

11. ACÉLOK TELJES EDZÉSE

11.1. Ötvözetlen acélok folyamatos hűtésű edzése

A folyamatos hűtésű edzés célja, hogy az acél szövetét annak lehetőleg teljes keresztmetszetében martensitessé, vagy túlnyomórészt martensitessé alakítsa és így annak teljes tömegében a lehető legnagyobb keménységet biztosítsa. A folyamatos hűtésű edzés az acél edzésének legáltalánosabb módja, azért röviden „edzés”-nek nevezik. Az edzés céljának elérésére elvileg a homogén γ -mező hőmérsékletére hevített acélt olyan gyorsan kell lehűteni, hogy elkerüljük a γ -vas bomlását és így lehetővé tegyük, hogy az M_s hőmérséklet alá hűlve martensitessé alakulhasson. Ha a hűtést a szobahőmérsékletig, helyesebben $100\text{ }^\circ\text{C}$ -nál kisebb hőmérsékletig folytatják, akkor a martensit főlegesen nagy, káros saját feszültséget okozó tetragonális rácsszerkezetűvé lesz, ami az edzési repedés veszélyét rejti magában. Az ilyen repedés mindig a lehűtés végső szakaszában, az M_s hőmérséklet alá való hűtéskor, a fajtérfogat növekedéssel járó γ -vas martensitté való átalakulásakor következik be. Nagy keresztmetszet-változásokat, vékonyabb helyeket, nyúlványokat tartalmazó alkatrész edzésekor ez a repedés fémes csengésű hanggal jelentkezik. Ezért általános szabály, hogy

$100\text{ }^\circ\text{C}$ alá folytatott hűtésű edzést mindig azonnal követnie kell a megeresztés első lépcsőjének, a $160\text{—}200\text{ }^\circ\text{C}$ -ra való hevítésnek, hogy a martensitrács tetragonálisból szabályos rácsvá alakulhasson, még mielőtt a túlzott saját feszültség edzési repedést okozhatna.

Az edzés műveletei általános fogalmazással:

Hevítés a teljes, vagy elegendő mérvű austenitté válást biztosító ún. edzési hőmérsékletre;

időzés az austenitté alakulás befejezéséig;

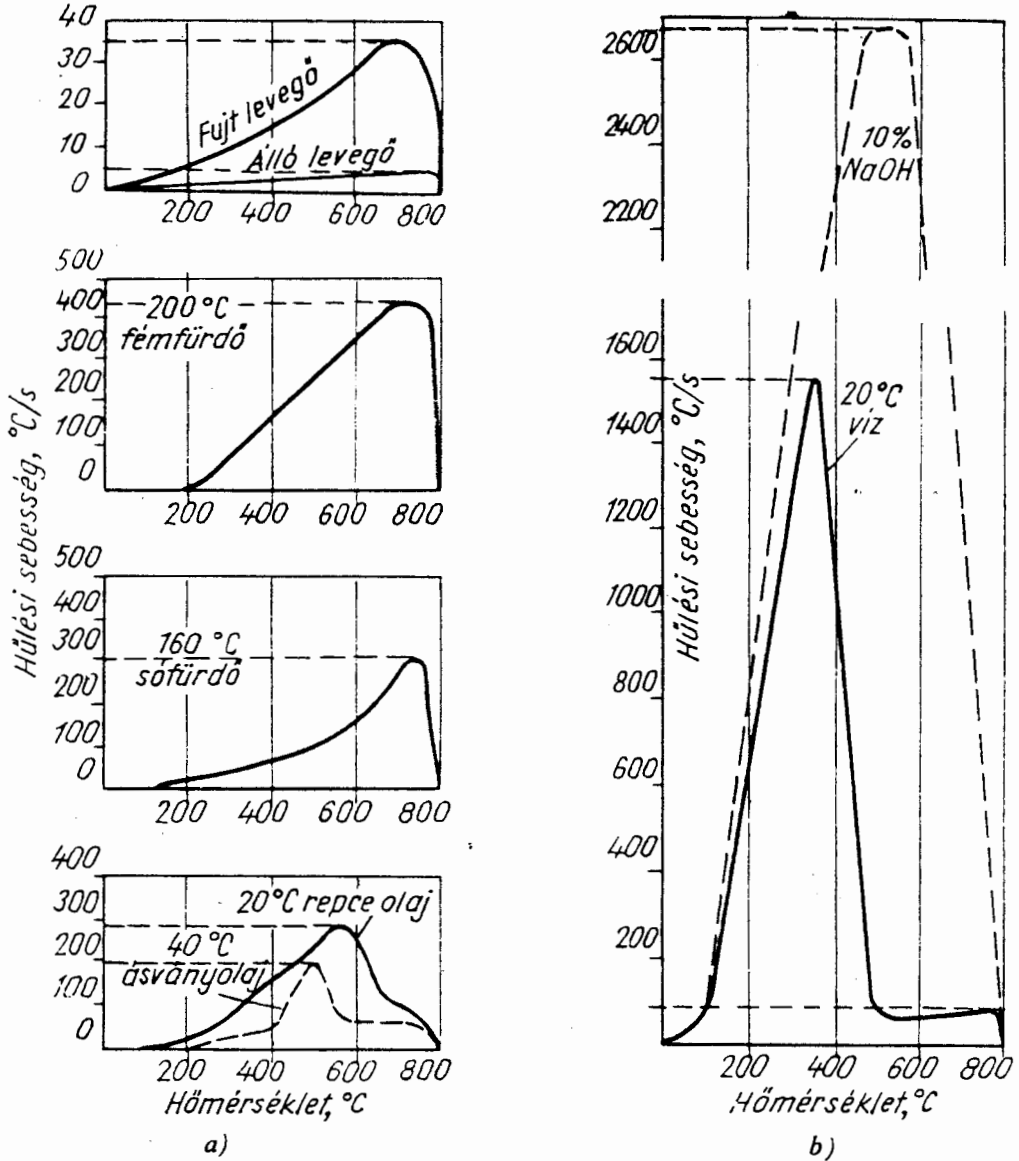
hűtés az acél felső kritikus hűtési sebességével;

megeresztés $150\text{—}200\text{ }^\circ\text{C}$ -on.

Az edzés sikere e 4 művelet közül legnagyobb mértékben az edzés hőmérsékletének és a hűtés módjának helyességétől függ. Az edzési hőmérséklet megválasztásá-

nak alapjául szolgáló A_{c3} és A_{c1} kritikus hőmérséklet, valamint a kritikus hűtési sebesség az acél összetételétől függ és az acélok adatait tartalmazó szakkönyvekből [14] vehetők ki, vagy szabatosabban az acél folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramjából [4] állapíthatók meg. Az ötvözetlen acélok helyes edzési hőmérsékletének megállapítására a Fe—Fe₃C egyensúlyi diagramot használhatjuk fel.

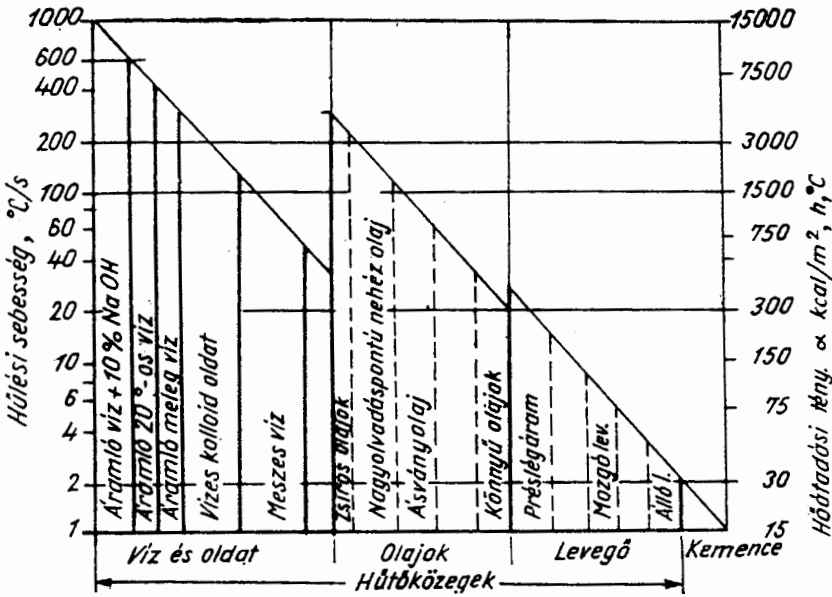
Az edzésnél szükséges hűlési sebességet úgy érik el, hogy az austenites szövétűvé hevített acéltárgyat az összetétel szerint szükséges legkisebb hűtési sebességet biztosító hűtőfolyadékba mártják, azzal permetezik, levegővel fúvatják vagy egy edzőgépben fémlapok közé szorítják. A gyakorlatban leginkább használt edzőközegek: hatékonyságuk növekvő sorrendjében: a levegő, olaj, sófürdő, fémfürdő és a víz. Ezeknek hűtőhatását ismételten megállapították. Összehasonlításuk csak azonos feltételek között lehetséges. A 191. ábrásor e hűtőközegek hatását mutatja 20 mm



191. ábra. 20 mm átmérőjű ezüstgolyó hűlési sebessége különböző közegekben (F. Wever és A. Rose után)

átmérőjű 800 °C-ra hevített ezüstgolyó hűlése közben. Az ábrából azt látjuk, hogy a közegek között a 10% NaOH-t tartalmazó víznek kiugróan legnagyobb a hűtőhatása és a fém- és sófürdő, a repceolaj és a levegő hűtőhatásához hasonlóan hűtőhatása a legnagyobb a perlitte bomlás hőmérsékletén.

Jellegében eltér ezektől a víz és az ásványolaj viselkedése. A tiszta víz hűtőhatása 800—500 °C hőmérsékletközben viszonylag egész kis értékű. Ennek oka az, hogy a hűtés első periódusában a hűtött felületet gőzréteg burkolja, mely később szét-pattan és így 300—400 °C között érvényesül csak a víz erőteljesebb hűtőhatása. Meleg víznél a gőzburok még makacsabb és még erős mozgatással sem rombolható



192. ábra. Különböző edzőközegek 500 °C-on mért hőátadási tényezői és hűtőhatásuk okozta hűlési sebességek [16]

szét. 5—10% konyhasónak, vagy nátronlúgnak a vízben való oldása ezt a jelenséget megszünteti és a víz hűtőhatását éppen a C-görbe orrpontja körüli hőmérsékleten (500—600 °C) erősen megnöveli. Bár a nátronlúg mérgező hatású, ezért kezelése biztonsági rendszabályokat követel, mégis előnyösebb a használata, mert a sós víz az edzett tárgyakon korróziót okoz.

Az ásványolaj viselkedése hasonló a vízéhez. Itt a hőszigetelést nem kondenzálható gázok okozzák. Az edzőolajok annál nagyobb hűtő hatásúak, minél sűrűbbek, zsírosabbak, minél nagyobb a viszkozitásuk és minél magasabb a lobbanáspontjuk. Legjobb edzőolajok a növényi olajok, amilyen pl. a repceolaj.

Az edzésnél a hűtőhatás az 500 °C körüli hőmérsékleten lényeges. Az egyes hűtőközegek hatását összefoglalóan mutatja ezen a hőmérsékleten a 192. ábra.

Ha ismerjük az acél felső kritikus sebességét, vagy ha ismerjük folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramját és ebből meghatározzuk azt, akkor annak elérésére alkalmas hűtőközeget a 192. ábrából ki tudjuk választani. Az edzés gyakorlatában nem ragaszkodnak ahhoz, hogy az edzett acél szövete 100%-ban martensit

legyen, hanem néha megelégszenek azzal is, ha 50%-ban válik edzés közben martensitessé, 50%-ban finomlemezes perlit és bainit szövettű. Az edzés hűtési sebessége ennek megfelelően a felső kritikusknál kisebb is lehet.

Az acélok kritikus hűtési sebességét az ötvözőelemek csökkentik. Már az ipari ötvözetlen acélok kritikus hűtési sebessége is kisebb a tiszta Fe-C ötvözetekénél. Például a csak C-t tartalmazó 0,8% C-tartalmú Fe-C ötvözet felső kritikus hűlési sebessége 750 °C/s-nek vehető, az ennél kevesebb C-t tartalmazó ötvözeté még nagyobb. A gyakorlati 0,45% C-tartalmú acél egy konkrét adagjánál, amelynek összetétele C = 0,44, Si = 0,22, Mn = 0,66, Cr = 0,15%, a folyamatos hűtési átalakulási diagramból számított 500 °C-hoz tartozó felső kritikus hűlési sebesség közelítőleg

$$v_{krf} = \frac{A_{c3} - 500}{i_m} \quad (37)$$

képletből számítható. A C45 acél adatait helyettesítve

$$v_{krf} = \frac{785 - 500}{1,5} = 190 \text{ °C/s-nak}$$

adódik (102. ábra és [2] 380. old. 52. táblázat, ahonnan $A_{c3} = 785^\circ$, $i_m = 1,5$ s). Az acélgártás során bekerült ötvözők tehát 25%-ára csökkentették a kritikus hűtési sebességet. Az edzéshez használt hűtőközegnek tehát ennél nagyobb hűtőhatást kell kifejtenie. A 192. ábra szerint az ötvözetlen acélok edzésére, amelyek kritikus hűtési sebessége kis ötvözőtartalmuk miatt az összes acélfajtákéhoz hasonlítva a legnagyobb, nemcsak az NaOH-tartalmú, hanem a 20 °C hőmérsékletű mozgásban levő víz, sőt szükség esetén — bonyolult alakú munkadarabok edzésénél — még a legnehezebb zsíros olaj is megfelel.

Az ötvözetlen acélok edzési hőmérsékletének megválasztásánál külön kell vizsgálnunk a hipo-, és külön a hipereutektoidos acélokat. A hipoeutektoidos acéloknaál az edzési hőmérséklet mindig nagyobb, mint az A_{c3} , mert különben az austenitben nem oldott, lágy ferrit marad vissza. Az A_{c3} túllépésének mérvét a γ -vas szemcséinek a hőmérséklettel való növekedése szabályozza (96. ábra). Arra kell törekedni, hogy a hevítéskor keletkezett homogén γ -vas szemnagysága minél finomabb legyen. Ez pedig az A_{c3} minél kisebb túllépését kívánja. A hőmérsékletmérés pontatlansága miatt a kívántnál nagyobb hőmérséklet-többletet szokás engedni. Így alakult ki az a szemlélet, hogy a hipoeutektoidos acélok helyes edzési hőmérséklete: $A_{c3} + 20\text{—}50$ °C. Ehelyett a következőkben $A_{c3} + 30$ °C értékekkel számolunk, mint edzési hőmérséklettel.

A hevítés sebességére nézve irányadó az a szempont, hogy a tárgy méretei által megengedett legnagyobb sebességgel kell hevíteni. Ennek indoka az, hogy a hevítés közben mindig megvan a C kiégésének veszélye. Márpedig a C az edződéshez nélkülözhetetlen ötvöző, amit semmi más nem pótol. A C kiégése éppen a felületen következhet be, ahol a kopásálláshoz a legnagyobb keménységre van szükség. Ezért

300 °C-ig lassan, 600 °C-tól pedig igen gyorsan hevítünk, mert e hőmérséklet fölött indul meg a rohamos oxidáció és gyorsul meg a C-kiégés. Ilyen nagy hőmérsékleten nincs már meg a magrepedés veszélye, mert a 600 °C-ra felhevített acél képlékeny alakváltozóképesége (δ , ψ) annyira megnő, hogy a héj és mag közötti hőmérsékletkülönbség okozta saját feszültséget alakváltozással szünteti meg.

Az edzés hőmérsékletén való időzést hasonló megfontolásokból a lehető legkisebbre kell korlátozni. A szükséges időtartamot az α — γ átalakulás, illetve a proeutektoidos ferrit γ -vasban való oldódása szabja meg. Maga az α — γ átalakulás hirtelen, átbillenészerűen megtörténik. Ennek tehát nincs időszükséglete. A heterogén fázisoknak a γ -vasban való oldódása csak diffúzióval történhet. Ez a folyamat tehát időt igényel, mégpedig annál többet, minél durvábbak a fázisok. Legdurvább heterogén fázisokat tartalmaz a lassan dermedt, vastag falú acélöntvény, legfinomabbak a fázisai a képlékenyen (hengerléssel, kovácsolással) mechanikusan megmunkált, valamint az előzetesen szemcsefinomító hőkezelésnek, normalizálásnak alávetett acélnek. Ezért fontos az a rendszabály, hogy

ha acélöntvényt edzeni kell, akkor az előtte levő műveletek közé, rendszeren nagyolás után normalizálást vagy nemesítést kell beiktatni.

Az edzési hőmérsékleten való időzés tartamának meghatározásánál arra is figyelemmel kell lenni, hogy minél nagyobb a hőmérséklet, annál hatványozottabban nagyobb a diffúziós tényező, tehát kisebb a diffúzió időszükséglete, de annál nagyobb a szemcsedurvulás és az elszéntelenedés veszélye is. *A szemcsedurvulás veszélye szempontjából ötvözetlen acéloknál a 900 °C olyan hőmérséklet határ, amely fölött csak igen rövid időig szabad időzni az edzésnél.* Az erősen alakított (vékony, hengerelt v. kovácsolt félkészáruból készült) alkatrészek edzésénél a hőntartás teljesen mellőzhető és az edzési hőmérsékletre való áthevülés után közvetlenül lehet hűteni. Vastagabb tárgyknál az edzési hőmérsékleten való tartás $10 + \frac{a}{2}$ percre, ahol a a legnagyobb vastagság mm-ben, de legfeljebb 30 percre tehető.

A hipoeutektoidos ötvözetlen acél edzésének műveletei:

Hevítés $A_{c_3} + 30$ °C-ra;

hőntartás $\left(10 + \frac{a}{2}\right)$ perc, de legfeljebb 30 perc;

hűtés mozgó vízben;

megeresztés 150—200 °C-on.

A hipereutektoidos ötvözetlen acélok edzési hőmérsékletének megválasztásánál ugyancsak célkitűzés a homogén γ -mező hőmérsékletére való hevítés. A 193. ábra tanúsága szerint azonban az 1,2—2% C-tartalmú acéloknál az A_{cm} nagy hőmérséklete miatt túl kellene lépni a 900 °C korlátot és így az austenit szemcsemérete

megengedhetetlenül nagygyá nőne. Az austenit szemnagysága az edzés kritikus sebességű hűtésénél nagyságát az M_s hőmérsékletig való túlhűtésig megtartja és így azonos szemnagyságú martensitté alakul (96d ábra). A durva szemű martensit nagy felületi nyomásnál könnyen kipattogzik. Ezért

az 1,2%-nál nagyobb C-tartalmú acélokat edzéskor nem szabad az A_{cm} fölé hevíteni.

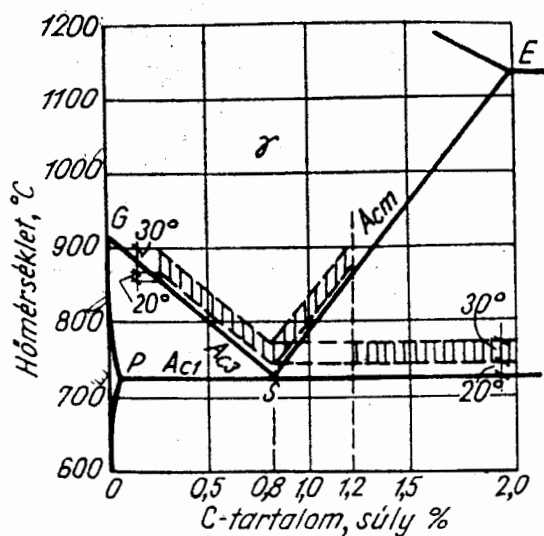
Az 1,2% C-tartalmú acél szövetének 93%-a perlit, 7%-a szekunder cementit. A 2% C-tartalmúnál ugyanezek az értékek 80% és 20%. Az A_{c1} hőmérséklet fölé hevítve a 93—80% perlit a legfinomabb szemcsés austenitté alakul, amelyben még szekunder cementit marad. Edzés után az austenit finom szemű tús martensitté válik, amelybe esetleg hálósan illeszkedik a szekunder cementit. Mivel a cementit és martensit keménysége közel egyenlő, akkor sem kapunk érdemlegesen nagyobb keménységet, ha az A_{cm} -nél nagyobb hőmérsékletről edzünk. Ezért

a hipereutektoidos acélokat nem is érdemes az A_{cm} -nél nagyobb hőmérsékletről edzeni.

A hipereutektoidos ötvözetlen acélok edzési hőmérsékletei fenti megfontolások szerint

0,8—1,2% C-tartalmú acéloknál $A_{cm} + 30^\circ\text{C}$,
 1,2—2,0% C-tartalmú acéloknál $A_{c1} + 30^\circ\text{C}$.

Az így edzett első csoport szövete homogén martensit, a második csoporté finom szemű martensit és az austenit szemcsék körül kivált karbidháló. A hálós szekunder cementit többnyire nem tűrhető meg az edzett szövetben. Mindig fontos követelmény ez pl. a nagy fajlagos felületi nyomások keletkezésekor, ami a golyós és görgős csapágyaknál fordul legtöbbször elő. Teljesen eltüntethető a szekunder cementit-háló a hipereutektoidos acél edzett szövetéből, ha az acél karbidtartalmát az edzéshez való hevítés előtt begömbösítik (10.3. pont 180. ábra). Ilyenkor az edzés előtt az acél kiindulási szövete sferoidit, szemcsés perlit. Az edzési hőmérséklet $A_{c1} + 30^\circ\text{C}$, de időzésre a szokásosnál több időt adnak: $\left(30 + \frac{a}{2}\right)$ perc, mialatt a finom



193. ábra. Az ötvözetlen acélok edzési hőmérsékletmezői

szemcsés eutektoidos γ -vassá való átalakulás az acél teljes tömegében végbemegy. Az austenit azonban nem lesz homogén, hanem benne fel nem oldott gömbös karbidok helyezkednek el a szekunder cementitnek megfelelő mennyiségben. Az edzés hűtési szakaszában ezek a karbidszemek csírahatásukkal az átalakulási hajlamot növelik, tehát a kritikus hűtési sebességet is növelik. Az ilyen acélt üvegkeményre 10% nátronlúgos vízben lehet edzeni. Az edzett szövet karbidszemeket tartalmazó finom szemű tús martensit, tehát kiváló, igen nagy felületi nyomások viselésére alkalmas edzett szövet.

Az edzést követő megeresztés célja, hogy a 100 °C alá folyamatosan hűtött acél tetragonálissá vált martensitjét szabályossá alakítsuk és ezzel a fölös saját feszültségét csökkentsük. Ez a hatás igen rövid idő, percek alatt bekövetkezik, ha az edzett acél hőmérsékletét 150 °C fölé növelik (5.10. pont). Az ilyen legkisebb hőmérsékletű megeresztés gyakorlati végrehajtása a következő módokon történhet: 1. Olajban való főzés $\frac{1}{2}$ —1 óráig. 2. Légekavarásos megeresztő kamrás kemencében való hevítés 1—2 órán át. 3. Az edző közegben való hűlést az edzett darab elfeketedése után megszakítják és a darab belsejéből kiáramló saját meleggel eresztik meg. 4. Az edzett darab felületén egy kis részt fémesre köszörülnek és a darabot alulról fűtött forró fémlapra helyezik addig, míg a csiszolt felület sárga futtatási szint nem kap. 5. A finom élű szerszámokat, marókat menetfúrókat ugyanígy, de fűtött homokfürdőben eresztik meg.

11.2. Ötvözött acélok edzése a folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramok alapján

A kissé ötvözött acélokra az edzésnek előző pontban ismertetett szabályai értelemszerűen érvényesek addig, míg az ötvözés mérve az Fe—C egyensúlyi diagram vonalait csak kevéssé módosítják. A több alkotós acél egyensúlyi diagramjának azonban nincs értelme. Az összes acélok, de elsősorban az ötvözött acélok hőkezelésének művelettervezését a minőségi gyártás igényeit kielégítő szabotossággal az átalakulási diagramok alapján lehet végezni.

A folyamatos hűtésű edzés művelettervezésének alapja az acél folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramja. Ezeket a diagramokat 4—5 mm átmérőjű hengeres próbatestek dilatométer-görbéivel vették fel olyan műszerrel, mely az átalakulási pontok jelzése mellett a próbadarab lehülési görbét is regisztrálta. Az így felvett diagramokból akkor lehet a folyamatos hűtéssel végzett hőkezelési folyamatoknál keletkező szövetre és keménységre elegendő pontossággal következtetni, ha a tényleges munkadarabokban a lehülési görbék elegendő pontossággal közelítik meg a diagramok görbéit.

E kérdés tisztázására alapos kutatómunkát végzett *F. Wever, A. Rose és W. Strassburg* [15]. Felvették 50 mm átmérőjű hengeres acélrúd keresztmetszetének a felülettől 5, 10, 15 mm-re levő

A W2 MSZ 4352-56 jelű melegmegmunkáló acél a W3-tól csak nagyobb, 9–10% W-tartalmában különbözik. Ez a különbség karbidjainak állandóságát növeli. Olajban 980 °C-ról, fújt levegőn 1080 °C-ról edzhető.

11.4. Maradékaustenit és átalakítása. Mélyhűtés

A folyamatos hűtéssel végzett edzésnél az austenitnek martensitté való átalakulása a hőmérsékletnek az M_s hőmérséklet alá csökkenésekor lassan indul meg, majd gyorsul és a hűlés utolsó szakaszában ismét lelassul. Az átalakulás teljes befejezése igen hosszú időt vesz igénybe. Az austenit általában sosem alakul át teljes mennyiségében martensitté, hanem több-kevesebb mennyisége visszamarad az edzett acélban. *Az edzéskor, általában a γ -mező hőmérsékletéről való lehűléskor át nem alakult austenitet maradékaustenitnek hívják.*

A maradékaustenit keletkezésének az átalakulás lelassulásán kívül még az az oka is van, hogy a martensitátalakulás M_s hőmérsékleten csak megindul és egy jóval, szénacéloknál 250–300 °C-al kisebb M_f hőmérsékleten fejeződik be. Ez a hőmérséklet egyes acélfajtáknál 0 °C alatt is lehet, így a környezeti hőmérsékletre való hűléssel, pl. 20 °C hőmérsékletű vízben vagy olajban való hűtéskor a martensitképződés be sem fejeződik.

A 91. ábrából, mely az ötvözetlen acélok M_s és M_f hőmérsékleteinek a C-tartalommal való változását mutatja, azt olvashatjuk ki, hogy az ötvözetlen acélokban az austenit martensitté való átalakulása a 0,6% C-nál többet tartalmazó acélokban nem fejeződhet be, ha 20 °C hőmérsékletű közegben végezzük az edzést. Az így visszamaradó austenit a környezet hőmérsékletén túlhűtött állapotban van, a hőmérsékletnek megfelelő egyensúlyihoz képest nagyobb az energiaszintje, tehát átalakulni igyekszik. Átalakulása a 20 °C-on végbemenő izotermás átalakulás lehet, amely ezen a kis hőmérsékleten csak igen lassan, évek alatt mehet — legtöbbször csak részben — végbe. A martensit fajtérfogata nagyobb az austeniténél, az átalakulás tehát térfogatnövekedéssel jár. Ennek méretváltozás és elhúzódás a következménye, ami idomszereknél, mérőműszereknél selejtessé válásukat okozhatja. De káros a *maradékaustenit* az edzett acélban azért is, mert keménysége (HV 400–500 kp/mm²) kisebb a martensit keménységénél és így csökkenti a keménységét olyan alkatrészeknek, amelyek pedig üvegekeménynek kell lennie: pl. golyóscsapágy részeinek.

A maradékaustenit martensitté való átalakítását legegyszerűbben úgy végzik, hogy az edzés hűtési szakaszát folytatják az M_f hőmérsékletig. Gyakorlatilag az edzés hűtőközegében a környezet hőmérsékletére lehűlt acéltárgyat ún. *mélyhűtésnek* vetik alá.

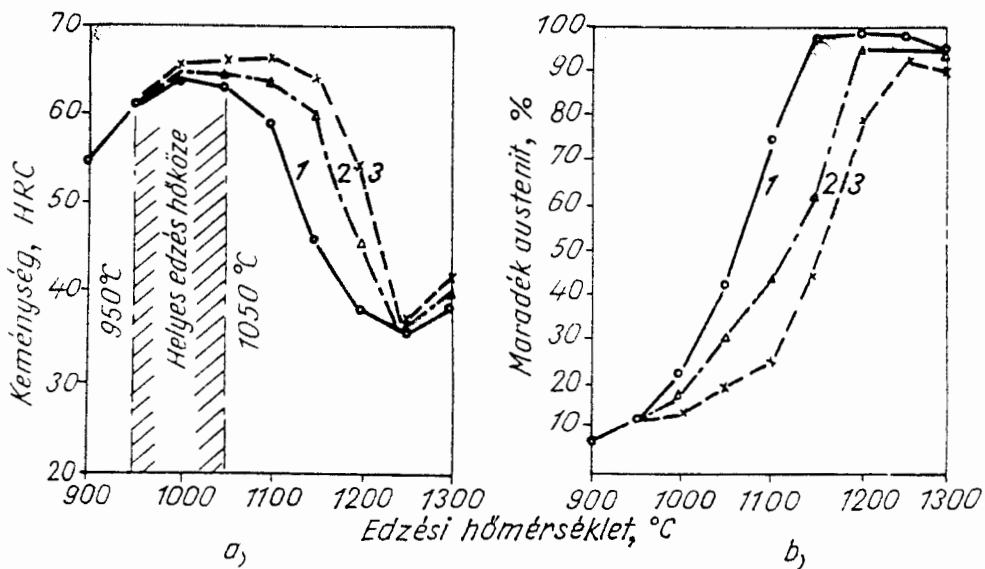
A mélyhűtést legcélszerűbben üvegyapottal szigetelt mélyhűtő kádban lehet végezni denaturált szeszben oldott száraz jéggel (szilárd CO₂) készített fürdőben.

Egy liter denaturált szesz hőmérsékletét 800 p száraz jég $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra csökkenti. Célszerű egy $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os előhűtő fürdőt is használni, mert a hirtelen hűtés éppúgy saját húzófeszültségeket kelt, mint a hirtelen hevítés, de nem a magban, hanem a kéregben, ahol a hirtelen keresztmetszet-változások és beszűrások helyein könnyen keletkezhetnek repedések.

A maradékaustenitnek az a tulajdonsága, hogy a hűtés megszakítása stabilizálja, átalakulását gátolja. Ezért a mélyhűtést az edzés befejezése után azonnal, de legalább fél órán belül kell elvégezni.

A kezelést megfelelő védőruhában kell végezni és a mélyhűtött munkadarabot pusztán kézzel nem szabad érinteni, mert az fagysérülést okoz. A mélyhűtés időtartama a hőkiegyenlítődésig tart. További mély hőmérsékleten való tartás felesleges, mert a maradékaustenit az M_f hőmérsékleten azonnal martensitté alakul.

A maradékaustenit mennyisége ugyanazoktól a tényezőktől függ, mint az austenit stabilitása: az acél összetételétől, és az edzés hőmérsékletétől. A C-tartalom éppúgy, mint az acélötvözők növelik a mennyiségét. Az ötvöztelen acélokban csak néhány %, az erősebben ötvözött acélokban 10%, gyorsacélban 30%-nál is több a



211. ábra. Az 1,75% C-, 13% Cr-tartalmú acél (K1) a) keménységének, b) maradékaustenit mennyiségének változása az edzés hőmérséklete és a mélyhűtés függvényében. 1. olajban edzve, 2. olajedzés után $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3. $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on mélyhűtve (F. Rapatz, H. Krainer, K. Svodoba [16])

maradékaustenit mennyisége. A hűlési sebesség is fokozza a felső kritikussig, annál nagyobb hűlési sebességnél ismét csökken.

Sokkal nagyobb hatása van a maradékaustenit mennyiségére az edzési hőmérséklet növelésének. Igen szemléltetően igazolja ezt a 211. ábra, mely egy K1 típusú, 1,75% C-, 13% Cr-tartalmú acél keménységeit és a maradékaustenit mennyiségét

mutatja 20 °C-on végzett olajedzés, azt követőleg —75 °C-on és —180 °C-on végzett mélyhűtés után.

A 211. ábra igazolja egyúttal erre az acélra az előbbieken levezetett edzési hőmérséklet határok helyességét. Mutatja továbbá azt, hogy, ha az edzés hőmérsékletét 1200 °C fölé növeljük, akkor nemcsak a maradékaustenit mennyisége nő meg 99%-ra, de annak stabilitása is oly nagy lesz, hogy még a —180 °C-on végzett mélyhűtés sem képes csak 20%-ot, 1250 °C edzési hőmérsékletnél pedig csak 7—8%-ot martensitté alakítani. Az ilyen stabil austenitet csak 500 °C-on való megeresztéssel lehet átalakítani ugyanolyan módon, mint azt majd a gyorsacéloknál megismerjük. A —180 °C-on végzett mélyhűtés közege a folyékony oxigén. Az ebben történő mélyhűtés előtt a munkadarabokat gondosan zsírtalanítani kell, mert a zsír és olaj oxigénnel robbanásszerűen ég el.

11.5. Edzési feszültségek és elhárításuk

A gyors hűtés az acélban igen nagy feszültségeket kelt, melyek három okra vezethetők vissza: kristályrács-feszültségre, a mag és a kéreg különböző szövetszerkezetei között fellépő feszültségre és a zsugorodási feszültségre.

Kristályrács-feszültségek két okból keletkezhetnek: a tetragonális martensit térrácstágító hatásából és a C-atomoknak az α -rácsban való bennrekedése okozta feszítő hatásából. Az első térrács-feszültség mint felesleges túlfeszültség káros, tehát 150—200 °C-on végzett megeresztéssel mindig meg kell szüntetni. A második térrács-feszültség az egyes kristályok között egyensúlyban van és így nem okoz ún. irányított, káros feszültségeket, hanem ellenkezőleg ezek azok a hasznos feszültségek, melyek az edzés okozta keménységnövekedést előidézik.

A különböző szövetszerkezetek között, tehát a martensites palást és a bainit-perlites mag között már irányított feszültségek lépnek fel, melyeknek oka az, hogy a martensites köpeny fajtérfogata nagyobb a perlites magrészt fajtérfogatánál. Ez a feszültség tehát irányított feszültség, mely a magban káros húzófeszültségeket okoz. Jellemzően fogva csak a teljesen át nem edződő acéloknál, főleg az ötvözetlen acéloknál lép fel és növeli az edzés következtében esetleg beálló repedések veszélyét. Legnagyobb mértékben a hipereutektoidos szénacéloknál érezteti hatását.

A legnagyobb repedési veszélyt a zsugorodási feszültségek okozzák, mert ezek adják a legnagyobb irányított feszültségeket, melyek minden edzett tárgyban, tehát az egész keresztmetszetükben átédzett tárgyakban is fellépnek. Oka a köpeny és mag felhevítés közben való hőtágulásának és lehűlés közben való zsugorodásának időbeli eltolódása. Lehűlés közben ugyanis először a gyorsabban lehűlt palást igyekszik összehúzódnival, de ebben a melegebb mag akadályozza. A lehűlés első periódusában tehát a palástban húzó-, a magban nyomófeszültségek lépnek fel, mely utóbbiak az akkor még nagyobb hőmérsékletű és így könnyebben alakítható magot deformálják. A lehűlés végén a palást nagyobb térfogaton rögzítődve a később lehűlt mag

összehúzódását akadályozza. A lehűlés végső szakaszában tehát a palást nyomó-, a mag húzófeszültség állapotába kerül.

Még nagyobb helyi feszültségtorlódások lépnek fel abban az esetben, ha a tárgy-
nak vékony, kiálló részei, vagy lap alakú szerszám esetén lyukak és kivágások
egyenlőtlen elhelyezése miatt nagy keresztmetszet-változásai vannak. Különösen
magnöveli a feszültséget, ha a vékonyabb részek éles sarkokkal csatlakoznak a
nagyobb tömegű anyagrészekhez. Edzési alapszabály tehát, hogy a tárgyat mindig
a vastagabb felével kell először a hűtőfolyadékba mártani és hogy a vékonyabb
nyúlványok mindenkor legömbölyített sarkokkal csatlakozzanak a nagyobb tömegű
anyagrészekhez. A vékony részek lehűlésének késleltetésére azokat sok esetben
agyaggal, azbesztszinórral védik a túl gyors lehűléstől. Éles hornyokba lágy acél-
huzalt rögzítenek.

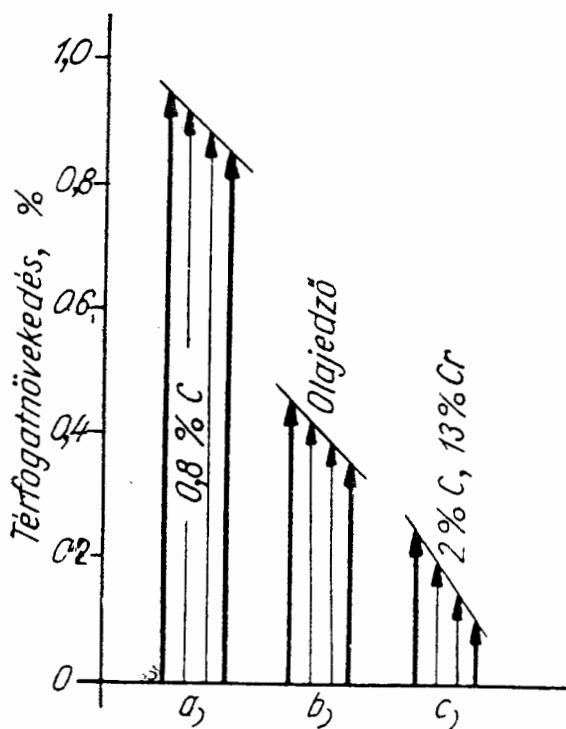
A zsugorodási feszültségek az edzett darabban olyan méreteket ölthetnek, hogy
az, ha az edzés után még ép marad, később külső erőhatás nélkül önmagától is meg-
repedhet. Éppen ezért az edzés után lehe-
tőleg azonnal el kell végezni a célszerűen
megválasztott hőmérsékletű megeresztést.

A legnagyobb edzési saját feszültségek
keletkeznek a nagyméretű, ötvözetlen
vagy kissé ötvözött acélokban, melyek-
nek edzési hűtőközege a víz. Oka ennek
egyrészt az, hogy a gyors hűtés miatt a
magrész hűlési sebessége a 201. ábra sze-
rint lényegesen kisebb a palásténál, más-
részt az, hogy a martensit-átalakulás a
vízedzésű acéloknál nagyobb térfogatnö-
vekedést okoz, mint a közepesen ötvözött
olajedzésű, és az erősen ötvözött léged-
zésű acéloknál (212. ábra).

Az austenit és átalakulási termékei faj-
térfogatainak növekvés szerinti sorrendje:
austenit — perlit — bainit — martensit.

Legnagyobb a különbség tehát az austenit
és a martensit fajtérfogatai között. E tér-
fogatkülönbség hatása edzés közben az
edzett munkadarab ama részében jelent-
kezik, ahol a martensit képződik, tehát
vízedzésű acélnál a kéregben, légedzésűnél
az egész keresztmetszetben. A martensit-

átalakulás térfogatnövelése a vízedzésű acél zsugorodási feszültségeit a hűlés első
szakaszában csökkenti. A hűlés befejező szakaszában azonban növeli, mert a mag
perlitté alakulva kisebb fajtérfogatú, mint a martensites kéreg.



212. ábra. Martensit-átalakulás okozta térfogatnövekedés különböző ötvöztetésű szerszámacélban. a) 0,8% C-tartalmú ötvözetlen, vízedzésű, b) közepesen ötvözött, olajedzésű, c) 2% C-, 13% Cr-tartalmú (K1) erősen ötvözött, légedzésű szerszámacél (Frehser és Lowitzer után [17])

Az ötvözetlen és kissé ötvözött acél edzési feszültségét növeli az a tény, hogy a martensitátalakulás okozta térfogatnövekedés ezeknél 2—3-szor akkora, mint a közepesen és erősen ötvözött acéloknál. Legnagyobb a térfogatnövekedés az eutektoidos acéloknál, melyeknél megközelíti az 1%-ot. Ezt mutatja a 212. ábra, mely szerint a martensitátalakulás térfogatnövekedése a) az eutektoidos ötvözetlen acélnál 0,85—0,95%, b) a közepesen ötvözött (olajedzésű) szerszámacélnál 0,35—0,45% és c) az erősen ötvözött (2% C, 13% Cr) ledeburitos króm szerszámacélnál csak 0,1—0,25%.

A 212. ábra is magyarázza azt a jelenséget, hogy az edzési repedés mindig a hűtés végső szakaszában jelentkezik. Igazolja azt is, hogy a legnagyobb edzési feszültség az eutektoidos acélban keletkezik, ezért az ilyen acélból készült munkadarabok edzésénél legnagyobb a repedés veszélye. Különösen az ötvözetlen és kissé ötvözött acéloknál, amelyeknek az izotermás átalakulási diagramja egész közel, 1—10 secnyira van a hűlés kezdetét jelző függőleges tengelytől, az edzési repedés elkerülése — ahol annak feltételei: éles sarkok, nagy keresztmetszetváltozás megvannak — nagy technológiai fegyelmet, szakértelmet és ügyességet követel.

Az ilyen gyors átalakulásra hajlamos, nagy kritikus hűtési sebességű acélok edzésének első kötelező szabálya, hogy a tetragonális martensitet eltávolító megeresztést közvetlenül az edzés után kell végezni.

Több azonos darab edzésénél kísérletileg megállapítják, mennyi ideig kell a hűtővízben tartani a darabot, hogy 200 °C alá hűljön. Ez idő elmúltával kiveszik a vízből és a belsejéből kiáramló meleggel megeresztve megakadályozzák a tetragonális martensit keletkezését. Ez a „megszakított edzés”.

Felhasználják azt a törvényszerűséget, hogy a martensitátalakulás az M_s hőmérséklet alá való hűtésnél a hűlés sebességétől függetlenül megtörténik. Ezért az eutektoidos és hipereutektoidos acélból készült tárgyakat csak 300—500 °C-ig (teljes elfeketedésig) hűtik vízben, majd olajba helyezve fejezik be az edzést. Ezt az eljárást „tört-edzés”-nek, vagy a „vízből-olajba edzés”-nek nevezik.

Csökkenteni lehet a vízedzés repedést okozó hevességét azzal is, hogy a hűtővíz felületére olajat öntenek. Ekkor a bemártott acéltárgy felületét vékony olajfilm védi a túl gyors hűléstől.

Az edzési repedések leghatásosabb elhárítása ötvözött acéloknál az ún. „melegedző” eljárásokkal, a lépcsős és az izotermás edzéssel sikerül.

11.6. Melegedzés: lépcsős és izotermás edzés

A melegedző eljárások helyes gyakorlati alkalmazásának irányító elméleti alapját az acélok izotermás átalakulási diagramjai képezik. Az első izotermás átalakulási diagram, az eutektoidos acél C-görbéje, *Davenport* és *Bain* kutató munkája után csak 1933. évben vált „S”-görbe néven ismertté. A többi acél C-görbéit csak a következő évtizedekben dolgozták ki úgy, hogy ma már majdnem minden acéltípus C-görbéjét ismerjük.

A melegezésnek, mint az edzési repedéseket elhárító edzési eljárásnak gyakorlati alkalmazása 50 évvel megelőzte a C-görbe kidolgozását. (5,3 pont). A melegedző eljárások az edzési repedéseket azzal a fogással hárítják el, hogy az edzési hőmérsékletre hevített acéltárgyat az M_s hőmérsékletnél nagyobb hőmérsékletű közegben hűtik. A hűtőközegen legalább addig tartják, míg a palást és mag hőmérséklete kiegyenlítődött. Ezzel a darab feszültségmentes állapotban folytathatja további lehülését. A lehülés befejező szakasza, az edzési feszültségek szempontjából legveszélyesebb M_s hőmérséklet átlépése, tetszőleges lassúsággal történhet. A melegedző eljárásoknak két fajtája használatos: a lépcsős edzés és az izotermás edzés.

A lépcsős edzés vagy termáledzés célja, hogy az acéltárgynak a legnagyobb (martensites) keménységet adja, de úgy, hogy az edzési feszültségeket a minimumra csökkentse.

A lépcsős edzés alkalmazható minden olyan acélnál, melynek izotermás C-görbét az ötvözők elegendő mértékben jobbra tolták. Hogy a C-görbe helyzete alkalmas-e az acélt a lépcsős edzésre, azt a hűtőközeg és anyagvastagsághoz tartozó lehülési görbéknek a C-görbébe való berajzolása, átlátszó lapra rajzolt lehülési görbe fedésbe hozása útján lehet eldönteni. Elegendő az orrponthőmérsékletekhez tartozó lehülési görbepontok bejelölése is. A sófürdő legnagyobb hűtőhatása a 191. ábra szerint közel egyenlő az olajével, ezért a hűtőhatását közelítőleg a 196., 197. és 198. ábrák olajhűtésre vonatkozó lehülési görbéivel vehetjük egyenlőnek és így ezeket használhatjuk fel a művelettervezésnél.

A lépcsős edzés lényege, hogy az edzési hőmérsékletre hevített acéltárgyat két lépésben hűtik le: első lépésben az M_s -nél nagyobb hőmérsékletű fém- vagy sófürdőben, majd hőkiegyenlítés után, de az átalakulás kezdete előtt nyugodt levegőn fejezik be a hűtést. Ezzel az első nagyobb hőesés okozta zsugorodási feszültség túlhűtött austenites állapotban kiegyenlítődik, és így az M_s hőmérsékleten át lassan lehülő acéltárgyban alig marad edzési feszültség.

A lépcsős edzés művelettervezését a 213. ábrán mutatjuk be a 2% C- 12% Cr-tartalmú K1 szerszámacél izotermás átalakulási diagramjának felhasználásával. Az ábra a lépcsős edzés két változatát mutatja.

Első változat (vezérpont L_1):

Hevítés 980 °C-ra, a K1 acél edzési hőmérsékletére.

Hőntartás vastagság-mm-enként 1 perc.

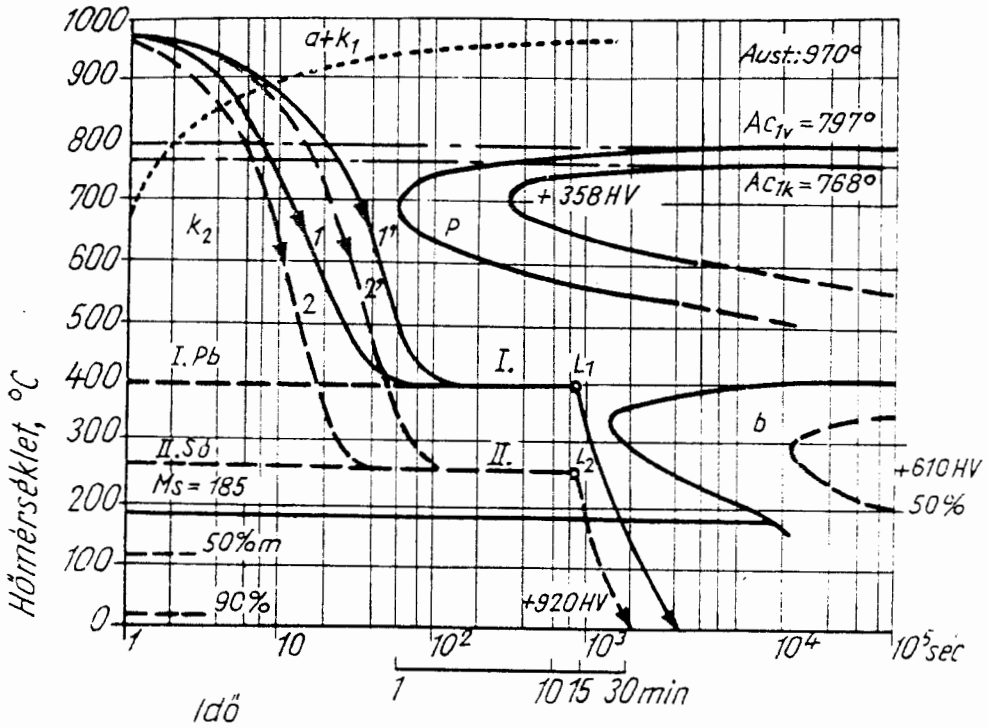
Hűtés 400 °C-ú ólomfürdőben.

Tartás az ólomfürdőben 15 perc.

Végelhűtés nyugodt levegőn.

Megeresztés 180 °C-ú olajban 1/2 órán át.

A második változat (vezérpont L_2), abban különbözik az elsőtől, hogy az első hűtési lépcsőhöz $250\text{ }^\circ\text{C}$ -ú közeget, mégpedig vagy sófürdőt, vagy nagy viszkozitású, nehezen gyulladó olajat használunk. Ennél a változatnál $150\text{ }^\circ\text{C}$ -szal kisebb a vég-lehűlés hőköze és így kisebb az edzett tárgyban visszamaradó saját feszültség.



213. ábra. K1 acélból készült kivágólap lépcsős edzésének művelettervezése

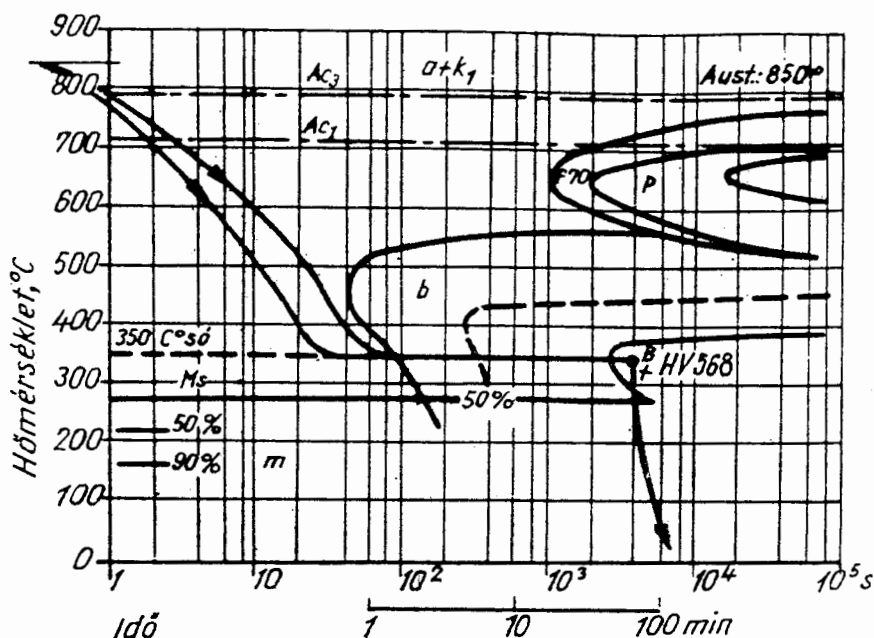
Az edző folyadék hőmérsékletének edzés közben való káros növekedését annak keringető hűtésével és megfelelő tömegével hárítjuk el. A fémfürdő 25—30-szor, a sófürdő és olaj 50-szer akkora tömegű legyen, mint a bennük edzett legnagyobb darab.

A 213. ábrában az 1 és 2 lehülési görbék a felület, 1' és 2' görbék az 50 mm vastag K1 acélból készült kivágólap középsíkjának lehülési görbéit jelentik. A műveletterv készítésére szolgáló L_1 és L_2 vezérpontokat, melyek a fürdő hőmérsékletét és a benne való tartás idejét szabják meg, lehetne közelebb, 5—10 percnyi távolságban is felvenni. A 15 perc a hőkiegyenlítődé és a feszültségek maradó alakváltozással való eltüntetésének biztonságát szolgálja.

A lépcsős edzés után az acél a környezet hőmérsékletére hűl és egész tömegében tetragonális martensitesre edződik. Ezért kell $180\text{ }^\circ\text{C}$ -on való megeresztéssel a tetragonalitást megszüntetni.

A melegedés másik eljárása, az izotermás edzés. Célja, hogy az edzendő munkadarab teljes keresztmetszetében nagy szívósságú, keménységben a martensithez közel álló szövetszerkezetet biztosítson. Ez a szövet a M_s hőmérséklet felett, annak közelében a túlhűtött austenitből izotermásan átalakuló bainit.

Az izotermás edzés olyan melegedés, amelynél a sófürdő hőmérsékletét az izotermás átalakulási diagram bainites bomlásának befejezését jelző görbeág orr-pontja magasságában célszerű választani, és a benne való időzés időtartamát a bomlás befejezéséig kell megszabni.



214. ábra. Az NK1 acél izotermás edzésének művelettervezése

Az izotermás edzés művelettervezését a 214. ábra az NK1 MSZ 4353 C = 0,5, Cr = 1, Ni = 1,8, Mo = 0,4, V = 0,15% összetételű szerszámacélra mutatja. Vezérpontul az előbbieket szerint a B pontot választjuk. Műveletek:

Hevítés az NK1 acél edzési hőmérsékletére 850 °C-ra.

Hűtés 350 °C-os sófürdőben.

Tartás a fürdőben kb. 1 óra 10 percig.

Végelhűtés nyugodt levegőn.

Az izotermás edzésnél az austenitessé tett acél teljes tömegében tús szerkezetű bainitté bomlik. Ezért ez után az edzés után nincs értelme a megeresztésnek. Az izotermás edzés eredményének értékelésére legalkalmasabb, ha a nyert keménységet összehasonlítjuk a folyamatos hűtéssel elérhető martensites keménységgel. A 214. ábra olyan NK1 acélhoz tartozik, melynek C-tartalma 0,52%. Ilyen acél 95%-os martensites keménysége a 199. ábra szerint HV = 711 kp/mm², 50%-os martensites keménysége HV = 503 kp/mm². Az izotermás edzéssel elérhető keménység a 214. ábra szerint HV = 568 kp/mm². Ez a 95%-os martensites keménység 90%-a, az 50%-osénak 110%-a, azzal kb. egyenértékű. A bainites szövet szívóssága azonban lényegesen nagyobb a martensitesénél. Ez az izotermás edzés előnye.