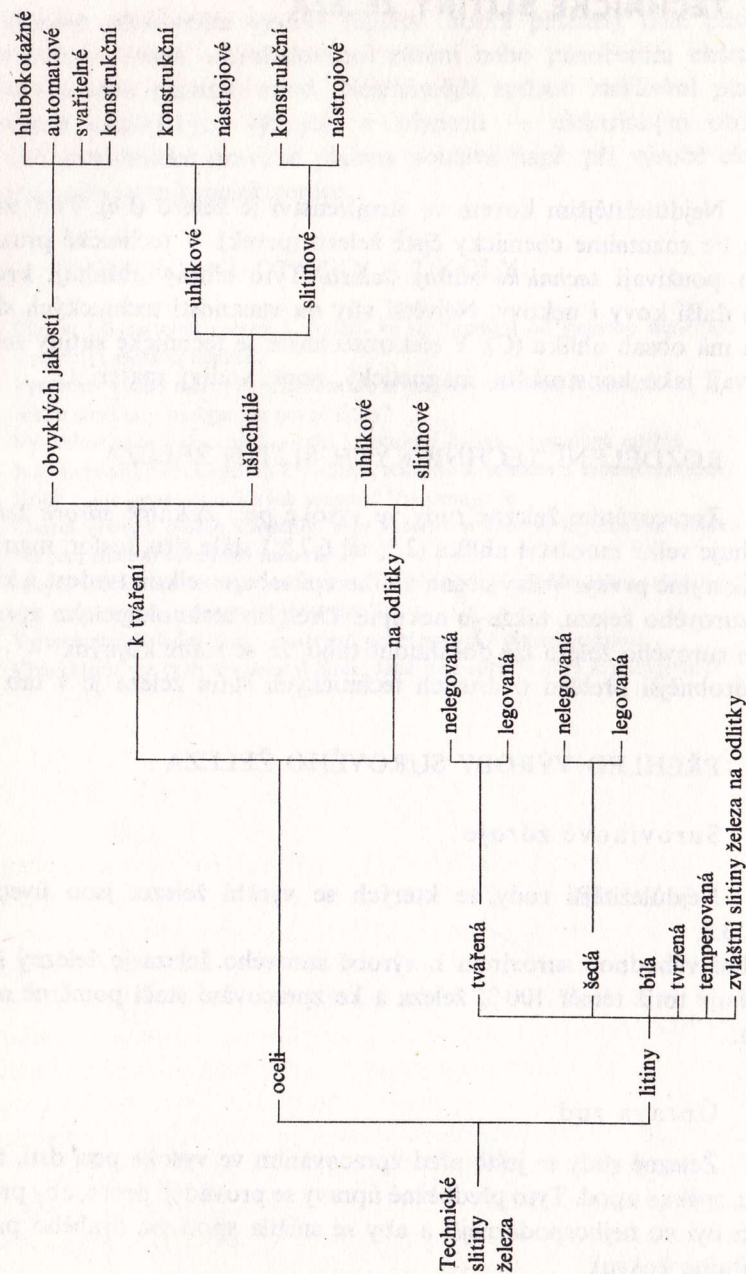
Nejdůležitější rudy, ze kterých se vyrábí železo, jsou uvedeny v tab. 3.2.

Velmi výhodnou surovinou k výrobě surového železa je železný šrot. Obsahuje totiž téměř 100 % železa a ke zpracování stačí poměrně málo paliva.

3.2.2. Úprava rud

Železné rudy se ještě před zpracováním ve vysoké peci drtí, třídí, perou, spékají apod. Tyto předběžné úpravy se provádějí proto, aby proces v peci byl co nejhospodárnější a aby se snížila spotřeba drahého paliva (kvalitního koksu).

Tab. 3.1. Rozdělení technických slitin železa



Struskotvorné přísady. Železná ruda obsahuje kromě železa také hlušinu, což jsou bezcenné složky, které neobsahují železo. Hlušina má obvykle vysokou teplotu tavení, proto se do rudy přidávají struskotvorné přísady, jejichž úkolem je snížit teplotu tavení hlušiny a umožnit vytvoření strusky. Ve vysokých pecích se jako struskotvorná přísada používá vápenec.

Tab. 3.2. Železné rudy

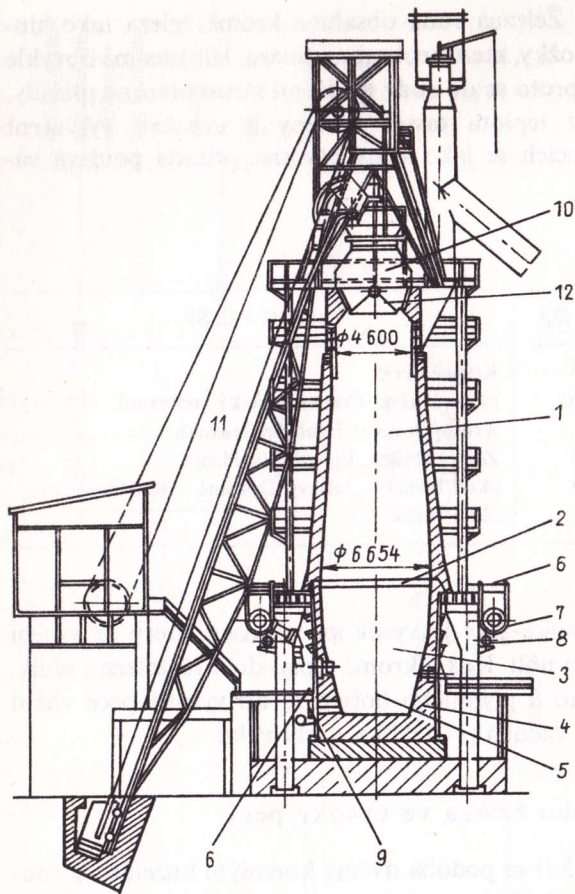
Název rudy	Obsah Fe (%)	Naleziště v ČSSR
krevel	40 až 65	Krušné hory;
magnetovec	50 až 60	některá místa Českomoravské vrchoviny, Krušných hor a Hrubého Jeseníku;
hnědel	20 až 60	Zdice, Mníšek, Ejovice (u Plzně);
ocetek	až 48	okolí Rožňavy, Jelšavy, Dobšíně, v Rudňanech aj.;
chamosit	až 46	okolí Nučic

Palivo. Palivem ve vysoké peci je vysokopecní koks, který se vyrábí z nejkvalitnějšího černého uhlí. Koks (kromě tepla) dodává železu i uhlík. Pro dosažení intenzivního a plynulého hoření se do vysoké pece vhání dmýchacím ventilátorem vzduch přehřátý v ohříváku.

3.2.3. Výroba surového železa ve vysoké peci

Vysoká pec (obr. 3.1) se podobá dvěma komolým kuželům, postaveným na sebe základnami. Horní část pece se nazývá šachta 1. Ta dole přechází v krátký válcovitý rozpor 2 a pokračuje zužujícím se sedlem 3. Nejspodnější část pece se nazývá podstava 4, v ní je nístěj 5. V nístěji se shromažďuje vytavené železo. Ve spodní části zavážky ústí do vysoké pece 8 až 16 výfučen 6, kterými se do pece vhání z větrovodu 7 ohřátý vzduch (tzv. vítr). Pod výfučnami je otvor 8 na vypouštění strusky (odtéká nepetržitě). Surové železo se vypouští odpichovým otvorem 9 na dně nístěje. Celá šachta je zavěšena na sloupech a je oddělitelná od ostatních částí pece (to umožňuje snadnější přístup při opravách vyzdívky).

Vysoká pec se zavází shora sazebnou 10. Vsázka, tj. směs rudy, koksu a struskotvorných přísad, se dopravuje nahoru výtahem 11 a vsypává se dvojítm uzávěrem (tzv. kychtovým uzávěrem) 12.



Obr. 3.1. Schéma vysoké pece

Vysoká pec je postavena ze žáruvzdorných cihel a má šamotovou vyzdívku. Spodní část pece (zarážka a nístěj) je tepelně nejvíc namáhána (teplota dosahuje až 2 000 °C). Je opatřena ocelovým pláštěm, který je neustále chlazen vodou.

Produkty vysoké pece jsou tyto:

1. *Surové železo* je hlavním produktem vysoké pece. Vypouští se (odpichuje) z nístěje v intervalech 3 až 8 hodin – podle velikosti pece, podle použitých surovin a podle způsobu zpracování.

2. *Vysokopecní struska* je tavenina rudné hlušiny, struskotvorných přísad a popela. Využívá se k výrobě některých druhů cementů, cihel, struskové vlny (pro tepelné izolace) atd.

3. *Vysokopecní plyn* vzniká při chemických reakcích uvnitř vysoké pece. Odvádí se horním uzávěrem a po odstranění prachu a vodní páry se využívá jako palivo v ohřivačích vzduchu (větru) pro vysokou pec a ve spalovacích motorech pro pohon dmýchadel. Zbytek plynu slouží k výrobě elektrické energie a k vytápění v přidružených provozech (ocelárny, koksovny, válcovny, kovárny).

3.3. PŘEHLED VÝROBY OCELI. PODSTATA ZKUJŇOVÁNÍ

Surové železo je velmi křehké a málo pevné. Nelze je tvářet, dobře se však taví. Proto je vhodné k odlévání.

Nepříznivé mechanické vlastnosti jsou způsobeny přítomností některých prvků: C, S, P, Si. Tyto prvky je třeba alespoň částečně odstranit, např. uhlíku, který má na mechanické vlastnosti největší vliv, musí být méně než 1,75 %. Zároveň se však přidávají různé příměsi (legury), které zlepšují vlastnosti železa. V tomto procesu, nazývaném *zkujňování*, se ze surového železa vytvoří kujný materiál – *ocel*.

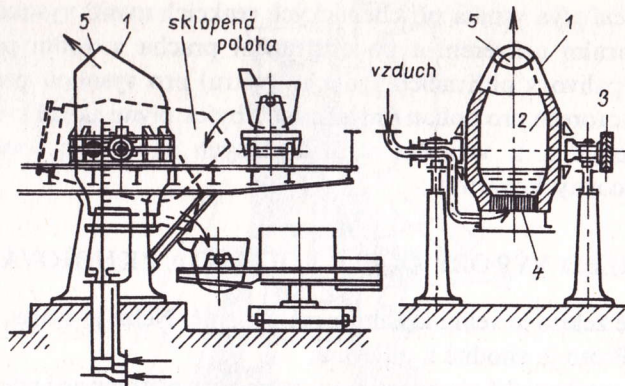
Ocel patří mezi nejdůležitější technické materiály. Je to slitina železa a dalších prvků, přičemž obsah uhlíku nepřesahuje 1,75 %. Na rozdíl od litiny ji lze tvářet za studena i za tepla a také svařovat. Tepelným zpracováním můžeme měnit její vlastnosti v širokém rozmezí.

Ocel se vyrábí zkujňováním železa. Spalováním (tj. oxidací) se surové železo zbaví značného podílu nežádoucích prvků, jako je C, Si, Mn, P. Ocel se vyrábí v konvertorech, v martinských pecích a v elektrických pecích.

3.3.1. Výroba oceli v konvertoru

Roztavené surové železo z vysoké pece se nalije do konvertoru a otvory ve dnu se do taveniny dmýchá atmosférický vzduch. Tlak vzduchu je 15 až 25 MPa. Účinkem kyslíku nastane intenzivní hoření, které trvá asi 20 min a shoří při něm nežádoucí prvky obsažené v surovém železe. Obvyčejné konvertorové oceli mají větší obsah dusíku, který se do oceli dostává z dmýchaného vzduchu a způsobuje stárnutí materiálu. Tato nevýhoda byla odstraněna novými konvertorovými pochody založenými na použití kyslíku.

Konvertor (obr. 3.2) je nádoba hruškovitého tvaru z ocelového plechu, uvnitř vyzdřená žáruvzdorným materiálem, uložená na čepech tak, aby ji



Obr. 3.2. Konvertor

1 – ocelový plášť, 2 – žáruvzdorná vyzdívka, 3 – čepy, 4 – otvory ve dně, 5 – hrdlo

bylo možné sklápět. Na dně konvertoru jsou otvory, kterými se dmýchá vzduch. Surové železo se hrdlem vleje do konvertoru, který je ve sklopené poloze, aby železo nevytékalo otvory ve dnu. Pak se začne dmýchat vzduch a konvertor se postaví do svislé polohy. Po ukončení zkujňování se konvertor opět sklopí a ocel se vypouští do slévací pánve.

Hmotnost jedné náplně konvertoru bývá až 50 t. Vyzdívka bývá zásaditá (Thomasův způsob) nebo kyselá (Bessemerův způsob).

3.3.2. Výroba oceli v martinské peci

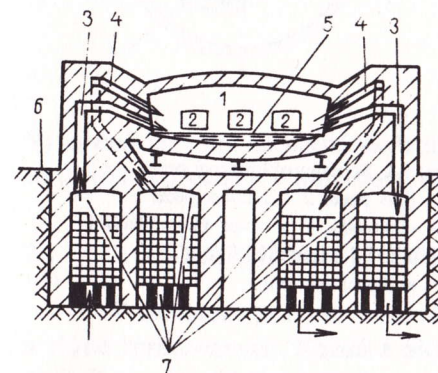
Nevýhodou výroby oceli v konvertoru je to, že v něm lze zpracovávat pouze roztavené surové železo. Ocelový a železný odpad (pevnou vsázku) nelze zpracovat.

Výroba oceli v plamenových pecích dlouho narážela na problémy, protože nebylo možné dosáhnout dostatečné teploty k roztavení oceli. Tento nedostatek vyřešil Francouz Pierre-Émile Martin, který v roce 1864 využil vynálezu regeneračního topení (podle Friedricha Siemense) a zkonstruoval nístějovou pec k výrobě oceli ze surového železa nebo železného či ocelového šrotu.

Martinská pec se někdy nazývá podle obou vynálezců siemens-martinská. Vysoké teploty se dosahuje tím, že topný plyn i vzduch se přehřívají ve zvláštních regeneračních komorách, jejichž zdivo je předem roz-

žhaveno zplodinami hoření. Vyzdívka pece bývá zpravidla zásaditá. Pece s kyselou vyzdívkou se používají zřídka, a to jen na přetavování ocelového odpadu. Většina světové produkce (asi 80 % vyráběné oceli) pochází z martinských pecí se zásaditou vyzdívkou.

Na obr. 3.3 je schéma martinské pece. Pec má plochou nístěj 1, do níž se otvory 2 vloží vsázka. Do čel pece ústí kanály na přívod plynu 3 a vzduchu 4. Plyn i vzduch se v regeneračních komorách přehřívají na 1 200 °C. Z regeneračních komor se nasávají do tavicího prostoru pece, kde se mísí a spalují, přičemž se dosahuje teploty až 1 750 °C. Zplodiny hoření odcházejí z pece do druhého páru regeneračních komor (vyhřívají je) a odtud do komína. Asi po půl hodině teplota prvních dvou komor klesne na 600 až 800 °C. Reverzačním zařízením (ventily) v kanálech se změni směr proudění, takže plyn i vzduch se vedou do pece přes nově vyhřáté komory a zplodiny hoření z pece do vychladlých komor. Směr proudění se mění v pravidelných intervalech.



Obr. 3.3. Martinská pec

1 – nístěj, 2 – otvory pro vkládání vsázky, 3 – kanály pro přívod plynu, 4 – kanály pro přívod vzduchu, 5 – odpichový otvor, 6 – pracovní plošina, 7 – regenerační komory

Ocel vyrobená v martinských pecích má mnohem lepší kvalitu než konvertorová ocel. Zkujňovací pochod v martinské peci totiž trvá déle (7 až 12 h), takže složení oceli lze přesněji řídit. Tato ocel se téměř vůbec neobohacuje dusíkem, protože je chráněna struskou. Používá se k odlévání ocelových odlitků i k tváření.

3.3.3. Výroba oceli v elektrických pecích

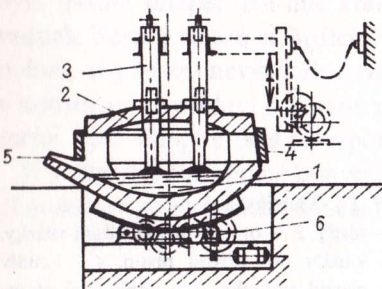
V ocelářství se používají dva druhy elektrických pecí – obloukové a indukční. Indukční pece rozlišujeme nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Výhodou elektrického ohřevu oproti jiným způsobům je zejména to, že

vsázku lze ohřát na libovolnou teplotu a pak tuto teplotu podle potřeby regulovat. Kromě toho se do taveniny nevnašejí žádné nečistoty. V elektrických pecích se vyrábějí nejkvalitnější oceli. Přitom se nezkujuje surové železo, ale zpracovává se ocelový šrot, zejména ve slévárnách ocelolityny. I elektrické pece mohou mít kyselou nebo zásaditou vyzdívku.

Oblouková pec

Oblouková pec (obr. 3.4) se skládá z dna 1 a klenby 2, kterou procházejí elektrody 3, napájené z transformátoru trojfázovým střídavým proudem. Oblouk se vytvoří mezi elektrodami a vsázkou. K elektrické výzbroji pece patří i regulace pohybu elektrod k zajištění rovnoměrného výkonu. Pec je uložena tak, aby ji bylo možné sklápět. Vsázka se vkládá otvorem 4 a hotová ocel se vypouští žlabem 5.

Existuje několik druhů obloukové pece, které se navzájem liší konstrukcí.

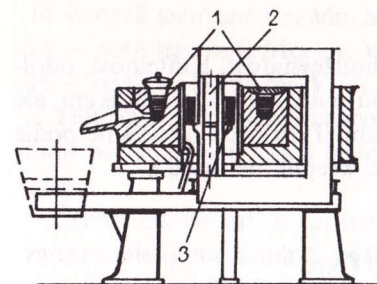


Obr. 3.4. Schéma obloukové pece
1 – dno pece, 2 – klenba pece,
3 – elektrody, 4 – otvor pro vkládání
vsázky, 5 – odpichový žlab,
6 – sklápěcí zařízení

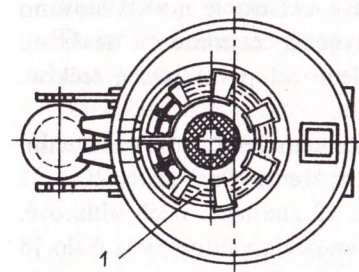
Indukční pece

Nízkofrekvenční indukční pece (obr. 3.5) se používají dnes již zřídka, zejména k tavení neželezných kovů. V podstatě jde o transformátor se železným jádrem, který má místo výstupního vinutí magnezitový prstenec ve tvaru žlábků. Tento prstenec tvoří závit nakrátko, takže se v něm indukuje velký proud, který ohřívá vsázku.

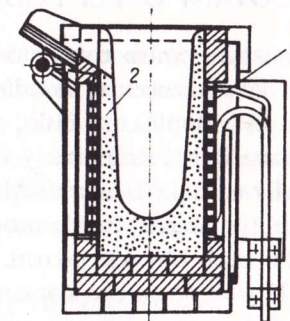
Vysokofrekvenční indukční pec (obr. 3.6) je tvořena indukční cívkou, uvnitř které je kelímek ze žáruvzdorného kyselého nebo zásaditého materiálu. Prochází-li cívkou vysokofrekvenční proud, vzniká v ní střídavé magnetické pole, které indukuje ve vsázce vířivé proudy, a tím se vsázka ohřeje a roztaví. Ve vysokofrekvenčních pecích se oceli většinou přetavují a legují.



Obr. 3.5. Nízkofrekvenční indukční pec
1 – kruhový žlábek, 2 – jádro
transformátoru, 3 – vinutí transformátoru



Obr. 3.6. Vysokofrekvenční indukční pec
1 – vinutí indukční cívky, 2 – žáruvzdorný
kelímek



Vyrobená ocel má zaručené složení a je dokonale homogenní. Tyto pece se stavějí pro vsázku o hmotnosti několik kilogramů až několik tun.

3.4. ROZDĚLENÍ OCELÍ PODLE SLOŽENÍ A POUŽITÍ

V technické praxi se používá velké množství ocelí různého složení a různě zpracovaných. Každá z nich má svoje specifické vlastnosti, které závisejí na chemickém složení, na technologii výroby, mechanickém zpracování, obsahu nečistot atd.

Podle složení rozlišujeme v zásadě dvě skupiny ocelí – *uhlíkové* a *slitiny* (legované).

Podle účelu použití se oceli dělí na *konstrukční* a *nástrojové*, podle způsobu zpracování rozlišujeme oceli *k tváření* a ocel *na odlitky*.

Uhlíkové oceli

Uhlíkové oceli jsou kujné slitiny železa s uhlíkem a mají obvyklý obsah vedlejších prvků: Mn (do 1 %), Si (do 0,4 %), S, P. Jejich vlastnosti, jako je pevnost, obrobiteľnosť, kaliteľnosť, tvárnosť, houževnatosť, jsou ovlivněny především uhlíkem.

Slitinové oceli

Všechny vlastnosti ocelí, jako pevnost, houževnatost, kalitelnost, odolnost proti popouštění, řezné vlastnosti, jsou ovlivněny nejen uhlíkem, ale zejména příměsmi dalších prvků – legurami. Tyto oceli nazýváme podle převládajících legur (chromové, manganové, křemíkové apod.).

3.5. OZNAČOVÁNÍ OCELÍ PODLE ČSN

Číselné označování a rozdělení ocelí k tváření je normalizováno v ČSN 42 0002. Značka oceli se skládá z dvojčíslí, za mezerou následují tři čísla, popř. ještě doplňkové číslo, oddělené od první pětičky tečkou. Každé číslo ve značce má svůj přesný význam.

První dvojčíslí označuje *třidu oceli*. Máme celkem deset tříd s označením 10 až 19 (číslíce 1 znamená, že jde o ocel k tváření). Oceli třídy 10 a 11 jsou konstrukční oceli obvyklé jakosti, třída 12 znamená oceli uhlíkové, dvojčíslí 13 až 17 jsou vyhrazena konstrukčním ocelím slitinovým, číslo 18 znamená slinuté ocelové a litinové prášky a dvojčíslí 19 je určeno pro oceli nástrojové.

Pro oceli obvyklých jakostí (třída 10 a 11) platí následující význam dalších čísel:

Druhé dvojčíslí udává nejmenší mez pevnosti v tahu vyjádřenou v desítkách megapascalů.

Pátá číslice je většinou pořadová a může označovat některou význačnou vlastnost dané oceli.

Doplňková číslice podává informaci o stavu oceli (tj. o způsobu tepelného zpracování).

Jako příklad uveďme a vysvětleme číselné označení 11 340.0:

11 – konstrukční ocel obvyklé jakosti se zaručeným obsahem fosforu a síry,

34 – nejmenší mez pevnosti v tahu je 340 MPa,

0 – ocel nemá význačnou vlastnost,

.0 – ocel nežíhaná.

Ušlechtilé konstrukční oceli mají sice podobný způsob označování jako oceli obvyklých jakostí, avšak význam jednotlivých číslic je zcela odlišný.

První dvojčíslí označuje třídu oceli podle chemického složení:

12 – oceli uhlíkové,

13 – oceli legované Mn, Si,

14 – oceli legované Cr, Mn, Si,

15 – oceli legované Mo, Cr, V, Mn,

16 – oceli legované Ni, V, Cr, Mo, W.

Třetí číslice v číselné značce znamená součet průměrného procentuálního podílu přísad všech legujících prvků, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo.

Čtvrtá číslice udává průměrný obsah uhlíku v desetinách procenta, zaokrouhlený na nejbližší vyšší číslo. Je-li obsah uhlíku větší než 0,9 %, je na čtvrtém místě 0.

Páté číslo je pořadové, rozlišuje různé oceli stejné skupiny.

Doplňková číslice vyjadřuje stav oceli, např. ocel nežíhaná, normalizačně žíhaná, kalená.

Například ocel označená 15 130.3 je chrommolybdenová ocel s obsahem Cr + Mo do 1,5 %, s obsahem uhlíku asi 0,3 %, žíhaná naměkko.

Oceli třídy 17 jsou vysokolegované, jejich označování je složitější.

3.6. LITINA, JEJÍ DRUHY A OZNAČOVÁNÍ

Litina je vlastně slitina železa na odlitky. Litinu lze rozdělit na šedou, bílou, temperovanou a litiny speciální (tvárnou a tvrzenou).

Šedá litina

Název šedá litina je odvozen od barvy lomu. Jeho šedivé zabarvení je způsobeno lupínky grafitu, které jsou v litině obsaženy.

Obsahuje 2,8 až 3,5 % C, 2 až 2,5 % Si a 0,5 až 0,8 % Mn. Mez pevnosti v tahu je 120 až 300 MPa, mez pevnosti v tlaku je třikrát až čtyřikrát větší než v tahu. Je feromagnetická a má velkou rezistivitu. Šedá litina velmi dobře tlumí chvění, proto je vhodná k výrobě rámů a koster strojů. Není kujná a těžko se svařuje, avšak lze ji dobře obrábět a brousit. Je mnohem odolnější proti korozi než ocel, lze ji žíhat, kalit i nitridovat.

Šedá litina se odlévá do pískových, keramických nebo kovových forem. Odlitky se po očištění ještě obrábějí.

Označení šedé litiny podle ČSN se skládá z čísla 42, které označuje třídu norem (hutnictví), číslo 24 znamená šedou litinu a poslední dvojčíslí určuje nejmenší mez pevnosti v tahu pro tloušťku stěny od 15 mm do 30 mm.

Příklad označení: ČSN 42 2415, 42 2420, 42 2435 atd.

Bílá litina

Bílá litina se svým chemickým složením podobá šedé litině, obsahuje 2,7 až 3,4 % C, 0,5 až 1 % Si. Odlitky mají bílý lom. Bílá litina je velmi tvrdá a křehká, je obrobitelná pouze broušením, proto je její použití omezeno na odlitky různých mlecích těles apod.

Temperovaná litina

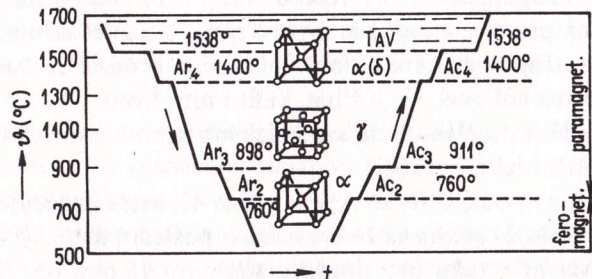
Temperovaná litina se vyrábí tepelným zpracováním (temperováním) bílé litiny. Podle postupu tepelného zpracování dostaneme litinu s černým lomem nebo litinu s bílým lomem. Temperovaná litina je houževnatý a dobře obrobitelný materiál.

Mezi speciální druhy litin řadíme *tvárnou litinu*, která se vyrábí z šedé litiny přidáním legujících přísad, a *tvrzenou litinu*, která se vyznačuje tím, že povrchová vrstva je tvořena bílou litinou, zatímco střed odlitku má charakter šedé litiny.

3.7. STRUKTURA ŽELEZA

V kapitole 2 jsme se zabývali mikrostrukturou a makrostrukturou materiálů. Hovořili jsme o základních pojmech z krystalografie, o řízení vlastností materiálů atd. Bylo by vhodné si tuto kapitolu zopakovat, protože nyní se budeme zabývat výkladem o struktuře železa.

Železo podobně jako každý kov má krystalickou strukturu. Základem jeho krystalové mřížky je krychle, tzn. krystalografická soustava je krychlová – a podle teploty, rychlosti změny teploty, složení apod. může být mřížka buď prostorově středěná, nebo plošně středěná (obr. 3.7). Tyto



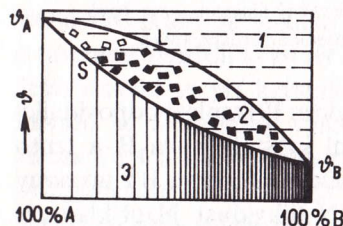
Obr. 3.7. Průběh změn krystalické struktury železa při chladnutí a při ohřevu Ar_2, Ar_3, Ar_4 – teploty přeměny struktury při ochlazování; Ac_2, Ac_3, Ac_4 – teploty přeměny struktury při ohřevu

modifikace označujeme řeckými písmeny; např. železo, jehož krystalová mřížka je prostorově středěná, nazýváme železo α , naproti tomu písmenem γ označujeme železo s plošně středěnou mřížkou.

Vzájemná závislost teploty, složení slitiny a její vnitřní stavby se graficky znázorňuje *rovnovážným diagramem*. Rovnovážný diagram podává kvalitativní a kvantitativní popis fází, které jsou v dané soustavě při různých teplotách v rovnováze (při konstantním tlaku). Tento diagram lze sestavit na základě sledování chladnutí většího počtu slitin se složením měnícím se od 0 % až do 100 % přísad nebo od 0 % až do určitého podílu přísad. V našem výkladu se omezíme pouze na základní pojmy.

3.7.1. Rovnovážný diagram dvou kovů navzájem dokonale rozpustných

Rovnovážný diagram dvou kovů A a B, které jsou navzájem dokonale rozpustné v kapalně i pevné fázi, znázorňuje obr. 3.8. Na vodorovnou osu se nanáší složení, na svislou osu teplota. Teplota ϑ_A znázorňuje bod tání čistého kovu A, teplota ϑ_B zase bod tání čistého kovu B.

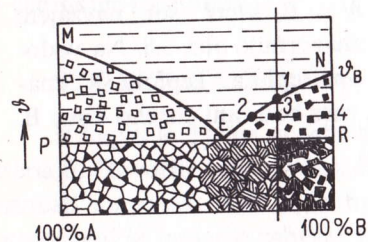


Obr. 3.8. Rovnovážný diagram dvou kovů dokonale rozpustných v kapalně i pevné fázi
S – solidus, L – likvidus, 1 – tavenina,
2 – směs taveniny a pevné fáze,
3 – pevná fáze

Je známo, že slitina při tavení v určitém rozmezí teplot obsahuje taveninu i krystaly. Dolní křivka S se nazývá *solidus*. Je to množina bodů určujících složení a teplotu, při kterých se slitina začíná tavit. Horní křivka L – *likvidus* je množina bodů určujících složení a teplotu, při kterých nastává úplné roztavení slitiny. Z toho vyplývá, že plocha pod křivkou S odpovídá slitině v pevné fázi, plocha nad křivkou L odpovídá slitině zcela roztavené. Plocha mezi oběma křivkami představuje stav, kdy v tavenině jsou ještě neroztavené krystality. Rovnovážný diagram platí pro tavení i pro tuhnutí.

3.7.2. Rovnovážný diagram dvou kovů v pevné fázi vzájemně nerozpustných

Na obr. 3.9. je rovnovážný diagram dvou kovů v pevné fázi vzájemně nerozpustných. Je složitější než diagram předcházející. Křivka likvidu je tvořena spojnici bodů MEN. Solidus je vodorovná čára PR procházející eutektickým bodem E, který udává složení a bod tání eutektika. Eutektikum je jemná směs krystalitů obou kovů (popř. tuhých roztoků) tvořících danou slitinu. Eutektikum tuhne (taví se) při konstantní teplotě. Oblast vymezená body MEP představuje směs taveniny a krystalitů s větším podílem kovu A, oblast NER naopak taveninu a krystality s větším obsahem kovu B. Slitiny, které svým složením odpovídají oblasti vlevo od bodu E, nazýváme podeutektické, oblast vpravo od bodu E představuje slitiny nadeutektické.

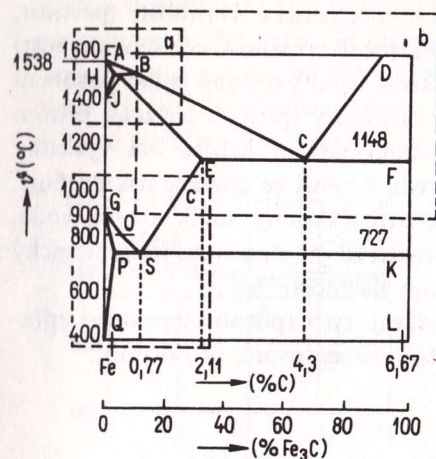


Obr. 3.9. Rovnovážný diagram dvou kovů v pevné fázi vzájemně nerozpustných

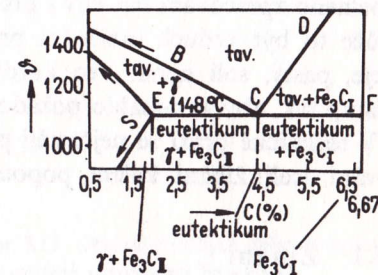
Krystalizace nadeutektické slitiny probíhá takto: Při teplotě odpovídající bodu 1 se z taveniny začnou vylučovat první krystaly kovu B, a tento proces pokračuje při dalším ochlazení. Vylučováním kovu B z taveniny se mění složení taveniny, a to podle čáry EN (likvidus). Například při teplotě dané bodem 3 je tavenina se složením podle bodu 2 v rovnováze s vykrystalizovaným kovem B (bod 4). Při ochlazení na teplotu solidu (PR) zbylá tavenina ztuhne na eutektikum.

3.7.3. Rovnovážný diagram metastabilní soustavy železo – karbid železa

Na obr. 3.10 je rovnovážný diagram metastabilní soustavy železo – karbid železa. Je zřejmé, že jde o diagram s eutektikem v bodě C, který odpovídá teplotě 1 148 °C. Podrobným rozбором diagramu lze sledovat krystalizaci a probíhající přeměny. Pozornost soustředíme jen na část



Obr. 3.10. Rovnovážný diagram soustavy železo – karbid železa (čárkovanými obdélníky jsou ohraničeny důležité části diagramu)



Obr. 3.11. Oblast eutektické krystalizace v rovnovážném diagramu soustavy železo – karbid železa (detail b z diagramu na obr. 3.10)

diagramu s eutektickou krystalizací (obr. 3.11). Likvidus má dvě větve, BC a DC, které se setkávají v eutektickém bodě C. Podél křivky BC se z taveniny vylučují krystaly *austenitu*, což je tuhý roztok uhlíku v železe γ . Jeho složení se při krystalizaci mění podle solidu JE. Podél větve DC likvidu se z taveniny vylučují krystaly primárního *cementitu* (karbidu železa Fe_3C). Eutektikum tvoří směs austenitu a cementitu – *ledeburitu*. Pod solidem EF (1 148 °C) se v oblasti vlevo od eutektického bodu C vyskytuje směs ledeburitu a austenitu, oblast vpravo od bodu C odpovídá směsi ledeburitu a cementitu.

3.8. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI

Pod pojmem tepelné zpracování rozumíme všechny postupy, při kterých materiál v pevném skupenství záměrně ohříváme a ochlazujeme, aby získal požadované vlastnosti. Každé tepelné zpracování se skládá ze tří operací. Jsou to:

- ohřev určitou rychlostí na danou teplotu,
- setrvání na dané teplotě po určitou dobu,
- ochlazení určitou rychlostí na původní teplotu.

Tepelným zpracováním se ovlivňují mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, tažnost atd.), technologické vlastnosti (tvárnost, opracovatelnost) a další fyzikální vlastnosti. Podle velikosti teploty a doby jejího působení buď nastává, nebo nenastává změna struktury (překrystalizace); přitom se může odstranit nebo může vzniknout vnitřní napětí. Na výsledky tepelného zpracování má vliv i prostředí, v němž se operace uskutečňuje. Může to být vzduch (oxidační prostředí), vakuum, vodík, dusík, voda, oleje, pasty, soli apod. Pro každý materiál je stanoven technologický postup tak, aby se dosáhlo požadované vlastnosti.

V technické praxi se nejčastěji používají tyto způsoby tepelného zpracování oceli: žihání, kalení, popouštění, cementování, nitridování.

3.8.1. Žihání

Při žihání se ocel v pevném skupenství ohřeje, udržuje se určitou dobu na dané teplotě a pak se pomalu ochlazuje. Podle teploty rozeznáváme žihání bez překrystalizace (od 200 do 790 °C) a žihání s překrystalizací (od 700 do 1 300 °C).

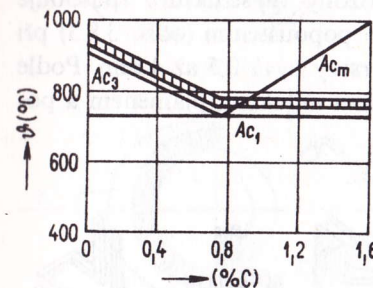
Žihání ke snížení pnutí. Nejdříve se žíhaná součást pomalu ohřeje na teplotu 500 až 600 °C, po dokonalém prohřátí (1 až 10 h) se součást pomalu ochlazuje v peci až na teplotu 250 až 300 °C a nakonec se dochlazuje na vzduchu. Účelem tohoto žihání je zmenšení vnitřních pnutí, která vznikají ve výrobcích po svařování, obrábění, tváření za tepla a rychlém ochlazení.

Normalizační žihání. Provádí se pomalým ohřevem na teplotu o 30 až 50 °C vyšší než překrystalizační teplota Ac_3 (obr. 3.7); po vyrovnání teploty v celé součásti následuje ochlazování na klidném vzduchu až na teplotu 650 °C, při níž dochází k rozpadu austenitu, a tím k zjemnění struktury. Pak se ochlazuje v peci na 300 °C a nakonec se dochladí na vzduchu. Normalizační žihání se používá zejména u ocelových odlitků a výkovků.

3.8.2. Kalení

Při kalení se součástka ohřeje na teplotu vyšší, než je teplota předkrystalizační, po určitou dobu se na této teplotě udržuje a potom se rychle ochlazuje ve vhodném kalicím prostředí. Při kalení se měkký a houževnatý *austenit* (tuhý roztok uhlíku v železe γ) přemění v *martenzit* (tuhý roztok

uhlíku v železe α). Tím nastane vnitřní pnutí, což se projeví zvětšením tvrdosti oceli. Při kalení je důležitá správná volba teploty ohřevu. Tato teplota závisí na obsahu uhlíku (obr. 3.12); např. podeutektoidní uhlíkové oceli (tj. oceli s obsahem uhlíku pod 0,8 %) se ohřívají na teplotu asi o 30 až 60 °C vyšší než teplota Ac_3 .



Obr. 3.12. Oblasti vhodných kalicích teplot znázorněné v diagramu Fe-Fe₃C

Na kalení má vliv *kalicí prostředí*; bývá jím voda, oleje, solné lázně, kovy s nízkým bodem tání (např. Pb) nebo vzduch.

Nejdříve se jako kalicí prostředí používala voda. Kalení v ní probíhá plynule. Když se do ní vyhřátá kalená součástka ponoří, vytvoří se kolem součástky vrstva páry, která zpomaluje chlazení. Vliv páry lze omezit pohybem součástky v lázni nebo ochlazováním vodní sprchou.

Oleje jsou mírnější kalicí prostředí. Rychlost ochlazování při tvorbě martenzitu je asi desetkrát menší než ve vodě, takže vnitřní pnutí způsobená kalením jsou menší. Pro olejovou kalici lázeň se používají převážně minerální oleje ohřáté na teplotu 50 °C. V oleji se kalí součásti ze slitinových ocelí a malé součástky z uhlíkových ocelí.

Solné lázně (roztavené směsi chloridů, dusičnanů a dusitanů) se vyznačují plynulejším ochlazováním. V prvním stadiu je rychlost ochlazování větší, potom postupně klesá. Vzniklá vnitřní pnutí jsou velmi malá.

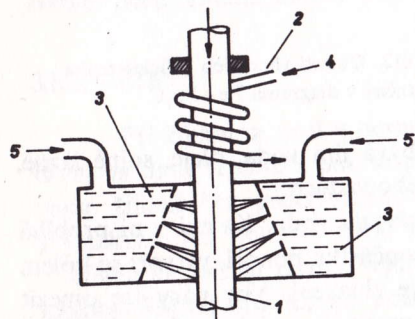
Na vzduchu se ochlazují některé slitinové oceli (tzv. samokalitelné), jako např. rychlořezné oceli. Ochlazování se urychluje ofukováním. Vnitřní pnutí bývají velmi malá.

Při ochlazování v lázni je třeba ponořovat kalený předmět ve směru podélné osy a vždy hmotnějším koncem napřed.

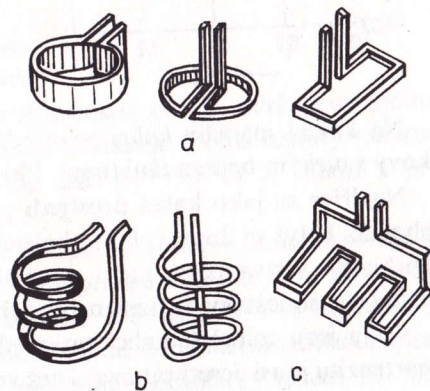
Povrchové kalení

U těch konstrukčních částí, jejichž povrch je vystaven nepříznivým mechanickým vlivům, se vyžaduje velká pevnost a tvrdost povrchu (popř.

některé jeho části) při zachování velké houževnatosti součástí. Toho se dosahuje různými způsoby, nejčastěji povrchoým kalením. Pro tento způsob kalení jsou vhodné uhlíkové a některé slitinové oceli s obsahem uhlíku 0,45 až 0,60 %. Ohřev musí být rychlejší než odvod tepla do jádra součásti. Po ochlazení vzniká na povrchu martenzitická struktura, která přechází v původní strukturu v jádře. Rozdíly ve struktuře způsobuje vnitřní pnutí, které se snižuje následujícím popouštěním (odst. 3.8.3) při teplotě 150 až 250 °C. Tloušťka zakalené vrstvy bývá 0,5 až 4 mm. Podle způsobu ohřevu rozlišujeme povrchové kalení indukční, plamenem a ponorné.



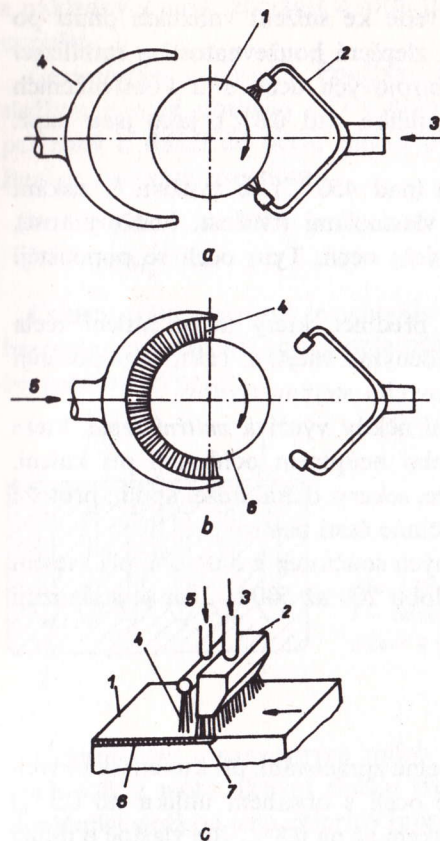
Obr. 3.13. Principiální schéma zařízení pro povrchové indukční kalení
1 – kalený předmět, 2 – induktor,
3 – nádrž s vodou pro kalici sprchu,
4 – voda ochlazující vinutí cívky,
5 – přívod kalící vody do nádrže



Obr. 3.14. Různé tvary induktorů
a) jednozávitové, b) několikazávitové,
c) na výrobky obdélníkového tvaru

Indukční kalení (vysokofrekvenční kalení) využívá vysokofrekvenční ohřev kaleného předmětu. Základem zařízení (obr. 3.13) je induktor, jehož vinutí je tvořeno jedním nebo několika závitů měděné trubky. Prochází-li vinutím střídavý proud z vysokofrekvenčního zdroje, indukují se v součástce umístěné uvnitř vinutí vířivé proudy, kterými se součástka ohřívá. Čím je frekvence vyšší, tím blíže jsou vířivé proudy k povrchu. Vhodnou volbou pracovní frekvence lze tedy dosáhnout tenké zakalené vrstvy. Tvar induktoru se přizpůsobuje tvaru součástky (obr. 3.14).

Povrchové kalení plamenem je schematicky znázorněno na obr. 3.15. K ohřevu se používá vysokotlaký hořák. Intenzitou plamene a rychlostí po-



Obr. 3.15. Schéma povrchového kalení plamenem
a) ohřev plamenem, b) kalení vodní sprchou,
c) postupné kalení rovinné plochy (pásu)
1 – kalený předmět, 2 – hořák, 3 – přívod topného plynu, 4 – kalící sprcha,
5 – přívod kalící vody, 6 – zakalená vrstva,
7 – ohřátá, dosud nezakalená vrstva

hybu součásti (otáčení nebo posuv) se řídí kalící teplota. Po rychlém prohrátí povrchu se součást ochlazuje vodní sprchou. Tloušťka zakalené vrstvy bývá větší než 2 mm.

Ponorné kalení se používá jen zřídka. Potřebného ohřevu se dosáhne v solných nebo kovových lázních s teplotou 1 100 až 1 250 °C.

3.8.3. Popouštění

Popouštění je technologický postup, který následuje po kalení ocelí; jeho účelem je zmenšit vnitřní pnutí a křehkost ocelí a zvětšit jejich houževnatost. Popouští se buď při nízkých teplotách, nebo při vysokých teplotách.

Popouštění při nízkých teplotách vede ke snížení vnitřních pnutí po kalení, k mírnému poklesu tvrdosti, zlepšení houževnatosti a stabilizaci rozměrů součástí. Používá se u nástrojových ocelí a u konstrukčních nadeutektoidních ocelí (s obsahem uhlíku nad 0,8 %), jako jsou např. oceli na valivá ložiska.

Popouštění při vysokých teplotách (nad 450 °C) se využívá k získání struktury s lepšími mechanickými vlastnostmi (tvrdost, houževnatost), zejména u nástrojových (rychlořezných) ocelí. Tyto oceli se popouštějí v olověných nebo solných lázních.

Při *popouštění vnějším teplem* se předmět, který je po kalení zcela ochlazen, pomalu ohřívá teplem přiváděným z vnějšku. Takto se popouštějí nástroje, které mají mít po celém povrchu stejnou tvrdost.

Při kusové výrobě se k *popouštění* někdy využívá *vnitřní teplo*, které zůstalo v předmětu (nástroji) po jeho neúplném ochlazení při kalení. Tímto způsobem se popouštějí sekáče, sekery, dláta, nože, apod., protože stačí dosáhnout velké tvrdosti jen v činné části nástroje.

Umělé stárnutí je popouštění přesných součástek a nástrojů, při kterém se setrvává na popouštěcí teplotě po dobu 200 až 500 h. Tím se stabilizují rozměry součástky.

3.8.4. Cementování

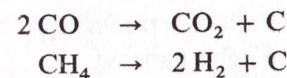
Cementování je chemicko-tepelné zpracování, při kterém se povrch součástky (obvykle z nízkouhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,3 %) při zvýšené teplotě (nad A_{c3}) sytí uhlíkem až na 0,8 %. Jde vlastně o difúzi uhlíku do krystalové mřížky železa. Následným zakalením a popuštěním se v povrchové vrstvě získá martenzitická struktura s velkou tvrdostí a odolností proti opotřebení, zatímco jádro součástky zůstává houževnaté.

Při cementování se povrchové vrstvy nasycují uhlíkem do hloubky 1 až 2 mm. Uhlík difunduje do oceli z plynného, kapalného nebo pevného prostředí.

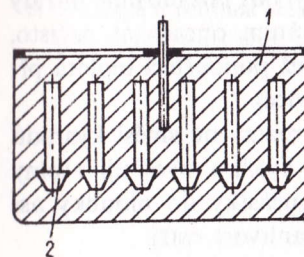
Cementování v prášku. Prášek je směs dřevěného uhlí a uhličitany barnatého $BaCO_3$ (až do 20 %). Součástky se vkládají do cementačních krabic ze žáruvzdorného plechu a zasypou se cementačním práškem (obr. 3.16). Krabice se uzavřou a utěsní (např. jilem) a vkládají se do pece, kde se ohřejí až na cementační teplotu. K určení doby potřebné k cementování přibližně platí, že době 1 h při cementační teplotě odpovídá hloubka nauhličené vrstvy asi 0,1 mm. Tento proces je zdoluhavý, neproduktivní

a nákladný a navíc zhoršuje životní prostředí v kalírně, proto se od něho upouští.

Cementování v plynech. Používají se směsi plynů, jejichž podstatnou složkou je oxid uhelnatý CO a uhlovodíky, např. methan CH_4 . Uhlík, potřebný k difúzi do oceli, vzniká při tepelném rozkladu těchto plynů. Reakce lze zapsat rovnicemi



Cementování v plynech je nejmodernější způsob cementování. Pro svou hospodárnost nachází široké uplatnění, vyžaduje však zvýšené nároky na bezpečnost při práci.



Obr. 3.16. Řez cementační krabicí
1 – cementační prášek, 2 – součástky určené k cementování

Cementování v roztavených solích. Cementační lázeň je směs roztavených solí, z nichž aktivní složku tvoří přísada kyanidů (KCN, NaCN), doplňující složkou jsou chloridy (popř. uhličitany). Při cementační teplotě (asi 900 °C) se skupina CN^- při styku s kovovým povrchem součástky rozkládá (kov působí jako katalyzátor) a uvolněné atomy uhlíku difundují pod povrch.

Kyanidové lázně jsou jedovaté, proto se přechází na cementační lázně na základě Na_2CO_3 a SiC.

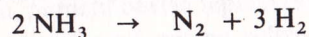
V některých případech se používá *cementační pasta*, kterou se potře povrch součástky. Po vysušení pasty se součástka ohřeje na cementační teplotu. Výhodou je krátká doba ohřevu bez použití cementačních krabic.

Náš chemický průmysl (Synthesia Kolín) dodává hotové směsi pro cementační lázně pod označením C 2 (pro mírné cementování), C 3, GS 560 MS, popř. NaCN v tabletách (pro cementování do hloubky až 1 mm), GS 54 MS, GS 820 (pro cementování do hloubky až 2 mm).

3.8.5. Nitridování

Nitridování je sycení povrchu ocelové součástky dusíkem. Jeho účelem je vytvoření tvrdé povrchové vrstvy obsahující nitridy, která je odolná proti opotřebení a zvyšuje mez únavy a odolnost součástky proti korozi. Nitridování se používá u součástek a nástrojů velmi namáhaných otěrem. Nitriduje se při teplotách 470 až 580 °C (při nich dusík nejlépe proniká do oceli). Nitridované součásti není třeba dále tepelně zpracovávat (kalit). Nitridační prostředí může být plynné nebo kapalné.

Nitridování v plynu. Zdrojem dusíku je amoniak, který se při nitridačních teplotách při styku s kovovým povrchem rozkládá podle rovnice



Část atomů dusíku difunduje do oceli a tam vytváří požadované nitridy slitinových prvků. Součástky lze před nitridováním opracovat načisto, nitridační teplota musí být asi o 100 °C nižší než popouštěcí teplota při zušlechťování. Doba sycení bývá dlouhá (30 h i více).

Nitridování v solné lázni. Lázeň se skládá z roztavené směsi kyanidů a kyanátů. Z lázně se působením vzdušného kyslíku uvolňují atomy dusíku, které difundují pod povrch ocelové součástky do hloubky asi 30 µm. Nitridováním nástrojů se prodlužuje trvanlivost ostří.

U nás se vyrábí směs MS 350 pro nitridační lázně k nitridování ocelových součástí.

3.9. KONTROLNÍ OTÁZKY A ÚKOLY

1. Co se rozumí pod pojmem technické železo?
2. Vymenujte nejdůležitější železné rudy.
3. Popište vysokou pec.
4. Popište procesy, které probíhají ve vysoké peci.
5. Popište konvertor. K čemu se využívá?
6. Jakou úlohu má vzduch (kyslík) při výrobě oceli?
7. Jaké znáte elektrické pece k výrobě oceli? Popište je.
8. Popište výrobu oceli v martinské peci.
9. Podle čeho se rozlišují různé třídy ocelí?
10. Vysvětlete způsob označování ocelí podle ČSN.
11. Vyhledejte nějakou ocelovou součást a pokuste se určit, z jakého druhu oceli je vyrobena.
12. Co je to litina? Jaké druhy litin rozeznáváme?
13. V jaké soustavě krystalizuje železo? Jaké má modifikace?
14. Jak se mění struktura železa (oceli) při ohřevu až do roztavení a pak při ochlazování taveniny až na normální teplotu?

15. Jaké maximální množství uhlíku může obsahovat ocel?
16. Co vyjadřuje rovnovážný diagram dvou kovů navzájem dokonale rozpustných?
17. Popište rovnovážný diagram slitiny dvou kovů, které jsou v pevné fázi navzájem nerozpustné.
18. Popište rovnovážný diagram metastabilní soustavy železo – karbid železa.
19. Jaké znáte způsoby tepelného zpracování ocelí?
20. Popište postup při žihání oceli. Jak se žihání projeví na vlastnostech materiálu?
21. Popište jednak podstatu kalení, jednak děje, které při kalení probíhají v oceli.
22. Proč je třeba ocel po kalení popouštět?
23. Vymenujte různé způsoby kalení a určete vhodnost použité metody pro nějakou konkrétní součástku.
24. Co je podstatou cementování a čeho se tím dosahuje?
25. Co znamená nitridování a co je jeho účelem?
26. Námět na domácí úkol:
 - a) Obstarejte si úlomky z různých slitin železa a charakterizujte je.
 - b) Obstarejte si použitou ocelovou součást (šroub, matici, pružinu, ventil, řezný nástroj apod.) a pokuste se určit, jak byla tepelně zpracována a proč.