

4 TEPELNÉ SPRACOVANIE OCELÍ

Vlastnosti ocele závisia nielen od jej chemického zloženia, ale predovšetkým od štruktúry, t.j. od fázového zloženia a od tvaru, veľkosti a rozloženia jednotlivých fáz. Požadovanú štruktúru ocele získame tepelným spracovaním.

Tepelné spracovanie zahŕňa technologické postupy, pri ktorých sa riadeným tepelným režimom dosahujú štruktúrne zmeny, výsledkom ktorých je zmena vlastností v požadovanom smere. Tepelné spracovanie sa realizuje v troch operáciách:

- ohrevom určitou rýchlosťou na stanovenú teplotu,
- zotrvanie (výdrž) na tejto teplote,
- ochladzovanie definovanou rýchlosťou.

Teoretická podstata tepelného spracovania teda spočíva vo fázových a štruktúrnych premenách v tuhom stave. Pri ich štúdiu vychádzame z rovnovážneho diagramu Fe-C. Štruktúrne zmeny zodpovedajú zákonitostiam IRA a ARA diagramu príslušnej ocele a rýchlosti ochladzovania. Základné fázové premeny, ktoré sa uplatňujú pri tepelnom spracovaní sú: austenitizácia, perlitická, bainitická a martenzitická premena a premeny pri popúšťaní.

Medzi základné procesy tepelného spracovania kovových materiálov je možné zaradiť:

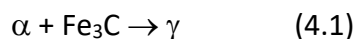
- **termické procesy** pri ktorých k zmenám vlastností materiálov dochádza zmenami teplôt. K termickým procesom spracovania ocelí patrí **žíhanie, kalenie a popúšťanie**. U hliníkových zliatin **vytvrdzovanie**.
- **chemicko-tepelné procesy** pri ktorých okrem zvýšených teplôt na povrchy pôsobí prostredie pri ktorom dochádza k zmenám v povrchových vrstvách.
- **termomechanické procesy** pri ktorých dochádza k zmenám štruktúry a vlastností materiálov kombináciou tepelného spracovania a plastickej deformácie.

4.1 Fázové premeny pri tepelnom spracovaní

Tepelné spracovanie zahŕňa technologické postupy, pri ktorých sa riadeným tepelným režimom dosahujú štruktúrne zmeny, výsledkom ktorých je zmena vlastností v požadovanom smere. Teoretická podstata tepelného spracovania teda spočíva vo fázových a štruktúrnych premenách v tuhom stave. Pri ich štúdiu vychádzame z rovnovážneho diagramu Fe-C. Štruktúrne zmeny zodpovedajú zákonitostiam IRA a ARA diagramu príslušnej ocele a rýchlosti ochladzovania. Základné fázové premeny, ktoré sa uplatňujú pri tepelnom spracovaní sú: austenitizácia, perlitická, bainitická a martenzitická premena a premeny pri popúšťaní.

4.1.1 Austenitizácia

Základným krokom pri tepelnom spracovaní s prekryštalizáciou je austenitizácia - premena heterogénnej feriticko-karbidickej štruktúry na homogénny austenit, ktorá nastáva pri ohreve ocele nad prekryštalizačné teploty (Ac_1 Ac_3 , A_{cm}) a výdrži na týchto teplotách, podľa schémy:

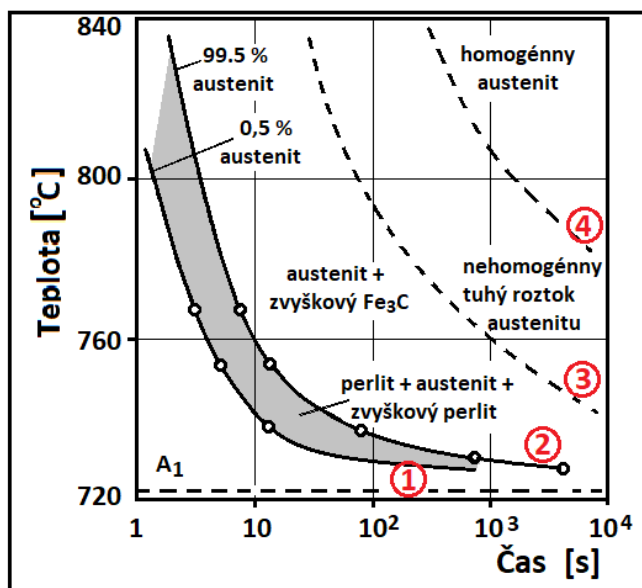


Austenit je pre rad postupov tepelného spracovania ocelí východiskovou štruktúrou; celý proces sa v týchto prípadoch zakladá na rozpade austenitu pri nasledujúcom ochladzovaní za určitých definovaných podmienok. Austenitizácia je difúzna premena. Pri eutektoidnej oceli môžeme priebeh austenitizácie rozdeliť na tieto čiastkové pochody:

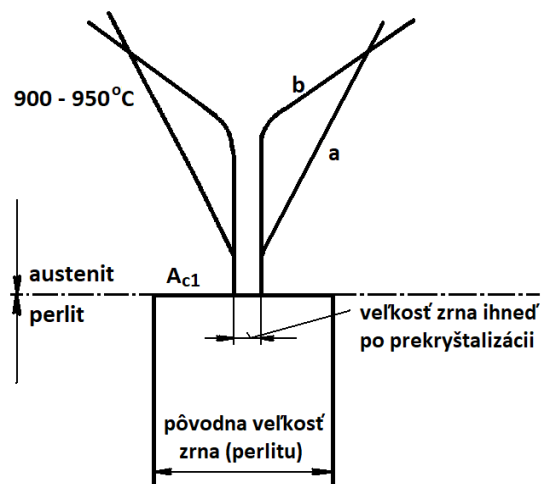
- vznik a rast zárodkov austenitu v perlitickom ferite,
- rozpúšťanie cementitu (u legovaných ocelí aj ostatných karbidov),
- homogenizácia austenitu (difúzne zrovnomenenie chemického zloženia austenitického zrna),
- rast austenitického zrna.

Premena má difúzny charakter a prebieha tvorbou zárodkov austenitu a ich ďalším rastom. Kinetiku austenitizácie vyjadrujú austenitizačné diagramy - obr. 4.1. Pri všetkých oceliach však požadujeme po austenitizácii homogénny austenit. To vyžaduje správnu voľbu austenitizačnej teploty a doby výdrže na tejto teplote.

Po prekryštalizácii pri ohreve nad kritické teploty je vznikajúce austenitické zrno malé. Rast austenitického zrna je nežiadúci jav, ktorý je dôsledkom príliš vysokej austenitizačnej teploty, alebo príliš dlhej výdrže na austenitizačnej teplote. Poznáme ocele dedične hrubozrnné, ktoré sú náchylné na rast zrna aj pri obvyklých teplotách austenitizácie – krivka a, obr. 4.2 a ocele dedične jemnozrnné (dezoxidované Al, Ti, V), pri ktorých je do teplôt cca. 1000°C náchylnosť na rast zrna veľmi malá – krivka b. Prílišné zhrubnutie zrna považujeme za štruktúrnú chybu a nazývame ho prehriatie. Následkom prehriatia austenitu je, že aj štruktúry po rozpade austenitu sú hrubé a z tohto dôvodu nemajú dobré predovšetkým krehkolomové vlastnosti. Vo všetkých postupoch tepelného spracovania, využívajúcich austenitizáciu nasleduje po nej ochladzovanie, pri ktorom nastáva premena austenitu na iné fázy. Premeny austenitu pri tepelnom spracovaní sa môžu uskutočňovať pri konštantnej teplote, vtedy hovoríme o izotermickom rozpade austenitu, alebo pri plynulom ochladzovaní, t.j. pri anizotermickom rozpade austenitu.



Obr. 4.1 Austenitizačný diagram eutektoidnej uhlíkovej ocele, 1 – krivka začiatku vylučovania perlitu, 2 – krivka konca vylučovania perlitu, 3 – krivka konca vylučovania karbidov, 4 – krivka konca vylučovania gradientov koncentrácie uhlíka



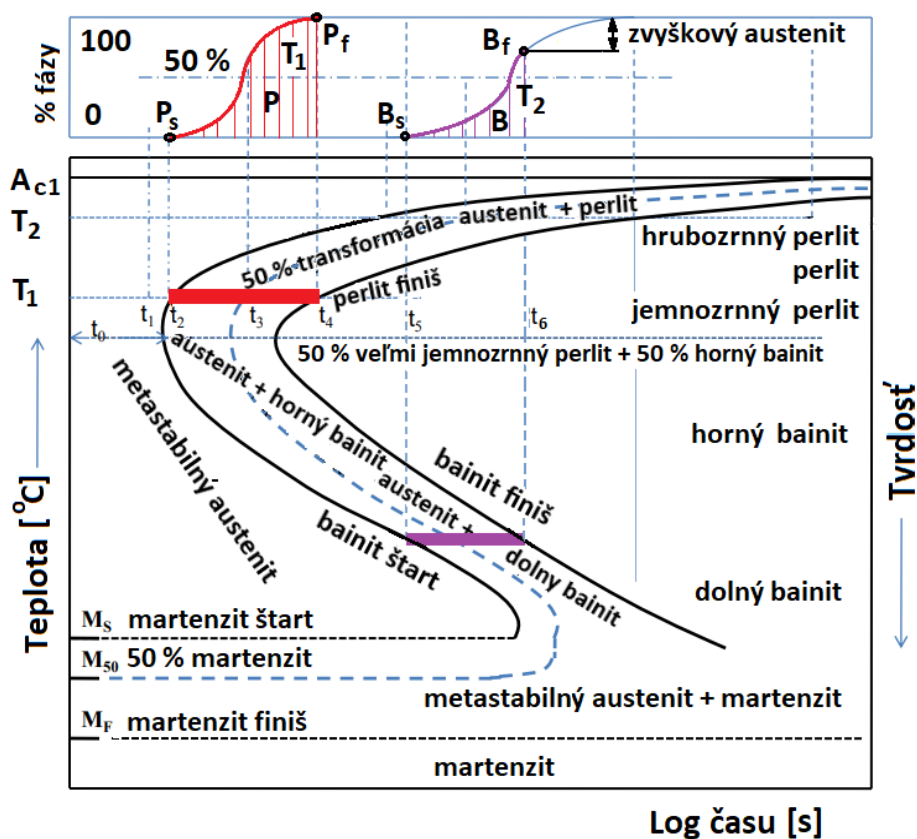
Obr. 4.2 Schéma rastu zrna austenitu eutektoidnej ocele

4.1.2 Izotermický rozpad austenitu

Diagramy IRA (izotermického rozpadu austenitu) graficky znázorňujú procesy pri rozpade austenitu pre oceľ určitého chemického zloženia. Konštruujú sa na základe kinetických kriviek perlitickej a bainitickej premeny, (obr. 4.3). Transformačné diagramy sa využívajú predovšetkým v procesoch tepelného spracovania ocelí. V menšom rozsahu sa používajú pri tepelnom spracovaní liatin. Údaje z diagramov IRA (izotermického rozpadu austenitu, t.j. rozpadu austenitu pri konštantnej teplote) nachádzajú využitie pri izotermických spôsoboch tepelného spracovania, ako sú izotermické žihanie a izotermické zušľachťovanie (t.j. bainitické kalenie).

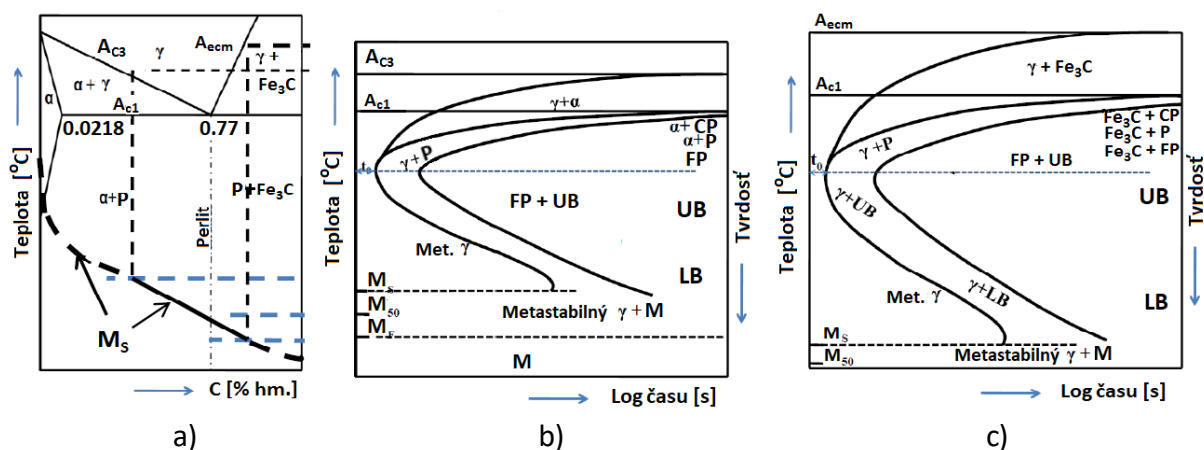
Častejšie sa však používajú diagramy ARA (anizotermického rozpadu austenitu), ktoré informujú o zmenách austenitu pri plynulom ochladzovaní. Tieto diagramy poskytujú informácie o vplyve rýchlosti ochladzovania z teploty austenitizácie (rýchlosť ochladzovania závisí od veľkosti ochladzovaného predmetu a druhu ochladzujúceho prostredia) na výslednú štruktúru a tvrdosť použitej ocele.

Každá oceľ má svoj špecifický diagram IRA alebo ARA. Pomocou týchto diagramov možno napríklad predpovedať, aké vlastnosti (t.j. štruktúru a tvrdosť) bude mať predmet s daným rozmerom po kalení do vody, oleja alebo po ochladení na vzduchu.



Obr. 4.3 Kinetické krivky rozpadu austenitu eutektoidnej ocele a IRA diagram eutektoidnej ocele; P - perlitická premena pri T_1 , B - bainitická premena pri T_2 ,

Pre konštrukciu diagramu IRA sú dôležité časové údaje o začiatku (P_s , B_s – perlit, bainit štart) a ukončení (P_f , B_f – perlit, bainit finiš) perlitickej a bainitickej premeny. Diagram IRA pre podeutektoidnú a nadeutektoidnú oceľ je na obr. 4.4.



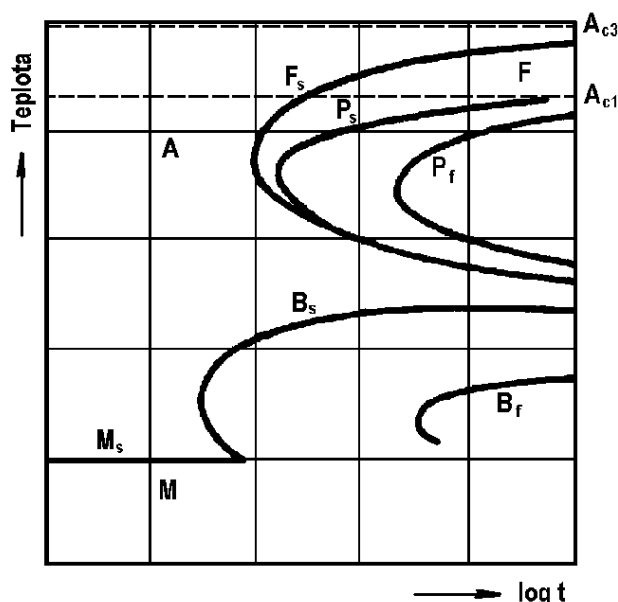
Obr. 4.4 IRA diagramy ocelí

a) zjednodušený diagram Fe-Fe₃C, b) IRA diagram podeutektoidnej ocele, c) IRA diagram nadeutektoidnej ocele (P – perlit, γ – austenit, α – ferit, UB – horný bainit, LB – dolný bainit, FP – jemnozrnný perlit, CP – hrubozrnný perlit, M – martenzit, M_s – martenzit štart, M_f – martenzit finiš, Met. – metastabilný)

Najväčší vplyv na polohu a tvar diagramov má chemické zloženie austenitu. Takmer všetky prísadové prvky (okrem Co a Al) spomaľujú rozpad austenitu a posúvajú krivky doprava. Karbidotvorné prvky (Cr, Mo, V, W) okrem toho oddeľujú perlitický a bainitický stupeň premeny, čím výrazne menia tvar diagramu, ktorý má miesto jedného dva oblúky - obr. 4.5. Izotermický rozpad austenitu je proces, pri ktorom sa rozpadá homogénny austenit pri konštantnej teplote, nižšej ako A_1 . Priebeh rozpadu austenitu bude závisieť od teploty rozpadu, ktorá ovplyvňuje difúzne pochody prvkov:

- samodifúziu železa, potrebnú na premenu kryštalickej mriežky železa,
- difúziu uhlíka, potrebnú na zmeny koncentrácie uhlíka medzi reagujúcimi fázami.

V závislosti na teplote rozpadu austenitu môžu nastať nasledujúce typy premeny: perlitickú, bainitickú a martenzitickú.

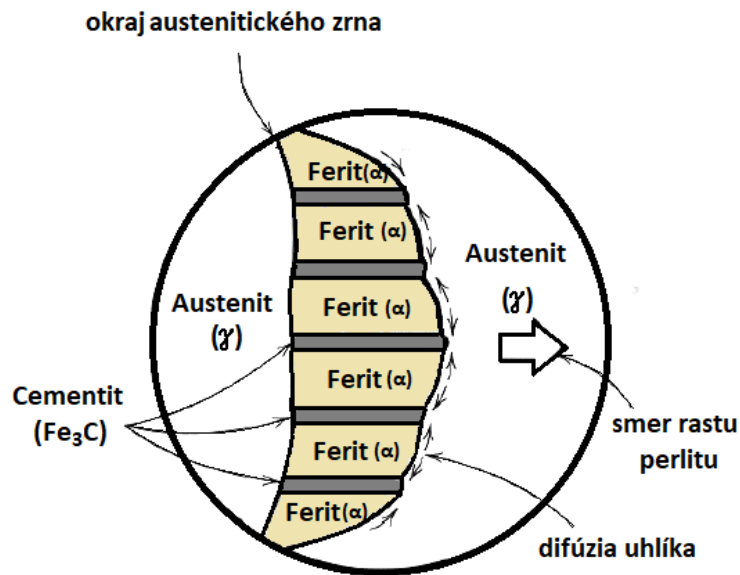


Obr. 4.5 Vplyv legujúcich prvkov na zmeny kriviek v IRA diagrame eutektoidnej ocele

Perlitická premena je fázovou premenou difúznou. Prebieha pri malom podchladení austenitu v intervale teplôt A_1 až 500°C , podľa schémy:

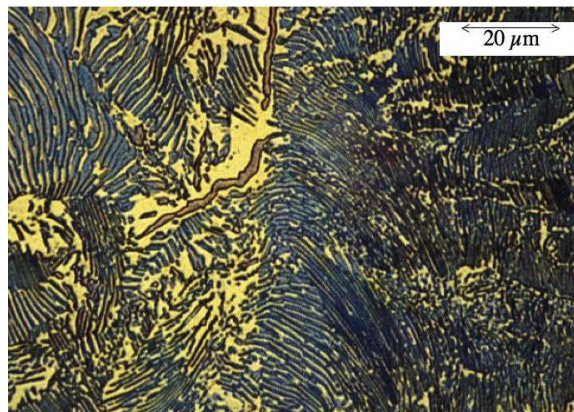


Perlit je dvojfázová zmes feritu a cementitu. Vznik perlitu je iniciovaný vznikom zárodka cementitu alebo feritu na hranici austenitického zrna. Pri raste cementitickej lamely, obr. 4.6 sa okolitý austenit ochudobní o uhlík, a tým sa vytvoria podmienky na vznik dvoch lamiel feritu. Útvár pozostávajúci z jednosmerne usporiadaných lamiel feritu a cementitu nazývame perlitická kolónia. Zrno perlitu potom tvorí súbor rôzne orientovaných kolónií (obr. 4.7).



Obr. 4.6 Schéma vzniku perlitickej kolónie

S klesajúcou teplotou rozpadu austenitu na perlit sa výsledná štruktúra zjemňuje. Jemnozrnný perlit má vyššiu tvrdosť a pevnosť ako hrubozrnný perlit.



Obr. 4.7 Perlitická mikroštruktúra

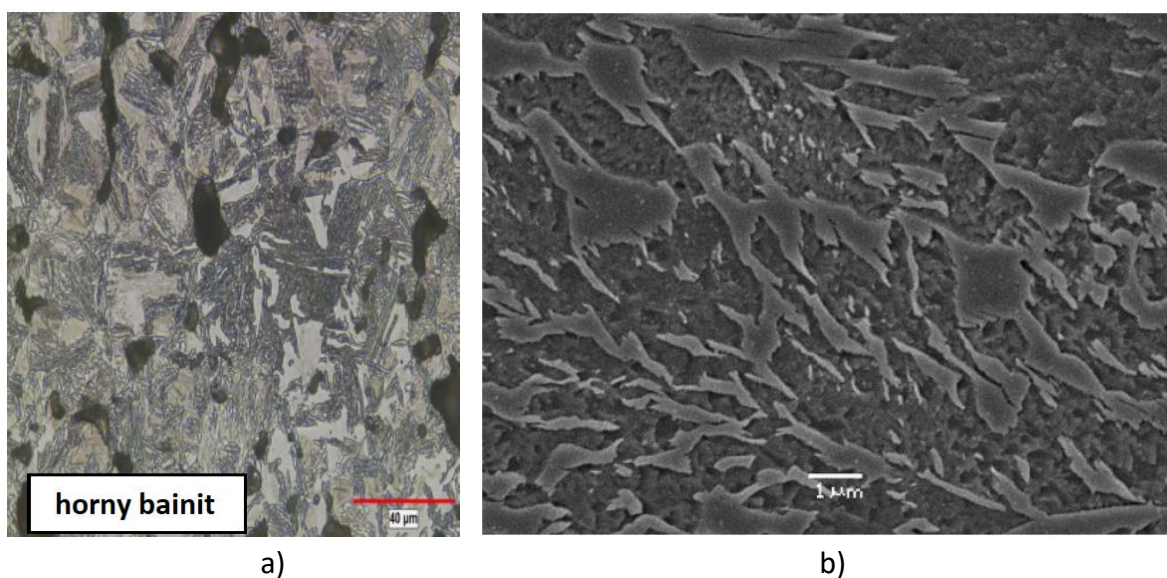
Bainitická premena prebieha pri stredne veľkom podchladení, pri teplotách asi pod 500°C až po teplotu začiatku martenzitickej premeny podľa rovnice:



Charakterizuje ju bezdifúzna transformácia mriežok $\text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\alpha$ pri súčasne prebiehajúcej difúzii uhlíka. Vzhľadom na obmedzenú difúziu atómov uhlíka vznikajúci tuhý roztok α je presýtený uhlíkom ($\alpha_{\text{pres.}}$). Výsledkom premeny je nelamelárna zmes $\alpha_{\text{pres.}} + \text{Fe}_3\text{C}$ nazývaná bainit. Konkrétny mechanizmus tvorby bainitu i jeho morfológia sa výrazne menia s teplotou bainitickej premeny. Bainit vznikajúci pri vyšších teplotách (nad cca. 350°C) nazývame horný, a bainit tvorený pri nižších teplotách (cca. pod 350°C) nazývame dolný.

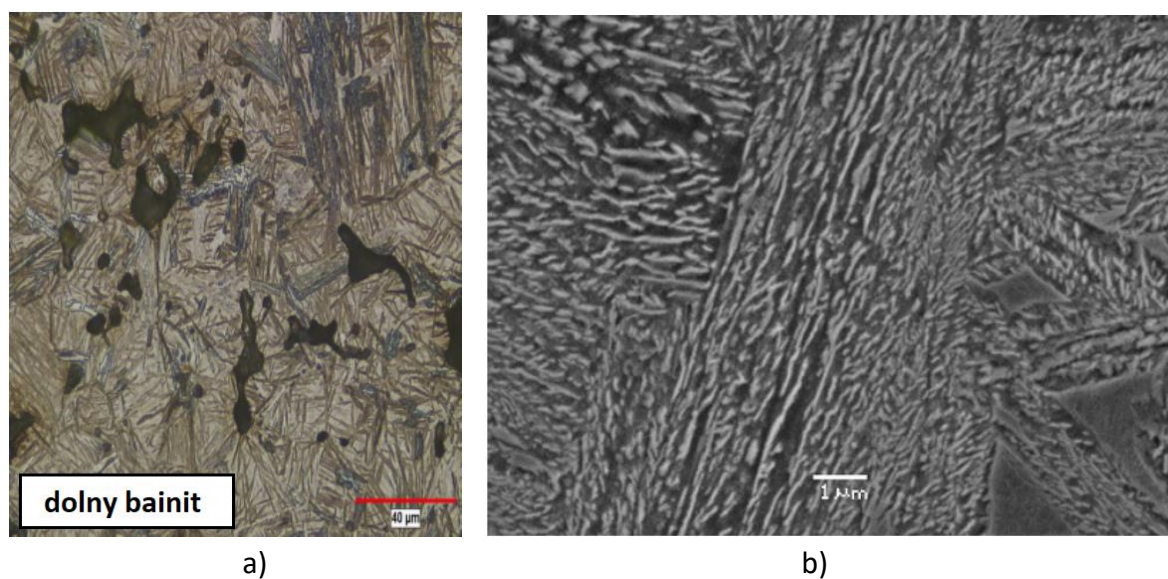
Štruktúra horného bainitu ktorá je na obr. 4.8, tvoria ho zväzky hrubších ihlíc bainitického feritu s pozdĺžne usporiadanými časticami cementitu, ktoré sú vylúčené na povrchu ihlíc. Má vyššiu hustotu dislokácií a nízku rázovú aj lomovú húževnatosť. Táto závisí od veľkosti pôvodných austenitických zŕn. Dolný bainit (obr. 4.9) vznikajúci pri nižších teplotách (podľa krivky 2, obr. 4.3) a väčších podchladení austenitu je tvorený tenkými doskami bainitického feritu. Jeho húževnatosť je zvyčajne vyššia ako u horného bainitu.

Pre bainitickú premenu (rovnako ako pre všetky šmykové premeny) je typické, že nie je celkom ukončená. V štruktúre zostáva určitý podiel zvyškového austenitu (viď obr. 4.3). Bainit je tvrdá, pevná a pritom vysoko húževnatá štruktúra.



Obr. 4.8 Mikroštruktúra horného bainitu

a) – mikroštruktúra pozorovaná na svetelnom mikroskope, b) – mikroštruktúra SEM

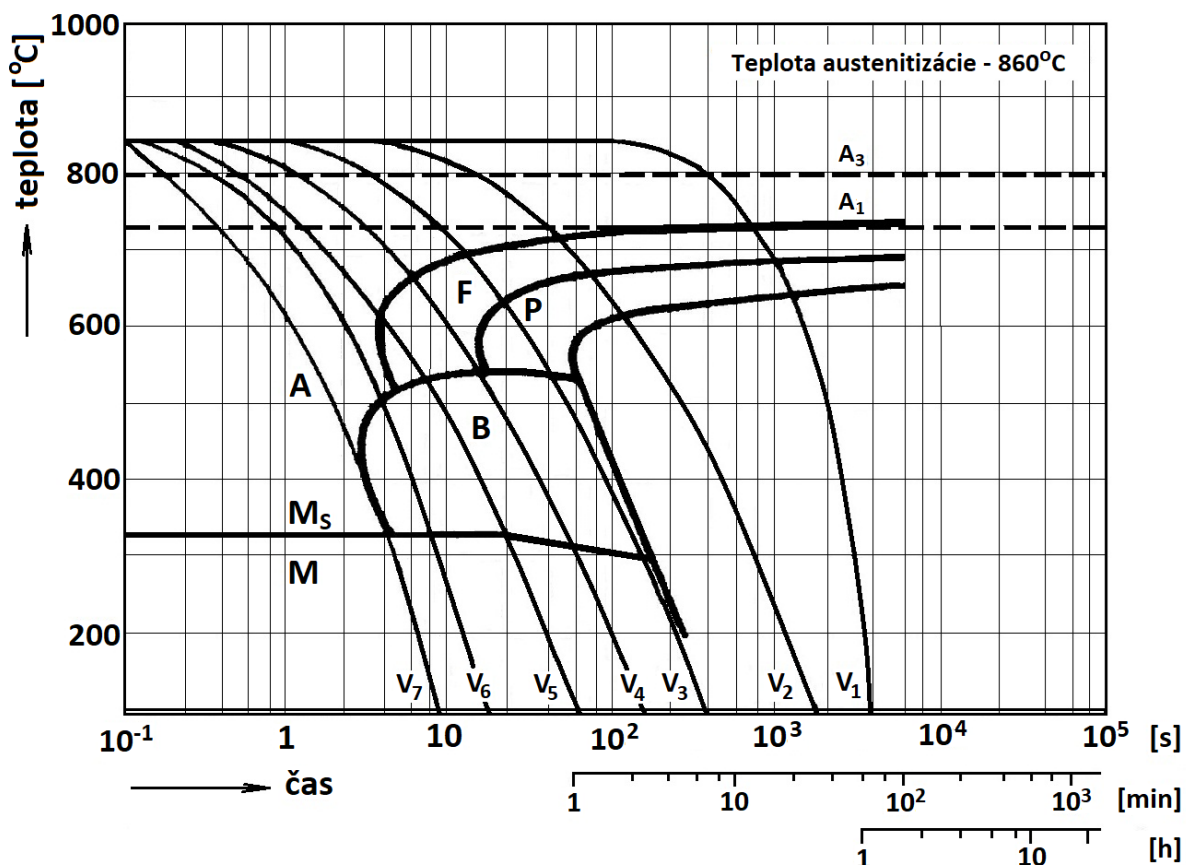


Obr. 4.8 Mikroštruktúra dolného bainitu

a) – mikroštruktúra pozorovaná na svetelnom mikroskope, b) – mikroštruktúra SEM

4.1.3 Anizotermický rozpad austenitu

V technickej praxi sa častejšie stretávame s takými postupmi tepelného spracovania, kedy po ohreve na predpísanú teplotu nasleduje plynulé ochladzovanie. Rozpad austenitu pri plynulom ochladzovaní môžeme sledovať v diagramoch anizotermického rozpadu austenitu – ARA diagramy. Výsledná štruktúra ocele môže byť tvorená zmesou produktov rozpadu a závisí od rýchlosti ochladzovania. Na obr. 4.9 je ARA diagram podeutektoidnej nízkolegovanej ocele s rôznymi rýchlosťami ochladzovania vzoriek, od v_1 po v_7 .



Obr. 4.9 Diagram ARA podeutektoidnej nízkolegovanej ocele 37MnSi5

Pri pomalom rýchlosti v_1 a v_2 sa austenit transformuje na ferit a perlit. Po ochladzovaní rýchlosťou v_2 bude v štruktúre viac perlitu ako pri rýchlosti v_1 . Rastúca rýchlosť ochladzovania má na priebeh rozpadu austenitu analogický vplyv ako znižujúca sa teplota izotermického rozpadu austenitu, pretože dochádza k zhoršeniu podmienok pre difúziu (zníženie teploty a skrátenie času na difúzne pochody). Vyššie rýchlosti ochladzovania majú za následok zjemnenie štruktúry a zvýšenie tvrdosti ocele. Pri rýchlostiach v_3 až v_6 sa časť austenitu zachová i pri teplotách, kedy už prebieha bainitická a martenzitická premena.

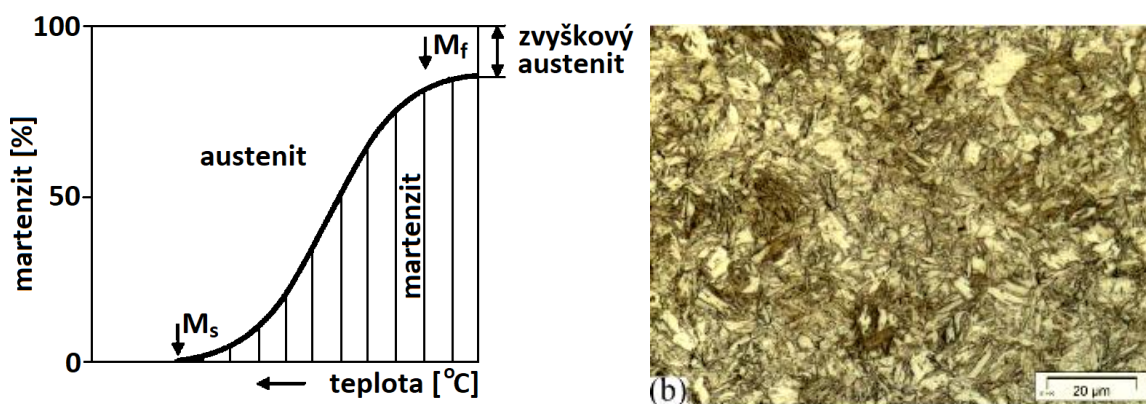
Rýchlosť v_3 sa nazýva dolná kritická rýchlosť ochladzovania. Je to najmenšia rýchlosť ochladzovania austenitu ktorá spôsobí martenzitickú premenu aspoň v časti objemu. Štruktúru bude tvoriť zmes malého množstva feritu, bainit, martenzit a zvyškový austenit. Po ochladzovaní rýchlosťou v_4 a v_5 bude v štruktúre malý podiel perlitu, ďalej bainit, martenzit a

zvyškový austenit. Zvyškový austenit je sprievodným znakom bainitickej a martenzitickej premeny.

Pri rýchlosti ochladzovania v_6 začína rozpad austenitu priamo bainitickou a pokračuje martenzitickou premenou. Výsledná štruktúra bude bainit, martenzit a zvyškový austenit. S rastúcou rýchlosťou ochladzovania sa zvyšuje podiel martenzitu vo výslednej štruktúre.

Rýchlosť v_7 nazývame hornou kritickou rýchlosťou ochladzovania. Je definovaná ako najmenšia rýchlosť, ktorá spôsobuje martenzitickú premenu v celom objeme. Postup tepelného spracovania ktorý spočíva v rozpade homogénneho austenitu martenzitickou transformáciou sa nazýva **kalenie**.

Martenzitická premena sa uskutočňuje pri ochladzovaní dostatočne veľkou rýchlosťou, ktorá zamedzí difúzii atómov železa aj uhlíka. Hlavným znakom martenzitickej premeny je teda jej bezdifúznosť. Premena začína pri teplote M_s a končí pri teplote M_f (obr. 4.10). Podobne ako bainitická premena neprebehne transformácia na martenzit úplne v celom objeme a vždy zostáva určité množstvo zvyškového austenitu. Hodnota teplôt M_s a M_f , závisí od chemického zloženia austenitu. So zvyšovaním obsahu uhlíka a legujúcich prvkov (Mn, Cr, Ni) klesá teplota M_s aj M_f . Pri asi 0,6 % C, je teplota M_f pod teplotou okolia a zníženie množstva zvyškového austenitu je možné len dodatočne, ďalším podchladením tzv. zmrazovaním.



Obr. 4.10 Krivka priebehu martenzitickej premeny, Obr. 4.11 Martenzitická mikroštruktúra M_s , M_f – teploty začiatku a konca tvorby martenzitu.

Produktom tejto bezdifúznej premeny je silne presýtený tuhý roztok uhlíka v železe α , nazývaný martenzit, obr. 4.11. Pri premene dôjde k zmene mriežky K12 na K8, avšak bez prerozdelenia obsahu uhlíka. Všetok uhlík rozpustený v austenite zostane v mriežke K8 v pôvodných polohách. Napr. pri eutektoidnej oceli tak v mriežke zostane rozpustených cca. 0,8 %C, namiesto rovnovážnych 0,02 %C. Vplyvom presýtenia uhlíkom dochádza k deformácii kubickej priestorovo centrovanej mriežky a martenzit má tetragonálnu mriežku priestorovo centrovanú s parametrami a , c . Stupeň tetragonality daný pomerom c/a závisí na obsahu uhlíka. So zvyšovaním jeho obsahu stupeň rastie a naopak. Martenzit je tvrdá a

krhľká štruktúrna zloľka. Tepelné spracovanie, pri ktorom sa úmyselne vyvolá martenzitická premena, sa označuje kalenie.

Pri legovaných oceliach vplýva rastúci obsah prísad (podobne aj uhlíka) na diagramy ARA analogicky ako na diagramy IRA:

1. posúva krivky rozpadu k nižším rýchlostiam, teda znižuje hornú kritickú rýchlosť ochladzovania,
2. znižuje teploty martenzitickej premeny.

4.2 ZÁKLADNÉ POSTUPY TEPELNÉHO SPRACOVANIA

Z technologického hľadiska pozostáva každé tepelné spracovanie z ohrevu na teplotu tepelného spracovania, výdrže na tejto teplote a ochladenia na teplotu okolia. Druh tepelného spracovania závisí od výšky teploty ohrevu a od rýchlosti ochladzovania (obr. 4.12). Technologické postupy tepelného spracovania kovov, používané v technickej praxi, môžeme rozdeliť do štyroch základných skupín:

1. **Žihanie** - postupy, pri ktorých získavame v porovnaní s východiskovým stavom rovnovážnejšie štruktúry.
2. **Kalenie a popúšťanie** - postupy, pri ktorých vytvárame štruktúry s určitým stupňom nerovnováŹnosti. V hliníkových zliatinách sa používa postup, nazývaný **vytvrdzovanie**.
3. **Chemicko-tepelné spracovanie** - postupy, pri ktorých dochádza k štruktúrnym zmenám v dôsledku zmeny chemického zloŹenia povrchových vrstiev materiálu.
4. **Termomechanické spracovanie** - postupy, pri ktorých sa dosahuje požadovaná zmena vlastností kombináciou intenzívneho tvárnenia a tepelného spracovania.

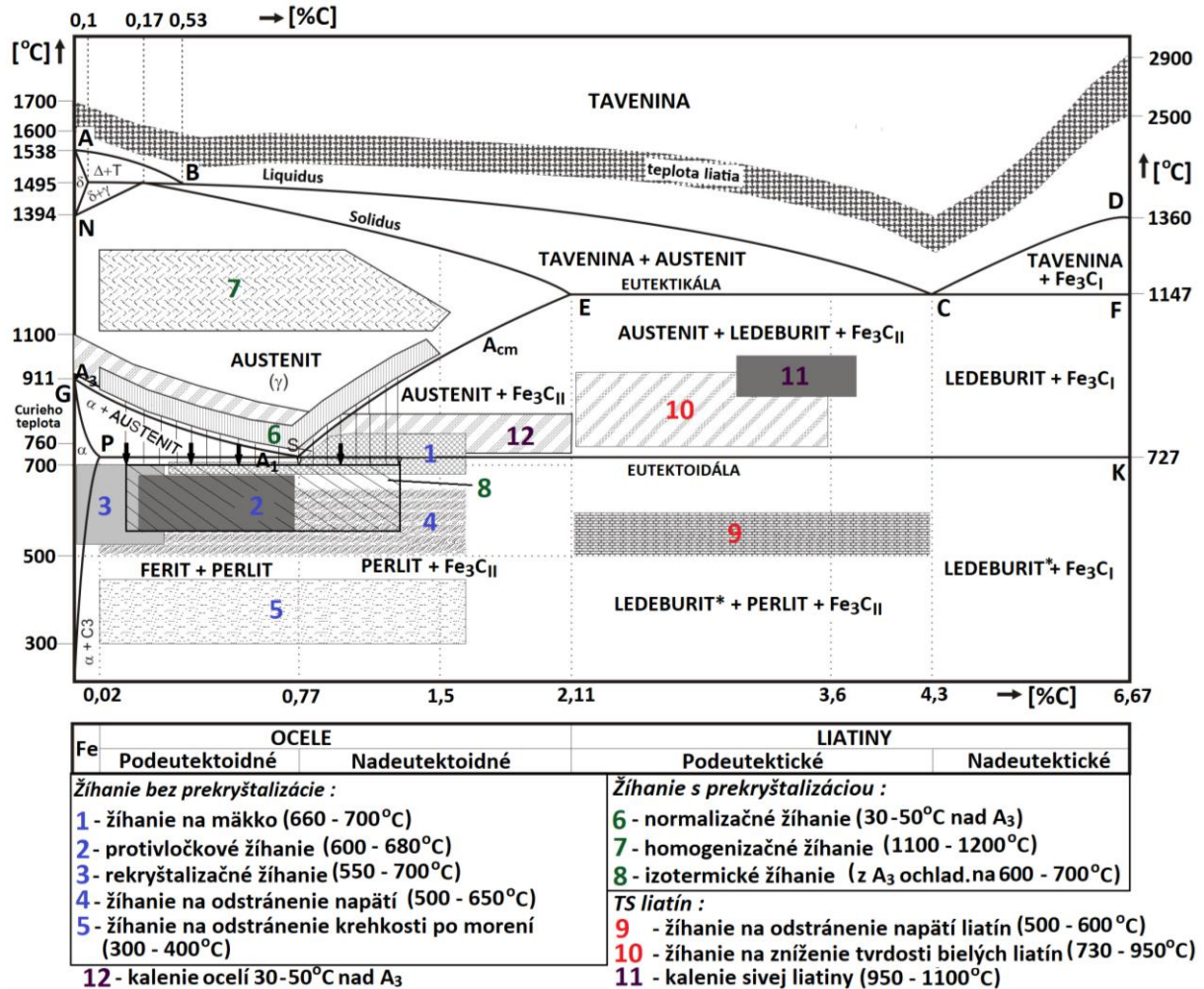
Ohrev a doba zotrvania na teplote pri tepelnom spracovaní sú dôleŹité nielen z technologického, ale aj z ekonomického hľadiska. So zvyšovaním rýchlosti ohrevu sa zvyšujú tepelné napätia. Teplotný spád po priereze súčiasťky spôsobuje, Źe aj fázové premeny budú pri ohreve prebiehať postupne smerom od povrchu a spôsobia vznik štruktúrných napätí. Termické a štruktúrne napätia môžu spôsobiť zmenu tvaru, bortenie, praskanie a dokonca aj porušenie výrobku.

Rýchlosť ohrevu a teplotný spád výrazne ovplyvňuje teplotná vodivosť materiálu. Všetky prísadové prvky rozpustené v základnej matici teplotnú vodivosť zhoršujú. V oceliach najvýraznejšie v tomto smere pôsobí uhlík a ďalej prvky v poradí Si, V, Cr, Mn, Ni, Mo, V.

Ohrev predmetov pri tepelnom spracovaní je možné robiť nasledovne:

- súčasný ohrev vsádzky a pece,

- ohrev v peci udržiavanej nepretržite na teplote ohrevu,
- intenzívny ohrev v peci, ktorá má podstatne vyššiu teplotu ako je teplota ohrevu,
- stupňovitý ohrev v dvoch a viacerých prostrediach.



Obr. 4.12 Základné druhy tepelného spracovania ocelí a liatin

Každý z týchto spôsobov sa vyznačuje určitým vplyvom na rozdiel teplôt medzi teplotou pece, teplotou povrchu a jadra ohrievaných povrchov. Stupňovitý ohrev umožňuje znížiť napätia pri ohreve, obmedziť bortenie a praskanie na minimum. Rýchlorezné ocele sa ohrievajú na kaliacu teplotu v troch až v štyroch stupňoch. Voľba spôsobu ohrevu závisí od akosti materiálu, tvaru a rozmeru súčastí, výšky požadovanej teploty a pod. Všeobecne platí, že čím je oceľ viac legovaná a súčiastka má zložitejší tvar a väčšie rozmery, tým má byť rýchlosť ohrevu miernejšia. Po dosiahnutí predpísanej teploty na povrchu súčastí nasleduje zotrvanie na teplote ohrevu. Cieľom je vyrovnanie teploty po priereze ohrievaných predmetov a priebeh predpokladaných difúzných procesov (rozpušťanie karbidov, intermetalických fáz, homogenizácia chemického zloženia tuhého roztoku, zníženie vnútorných napätí a pod.). Čas zotrvania na teplote sa volí podľa účelu tepelného spracovania. Ohrev súčiastok pri tepelnom spracovaní sa realizuje v peciach s plynou

atmosférou, v prostrediach roztopených solí (NaCl , KCl , BaCl_2), alebo roztavených kovov (Pb , Al). Pri ohreve vo vzdušných atmosférach dochádza k oxidácii, oduhličeniu alebo nauhličeniu povrchu. Tomu sa dá zabrániť použitím ochranných zábalov (vypálený koks, liatinové triesky, ochranné nátery a pod.), alebo ohrevom vo vákuových peciach.

4.2.1 Žihanie

Spoločným znakom všetkých postupov žihania je malá rýchlosť ochladzovania, ktorá umožňuje vznik štruktúr blízkyh rovnovážnym.

Ohrev súčiastok pri tepelnom spracovaní sa realizuje v peciach s plynnou atmosférou, v roztopených soliach, alebo roztavených kovoch. Najčastejšie sa ohrev vykonáva v peciach s prirodzenou atmosférou (Obr. 4.13), pokloповých peciach (obr. 4.14) resp. indukčne (obr. 4.15).

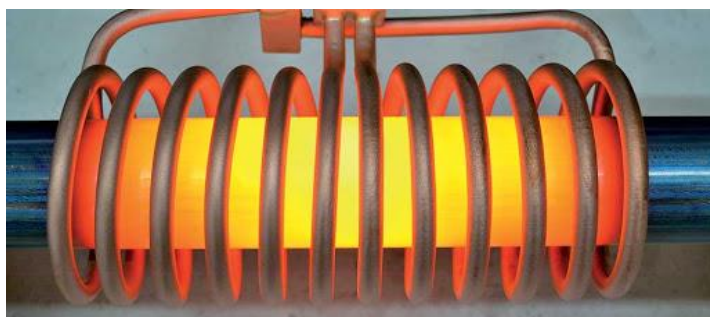


Obr. 4.13 Pojazdová žihacia pec

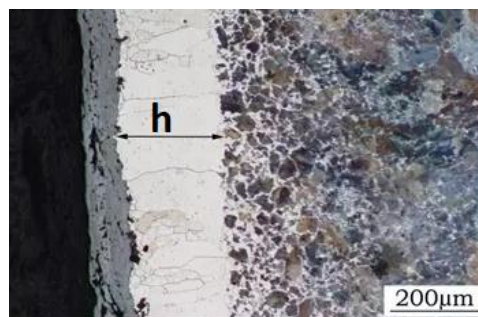


Obr. 4.14 Pokloповá žihacia pec

Pri zvýšených teplotách dochádza však k oxidácii spojenej s tvorbou oxidov železa, prípadne legujúcich prvkov, alebo k oduhličovaniu (Obr. 4.16), t.j. zníženiu obsahu uhlíka na povrchu oceľových súčiastok. To je možné obmedziť nahradením prirodzenej atmosféry pece umelou ochrannou atmosférou.



Obr. 4.15 Indukčné žihanie hriadeľa



Obr. 4.16 Oduhličená povrchová vrstva „h“

Výška žihacej teploty a doba výdrže závisia predovšetkým od chemického zloženia ocele a od druhu žihania a sú preto rozhodujúcimi technologickými parametrami. Rýchlosť

ochladzovania zo žihacej teploty býva obvykle pomalá, napr. v peci (výnimkou je normalizačné žihanie). Obvyklé teploty žihania ocelí vyplývajú z obr. 2.17. Podľa výšky žihacej teploty je možné všetky postupy žihania ocelí rozdeliť na žihanie s prekryštalizáciou a bez prekryštalizácie.

Žihanie bez prekryštalizácie - je charakteristické teplotami žihania nižšími ako teplota A_1 . Do tejto skupiny postupov zaraďujeme:

➤ **Žihanie na mätko (sferoidizačné žihanie)** sa robí najčastejšie pri teplotách tesne pod A_1 . Doba izotermickej výdrže býva obyčajne niekoľko hodín. Cieľom žihania je zníženie tvrdosti a tiež pevnosti za účelom zlepšenia obrobitelnosti res. tvárnosti. U eutektoidných ocelí sa zmena vlastností sa dosiahne sferoidizáciou lamelárneho perlitu na perlit globulárny. Pri nadeutektoidných oceliach sa žiha na mätko cyklovaním teploty okolo A_1 . Pri podeutektoidných oceliach sa teplota žihania pohybuje v rozmedzí 660 až 700 °C (pod A_1) s výdržou 4 až 8 hod. s nasledujúcim pomalým ochladzovaním v peci. S rastúcim obsahom uhlíka sa budú karbidy rozpúšťať pomalšie a karbidy vylúčené po hraniciach zŕn nie je možné pri týchto teplotách (pod A_1) rozpustiť. Z toho dôvodu sa pri nadeutektoidných, resp. nástrojových oceliach volí teplota žihania nad teplotou A_1 s výdržou 6 až 12 hod. s veľmi pomalým ochladzovaním najprv v peci (do teploty 600 °C rýchlosťou 10 až 15 °C/hod.) a potom na vzduchu.

➤ **Žihanie na odstránenie napätí (relaxačné žihanie)** má za cieľ znížiť hladinu vnútorných napätí, ktoré vznikajú v súčiastkach pri predchádzajúcom technologickom spracovaní (napr. po tvárnení za studena, zvaraní, kalení). Podstata zníženia vnútorných napätí spočíva v premene pružnej deformácie na plastickú. Najväčší efekt zníženia vnútorných napätí je pri vyšších teplotách (500 až 650°C), pri ktorých majú ocele nízku hodnotu medze klzu a medze tečenia. Výdrž na teplote ohrevu je 1 – 2 hodiny a pomalé ochladzovanie v peci až do teplôt 150 – 400°C, podľa tvárnosti ocele, veľkosti a tvaru predmetu. Pokles vnútorných napätí prebieha formou relaxácie, keď sa vnútorné napätia znižia mikropplastickými deformáciami. Výdrž na teplote závisí od požadovaného stupňa zníženia vnútorných napätí. Čím je teplota ohrevu vyššia, tým kratšia bude výdrž na teplote. Ochladzovacia rýchlosť je približne 50 °C za hod. Ochladzovanie musí byť veľmi pomalé, aby sa zabránilo vzniku nových napätí v štruktúre.

➤ **Rekryštalizačné žihanie** sa využíva na obnovenie tvárnosti ocele po predchádzajúcom spevnení tvárnením za studena alebo pri nedostatočných teplotách tvárnenia za tepla. Zrná v smere tvárnenia sa predlžujú, narastá pevnosť a tvrdosť, klesá ťažnosť. Podstatou žihania je zníženie hustoty dislokácií, nukleácia a rast nových rovnoosých zŕn v pôvodnej deformovanej štruktúre materiálu. Rekryštalizačná teplota býva v rozsahu 550 až 700 °C, s výdržou 1 - 5 hodín. Teplota nesmie prekročiť teplotu nad A_1 , inak nastáva prekryštalizácia. Pokiaľ je cieľom získať jemnejšie zrno, volí sa nižšia teplota žihania (550 °C). Ak sa požaduje hrubozrnnejšia štruktúra (napr. pre ocele na transformátorové plechy), volí sa vyššia teplota žihania (cca. 700 °C). Ohrev aj chladenie sa uskutočňuje v ochrannnej atmosfére inertných

plynov, aby nenastala oxidácia povrchu súčiastok. Používa sa najmä ako medzioperačné žihanie, pri spracovaní niektorých nízkouhlíkových ocelí tvárnením za studena.

➤ **Protivločkové žihanie** sa aplikuje za účelom zníženia obsahu vodíka, ktorý spôsobuje vznik vnútorných trhlín v tvare vločiek. S klesajúcou teplotou vyvolá difundujúci vodík v štruktúre vznik napätí, ktoré môžu iniciovať vzniku trhlín. V niektorých prípadoch môžu tieto napätia spôsobiť miestne porušenie súdržnosti ocele. Teplota žihania sa pohybuje v rozmedzí 600 až 680°C s výdržou na teplote niekoľko desiatok hodín. Pri objemných výkovkoch môže byť celkový čas žihania až niekoľko dní. Ochladzovanie prebieha v peci (do 150 °C) a musí byť veľmi pomalé (~ 5 °C /hod.), aby vodík stačil difundovať na povrch.

➤ **Žihanie na odstránenie krehkosti po morení** sa používa na odstránenie vodíka, ktorý difundoval do povrchových vrstiev pri morení v kyselinách (odstraňovanie oxidických vrstiev z povrchu ocele). Nakoľko pri morení v kyselinách sa uvoľňuje vodík v atomárnom stave, sú postačujúce nižšie teploty žihania 200 až 300°C. Počas výdrže 4 až 10 hod. sa vodík uvoľní a tým sa odstráni vodíková krehkosť ocele

Žihanie s prekryštalizáciou - je charakteristické teplotami žihania vyššími, než sú prekryštalizačné teploty A_1 , A_3 a A_{cm} .

➤ **Homogenizačné (difúzne) žihanie** má za cieľ odstrániť chemickú nehomogenitu odliatkov a výkovkov. Vyrovnanie chemického zloženia v priereze výrobkov sa uskutočňuje difúziou pri vysokých teplotách (200 až 300°C nad teplotou A_{c3} , t.j. 1100 až 1200°C). Doby izotermickej výdrže dosahujú až 20 hodín, preto je tento spôsob žihania ekonomicky náročný a robí sa len u kvalitných legovaných ocelí. Čas žihania sa volí podľa veľkosti odliatku a druhu ocele, zvyčajne býva v rozmedzí 8 až 18 hodín, v niektorých prípadoch môže dosiahnuť až niekoľko desiatok hodín. Pri vysokých teplotách sa zvyčajne na povrchu tvoria okuje a dochádza k oduhličeniu podpovrchových vrstiev. Zároveň hrozí nebezpečenstvo zhrubnutia zrna, preto zvyčajne po homogenizačnom žíhaní nasleduje normalizačné žihanie, ktorým docielime zjemnenie štruktúry.

➤ **Normalizačné žihanie** je najrozšírenejším druhom žihania s prekryštalizáciou. Jeho cieľom je zjemnenie a zrovnomenenie štruktúry. Spočíva v ohreve 30 – 50°C nad prekryštalizačné teploty A_3 u podeutektoidných ocelí alebo A_{cm} u nadeutektoidných ocelí, z izotermickej výdrže na týchto teplotách (1 – 4 hod.) a v nasledujúcom ochladení na vzduchu. Je základným druhom tepelného spracovania nízkouhlíkových ocelí obvyklých akostí. Štruktúra po normalizačnom žíhaní je jemnejšia s rovnomerne rozloženými zrnami a vyššou medzou pevnosti a súčasne dobrými plastickými vlastnosťami. Tento spôsob žihania je vhodný najmä pre uhlíkové a nízkolegované ocele. Pri podeutektoidných oceliach býva teplota žihania 30 až 50°C nad A_3 s výdržou na teplote 1 až 4 hod. (~ 1 hod. na 25 mm hrúbky) s voľným ochladzovaním na vzduchu. Pri oceliach s obsahom uhlíka vyšším ako 0,3 % prebieha ochladzovanie v peci, aby sa zabránilo vzniku štruktúry s vysokou tvrdosťou (vznik bainiticko-martenzitickej štruktúry). Pri nadeutektoidných oceliach sa normalizačné žihanie

používa veľmi zriedka. Ide o prípady, keď sa nevhodným spôsobom ochladzovania (napr. pomalým ochladzovaním z tvárniacej teploty) vylúčil cementit po hraniciach zŕn a vytvoril tzv. karbidické sieťovanie, čo vedie k zhoršeniu vlastností ocele pri dynamickom namáhaní. Normalizačná teplota je pri týchto oceliach $\sim 30^\circ\text{C}$ nad A_{cm} s ďalším rýchlym ochladením na 700°C . Ďalšie ochladzovanie už musí byť pomalé, aby sa austenit stihol premeniť na perlit a nenastalo zakalenie štruktúry, čo by viedlo k vzniku napätí a trhlín.

➤ **Izotermické žihanie.** Niektoré zliatinové ocele majú i po dlhodobom žíhaní na mätko príliš vysokú tvrdosť a ťažko sa obrábajú. V takom prípade môžeme použiť izotermické žihanie, ktoré pozostáva z krátkodobej austenitizácie a z nasledujúceho rýchleho ochladenia do perlitickej oblasti ($600 - 700^\circ\text{C}$) a izotermického rozpadu austenitu na globulárny perlit. Teploty austenitizácie pri sa volia tesne nad A_{c3} , (pri podeutektoidných oceliach) alebo nad A_{c1} (pri eutektoidných a nadeutektoidných oceliach). Ochladzovanie prebieha na vzduchu, čím sa dosiahne, že štruktúra ocele bude obsahovať jemnozrnný globulárny perlit s dobrými mechanickými vlastnosťami.

4.2.2 Kalenie a popúšťanie

Kalenie je ohrev ocele tesne nad prekryštalizačné teploty, výdrž na týchto teplotách (za účelom homogenizácie austenitu) a ochladenie hornou kritickou (alebo väčšou) ochladzovacou rýchlosťou. Štruktúru v takomto prípade tvorí martenzit a zvyškový austenit v celom objeme súčasti. Za zakalenú považujeme oceľ vtedy, ak má v štruktúre aspoň 50 % martenzitu. Vhodnosť ocelí na kalenie sa posudzuje pomocou pojmov kaliteľnosť a prekaliteľnosť.

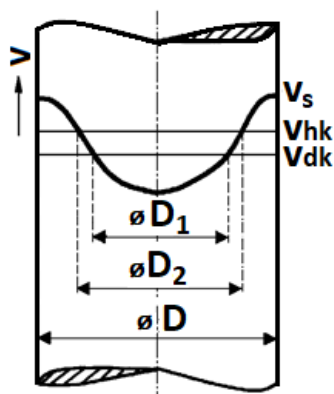
Kaliteľnosť je schopnosť ocele kalením dosiahnuť martenzitickú štruktúru s vysokou tvrdosťou. Kaliteľnosť závisí predovšetkým od obsahu uhlíka. So zvyšujúcim sa obsahom uhlíka sa tvrdosť po zakalení zvyšuje. Za dobre kaliteľné považujeme ocele s obsahom nad 0,35 %C. Ocele do 0,2 %C sú nekaliteľné (platí pre uhlíkové ocele). Vplyvom legujúcich prvkov sa táto spodná hranica obsahu uhlíka znižuje.

Prekaliteľnosť je schopnosť ocele zakalením dosiahnuť martenzitickú štruktúru do určitej hĺbky pod povrchom. Martenzitická štruktúra vznikne pri kalení iba v tých miestach prierezu, v ktorých je hodnota skutočnej rýchlosti ochladzovania (v_s) vyššia ako kritická rýchlosť ochladzovania (v_{hk}). Napr. pri kalení telesa tvaru valca o priemere D (obr. 4.17) bude zakalená len vrstva pod povrchom vo vzdialenosti od $D/2$ až po $D_2/2$, kde platí, že $v_s > v_{hk}$.

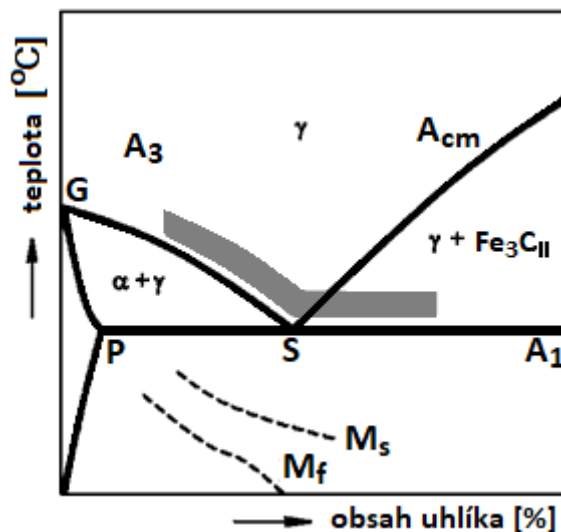
Prekaliteľnosť závisí od použitého ochladzovacieho prostredia a od chemického zloženia materiálu. S rastúcim obsahom uhlíka a legujúcich prvkov sa preto zväčšuje prekaliteľnosť.

Kaliace teploty pri podeutektoidných oceliach sa volia len $30 - 50^\circ\text{C}$ nad A_3 , aby nedošlo k nežiadúcemu rastu austenitického zrna (obr. 4.18). U nadeutektoidných ocelí je správna kaliaca teplota $30 - 50^\circ\text{C}$ nad A_1 , pretože zvýšením teploty nad A_3 by sa v austenite zväčšil obsah uhlíka rozpustením sekundárneho cementitu. Po kalení z teploty nad A_1 , je štruktúra

tvorená okrem martenzitu (a malého podielu zvyškového austenitu) sekundárnym cementitom, ktorý je na rozdiel od zvyškového austenitu tvrdý.



Obr. 4.17 Rýchlosť ochladzovania pri kalení valcového telesa



Obr. 4.18 Kľúčové teploty uhlíkových ocelí

Kaliace prostredia slúžia na rýchle ochladenie súčiastok po ohreve. Požadujeme od nich aby ich ochladzovacia schopnosť pre daný materiál bola taká, aby $v_s > v_k$.

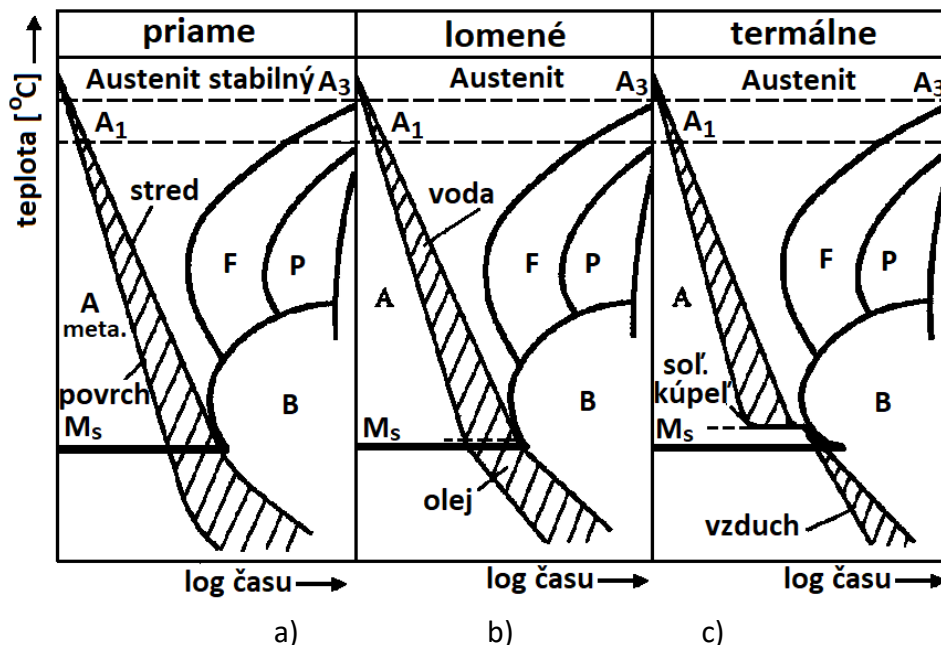
Ako kaliace prostredia sa používajú voda, vodné roztoky zásad, oleje, roztavené soli a kovy, vzduch, kovové dosky a pod. Ideálne kaliace prostredie by malo ochladzovať intenzívne v teplotnej oblasti minimálnej stability podchladeného austenitu a pomaly v oblasti teplôt martenzitickej premeny. Prvú požiadavku spĺňajú napr. voda a vodné roztoky. Tým umožňujú kaliť materiály s malou prekaliteľnosťou, ale práve tieto ochladzovacie prostredia nespĺňajú druhú podmienku. Následkom vysokej ochladzovacej schopnosti počas martenzitickej premeny vzniká vysoká hladina vnútorných napätí, ktoré výrazne zvyšujú riziko vzniku kľacich trhlín.

Druhy kalenia sú schematicky znázornené v diagramoch ARA na obr. 4.19.

- **Priame kalenie.** Je najčastejšie používaným typom kalenia. Ochladzuje sa z teploty austenitizácie. Pri uhlíkových oceliach sa najčastejšie kalí do vody, pri zliatinových oceliach alebo pri drobných súčiastkach z uhlíkových ocelí do oleja. Pri tomto postupe kalenia vznikajú najväčšie vnútorné napätia, a teda i najväčšie nebezpečie vzniku kľacich trhlín.
- **Lomené (prerušované) kalenie.** Austenitizované súčiastky sa ochladzujú v dvoch prostrediach. Vo vode sa ochladzujú na teplotu až tesne nad teplotu M_s príslušnej ocele a potom sa súčiastky preložia do oleja aby sa martenzitická premena uskutočnila v priebehu pomalšieho ochladzovania. Lomené kalenie sa používa najmä pre súčiastky zložitého tvaru resp. rozmerné súčiastky, kde je vzhľadom na ich rozmery a ich veľkú prekaliteľnosť zvýšiť rýchlosť ochladzovania v intervale perlitickej

premeny, ale martenzitická premena musí prebehnúť pri veľmi pomalom ochladzovaní (napr. rozmerné zápustky). V procese kalenia je dôležitým faktorom realizovať presun medzi kaliacimi médiami v správnom okamihu.

- **Termálne kalenie.** Po austenitizácii sa súčiastky ochladia nadkritickou rýchlosťou na teplotu aspoň o 20°C vyššiu ako je teplota M_s príslušnej ocele, pri ktorej zotrávajú po dobu potrebnú na vyrovnanie teplôt v ich priereze. Nasleduje ochladenie predmetu do oblasti martenzitickej premeny obyčajne na vzduchu. Prostredie v ktorom dochádza k vyrovnaniu teplôt v priereze súčiastok sa najčastejšie tvorí roztavenými soľami. Použitie termálneho kalenia znamená podstatné zníženie tepelných i štruktúrnych kaliacich napätí a teda aj minimálne deformácie súčiastok. Termálne kalenie sa realizuje u ocelí s vyšším obsahom zliatinových prvkov, najmä nástrojových ocelí.



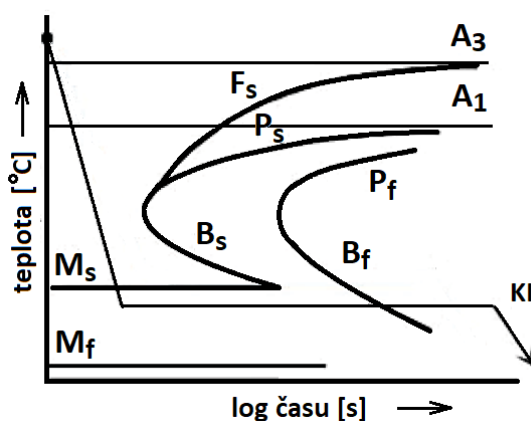
Obr. 4.19 IRA diagramy vybraných druhov kalenia

a) priame kalenie, b) lomené kalenie c) termálne kalenie

- **Hysterézne kalenie** je spôsob kalenia, ktorý má znížiť napätie po kalení. V procese sa používa vyššia austenitizačná teplota, čo má za následok väčšiu homogenizáciu austenitu a zároveň zhrubnutie austenitických zŕn, čo spôsobí zníženie kritickej ochladzovacej rýchlosti a zvýšenie prekaliteľnosti. Použité teploty ohrevu sú vyššie ako pri priamom kalení. Ohrev na 980°C a následný pokles pri kalení nadeutektoidných ocelí na teplotu pri ktorej nastáva spomalenie chladnutia a to v intervale 800°C - 750°C a až následne a až pod týmto intervalom sa súčiastka kalí do vody alebo do oleja. Podobný postup je aj u padeutektoidných ocelí až na interval

spomalenia chladnutia, ktorý je medzi 670 °C až 620°C s následným rýchlim ochladením v oleji resp. vo vode.

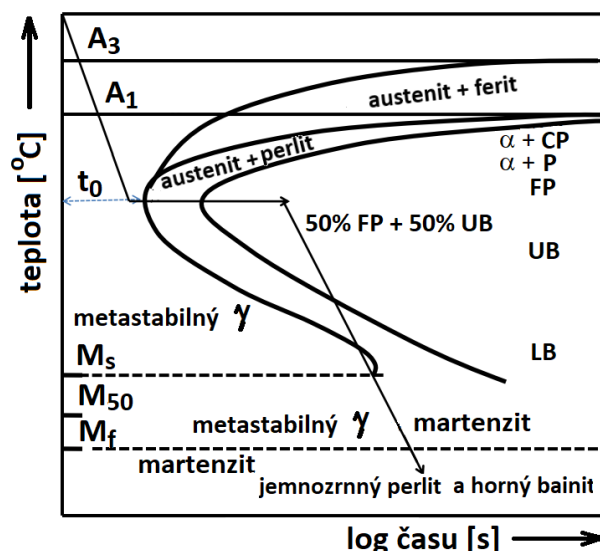
- **Kalenie izotermické** sa používa pri oceliach s nižším obsahom uhlíka. Teplotu izotermickej premeny možno znížiť tesne pod M_s (obr. 4.20). Výslednú štruktúru už teda nebude tvoriť čistý bainit, ale zmes bainitu, martenzitu a zvyškového austenitu. Cieľom izotermického kalenia je získať mechanické vlastnosti súčiastky priamo po kalení, bez nutnosti následného popúšťania. Oproti kalenej a popustenej súčiastke má súčiastka po izotermickom kalení vyššiu húževnatosť a medzu únavy. Redukované sú tiež vnútorné napätia. V procese kalenia sa realizuje ohrev na kaliacu teplotu a zotrvanie v soľnom kúpeli, resp. kúpeľoch z roztavených kovov na teplote zodpovedajúcej vzniku bainitickej štruktúry. Ochladenie na teplotu rozpadu austenitu musí byť rýchle aby nedošlo k perlitickej premene. Používa sa pri výrobe píl, lopát, náradia a pod.



Obr. 4.20 Priebeh izotermického kalenia (KI)

- **Patentovanie** sa používa ako medzioperačné spracovanie drôtov s vyšším obsahom uhlíka pri ťahaní za studena. Je to najstarší spôsob izotermického kalenia, vykonávaný už pred objavením podstaty izotermického rozpadu austenitu (obr. 4.21). Zaustenitizovaný drôt prechádza oloveným kúpeľom s teplotou 400 až 550 °C a následne chladne na vzduchu. Výsledná štruktúra je pevná, húževnatá, tvorená zmesou jemného perlitu a bainitu. Požadovanou výslednou štruktúrou je bainit, ktorý vzniká pri vyšších teplotách alebo veľmi jemný lamelárny perlit - troostit. Takáto štruktúra umožňuje výrazné redukcie prierezu pri ďalšom tvárnení. Patentovanie je kontinuálne a je zaradené priamo do linky drôtoťahu.

Vlastnosti ocele sa po kalení výrazne menia. Okrem tvrdosti sa výrazne zvyšuje aj pevnosť, klesá však ťažnosť a húževnatosť. Pre konštrukčné použitie sú však ocele v stave kalenom nevhodné pre svoju krehkosť, preto po kalení na martenzit prakticky vždy nasleduje popúšťanie, ktoré má prebehnúť ihneď po kalení.



Obr. 4.21 Patentovanie nadeutektoidnej ocele

γ - austenit, α – ferit, CP – hrubozrnný perlit, P – perlit, FP – jemnozrnný perlit, UB – horný bainit, LB – dolný bainit, M - martenzit, M_s – teplota martenzit štart, M_{50} – teplota pri obsahu 50% martenzitu v štruktúre, M_f – teplota martenzit finiš, t_0 – minimálna inkubačná doba

Popúšťanie

Popúšťanie je podľa STN EN ISO 4885 klasifikované ako ohrev zakalenej ocele na popúšťacie teploty pod A_1 , výdrž na tejto teplote 30 minút až 10 hodín a následné pomalé ochladenie. Ohrev na popúšťaciu teplotu musí byť rovnomerný, aby nevznikli nové vnútorné napätia. Vznikajú pri ňom štruktúry bližšie rovnovážnemu stavu. Tento rozpad je spojený so zmenami mechanických a fyzikálnych vlastností.

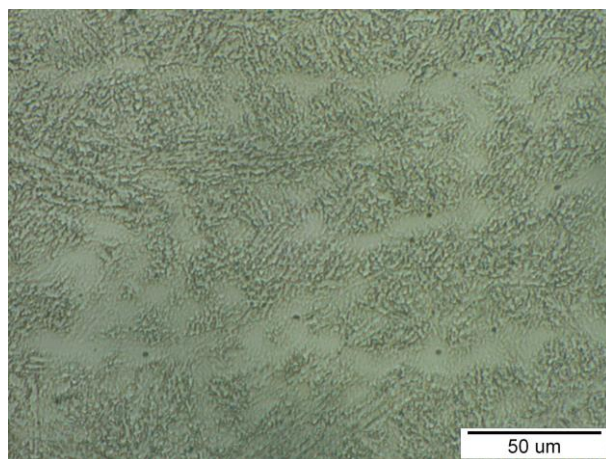
Procesy popúšťania rozdeľujeme z technologického hľadiska na nízko-teplotné popúšťanie do teploty cca. 350°C, pri ktorom sa podstatne zníži krehkosť ocele, ale oceľ si ešte zachováva vysokú tvrdosť a na vysoko-teplotné popúšťanie, t.j. pri teplotách zvyčajne nad 350°C. Premeny, ku ktorým dochádza pri popúšťaní uhlíkových ocelí zakalených na martenzit, môžeme rozdeliť do štyroch etáp:

1. **Vylučovanie hexagonálnych ϵ -karbidov z martenzitu.** Martenzit má najväčší merný objem zo všetkých štruktúr, ktoré sa môžu vyskytovať v oceli. V prvom štádiu popúšťania dochádza k zmenšovaniu objemu martenzitu, ktoré začína už pri teplotách okolo 20°C. Po prvej etape popúšťania tvorí štruktúru kubický martenzit, nestabilné ϵ -karbidy a zvyškový austenit. Tieto premeny prebiehajú zvyčajne v rozmedzí teplôt 100-200°C. Výsledkom prvej etapy popúšťania je mierne zníženie tvrdosti ocele a zmenšenie jej merného objemu.

2. V druhom štádiu (200 – 300°C) dochádza k **rozpadu zvyškového austenitu** na ferit a karbidy. Táto reakcia je podstate pokračovaním procesov I. etapy tým, že sa znížia napätia, spôsobujúce existenciu zvyškového austenitu. Premeny sa ďalej prejavujú zvýšením merného objemu ocele. Rozpadom zvyškového austenitu sa čiastočne zvyšuje tvrdosť ocele alebo sa aspoň spomaľuje pokles tvrdosti pri intenzívnejšom rozpade martenzitu.

3. Vznik feriticko-karbidickej zmesi. V treťom štádiu popúšťania (nad 300°C) sa metastabilný ϵ -karbid transformuje na cementit a nízkouhlíkový martenzit sa mení na rovnovážny ferit. Výslednou štruktúrou je húževnatá, jemná feriticko-cementitická zmes - sorbit ($F + Fe_3C$) - obr. 4.22.

4. Štvrté štádium popúšťania (nad asi 500°C) zahŕňa v prípade uhlíkových ocelí **hrubnutie častíc cementitu a sferoidizáciu a hrubnutie feritických zŕn**. Hrubá sorbitická štruktúra vznikajúca pri najvyšších popúšťacích teplotách (pod A_1) sa nazýva zrnitý perlit. Jeho tvrdosť je nižšia ako tvrdosť lamelárneho perlitu.



Obr. 4.22 Sorbitická mikrostuktúra ocele 41CrMo4 EN 10083-1-91

Nízkoteplotné popúšťanie sa aplikuje na nástroje, ktoré okrem vysokej pevnosti musia odolávať dynamickým rázom (napr. zápustky pre kovanie, valce kontinuálneho odlievania ocele a teplej valcovne a pod.) Pre zachovanie vysokej tvrdosti nástrojov sa pri popúšťaní používajú teploty do 150 °C. Vysokoteplotné popúšťanie sa aplikuje pre vysokonamáhané súčiastky ako napr. kľukové hriadele, pružiny, torzne tyče a pod.

Popúšťacia krehkosť sa prejaví poklesom vrubovej húževnatosti, ale najmä poklesom prechodovej teploty. Rozoznávame dva druhy popúšťacej krehkosti. Prvou z nich je nevratná (nízkoteplotná) popúšťacia krehkosť, ktorá znižuje vrubovú húževnatosť ocele pri popúšťaní ocele v teplotnej oblasti 300÷350 °C. Za príčinu jej vzniku sa považuje precipitácia cementitu po hraniciach pôvodných austenitických zŕn - vytvorenie cementitického sieťovia. K zabráneniu jej tvorby možno čiastočne predísť len tepelno-mechanickým spracovaním ocele. Druhou z nich je vratná (vysokoteplotná) popúšťacia krehkosť, ktorá sa najintenzívnejšie rozvíja pri teplotách 500÷550 °C, alebo priamo pri popúšťaní v tomto kritickom teplotnom intervale, alebo pri pomalom ochladzovaní z vyšších popúšťacích teplôt. Prejavuje sa najmä zvýšením prechodovej teploty. Príčinou rozvoja vratnej popúšťacej krehkosti je segregácia niektorých prvkov (P, Sn) po hraniciach pôvodných austenitických zŕn. Možno ju odstrániť novým popúšťaním ocele, pričom v oblasti teplôt vysokoteplotnej popúšťacej krehkosti sa prejde zrýchlene.

Zošľachťovanie je najdôležitejším postupom tepelného spracovania konštrukčných ušľachtilých ocelí. Skladá sa z **kalenia** na martenzit a **nasledujúceho** popúšťania. Výslednou štruktúrou po zošľachťovaní je sorbit. Sorbitická štruktúra je charakteristická veľmi výhodnou kombináciou pevnostných a tvárných vlastností, pričom vzájomné relácie medzi pevnostnými a tvárnymi charakteristikami je možné regulovať voľbou vhodnej teploty popúšťania. V porovnaní s východiskovým stavom sa zošľachťovaním mení predovšetkým pomer R_e/R_m , ktorý je pred kalením cca. 0,50 a po zošľachťovaní až 0,9.

Kalenie a nízkoteplotné popúšťanie je typickým cyklom tepelného spracovania nástrojov a ďalších súčiastok (valivé ložiská), kde je požadovaná vysoká tvrdosť.

Povrchové kalenie sa realizuje u súčiastok, ktoré majú byť odolné proti dynamickému namáhaniu, pri súčasnej odolnosti na oter. Tieto požiadavky sú splnené húževnatým jadrom a tvrdým povrchom súčiastky. Tvrdý povrch a súčasne húževnaté jadro je možné dosiahnuť povrchovým kalením alebo chemicko-teplným spracovaním.

Povrchové kalenie spočíva v ohreve súčiastky a nasledujúcom ochladení takým spôsobom, aby martenzitická štruktúra vznikla len v určitej vrstve na povrchu súčiastky. Podľa spôsobu ohrevu je možné povrchové kalenie rozdeliť na povrchové kalenie plameňom, indukčné a laserom.

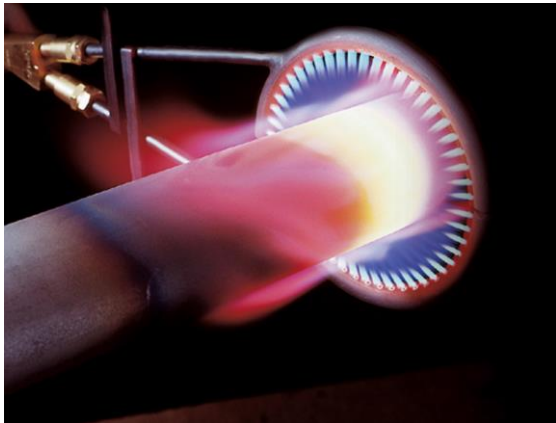
Povrchové kalenie plameňom - ohrev súčiastky sa robí plameňom, vzniknutým spaľovaním acetylénu, svietiplynu, propánu a pod., v horákoch rôznych konštrukcií (obr. 4.23). Hrúbka zakalenej vrstvy sa dá regulovať v širokých medziach napr. dobou ohrevu, vzdialenosťou horáku od povrchu súčiastky, pomerom kyslíka a spaľovaného plynu a pod.

Povrchové kalenie indukčné - povrch súčiastok sa ohrieva indukovanými prúdmi strednej a vysokej frekvencie. Súčiastka sa vkladá do induktora, čo je vlastne medená rúrka v tvare jedného alebo niekoľkých závitov, zvnútra chladená vodou (obr. 4.24). Induktor je napájaný vysokofrekvenčným prúdom ($f = 1-1000$ kHz), ktorý na povrchu telesa indukuje vírivé prúdy. Vzniká tým Joulovo teplo ktoré ohrieva tenkú povrchovú vrstvu. Tento spôsob povrchového kalenia sa používa najmä pri sériovej výrobe.

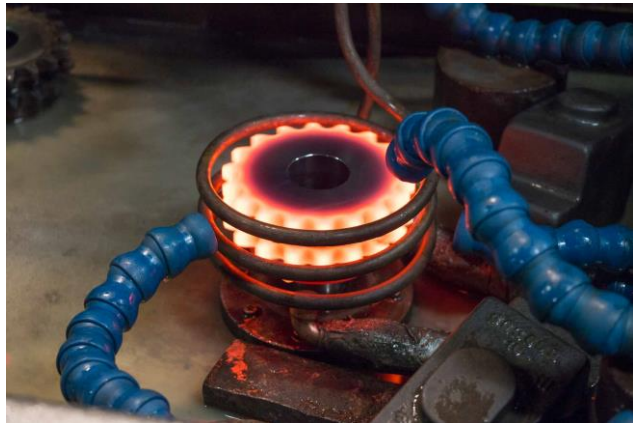
Povrchové kalenie laserom – používa sa u ocelí a zliatin s obsahom C = 0,15 – 0,5 %. Na povrchu vzniká jemnozrnná štruktúra s vysokou tvrdosťou hrúbky 0,2 – 1,2 mm. Používa sa pre značne namáhané súčiastky, napr. boky ozubených kolies, kľukové a vačkové hriadele, steny valcov motorov, hrany foriem pre vstrekovanie plastov a rezné hrany nástrojov (obr. 4.25 a 4.26). Umožňuje zvýšenie životnosti súčastí o desiatky percent.

Uvedenými spôsobmi vznikne martenzitická štruktúra s vysokou tvrdosťou iba v povrchovej vrstve, ktorá bola austenitizovaná. Pod touto vrstvou je zmesná štruktúra, tvorená feritom a martenzitom. Východisková štruktúra jadra súčiastky ostáva pri povrchovom kalení zachovaná. Hrúbka zakalenej vrstvy sa volí na základe veľkosti súčiastky, veľkosti a druhu namáhania a dosahuje cca. 1 až 6 mm. Deformácie vzniknuté kalením sú

malé. Používa sa napr. pre ozubené kolesá väčších rozmerov, súčasti motorových vozidiel, obrábacích strojov, hriadele, nástroje a pod.



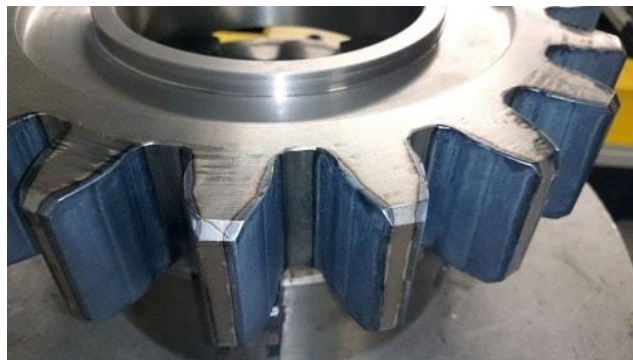
Obr. 4.23 Povrchové kalenie plameňom



Obr. 4.24 Indukčné kalenie zubov bagra



Obr. 4.25 Povrchové kalenie hriadeľa laserom



Obr. 4.26 Laserom kalený povrch ozubenenia

4.2.3 Chemicko-tepelné spracovanie

Týmto spôsobom spracovania môžeme dosiahnuť povrchovú tvrdosť pri súčasnom zachovaní húževnatého jadra u súčiastok podobne ako pri povrchovom kalení. Rozdiel medzi týmito dvomi spôsobmi spočíva v tom, že pri chemicko-tepelnom spracovaní je získanie povrchovej tvrdosti spojené so zmenami chemického zloženia povrchu. Okrem povrchovej tvrdosti môžeme získať aj iné priaznivé vlastnosti povrchu ako napr. zvýšenie medze únavy, korozivzdornosti, žiaruvzdornosti a pod.

Zmeny chemického zloženia povrchu sa dosahujú jeho difúznym nasýtením niektorými prvkami. Ak ide o sýtenie povrchovej vrstvy uhlíkom, hovoríme o cementovaní, dusíkom o nitrídaní. Kombináciou oboch spôsobov dostávame tzv. karbonitrídanie a nitrocementovanie. Z ďalších prvkov to môžu byť kovy napr. chróm, potom dostávame tzv. chrómovanie, alebo kremík - kremíkovanie. Z nekovových prvkov sa ďalej používa síra pri sulfonitrídaní a síra v kombinácii s dusíkom pri sulfonitrídaní.

Cementovanie - je najrozšírenejší a dosiaľ najúčinnější spôsob chemicko-tepelného spracovania vysokonamáhaných strojných súčastí, ako sú ozubené kolesá, čapy, hriadele a pod. Na cementovanie sa používajú uhlíkové aj legované ocele s obsahom 0,1 - 0,25 %C. Počas cementovania obsah uhlíka na povrchu stúpne na 0,8 - 1,4 %. Sýtenie sa robí pri teplotách nad A_{c3} , t.j. medzi 850 - 950°C. Po cementovaní nasleduje kalenie, čím sa na povrchu vytvorí martenzit a v jadre vzhľadom na nízky obsah uhlíka vzniká húževnatá feriticko-perlitická štruktúra. Hrúbka cementačnej vrstvy sa pohybuje do 2 mm.

Samotný cementačný proces sa môže uskutočňovať buď v prostredí pevnom (zmes dreveného uhlia a uhlíčitane bárnateho), alebo v kvapalnom prostredí (taveniny solí, ktorých funkčnou zložkou sú alkalické kyanidy). Najmodernejším spôsobom cementovania je cementovanie v plynnom prostredí. U nás je najviac používaný spôsob prípravy cementačnej atmosféry krakovaním kvapalných uhľovodíkov priamo v priestore pece. Pri tomto spôsobe sa do priestoru pece privádza vhodná kvapalina, ktorá kvapká na rozžeravenú niklovú doštičku, na ktorej sa rozkladá za vzniku cementačnej atmosféry. Tento systém známy pod menom "Monocarb", používa napr. cementačnú kvapalinu, ktorá sa skladá zo 40 % terpentínového oleja, 30 %, acetónu, 30 % bezvodého etylalkoholu. Rýchlosť cementovania v plynnom prostredí je asi 0,1 mm/hod. Po kalení nasleduje u cementovaných ocelí nízkoteplotné popúšťanie pri teplotách 160 - 180°C.

Nitridácia - je princíp povrchového vytvrdzovania ocelí, pri ktorom sa povrch ocele nasycuje dusíkom za tvorby nitridov železa a legujúcich prvkov prítomných v oceli. Tvrdá vrstva na povrchu vzniká už v priebehu nitridovania. Po nitridovaní teda už nenasleduje tepelné spracovanie. Nitridovanie sa uskutočňuje obyčajne na oceliach zošľachtených na vysokú pevnosť, pričom teplota nitridovania nemá prekročiť teplotu popúšťania, aby nedošlo k zníženiu pevnostných vlastností jadra. Teplota nitridovania sa pohybuje okolo 500°C. Rýchlosť nitridovania je asi 10x menšia ako rýchlosť cementovania. Maximálne hrúbky bývajú v rozmedzí 0,1- 0,5 mm, čo možno dosiahnuť za dobu 12 - 50 hodín.

Nasycovanie povrchu ocele sa uskutočňuje atomárnym dusíkom, ktorý vzniká disociáciou čpavku podľa rovnice:



Kvalitná nitridačná vrstva sa vyznačuje okrem vysokej tvrdosti, odolnosťou proti opotrebeniu, korózii a aj zvýšenou medzou únavy.

Nitrocementovanie je postup chemicko-tepelného spracovania v prostrediach obsahujúcich okrem aktívneho uhlíka aj dusík. Realizuje sa dvoma základnými postupmi:

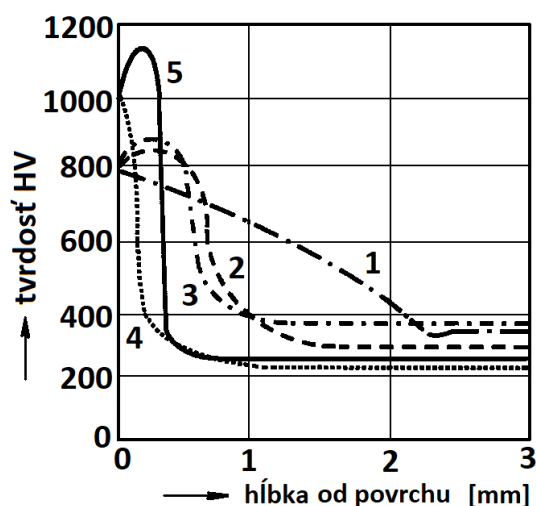
- nasycovaním povrchu súčiastky v kyanidových soľných kúpeľoch,
- nasycovaním povrchu súčiastky v plynných atmosférach.

V oboch prípadoch sa používajú nízkouhlíkové ocele, pretože rozhodujúcim pochodom na povrchu súčiastky je nasycovanie uhlíkom a požadované vlastnosti povrchu a jadra súčiastky sa dosahujú po nasledujúcom tepelnom spracovaní. Nitrocementačné teploty

sú nižšie ako cementačné (820 – 880 °C), pretože vplyvom dusíka dochádza k rýchlejšiemu rastu nasýtenej vrstvy. Je tu preto menšie nebezpečie rastu austenitického zrna a môžu sa zvyčajne použiť jednoduchšie postupy konečného tepelného spracovania. Nitrocementovanie v kyanidových kúpeľoch je nevýhodné z hľadiska bezpečnosti práce (kyanidy sú jedovaté).

Karbonitridovanie - na rozdiel od nitrocementovania prevažuje vo vrstve dusík. Vytvára sa tvrdá vrstva karbonitridov bez nasledujúceho kalenia, podobne ako pri nitridovaní. Robí sa v atmosfére čiastočne disociovaného amoniaku s prídavkom uhľovodíkov pri 570 až 620°C. Na povrchu súčastí sa vytvorí vrstva karbonitridu s hrúbkou asi 40 µm. Pod ňou je do hĺbky cca. 1 mm ferit obohatený dusíkom. Ochladením do oleja (priamo z karbonitridačnej teploty) vznikne presýtený tuhý roztok, ktorý sa samovoľne vytvrdí vylúčením jemných častíc nitridu železa. Povrchová vrstva má tvrdosť až 1000 HV a je odolná proti zadieraniu, opotrebeniu a zvyšuje medzu únavy až o 100 %.

Väčšina postupov chemicko-tepelného spracovania má podobný účinok, t.j. vytvorenie tvrdej, oteruvzdornej povrchovej vrstvy. Tieto vrstvy nie sú rovnako hrubé a nemajú rovnakú tvrdosť (obr. 4.27). Najtvrdšie, najrovnomernejšie, ale aj najtenšie sú nitridačné a karbonitridačné vrstvy. Sú vhodné vtedy, ak je súčiastka namáhaná na oter, ale nie sú vhodné pri príliš veľkých merných tlakoch (nebezpečie prelamovania vrstvy).



Obr. 4.27 Priebeh tvrdosti v rôznych vrstvách: 1– povrchové kalenie, 2 – cementovanie, 3 – nitrocementovanie, 4 – karbonitridovanie, 5 – nitridovanie

Cementované a nitrocementované vrstvy sú menej tvrdé, ale podstatne hrubšie. Dobre odolávajú opotrebeniu a znášajú stredné merné tlaky. Najhrubšie, ale pomerne nerovnomerné sú povrchovo kalené vrstvy. Z ekonomického hľadiska je najvýhodnejší spôsob povrchové kalenie, najnáročnejšie je nitridovanie.

Zariadenia na tepelné spracovanie a chemicko-tepelné spracovanie sa delia podľa:

1) zdrojov tepla:

- a) elektrické odporové pece
- b) palivové pece
 - na plyné palivo (obvykle zemný plyn, CH₄, propán)
 - na kvapalné palivo (mazut, nafta, oleje, benzín, alkohol)
 - na tuhé palivo (uhlie, drevo, koks) - minimálne využitie

2) prostredia, pôsobiaceho na vsádzku:

- a) vzduchové pece
 - oxidačné prostredie
- b) vákuové pece
 - neutrálne vákuum
 - aktívne vákuum
- c) pece s riadenými atmosférami
 - neutrálne plyny alebo zmesi plynov
 - aktívne zmesi plynov
- d) roztavené soľné kúpele
 - neutrálne
 - aktívne
- e) fluidné pece
 - neutrálna fluidná vrstva
 - aktívna fluidná vrstva

3) hlavných konštrukčných znakov:

- a) komorové pece
- b) šachtové pece
- c) zvonové (poklopové) pece
- d) priebežné pece
- e) kúpeľové (téglikové) pece
- f) vozové pece
- g) karuselové pece
- h) štrbinové pece
- i) viacúčelové pece
- j) pece s rotujúcou retortou (bubnové pece)

4) toku materiálu:

- a) statické zariadenia
 - komorová pec (zväčša klasická atmosféra, pričom vznikajú okuje a sú potrebné veľké prídavky)
 - vozové pece - sú určené pre veľkorozmerné súčiastky
 - muflové pece - mufla = plynotesná nádoba, pričom články nie sú v styku s prostredím pece)
 - šachtové pece - súčiastky sa nedeformujú, špeciálnou šachtovou pecou je prípad hĺbinnej pece
 - zvonové (poklopové, elevátorové) pece
- b) priebežné zariadenia
 - krokové pece
 - vozíkové pece
 - narážacie pece (vsádzka je umiestnená na roštoch, ktoré sa posúvajú)

- pásové pece (je určená pre malorozmerné súčiastky - nože, príbory ...)
- valčekové pece
- závitovkové pece (používajú sa na výrobu pružín)
- rotačné (bubnové) pece - vsádzka sa vo vnútri bubna premiešava

Pece môžu byť z konštrukčného hľadiska:

a) statické zariadenia

Solné pece - používali sa na tepelné spracovanie rýchlorezných ocelí. Tieto pece sú ekologicky závadné a z tohto dôvodu sa v súčasnosti už nepoužívajú. Zväčša sa jednalo o roztavené soli (chloridové - BaCl_2 , dusičnanové - NaNO_3 , kyanidové). Súčiastky sa ohrievali priamym ohrevom - prechodom elektrického prúdu cez soľ.

Viacúčelové pece - v jednej komore je možné vykonávať viac úkonov, pričom sa používajú riadené atmosféry.

Vákuové pece - vákuum slúži ako ochranný prostriedok pred povrchovou oxidáciou súčiastok. Pri vysokom vákuu hrozí nebezpečenstvo odparovania niektorých prvkov zo zahrievaného materiálu. Pri ochladzovaní sa používa pretlak inertného plynu (N_2) - 0,6 MPa.

b) priebežné zariadenia

Linky - využíva sa riadená atmosféra vyrobená spaľovaním CH_4 . Spaľovanie môže byť dokonalé, alebo nedokonalé.

5) podľa pracovnej teploty:

- nízkoteplotné (žíhacie, popúšťacie, nitridačné, vytvrdzovacie)
- vysokoteplotné (kaliace, cementačné, žíhacie)

6) podľa použitej atmosféry:

- bez ochrannej atmosféry (vzduchové)
- riadená atmosféra (exo-, endo-, nitridačná atmosféra)
- inertná atmosféra (N_2 , Ar)
- vákuové

7) podľa technológie tepelného spracovania:

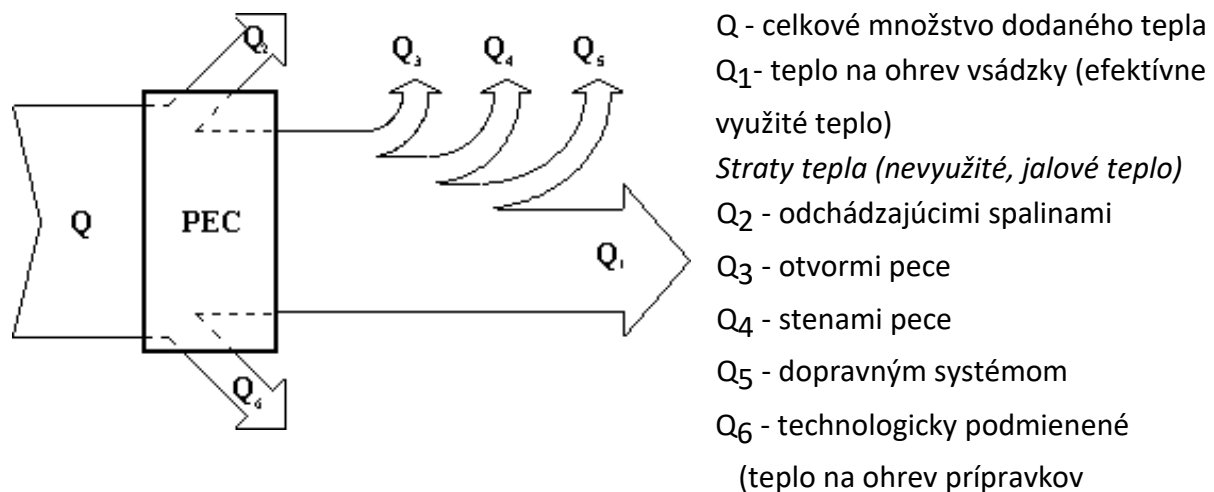
- žíhacie
- kaliace
- popúšťacie

- cementačné
- nitridačné
- kombinované (viacúčelové)
- špeciálne zariadenia (laser, indukčný ohrev, plazma, elektrónový a iónový lúč)

8) podľa stupňa automatizácie a regulácie (sleduje sa teplota, tlak, uhlíkový potenciál, čas, rýchlosť pohybu vsádzky):

- bez regulácie
- s reguláciou na konštantnú hodnotu
- s reguláciou na premenlivú hodnotu - programovanie

Energetická bilancia viacúčelového pecného agregátu s riadenou atmosférou (Obr. 4.28)



Obr.4.28 Energetická bilancia pece roštov)

Energetická účinnosť procesu

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} \cdot 100 \quad (\%)$$

Pre viacúčelovú komorovú pec s riadenou atmosférou platí

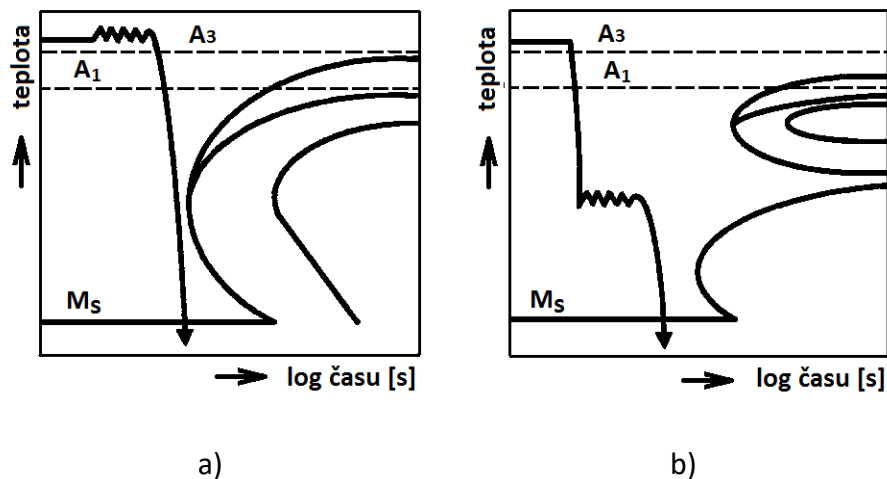
$$\eta = 15$$

- ak hmotnosť prípravkov a roštov = hmotnosti vsádzky.

4.2.4 Termomechanické spracovanie - TMS

Využíva priaznivý vplyv mechanického spracovania plastickou deformáciou za tepla (jemnozrnná štruktúra, množstvo porúch) a následného tepelného spracovania. Spôsoby TMS sa najčastejšie rozdeľujú podľa teploty tvárnenia na:

- **Vysokoteplotné termomechanické spracovanie (VTMS)** – oceľ sa tvárni nad A_3 (max. 1000 °C). Stupeň deformácie dosahuje 40 – 90 %. V silne deformovaných zrnách prebieha zotavovanie a rekryštalizácia. Skôr než dôjde k rastu zŕn sa oceľ podchladí pod T_{rekr} austenitu a zakalí s následným popúšťaním (obr. 4.29a). Vznikne tým veľmi jemný martenzit. U nízkolegovaných ocelí sa dá dosiahnuť pevnosť až 2500 MPa.
- **Nízkoteplotné termomechanické spracovanie (NTMS)** – používa sa u stredne a vysokolegovaných oceliach. Po austenitizácii nastáva rýchle ochladenie do oblasti vysokej stability austenitu (500 – 600 °C) a tvárnenie pri tejto teplote. Nasleduje kalenie a nízkoteplotné popúšťanie (obr. 4.29b). Vysoká hustota porúch a rozdrobenie zŕn vedie k vzniku extrémne jemného martenzitu s pevnosťou až 3000 MPa pri pomerne dobrej húževnatosti.



Obr. 4.29 Spôsoby termomechanického spracovania:

- a) Vysokoteplotné termomechanické spracovanie (VTMS), b) – Nízkoteplotné termomechanické spracovanie (NTMS)