**Základy tepelného zpracování kovů**

Tepelným zpracováním kovů se rozumí postup, při kterém se řízeně mění teploty a někdy také chemické složení kovu.

Účelem tepelného zpracování je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. V některých případech dochází při tepelném zpracování k dalším pozitivním efektům.

Průběh tepelného zpracování je u všech způsobů a u všech kovových materiálů v podstatě stejný. Skládá se z ohřevu na vhodnou teplotu, setrvání na této teplotě (prohřátí, prohřev) a následném ochlazení, přičemž se tento postup může i vícekrát opakovat.

ohřev

čas

teplota

ochlazení

prohřev

Konkrétní druh tepelného zpracování je charakterizován rychlostí a průběhem ohřevu, konečnou výškou teploty ohřevu, dobou setrvání na dané teplotě a rychlostí ochlazování, případně podmínkami při opakování základního postupu.

Vhodná rychlost ohřevu a průběh ohřívání závisejí na účelu tepelného zpracování. U některých postupů je nutný pozvolný ohřev, při němž rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou vnitřku ohřívaného materiálu není velký, aby v důsledku teplotních dilatací v materiálu nedocházelo  ke vzniku pnutí a porušení jeho pevnosti. V těchto případech se ohřev provádí v pecích s regulovanou teplotou, někdy postupně v několika pecích s rozdílnou teplotou. Jiné postupy naopak vyžadují velmi prudký ohřev povrchu kovu. Příkladem je povrchové kalení ocelí a litin, při kterém se materiál ohřívá plamenem.

Volba výšky konečné teploty ohřevu závisí na povaze strukturálních změn, které při tepelném zpracování probíhají. V některých případech zůstává struktura v podstatě stejná jako za normálních teplot, v jiných se materiál ohřevem uvádí do potřebné strukturální oblasti.

Doba prohřívání materiálu opět závisí na účelu zpracování a na rozměrech materiálu.

Rychlost ochlazování je závislá na cíli tepelného zpracování. V případech, kdy má během chladnutí být zachován rovnovážný stav soustavy, probíhá ochlazování pomalu. Příkladem je chladnutí materiálu v peci s regulovaným poklesem teploty. V jiných případech je naopak cílem zpracování rychlým ochlazením potlačit změny, ke kterým by došlo v rovnovážném stavu a tak vytvořit nové strukturální složky se specifickými vlastnostmi. Ochlazování stejně jako ohřev může probíhat stupňovitě, přičemž materiál postupně prochází několika prostředími.

***Tepelné zpracování ocelí***

Tepelné zpracování oceli je založeno na řízené difusi atomů materiálu. Z tohoto hlediska je možno tepelné zpracování rozdělit do dvou základních skupin:

- způsoby, při kterých je difuse podporována

- způsoby, při kterých je difuse potlačována; do této skupiny patří především kalení.

U postupů prvé skupiny probíhají děje tak pomalu, že stav soustavy je blízký rovnováze. Patří sem žíhání.

Pro postupy druhé skupiny je naopak typický rychlý průběh teplotních změn, při kterém je vlivem setrvačnosti materiálu rovnováha soustavy porušena. Důsledkem je zpomalení až potlačení některých procesů.

Z hlediska výšky teploty ohřevu je možno tepelné zpracování rozdělit na postupy

- bez překrystalizace, u kterých je zachována feritická a perlitická struktura

- s překrystalizací, u kterých je feritická a perlitická struktura ohřevem převedena na strukturu austenitickou; tento postup se nazývá austenitizace.

V prvním případě probíhají uvnitř materiálu pouze dílčí procesy v krystalické struktuře, spojené se změnou velikosti, formy a vzájemné polohy krystalů.

Ve druhém případě dochází k zásadním změnám struktury v důsledku přeměny modifikace kovu. Pro pochopení těchto postupů je nutno poznat chování slitin železa při řízeném přechodu z austenitu na nižší složky.

Velmi pomalé změny probíhající při ochlazování austenitu popisuje rovnovážný diagram. Rychlé změny teploty jsou spojeny s potlačením, někdy dokonce vyloučením rovnovážných přeměn. Austenit může pak být zachován i pod teplotou A1. Vzniklé nerovnovážné struktury mohou mít zcela jiný charakter než struktury rovnovážné. Pokud probíhá přeměna austenitu pod teplotou A1, nazývá se rozpadem austenitu.

Rozpad austenitu

Rozpad austenitu je možno sledovat dvojím způsobem. Při prvním je *austenit rychle ochlazen pod A1 a pak je jeho teplota po celou dobu přeměny udržována na konstantní hodnotě*. Postup je nazýván ***izotermickým rozpadem austenitu*** a ve zkratce označován **IRA**. Při druhém způsobu je *materiál ochlazován plynule*, postup je nazýván ***anizotermickým rozpadem austenitu*** a označován zkratkou **ARA**.

V časovém záznamu izotermického a anizotermického rozpadu austenitu, kresleném pro nejjednodušší případ eutektoidního složení, představuje bod O výchozí austenitizovaný stav, body A (A’) začátek rozpadu, body B (B’) konec rozpadu. Pro každou teplotu (IRA) nebo každou rychlost (ARA) ochlazování, při kterých probíhá rozpad, je experimentálně získán specifický časový záznam. Z těchto záznamů jsou pak konstruovány diagramy určující začátky a konce rozpadu.

čas

A

B

A’

B’

O

°C

A1

IRA

ARA

Konstrukce diagramu IRA je zřejmá z dalšího obrázku. Několik vzorků (v naznačeném případě šest) eutektoidní oceli bylo ohřevem austenitizováno na teplotu bodu O. Jednotlivé vzorky byly rychle ochlazeny, například proudem vzduchu, na teploty označené I až VI. U každého vzorku byly zaznamenány začátky a konce přeměny austenitu na perlit a vyneseny jako body A a B (zde naznačeno pouze u vzorku II) do diagramu. V diagramu je na časové ose užito logaritmické stupnice, která je v tomto případě vhodnější než stupnice lineární. Po ukončení přeměny byly vzorky volně ochlazeny na vzduchu.

A

austenit + perlit

perlit

°C

Ac1

austenit

čas (log. stupnice)

O

I

II

III

IV

V

VI

B

Ze záznamu je zřejmé, že u průběhů označených I až IV se přeměna se snižováním teploty, při které probíhá, urychluje. Je-li ale vzorek ochlazen na teplotu nižší než odpovídá IV, přeměna se naopak opožďuje (pomalejší difúze).

Následně byly všechny začátky přeměny A a všechny konce přeměny B spojeny čarami, které udávají příslušné hodnoty pro další teploty přeměny. Podle svého tvaru se křivky spojující začátky a konce přeměny nazývají C-křivky nebo, u složitějších slitin, S-křivky. Bod příslušející nejkratší době začátku rozpadu (zde u vzorku IV při teplotě asi 550 °C) se nazývá nos křivky.

**Perlit** vzniklý rozpadem austenitu při různých teplotách nemá stejnou formu. Při vyšších teplotách vznikají hrubší krystaly, při nižších teplotách jemnější. Při teplotách pod nosem křivky vzniká zvláštní struktura jehlicovitého tvaru, která se od perlitu vzniklého za vyšších teplot výrazně liší také svými mechanickými vlastnostmi. Nazývá se **bainit**.

Část levé křivky ležící nad jejím nosem se označuje Ps (perlit start), část pod nosem křivky Bs (bainit start).

Část pravé křivky ležící nad jejím nosem se označuje Pf (perlit finish), část pod nosem křivky Bf (bainit finish).

Při přeměně austenitu na perlit nebo bainit se mřížka železa γ mění na mřížku železa α. Protože modifikace železa γ v sobě rozpouští až 2,14 % a modifikace železa α pouze nepatrné množství (podle různých údajů 0,02 % i méně), musí během přeměny austenitu na perlit uhlík z mřížky železa γ difundovat. Na hranicích feritových zrn se vytvoří cementitové částice.

A

II

A+B

A+P

°C

Ac1

perlit

bainit

Pf

Ps

Bf

Bs

austenit

I

III

IV

V

M+zA

P+M

čas (log. stupnice)

Mf

A + M

Ms

A + P + M

VI

Při velmi rychlém ochlazení materiálu na nízké teploty (u eutektoidního složení asi na 200 °C) je difuse uhlíku z mřížky austenitu potlačena a uhlík zůstává uzavřen v mřížce železa α. Tento nestabilní stav je provázen deformací mřížky a vznikem velkého pnutí uvnitř struktury. Navenek se projevuje velkou tvrdostí a křehkostí materiálu. Takto vzniklá struktura se nazývá martenzit. **Martenzit** je tedy nestabilní přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α. Přeměna austenitu na martenzit probíhá v určitém rozsahu teplot. Teplota začátku této přeměny je označována Ms (martenzit start), teplota konce přeměny Mf (martenzit finish).

Diagram ARA se diagramu IRA svým tvarem velmi podobá. Jednotlivé změny jsou pouze poněkud opožděny. Protože v  obrázcích nejsou uváděny konkrétní časy, není v dalším výkladu nutno rozdílnost obou diagramů rozlišovat.

V dalším obrázku je znázorněn diagram IRA (nebo ARA) eutektoidní oceli se všemi popsanými změnami. Je zde zakresleno několik průběhů ochlazování (I až VI), kterých bude užito pro další výklad.

Při ochlazování podle I, tj. relativně pomalu, se začne na čáře Ps austenit měnit na perlit, přeměna je ukončena na čáře Pf. Výslednou strukturou je samý perlit.

Při ochlazování podle II není čára Ps protnuta a proto k přeměně austenitu na perlit vůbec nedojde. Skoro veškerý austenit se změní přímo na martenzit. Určité množství austenitu, označované jako zbytkový austenit, se zachová i pod Mf. Výslednou strukturou je tedy martenzit a zbytkový austenit. Protože teplota Mf je nižší než 0 °C, zpravidla nebývá v diagramech zakreslována.

Při ochlazování podle III se na Ps začne austenit měnit na perlit. Protože není protnuta čára Pf, není tato přeměna dokončena. Při teplotě Ms se zbývající austenit začne měnit na martenzit, na Mf je přeměna dokončena. Výslednou strukturou je směs perlitu a martenzitu (s možností zbytkového austenitu).

Při ochlazování podle IV se na Ps austenit začne měnit na perlit a na Pf je změna ukončena. Výslednou strukturou je samý perlit. Při rychlosti ochlazování jen o málo vyšší než IV by ale došlo i ke vzniku martenzitu jako při postupu podle III. Proto se rychlost IV nazývá martenzitická dolní kritická rychlost ochlazování, někdy zkráceně dolní rychlost zákalu. Je to tedy nejnižší rychlost ochlazování, při které by se mohl ve výsledné struktuře objevit martenzit.

Při ochlazování podle V dojde k dotyku s čarou Ps, ale perlit nevznikne (jinak: vznikne nulové množství perlitu). Při rychlosti jen o málo nižší by ovšem perlit vznikl. Proto se rychlost V nazývá martenzitická horní kritická rychlost ochlazování, někdy zkráceně horní rychlost zákalu. Je to tedy nejnižší rychlost ochlazování, při které je výsledná struktura tvořena samým martenzitem.

Při ochlazování podle VI nejsou protnuty ani čáry Ms a Mf a proto k žádné přeměně austenitu nedojde. Austenit se zachová do normálních teplot.

Vliv složení materiálu na průběh překrystalizace

Na tvar a polohu křivek v diagramech IRA a ARA má vliv složení materiálu. Obsah uhlíku ovlivňuje teploty Ms a Mf způsobem naznačeným v obrázku. S jeho obsahem se tyto teploty snižují. Uhlík má vliv na zakalitelnost, (jinak také kalitelnost) oceli, tj. na největší tvrdost dosažitelnou kalením. S vyšším obsahem uhlíku vznikne ve struktuře více martenzitu.

% C

°C

600

1,0

1,5

0,5

Mf

Ms

400

200

0

-200

Při rovnovážném ochlazování podeutektoidní uhlíkové oceli se z austenitu začíná při telotě Ar3 nejdříve tvořit ferit a až při poklesu teploty na A1 se zbytek austenitu změní eutektoidní reakcí na perlit. Podobně při rovnovážném ochlazování nadeutektoidní oceli nejdříve začne z austenitu segregovat sekundární cementit a až při poklesu teploty na A1 dojde k vytvoření perlitu. Proto se musí také v diagramech IRA a ARA objevit feritická přeměna a segregace cementitu. Průběh nerovnovážných přeměn je zřejmý z následujících diagramů.

°C

Ac1

Pf

Cf=Ps

Bf

Bs

čas

Ms

Acm

Cs

°C

Ac1

Pf

Ff=Ps

Bf

Bs

čas

Ms

Ac3

Fs

Mf

Ms

V diagramu podektektoidní oceli je v oblasti vlevo od křivek a nad Ms austenit. Na Fs začíná přeměna austenitu na ferit, na Ff tato přeměna končí a začíná přeměna zbývajícího austenitu na perlit. V oblasti mezi Fs a Ff=Ps je tedy austenit a ferit, mezi Ps a Pf je austenit, ferit a perlit, vpravo od Pf je ferit a perlit.

V diagramu nadektektoidní oceli na čáře Cs (cementit start) začíná z austenitu segregovat sekundární cementit, na čáře Cf (cementit finish) segregace končí a začíná přeměna zbývajícího austenitu na perlit. V oblasti mezi Cs a Cf=Ps je tedy austenit a sekundární cementit, mezi Ps a Pf je austenit, sekundární cementit a perlit, vpravo od Pf je sekundární cementit a perlit.

Legující čili přísadové prvky ovlivňují diagramy IRA a ARA dvojím způsobem:

°C

čas

°C

čas

- s výjimkou kobaltu posouvají křivky diagramů vpravo; to znamená, že i při nižší teplotě ochlazování dojde k zakalení; tím legury ovlivňují schopnost oceli ke kalení do hloubky neboli její prokalitelnost

- mění tvar diagramu tak, že se odděluje část bainitická od části perlitické.

***Žíhání ocelí***

Cílem žíhání ocelí je zpravidla jejich uvedení do stavu blízkého rovnováze. Proto se při žíhání užívá rovnoměrného a pomalého ohřevu, dlouhé doby prohřátí a pomalého ochlazování. Tímto režimem je podporována difuze uvnitř materiálu.

Žíhání je možno podle užité teploty ohřevu rozdělit do dvou skupin:

- žíhání bez překrystalizace, tj. při teplotách nižších než A1, ke kterým patří nejčastější způsoby žíhání

% C

- ke snížení pnutí

homogenizační

normalizační

rekrystalizační

měkké

na odstranění pnutí

°C

Ac1

Acm

Ac3

- rekrystalizační

- naměkko (měkké)

- žíhání s překrystalizací, tj. při teplotách vyšších než A1, ke kterým patří nejčastější způsoby žíhání

- normalizační

- izotermické

- homogenizační.

Pásma teplot ohřevu pro jmenované způsoby žíhání jsou zakreslena v obrázku, znázorňujícím dolní část rovnovážného diagramu.

***Žíhání na odstranění pnutí***

Cílem tohoto postupu je odstranit nebo alespoň snížit vnitřní pnutí uvnitř materiálu, které vzniklo jako důsledek předchozího zpracování (tváření, svařování, obrábění, nerovnoměrného chladnutí po odlití). Teplota ohřevu je 500 až 650 °C. Ohřevem dojde ke snížení meze kluzu materiálu natolik, že vnitřní pnutí vyvolá místní plastickou deformaci krystalů a tím jejich uvolnění.

***Žíhání rekrystalizační***

Cílem je obnovení tvárnosti oceli, která byla předtím tvářena za studena a ve které tím došlo k deformaci zrn a ke zpevnění. Ohřevem je urychlena difuze, při které se rozdrobená zrna spojují a dochází k obnovení tvárné struktury schopné další deformace. Teplota ohřevu je 550 až 700 °C.

***Žíhání na měkko***

Cílem žíhání na měkko je zlepšení obrobitelnosti materiálu. Cementit obsažený v oceli může mít dvě formy – lamelární čili destičkovou a globulární čili kuličkovou. Cementitové lamely způsobují při obrábění rychlé otupování břitu nástrojů, materiál je špatně obrobitelný. Ohřevem se dosáhne sbalování lamel do globulí, které břit nástrojů otupují mnohem méně. U podeutektoidních ocelí probíhá žíhání při teplotách pod A1, v rozmezí 680 až 700 °C. U ocelí nadeutektoidních se užívá kolísavého ohřevu, při němž se využívá setrvačnosti materiálu. Teplota se zvyšuje nad A1, ale před začátkem překrystalizace se materiál opět stabilizuje ochlazením pod tuto teplotu. Zvyšování a snižování teploty se několikrát opakuje. Výhodou tohoto postupu je urychlení procesu.

***Normalizační žíhání***

Normalizační žíhání je nejčastěji používaným a nejdůležitějším postupem. Většinou se užívá pro podeutektoidní oceli (obrázek naznačující srovnání normalizačního a izotermického žíhání je kreslen pro jednodušší případ eutektoidní oceli). Jeho cílem je dosažení rovnoměrné a jemné struktury bez vnitřních pnutí a s dobrými mechanickými vlastnostmi. Žíhání je založeno na skutečnosti, že při překrystalizaci feritu a perlitu na austenit dojde k výraznému zjemnění zrna oceli. Teplota ohřevu je 30 až 80 °C nad čarami Ac3 nebo Acm. Prohřátí musí být dostatečně dlouhé, aby vznikl homogenní austenit. Potom se materiál ochladí na vzduchu. Během nerovnovážné překrystalizace austenitu na ferit a perlit se jemná struktura zachová.

°C

čas

žíhání normalizační

žíhání izotermické

***Izotermické žíhání***

Izotermické žíhání zpravidla slouží k podobným účelům jako žíhání normalizační. Jeho výhodou je kratší doba procesu, jehož průběh je ale poněkud složitější. Teplota ohřevu je na dolní úrovni pásma ohřevu žíhání normalizačního. Po prohřátí se materiál ochladí proudem vzduchu na teplotu odpovídající asi polovině perlitické oblasti v diagramu IRA a na této teplotě se po dobu překrystalizace udržuje, překrystalizace proběhne izotermicky. Potom se materiál ochladí.

***Homogenizační žíhání***

Tento způsob se používá zejména u velkých odlitků ze slitinových ocelí, v jejichž struktuře došlo během tuhnutí k významné segregaci uhlíku a přísadových prvků. Cílem žíhání je dosažení homogenní struktury. Teploty ohřevu jsou 1000 až 1250 °C. Při tak vysoké teplotě velmi zhrubne zrno oceli a proto je zpravidla nutno po homogenizačním žíhání zařadit ještě žíhání normalizační.

***Kalení ocelí***



Účelem kalení je zvýšení tvrdosti oceli. Tohoto cíle je možno dosáhnout i jinými způsoby tepelného a mechanického zpracování. Kalení je způsobem nejčastějším.

Principem kalení je převedení perlitického nebo perliticko feritického slohu (struktury) na sloh martensitický nebo bainitický. Z toho vyplývá, že kalitelné jsou oceli obsahující alespoň 0,3 % uhlíku. U ocelí s obsahem uhlíku menším se vytváří jen malé množství martensitu, které se v tvrdosti finální struktury výrazně neprojeví (martensit je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α). Proto jsou oceli s obsahem uhlíku nižším než 0,2 % označovány jako nekalitelné.

Postup kalení je stejně jako ostatní způsoby tepelného zpracování složen z fáze ohřevu, prohřátí a ochlazení.

Výše ohřívací teploty pro kalení vyplývá ze samého požadavku zvýšení tvrdosti materiálu. V rovnovážném diagramu je pásmo teplot ohřevu pro kalení vyznačeno. Pokud by u ocelí podeutektoidních teplota ohřevu byla v oblasti přechodu austenitu na ferit (a + f), změnil by se při ochlazení austenit na martensit, ale ferit by žádnou přeměnu neprodělal. Získali bychom tak pouze směs tvrdého martensitu a měkkého feritu. Proto je nutno ohřát materiál až do oblasti austenitu. Pak získáme samý martensit. Naopak u ocelí nadeutektoidních je vhodné ohřát ocel pouze do oblasti přechodu austenitu na sekundární cementit (a + sc). Po ochlazení dostaneme směs tvrdého martensitu a ještě tvrdšího cementitu. Při ohřevu vyšším, do pásma austenitu, bychom s vyššími náklady na ohřev získali jen martensit, tedy strukturu s nižší tvrdostí.

Ochlazení oceli po jejím ohřevu musí být dostatečně rychlé, aby došlo k přeměně austenitu na martensit. Při rychlém ochlazování ale dochází ke značnému rozdílu teplot na povrchu a uvnitř materiálu a v důsledku teplotních dilatací ke vzniku vnitřních pnutí. Ta mohou způsobit porušení soudržnosti materiálu, zejména po vnějším zatížení. Proto je snahou volit jen bezpodmínečně nutnou ochlazovací rychlost. Optimální rychlostí ochlazení by tedy byla martensitická horní kritická rychlost. Protože její dodržení je v praxi obtížné, je skutečně užívaná rychlost mírně vyšší. Jak bylo výše uvedeno, závisí poloha křivek v diagramech IRA a ARA na obsahu legujících prvků. S výjimkou kobaltu legující prvky zvyšují prokalitelnost ocelí. Proto u legovaných ocelí k zakalení stačí nižší rychlosti ochlazování než u ocelí uhlíkových. Rychlost ochlazování se reguluje volbou ochlazovacího prostředí. Podle ochlazovací schopnosti je možno chladicí prostředí seřadit od nejrazantnějšího k nejmírnějšímu: vodní sprcha, proudící voda, klidná voda (s různou teplotou), voda s přísadou oleje nebo mýdla, rostlinné nebo minerální oleje(s různou teplotou), roztavené soli, roztavené kovy, proudící vzduch, klidný vzduch. Oceli, k jejichž zakalení postačuje ochlazení na vzduchu se nazývají samokalitelné.

Způsoby kalení



Martensitická struktura je tvrdá, ale křehká. K dosažení požadavku omezit nežádoucí křehkost kalené oceli bylo vyvinuto více zvláštních kalicích postupů. Uvedeny budou pouze nejčastější. Podle konečné struktury a průběhu ochlazování je možno způsoby kalení rozdělit následovně:

kalení martensitické - nepřetržité

 - přetržité - lomené

 - termální

 - se zmrazováním

 bainitické - izotermické

 - nepřetržité.

***Martensitické kalení***

Čára I v diagramu IRA (ARA) znázorňuje průběh nepřetržitého kalení. Ochlazuje se přímo z teploty bodu *a* v jediném prostředí, nejčastěji ve vodě. Přechod přes teploty Ms a Mf je prudký a proto dochází ke vzniku velkého vnitřního pnutí. Tento způsob se používá pouze při nenáročných požadavcích a pro jednoduché součásti.

Čára II znázorňuje průběh lomeného kalení. Z teploty bodu *a* se ochlazuje nejdříve prudce jako v předchozím případě, aby nedošlo ke vzniku perlitu. Při dosažení teploty těsně nad Ms (bod *b*) se kalený předmět z prvního prostředí vyjme a vloží do prostředí s nižší ochlazovací schopností, například do oleje. Přechod přes teploty Ms a Mf je pozvolnější a vzniklé napětí je menší.

Čára III znázorňuje průběh tak zvaného termálního kalení. První fáze ochlazování je stejná jako v předchozích případech. Po dosažení teploty bodu *b* se předmět vloží do prostředí, jehož teplota je udržována těsně nad Ms. Může to být například lázeň z roztavených solí. Zde se součást ponechá po určitou dobu, přičemž dochází k částečnému vyrovnání teplot na jejím povrchu a uvnitř. Před okamžikem, kdy by začala přeměna austenitu na bainit se předmět ze solné lázně vyjme a ochladí pod teploty martensitické přeměny, například na vzduchu. Účelem tohoto složitějšího postupu, který se užívá u náročnějších výrobků včetně nástrojů, je ještě více omezit nebezpečí vzniku vnitřních pnutí.

Kalení se zmrazováním se užívá u ocelí, které mají teplotu ukončení martensitické přeměny (Mf) pod 0 °C. Při kalení do běžných prostředí by u nich nebyla martensitická přeměna ukončena a materiál by nebyl dostatečně zakalen. Příkladem jsou nadeutektoidní oceli. Nejdříve se provádí ochlazování ve vodě a potom se zmrazuje v prostředí s nízkou teplotou, například v kapaném dusíku. Postup je poměrně nákladný. Známé je použití kalení se zmrazováním u nerezavějících ocelí (například u dražších kuchyňských nožů).

***Bainitické kalení***

Bainit je, jak již bylo popsáno, zvláštní formou perlitu vznikající při přeměně austenitu pod nosem křivek v diagramu IRA (ARA). Má vynikající vlastnosti. Jeho tvrdost se blíží tvrdosti martensitu, ale na rozdíl od něho je bainit velmi houževnatý. Proto není třeba bainiticky kalené oceli na rozdíl od ocelí kalených martensiticky za účelem snížení křehkosti popouštět.

Při izotermickém bainitickém kalení se materiál ochladí dostatečně rychle do solné nebo kovové lázně na teplotu odpovídající bodu *b*, tedy pod nos křivky. V této lázni se předmět ponechá tak dlouho, až se austenit přemění na bainit. Pak se předmět z lázně vyjme a nechá dochladit na vzduchu.

U slitinových ocelí, které v důsledku obsahu legujících prvků mají v diagramech IRA (ARA) zřetelně oddělenou část bainickou od části perlitické je možno provést bainitické kalení nepřetržitým procesem. Podle rychlosti ochlazování je výslednou strukturou buď samý bainit (rychlost ochlazování podle čáry I) nebo směs bainitu s martensitem (rychlost ochlazování podle čáry II). V prvním případě není třeba oceli po kalení popouštět, ve druhém ano.





***Popouštění ocelí***

Cílem popouštění ocelí je snížit jejich křehkost vzniklou při martensitickém kalení. Popouštění je založeno na částečné přeměně struktury materiálu při teplotách mezi 150 a 400 °C. Nežádoucím jevem spojeným s popouštěním je pokles tvrdosti zakaleného materiálu.

Při popouštěcích teplotách do 180 °C se tetragonální martensit mění na martensit kubický. Snížení křehkosti je výrazné, tvrdost se zmenšuje jen nepatrně. Podstatně se sníží vnitřní pnutí uvnitř materiálu. Postup se uskutečňuje vyvařením zakalených výrobků v oleji.

Při popouštění za teplot mezi 180 a 300 °C dochází k rozpadu zbytkového austenitu na bainit. Snížení křehkosti je vyšší než v předchozím případě, vyšší je ale i pokles tvrdosti.

Při popouštění za teplot mezi 300 a 400 °C dochází k úplnému rozpadu martensitu na velmi jemnou feritickou strukturu s globulárním cementitem. Jehlicovitý tvar feritických zrn se zachovává. Křehkost i tvrdost se snižují podstatně.

Při popouštění za teplot nad 400 °C narůstají cementitové globule, jehlicovitá struktura mizí. Vzniklá struktura, zvláštní forma perlitu nazývaná sorbit, je velmi pevná a houževnatá.

***Zušlechťování ocelí***

Cílem zušlechťování je dosažení sorbitické struktury vyznačující se vysokou pevností, houževnatostí a zvýšenou mezí kluzu. Princip zušlechťování spočívá ve spojení martensitického zakalení oceli a jejího následného popuštění na teploty vyšší než 400 °C.

Zušlechťování se používá jednak u hotových výrobků, jednak u hutních polotovarů.

***Patentování ocelí***

Patentování ocelí je postup užívaný při výrobě ocelových drátů tažením. Ocel se při tažení průvlakem zpevňuje, tvrdne. U oceli s malým obsahem uhlíku se pro odstranění zpevnění mezi jednotlivé tahy zařazuje normalizační nebo rekrystalizační žíhání. U pevnějších ocelí s vyšším obsahem uhlíku vyžíhání nepostačuje. Proto se volí postup obdobný izotermickému kalení na bainit, prováděný kontinuálně při teplotách lázně asi 500 °C, spojený s opakovaným tažením. Takto zpracované oceli se nazývají patentované. Patentované dráty mají vysokou pevnost (σPt = 1500 až 3000 Mpa) při dobré houževnatosti. Používají se na struny, pružiny a lana.

***Povrchové tvrzení ocelí***

V technické praxi se vyskytují případy, kdy na mechanické vlastnosti součásti jsou kladeny rozporné požadavky. Jedním z těchto případů je spojení požadavku na tvrdý povrch součásti, odolný opotřebení, a současně požadavku na odolnost součásti proti dynamickému, to jest rázovému nebo proměnlivému zatížení, tedy na její houževnatost. Příkladem takové součásti je pístní čep spalovacího motoru, otáčející se v kluzném ložisku a zachycující velmi proměnlivá zatížení od pístu.

Existuje více metod vedoucích ke splnění tohoto cíle. Některé z nich patří do oblasti tepelného zpracování, jiné do oblasti tváření nebo oblasti povrchových úprav kovů. Zde budou popsány pouze nejčastěji užívané metody spadající do tepelného zpracování. Jsou to

z ryze tepelného zpracování povrchové kalení

z chemicko tepelného zpracování cementace

 nitridace

 nitrocementace.

***Povrchové kalení***

Metoda je založena na tak rychlém zahřátí povrchu materiálu, že pouze povrchová vrstva žádané tloušťky dosáhne teploty vhodné pro kalení a po ochlazení se zakalí. Ve větších hloubkách materiálu je feritická a perlitická struktura, která se při ochlazení nezmění.

Oceli určené k povrchovému kalení musí být samy o sobě dobře kalitelné. Vhodné jsou oceli s 0,45 až 0,6 % uhlíku. Zpravidla se u nich před kalením provádí normalizační žíhání nebo zušlechťování. Jak již bylo uvedeno, tyto podeutektoidní oceli je třeba pro kalení uvést do oblasti austenitu. Povrchové kalení se provádí také u litiny.

Požadované rychlosti ohřevu je možno dosáhnout dvěma způsoby: plamenem o vysoké teplotě nebo elektroindukčně.

V prvém případě se nejčastěji užívá plamene kyslíkoacetylenového. Ohřev a ochlazení mohou probíhat dvěma způsoby. Buď se povrch předmětu pod hořákem zvolna pohybuje (či opačně se hořák pohybuje nad povrchem předmětu) a blízko za hořákem je povrch ochlazován vodní sprchou. Nebo, u rotačních předmětů, se předmět pod hořákem rychle otáčí až celý povrch dosáhne požadované teploty a následně se celý ochladí. Tloušťka prohřáté a tedy i zakalené vrstvy se reguluje dobou ohřevu a je minimálně 2 mm.

Při indukčním ohřevu je předmět vložen do vhodně tvarované indukční cívky s jediným závitem. Průchodem proudu s frekvencí od 15 do 500 kHz se v povrchu kalené součásti indukují proudy jako v sekundárním vinutí transformátoru. Energie indukovaných proudů se mění v teplo zahřívající povrch součásti. Pak se součást ochladí. Tloušťka prohřáté a tedy i zakalené vrstvy se reguluje frekvencí proudu. Zvýšením frekvence se dosáhne tenší prohřáté vrstvy. Nejmenší tloušťka zakalené vrstvy je 1 mm.

***Cementace***

Při cementaci se používají oceli, které mají málo uhlíku, do 0,2 %. Takové oceli jsou houževnaté, ale pro malý obsah uhlíku nekalitelné. Tvrdosti povrchové vrstvy se dosáhne vytvořením kalitelné povrchové vrstvy, to je zvýšením obsahu uhlíku v povrchu asi na 0,7 až 0,9 % C, difusí uhlíku zvenku a následným zakalením předmětu. Cementací se zpravidla rozumí celý proces složený z nauhličení materiálu a jeho zakalení, i když toto označení ve skutečnosti patří samotné nauhličovací fázi.

Difuse uhlíku se provádí při ohřátí cementovaných součástí na teplotu, při které je materiál schopen uhlík v sobě dobře rozpouštět. To znamená, že ocel musí být zahřáta do oblasti austenitu na teploty 850 až 900 °C. Austenit je, jak bylo uvedeno, tuhým roztokem uhlíku v železe γ, které je v sobě schopno rozpustit až 2,14 % C. Základními způsoby cementace jsou

 - v prášku dřevěného uhlí s přísadou 7 až 20 % uhličitanu barnatého, urychlujícího proces nauhličení

- v solné lázni, nejčastěji kyanidu sodném

- v plynu, nejčastěji CO, CH4.

Cementace v prášku je nejjednodušší, nevyžaduje nákladné zařízení. Předměty se vkládají do plechových krabic a zasypávají práškem. Krabice se pak vkládají do pece. Nevýhodou tohoto způsobu je jeho pomalost. Za hodinu se ocel nauhličí do hloubky asi 0,1 mm.

Při cementaci v lázni a v plynu dochází ohřevem k rozkladu uhlíkatých sloučenin a takto uvolněné atomy uhlíku rychleji pronikají do povrchu materiálu. Nejrychleji probíhá cementace v plynu. Oba způsoby vyžadují speciální zařízení.

Požadované tvrdosti povrchu součástí se při cementaci dosáhne až zakalením nauhličené vrstvy. Materiál ve větších hloubkách, který nebyl nauhličen, zůstal nekalitelný a zachoval si původní vlastnosti včetně požadované houževnatosti. Z hlediska nebezpečí vzniku vnitřních pnutí leží optimální kalicí teplota při výše uvedeném složení nauhličené povrchové vrstvy (přibližně eutektoidní složení oceli) těsně nad A1,ale cementace sama probíhala při teplotách vyšších. Proto se náročnější součásti nechávají pomalu vychladnout a na optimální teplotu se znovu ohřejí. Pak teprve se kalí. Méně náročné výrobky se kalí přímo z cementační teploty bezprostředně po vyjmutí z cementačního prostředí, tzv. z jednoho žáru.

***Nitridace***

Nitridace je založena na zcela jiném principu než předchozí metody. Povrchová vrstva získává svoji tvrdost přítomností tvrdých a stabilních nitridů některých legujících prvků, především hliníku (~ 1 %), chromu (~ 2 %), vanadu (~ 0,5 %) a molybdenu (~ 0,25 %). Také železo samo tvoří dostatečně tvrdé nitridy, které ale nejsou stabilní a po čase se rozpadají.

Nitridy se v povrchové vrstvě vytvářejí difusí dusíku při teplotách 500 až 600 °C, nitridací. Nitridaci nelze provádět v prostředí molekulárního dusíku, který se s kovy slučuje jen velmi málo. Dobře s kovy reaguje atomární dusík, vznikající štěpením různých dusíkatých sloučenin za zvýšené teploty. Tato forma dusíku se nazývá “dusík ve stavu zrodu”.

Nitridace se provádí v prostředí

- plynném, nejčastěji rozkladem čpavku

- kapalném, nejčastěji ve směsi kyanidu sodného a kyanatanu draselného.

Rychlost nitridace je pouze asi 0,01 mm za hodinu.

Výhodami nitridace oproti povrchovému kalení a cementaci je

- vyšší tvrdost povrchové vrstvy

- nižší provozní teploty a s tím spojené nižší pnutí materiálu

- skutečnost, že se neprovádí kalení

- vedlejší efekt zvýšené odolnosti proti korozi

- vedlejší efekt zvýšené meze únavy materiálu.

Někdy, například u nástrojů, se nitridace provádí pouze za účelem uváděných vedlejších efektů.

Nevýhodou nitridace je malá rychlost procesu. Uvedená hodnota 0,01 mm za hodinu je průměrnou hodnotou při nitridované tloušťce asi 0,5 mm. Při prodlužování procesu se nitridace stále zpomaluje. Tloušťka 0,5 mm je zpravidla krajní možností z hlediska přijatelnosti nákladů. Tato síla tvrzené vrstvy ale nepostačuje v případech bodového zatížení stykových ploch součástí a prolamuje se.

***Nitrocementace***

Nitrocementace je kombinací cementace a nitridace v jednom procesu. Podle užité teploty jeden z postupů převažuje: při teplotách 750 až 800 °C nitridace, při teplotách 800 až 900 °C cementace.

Po nitrocementaci je nutno materiál zakalit.