

SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
ANYAGISMERETI ÉS JÁRMŰGYÁRTÁSI TANSZÉK

HŐKEZELÉS

Kézirat

Készítette: Csizmazia Ferencné dr.

Minden jog fenntartva, beleértve bárminemű sokszorosítás, másolás,
elektronikus médiumokban való feldolgozás és közlés jogát a kézirat egészére
vagy annak egyes fejezeteire

Győr 2003.

1. Egyensúlytól eltérő átalakulások

1.1 Fe-C ötvözetek nem egyensúlyi módon végbemenő átalakulásai

Mint a korábbiakban láttuk, az egyensúlyi diagramok alapján meg lehet határozni a kristályosodás, a fázis átalakulások stb. hőmérsékleteit. A valóságban, ha a lehűlési sebesség nem nagyon lassú "végtelen lassú", hanem nagyobb, ezek a folyamatok, nem a diagram jelezte hőmérsékleten mennek végbe.

Az eltérések oka, hogy a fázis átalakulások **túlhűtést** igényelnek, és a túlhűlés mértéke nem független a lehűlési sebességtől. A fázisátalakulások esetében jelentősen változik az összetétel is. Az összetétel megváltozása szilárd állapotban **diffúzió**val lehetséges, és a diffúzió időt igényel.

A vasötvözetek szobahőmérsékleten előforduló szövetelemei az öntöttvasak grafitja vagy a lédeburitjának karbidját leszámítva az ausztenitből képződnek. Az ausztenit, mint "anyafázis" meghatározza a belőle képződő szövetelemek tulajdonságait. Ezért először az ausztenittel kell megismerkednünk.

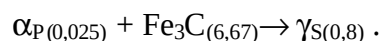
Az ausztenitesedés folyamata

Az acélokban kétféle módon keletkezhet ausztenit:

- kristályosodással
- hevítés során

Az ausztenit szilárd oldat, ezért a kristályosodással létrejövő ausztenit összetétele nem egyenletes, réteges. A krisztallit belseje az ötvözőkből, szennyezőkből kevesebbet tartalmaz, mint a széle.

A hevítésnél képződő ausztenit vizsgálatához először nézzük meg az egyensúlyi viszonyokat. Az egyensúlyi diagram szerint eutektoidos acélban az ausztenitesedés 723 C°-on (A₁ hőmérséklet) játszódik le, az alábbi egyenlet szerint:



A hőmérséklet nem változhat a három fázis miatt. Az ausztenit képződése a fázisok határvonalán kezdődik, ott ahol a legtöbb a rácsrendezetlenség, tehát a legmagasabb az energia szint. Az α t.k.k. rácsa átalakul l.k.k. γ -vá, és a megnövekedett C oldóképesség eredményeként a vaskarbid karbonjának diffúziója megkezdődik. A folyamat csiraképződéssel jár és diffúziót igényel. Hipoeutektoidos acélokban a továbbiakban a ferrit alakul át allotróp átalakulással ausztenitté, a hipereutektoidos acélokban, pedig az ausztenit a növekvő hőmérséklettel növekvő karbonoldóképessége miatt feloldja a szekunder cementitet.

Az ausztenit képződése a valóságban nem mehet végbe az egyensúlyi hőmérsékleten, hiszen az átalakulás hajtóereje az α és γ fázisok közötti szabadenergia különbség, ami az átalakulás hőmérsékletén nulla, ezért **túlhevítésre** van szükség.

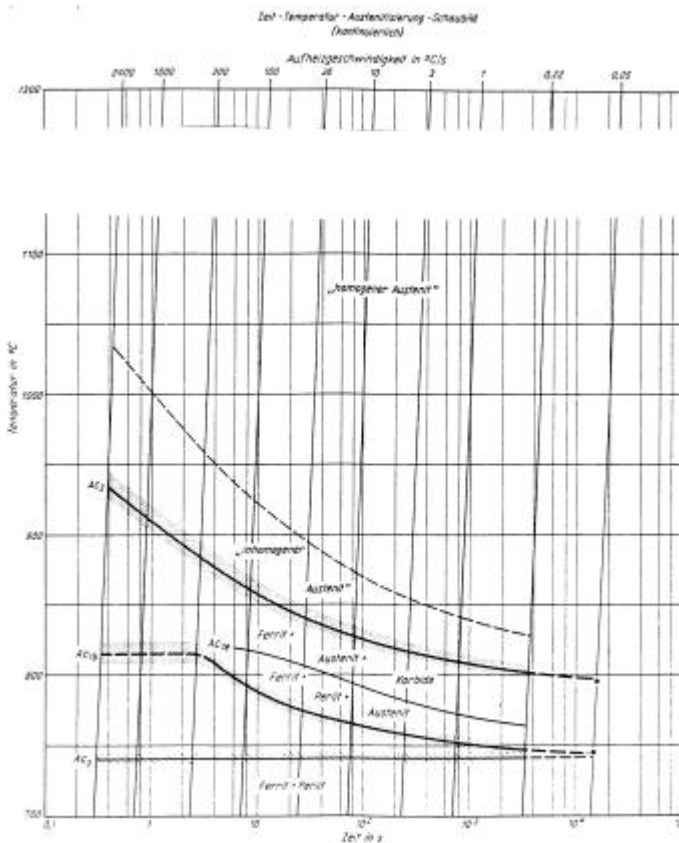
Az ausztenit az acélokban valóságos körülmények között létrehozható :

- izotermikus hevítéssel
- folyamatos hevítéssel

Az ausztenitesedés folyamatát az ausztenitesedési diagramok mutatják.

Az izotermikus diagramok használhatósága korlátozott, mivel a gyakorlatban a nagyobb darabok esetén nehéz, vagy nem is lehet az izotermikus hevítés feltételeit megvalósítani. A folyamatos hevítésre érvényes diagramokat szabályozható hevítési sebességgel hevített darabok dilatációs görbéi alapján veszik fel. A tágulás mérése alkalmas az ausztenitesedés vizsgálatára, ugyanis az átalakulás a fajtérfogat csökkenésével jár.

A folyamatos hevítés sebessége az átalakulást a magasabb hőmérséklet és a kisebb idő irányába tolja el. Az ausztenitesítési diagramokról leolvasható, hogy adott hevítési viszonyok mellett mennyi idő múlva kezdődik az átalakulás, és mennyi idő múlva ér véget. (1. ábra) Mérésekkel igen sok acél ausztenitesítési diagramját meghatározták és azok különböző hőkezelési atlaszokban, szakkönyvekben megtalálhatók.



1. ábra

Szerkezeti acél C=0,37 % folyamatos ausztenitesítési diagramja[2]

tulajdonságai

A hevítéssel keletkezett ausztenit

A hevítéskor keletkezett ausztenit tulajdonságai az összetételétől az összetételének egyenletességétől és nem utolsósorban a szemcsenagyságtól függenek. A szemcsenagyság szerepe a elsősorban a lehűlés közben bekövetkező átalakulásoknál jelentős, hiszen a krisztallithatár a legreakcióképebb.

A hevítéssel keletkező ausztenit legfontosabb tulajdonsága az, hogy szemcsenagysága nem állandó, hanem mindaddig, amíg az acél ausztenites állapotban van a szemcsenagysága állandóan nő, és hűtéskor a lehűlési sebességtől függetlenül megtartja a hevítésnél kialakult szemcseszerkezetet. Ezt a viselkedést **irreverzibilis szemcsedurvulásnak** nevezzük.

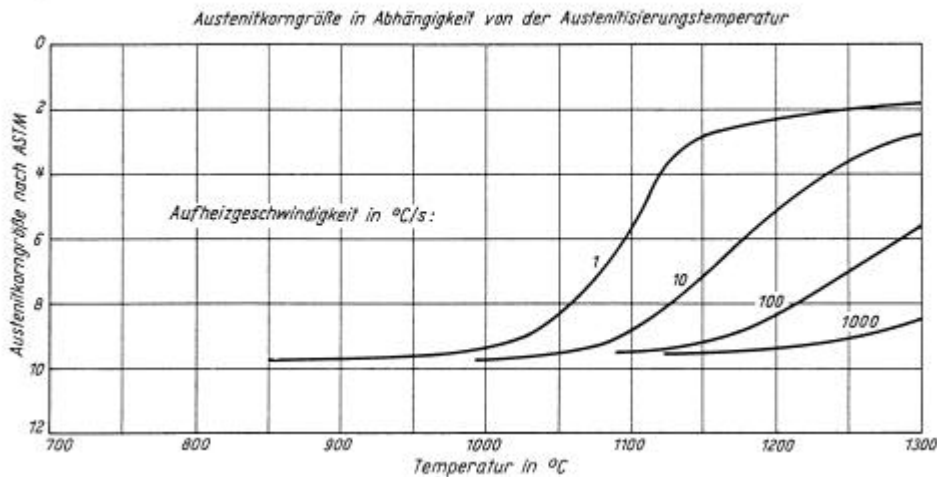
A hevítéskor kialakuló ausztenit szemcsenagysága három tényezőtől függ. Ezek

- hőmérséklet
- hőtartási idő
- az ausztenit összetétele

Az **izzítás hőmérsékletének növelésével az ausztenit szemcsenagysága erősen nő**. A 2. ábrán látható, a hőmérséklet hatása a normális acél szemcsenagyságára.

Az ausztenit szemcsenagyságának növekedése időt igényel, ezért fontos a felhevítés sebessége is. Az ábrán látható, hogy a nagyobb sebességgel végzett felhevítés ugyanazon a hőmérsékleten kisebb ausztenit szemcsenagyságot eredményez.

A hőtartási idő hatása is hasonló a hőmérsékletéhez. Az idő növelésére ha nem is olyan nagy mértékben, mint a hőmérséklettel, durvul az ausztenit. Az ausztenit összetételének hatása a 3. ábrán figyelhető meg.

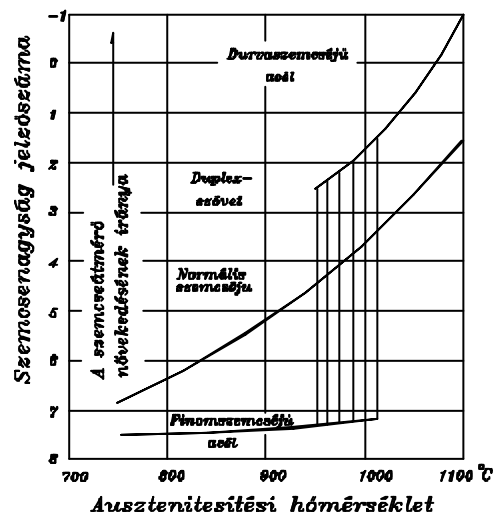


2. ábra

Az ausztenit szemnagysága az izzítási hőmérséklet függvényében [2]

Megjegyzés: a szemcsenagyság az ASTM szerinti szá növekedésével csökken

A finomszemcséjű acél olyan **ötvözőket** tartalmaz (kis mennyiségben Al vagy Ti stb.), melyek az acélban lévő nitrogénnel **nitridet képeznek, és megakadályozzák a szemcsedurvulást**. Az ausztenit kristályhatárokon elhelyezkedő kiválások hatása addig tart, amíg oldatba nem mennek. Az ötvöző típusától függően ez kb. 900 - 950 °C. Az oldódási hőmérséklet környékén együtt találhatók a kis és a nagy méretű szemcsék. Ezt a szerkezetet nevezzük duplex szövetnek.

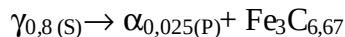


3. ábra

Az ausztenit szemnagysága normális és finomszemcsés acélok esetében

Az ausztenit átalakulásai

Az ausztenit egyensúlytól eltérő módon végbemenő átalakulásai az A_1 hőmérsékleten bekövetkező eutektoidos folyamat tanulmányozásával figyelhetők meg. Az eutektoidos folyamat:



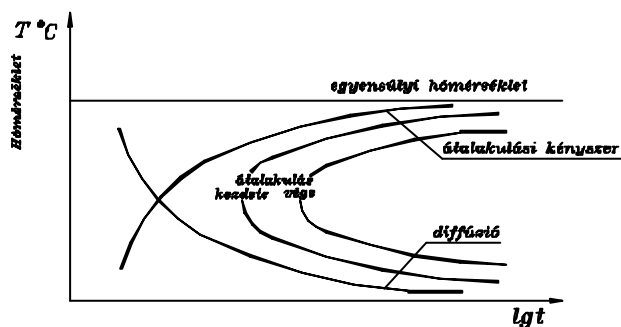
A folyamat két rész folyamatra bontható. Ezek:

$\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulás l.k.k.-ból t.k.k.-be való átmenet
C diffúzió, a Fe_3C képződése

A két részfolyamat időszükséglete nagyon eltérő. A $\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulás nagyon rövid idő alatt bekövetkezik, ha megvan az átalakulás hajtóereje a ΔT hőmérséklet különbséggel arányos szabadenergia különbség. Minél nagyobb a ΔT , annál nagyobb az átalakulás hajtóereje. A másik részfolyamat a karbon diffúzió, ez a C atomok mozgását jelenti. A diffúzió annál nagyobb, minél nagyobb a hőmérséklet és minél hosszabb az idő.

Lassú hűtés esetén az átalakulás mindkét rész folyamata bekövetkezik. Az ilyen átalakulásokat **diffúziós átalakulás**nak nevezzük. Az átalakulás a kristályosodáshoz hasonlóan csira képződéssel jár, időszükséglete a csira képződéstől és a diffúziótól függ. Az átalakulások időszükségletét mutatja a 4. ábra. Az ábrát alakja után C görbének nevezik. Minden diffúziós átalakulásra egy-egy C görbe jellemző.

Ha az ausztenit az átalakulás hőmérsékletéről nagyon **gyorsan** (pl. vízben) **hűtjük**, a két rész folyamat közül, csak a $\gamma \rightarrow \alpha$ rácsátalakulás megy végbe, a karbon diffúzió idő hiányában nem. A C atomok bennszoznak a rácsban, és azt igen nagy belső feszültséget okozva eltorzítják. Az ilyen átalakulást **martenzites átalakulásnak** nevezzük. Azt a lehűtési sebességet, amelynél nagyobb megakadályozza a diffúziót, tehát martenzites átalakulást okoz $V_{kritikus\ felső}$ -nek nevezzük.



4. ábra
A diffúziós átalakulások
időszükségletének alakulása

összetételű acélon mutatjuk be.

Perlites átalakulás

Az ausztenit A_1 hőmérséklet és kb. $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ között alakul át perlitesen. Ebben a hőmérséklet tartományban az eutektoidos átalakulás két részfolyamata közül a C diffúzió, a Fe_3C képződése van "kedvezőbb helyzetben", mivel a viszonylag kis túlhűtés miatt nem túl nagy az átalakulás hajtóereje, de a nagy hőmérséklet miatt, nagy a diffúzió. Az átalakulás tehát az ausztenit krisztallit határon megjelenő cementit csirákkal kezdődik. A C atomok az ausztenitből a cementit csira felé vándorolnak, így a csira környezete karbonban elszegényedik, és átalakul ferritké. A keletkező szövetelem a lemezes szerkezetű perlit. A jelenség az ausztenit krisztallit határon körben bekövetkezik. A további növekedés a csirák befelé növekedésével történik. A befelé növekvő, összeérő kristályok a jellegzetes poligonális kristályhatárokat mutató, lemezes szerkezetű perlitet eredményezik.

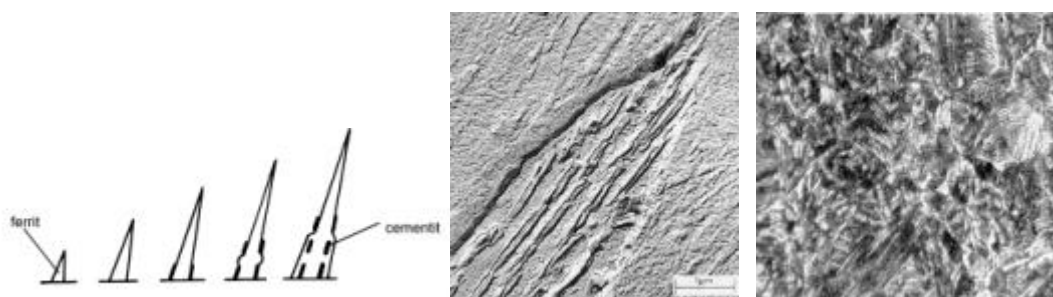
Az átalakulást a túlhűtés és a lehűlés sebessége úgy befolyásolja, hogy a nagyobb túlhűtés ill. sebesség a diffúzió feltételeit rontja, tehát a C atomok adott idő alatt rövidebb utat tudnak megtenni, vagyis a lemezek mérete csökken. A kisebb vastagságú lemezből álló szövetszerkezet nagyobb folyáshatárral, keménységgel, de kisebb alakváltozó képességgel jellemezhető.



5. ábra
Perlites átalakulás

Bainites átalakulás

Ha az ausztenitet 550 C° és kb. 250 C° közé hűtjük az átalakulás már más mechanizmussal megy végbe. Az eltérés oka, hogy ebben az esetben sokkal nagyobb a túlhűtés, tehát az átalakulás hajtóereje, így a két részfolyamat közül a $\gamma \rightarrow \alpha$ átalakulás van "kedvezőbb helyzetben". Az ausztenit kristályhatáron tehát megjelennek a tű alakú ferrit csírok. A túltelített ferritből azonban ezen a hőmérsékleten még ki tud diffundálni a karbon, tehát a ferrit tűk mellett apró cementit korongocskák keletkeznek. A ferrit növekedési sebessége lényegesen nagyobb, mint a diffúzió biztosította cementit képződés, ezért a cementit korongokat "benövi" a ferrit, és kialakul, a **ferrit alapba ágyazott cementit korongocskákból álló szövetszerkezet, a bainit.** (6. ábra)



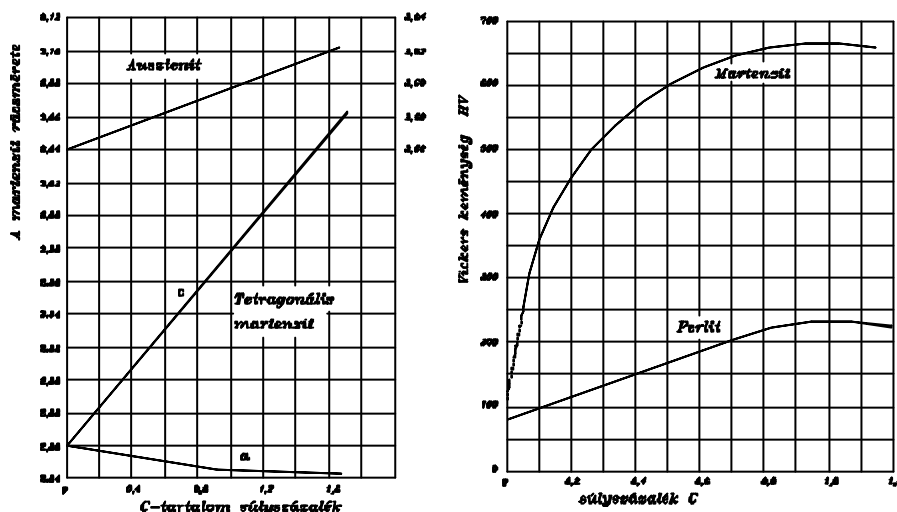
6. ábra
Bainites átalakulás

A folyamatot a ferrit kristályok növekedése szabályozza. A bainit képződést is természetesen befolyásolja a túlhűtés. Az alacsonyabb hőmérsékleten vagy gyorsabb hűtés esetén keletkezett bainit keményebb, mert a C atomok nem tudnak kidiffundálni.. A bainit betétedzett ötvözt acélok magiszövetében fordul elő igen gyakran.

Martenzites átalakulás

Ha az ausztenitet nagyon gyorsan kb. 250 °C-ra le tudjuk hűteni úgy, hogy diffúziós átalakulás ne jöhessen létre, az átalakulás egy új mechanizmussal, martenzitesen megy végbe. A két részfolyamat közül, csak a $\gamma \rightarrow \alpha$ rácsátalakulás következik be.

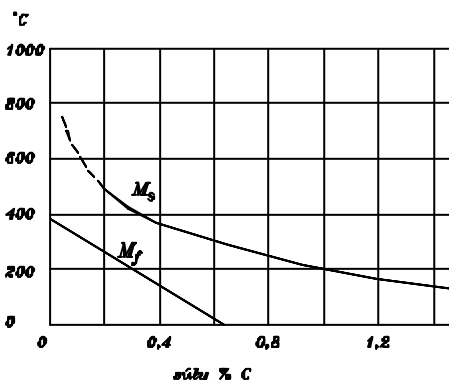
A diffúziós átalakulások elkerüléséhez szükséges sebesség a **felső kritikus lehűtési sebesség**. Az átalakulás **rácsátbillenéssel** jön létre, a C atomok nem tudnak kidiffundálni, az α térközepes köbös rácsát tetragonálissá torzítják, ugyanis a C atomok az oldaléleken, a Fe atomok közé beékelődve helyezkednek el. A torzítás mértéke az ausztenit C tartalmának függvénye. A torzulás nagy belső feszültséget eredményez, ami a martenzitet nagyon keménnyé és rideggé teszi. (7. ábra.)



7. ábra

A ráctorzulás mértéke és a martenzit keménysége a C tartalom függvényében

A martenzites átalakulás kezdő és befejező hőmérséklete a C tartalom függvénye. (8. ábra) Az átalakulás a fajtérfogat növekedésével jár és folyamatos hűtést igényel. Az ábrán látható, hogy kb. 0,6 % C fölött a az M_f hőmérséklet a szobahőmérséklet alatt van, ezért szobahőmérsékletig hűtve jelentős mennyiségű át nem alakult maradék ausztenit lehet a szövetben.



8. ábra

A martenzites átalakulás kezdő és befejező hőmérséklete a C tartalom függvényében

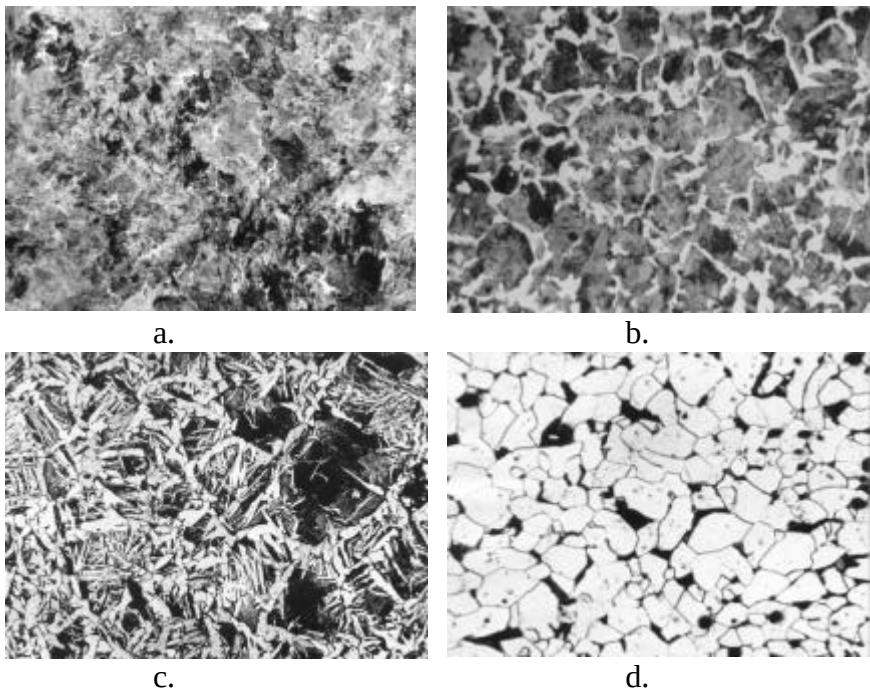
A martenzites átalakulás kezdő M_s és befejező M_f hőmérséklete a lehűlési sebességtől független. Az átalakulás előrehaladásával az energia igény nő. Ennek az egyik oka az, hogy az átalakulás egy ausztenit kristályon belül játszódik le, és a keletkezett martenzit a még át nem alakult részeket közrefogja "összenyomja". Ujabb átalakulás során a fajtérfogat növekedés energia igénye ezért nagyobb. Az átalakulás előrehaladásával kisebb tűk képződnek, amelyeknek a felület/térfogat aránya

nagyobb, ezért nő a felületi energia igény is. Az ausztenit tömegével arányos energia viszont az ausztenit átalakulásával csökken. Ezekből következően az átalakulás nem eredményezhet 100 % martenzitet.

Az át nem alakult ausztenitet **maradék ausztenit**nek nevezzük. Megjegyzés: a maradék ausztenit mennyisége kb. 0,6 % C tartalom alatt 1 % körüli, annál nagyobb karbon tartalom esetén szobahőmérsékletig végzett hűtés esetén nő, mivel $M_f < 0$. Mennyisége mélyhűtéssel csökkenthető. Jelentős mennyiségű maradék ausztenit marad vissza a betétedzett acélokban ill. a szerszámacélokban.

Proeutektoidos átalakulások

A **hipoeutektoidos** (0,8 % C-nél kisebb) **acélok** lehűtése során az ausztenit átalakulását megelőzi a **ferrit**, **hipereutektoidos acélok** esetében pedig a **szekunder cementit** kiválása. Az átalakulások diffúziós átalakulások, és mivel megelőzik az eutektoidos átalakulást ezért **proeutektoidos átalakulások**nak nevezik. A keletkező proeutektoidos fázisok mennyisége a túlhűtéstől, a lehűtési sebességtől függ, megjelenési formái a karbon tartalom kívül, az ausztenit szemnagyságától is függ. (9.ábra) Az ausztenit szemnagyságának hatása abban nyilvánul meg, hogy a krisztallithatár a legreakcióképesebb legreakcióképesebb. A durvább ausztenitben kevesebb a krisztallithatár, ezért az átalakulások megkezdődéséhez hosszabb idő kell.



9. ábra

A proeutektoidos ferrit megjelenési formái

a ferrit foltos, b ferrit hálós, c Wiedmanstatteni, d masszív ferrit

Átalakulási diagramok

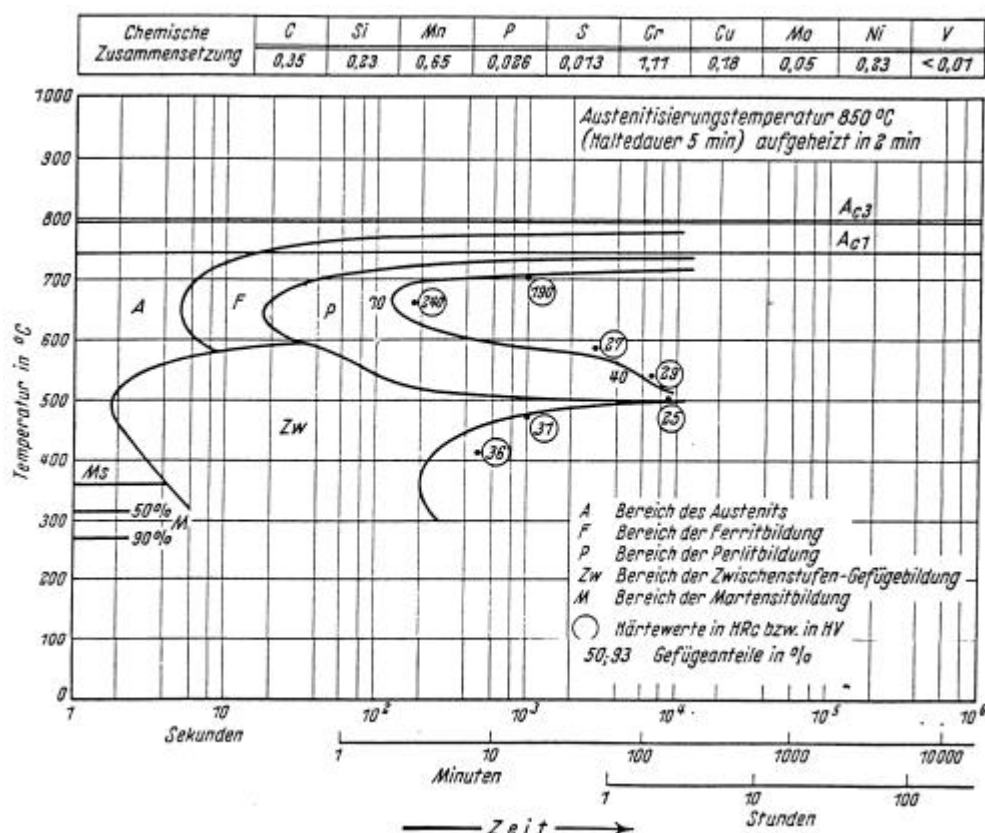
Az átalakulási diagramok egy acél ausztenitjének különböző hőmérsékleteken bekövetkező átalakulásainak időszükségletét mutatják.

Az ausztenit átalakulásait hasonlóan az ausztenitesedéshez vizsgálhatjuk izotermikus és folyamatos hűtés közben.

Az átalakulási diagramokban különböző hőmérsékleteken és lehűlési sebességek mellett az átalakulás megkezdéséhez (inkubációs idő), és a befejezéséhez szükséges időket tüntetjük fel az idő függvényében (Az idő logaritmikus léptékben van.!).

Elvben minden acél átalakulási diagramjának három része van: Ezek a perlites és a bainites átalakulás kezdetét és végét jelző C görbék, mivel mind a kettő diffúziós átalakulás, tehát egy-egy C görbe jellemző rá és a martenzites átalakulás M_s és M_f vonala. Ehhez kapcsolódik még hipoeutektoidos acélok esetében a proeutektoidos ferrit, a hipereutektoidos acélok esetében a cementit kiválását jelző C görbe darab, amelyek az A_{c3} ill. az A_{cm} (cementit kiválás kezdete) vonalhoz tart.

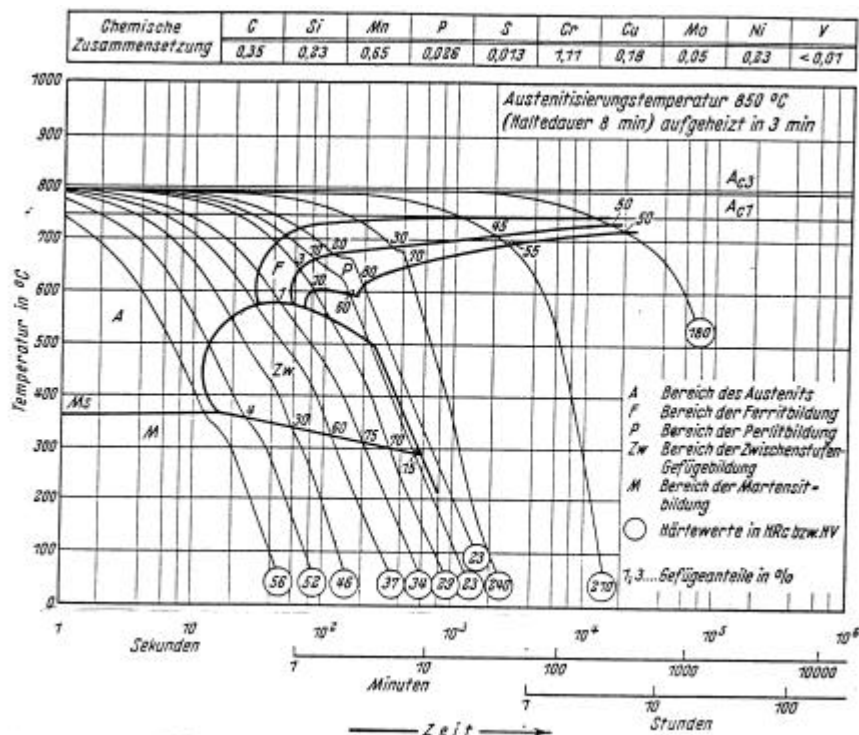
A különböző összetételű acélok átalakulási diagramjait mérésekkel veszik fel és különböző atlaszokban, kézikönyvekben publikálják. A 10. ábra a Max Planck Institut által kiadott hőkezelési atlaszból kivett 34 Cr 4 acél izotermikus diagramját, az 83. ábra pedig a folyamatos hűtésre érvényes diagramot mutatja.



10. ábra
Izotermikus átalakulási diagram[4]

A 11. és 12. ábrákon feltüntetett jelölések:

- A az ausztenit területe
- F a ferritképződés területe
- P a perlitképződés területe
- Zw a bainit képződés területe (a német irodalmakban a bainit elnevezés Zwischenstufengefüge)
- M a martenzitképződés területe
- O keménység HRC illetve HV értékben kifejezve
- 1,2, .. szövetlemek mennyisége %-ban



11. ábra
Folyamatos átalakulási diagram [4]

Az izotermikus átalakulási diagramból meghatározhatjuk az átalakulás megkezdéséhez és befejeződéséhez szükséges időt különböző hőmérsékleteken. Ezeket a diagramokat az izotermikus hőkezeléseknél (pl. izotermikus lágyítás használjuk). A diagramról csak izotermásan, azaz csak állandó átalakulási hőmérsékletre tartozó, vízszintes irányban feltüntetett időadatokat olvashatunk le!

A gyakorlatban a lehűtés ritkán izotermikus, leggyakrabban folyamatos, ezért szükséges meghatározni, a folyamatos lehűlésre érvényes átalakulási diagramokat is. Folyamatos hűtés közben az ausztenit ugyanazokká a szövetelemekké, tehát perlitté, bainitté, és martenzitté alakul.

Az ábrán meghatározható a diffúziós átalakulások C görbéjének orrpontját érintő lehűlési sebesség amely lényeges. Ez az a határsebesség, melynél gyorsabban hűtve martenzitet kapunk, azaz a **felső kritikus lehűlési sebesség**. Jelölése: $v_{kritikus, felső}$.

Megjegyzés: A diagramokon minden esetben fel kell tüntetni az adott acél pontos összetételét, az ausztenítés hőmérsékletét és a hőtartás idejét. Ezek az ausztenit szemcsenagyságát befolyásolják, ami a vonalak helyzetét kismértékben befolyásolja.

A folyamatos lehűlésre érvényes diagramot csak folyamatos lehűlési sebességek mentén lehet értelmezni!

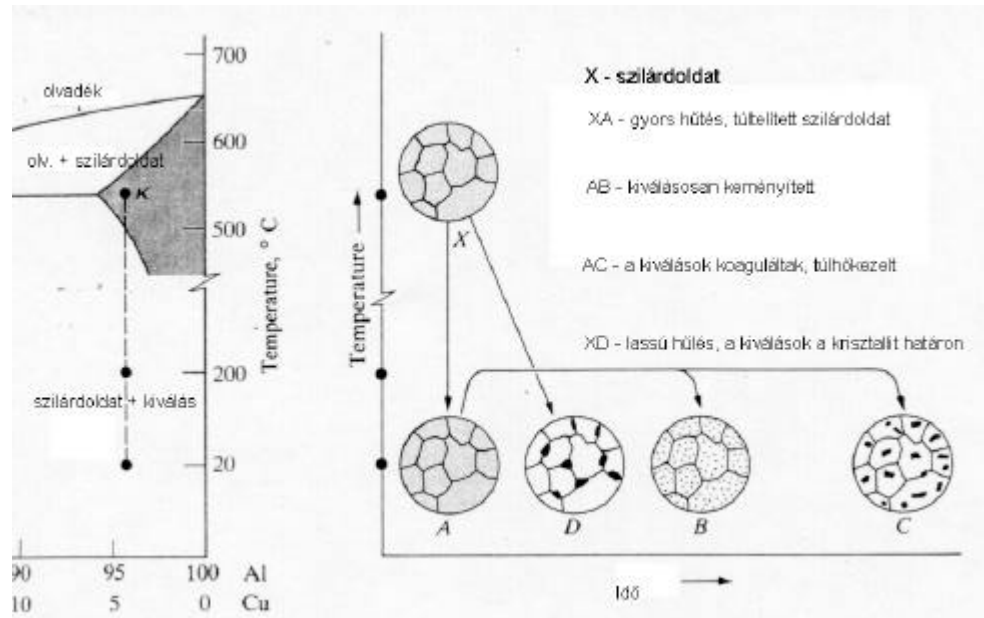
A folyamatos lehűlésre érvényes átalakulási diagramok a hőkezelés fontos segédeszközei.

1.2 Kiválásos keményedés

A kiválásos keményítés korlátozott szilárd oldatot képező ötvözetek esetében alkalmazzák. A folyamatot Al-Cu ötvözetrendszeren mutatjuk be. A Cu az alumíniummal szilárd oldatot alkot, az oldódás korlátozott, és a szilárd állapotban való kiválás vegyületének formájában történik.

A vegyületfázis egyensúlyi lehűtés esetén a krisztallithatáron, kedvezőtlen alakot felvéve válik ki. Kedvező a finom, egyenletesen elosztott kiválás. Ezt úgy érjük el, hogy a hőkezelés során **első lépésben oldatba visszük az ötvözt, majd gyors hűtéssel megakadályozzuk a kiválást. A túltelített szilárdoldatból a vegyület az öregbítés során nagyon finom formában válik ki.** A folyamatot a 12. ábra mutatja.

12. ábra



A kiválásos keményítés lényege.

2. A fémek tulajdonságainak megváltoztatási lehetőségei

A fémek tulajdonságait az összetételük, a szerkezetük és a feszültség állapotuk határozza meg.

Igen sok esetben szükség van a tulajdonságok megváltoztatására annak érdekében, hogy a felhasználási célnak leginkább megfelelő tulajdonsággal rendelkező szerkezeti anyagot nyerjük.

A tulajdonság megváltoztatás célja lehet

- a mechanikai tulajdonságok megváltoztatása
- fizikai tulajdonságok megváltoztatása stb.

A tulajdonság változtatási eljárások között kiemelt jelentősége van a szilárdság, illetve az azzal összefüggő terhelhetőség növelésének. A fémek esetében a szilárdság növelése lehetséges módszerek az :

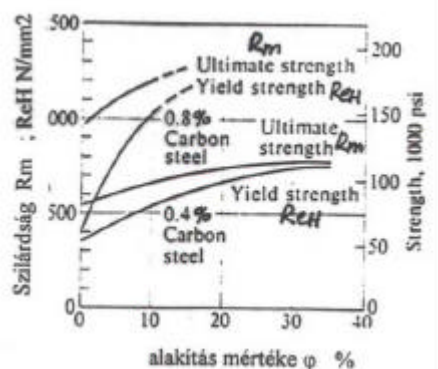
- ötvözés
- hidegalakítás (felkeményedés)
- hőkezelés
-

2.1 Ötvözés

A szerkezeti anyagok szilárdságnövelésének a leggyakrabban alkalmazott módszere az ötvözés. Az ötvöző elemek a fémekben szilárd oldatot, vagy vegyületet képezhetnek, de minden esetben növelik a szilárdságot. Az ötvözéshez hasonló módszerek a polimerek, kerámiák gyártásánál is megtalálhatók.

2.2 A hidegalakítás hatása (felkeményedés)

Ha egy fémet a folyáshatárnál nagyobb feszültséggel terheljük, maradó alakváltozást szenved. A maradó alakváltozás eredményeként, megváltozik a fém állapota azaz felkeményedik. Ez a szilárdsági jellemzők növekedését, az alakváltozási jellemzők csökkenését jelenti. (13. ábra)



13. ábra

A hidegalakítás hatása különböző C tartalmú acélokra

A felkeményedés a különböző fémeknél különböző, de minden fém esetében létezik, és lehetőség a szilárdság növelésére.

2.3 Hőkezelés

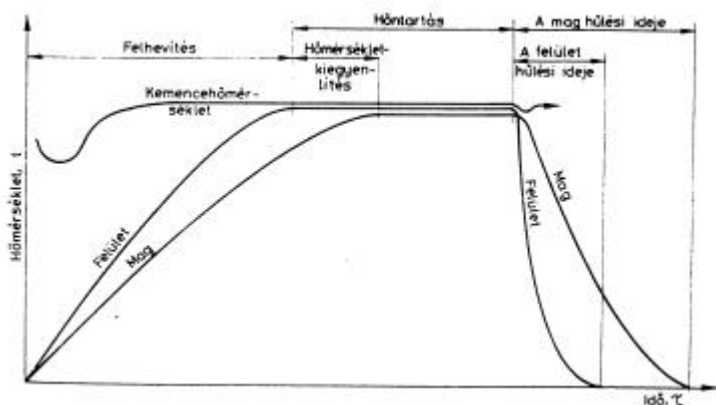
A hőkezelés egy tervszerűen megválasztott hőmérsékletváltoztatási folyamat, mely felhevítésből, hőntartásból és lehűtésből áll, és célja a munkadarab szövetszerkezetének illetve feszültségállapotának tudatos megváltoztatása, az előírt tulajdonságok elérése céljából.

A hőkezelés alapja lehet:

- az allotróp átalakulások befolyásolása, az eutektoidos folyamat egyensúlytól való eltérítése
- a szilárd állapotban végbemenő oldódás és kiválás befolyásolása
- a diffúzió, a szilárd állapotban bekövetkező oldódás, ötvözés tudatos kihasználása

Hőkezelés közben a szerkezeti anyag szilárd halmazállapotú, részlegesen sem olvad meg, tehát a hőkezelést csak a szolidusznál kisebb hőmérsékleten végezzük!

A hőkezelés idő - hőmérséklet diagramját a 14. ábra mutatja.



14. ábra
A hőkezelések
idő-hőmérséklet diagramja

A hőkezelési folyamatok során a darab és a környezet között hőcsere van. A hőátadási együttható a tárgy és a környezet között az az időegység alatt felületegységenként kilépő hőmennyiség, amely a felületre merőlegesen belép a darabba vagy kilép a darabból. A hőcsere megvalósulhat:

- hővezetéssel,
- hőáramlással
- hősugárzással

Az időegységenként átadódó hőmennyiség függ a darab és a környezet hőmérséklet különbségétől. Mivel ez a különbség idővel egyre kisebb a felmelegedés vagy a lehűlés sebessége exponenciális görbe szerint változik.

A **hővezetés** szilárd testekre jellemző, a hőcsere a szomszédos nyugalomban lévő részecskék között megy végbe. Függ a darab anyagának hővezető képességétől. A hővezetőképeség a szénfémek esetében a legnagyobb. Az ötvözők a hővezetőképeségét csökkentik. Természetesen befolyásolja az anyag állapota is és nem utolsósorban a hőmérséklet.

A **hőáramlás** során a gáz vagy cseppfolyós részecskék áramolása útján jön létre a hőcsere. Az áramlás lehet szabad vagy kényszeráramlás. A kényszeráramlás esetén jóval nagyobb a hőátadás.

A **hősugárzás** olyan hőátadás ahol a darab valamely test által kisugárzott energiát nyeli el. Mivel a folyamat energia hordozó nélkül megy végbe a hő ezen a módon vákuumban is terjed.

A hőkezelő berendezésben (kemencében) a darabok elsősorban hőáramlás és sugárzás útján melegsznek fel. A 14. ábra alapján láthatjuk, hogy a felhevítés során a darab felületének és belsejének hőmérséklete eltérő. Ez a különbség belső feszültségekhez, kialakulásához vezethet. A túl gyors hevítés hatására kialakuló feszültségek a nagyobb hőmérsékleten kisebb szilárdságú anyag repedését okozhatják.

A **felhevítés** lehet:

- folyamatos
- szakaszos (lépcsőzetes) rossz hővezető anyagok esetén

A **hőntartás** a hőkezelési hőmérsékleten tartást jelenti. Ez alatt átalakulások, diffúziós folyamatok mennek végbe

A **lehűtés** az izzítás hőmérsékletéről rendszerint szobahőmérsékletre való hűtés. A lehűtés közben általában fázisátalakulások mennek végbe. A lehűtés az előírt szövetszerkezetet biztosító technológiától függően lehet:

- gyors (edző, rögzítő hatású)
- normál (normalizáló hatású)
- lassú (lágyító hatású)

A lehűlés sebessége elsősorban a hűtőközeg hővezető képességétől függ. Legkisebb a levegő utána az olaj, sóolvadékok, vizes emulziók és a víz hűtőképessége. A hűtés intenzitása a közeg mozgatásával, áramoltatásával fokozható. A hűlési viszonyokat természetesen befolyásolja a közeg hőmérséklete, a munkadarab anyaga, alakja, felület-térfogat aránya stb. Gázok pl. nitrogén esetében lényeges a nyomás is. A nyomás növelésével a hűtés intenzitása fokozható.

A hőkezelési műveletek során a kemence atmoszféra és a darab között vegyi folyamatok is lejátszódnak. Ezek lehetnek:

- Oxidáció
- Dekarbonizáció
- Tudatos összetétel változtatás (termokémiai kezelések)

Az **oxidáció** a hőmérséklet növelésével rohamosan gyorsul. A felületen 200 - 300 °C fölött vékony különböző színű oxidhártya képződik (futtatási színek), de 600 °C fölött már vastagabb rideg, oxidhártya keletkezik (reveréteg). A reveréteg kialakulásban fontos szerepe van az időnek is.

A **dekarbonizáció**, elszéntelenedés 700 °C fölött következhet be. A darab felületéből a C a környezetbe vándorol. A dekarbonizáció lehet részleges vagy teljes. Következménye, hogy a darab felületén a C tartalom lecsökken és nem edződik megfelelő keménységűre, továbbá a kisebb szilárdságú, húzófeszültséggel terhelt rétegben nő a kőszörülési repedések megjelenésének lehetősége. Különösen veszélyes ez a nagy C tartalmú szerszámacélok esetében, ahol a kis C tartalmú dekarbonizálódott réteg nem edzhető megfelelő keménységűre.

A 14. ábrán látható, hogy a hőkezelési folyamatban a lehűlés során is eltérő sebességgel hűl a munkadarab felülete és magja. Ez az eltérés függ a lehűtés módjától, elsősorban a hűtőközegetől, a darab anyagától, méretétől, és **hőkezelési hibák** (feszültség, elhúzóadás, repedés) kialakulásához vezethet.

Fontos megjegyezni, hogy a hőkezelési **méretváltozások, vetemedés** függ az alakítás irányától, a kovácsolással kialakított szálrendeződéstől továbbá, hogy a darab anyagának szilárdsága a kezelési hőmérsékleteken kicsi, ezért a nem megfelelően "alátámasztott" darabok a saját súlyuk hatására is vetemedhetnek. Tengelyek függesztve pl.! A hőkezelési méretváltozások egyengetéssel vagy a hőkezelést követő megmunkálással megszüntethetők, tehát javítható hibák, de a tömegtermelésben jelentős többletköltséget okoznak.

Ha a keletkező feszültségek meghaladják az anyag szilárdságát **repedések**, tehát nem javítható hibák keletkeznek. A repedés lehet a túl gyors felhevítés (a darab felülete és a hideg mag közötti méretkülönbség a magban húzó a kéregben nyomó feszültséget okoz) hatására kialakuló **magrepedés**, vagy a darab felületén gyors hűtés hatására (a felületen húzófeszültség keletkezik) kialakuló hűtési elsősorban **edzési repedés**.

A repedések kialakulásának lehetősége a nagyobb C tartalmú, ötvözt, tagolt daraboknál nagyobb. A gyakorlatban ezért hevítéskor az optimális hevítési sebességet, vagy lépcsőzetes

felhevítést, hűtéskor pedig az adott cél elérését biztosító legenyhébb hűtőközeget alkalmazzuk!!

2.3.1. Vasötvözetek hőkezelése

A hőkezelések csoportosítása

A hőkezelő eljárások csoportosítására legáltalánosabban elfogadott az, hogy az előírt szövetszerkezetet, és ezzel az előírt tulajdonságokat a darab, mely részén kívánjuk kialakítani. Így megkülönböztetünk:

- teljes keresztmetszetre kiterjedő és
- felületi hőkezeléseket.

Teljes keresztmetszetre kiterjedő hőkezelések

A teljes keresztmetszetre kiterjedő hőkezelések célja a munkadarab megkívánt tulajdonságainak (leglágább állapot, egyenletes, finom szemcseszerkezet, keménység, szívósság stb.) kialakítása a teljes keresztmetszetben.

A kezelések lehetnek:

- lágyító és egyneműsítő
- keménységet fokozó
- szívósságot fokozó

Az anyagokra vonatkozó anyagszabványok a legfontosabb hőkezelések adatait tartalmazzák.

Lágyító és egyneműsítő hőkezelések

A lágyító és egyneműsítő eljárások célja a lágy, homogén, finomszemcsés állapot biztosítása. Ebbe a csoportba tartozó hőkezeléseket annak megfelelően csoportosítjuk tovább, hogy a hőkezelés során történik-e átkristályosodás, azaz $\gamma \Leftrightarrow \alpha$ átalakulás vagy nem, azaz a hőmérséklet A_{c3} -nál magasabb, vagy az A_{c1} alatt marad.

- átkristályosodással nem járó hőkezelések $T < A_{c1}$
- teljes átkristályosodással járó kezelések $T > A_{c3}$

Átkristályosodással nem járó hőkezelések

Feszültségcsökkentés

Célja az anyagban lévő belső feszültségek csökkentése vagy megszüntetése.

A belső feszültségek az öntést, kovácsolást, hengerlést és hegesztést, követő egyenlőtlen hűtés, valamint hidegalakítás (hajlítás, egyengetés, nagyoló forgácsolás) során keletkeznek az acélokból. A feszültségcsökkentésnél a munkadarabot 550-650 ° C hőmérsékleten 2-6 órán át hűntartjuk, majd kemencével együtt hűtjük.

A feszültségcsökkenés alapja az, hogy a magasabb hőmérsékleten a folyáshatár lecsökken, és a belső feszültségek maradó alakváltozássá alakulva leépülnek.

Lágyítás

A lágyítás célja az acél forgácsolhatóságának, alakíthatóságának biztosítása. Ezt a módszert általában a 0,3 %-nál nagyobb C tartalmú ötvöztelen valamint ötvözött acéloknál alkalmazzák. Az ennél kisebb C tartalmú acélok ugyanis ezen kezelés hatására túl lágyak lesznek. A szerkezeti acélok (hipoeutektoidos $C < 0,8 \%$) szobahőmérsékleten ferrit perlit szerkezetűek. A ferrit lágy a lemezes perlit kemény vaskarbid és lágy ferrit lemezekből épül fel. A lemezes perlit forgácsoláskor a kemény karbidlemezeket el kell vágni, alakításkor össze kell törni. A lágyítás célja a lemezes perlites szerkezetet szemcsés perlitté alakítani. A **szemcsés perlit** ferrites alapba ágyazott karbidrögös szerkezetet jelent. A szemcsés perlitben a cementit rögök kitérnek a kés éle elől, illetve alakításkor a lágy ferrites alap könnyebben alakítható. A folyamat lényegét a 15. ábra mutatja.



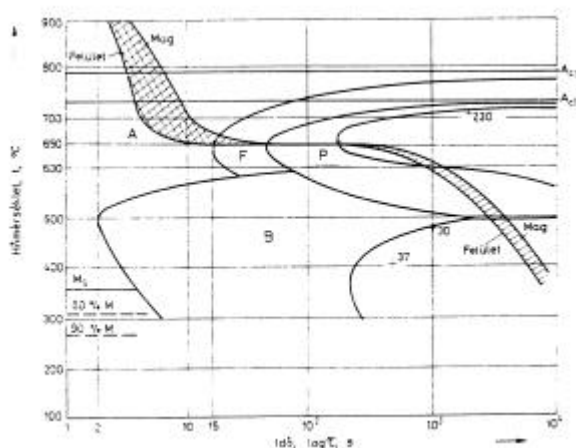
15. ábra
A lemezes perlit szemcsésedésének vázlata [16]

Lágyításkor az acélt A_{c1} -nél $10-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -al kisebb hőmérsékletre ($680-700\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra) hevítjük, itt hőntartjuk, majd kemencében hűtjük. A hőntartás időtartama az acél összetételétől függ, ötvöztelen acélok esetében 2-3 óra, ötvözötteknél pl. szerszámacélok 4-5 óra. A lágyítás Brinell keménységméréssel ellenőrizhető, a keménységértékeket az anyagszabványok tartalmazzák.

Átkristályosítással járó lágyító és egyenmûsítő eljárások

Izotermikus lágyítás

A lágyítás nagy idõszükségletének rövidítésére, továbbá a tömegmegmunkálásra alkalmas egyenletes keménységû darabok biztosítása a kezelés célja. A 16. ábrán nyomon követhetjük a folyamatot. Az ausztenitesítés után izotermikusan a megkívánt keménységet biztosító hőmérsékletre hűtjük a darabot. Az adott hőmérsékleten addig tartjuk, amíg az átalakulás befejeződik. A keménység szűk tartományra beállítható. A keletkező szövetszerkezet az összetételétől és a hőmérséklettől függő mennyiségű ferrit és lemezes perlit. Az ellenőrzés keménységméréssel történik.



16. ábra
Izotermikus lágyítás [16]

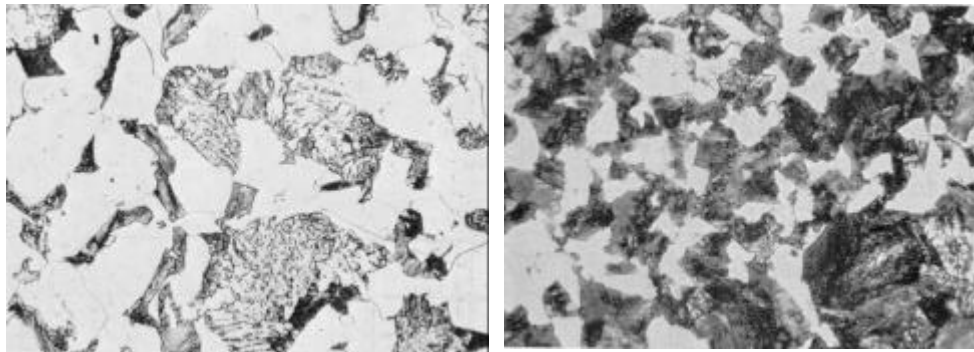
Normalizálás

Célja a melegen alakított, hegesztett, öntött acélok túlhevített, durvaszemcsés, egyenlőtlen szemcseszerkezetének finomítása, a mechanikai tulajdonságok, sok esetben az edzhetőség javítása. A kis C tartalmú acélokat forgácsoló megmunkáláshoz pl. fogazás, bordamarás, üregelés normalizálással teszik forgácsolhatóvá.

A normalizálás ausztenitesítésből, majd 5-10 perces hõntartás után nyugodt levegõn való lehûtésbõl áll. A keletkezõ szövetszerkezet a C tartalomtól függõen **ferrit, lemezes perlit** vagy **lemezes perlit és szekunder cementit**.

A normalizált acélok mechanikai jellemzõi a szelvényátmérõtõl függnek! Ellenõrzése keménységméréssel történik.

A 17. ábra betétben edzhetõ és nemesíthetõ acélok ($C=0,22\%$ és $C=0,35\%$) normalizált szövetét mutatja.



17. ábra

**Keménységet
fokozó
hőkezelések**

A keménységet növelõ eljárások célja az acél legnagyobb keménységének biztosítása. Az acél martenzites állapotban a legkeményebb. A martenzit úgy érhetõ el, hogy az acélt homogén ausztenites állapotból a felsõ kritikus lehûtési sebességnél gyorsabban hûtjük. Ezt a mûveletet, mint hőkezelést edzésnek nevezzük. Tehát **az edzés célja a martenzites szövetszerkezet biztosítása!** Az edzést mint hőkezelést szerszámok kezelésére használják, amelyek nagy keménységgel és kopásállósággal kell, hogy rendelkezzenek. Az edzés a kemény kérget biztosító felületi hőkezelések része is pl. betétedzés, indukciós edzés stb.)

Az acél edzhetõsége, átedzhetõsége

Az acélnek azt a tulajdonságát, hogy ausztenites állapotból v_{kf} -nél nagyobb sebességgel hûtve martenzitessé tehetõ az acél **edzhetõségének** nevezzük.

Az edzhetõség feltételei:

1. A szövetszerkezet a hûtés megkezdésekor legyen ausztenites.

Hipoeutektoidos acéloknál: $A_{c3} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Eutektoidos acéloknál: $A_{c1} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Hipereutektoidos acéloknál: $A_{c1} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,

2. A C tartalom legyen nagyobb, mint $0,2\%$

3. A lehûtési sebesség legyen nagyobb, mint a v_{kf} , hogy a szövetszerkezetben a martenzit mellett, ne jelenjen meg egyéb a martenzitnél lágyabb szövetelem (ferrit, perlit, bainit).

Az ausztenitet az M_s hőmérsékletig kell $v > v_{kf}$ sebességgel hûtteni, hogy elkerüljük a perlites, vagy bainites átalakulást. Ettõl kezdve bármilyen, de **folyamatos lehûtés** szükséges, ahhoz, hogy az átalakulás befejezõdjék. A darab belseje mindig lassabban hûl, mint a felület. Az eltérés annál nagyobb, minél vastagabb a darab, és minél kisebb az anyag hővezetõ képessége illetve minél kisebb a hûtõközeg hõelvonó képessége. Ez az oka annak, hogy nem érhetjük el tetszõleges keresztmetszetben a martenzites állapotot. Értelmeznünk kell tehát az **átedzhetõséget**.

Az acél átedzhetõsége

Az átedzhetõség úgy érthetõ meg, hogy elképzeljük, hogy amíg a darab átmérõje egy bizonyos értéknél kisebb a darab közepén is tudjuk biztosítani a $v > v_{kf}$ feltételt tehát a darab

martenzites lesz, ha azonban a darab közepén ez a feltétel nem teljesül, a mag nem edzhető teljesen martenzitesre.

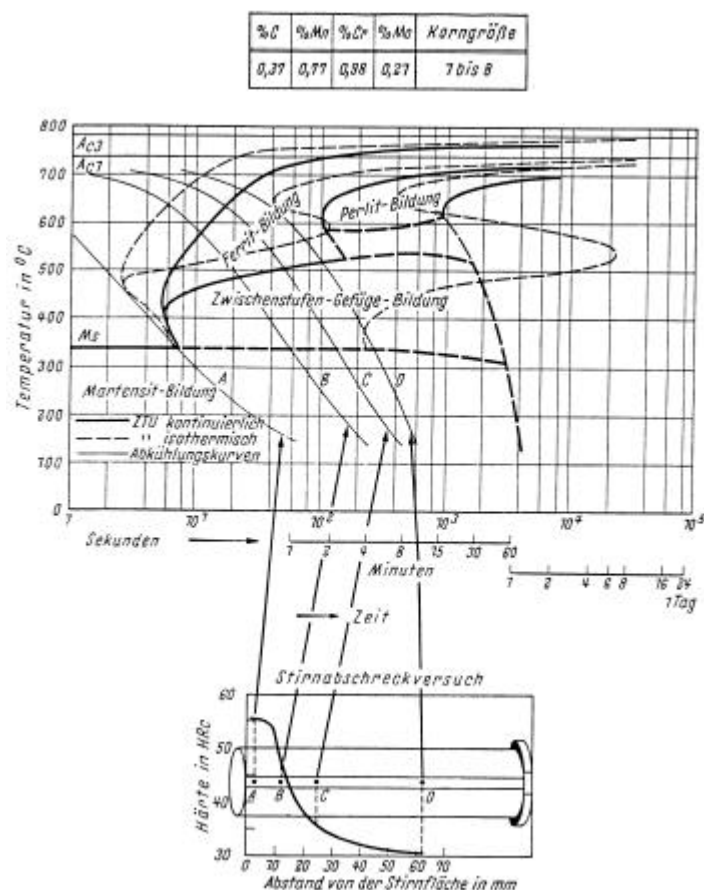
Adott összetételű acélnak, a teljes keresztmetszetben martenzitessé tehető keresztmetszetét **ideálisan átedződő**, vagy teljesen átedződő szelvényátmérőnek nevezzük.

A közepén 50 %-ban martenzitesen, 50 %-ban perlit, bainitesen átalakult szelvény, pedig **átedződő szelvényátmérő**. (DI)

Az átedződő szelvényátmérő mindig nagyobb, mint az ideálisan átedződő! Ismerete nagyon fontos, meghatározása kísérlettel vagy számítással történik.

Az edzhetőség vizsgálata véglapedző (Jominy) próbával (MSZ 9770:1991)

A szabványos próbatestet megfelelő kemencében edzési hőmérsékletre hevítjük. (Megjegyzés vannak indukciós hevítéssel működő vizsgáló berendezések ahol próbatest hevítése indukciós hevítéssel történik. Ebben az esetben, mivel az ausztenitesedés körülményei mások, a meghatározott értékek eltérhetnek a kemencében hevített és lehűtött darabokhoz képest.). A darabot hűtőtartás után készülékben a véglapját érő víz sugárral lehűtjük. A darab véglapja nagyon gyorsan hűl, attól távolodva a lehűlési sebesség csökken. (18. ábra)



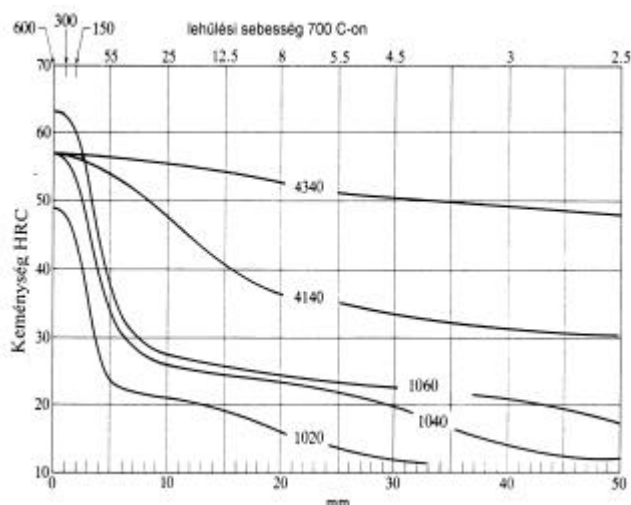
18. ábra

A Jominy próbatest lehűlése és a kialakuló szövet közötti kapcsolat [4]

A próbatest edződéséről legegyszerűbben keménységméréssel győződhetünk meg. A keménységméréshez a próbatest palástján két egymással párhuzamos síkot alakítunk ki köszörüléssel. A kialakított felületen HRC keménységet mérünk a véglaptól kiindulva.

A keménységmérések eredményét a véglaptól mért távolság (d) függvényében ábrázolva a Jominy görbét kapjuk. A 19. ábra ötvöztelen és ötvözött acélok Jominy görbéit mutatja. A görbe kezdeti szakasza azt a legnagyobb keménységet mutatja, amelyre az acél edzhető. Az ábrán jól látható, hogy egy acél esetében az edzéssel elérhető keménység elsősorban a C

tartalomtól függ. Megfigyelhető továbbá, hogy az ötvözőelemek növelik az átedződő szelvényátmérő, mivel a diffúziós átalakulásokra jellemző C görbéket jobbra tolják.



19. ábra
Különböző C tartalmú ötvöztelen és ötvözött acélok Jominy görbéi[7]

Jelölés	C%	Az ábrán alkalmazott jelölések			
		Mn%	Ni%	Cr%	Mo%
SAE J404					
1020	0,20	0,90	0,01	-	-
1040	0,39	0,89	0,01	-	-
1060	0,62	0,81	0,02	-	-
4140	0,38	0,79	0,01	1,01	0,22
4340	0,40	0,75	1,71	0,77	0,30

Az edzhetőség meghatározása számítással
(SAE J406 és ASTM A 255 –95 alapján)

A martenzit képződés feltétele, mint ismeretes, hogy az ausztenitet a felső kritikus lehűlési sebességnél gyorsabban kell hűteni. A felső kritikus lehűlési sebesség a folyamatos átalakulási diagram (C görbe) Orr pontjához húzott érintő sebesség. A C görbék helyzetét az ausztenit szemcsenagysága (izzítás sebessége, hőmérséklete, a hõntartás ideje) és az acél összetétele határozza meg. A karbon és az ötvözõ elemek (kivétel csak a Co) a C görbéket jobbra tolják ezzel csökkentve a felső kritikus lehűlési sebességet. Az ötvözõ elemek hatása különbözõ. A szabvány az egyes elemekre a mennyiségtõl függõen szorzótényezõket ad meg, amelyek ismeretében az átedzõdõ szelvényátmérõ kiszámolható. A szabványok 7-es ausztenit szemnagyságra vonatkoznak. Abban az esetben ha az acél szemcsenagysága ettõl eltér a meghatározott értéket korrigálni kell. ($DI \times$ szorzó tényezõ)

Edzés

Célja a martenzites szövetszerkezet, ezzel a legnagyobb keménység biztosítása.

Az edzés hőmérsékletének megválasztásakor az alábbiakat kell figyelembe venni:

Hipoeutektoidos acéloknál: $A_{c3} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Eutektoidos acéloknál: $A_{c1} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Hipereutektoidos acéloknál: $A_{c1} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,

Az egyes acélfajták edzési hőmérsékletét a vonatkozó anyagszabványok tartalmazzák.

A hõntartási idõ: a darab méreteitõl függ, a lehûtés a $v > v_{kf}$ feltételt teljesítõ víz, vizes emulzió vagy olaj, szerszámacélok esetében sófürdõ.

Az edzett acél kemény, rideg, szerkezeti anyagként nem használható, ezért minden esetben szükség van egy újabb kezelésre ez a **megeresztés**. A megeresztés hőmérséklete általában $180 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, ideje legalább fél illetve egy óra. A kis hőmérsékletû megeresztés az acél ridegségét csökkenti a keménység jelentéktelen csökkenése mellett. Az edzés keménységméréssel ellenõrizhetõ!

Szívósságot fokozó hőkezelések

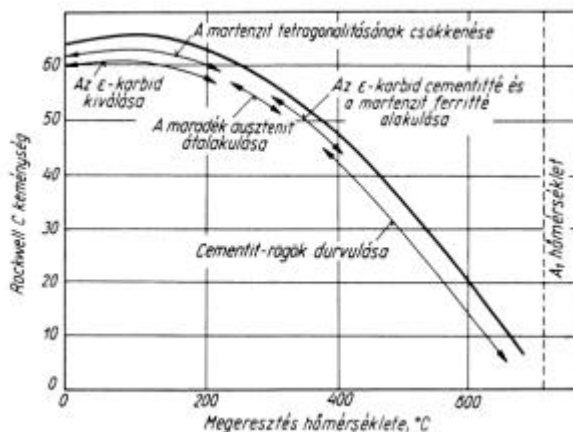
A szívósság nagyon fontos jellemzője a szerkezeti anyagoknak. A szívósság egyik tényezője a szilárdság a másik az alakváltozó képesség. A szívósság a legnagyobb szilárdság melletti legnagyobb alakváltozó képességet jelenti. .

A szívósság az ütőmunkával jellemezhető (KV; KU). A szívósság annál nagyobb, minél finomabb és egyenletesebb a szerkezet. Az acélok legszívósabb állapotát biztosító hőkezelés a nemesítés.

Nemesítés

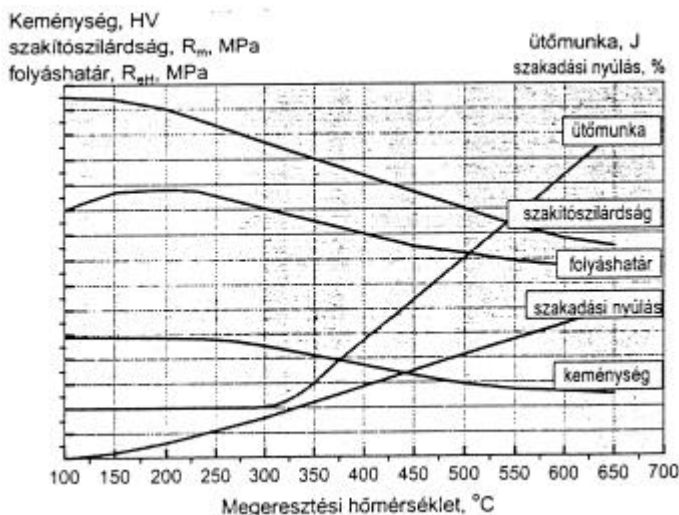
A nemesítés = edzés + nagyhőmérsékletű megeresztés.

A megeresztés során lejátszódó folyamatokat a 20. ábrán követhetjük.



20. ábra
Ötvöztelen acélok megeresztése során
lejátszódó folyamatok

A nagyhőmérsékletű megeresztés során kialakuló szövetszerkezet a szferoidit, amely ferrites alapba ágyazott igen finom karbid rögöket jelent. A nemesítésre vonatkozó adatokat (edzés és megeresztés hőmérséklete, hűtőközeg) az anyagszabványok tartalmazzák. A 21. ábra az ötvöztelen vagy gyengén ötvözött acélok mechanikai tulajdonságainak változását mutatja a megeresztési hőmérséklet függvényében.



21. ábra
Acélok mechanikai
tulajdonságainak változása a
megeresztési hőmérséklet
függvényében. [17]

Bizonyos esetekben (elsősorban Cr-al, Mn-al ötvözött acélok) a nemesítés második lépcsőjét a megeresztést követő lassú (levegő) hűtés hatására az acél rideggé válik. A jelenség a megeresztési ridegség, gyors hűtéssel (víz vagy olaj) akadályozhatjuk meg.

A nemesítést elsősorban dinamikus, vagy ismételt igénybevételnek kitett alkatrészek anyagának kezelésére használják.

Felületi hőkezelések

A gyakorlatban sokszor merül fel az az igény, hogy az alkatrész a kopásnak kitett felületén legyen kemény, kopásálló, a magja pedig legyen szívós. A járműiparból vett példával élve egy állócsap vagy gömbcsap legyen hosszú ideig mérettartó (kopásálló), de egy ütközés során ne törjön el, hanem deformálódjon, de maradjon a helyén. A felületi hőkezeléseket nagyon gyakran alkalmazzuk fogaskerekek kezelésére is, ahol a felületnek a kopásállóság, fárasztó igénybevétellel szembeni ellenállás miatt keménynek a magnak pedig szívósnak kell lenni. Ez az elvárás a **kemény kopásálló felület (kéreg) és szívós mag** felületi edzéssel vagy egyidejűleg alkalmazott hő-és vegyi hatásokkal érhető el. Így megkülönböztetünk:

- összetélt nem változtató felületi edzéseket
- összetélt változtató kérgesítő eljárásokat

A felületi hőkezelések áttekintése az edzhetőség feltételei alapján

A felületi edzések alapelve az, hogy az edzéshez szükséges 3 feltétel közül mindhárom, csak a kéregben teljesül

1. ausztenitesítés (hevítés $T > A_{c3}$)
2. hűtés v_{kf} -nél nagyobb sebességgel
3. $C > 0,2\%$

⇒ Ha az **1. feltétel** nem teljesül a magban, tehát a $C > 0,2\%$ összetételű anyagot csak a felületen hevítjük fel, és hűtjük $v > v_{kf}$ sebességgel. Ez a **felületi edzés**, pl. láng vagy indukciós edzés.

⇒ Ha a **3. feltétel** nem teljesül mert $C < 0,2\%$, akkor a felületen megnöveljük a C tartalmat, és azután edzünk. Ez a **betétedzés**.

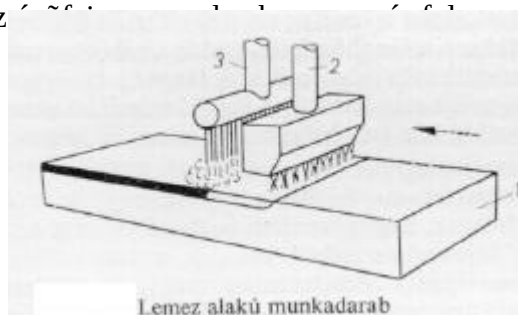
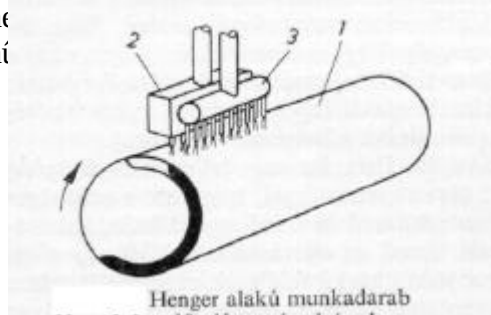
A kitűzött célt úgy is elérhetjük, hogy a felületbe diffundáltatunk valamilyen elemet pl. N-t, vagy B-t, mely vegyületet képezve növeli a felületi keménységet

Az acél összetételét nem változtató felületi hőkezelések, felületi edzések

A felületi edzéseknél az acél felületét meghatározott mélységig $T > A_{c3}$ hőmérsékletre hevítik, és onnan a v_{kf} -nél gyorsabban hűtik. A kéregvastagságnak megfelelő mélységű hevítéshez rendkívül nagy hevítési sebességet ($500-1000\text{ }^\circ\text{C/sec}$) kell elérni, hogy a felületen nagy hőtorlódás keletkezzen. Ez csak nagy felületi teljesítménnyel lehetséges ($1000-10000\text{ W/cm}^2$). Eközben a mag hőmérséklete és szövetszerkezete nem változik. A nagy hőteljesítmény, a gyors hevítés acetilén-oxigén gázlánggal vagy indukciós hevítéssel valósítható meg.

Lángedzés

A lángedzés során a darab felületét nagyteljesítményű gázégőkkel hevítjük, majd vízzel hűtjük. A kéregvastagság 1.5 - 5 mm lehet. A technológia lehet **szakaszos** (a teljes felület hűtése után a következő szakaszra kerül a darab) vagy **áramló** (a darab folyamatosan mozog a hűtővíz áramlása mellett).



22. ábra
Lángedzés elve [16]

A hőmérsékleteloszlást a szelvényben az időegység alatt felvett teljesítmény és a darab hővezető képessége befolyásolja. Nagyobb hőmérsékletű lánggal (acetilén - oxigén a láng hőmérséklet kb. $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$) gyorsabb felmelegedés érhető el, és mivel kevesebb idő van a hő elvezetésére a kéreg vékonyabb lehet. A hűtés vízzel történik, melynek hűtőhatása műanyag bázisú adalékokkal szabályozható. A darabokat a kezelés után $150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os megeresztésnek kell alávetni.

Főleg kopásnak kitett alkatrészek felületi keménységének növelésére használjuk. Ilyen pl. nagyméretű fogas- és lánckerekek, kötélhornyok, tengelyek, eszterga szánvezetékek, csúszólapok, forgattyústengely csapok stb. A lángedzés annál gazdaságosabb, minél kisebb az edzendő felület az összfelülethez képest.

A lángedzés előnye, hogy egyszerű, olcsó, így kis darabszám esetén is gazdaságos lehet. Hátránya, hogy a kéregvastagság nem lehet kisebb, mint 1 mm és nem szabályozható pontosan.

Indukciós edzés

Az indukciós hevítés elvi alapja az, hogy egy váltóárammal átvárt vezető erőterébe helyezett acél a benne fellépő mágneses (hiszterézis) és villamos (örvényáram) veszteségek miatt felmelegszik. A hatékony felhevítés miatt a vezető (induktor tekercs) körül kell vegye a darabot. A jelenség frekvencia függő. Minél nagyobb a frekvencia annál kisebb a felmelegedő kéreg vastagsága (szkin effektus). A nagy hevítési sebesség és a szkinhatás együtt a felületben igen nagy hőtorlódást eredményez. A hűtés vízzel, vagy vizes oldattal történik. A hűtőközeg gyakran az induktor hűtésére szolgáló hűtővíz. A felhevített kéreg a hűtőközeg és a mag hőelvonása miatt gyorsan hűl.

Használatos frekvenciák:

- középfrekvencia $2,5 - 10\text{ kHz}$ $1 - 3\text{ mm}$ -nél vastagabb kéreghez
- nagyfrekvencia nagyobb 100 kHz a 3 mm -nél vékonyabb kéreghez

A darabokat az indukciós edzés után $150\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on meg kell eresztetni. A korszerű indukciós edző berendezésekben a megeresztés is induktor tekercsben történik.

Az indukciós edzés előnye, hogy gyors, revementes, pontosan szabályozható, automatizálható, mind a kéregvastagság, mind a kéregkifutás tekintetében.

Hátránya a nagy beruházási költség, mely csak nagy darabszám esetén teszi gazdaságossá.



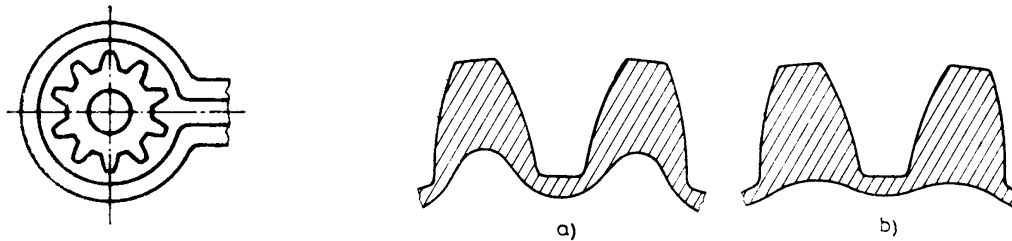
23. ábra
Indukciós edzés [16]

Az indukciós edzést elsősorban fogaskerek, bordástengelyek, gépjármű alkatrészek pl. vezérmű tengely bütykök, forgattyústengely csapok, kormánygömbcsapszeg stb. hőkezelésére alkalmazzák.

A fogaskerek kezelésére három módszer ismeretes. Ezek:

- Összfogedzés
- Fogankénti edzés
- Fogoldal edzés

Az **összfogedzés** (24. ábra) esetén az induktorba helyezett fogaskereket álló vagy forgó helyzetben edzési hőmérsékletre hevítjük és azután megfelelő hűtőközeggel leeddük. Ez a módszer a kisebb kerek edzésére alkalmas.

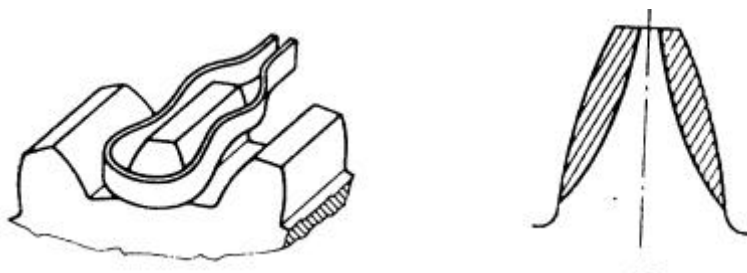


96. ábra

24. ábra Összfogedzés [16]

a. a kéreg nagyobb b. kisebb teljesítményű generátorral.

A **fogankénti edzés** (25. ábra) során az induktor csak egy fogat vesz körül. A darabot forgatni kell. Ebben az esetben a lábkörön nem keletkezik kéreg.



25. ábra

Fogankénti edzés elve és a kéreg lefutása [16]

A fogoldal edzés módszerével a fogaskerek fogait egyenként előtolással eddük. (26. ábra)



26. ábra

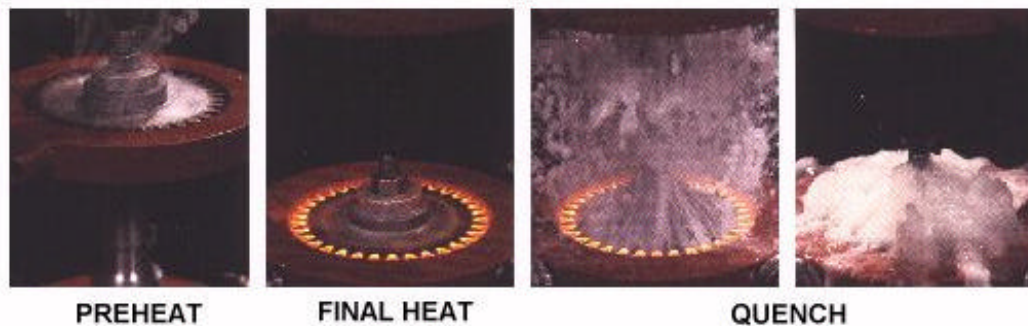
Fogoldal edzés és a kéreg [16]

Ez a módszer nagy igénybevételű fogaskerek kéregítésére alkalmas elsősorban.

A járműipar igen nagy mennyiségben igényli a fogaskereket ill. olyan alkatrészeket, amelyeknek kemény kéreggel és szívós maggal kell rendelkezni. A gyártási költségek

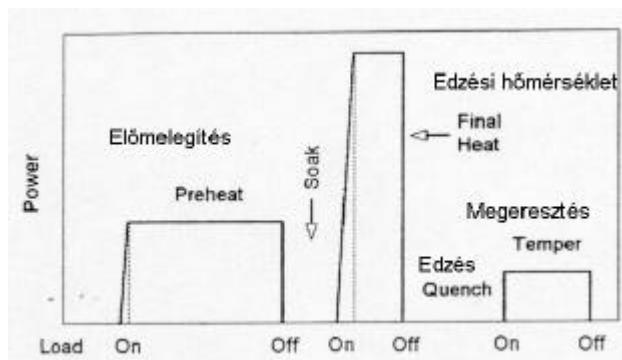
csökkentése érdekében minimalizálni, kell a felületi hőkezeléseket követő megmunkálásokat. Ennek feltétele, hogy a darabok méretváltozása a hőkezelés során minimális legyen és a minőség a lehető legegyszerűsebb legyen. Ennek az igen szigorú elvárásnak a teljesítésére dolgozták ki a kettős frekvenciás mikro impulzus *kontúr edzési eljárást*.

Contour hardening (Contour edzés)



Az eljárás lényege:

Az alkatrészt (pl. fogaskereket) egy induktorban a technológia által meghatározott hőmérsékletre előmelegítik. Az előmelegítést a darab méretétől, típusától függően 3-10 kHz középfrekvenciával és/vagy 30-450 kHz nagyfrekvenciával valósítják meg. A folyamatra jellemző teljesítmény-ciklusidő diagramot a 27. ábra mutatja.



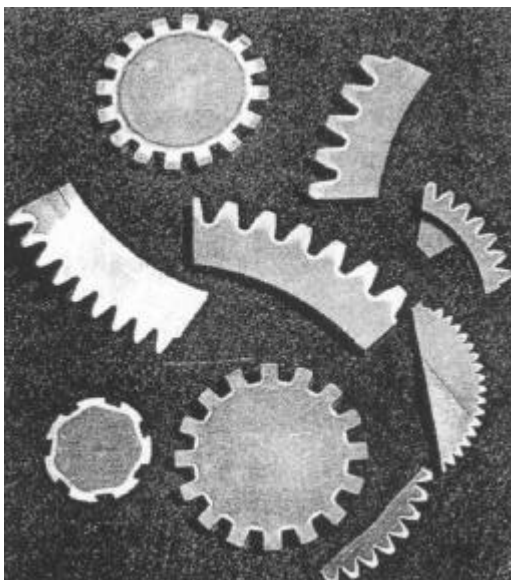
27. ábra

„Kettős-impulzus” indukciós edzés [21]

A teljes folyamat (előmelegítés, edzési hőmérsékletre hevítés és a megeresztés ugyanabban a nagyfrekvenciás tápegységgel táplált tekercsben történik. A 27. ábrán megfigyelhető, hogy az előmelegítés csökkentett teljesítménnyel, az edzési hőmérsékletre hevítés rövid ideig nagy teljesítménnyel, majd a gyors hűtést követő megeresztés ismét csökkentett teljesítménnyel történik.

Az előmelegítés a fogak egész tömegének az előmelegítését, ezzel az előírt hevítési mélységet biztosítja a fogárokból is ezzel lehetővé téve a tervezett metallurgiai eredmények

elérését és bizonyos anyagokban csökkenti a torzulást is. Továbbá az előmelegítés csökkenti a végső (edzési) hőmérsékletre hevítéshez szükséges energia mennyiséget, lehetővé teszi a végső hevítési fokozatban nagy teljesítményű rádiófrekvenciás (RF) áram alkalmazását, ami a fogak kontúrját követi. A 28. ábrán kontúr edzett darabok láthatók.



28. ábra

Kontúr edzett (contour hardening) darabokon kialakult kéreg [21]

Az indukciós edzésre nem minden edzhető acél alkalmas, ugyanis a darab anyagának mágneses permeabilitása 769 C°-on (Currie pont) 1-re csökken, ezzel jelentősen csökken az átmágnesezési veszteség. Ezen okok miatt a felhevülés lelassul, a "darabnak van ideje a hőt elvezetni". Indukciós edzésre a 0,35 %-nál nagyobb karbontartalmú acélok alkalmasak. Az ötvözőelemek javítják az edzhetőséget, csökkentik a szükséges hűtési sebességet és a repedésérzékenységet.

Az indukciós edzéssel kezelt darabokat a nagy magszilárdság biztosítása érdekében indukciós edzést megelőzően nemesíthetik.

Az összetélt változtató felületi hőkezelések

A termokémiai kezelések célja az acél felületén meghatározott mélységig valamilyen fémes vagy nemfémes elem koncentrációját megnövelni (a felület ötvözése), és így a kéreg tulajdonságát a kívánt módon megváltoztatni. Az eljárások célja lehet mechanikai-, hő-és vegyi hatásokkal szembeni ellenállás növelése. A legtöbb esetben azonban **a cél a felület kopásállóságának és a munkadarab kifáradással szembeni ellenállásának növelése a kemény kéreg és szívós mag biztosításával.**

A felület ötvözésére különféle termokémiai eljárások terjedtek el, amelyekkel leggyakrabban korbont és nitrogént, ritkábban bórt, krómot, alumíniumot, szilíciumot juttatunk diffúzió útján az anyag felületébe.

A kéreg vastagsága az eljárás jellegzetességétől, a darab méretétől függően betétedzés, nitrocementálás esetében kb. 0,1-2 mm, karbonitridálásnál kb. 20µm.

A felület ötvözéséhez szükséges elemet a darabot körülvevő közeg biztosítja. A közeg feladata, hogy a felülettel kölcsönhatásba lépve, azt valamilyen elemmel feldúsítsa.

A kölcsönhatás három részfolyamatra bontható:

1. Az ötvöző elemet atomos állapotban kell a felületre juttatni. Ez az atomos állapotú elem rendszerint **disszociáció** eredménye.
2. A közeg által atomos állapotban leadott elemnek meg kell tapadni az acél felületén. Ez a folyamat az **adszorpció**.
3. Az adszorbeált elemnek a felületi rétegbe kell vándorolni. Ez a **diffúzió** révén lehetséges.

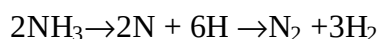
Az összetélt változtató termokémiai kezelések áttekintése

Nitridálás, karbonitridálás

A **nitridálás** célja az acél felületébe nitrogén bejuttatása, amely a felületen kemény kopásálló, korrózióálló, a kifáradással szemben ellenálló kérget hoz létre anélkül, hogy azt edzeni kellene. A darabot a kezelés megkezdése előtt a legtöbb esetben nemesítik, így a mag szívós lesz. A **karbonitridálás** esetében a nitrogénnel egyidejűleg karbon is diffundál a felületbe, aminek hatására a nitrideken kívül kemény karbonitridek is keletkeznek.

A nitridálás és a karbonitridálás folyamata és jellemzői:

A nitridáló közeg általában ammónia, és mivel a nitrogén a ferritben jobban oldódik a kezelés hőmérséklete 500-600 C°. A kemencétérbe bevezetett ammónia az acél felületén alkotóira bomlik



A nitrogén egy része a kezelés pillanatában az acél felületén megtapad, majd azon átáramlik és tovább diffundál, a másik része megtapadni nem képes molekulává egyesül. Ezért a kezelés alatt folyamatos ammónia áramlást kell biztosítani.

A kéreg vastagsága, keménysége, kifáradási határa az acél összetételétől, előzetes hőkezelésétől, a munkadarab felületének állapotától és a nitridálás jellemzőitől függ.

Gáznitridálásra nitridképző ötvözőkkel ötvözött acélokat használunk. Ilyen ötvözők a króm, az alumínium a molibdén és a vanádium (nitridálható szerkezeti acélok). Az Al-al ötvözött acélok elérhető felületi keménysége 67 HRC. Az ilyen kemény kéreg kevésbé szívós, dinamikus, lökészerű igénybevétel hatására könnyen megreped, leválik. Dinamikus igénybevételnek kitett darabok esetében Mo, V és Al ötvöztetésű acélokat választunk, ahol az elérhető keménység 62-67 HRC.

A nitridálást megelőző nemesítés hőmérsékletét úgy kell megválasztani, hogy az nagyobb legyen, mint a nitridálásé. A darabokat a kezelés előtt gondosan zsírtalanítani kell.

A nitridált kéreg vastagsága 0,2-0,8 mm, amelynek eléréséhez szükséges hőntartási idő 40-60 óra. A nitrogén diffúziója következtében a darab duzzad. A kéreg szerkezete nem egységes. A felületen egy néhány mikron vastagságú vegyületi réteg "fehér kéreg" található. Ezt a vegyületi réteget vas és ötvöző nitridek alkotják. Alatta a befelé haladó nitrogén diffúziós frontnak megfelelően, élesen elválasztva a diffúziós zóna van. A diffúziós zónában a nitridek túlnyomórészt a krisztallithatáron vékony nitrid rostok alakjában találhatók. A kéreg keménysége 1000-1200 HV.

A gyakorlatban elterjedtebben alkalmazott a *karbonitridálás (nikotrálás)*, ahol a közeg 50 % ammónia és 50 % cementáló gáz. A kezelés hőmérséklete 570 C° ideje 3-4 óra. A kéreg két részből áll: 10-20µm vastagságú vegyületi kéreg (nitridek), alatta 0,3-0,5 mm nitrogénben dús diffúziós zóna.

A nitridálást, nikotrálást koptató hatásnak és ismételt igénybevételnek kitett alkatrészeknél használják. pl. motor főtengelyek, szelepemelő himba, vezérmű tengelyek, fogaskerekek, kipufogó szelepek, bordástengelyek stb. A vegyületi zóna 300 C°-ig még szárazfutás esetén is kopásálló. A diffúziós réteg nagy nitrogéntartalmú és a martenzites kéreghez hasonlóan kopásálló, annak ellenére, hogy a keménysége kisebb.

Betétedzés

Mint a felületi hőkezeléseknél általában a betétedzésnél is a cél a kemény, kopásálló, ismételt igénybevételnek jól ellenálló kéreg és a szívós mag biztosítása. A betétedzést jelentős nyomó-, hajlító- és csavaró igénybevétellel terhelt, nagy fajlagos felületi terheléseket átvivő alkatrészek (fogaskerekek, csapszeg stb.) kezelésére használják.

A betétedzés lényege, hogy a kis C tartalmú, nagyon szívós acélok felületi rétegét karbonnal dúsítják, majd az így módon a kérgében edzhetővé vált darabot edzik.

A betétedzés = cementálás + edzés

Cementálni elsősorban gázhalmazállapotú, esetleg folyékony vagy szilárd aktív kARBONT leadni képes közegben lehet.

Cementálás

A cementálás két részfolyamatból áll. A karbon atomok a cementáló közegből az ott lejátszódó reakciók következményeként az acél felületére mennek, ott megtapadnak, majd diffundálnak az anyag belsejébe.

Az első részfolyamatban nagy szerepe van **a gáz C_p karbonpotenciáljának, karbontleadó képességének és a b karbonátmeneti számnak**. A második részfolyamatban döntő a **D diffúziós tényező** szerepe.

A gáz adott karbonpotenciálja és az acél felületének karbontartalma között a kinetikai feltételektől függően rövidebb-hosszabb idő alatt egyensúly áll be. A felület karbontartalmának megnövekedése potenciál különbséget idéz elő a munkadarab felülete és annak belseje között, ami a C atomok befelé irányuló diffúziós mozgásához vezet. Ha a gázközezből elegendő utánpótlást kap az acél felületétől befelé diffundáló atomos karbon, akkor bizonyos idő múlva dinamikus egyensúlyi állapot alakul ki a gázközeg karbonpotenciája és az acél felületi karbontartalma között.

A cementált kéreg növekedését az acél felületén kialakult egyensúlyi viszonyok és a hőmérséklet határozza meg. Azonos körülmények között cementálva azonos karbontartalmú betétben edzhető acélban a kéregnövekedés sebessége különböző lehet. Az eltérést főleg a különböző **szénaktivitás** okozza, amelyet az acél vegyi összetétele határoz meg.

A cementálás vegyi reakciójának egyidejűleg olyan termékei is vannak, amelyek dekarbonizáló hatásúak. A folyamat olyan állapotra törekszik amelyben a cementáló és dekarbonizáló hatás lassan egyensúlyba kerül. Az acéloknak azt a karbontartalmát is karbonpotenciálnak nevezik amely ennél az egyensúlynál beáll.

A karbonpotenciál azt fejezi ki, hogy a közeg adott hőmérsékleten a munkadarab felületének karbontartalmát milyen mértékben növeli vagy csökkenti. Jele C_p , mértékegysége % vagy g/m^3 .

Megértéséhez nézzünk egy példát. Ha egy cementáló közegnek adott hőmérsékleten 1 % a karbonpotenciálja, akkor az 1%-nál kisebb karbontartalmú acél 1 %-ra cementálódik, míg a nagyobb karbontartalmú acél erre az értékre dekarbonizálódik.

A cementáló közeg karbonpotenciálját 0,05 mm vastag, ötvözetlen acélból készült fóliával határozzák meg. A fólia a cementálás hőmérsékletén 15-20 perc alatt felveszi a közeg karbontartalmát, ami egyszerűen a fólia C tartalmának elemzésével meghatározható.

A cementáló közeg további fontos jellemzője, hogy mennyi aktív elemi szén képes belőle az acél felületére átjutni, azaz mennyi aktív megtapadni képes karbont tud leadni. Ezt a jellemzőt **karbon leadó képességnek** nevezzük.

A cementáló közeg karbon leadó képessége az elemi szén grammban mért mennyisége, amelyet 1 normál m^3 gáz, meghatározott hőmérsékleten leadhat, miközben karbonpotenciálja 1,00 %-ról 0,9 %-ra csökken.

Ennek különös jelentősége van akkor, ha a cementáló gáz áramlása gyenge, vagy a munkadarabokat az adagon belül sűrűn helyeztük el, vagy zsákfuratokat, bordás üregeket kell cementálni.

Cementáláskor az acél felületén bonyolult folyamatok játszódnak le. A karbonhordozó gázalkotók disszociációja, esetleges oxidációja, a bomlástermékek elszállítása a felületről igen összetett jelenség, amely a gázatmoszféra és a darab között kialakult rendkívül keskeny ún. Nernst-féle határrétegben megy végbe. A Nernst-féle határréteg diffúziós réteg a gázatmoszféra oldalán. A határréteg vastagsága kb. 10 μm . Ezen belül nagyobb a gáz sűrűsége, kisebb a gázmolekulák mozgékonyasága. A fém felőli oldalon, vagyis a fémbe a rácshibák és a rácsparaméterek még nem felelnek meg a szilárd testre jellemző egyensúlynak. Az acél felülete a kettős réteg egyik fajtája: fém+adszorbeálódott gáz. E rétegben megy végbe a gázmolekulákon belüli kötés lazulása, a disszociáció és a reakciótermékek képződése. A

cementálási folyamat szempontjából lényeges az acél felületén elnyelődő karbon mennyisége, ami a *karbonátmeneti számmal* fejezhető ki.

$$m = b(C_{pg} - C_{pf})$$

ahol

m az egységnyi felületen másodpercenként áthaladó karbon mennyisége $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$

C_{pg} a gáz és C_{pf} az acél felületének karbonpotenciálja g/cm^3

b a *karbonátmeneti szám* cm/s , amely azt fejezi ki, hogy másodpercenként hány gramm atomos állapotú karbon lép át az acél 1 cm^2 -nyi felületébe $1,0 \%$ karbonpotenciál különbség esetén.

A cementálás második részfolyamata a karbon diffúziója az acélban.

E folyamat során az acél felületéről az ott megtapadt C atomok az anyag belseje felé diffundálnak. A diffúzió eredményeként a felülettől befelé x távolságban változik a C koncentráció, $\Delta C/\Delta x$ koncentrációesés alakul ki, amely minél meredekebb, annál nagyobb a Δt idő alatt a felülettel párhuzamos szelvényben átáramló C mennyiség grammban.

A cementált réteg növekedése a folyamat során nem egyenletes. A mag kis C tartalma (kb. $0,15 \%$) és a cementáló gáztér lényegesen nagyobb karbonpotenciálja ($0,8-1,0 \%$) következtében a gáztér és az acél felülete között nagy potenciál különbség "potenciál ugrás" van. Ez a folyamat kezdetén a legnagyobb, majd a C diffúzió az anyag C tartalmának növekedése miatt egyre csökken. A csökkenő potenciálkülönbség a folyamat sebességének csökkenését eredményezi.

Cementáló eljárások

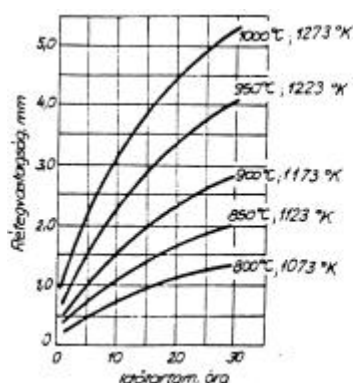
A cementálás során az alkatrészt karbont leadó közegben $850-930 \text{ C}^\circ$, ma egyre magasabb gyakran $950-970 \text{ C}^\circ$ -on izzítjuk.

A cementáló közeg lehet: szilárd (faszén, csontszén, koks), folyékony (sófürdő + karbont leadó anyag) vagy gáz. Ipari körülmények között már csak a gázcementálásnak van jelentősége.

A gáz cementáló szerek hatóanyaga CO vagy szénhidrogén vegyület, pl. metán, propán, toluol, éter vagy hasonló. A szobahőmérsékleten cseppfolyós szénhidrogéneket gőz alakban juttatják a cementáló térbe úgy, hogy valami alkalmas hordozógázt $15-25 \%$ szénhidrogénnel telítünk. A hordozógáz lehet semleges hatású pl. nitrogén, lehet maga is karbonizáló pl. CO, de lehet dekarbonizáló is pl. hidrogén, vagy nitrogén-hidrogén-szénmonoxid gázkeverék.

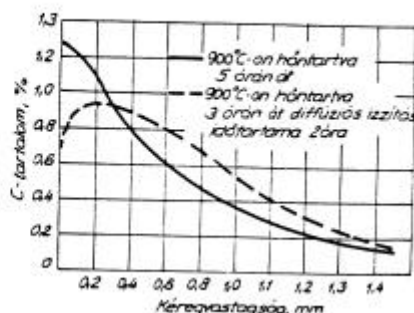
Azok a cementáló közegek, amelyeknek a CO a hatóanyaga enyhén karbonizálnak, amelyekben pedig szénhidrogének vannak erősen hatnak. Arról van szó ugyanis, hogy a CO-ból bizonyos idő alatt kevés C adszorbeálódik a darab felületén, hogy oldódhassék az ausztenitben, míg a szénhidrogénekből lényegesen több. A CO-ból átvett kevés karbon befelé diffundál, mégpedig olyan gyorsan, hogy a felületi rétegben megmaradó legnagyobb karbontartalom idővel csak lassan nő. A szénhidrogének időegység alatt sok karbont adnak át a cementálandó darab felületén, úgyhogy az nem tud eldiffundálni befelé. Enyhén ható cementáló szerben hosszú idő alatt is aránylag kis C tartalmú, mély kérget kapunk, erőlyes cementáló szerben pedig rövid idő alatt is nagy C tartalmú, de sekély kérget. A nagy felület közeli C tartalmat diffúziós izzítással tudjuk csökkenteni, ami a kéregvastagságot is növeli. A cementálás hőmérséklete a kéreg legnagyobb karbontartalmát, de természetesen a diffúziót is befolyásolja.

A 29. ábra a hőmérséklet és a kéregvastagság összefüggését a 30. ábra pedig a diffúziós izzítás hatását mutatja.



29. ábra

A cementált kéreg vastagságának változása a hőmérséklet és a hőntartási idő függvényében



30. ábra

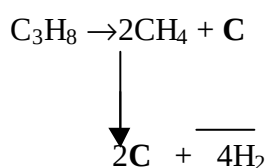
A diffúziós izzítás hatása

A hagyományos gázcementáló eljárásoknál a kisebb méretű fogaskerekre szokásosan előírt 0,5 - 0,9 mm kéregvastagság eléréséhez a kezelési idő a hőmérséklettől függően 6-8 óra. A kezelés utolsó órájában általában diffúziós izzítás történik a felületi nagy karbontartalom, ezzel a szekunder cementit háló elkerülése érdekében.

A hagyományos cementálás legnagyobb hátránya a hosszú kezelési idő. Ez egyrészt gazdaságtalan, másrészt az ausztenit a hosszú cementálási idő alatt eldurvulhat, (kivéve finomszemcsés acélok) ami kedvezőtlen tulajdonságú kérget és magot eredményezhet.

Kisnyomású (vakuum cementálás)

A kisnyomású cementálás 1 - 18 mbar vakuumban történik. A cementáló gáz propán. Az aktív megtapadni képes C atomok az alábbi folyamattal képződnek:



A folyamat alapján egy propán molekulából 3 aktív C atom képződik.

A cementálandó adaggal megrakott 10-100Pa nyomású, a cementálás hőmérsékletére felhevített (a kezelés hőmérséklete 960-970 C°) vakuum kamrába propánt vezetnek. A gáz bevezetésével a nyomás 500 Pa-ra nő. A propán adagolásával a nyomást úgy állítják be, hogy a magas cementálási hőmérsékleten a darabok felülete karbonnal túltelítődjék. A cementálást diffúziós izzítás követi, amelyben a nyomás 10-100Pa-ra való csökkentésével eléri az előírt felületi karbontartalmat. A cementálást és a diffúziós izzítást többször megismétlik azzal a megjegyzéssel, hogy a telítés ideje (cementálás) egyre rövidebb, amíg a diffúziós izzítás ideje egyre hosszabb.

A cementálás és a felület közeli C tartalom csökkenését eredményező diffúziós izzítás váltogatása az egész folyamat alatt egy intenzív kéregnövekedést biztosít, ami mint tudjuk a hagyományos gázcementálás esetén a folyamat előrehaladtával csökken.

Így a cementálási és diffúziós szakaszok többszöri ismétlésével az igen rövid 2-3 óra kezelési idő alatt 0,3 - 0,9 mm kéregvastagság érhető el. További előnye a vakuum cementálásnak a belső oxidáció elkerülése, az igen kis szénhidrogén igény.

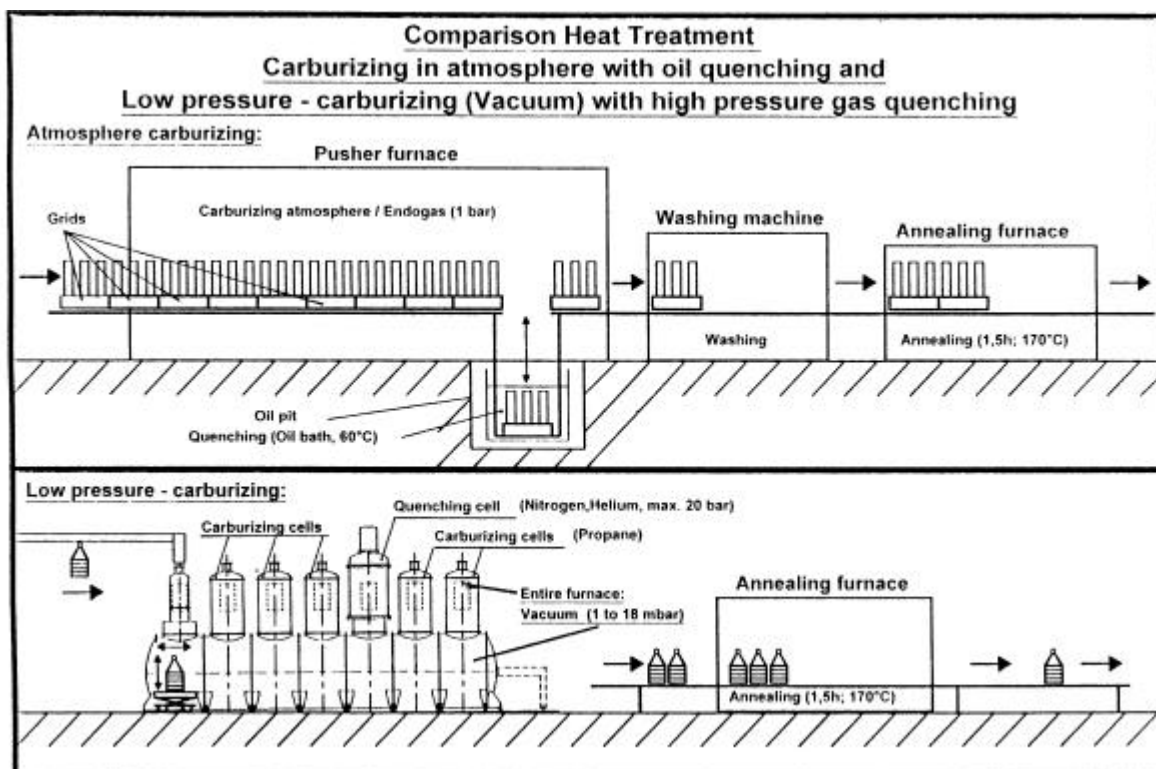
Az OPEL Magyarország Kft-nél alkalmazott berendezés cellákból áll, ami a többféle felhasználás mellett lehetővé teszi a szakaszos üzemeltetést is. A 31. ábra egy hagyományos gázcementáló berendezés és a vakuum cementáló nagynyomású gázedző berendezést együtt mutatja.

Az "INFRACARB" hűtött falú vakuum kemence, amely 700-1300 C° hőmérsékleten működhet. A cementálás folyamatához propángázt injektálnak. A gázbevezetés a betét felületétől független. A kemencében a folyamat alatt 5 mbar nyomás van. A berendezés működéséhez szükséges hűtővíz nagyon fontos, egyrészt a vezetékek élettartama másrészt a betét optimális edzésének biztosítása miatt.

A berendezés moduláris felépítésű, több függőleges cellából és egy vízszintes főkamrából áll. A **be-és kiléptető cella** biztosítja a betét ki és berakását. A zsilipelhető cella a főkamrától elzárható. A berakás után szivattyúval tetszőleges nyomás állítható be. A betétet ki-be kapcsolható rögzítőrendszer tartja.

A **transzferkamra** szállítókocsival lifttel sínen mozog és a betét cellák közötti gyors mozgását végzi.

Az 5 db **kezelő cella** 1300 C°-ig fűthető. A cellákban a cementáláson kívül egyéb kezelések is végezhetők pl. ausztenitesítés, lágyítás, megeresztés vákuumban vagy alacsony nyomású szénhidrogén vagy semleges gázatmoszférában. A cellák grafitellenállás fűtésűek, kettős falazatuk vízzel hűtött. A cementáló atmoszféra biztosításához szükséges propángázt gázinjektálókon keresztül juttatják be. A kezelőcellák összeköttetésben vannak a főkamrával. Az **edzőcella** maximális 12bar abszolút nyomással működik. A főkamrától zsilip választja el. Az edző nitrogéngázt egy ventilátor vízhűtőn keresztül áramoltatja biztosítva ezzel a betét gyors, ellenőrzött hűtését. Az edzés után a nitrogén gázt egy tartályba szivattyúzzák. A berendezés minden szükséges ellenőrző és jelző egységgel el van látva és működése teljesen automatikusan szabályozott.



31. ábra

A hagyományos és a kisnyomású cementáló és nagynyomású gázedző berendezés összehasonlítása

A cementálás folyamatának szimulálására szoftver áll rendelkezésre, melynek segítségével a folyamat paraméterei (az előírt kéregjellemzőknek megfelelő cementálási és diffúziós idő stb.) meghatározható. A szimulált és a tényleges folyamat közötti eltérés kb. 5 %.

Az eljárás jellemzői:

- ⇒ Rövid kezelési idő (2 - 4 óra szemben a hagyományos 6 - 8 órával)
- ⇒ A berendezés rugalmas, nem szükséges folyamatosan működtetni
- ⇒ A javítások egyszerűbben végezhetők
- ⇒ Nem szükséges hűtőolaj az edzéshez, nincs olajpárolgás
- ⇒ Nincs hőkisugárzás
- ⇒ Tiszta
- ⇒ A hőtörzulás 30 %-al csökken a darabok egyenletesebbek
- ⇒ A darabok mozgatása kevesebb, lecsökken a gyártási hibák csökkentéséhez szükséges idő
- ⇒ A kemencehibákból eredő selejt 20% alá csökken
- ⇒ Nincs oxidáció a perifériás zónában

Összefoglalva a vakuum cementálás és nagy nyomású gázedzés együttesen lehetővé teszi a hő okozta méretváltozások minimumra csökkentését, a minőség javítását, a gyártás költségének csökkentését azáltal, hogy a betétedzést követő megmunkálásokat minimalizálja.

A cementálást követő hőkezelések

A cementált darabok felületének C tartalma 0,8-0,9 %, míg a mag 0,17-0,23 % C tartalmú. A betétedzés céljaként megfogalmazott kemény, kopásálló, fárasztó igénybevételnek ellenálló kéreggel és szívós maggal rendelkező darabot csak akkor tudjuk teljesíteni, ha a darabot további hőkezeléseknek vetjük alá. Ezek az **edzés és a megeresztés**.

A cementálást követően a darab kérgé és magja különböző C tartalmú, ami különböző edzési hőmérsékletet igényel. A kéreg 0,7-0,9 % C tartalmú, míg a mag kisebb 0,2 % C. Korábban alkalmazták a *kettős edzést*, amikor külön történik a "mag edzése" majd ezt követi a kéreg edzése és a megeresztés. A többszöri felhevítés és gyors hűtés gazdaságtalan és jelentős méretváltozásokat okoz.

Kedvezőbb a helyzet akkor, ha az acél szemcsedurvulásra nem hajlamos, mert ebben az esetben az edzés a cementálást követően elvégezhető (*direkt edzés*). Az edzés az acél összetételétől függően -ötvözetlen acélt vizes emulzióban, ötvöztet olajban - történik. Alkalmazható szintén szemcsedurvulásra nem hajlamos acélok edzése során a *kéreg edzési hőmérsékletéről történő edzés* is.

A vakuum cementálás esetében a darabokat a cementálás hőmérsékletéről a vetemedés csökkentése miatt edzési hőmérsékletre kb. 860 C° -ra visszahűtés után nagynyomású (max. 20 bar) áramló vízzel hűtött nitrogén gázzal hűtik. A nagynyomású, az edző kamrába több helyen egyenletesen bevezetett és folyamatosan áramoltatott nitrogén biztosítja a martenzites szövetszerkezet kialakulásához szükséges felső kritikus lehűlési sebességnél gyorsabb hűtést, azaz a darabok edzését, azok jelentősebb méretváltozása, torzulása nélkül.

Az edzést kishőmérsékletű 160 C°-on 1 órás megeresztés követi.

Nagyenergiával végzett felületi kezelések

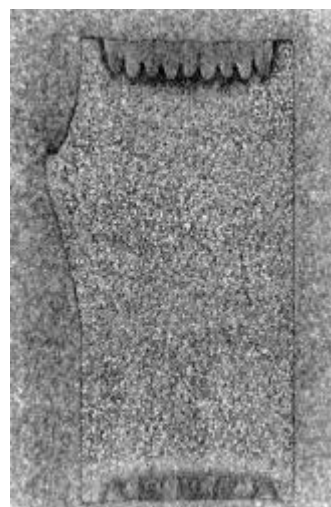
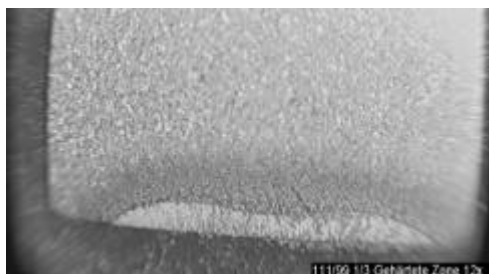
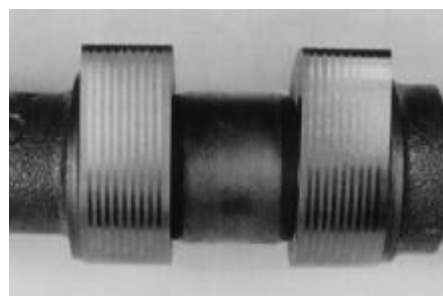
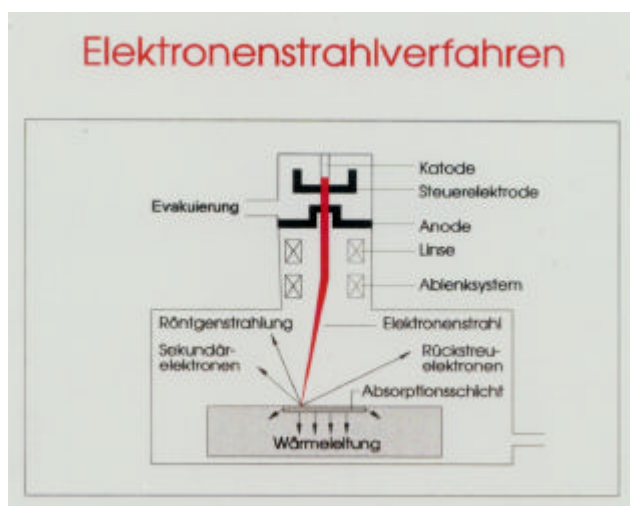
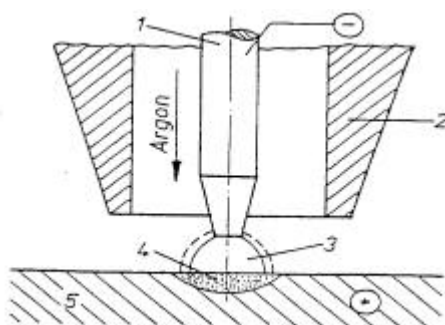
Nagy energia sűrűségű felületi hevítés

Lézer, plazma és elektronsugárzás felhasználásával nagyobb, mint 10⁴ W/m² felületi teljesítmény érhető el, vagyis a szokásos hőforrásoknál 1000-10000-szer nagyobb. Ilyen

energiaforrásokat felhasználva az acélok felületkezelésére az eddig tárgyalt eljárásokhoz képest lényegesen kedvezőbb jelenségek játszódnak le, és ennek következtében eddig nem észlelt anyagtulajdonságok alakulnak ki.

Jellemzőik:

- Az ütközési pontban a legnagyobb az energia sűrűség. A hevítés sebessége 10^6 - 10^8 K/sec.
- A sugár nagyon pontosan szabályozható, automatizálás szükséges.
- A felhevített térfogat nagyon kicsi, a kezelt és az alapanyag közötti nagy hőmérséklet-gradiens miatt igen gyors a lehűlés, ami ultrafinom martenzit képződését eredményezi.
- A nagyon magas hőmérsékleten nagyon intenzív a diffúzió, ezért lehetséges a felület átolvasztása (104. ábra) illetve ötvözése.
- Megnő a pont és a vonalszerű rács hibák száma, a kiválások nagyon finomak lesznek.
- A több szilárdságnövelő mechanizmus együttes eredménye a szuperkeménység.



32. ábra
Öntöttvas vezérmű tengelyek átolvasztásos kezelése

Gőzfázisú bevonatképző eljárások

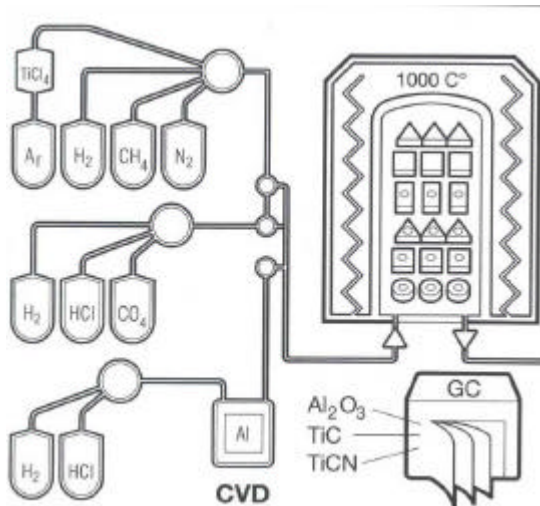
A szerszámok vagy az alkatrészek felületén kemény, kopásálló réteget létrehozására alkalmas eljárás a :

- kémiai gőzfázisú bevonatolás CVD
- Fizikai gőzfázisú bevonatolás PVD

Kémiai gőzfázisú bevonatolás (CVD)

A CVD eljárást keményfémleplek és kerámiák felületi kezelésére dolgozták ki.

Az eljárás (33. ábra) során a reakciótérbe elgőzöltetett titánkloridot (TiCl_4) vezetünk hidrogénnel dúsított atmoszférában. Metán (CH_4) hozzávezetésével 900-1000 °C-on vákuumban titánkarbid (TiC) és sósav (HCl) keletkezik. A TiC kicsapódik a kamrában elhelyezett tárgyakon, azok felületén 3-10 μm vastag, ellenálló réteget képezve. A réteg keménysége 2500 HV körüli. A HCl -t a retortából kiszivattyúzzák és semlegesítik. Az eljárás alkalmas karbid, nitrid, borid, oxid, szilicid bevonatok készítésére is. Ezzel az eljárással gyémántbevonat is készíthető.

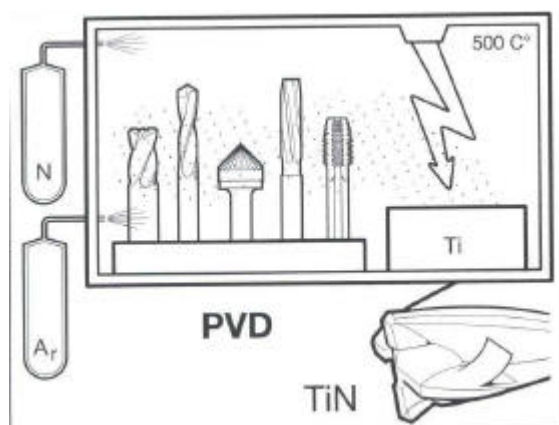


33. ábra
Kémiai bevonatolás (CVD)[23]

Fizikai gőzfázisú bevonatolás (PVD)

A PVD eljárás során a bevonat nem nagy hőmérsékleten vegyi reakció, hanem alacsony 150-550 °C-on fizikai elvek alapján keletkezik. A leggyakrabban nitrogéndús környezetben titánt gőzöltetünk (porlasztunk), amely a nitrogénnel TiN -t képez, amely az alacsony nyomású térben elhelyezett tárgyak felületén kicsapódik, jellegzetes aranysárga bevonatot képezve. (106. ábra) A TiN keménysége 2000-2500 HV, kopásálló.

Mivel a kezelési hőmérséklet alacsony a módszer alkalmas szerkezeti és szerszámacélok bevonásra is. Az acélok kezelése készre munkált állapotban történik. A módszer hátránya, hogy a bevonat tapadása gyenge. Jobb tapadás érhető el, ha a bevonat anyagát ionizálják, ami azután elektromos erőter hatására nagy sebességgel csapódik a kezelendő anyag felületébe és annak kristályszerkezetébe is beépül. Ha a kemencében olyan gázatmoszféra van, amely az elgőzöltetett anyaggal képes vegyületet alkotni, úgy a technológiai paraméterekkel beállítással elérhető, hogy vegyületi réteg alakuljon ki. Hasonló eljárással nagy keménységű Al_2O_3 bevonat is képezhető.



34. ábra
Fizikai bevonatolás (PVD) [23]

2.3.2. Az alumíniumötvözetek hőkezelése

A tiszta alumínium szilárdsága növelhető:

- ötvözéssel
- hidegalakítással
- az ötvözetek hőkezelésével, elterjedt nevén nemesítéssel

Az alumínium ötvözése

Az ötvözőelemek az alumíniummal korlátozott szilárd oldatot alkotnak, növelik a szilárdságot, csökkentik a vezetőképességet és az olvadáspontot, és esetenként a korrózióállóságot is. (pl. Cu vagy a Fe)

Az alumínium fő ötvözetek és jelölésük (MSZ EN 573)

Sorozatszám	Ötvözet
1000	Tiszta, ötvözetlen alumínium
2000	Al-Cu
3000	Al-Mn
4000	Al-Si
5000	Al-Mg
6000	Al-Mg-Si
7000	Al-Zn
8000	Egyéb ötvözetek, pl. Al-Li; Al-Fe

Az alumíniumötvözeteket a nagy szilárdság, a jó korrózióállóság, a jó feldolgozhatóság (alakíthatóság, önthetőség, hegeszthetőség, forgácsolhatóság stb.) jellemzi.

Az alumínium ötvözeteket a feldolgozhatóság szempontjából csoportosíthatjuk, mint

- Alakítható
- Öntészeti

Mindkét csoportban találunk kiválóan keményíthető (nemesíthető) illetve nem nemesíthető ötvözeteket. **A nem hőkezelhető ötvözetek szilárdsága csak hidegalakítással növelhető!**

Hidegen alakított ötvözetek lágyítása

Az alakítható ötvözetek az ötvözőelemekből kevesebbet tartalmaznak és többnyire szilárd oldat szerkezetűek. Alakítással az összes ötvözetcsoporthoz 2000-8000-ig feldolgozható. A

hidegalakítás hatására az ötvözetek felkeményednek, azaz a mechanikai jellemzőik nőnek, az alakíthatóság pedig csökken.

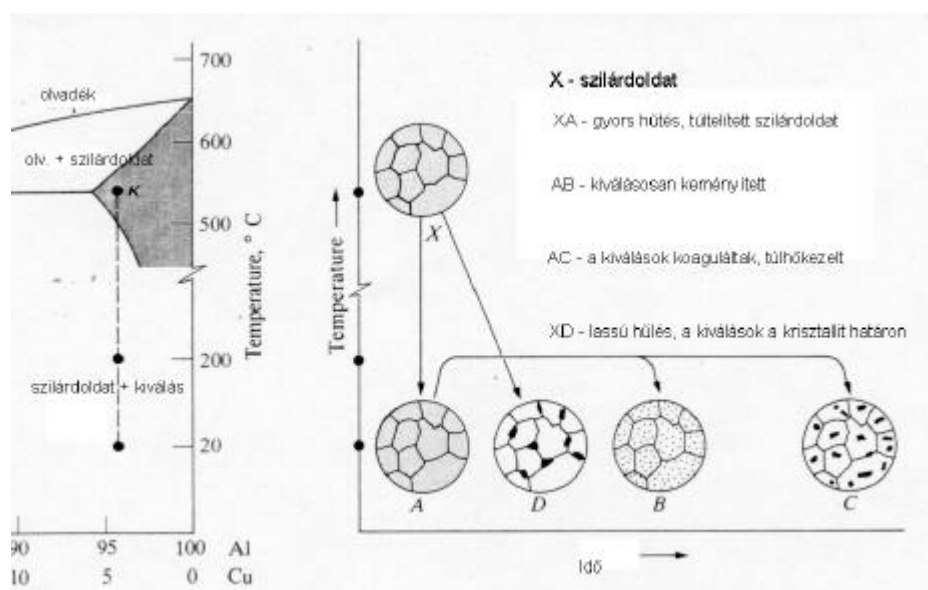
A hidegen alakított ötvözet hőkezelése a lágyítás, ami lényegében újrakristályosítás. A kezelés az előzetes alakítás mértékétől függően 300-350 C°-on történik, hatására az alakíthatóság nő, a kemény csökken.

Fontos, hogy az újrakristályosító izzítással elkerüljük az erőteljes szemcsedurvulást, amely 550-650 C°-nál jelentkezik, ha az előzetes alakítás mértéke 1-10 % illetve 65-95 %. Az újrakristályosodásnál eldurvul szemcseszerkezet hőkezeléssel nem javítható!

A szilárdság növelése hőkezeléssel

Az alumíniumötvözetek szilárdságnövelő hőkezelése kiválásos keményítés, amelyet a gyakorlatban nemesítésnek neveznek. Ez kezelés abban az esetben használható, ha az ötvöző az alumíniummal szilárd oldatot alkot, az oldódás korlátozott, és a szilárd állapotban való kiválás vegyületének formájában történik.

A vegyületfázis egyensúlyi lehűtés esetén a kristallithatáron, kedvezőtlen alakot felvéve válik ki. Kedvező a finom, egyenletesen elosztott kiválás. Ezt úgy érjük el, hogy a hőkezelés során **első lépésben oldatba visszük az ötvözőt, majd gyors hűtéssel megakadályozzuk a kiválást. A túltelített szilárdoldatból a vegyület az öregbítés során nagyon finom formában válik ki**, és hatékonyan növeli a szilárdságot. A 35. ábra Al-Cu ötvözet esetében mutatja a kiválásos keményítés lényegét.



35. ábra
A kiválásos
keményítés elve.

alumíniumötvözeteket az alábbi táblázat tartalmazza:

Megjegyzés: Az alumíniumötvözeteket vegyjellel vagy számmal jelöljük.

A Szabványos jelölés pl. EN AW-6082 [AlMgSi1]

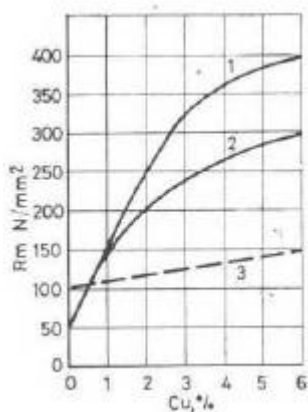
A zárójelben első helyen az Al, majd az ötvözők névleges tartalmának csökkenő sorrendje, négy elemre korlátozva.

Ötvözet csoport			
Al-Cu (2000)	Al-Mg-Si (6000)	Al-Zn (7000)	Egyéb (8000)
AlCu2,5Mg	EAlMgSi	AlZn1	AlFeMn
AlCu2,5NiMg	AlMgSi0,3Cu	AlZn4,5Mg1	AlFe1Si
AlCu4Mg1	AlMgSi0,5	AlZn5MgZr	AlFeSiCu
AlCu4SiMg	AlMgSi1	AlZn6MgCu	

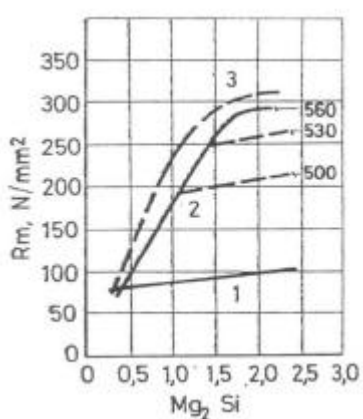
A hőkezelhető

	AlMgMn AlMg1Si0,8 AlMg1SiCu AlSiMg AlSi1MgMn		
--	--	--	--

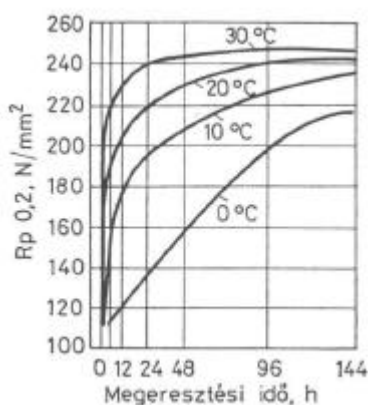
A 36. ábra az Al-Cu ötvözetek (a kiváló fázis Al_2Cu) szilárdságnövekedését, a 37. ábra az Al-Mg-Si (kiváló fázis Mg_2Si) ötvözetek szakítószilárdságának növekedését a 38. ábra az Al-Cu-Mg ötvözetek, folyáshatárának, a 39. keménységnek a növekedését mutatja.



36. ábra
Al-Cu ötvözet szakítószilárdságának változása a Cu tartalom függvényében különböző hőkezelések után. [20]
1- gyorsan hűtve 160 °C-on megeresztve, 2- 500 °C-ról gyorsan hűtve, 3- 300 °C-on lágýtva



37. ábra
Al-Si-Mg alapú ötvözet szilárdságának változása az Mg_2Si függvényében [20]
Az oldóiztítás 530-550 °C, vízűtés, 1-345 °C-on lágýtva, 2-különböző hőmérsékletekről gyorsan hűlt darab egy hétig természetes „öregbítés”, 3-560 °C-ról gyorsan hűtve, 160 °C-on 18 óra „öregbítés”



38. ábra
Al-Cu-Mg ötvözetek folyáshatárának változása
Megjegyzés: a természetes öregbítés (nemesedés) időtartama 5 nap, de függ a hőmérséklettől is [20]



39. ábra
A Cu és a Mg hatása a keménységre 10 napos természetes „öregbítés” után [20]

Irodalom

[1] William D. Callister, Jr. : Materials Science and Engineering an Introduction
John Wiley and Sons, Inc. 1994.
ISBN 0-471-30568-5

[2] Michael F Ashby and David R H Jones: Engineering Materials 1. An Introduction to their
Properties and Applications
Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall
ISBN 0-08-0261 39-6

[3] Vernon John : Testing of Materials
MACMILLEN Educatoin Ltd 1992.
ISBN 0-333-44783-2

[4] Atlas zur Warmebehandlung der Stähle
Max Planck Institut für Eisenforschung
Verlag Stahleisen M.B.H. Düsseldorf

[5] Dr. Prohászka János: Bevezetés az anyagtudományba I.
Tankönyvkiadó, Budapest, 1988
ISBN 963 18 0671 5

[6] Verő József - Káldor Mihály: Fémtan
Tankönyvkiadó, Budapest 1977
ISBN 963 17 1798 4

[7] Dr. Verő József - Dr. Káldor Mihály : Vasötvözetek fémtana
Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1980.

[8] Hütte: A mérnöki tudományok kézikönyve
Springer 1995.

[9] Lawrence H. Van Vlack: Elements of Materials Science and Engineering
Addison - Wesley Publishing Company, 1989.

[10] Materials Principles and Practice
The Open University, 1990
Butterworth - Heinemann Ltd.

[11] Dévényi Györgyné - Dr. Vonich Pál: Anyagszerkezetan
Műszaki Könyvkiadó 1980.

[12] Artinger - Csikós - Krállics - Németh - Palotás:
Fémek és kerámiák technológiája
Műegyetem K iadó1997.

[13] Reihold Laska, Chiristian Felsch:
Werkstoffkunde für Ingenieure
Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1981

[14]Csizmazia Ferencné dr. : Anyagismeret
PHARE PMZ HU-94.05.0201-L016/09 1998.

[15] Csizmazia Ferencné dr. : Anyagvizsgálat
SZIF- UNIVERSITAS Kft. 1998.

[16] Dr. Szombatfalvy Árpád : A hőkezelés technológiája
Műszaki Könyvkiadó 1985

[17] Komócsin Mihály : Gépipari anyagismeret
COKOM Mérnökiroda Kft. 1995

[18] John M. Storm& Michael R. Chaplin Contour Hardening, Inc. Indianapolis:
Dual Frequency Induction Gear Hardening
Gear Technology, The Journal of Gear Manufacturing March/April, 1993

[19] Csizmazia Ferencné dr. Fémten multimédiás jegyzet <http://zeus.szif.hu/ejegyzet>

[20] Német Emil: Acélok és nemvasfémek hőkezelése a gyártástechnológiában
Műszaki Könyvkiadó Budapest 1981

[21] George E. Totten, Maurice A. H: Howes
Steel Heat Treatment Handbook
Marcel Dekker Inc. New York . Basel . Hong Kong 1997

[22] Dr. Bagyinszki Gyula- Dr. Kovács Mihály: Gépipari alapanyagok és
félkészgyártmányok. Anyagismeret
Nemzeti tankönyvkiadó TM-21013/1

[23] Modern Metal Cutting AB Sandvik Coromant
S-811 81 Sandviken, Sweden
1994

[24] Dr. Gáti József:Hegesztési kézikönyv
Műszaki Könyvkiadó]

[25] Dr. Farkas Ferenc- Farkas Ferenc József:
Ragasztás kézikönyve
Műszaki Könyvkiadó]

Tartalomjegyzék

1. Egyensúlytól eltérő átalakulások	1
1.1. Fe_C ötvözetek nem egyensúlyi módon végbemenő átalakulásai	1
1.2. Kiváklásoos keményítés	11
2. A fémek tulajdosságainak megváltoztatási lehetőségei	12
2.1 Ötvözés	13
2.2. A hidegalakítás hatása (felkemnényedés)	13
2.3. Hőkezelés	14
2.3.1. Vasötvözetek hőkezelése	15
Teljes keresztmetszetre kiterjedő hőkezelések	15
Felületi hőkezzelések	22
Gőzfázisú bevonatképző eljárások	36
2.3.2. Az alumíniumötvözetek hőkezelése	37