

Az acél hőkezelése

Házi tanulmány

A tanulmány célja a hobbikovácok és a téma iránt érdeklődők minimális ismereteinek még minimálisabbá tétele, ezért természetesen ezen iromány szabadon felhasználható oktatási célokra.

A tanulmány elkészítéséhez a szerző természetesen semmiféle forrásanyagot nem használt fel (főként azokat nem, amelyeket legvégül felsorol), és azoknak felhasználásához különben sem járult volna senki hozzá, így természetesen minden adat légből kapott, és ha bármi hasonlóság vagy random egyezés fordulna elő valós információkra alapozott könyvek, tanulmányok vagy jegyzetekkel összehasonlítva, az pusztán csak a véletlen műve lehet!

(Illetve vallásos olvasóim számára pedig: Mert ez az egy és igaz Isten akarata! - Ámen!; -Amitabha!; - Mert Allah hatalmas és igazságos! Áldott legyen a próféta!; -Hallelu-Jhvh!; - Tengerin bosig.).

A hőkezelés céljai

A **hőkezelés** egy irányított folyamat, amely felmelegítésből és lehűtésből áll, amely az adott anyag – jelen esetben fém (az acél) – fizikai és mechanikai jellemzőit változtatja meg, (lehetőleg) annak alakváltozása nélkül. Hőkezelési eljárás azonban előfordulhat véletlenszerűen kivitelezve is, különféle gyártási folyamatok során, amik vagy felmelegítik, vagy le is hűtik az adott anyagot.

A hőkezelési eljárásokat gyakran kapcsolják az adott anyag szívóssá, vagy keményebbé tételéhez, azonban ezen folyamat(ka)t tovább is fel lehet használni, például az adott anyag gyárthatósági tulajdonságainak megváltoztatásához, pl.: gépi megmunkálhatóság, valamint (hideg)alakíthatóság könnyebbé vagy nehezebbé tétele, hajlékonyság és nyújthatóság visszaállítása, stb..

Az acél egy különösen jó alapanyag hőkezelési szempontokat figyelembe véve, mivel jól reagálnak a különféle hőbehatásokra, amivel tulajdonságait szélesebb határokon belül jó lehet változtatni, ezért az acélok kereskedelmi felhasználása több, mint bármelyik másik alapanyagé.

Általában az acélt az alábbi okok legalább egyike miatt hőkezelik:

1. **Lágyítás**
2. **Keményítés**
3. **Egyéb módosító eljárások**

Általános hőkezelési típusok

A lágyítás

A lágyítás egy olyan eljárás, amellyel az acél szilárdságát vagy keménységét csökkentik, vagy az anyagban maradó feszültséget megszüntetik, növelik annak szívósságát, vagy visszaállítják vele az anyag nyújthatóságát, illetve hajlékonyságát, csökkentik a szemcsézettség méretét, vagy az acél elektromágneses tulajdonságát változtatják meg vele.

Ezek közül a tulajdonságok közül az anyag nyújthatóságának és hajlékonyságának (együtt: **duktilitás**), valamint a belső maradó feszültségek eltávolításának különleges szerep jut, mivel ezen műveleteket általában szükséges elvégezni hidegalakítási eljárások megkezdése előtt (pl. huzalhúzás vagy hidegen való hengerlés előtt). A **teljes megeresztés, sferordizálás**, normalizálás és kieresztés – pl. **ausztenítésítés** – a főbb eljárások, amelyek során az acél keménységét csökkentik, lágyítják

Keményítés

Acélok **keményítése** során az anyag kopásállóságát, keménységét és szilárdságát tudjuk megnövelni. **A keményítés előfeltétele**, hogy elegendő szén-, illetve ötvözőanyag-tartalom legyen az acélban. Ha van elég széntartalom, akkor az acélt lehet **közvetlenül edzeni**. Máskülönben az acél felszínét lehet csak keményíteni, pl. **szén-diffúziós dúsítási eljárással** (cementálás).

Módosító eljárások

Az acél anyagi, szerkezetbeli tulajdonságainak megváltoztatásának célja az a hőkezelés, amely az acél a keményítésén és lágyításán kívüli céllal történik. Az ilyen eljárások megváltoztatják az acél viselkedését különféle behatások ellen, és jótékonyan hatnak a termék élettartamára - ilyen pl. a **feszültségmentesítés**; vagy szilárdságnövelés – ilyen pl. a **kriogenikus hőkezelés (hűtés)**; vagy valamilyen más kívánatos tulajdonság erősítése – pl. rugók **öregbítése**.

Lágyítási eljárások

Teljes megeresztés

A teljes kieresztés eljárása során a hőmérsékletet lassan növeljük 50°C-szal a megfelelő ausztenites vagy ausztenites-cementites hőmérsékleti pont fölé.

(Ez a hőmérsékleti pont természetesen az elemi vasban oldott széntartalomtól függ. Hogy ez mennyi, pl. 0,77% szén tartalom mellett ez 727°C - fontos eutektikus pont! Kritikus hőmérséklet! - de legrosszabb esetben is maximum 912°C, tehát 912°C+50°C-nál stabil, ha az oldott széntartalom: $C < 0,77\%$ - hipoeutektoidos acél.

Itt csak ausztenit van jelen (más néven gamma-vas).

Nagyobb széntartalmú acélt otthoni kovácsolásra használni tulajdonképpen felesleges.

Egyébként ha ennél nagyobb széntartalomról van szó – mert csak ilyen alapanyag van otthon - akkor a hőmérséklettel elmehetünk 1146°C+50°C-ig, ha az oldott széntartalom $0,77\% < C < 2\%$ - hipereutektoidos acél. Itt ausztenit és cementit van együtt jelen (gamma vas és vas-karbid).)

Az alapanyagot ebben a hőmérsékleti tartományban a megfelelő ideig tartva az acél teljes keresztmetszetében ausztenitté, vagy ausztenites-cementites (ledeburitos?) összetételűvé válik.

Ezután az átalakulás után lassú hűtés következik, kb. 20°C/órás hőmérséklet-csökkentéssel, 100°C fok alá, így az acél összetétele ferrites-cementites összetételű lesz. Az így kapott munkadarabot a hőkezelőből kivesszük, és levegőn hagyják kihűlni. Az így kapott acél lágy és képlékeny lesz a perlites-ferrites ($C < 0,77\%$), vagy perlites-cementites-ledeburitos ($C > 0,77\%$) szemcsék kristályrácsának köszönhetően.

(Látjuk, érezzük, hogy ez a kihűtés hosszú és fájdalmas folyamat, kb. 960°C-ról lehűteni valamit 100°C-ra 20°C-os csökkentésekkel óránként, az kb. 43-44 órába telik. Természetesen ez a művelet otthon szinte kivitelezhetetlen, és a folyamat gátlástalanul megenné az összes szénünket legalább egy kiló brazil kávé kíséretében – így ilyen műveletekkel otthon nem is foglalkozunk. Ezt meghagyhatjuk azoknak, akik szerszámgyárban dolgoznak, vagy akiket annyira felvet a della, hogy nincs hova tenni, vagy rendelkeznek egy romániai szénbányával, esetleg kutatómérnököt játszanak az állam/adófizetők pénzén egy tetszőleges, ettől a ponttól tetszőleges epszilon-távolságra levő egyetemen vagy fősulin. A legtöbbet ezt a cuccot elintézik egy „este betettem a kályhába” cselekménnyel – vagy esetleg a minden hájjal megkent kontárok legalja, mint én, képes kétszer felmelegíteni és egy fogó segítségével mozgatva levegőn kihűteni azt, és azt gondolni, hogy mindez így tényleg szép és jó. De ez is téma lesz. A fő kérdés itt, hogy mennyi időn keresztül kell benntartani az acélt – mert az egyetemi könyvekben természetesen pont a lényegről nincs szó - hogy átalakuljon megfelelő kristályszerkezetűvé, hogy majd

ugyanazzal a melegítéssel be bírjunk edzeni egy másik darabot, vagy később ugyanezt az okosságot felhasználva épp azt, amit épp kieresztünk, szeretnénk beedzeni. Ezt az időt a TTT diagramról (idő-hőmérséklet-átalakulás diagram) olvashatjuk le. Ez itt nincs megadva, ill. anyagfüggő, úgyhogy nincs más hátra, segítünk magunkon - a függelékbe betettem pár ilyen.

Onnan az értékeket leolvastva ennek az időnek mennyisége kb. 10 és 100 másodperc között van, tehát ha max. kb. másfél percig hagyjuk a vasat sárgán izzani, elértük, amit akartunk (egy 5mm-es vastagságú anyag esetében). Ami még zavaró, hogy ezeken a diagramokon nincs feltüntetve a ténylegesen vizsgált/vonatkoztatott anyag méretezése - ugyanis ez az idő függ az darab méretétől).

Normalizálás

A **normalizálás** azon eljárás, amikor az anyag hőmérsékletét 60°C-szal fölé emeljük a teljesen a stabil ausztenit képződésének régiójába. Ilyenkor az anyagot hőn tartják, hogy az acél kristályszerkezetét tekintve az teljes keresztmetszetben ausztenit alakuljon. Ezután kivesszük a munkadarabot a hőkezelőből, és levegőn hagyják kihűlni. Az eredmény finomszemcsés szerkezetű perlit, amely ferritből és cementitből áll (a kettő keveréke, valamelyik túlsúlyával). Az így kapott anyag **lágú**, ennek a lágúságnak mértéke azonban függ a hűtést meghatározó aktuális környezeti feltételektől. Ez az eljárás **jelentősen olcsóbb, mint a teljes megeresztés**, hiszen itt nem jelenik meg a fokozatos és irányítottan lassú lehűtés hozzáadott költsége.

A fő különbség a teljes megeresztés és a normalizálás között, hogy a teljesen megeresztett munkadarabok teljes keresztmetszetükben egységes keménységűek (azaz lágúak), és ezáltal egységesen forgácsolhatóak a darab minden részén.

Egy normalizált acél esetében az aktuális keménység függ a darab geometriájától, a lehűlés gyorsaságától és a külső hőmérséklettől. Mivel a kihűlés mértéke nem azonos a teljes keresztmetszeten, ezért a normalizált anyag keménysége is a hely függvénye. Ez az eredmény lehet, hogy nemkívánatos a további megmunkálásokat illetően, hiszen a forgácsolási eljárásokat kiszámíthatatlanná teheti – ebben az esetben biztonságosabb a teljes megeresztés eljárását alkalmazni.

Fokozatos megeresztés

A **fokozatos kieresztés** eljárását olyan alacsony széntartalmú ($C < 0,25\%$) acélon hajthatjuk végre, amelyek hidegalakítás során keményedtek fel. Ez az eljárás így lehetővé teszi, hogy újra kilágyuljon az anyag annyira, hogy ne repedjen vagy törjön el további hidegalakításos eljárások során.

Ezen lágúítási eljárás során a hőmérsékletet úgy emelik meg, hogy az még az ausztenit-ferrit régiót ne érje el (ez a hőmérséklet 727°C, tehát ez alatt, pl. 650-700°C körül tartják a hőmérsékletet). Itt az acéldarabot hőn tartják, míg a ferrites újrakristályosodási folyamat teljesen le nem zajlik. Ezt a lépést áramoltatott levegővel való hűtés követi. Mivel az alapanyag végig ugyanabban a ferrites kristályfázisban van, annak változó tulajdonságai egyedül a méret, alak, forma és a szemcsézettség eloszlása.

Ez az eljárás olcsóbb, mint a teljes megeresztés vagy a normalizálás folyamata, mivel a munkadarabot nem kell relatíve nagyon magas hőmérsékletre felhevíteni, sem pedig irányítottan lassan kihűteni.

Feszültségmentesítő megeresztés

A **feszültségmentesítés** folyamata az anyagban maradandó feszültségek csökkentése, amik lehetnek pl. öntési hibák, hegesztési hibák, vagy a megmunkálás során az anyagba került feszültségek. Néhány anyag érzékeny lehet még hőmérsékleti változásokra, vagy hidegalakításos eljárásokra. Ezen eljárás során a munkadarabot 600-650°C-ra melegítik, és ott hosszabb ideig hőn tartják (pl. 1 órán át), amit aztán levegőn való kihűlés követ.

Szferoidizáció

A **szferoidizáció** olyan lágýtási eljárás, amelyet magasabb széntartalmú acélok esetében alkalmaznak ($C > 0,60\%$) akkor, ha a munkadarabot forgácsolással vagy hidegalakítással kívánják később megmunkálni. Szferoidizáció az alábbi módszerek egyikével mehet végbe:

1. Az acél hőmérsékletét a ferrites-ausztenites vagy a ferrites-cementites régió (727°C) alá viszik fel, amit aztán hosszú időn át hõn tartanak, majd ezt a lépést egy eléggé lassú lehûtés követi.
2. Az acél hőmérsékletét többször is változtatják a már fent említett 727°C körül, és azt hol alá, hol fölé viszik ennek a pontnak, pl. 700°C és 750°C között változtatják, amit aztán nagyon lassú lehûtés követ.
3. Szerszámacélok és ötvözött acélok esetében a munkadarabot felmelegítik $750-800^{\circ}\text{C}$ -ra, ott több órán át hõn tartják, majd fokozatosan lehûtik.

Mindezen fenti eljárások a cementit gömbszerû (görögül a gömb szfaira, ebbõl az idegen szóból képzõdött „szferoid” szó gömbszerût jelent) kristályait eredményezi az anyag ferrites szerkezetében. Ez a kristályszerkezet javítja a kopásállóságot, valamint folyamatos és szinte teljesen egységes megmunkálhatóságot tesz lehetővé automatizált vágógépek, esztergák stb. számára.

Temperálás

A temperálás egy olyan folyamat, amely hirtelen hûtéssel elért keménységnövelés (edzés) után következik, de az így lehûtött darabok általában túlzottan is törékenyek. Ez a törékenység az anyagon belüli martenzit túlsúlyából fakad. Ezt a rideg törékenységet temperálással távolítják el az anyagból. A temperálás egy vagy több, a terméktõl elvárt tulajdonsághoz (hajlékonyság, szívósság, szilárdság, szerkezeti stabilitás & keménység), vagy azok kombinációjához vezet. A temperálás mechanizmusa függ az acéltól és a hőmérséklettõl. A kapott martenzit, ami jellemzi az anyagszerkezetet, egy kissé instabil kristályrács. Amikor ezt hõ éri, akkor a szénatomok a martenzitból diffundálnak, hogy karbidot alakíthassanak, ami egyidejûleg ferrit és cementit (vas-karbid) képzõdéséhez vezet, amik már hőmérsékletünkön stabil allotróp módosulatok. Ennek köszönhetõen pl. a szerszámacélok 2-4 keménységi pontot vesztenek Rockwell C skálán. Így egy kis szilárdság feláldozódik, míg nagymértékû szívósság-növekedés tapasztalható (aminek ütõmunkával történik mérése). Rugók és hozzá hasonló mechanikai igénybevételeknek kitett alkatrészeknek még szívósabbnak kell lenniük, így azokat egy sokkal kisebb keménységi fokra temperálják. Az edzést általában azonnal temperálás követi, miután az acéldarab $40^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletûre hûl a közvetlen hûtést követõen, a munkadarab már megfelelõen készen áll a temperálásra. Így az acélt felhevítik egy $150-400^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékletre. Ebben a hőmérsékleti tartományban egy lágyabb, de szívósabb szerkezetû anyag, a troosztit keletkezik. Vagy esetlegesen az acéldarabot egy magasabb hőmérsékleti tartományba melegítik, $400-700^{\circ}\text{C}$ közé, ami egy még lágyabb szerkezethez vezet, amit úgy hívnak, hogy szorbit (fontos nem összekeverni ugyancsak erre a névre hallgató E420-as ételadalékkal, ezért annak nevét szorbitolra változtatták). Ezen anyag viszont még szívósabb és rugalmasabb, mint a troosztit.

A temperálás legjobb kivitelezési módja, hogyha a hõkezelti kívánt darabot olajfürdõbe tesszük, amit a megfelelõ hőmérsékletig (egészen 350°C -ig) felmelegíthetünk az abban elmerült munkadarabokkal együtt. Az elõnye ennek a módszernek, hogy a fürdõben az acél egyenletesen melegszik fel, és minden rész ugyanolyan mértékû és minõségû temperáláson esik át. A 350°C feletti fürdõkhöz a legjobb nitrát-sókat használni – ezeket 625°C -ig melegíthetjük. A fürdõ összetételétõl függetlenül viszont fontos, hogy a fürdõt mindig egyenletesen és fokozatosan melegítsük, így gátolva azt, hogy az edzett acéldarab megrepedjen. Miután a megfelelõ hőmérsékletet elértük, ott a fürdõt és teljes tartalmát kb. 2 órán keresztül hõn tartjuk, aztán a munkadarabokat kivesszük, és hagyjuk levegõn kihûlni.

Auszténites temperálás/edzés

Az auszténites temperálás tulajdonképp egy gyors lehűtési típus. Itt az anyag nem tud a martenzites régióba lépni lehűlés közben, ehelyett a lehűtést csak addig a hőmérsékletig folytatják, ameddig még nem tud martenzit képződni. Ez a hőmérséklet 315°C . A munkadarabot ezen a hőmérsékleten tartják mindaddig, amíg a darab teljes egészében át nem veszi ezt a hőmérsékletet. Mivel a darabot viszonylag hosszabb időn keresztül ezen a hőmérsékleten tartják, az auszténit átalakul bainitté. A bainit (nevét Edger Bain után kapta, magyar oktatási anyagokban „bénit” néven is szerepelhet, de mivel a magyar tudomány a német elnevezéseket vette át és használja, maradjunk is annál) pedig már kevésbé hajlamos a spontán repedésre, és eléggé szívós ahhoz, hogy további temperálási eljárás már nem szükséges.

Martenzites temperálás/edzés

A martenzites temperálás hasonló az auszténites temperálásos eljáráshoz, csak itt az acélt a hűtés során beviszik a martenzites régióba. Az így kapott kristálystruktúra hasonlóan martenzites lesz, mint egy teljesen gyors lehűtés esetében, és további temperálásos eljárásra van szükség. A martenzit képződése auszténitből már magasabb hőmérsékleten (225°C) megindul.

(Ez ábrákon ált. az Ms vonal jelzi, kovácsvasak esetében általában kb. $200\text{--}230^{\circ}\text{C}$, ötvözőktől függően. Ötvözött acélok esetében ez a hőmérséklet 500°C is lehet! Pl. AISI 1060-as esetében ez az érték 270°C , AISI 1075 esetében 240°C , míg AISI 1085 esetében 215°C . Az $0,77\%$ szén tartalmazó ideális eutektikus acél esetében ez az érték $224,5^{\circ}\text{C}$ - tehát látjuk, hogy ez a hőmérsékleti érték a szén növekedésével arányosan csökken. Ha az edzett acéldarabot 100°C alá hűtjük, a martenzitté alakulás 100% -os, míg ha csak 150°C -ra hűtjük, az kb. 50% -os átalakulással jár.)

Az előnye a hűtési fok maximalizálásának – auszténites vagy martenzites temperálás esetén – hogy az ilyen eljárással hőkezelt anyag kevésbé hajlamos az elcsavarodásra és a repedésre, törésre.

Keménysegnövelési eljárások

Diffúziós eljárások

A vasban oldott széntartalom határozza meg, hogy az adott anyagot lehet-e közvetlenül edzeni. Ha ez a széntartalom ehhez túl alacsony (pl. kevesebb, mint $0,25\%$), akkor erre a problémára alternatívát nyújthat, hogy a felületi széntartalmat megnövelhetjük. Egy ilyen eljárás után a munkadarabot hőkezelhetjük folyadékban való edzéssel vagy levegőn való hűtéssel, az anyagtól elvárt tulajdonságoktól függően. Fontos azonban tudnunk, hogy ezen eljárások alkalmazásával csak a felület keménységét tudjuk bizonyos határokon belül megnövelni, de a felület alatti magrészt nem – hiszen a szénrel telített réteg a felszínen található meg. Ez viszont néha ténylegesen egy elvárt tulajdonság (pl. fogaskerekektől), mert a keményebb felszín jobb kopásállóságot biztosít, míg a lágyabb és szívósabb belső rész ellenállóvá teszi dinamikus terhelésekkel szemben (pl. ütőmunka).

Karbidizációs eljárások

1. **A cementálás** elnevezése annak az eljárásnak, amikor az acél felületét szénrel dúsítják. Azt úgy csinálják, hogy az aktuális acéldarabok hőmérsékletét szénben gazdag környezetbe helyezik, és ennek a rendszernek a hőmérsékletét megemelik, lehetővé téve a szénatomok diffúzióját az acél kristályszerkezetébe. Ez az eljárás csak akkor működik, ha maga az acéldarab csakis alacsony széntartalommal rendelkezik, mivel ez a diffúziós reakció koncentrációkülönbségen alapszik (tehát a reakció egyensúlyi). Hogyha például a szóban forgó acél szénben gazdag/telített, és egy szénben

szegény légkörben (pl. levegő) hevítjük, akkor a szénatomok az acélból diffundálnának ki, ami a munkadarab dekarbidizációjával járna (ilyen légkörök – oxidatív, semleges és redukív egyaránt – a kovácstűz izzítóterében is kialakulhat).

2. **Szilárd fázisú karbidizáció** az az eljárás, amikor az acéldarabokat szénben gazdag reakcióelegybe (salakba) teszik. Ilyen elegy lehet a szénpor (finom szénpor, porított faszén, csontszén; vegyi gyorsító: bárium-karbonát), vagy öntöttvasreszelék elegye, amit aztán 12-72 órára együtt hevítenek 900°C-on. Ezen a magas hőmérsékleten szén-monoxid keletkezik, ami egy igen erős redukálószer. A redukció az acél felületén megy végbe, ahol szén szabadul fel, ami a magas hőmérsékletnek köszönhetően bele tud jutni (diffundálni) az acélba. Amikor a darab már eléggé felszenült, a reakcióelegyből kivéve hagyományos keménységnövelő eljárásokkal lehet hőkezelti. A felületi széntartalom ennél a módszernél általában 0,7-1,2%, ami 0,1-1,5mm közötti mélységig tud hatolni, az eljárás körülményeitől függően. Az így elérhető maximális keménység 60-65HRC. Azonban ezen típusú az eljárás általában nem vezet megbízhatóan megismételhető eredményhez, mert a folyamat hő és hőmérsékleti egyezését a reakciók során nehéz jól és azonos mértékben irányítani, valamint a munkafolyamat külön odafigyelést és munkavédelmet kíván a szén-monoxidos (mérgező) reakcióter miatt.

3. **A gáz fázisú karbidizáció** eljárása ugyanazon az alapelven működik, mint a szilárd fázisú, azzal a különbséggel, hogy redukáló anyagként közvetlenül szén-monoxid gázt juttatnak a reakcióterbe. A reakció hasonlóan a fém felületén megy végbe, és hasonlóan az előbbieken leírt reakcióhoz, a szén bediffundál a fémrácsba. Ezen eljárás azonban megbízhatóbb, mint a szilárd fázisú, hiszen itt a hőkontrollált diffúzió csak a melegítő kemence paramétereitől függ. A vívőgáz általában nitrogén (redukált légkör biztosítása), az egyensúlyi folyamatot a víz- vagy hidrogéngáz elegyével állítják (karbidizációra és dekarbidizációra egyaránt alkalmas).

Az egyetlen probléma, amely közös a szilárd fázisú karbidizációval, hogy a szén-monoxidos légkör igen mérgező. Ennek a gáz fázisú reakciónak egy másik variánsa, amikor alkoholt csepegtetnek a reakcióterbe, miközben az meggyullad, így szolgáltatva a reakcióhoz szükséges szén-oxidot. Ezzel a módszerrel előállított felszenült mélység 0,01 -0,075mm.

4. **A folyékony fázisú karbidizáció** reakcióelegyében jellemzően nátrium-cianid, vagy más ciánsó, vagy azok keveréke, és bárium-klorid található (esetenként nátrium-klorid és nátrium-karbonát). Ezen elegy magas hőmérsékletű (850-950°C) olvadékába merül a karbidizálni kívánt acéldarab - amely hőmérsékleten a cianidok nagy mértékben párolognak, valamint nitrogén is kerül a cementálni kívánt felületbe. Ez az eljárás egészségügyi problémákat vetett fel, amik kevésbé mérgező helyettesítő vegyületek alkalmazásához vezettek (lásd: **karbonitridálás**). A cianidos eljárás egyetlen előnye, hogy gyorsabban eredményre vezet (kb. fél óra), mint a gáz fázisú.

5. **A nitridálás** folyamata során nitrogént juttatnak az ötvözött acél felületének határretegébe. A nitrogén nitrideket alkot az alábbi fémekkel: alumínium, króm, molibdén, vanádium. Ezen ötvözőket tartalmazó acélokat először nemesítik, majd a felületét megtisztítják, felcsiszolják, és berakják egy reakcióterbe, amelybe aztán ammóniát juttatnak. Az ammóniát nitrogénatom és hidrogénatomok alkotják. Ezt a reakcióelegyet melegítik fel 500-630°C-ra, így a nitrogén már (bomlik és) bediffundál az acélba, és ott nitrideket képez. Ezen eljárás során (hőmérsékleten) az anyagok elcsavarodása egyáltalán nem jellemző tulajdonság (nincs allotrop átalakulás). Az így kapott nitrides felületi réteg nagyon kemény, elérheti a 70HRC-t is. További hőkezelés nem szükséges, sőt, ronthatja a keménységi mutatót, mivel a nitrides felületi réteg sérülhet. Ugyanezen okokból ajánlatos a csiszolás munkamenetét még nitridálás előtt elvégezni.

Ennek a reakciónak maximális diffundálási mélysége 0,6mm körül van, amely két óra alatt alakul ki.

6. **A karbonitridálás** a legalkalmasabb felületi keménységnövelő eljárás az alacsony széntartalmú egyszerű és ötvözött acélok esetében. Ezen eljárás során nitrogént és szenet is diffundáltatnak az acél

felületi rétegeibe. A reakcióközeg légköre általában szénhidrogén (metán, etán vagy propán) és ammónia keveréke. A reakciók a nitridálás és karbidizáció keverékének tekinthető, hasonlóan a cianidizálásos (folyékony fázisú) módszerhez, azonban itt a résztvevő reagensek gáz halmazállapotúak. Tekintve, hogy a nitridálás eljárása alacsonyabb (500-600°C), míg a cementálásos eljárások magasabb hőmérsékleten (jellemzően 900°C) zajlanak, a karbonitridálás szükséges és elégséges hőmérséklete ennek megfelelően egy köztes állapotot tükröz: 760-870°C. Erről a hőmérsékletről való lehűtés egy oxigén-mentes természetes gáz légkörében (nitrogén) zajlik, ami kíméletesebb, mint a vizes vagy olajban történő változat, azonban emiatt és a nagyobb reakció-hőmérséklet miatt az elcsavarodás gyakoribb jelenség. Ezzel a módszerrel elérhető legnagyobb keménység 65HRC, míg a felületbe diffundált szénben és nitrogénben gazdagabb réteg mélysége 0,1-0,75mm, amely martenzites, és emiatt általában feszültségcsökkentő temperálásra van szükség.

Közvetlen keménységnövelés (edzés)

Az acél keménysége a vasban oldott széntartalom (és más ötvözők/szennyezők) függvénye. Az acél mesterséges megkeményítése a kristálystruktúra megváltoztatásával jár együtt – térközéppontú kockarács (ferrit) szerkezetből a lap középpontú kockarácsba (ausztenit) – ezért azt fel kell melegíteni a megfelelő, ausztenites régióba. Amikor ezt az ausztenites formát hirtelen lehűtik, martenzit keletkezik, ami egy nagyon kemény, de törékeny struktúra. Ha lassabban hűtik, ausztenit és perlit keletkezik, ami bizonyos részeiben keményebb, más részeiben lágyabb struktúra. Minél lassabb a hűtés, a perlit keletkezése annál nagyobb mértékű, ami egy nagyon lágy anyag.

Az acél keményíthetősége és elérhető maximális keménysége összefügg az acélban megtalálható különféle minőségű és mennyiségű ötvözőelemektől. Különféle ötvözetek azonos széntartalom mellett ugyanazt a maximális keménységi fokot tudják elérni, bár a teljes keménység felszínről mért mélysége függ az ötvözet típusától. Ez az oka annak, hogy általában az ötvözött acéloknak nem a keménységét, hanem az átedzhetőségét szeretnék javítani. Ez az átedzhetőség azt mutatja meg, hogy ezt az elérhető maximális keménységet mekkora keresztmetszetben lehet elérni az anyagban a külső felülettől mérve. Ez függ a lehülési sebességtől is.

Amikor a forró acélt lehűtik, a hűtés az acél külső felületét éri – tehát a keménységnövekedés is itt a legnagyobb, és innen tud terjeszkedni az anyag belseje felé. Az ötvözőelemek segítenek a keménység növelésében, és ha valaki jól választja meg az ötvözetet, akkor az az adott alkalmazási területen megkívánt tulajdonságokat könnyen elérheti. Az ötvözés ilyen formában segít a gyors lehűtés szükségességének visszaszorításában, így csökkentve a deformálódás, repedés és elcsavarodás esélyeit, továbbá az ötvözőknek köszönhetően nagyobb keresztmetszetű anyagokat is könnyebb átedzeni.

A hűtő közeg

Az edzés a forró acél gyors lehűtésének folyamata annak megkeményítése érdekében.

A víz: gyors lehűlést lehet elérni azzal, ha a forró acéldarabot víz alá merítjük. A víz, amely a forró acél felületével érintkezik, felforr, így az a továbbiakban nem érintkezik közvetlenül a vízzel. Ez lelassítja a hűtést, ameddig a buborékok szét nem pukkannak – a folyékony víz csak ezután tud újra érintkezni a forró fém felületével. Amint a víz hozzáér az acélhoz, az nagymértékű hőt von el az acéltól. Jó keveréssel vagy az anyag mozgatásával meg lehet akadályozni, hogy a buborék hozzáragadjon az acél felületéhez, így megakadályozható, hogy lágyabb pontok alakuljanak ki.

A víz egy jó és gyors hűtőközeg, bár korrozívan hat az egyszerű, ötvözetlen szénacélokra, és a túl gyors hűtés elcsavarodást vagy egyéb deformációt, esetleg repedést okozhat az acéldarabban.

A sós víz egy gyorsabb hűtőközeg, mint az egyszerű csapvíz, mert az oldat sótartalma megkönnyíti a buborékok szétbomlását az oldatban, ami lehetővé teszi, hogy a folyékony oldat érintkezését a forró acéllal. A hátránya, hogy a sós víz oldata az egyszerű szénacélokkal szemben még korrozívabb, mint az

egyszerű csapvíz, így azt azonnal le kell mosni, öblíteni.

Az olaj, mint hűtőközeg egy lassabb és kíméletesebb hűtést tesz lehetővé. Mivel az olajnak eléggé nagy a forráspontja, a martenzit képződésének menete ausztenitből az átkristályosodás folyamatának kezdetétől annak végéig eléggé lassú, ami csökkenti a repedés és a deformáció kockázatát. Az olajban való hűtés gyakran járhat együtt füsttel, a forró olaj fröccsenésével és az olaj kigyulladásának veszélyével, tehát munkavédelmi szempontból különös odafigyelés igényel.

Polimerek, mint hűtőközeg hűtési sebességre valahol a víz és az olaj között helyezkedik el. Ennél a közegeknél – víz és különféle glikopolimerek elegyről lévén szó - a hűtés sebességét állítani lehet a különféle összetevők módosításával, keverésével. Polimer hűtőközeg alkalmazásával az eredmények reprodukálhatóbbak, kevésbé korrozívak, mint a vizes hűtés, és kisebb a tűz kockázata, mint az olaj esetében. A polimeres hűtés hátránya, hogy az elegy összetételét folyamatos megfigyelés alatt kell tartani, hogy megismételhetően azonos eredményeket kapjunk.

Kriogenikus hűtés vagy mélyfagyasztásos hűtés eljárásának alkalmazása során nincs visszamaradó ausztenit. A hűtőközeg általában folyékony nitrogén (-196°C), esetleg folyékony hélium (-269°C). A martenzit keletkezésének mennyisége összefügg a hűtés során mérhető legalacsonyabb hőmérséklettel. Bármilyen más hűtéssel a visszamaradó ausztenit mennyisége egyensúlyban van a martenzites kristályokkal. Az át nem alakult ausztenit nagyon törékeny, és az alábbi mutatók romlását is okozhatja: keménység, szilárdság, repedésre vagy törésre való hajlam. Ezt az eljárást jellemzően ötvözött acéloknál alkalmazzák, mivel az egyszerű, alacsonyabb széntartalmú acélok már szobahőmérsékleten 100%-osan martenzitesednek, ellenben a magasabb széntartalmú vagy erősen ötvözött acélokkal (pl. AISI A2, M2, D2 szerszámacélok). Így az utóbbiak esetében csökkenteni kell a hűtés hőmérsékletét, hogy megszabaduljanak a visszamaradó és instabil ausztenittől. A hűtési hőmérséklet általában -185°C -190°C körüli, bár a legtöbb acél -75°C-on már elvártan martenzitesedik, hiszen ez az a hőmérsékleti határ, amelyen már a martenzitesedés általában 100%-os - így ez a hőmérséklet is sok esetben elegendő. A kriogenikus hűtés javítja a kopásállóságot, és csökkenti az anyagban található belső feszültségeket, ezzel növelve az anyag szívósságát – főként iparban alkalmazzák, pl. belső égésű motor alkatrészek gyártása során. Természetesen egy ilyen hűtést általában kíméletes temperálás követ.

Szelektív módszerek

Azon szénacélok esetében, amelyeknek legalább 0,4%-os széntartalmuk van, vagy alacsonyabb széntartalmú ötvözött acélok (pl. edzhető rozsdamentes acélok 0,1%-os széntartalommal) esetében alkalmazhatunk szelektív keménységnövelést az anyag általunk megválasztott részén. Az ilyen részek lehetnek pl. fogaskerekek fogai, perselyek, stb., amiket lángedzéssel keményíthetünk. Ezen módszereket a legjobb közepes széntartalmú szénacélok (0,4%<C<0,77%) esetében alkalmazzák.

Gyakrabban alkalmazott szelektív keménységnövelő módszerek

Lángedés: egy oxigén-acetilén hegesztőgép gázlángja segítségével megmelegítésre kerül a kezelni kívánt darabrész. A melegítés manuális, a gázhegesztő kezelője állapítja meg a vas színváltozásáról, hogy az aktuális munkadarab kellően felmelegedett-e az ausztenit képződéséhez szükséges hőmérsékletre. A teljes hőátadás korlátozott, és függ a gázláng fáklyájának nagyságától, ami általában vagy nem elég ahhoz, hogy egy nagyobb munkadarab közepe is jól átmelegedjen, vagy nem gazdaságos, mivel az átadott hő arányos a melegítés idejével. Ez a módszer általában 6,35 mm-t képes megbízhatóan átizzítani.

Miután a kellő hőfokot elérte a munkadarab, az lehűtésre kerül, majd azt temperálás művelete követi.

Indukciós edzés általában egy váltóáram átjárta tekercs segítségével működik, amibe a hőkezelendő anyagot teszik. A behelyezett munkadarab egy ellenálláshoz hasonlóan az áram hatására elkezd

melegedni. A melegítést befolyásolni lehet az átfolyt áram mennyiségével és frekvenciájával, így szabályozni lehet a melegítés idejét és annak mélységét. Ezen típusú eljárás tökéletesen alkalmas felszíni edzés kivitelezésére.

A lézersugaras edzés a lángedzés egyik formája. A hőkezelés előtt a munkadarabot foszfátréteggel vonják be, ami elősegíti a lézer energiájának elnyelődését. A hőkezelt kívánt részt lézersugarak érik, ami annak felmelegedésével jár. A lézer energiájának, intenzitásának állításával befolyásolni lehet az elnyelt hő mennyiségét, így ez egy nagyon pontos hőközlést tesz lehetővé, ami ráadásul nagyon rövid ideig tart, így az elcsavarodás vagy egyéb deformáció esélye nagyon kicsi. A hőkezelést természetesen hűtés és temperálás követi.

Az elektronsugaras edzés nagyon hasonló a lézersugaras edzéshez, azonban itt a hő forrását energianövelt elektronok adják. Az elektronsugarat (katódsugár) elektromágneses tekercsek segítségével állítják. Ez a módszer a lézersugaras edzéshez hasonlóan nagyon gyors, pontos, megbízható, jól állítható és automatizálható, azonban hátránya, hogy az eljárást vákuum alatt kell végezni, mivel az elektronsugarak könnyen disszipálódnak a levegőben.

Módosító eljárások

Kriogenikus hűtés – lásd fentebb, a keménységnöveléses módszerek, a hűtőközeg megválasztása részénél.

Öregbítés – egy rugótekerccs könnyen elvesztheti rugalmasságát vagy feszítettségét, mivel a nagy igénybevételeknek kitett darab elaszticitása idővel csökken (anelasztikus alakváltozás). Hogy ezt minél jobban elkerüljék, a rugókat a gyártó egy hőkezelőbe teszi, ahol a darabokat két órán keresztül 315-375°C-on tart. Ezt az eljárást hívjuk rugók öregbítésének, és ez teszi lehetővé, hogy a rugó alakot váltson, majd visszanyerje eredeti alakját olyanra, amilyen a behatás vagy igénybevétel előtt volt. Ezt az alakváltozást és visszacsavarodást, illetve annak mértékét a tervezés után így még bizonyos mértékben állítani lehet.

Belső feszültségek mentesítése

Belső feszültségek keletkeznek az acél megmunkálása során. A hidegen történő megmunkálások általában nagyban növelik az anyag belső feszültségét, ami alakvesztéshez, eldeformálódáshoz, repedéshez, vagy akár töréshez is vezethet. Minél nagyobb és bonyolultabb egy munkadarab, annál több belső feszültség keletkezhet. Minél több a lyuk vagy a bemarás a darabon, annál valószínűbb, hogy a tervezésnél megválasztott anyag az igénybevételeknél annak elvárt tolerancia-határain kívül fog esni. Ezen előbb felsorolt indokok miatt gyakran szükséges a munkadarabok (akár gyártás közbeni) belső feszültségeinek csökkentése, megszüntetése.

Az anyagban a megmunkálás során felhalmozódott belső stressz csökkentése jótékonyan hat a minél nagyobb és bonyolultabb öntvényekre, hegesztményekre, szűk mérettartományú alkatrészekre és olyan forgácsolt darabokra, amelyek esetében nagy mennyiségű forgácsleválasztás történt meg.

Ez az eljárás acéloknál általában 75°C-szal az ausztenites képződés hőmérséklete alatt zajlik (azaz 727°C alatt 75°C-kal, de ötvözött acélok esetében, vagy nagyobb széntartalmú öntvények esetében ez az eljárás egy magasabb hőmérsékleten valósul meg), azonban leggyakrabban 650°C körül, amely hőmérsékleten körülbelül egy órás hűtés tartás valósul meg, vagy addig, amíg az acéldarab teljes keresztmetszetében át nem veszi ezt a hőmérsékletet (minél kisebb a darab, annál kevesebb ideig kell hűtést tartani). Miután ennek a hőkezelési eljárás paraméterei teljesültek, a darabot a kemencéből kivesszük, majd hagyják levegőn lehűlni.

Ez az eljárás a belső feszültségek több, mint 90%-át eltávolítja az anyagból.

Ezen dokumentum jelenlegi állapotában megpróbál csak a tiszta szénacélokkal, más ötvöző- vagy szennyezőelem nélküli – tehát ideális – formában foglalkozni, de mivel ilyen természetesen a való életben nem létezik, ezért az gyakorlatban eltérhet a leírtaktól. (Mindazonáltal egy jó közelítés közel 5mm keresztmetszetű anyagok esetében.)

Ezen művem katolikus egyetemeknek és magyar katolikus egyetemistáknak ajánlom, mivel valaha én is voltam egyetemista, és vallásom római katolikus. Továbbá, köszönetet szeretnék mondani a családomnak és barátaimnak, akik nem feltétlen segítettek ugyan a cikk megírását, de mivel néha ilyet is szoktak publikációkba írni, ezért ez se hiányozzon.

A tanulmány megírásának elején az első utáni bekezdés 4. sorából vélhetően kimaradtak az alábbiak: diplomamunka, tudományos értekezés, doktori disszertáció, témalabor feladat, stb..

Függelék

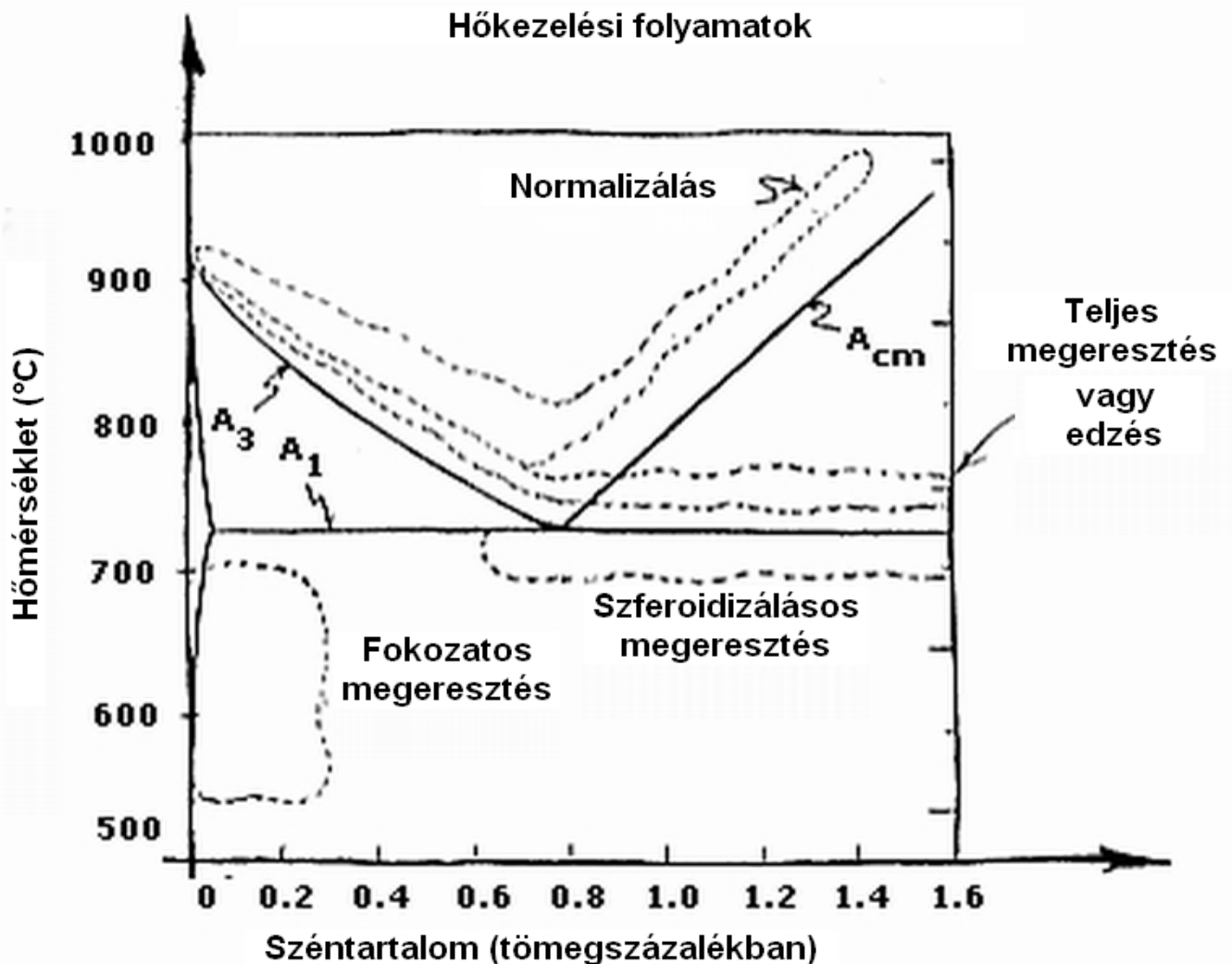
Ábrák

1# ábra - a leghasznosabb ábra:

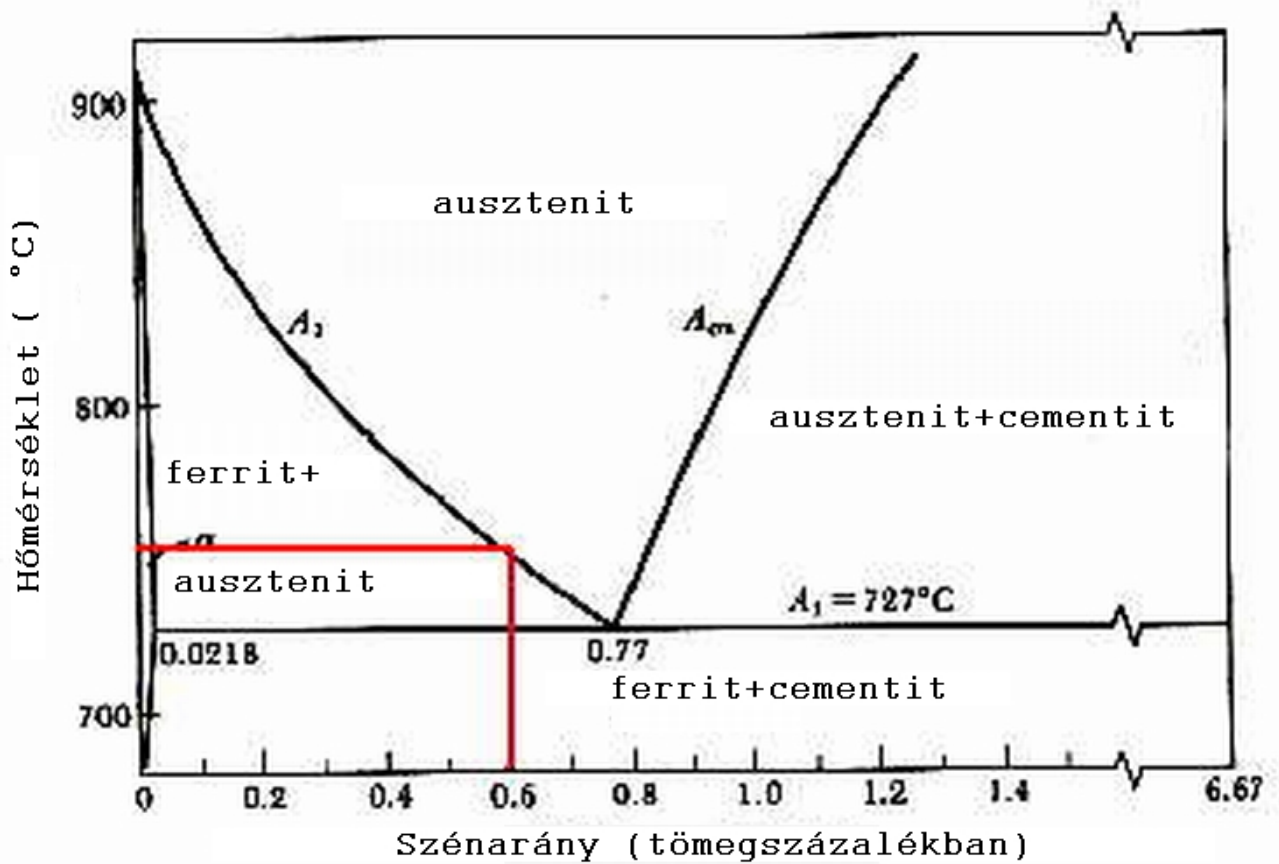
Vas-szén eutektikus diagramja a hőmérséklet függvényében - részlet.

(magyarán: a szén oldódása vasban a hőmérséklet függvényében – abból is csak az, ami nekünk fontos)

Figyeljük meg, hogy milyen szupercirkusin be vannak jelölve halandó ember szempontjából a használandó tartományok – okostóniskodás (ferrit, perlit, cementit, ledeburitoskodás, stb.) nélkül.

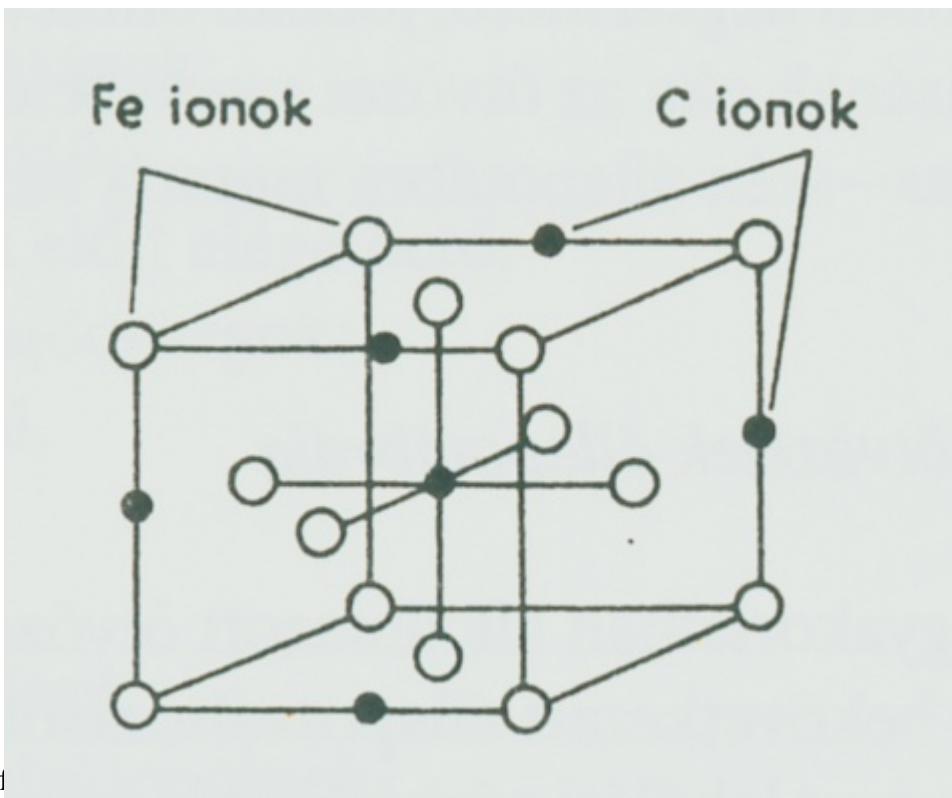


2# **ábra** - AISI 1060-as acél (C60-as acél, széntartalom 0,60%) jellemzői pirossal jelölve

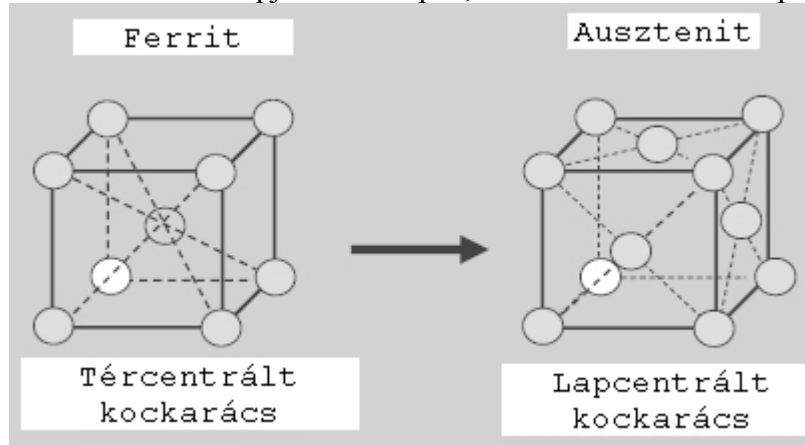


3# **ábra** – ausztenit, a kép magáért beszél.

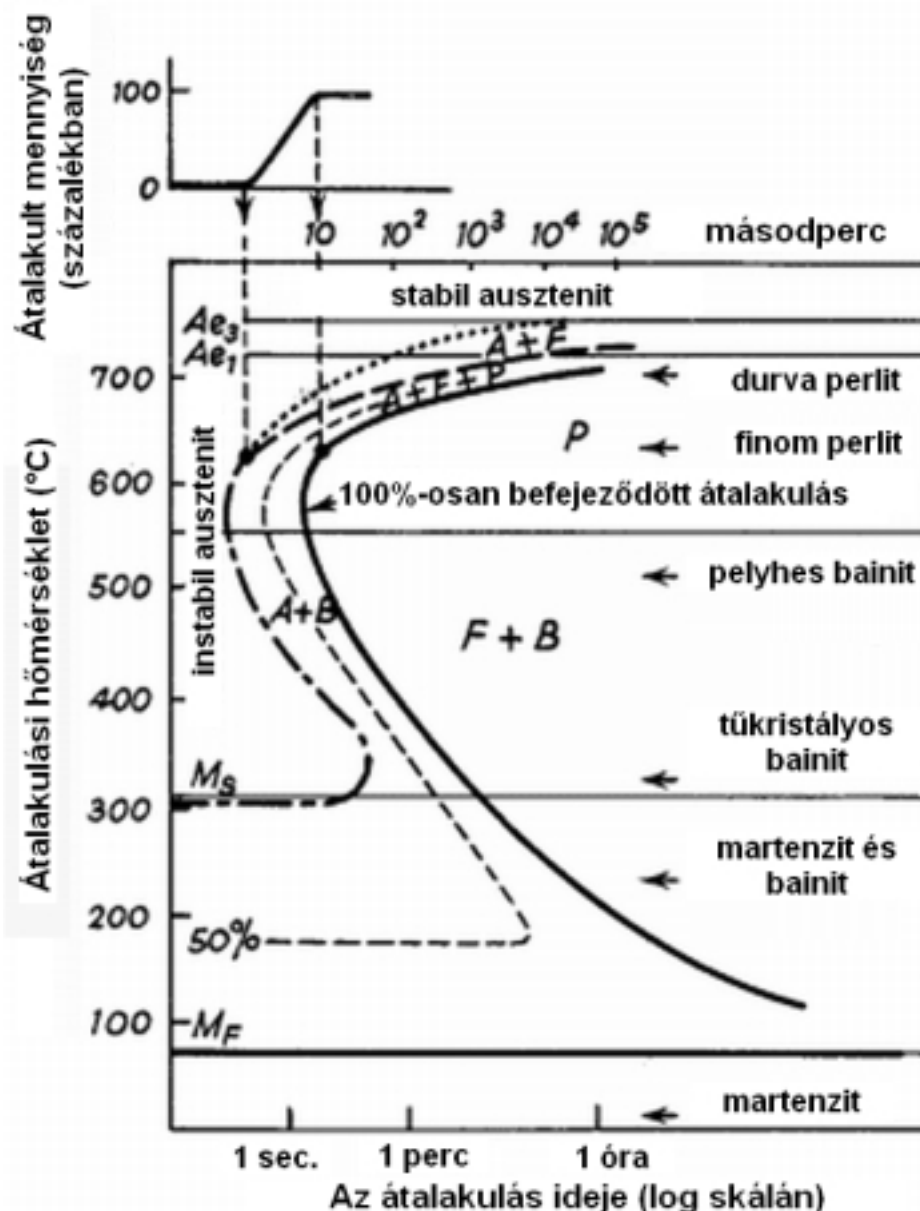
Figyeljük meg, hogy a vas-atomok a kocka külső lapjain és annak közepén helyezkednek el. Ezért ennek a kristályrácsnak a neve lapcentrált kockarács. Más, nem csak vas kristályok esetén is!



4# ábra – ferrit és ausztenit. Itt láthatjuk, mi a különbség a ferrit és ausztenit között. A ferrit esetében vas atom nem helyezkedik el a kocka lapjainak közepén, hanem az a kocka közepén helyezkedik el!



5# ábra – AISI 1065
TTT diagramja (ez kb. megfelel a C65-ös acélnak, C= 0,65%)

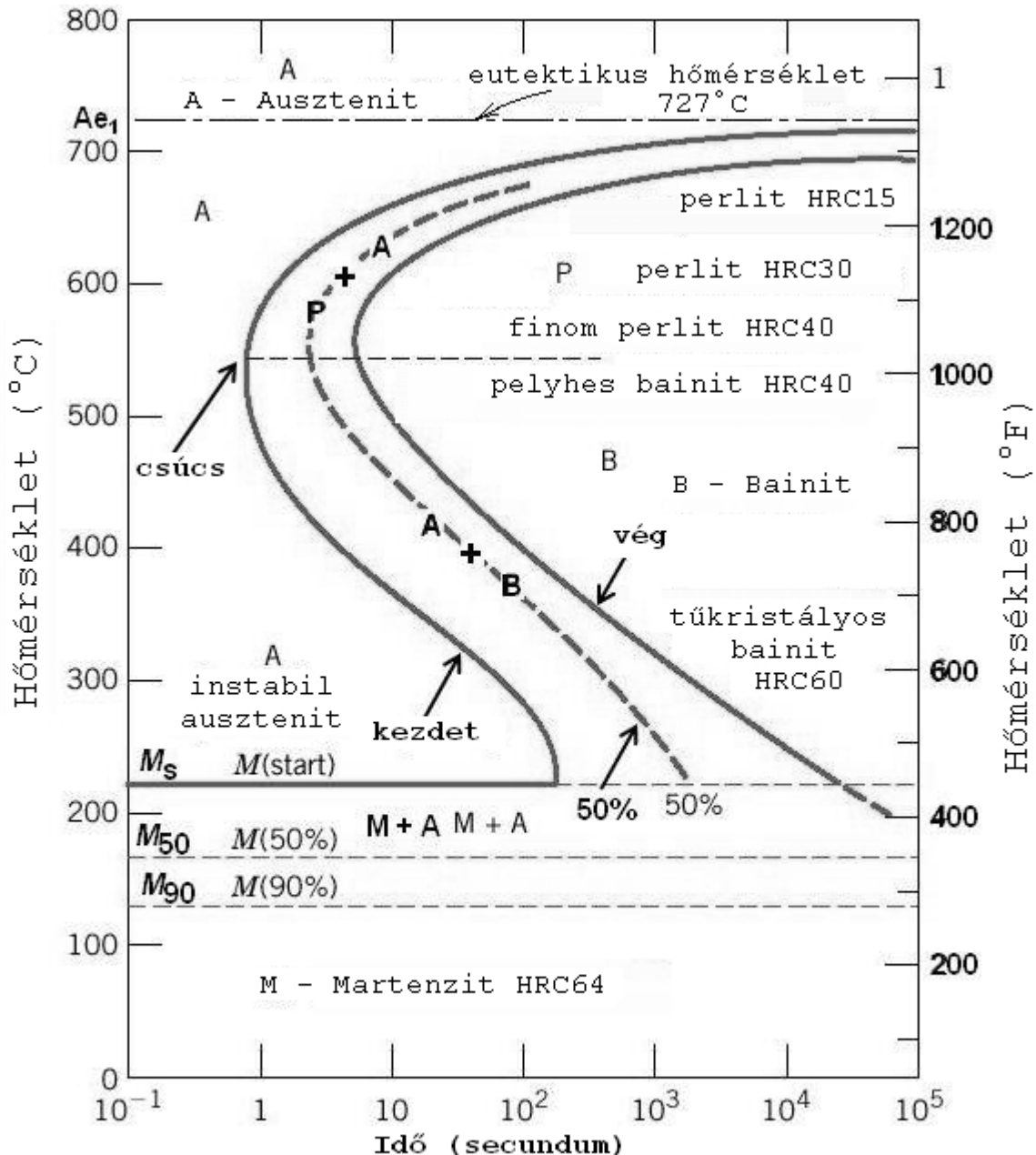


6# ábra – AISI 1080 TTT diagramja (C=0,80%)

Az előző ábrához nem írtam oda, mert szétugrott volna a beszűrt kép miatt az oldal... Itt, ezen az ábrán viszont jól megfigyelhetjük, hogy vannak M_s , M_{50} és M_{90} vonalkák feltüntetve. No, az M_s az a hőmérséklet, amelynél a martenzit kialakulása megindul. Az M_{50} azt jelzi, hogy ezt a hőmérsékletet elérve egy gyors hűtés után az ausztenit 50%-a martenzitté alakult (ez egy fontos pont!). Az M_{90} 90%-os átalakulást jelöl.

Ugyanígy megtaláljuk az ausztenit (A), bainit (B), perlit (P) és martenzit (M) rövidítéseket, ezen kristályok szintiszta régióit és keverékeit az ábrán.

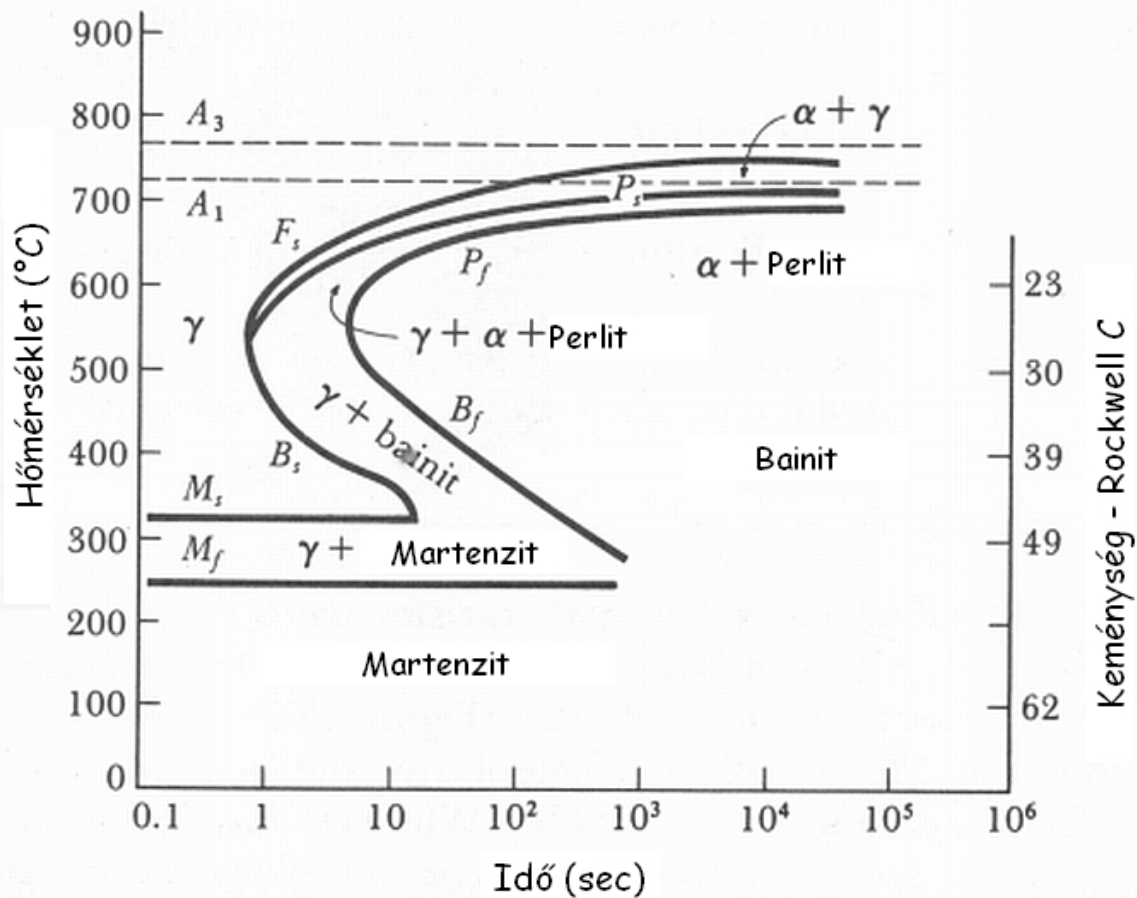
Továbbá láthatjuk, hogy a keletkező kristályok milyensége (durva vagy éppen finom szemcsézet megjelenése, pelyhes vagy tűkristályok keletkezése) egyedül a hőmérséklet függvénye.



Az AISI 1080 acél izotermikus átalakulási diagramja

7# ábra – AISI 1050

TTT diagramja (C=0,50%), keménységi mutatókkal.



Egyéb tudnivalók

Acélok és más fémek kovácsolhatósága

Az **öntöttvasak** (C>2,06%) általában nem kovácsolhatóak.

Ettől kivétel a **temperöntvény** (Tö., v. Töfk.). A temperöntvény elméletben kovácsolható, forgácsolható, és temperálható is. Ha ezen műveleteket óvatosan, nagy odafigyeléssel és jól végezzük, akkor temperálás után szívós is lesz. Ilyen temperöntvényekből alakították ki régen a fékdobokat, bizonyos futómű-alkatrészeket, a hajtóműházakat, tengelyeket, csavarokat, villáskulcsokat, szorítókat. Ezekkel hasonlóan úgy kell dolgozni, mint a kovácsolható rozsdamentes acélokkal.

A **betétben edzhető acélok** általában nem edzhető, nem nemesíthető acélok, hanem a betétben egy cementálási eljárásnak teszik ki őket, ami az acél határfelületén egy vékony, keményíthető réteget hoz létre (lásd a **karbidizációs eljárások** rész alatt).

Egyes nézetek szerint egyes **bronzfélék** (ónbronz és ólombronz) is kovácsolhatóak. Ezt egy távoli ismerősöm (id. Sinka Imre, 2010.) is megerősítette, aki valamikor régen a Ganz villamosgyár dolgozója volt.

Az alumínium egyes ötvözetei, jellemzően az **alumínium magnézium és magnézium-szilícium ötvözet**e jól alakíthatóak, (redukált légkörben) hegeszthetőek és nemesíthetőek.

Acélok szabványos jelölése

- az ötvözők tartalma százalékban kifejezve mindig tömegszázalékot jelöl; a gyárthatóságban pedig csak egy középértéket, bizonyos tolerancia határokon belül - ez utóbbit jobb mindig észben tartani.

- **ötvözetlen hőkezelhető szénacélok** esetén a széntartalom alapján, jel: „C” betű (utalás a szénre, mint egyetlen ötvözőelemre) és utána százszor a széntartalma százalékban, pl. C60 → 0,6% szén.

Ugyanez AISI SAE szabvány szerint: 10xx, ahol xx a szén %-os ötvöző aránya megszorozva százzal. Tehát: SAE 1060 → 0,60% szén;

- **gyengén ötvözött acélok** esetében (ahol az ötvözőelem tartalom kisebb, mint 5%), százszor a széntartalom százalékban (tehát ezen típusú acélok minden esetben számmal kezdődnek), majd az ötvözőelem, majd annak koefficiensének szorzója,

(ez elemenként van meghatározva:

I-es csoport: Cr, Co, Mn, Ni, Si, W esetében 1/4;

II-es csoport Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr esetében ez 1/10;

III-es csoport Ce, N, P, S esetében ez 1/100;

IV-es csoport B esetében ez 1/1000.)

pl. 13CrMo4-5 → 0,13% szén, 1% króm (4/4=1) , 0,5% molibdén (5/10=0,5); vagy

pl. 15CrMo4 → 0,15% szén, 1% króm, molibdén nincs megadva.

- **erősen ötvözött acélok** esetében (értelemszerűen ahol az ötvözőelem tartalom nagyobb, mint 5%), a jelölés egy nagy „X” betűvel kezdődik, majd 100× az acél széntartalma százalékban, majd az egyéb ötvözők tartalma, pl. X2CrNiMo 18-16-4 → 0,02% szén, 18% króm, 16% nikkel, 4% molibdén.

- **gyorsacélok** esetében a jelölés mindig a „HS” betűpárossal kezdődik, majd sorrendben számok következnek, egymást kötőjellel elválasztva, amik az alábbi ötvözőelemek sorrendje: W, Mo, V, Co.

A króm és a szén aránya, mint ötvözőelemek nincsenek megadva,

pl. HS10-4-3-10 → 10% wolfram, 4% molibdén, 3% vanádium; 10% kobalt.

Fel nem használt irodalom:

efunda.com – The ultimate online reference for engineers – Heat treatments

Acélok hőkezelése – BME Anyagtudomány és Technológia tanszék kiadványa – kivonat

Hőkezelés – Széchenyi István egyetemi kiadvány hallgatói jegyzete

Hőkezelés / hőkezelő technikák – BME gépészkari egyetemista jegyzet

Hőkezelhető acélok - Edelstahl Witten-Krefeld GmbH kiadvány

Acélok hőkezelésének alapjai – BMF Bánki Donát gépészkari oktatási segédlet

Koyo thermo systems / Crystec Technology Trading GmbH -
ingyenes reklámkiadványa forgalmazott berendezéseikhez

<http://www.crystec.com/klthsth.htm>

Inox Service Hungary tájékoztató honlapja:

<http://www.inoxservice.hu/index.php/hu/rozsdamentesacel>

Heat treatment of plain carbon and low alloy steels: Effects on macroscopic mechanical properties.
5. Laboratóriumi gyakorlat mintajegyzete - M.I.T., Department of Mechanical Engineering, Cambridge

A model for predicting the Ms temperatures of steels -
Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge

http://www.thomas-sourmail.net/papers_html/New_Ms_model/index.html

Ugyanennek a doktori értekezés-részletnek az adatbázisa mért értékekkel
(itt sok érdekes publikáció megtalálható)

Tempering processes/Technology -

Heat Treater's Guide: Practices and procedures for irons and steels, kiadvány

Standard of steel grades marking in the title block drawing – dr. Kandrotaitė Janutienė Rasa
(10th International Conference on Engineering Graphics – kiadvány)

Különféle anyagok technikai jellemzőinek leírásai – ingyenes kiadványok, főként U.S.A.-beliek.