

Dr. Kovács Tünde Anna

ANYAGOK ÉS VISELKEDÉSÜK HEGESZTÉS SORÁN

Hegesztőtechnológus képzés

© Dunaújvárosi Egyetem–Ecotech Nonprofit Zrt., 2022

© Kovács Tünde Anna author, 2022

A kötet A Dunaújvárosi Egyetem Paksi Kompetencia- és Kutatóközpontjának kialakításához szükséges feladatok ellátásához kapcsolódó 1734/2019. (XII. 19.) Korm. határozat alapján kapott támogatásból valósul meg.

DUNAÚJVÁROSI EGYETEM
www.uniduna.hu
D=U=E PRESS

Kiadóvezető Németh István

Felelős kiadó Dr. habil András István
Felelős szerkesztő Nemeskéry Artúr

Tördelés Duma Attila
Készült a HTSART nyomdában
Felelős vezető Halász Iván

Dr. Kovács Tünde Anna

ANYAGOK ÉS VISELKEDÉSÜK HEGESZTÉS SORÁN

Hegesztőtechnológus képzés

DUE Press
Dunaújváros, 2022

TARTALOM

KÉPZÉSI CÉLOK	11
2. ANYAGOK ÉS VISELKEDÉSÜK HEGESZTÉS SORÁN	12
2.5. A SZERKEZETI ANYAGOK VISELKEDÉSE ÖMLESZTŐ HEGESZTÉSEKNÉL	12
2.5.1. ÖMLESZTŐ HEGESZTÉSEK HATÁSA AZ ANYAGRA	12
2.5.3. HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS AZ ÖMLESZTŐ HEGESZTÉSEKNÉL	13
2.5.6. KEMÉNYSÉG ÉS SZÖVETSZERKEZET	15
2.5.8. ELŐMELEGÍTÉS MEGHATÁROZÁSA	17
2.6. TÖRÉSI ELMÉLET HEGESZTETT KÖTÉSEKBEN	20
2.6.1. MELEGREPEDÉSEK	21
2.6.8. HIDEGREPEDÉSEK	24
2.6.10. RÉTEGES TÉPŐDÉS	27
2.7. TÖRÉSEK, A TÖRÉSEK KÜLÖNBÖZŐ FAJTÁI	29
2.7.1. ALAP IGÉNYBEVÉTELEK	29
2.7.2. TÖRÉSMECHANIKAI ELMÉLETEK	33
2.7.3. ÁLLAPOTTÉNYEZŐK HATÁSA A TÖRÉSRE	38
2.7.3. FÁRADÁSOS TÖRÉS	39
2.7.4. REPEDÉSI HALJAM VIZSGÁLATOK	45
2.9. SZERKEZETI (ÖTVÖZETLEN) ACÉLOK HEGESZTÉSE	53
2.9.1. HEGESZTHETŐSÉG	53
2.9.2. ÖTVÖZETLEN ACÉLOK JELÖLÉSRENDSZERE	54
2.9.3. STATIKUS TERHELÉSŰ ANYAGVIZSGÁLATOK	59



2.10. NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTÉSE	68
2.10.1. TERMOMECHANIKUSAN HENGERELT NAGYSZILÁRDSÁGÚ A CÉLOK HEGESZTHETŐSÉGE	69
2.10.2. NEMESÍTETT NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTHETŐSÉGE	72
2.10.3. DUÁL FÁZISÚ, TRIP ÉS TWIP ACÉLOK HEGESZTHETŐSÉGE	74
2.11. A SZERKEZETI ÉS NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ALKALMAZÁSA	77
2.11.1. SZERKEZETI ACÉLOK JELLEMZŐIK, HEGESZTHETŐSÉGÜK	78
2.11.2. ELŐMELEGÍTÉSI HŐMÉRSÉKLET EN 1011-2 A MÓDSZER	79
2.11.3. ELŐMELEGÍTÉSI HŐMÉRSÉKLET MSZ EN 1011-2 B MÓDSZER	81
2.11.4. PCM MÓDSZER, HIDROGÉN KONTROLL MÓDSZER (ITO AND BESSYO)	83
2.11.5. NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK CSOPORTOSÍTÁSA, JELLEMZŐIK, HEGESZTHETŐSÉGÜK	83
2.12. ERŐSEN ÖTVÖZÖTT, KÚSZÁS ÁLLÓ ACÉLOK	85
2.12.1. KÚSZÁS, HŐMÉRSÉKLET ÉS TERHELÉS HATÁSA	85
2.12.2. KÚSZÁSÁLLÓ, MELEGSZILÁRD ACÉLOK VÁLASZTÉKA (ÖTVÖZŐK HATÁSA)	87
2.12.4. MELEGSZILÁRD ACÉLOK HEGESZTÉSE	88
2.13. HIDEGSZÍVÓS ACÉLOK HEGESZTÉSE	91
2.13.1. HIDEGSZÍVÓS ACÉLOK TÍPUSAI	91
2.13.2. HIDEGSZÍVÓS ACÉLOK ALKALMAZÁSI TERÜLETEI	93
2.13.4. HIDEGSZÍVÓS ACÉLOK HEGESZTÉSE	95



2.14. BEVEZETÉS A KORRÓZIÓBA	97
2.14.1. KORRÓZIÓ ELMÉLETI ALAPJAI (KÉMIAI, ELEKTROKÉMIAI ÉS VEGYES KORRÓZIÓ)	97
2.14.2. KORRÓZIÓ TÍPUSAI	98
2.14.3. KORRÓZIÓVÉDELEM	100
2.15. ROZSDAÁLLÓ ÉS HŐÁLLÓ ACÉLOK HEGESZTÉSE	102
2.15.1. ROZSDAÁLLÓ ACÉLOK TÍPUSAI, ÖTVÖZŐK	102
2.15.2. PREN, CPT, CCT KORRÓZIÓS ELLENÁLLÁS JELLEMZŐK	111
2.15.3. HŐÁLLÓ ACÉLOK TÍPUSAI, ÖTVÖZŐK, ALKALMAZHATÓSÁGI TARTOMÁNYOK	114
2.15.4. KORRÓZIÓ MÉRÉSE	117
2.16. BEVEZETÉS A KOPÁSBA ÉS A VÉDŐ RÉTEGEKBE	118
2.16.1. KOPÁS TÍPUSAI	118
2.16.2. KOPÁSÁLLÓSÁG MÉRÉSI MÓDSZEREK	119
2.16.3. KOPÁSÁLLÓSÁG JAVÍTÁSI MÓDOK FELÜLET KÉMIAI ÖSSZETÉTEL VÁLTOZTATÁSSAL	121
2.16.4. KÉMIAI ÖSSZETÉTEL VÁLTOZTATÁS NÉLKÜL	123
2.16.5. VÉDŐRÉTEG FELVITELLEL	124
2.17. ÖNTÖTT VASAK ÉS ÖNTÖTT ACÉLOK HEGESZTÉSE	126
2.17.1. ACÉLÖNTVÉNYEK CSOPORTOSÍTÁSA ÉS HEGESZTÉSE	127
2.17.2. ÖNTÖTTVASAK JELÖLÉSE	129
2.17.3. GRAFITOS ÖNTÖTTVASAK CSOPORTOSÍTÁSA	131
2.17.4. FEKETE ÉS FEHÉR TEMPERÖNTVÉNYEK TULAJDONSÁGAI ÉS HEGESZTHETŐSÉGÜK	134
2.17.5. HEGESZTŐANYAG KIVÁLASZTÁS	134
2.18. A RÉZ ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE	138
2.18.1. RÉZ ÖTVÖZETEI	138
2.18.2. RÉZ ÉS SÁRGARÉZ HEGESZTÉSE	140
2.18.3. BRONZOK HEGESZTÉSE	141



2.19. A NIKKEL ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE	142
2.19.1. NI ÖTVÖZETEK	143
2.19.2. SZILÁRDOLDATOS ÖTVÖZETEK	144
2.19.3. REPEDÉSÉRZÉKENYSÉG	145
2.20. AZ ALUMÍNIUM ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE	147
2.20.1. ALAKÍTHATÓ ALUMÍNIUMÖTVÖZETEK	148
2.20.2. NEM HŐKEZELHETŐ ALUMÍNIUMÖTVÖZETEK	149
2.20.3. HŐKEZELHETŐ ALUMÍNIUMÖTVÖZETEK	152
2.20.4. ÖNTÉSZETI ALUMÍNIUMÖTVÖZETEK	155
2.21. A TITÁN ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE	157
2.21.1. A TITÁN TULAJDONSÁGAI	157
2.21.2. SZENNYEZŐK ÉS ÖTVÖZŐK HATÁSA A TITÁNRA	159
2.21.3. TITÁN ÉS ÖTVÖZETEINEK HEGESZTÉSE	160
2.22. KÜLÖNBÖZŐ (ELTÉRŐ) ANYAGOK KÖTÉSE HEGESZTÉSSEL	164
2.22.1. KEVEREDÉS SZÁMÍTÁSA	164
2.22.11. GRAFIKUS MÓDSZER	165
2.22.3. ELTÉRŐ ANYAGOK HEGESZTÉS PÁRNARÉTEGGEL	168
2.22.4. PLATTÍROZOTT LEMEZEK HEGESZTÉSE	168





KÉPZÉSI CÉLOK

A tananyag elsajátítása után a tanfolyam résztvevője:

A program keretében a hegesztőképzést elvégző jelölt átfogó ismeretekkel rendelkezik és a hegesztési technológia alkalmazását átlátja. A hegesztési technológia területén megkövetelt szintű szakértelemmel és készségekkel rendelkezik.

Képes:

- ◆ alacsony szintű komplex problémák megoldására,
- ◆ a hegesztési alkalmazások és a kapcsolódó szakmai tevékenységek vagy projektek részletes kezelésére,
- ◆ felelősségvállalásra a döntéshozatalért alacsony szintű, összetett munka vagy tanulmányi környezetben,
- ◆ felelősségvállalásra a hegesztő vagy a hozzá kapcsolódó személyzet feladatainak meghatározásában,
- ◆ képes kezelni az egyének és csoportok szakmai fejlődését.



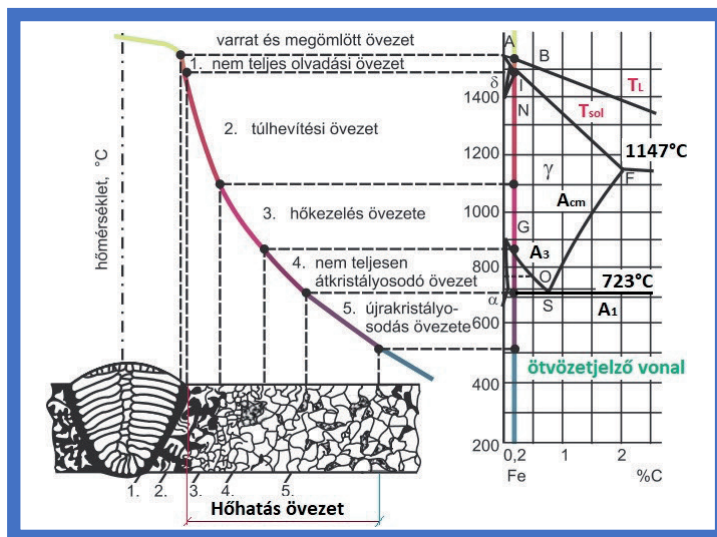
2. ANYAGOK ÉS VISELKEDÉSÜK HEGESZTÉS SORÁN

2.5 A SZERKEZETI ANYAGOK VISELKEDÉSE ÖMLESZTŐ HEGESZTÉSEKNÉL

2.5.1 Ömlesztő hegesztések hatása az anyagra

Ömlesztő hegesztés során a hegesztett anyag olvadt állapotba kerül, mely a kohászati ömledékre jellemző viselkedést mutat. A folyékony fém az alapanyaggal összeolvadva és megszilárdulva képez kötést melyet hegesztési varratnak nevezünk. A varrat kristályosodása jellemzően dendrites, az öntött fémek szerkezetének megfelelően. Ötvözetlen szerkezeti acélok varratának és a varrat tengelyétől távolodva a felhevült övezetnek a szerkezete egyensúlyi hűlést feltételezve megfelel az ötvözetlen acél Fe–C kétalkotós egyensúlyi diagram megfelelő hőmérsékletű szakaszaiban kialakult szerkezetnek. A 2.5.1. ábra mutatja a kialakult hegesztési varrat és a Fe–C egyensúlyi diagram közötti elvi összefüggést. Az ötvözetjelző vonalon 1600°C-tól a hűlés szerint (lefelé) haladva a következő szövetszerkezetek találhatók: Likvidusz-görbe felett T_L 1600°C-on az ömledék övezet található, ennek kristályosodása öntött dendrites jellegű lesz. A Likvidusz- és a szolidusz görbék közötti hőmérsékleten a részben kristályos vagy részben megolvadt övezet található, mely az alapanyag és az olvadt hegesztőanyag összeolvadását mutatja. A szolidusz hőmérséklet alatt már nincs olvadék, ez a terület 1100°C-ig a túlhevített övezet, a túlhevített övezetre jellemző a szemcsedurulás a nagy hőmérséklet miatt. 1100°C és az A_3 hőmérséklet között az acél normalizálásnak megfelelő hőmérsékletre hevül, innen hűlve normalizált finomszemcsés szerkezetet mutat. Az A_3 és A_1 közé hevült övezet a részben átkristályosodás övezete. Ebben a szakaszban a ferrit csak részben alakul ausztenitté.

2.5.1 ábra. Varrat kristályosodása az Fe–C-diagram szerint



A részben átkristályosodott zóna szövetszerkezete a normalizálthoz hasonló, szemcsedurulás nem jellemző. Az A_1 hőmérséklet alatti tartományban azonban újrakristályosodás jön létre a hidegen alakított fémek esetében.

A hőhatásövezetben kialakuló szemcseméretnek a mechanikai tulajdonságokra hatása van. A szemcseméret nagysága szoros összefüggésben áll az anyag mechanikai tulajdonságaival. A Hall-Petch-egyenlet szerint az anyag folyáshatára a szemcseátmérő négyzetgyökével fordítottan arányos, ahol ReH a folyáshatár, d a szemcseméret, k anyagtól függő tényező.

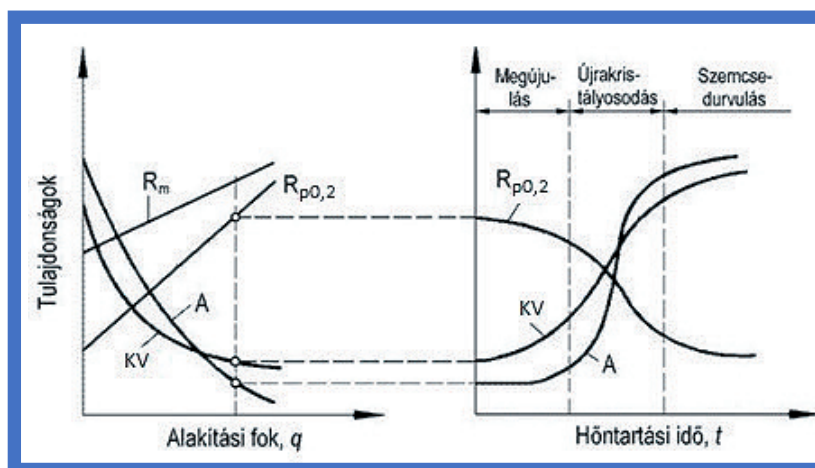


$$R_{eH} = \frac{1}{\sqrt{d}} k \text{ (MPa)}$$

A szemcseméret kialakulása a hőhatásövezet újrakristályosodási szakaszában függ a hegesztett acél előzetes hidegalakításának mértékétől. Fémek esetében 3–10% közötti alakítás esetén nagy lesz a kialakuló szemcseméret. Ennek oka, hogy a kismértékű alakítás hatására kicsi lesz a tárolt energia, így kevés újrakristályosodási csíra keletkezik. Egy bizonyos értéknél kisebb alakítást (3–10%) kritikus alakítási mértéknek nevezünk. A kritikus mértékű alakítás hatása az újrakristályosodás során szemcsedurvulás következik be. Ugyancsak szemcsedurvulást okoz, ha túl hosszú ideig marad a darab az újrakristályosodási hőmérséklet feleletti hőmérsékleten.

Az újrakristályosodási küszöbhőmérséklet, a fém olvadáspontjának Kelvinben kifejezett (természetes) értékének 0,4 szerese (40%-a). Az újrakristályosodás hatására kialakuló mechanikai tulajdonságokat a 2.5.2. ábra mutatja. A mechanikai tulajdonságok (folyáshatár, ütőmunka, szakadási nyúlás) változása függ az alakítás mértékétől és a hűntartás idejétől.

2.5.2. ábra. A mechanikai tulajdonságok változása az újrakristályosodás hatására

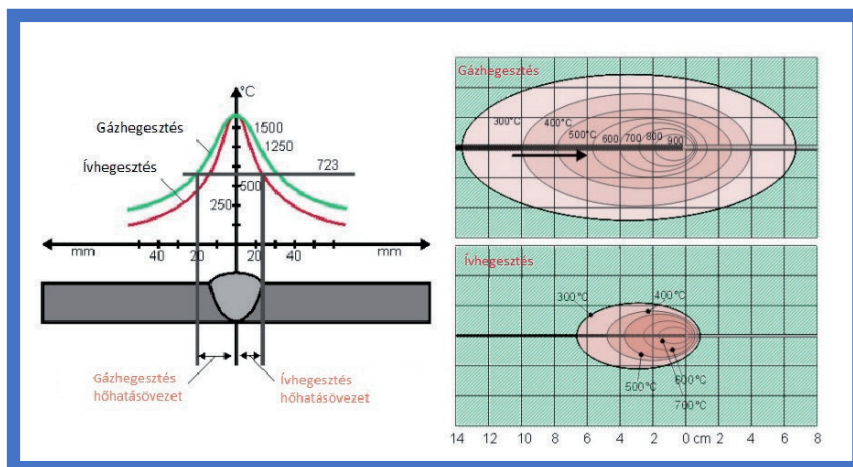


2.5.3 Hőmérséklet-eloszlás az ömlesztő hegesztéseknél

A hegesztési hőhatásövezet szélessége és a kialakuló szövetszerkezet, ezzel együtt a mechanikai tulajdonságok több tényezőtől függenek.

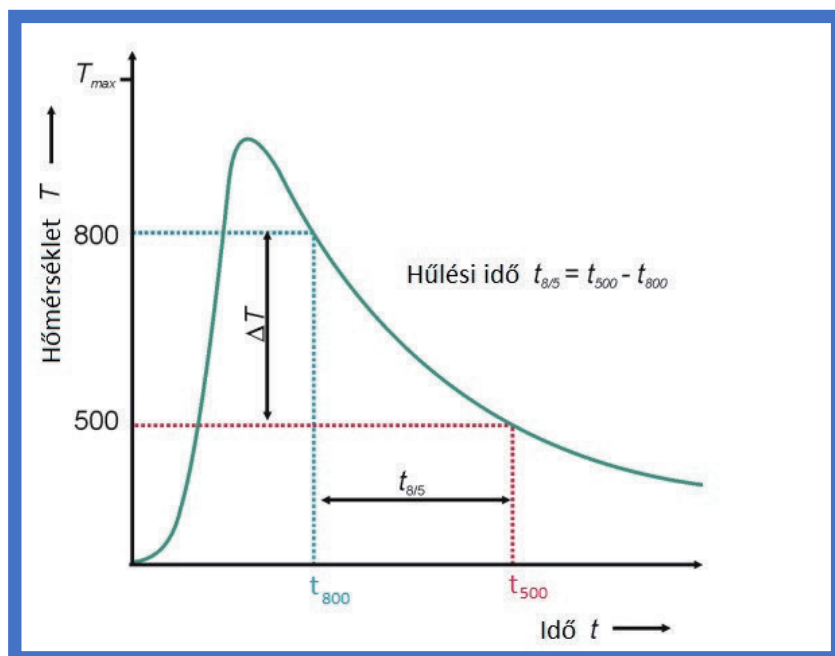
I. A hőhatásövezet szélessége függ a hőbevitel mértékétől (hegesztési eljárás és hegesztési paraméterek függvénye 2.5.3. ábra). Az ábrán látható izotermák kialakulása a hegesztés hőbevitelétől függ, az ábra csak az eljárások közötti különbséget mutatja, a hegesztési sebességet azonosnak feltételezve. Az ábra jól mutatja, hogy az ívhegesztés során kisebb a hőbevitel, keskenyebb a kialakuló hőhatásövezet, mint a gázhegesztésnél.

2.5.3. ábra. Hegesztési hőbevitel izotermák kialakulása gázhegesztésnél és ívhegesztésnél



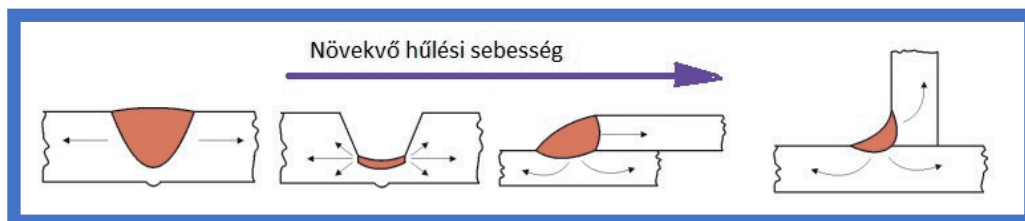
II. Függ a hegesztett alapanyag kémiai összetételétől. A kémiai összetétel miatt a darab hővezetése változhat, valamint a hűlés során bekövetkező nem egyensúlyi hűlés (edződés, részleges edződés) nem egyensúlyi szövetszerkezet kialakulását eredményezheti. A hűlési viszonyokat és ezek hatását a 800°C-ról 500°C-ra való hűlés időtartamával jellemezzük ($t_{8/5}$). A 2.5.4. ábrán a hegesztési hő hatására történő felhevülés és hűlés látható. A hűlési szakaszon a 800°C és 500°C közötti hűlési időt a vízszintes tengelyen lehet leolvasni.

2.5.4. ábra. A 800°C-ról 500°C-ra hűlési idő értelmezése a hőbevitel függvényében



III. A hegesztett darab vastagsága és a varrat kialakítása befolyásolja a varrat és a hőhatásövezet hűlését a hőelvonás miatt. Az egy, illetve több tengelyű hőelvonást, vagy kétdimenziós és három dimenziós hőelvonást az egyes varratkialakítások függvényében a 2.5.5. ábra. mutatja.

2.5.5. ábra. A hegesztett kötés kialakítása és a hűlési sebesség kapcsolata



2.5.6 Keménység és szövetszerkezet

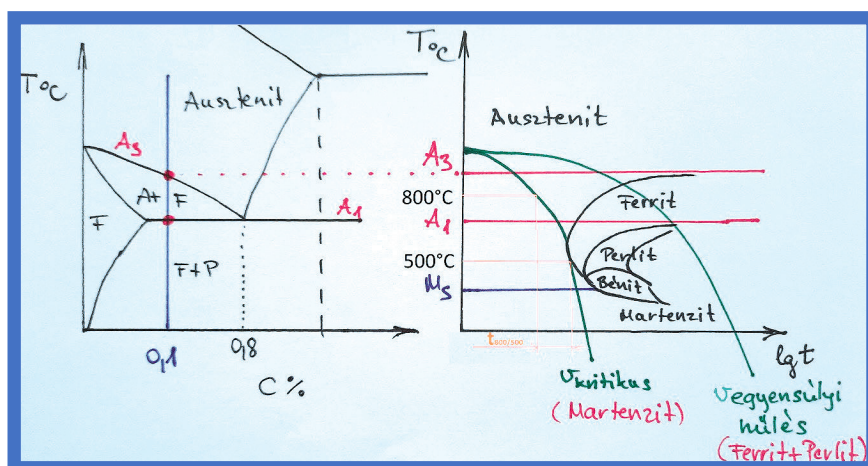
A nem egyensúlyi, folyamatos hűlési diagramon a $t_{8/5}$ hűlési idő ugyancsak értelmezhető. A 2.5.6. ábra egy közel $C=0,1\%$ tartalmú ötvözetlen acél egyensúlyi és nem egyensúlyi viszonyait mutatja be.

A Fe–C egyensúlyi diagramnak csak a bal alsó sarka látható, melyen az ötvözetjelző vonal az ausztenites állapotról történő egyensúlyi hűlést mutatja. Egyensúlyi hűlés eredménye ferrit-perlites szövetszerkezet. A folyamatos hűlési diagramon azonban két hűlési sebesség görbe is látható. A $v_{kritikus}$ hűlési sebesség eredményeként közel 100% martenzites szövetszerkezet képződik, míg a másik hűlési sebesség ($v_{egyensúlyi} < v_{kritikus}$) eredménye egyensúlyi szövetszerkezet (ferrit+perlit). A $v_{kritikus}$ hűlési görbe 800°C -ról 500°C -ra való hűlési szakasza a vízszintes tengelyen jelölt hűlési időt mutatja. A hűlési idő ebben az esetben kicsi, emiatt az ausztenitesre hevült hőhatásövezeti zóna a hegesztést követően gyorsan hűl és beedződik, nagy keménységű, martenzites szövetszerkezetű lesz. A hegesztést követő hűlés nem csak a levegő, mint hűtőközeg hatására következik be, de a hegesztett szerkezet önmagát is hűti. Nagy falvastagság esetén a hegesztett szerkezet anyagától függően a hőelvonás, ebből következően a hűlés, kritikus sebességű is lehet. A kialakuló szövetszerkezetet egyben a hegesztés megfelelőségét nagyon egyszerűen keménységméréssel ellenőrizhetjük. A keménység értéke adott kémiai összetételű acél esetében tájékoztatást ad a hűlési viszonyokról és a kialakult szövetszerkezetről. Ötvözetlen acélok esetében a martenzittartalom és a keménység közötti összefüggést az alábbi összefüggés írja le, ahol a szénttartalom (C) tömegszázalékban értelmezett:

$$HV_{10\max} = 983 \cdot C + 283$$

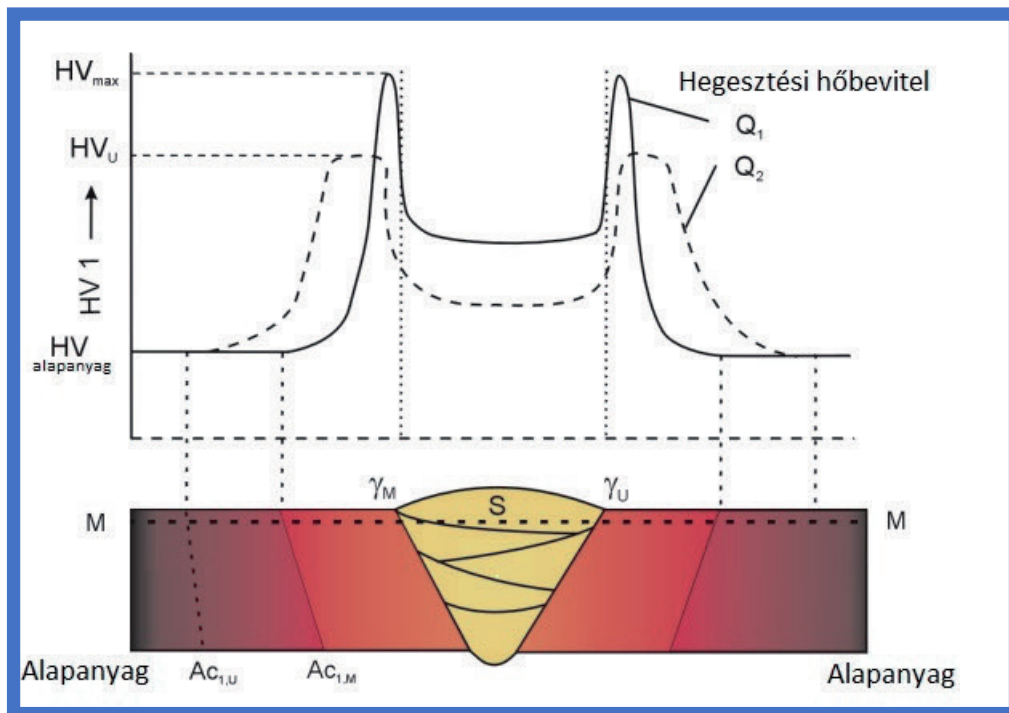
A maximális keménység tehát egy $C=0,1\%$ tartalmú ötvözetlen acél esetében $381,3 HV_{10}$. A szabvány ajánlása ezzel harmonizálva a hegesztett szerkezetek esetében maximálisan $380 HV_{10}$ keménységet enged meg.

2.5.6. ábra. Egyensúlyi és nem egyensúlyi hűlés elvi ábra



A hegesztett kötés keménysége az alapanyaghoz viszonyítva a varratban és a hőhatásövezetben eltérő lehet. A 2.5.7. ábra egy hegesztett varrat keménység-eloszlását mutatja az eltérő hőbevitel függvényében. A nagy hőbevitel Q ($Q_1 < Q_2$) esetén a varrat és a hőhatásövezet lassabban hűl, mint kis hőbevitel esetén. A hűlés erélyességétől függően kialakuló szövetszerkezet eredménye a keménység. Nagy keménységet eredményez a kis hőbevitel, valamint a gyors hűlés, ami martenzites szövetszerkezet kialakulásával jár.

2.5.7. ábra. Keménység-eloszlás a hőbevitel függvényében



Meg kell jegyezni, hogy a martenzit, nem egyensúlyi szövetelem. Emellett még képződhet bénit, mely szintén nagyobb keménységű, mint azonos széntartalmú acél esetében a ferrit-perlites szövet. A martenzitre jellemző, hogy rideg, kis alakváltozóképeségű szövetelem, melynek megjelenése a hegesztett szerkezetben (főként ötvöztelen szerkezeti acél esetén) káros. A martenzites átalakulás hatására a szerkezet belső feszültsége megnő, az anyag térfogata megváltozik, hidegrepedésre hajlamosabbá válik. Ahogyan a 2.5.7. ábra mutatja a keménység-növekedés a hőhatásövezet túlhevített zónájában jellemző, és ott várható a repedések kialakulása is.

A hűlési viszonyokra és a kialakuló keménységre az acél széntartalmának jelentős hatása van. Az ötvöztelen acélok esetében az egyensúlyi hűlésre 2.5.1. ábra érvényes. Az ötvözött acélok esetében, még akkor is, ha kis mennyiségű ötvözőt tartalmaznak a szénegyenérték számítása az irányadó, melynek alapján a várhatóan kialakuló varrat és hőhatásövezet mechanikai tulajdonságai becsülhetők.

A szénegyenérték meghatározást acéltípus szerinti összefüggéssel kell elvégezni. Kis ötvöző tartalmú, kis széntartalmú acéloknak az IIW és az Uwer-Höhne szerinti összefüggéseket használjuk.

Az MSZ EN 1011-2 az IIW ajánlása szerinti összefüggést tartalmazza, az összefüggésbe az acél ötvözőit tömegszázalékban kell értelmezni. A képlet használatára határt szab, hogy $C=0,05-0,25\%$, $Si=0,8\%$ max., $Mn=1,7\%$ max., $Cr=0,9\%$ max., $Cu=1\%$ max., $Ni=2,5\%$ max., $Mo=0,75\%$ max és $V=0,2\%$ max. értékig használható fel. $CE = 0,3 \dots 0,7\%$ között érvényes.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \%$$



A másik leginkább használatos összefüggés a CET (Uwer-Höhne) karbonegyenérték. Az összefüggés kidolgozása során kissé ötvözött, nagyszilárdságú acélokon végzett kísérletek után határozták meg. Az összefüggés felhasználható nem csak ötvöztelen acélokra, hanem finomszemcsés és gyengén ötvözött acélokra, nemesíthető acélokra és termomechanikusan kezelt acélokra, valamint vanádiummal kissé ötvözött acélokra is. Az összefüggés $CET = 0,2-0,5\%$ tartományban érvényes. A képlet használatára határt szab, hogy $C=0,05-0,32\%$, $Si=0,8\%$ max., $Mn=0,5-1,9\%$, $Cr=1,5\%$ max, $Cu=0,7\%$ max. $Ni=2,5\%$ max, $Mo=0,75\%$ max, $V=0,18\%$ max $Ti=0,12$ max. értékig használható fel.

A CET-összefüggés az alábbi:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \%$$

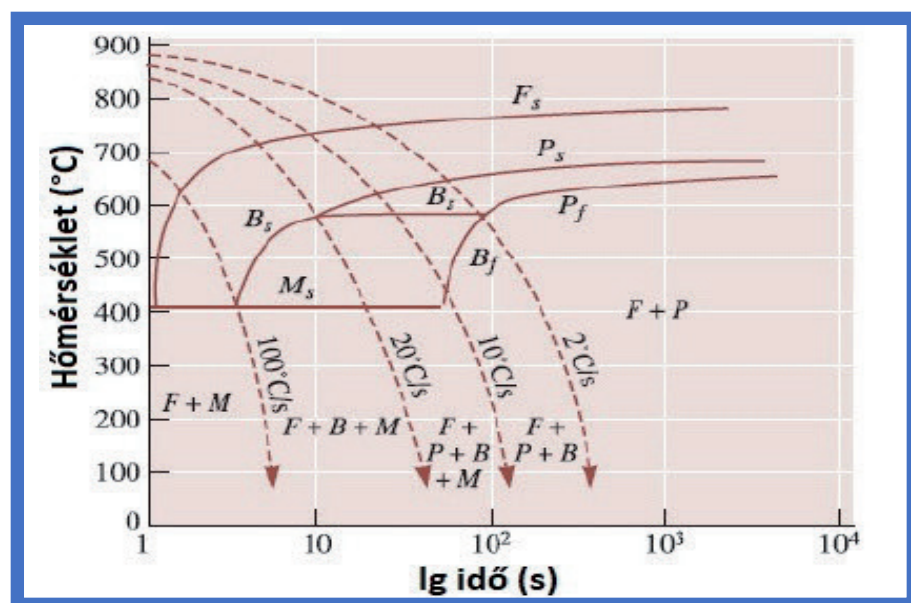
2.5.8 Előmelegítés meghatározása

A kis karbontartalmú alacsony ötvözésű acélok ömlesztő hegesztése problémákat jelenthet az ipari alkalmazásokban. Cél, hogy a varrat és a hőhatásövezet lassan hűljön le és egyensúlyi szövetszerkezet alakuljon ki. Továbbá „hideg repedési” hajlamot is okozhat a szövetszerkezet átalakulása (martenzites átalakulás) és a hidrogén bekerülése a varratba. A hőhatásövezet és a varrat megfelelő hűlését úgy érhetjük el, hogy előmelegítést alkalmazunk és több soros hegesztésnél a sorközi hőmérsékletet is ellenőrzés alatt tartjuk. Az előmelegítés hőmérsékletének meghatározási alapja a szénegyenérték meghatározása, mely az acél kémiai összetételéből számítandó, továbbá a hegesztendő darab falvastagságát is figyelembe kell venni.

Előmelegítés fontossága:

Az 2.5.8. ábrán egy folyamatos hűtési diagram látható. A hűlési sebességeket és a hatásukra létrejövő szövetszerkezetet is le lehet olvasni. Mivel ez egy $C=0,23\%$, $Si=0,01\%$, $Mn=0,25\%$ összetételű acél hűlési diagramja, még a $100^\circ/\text{s}$ hűtési sebesség mellett Ferrit+Bénit+Martenzit szövetszerkezet képződik. Hegesztést követően Ferrit+Perlit szövetszerkezetet kell elérni a varratban és a hőhatásövezetben is.

2.5.8. ábra. Kis karbontartalmú acél folyamatos hűtési görbéje



Sok kis karbontartalmú acél, hidrogén okozta hidegrepedési hajlamot mutat, ami az ausztenit 500-800 °C közötti átalakulási folyamata közben jelentkezik. A 800 °C-ról 500 °C-ra történő hűlési idő (t_{8-5} [s]) kialakuló szövetszerkezet határozza meg a repedésképződési hajlamot. A kialakuló szövetszerkezetben a Martenzit jelenléte nem megengedett!

Az előmelegítési hőmérséklet meghatározása a következő mintafeladat szerint végezendő el.

1. Szén egyenérték meghatározása, az *International Institute of Welding (IIW)* szerint (az alkalmazhatósági tartományt betartása mellett)

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \%$$

2. Diffúzióképes hidrogéntartalom meghatározása

A diffúzióképes hidrogéntartalom szerint öt csoportot különböztetünk meg, az adott eljárás, bevonat, fedőpor vagy portöltet alapján (2.5.9. táblázat).

2.5.9. táblázat. A diffúzióképes hidrogén átlagos tartalma

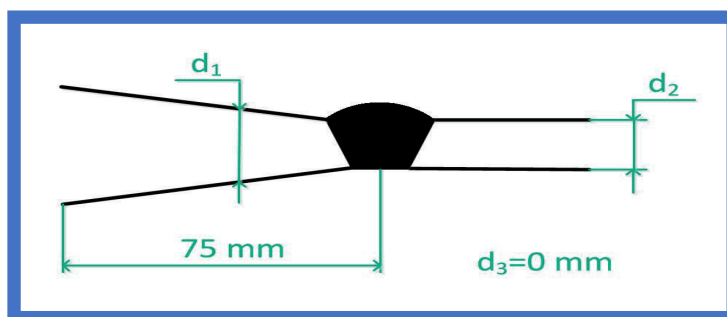
Jelölés	Hegesztési eljárás	Diffúzióképes hidrogén
A	Bevont elektródás, rutilos, cellulózos bevonattal	15<HD [ml/100g]
B	Bevont elektródás, bázikus bevonattal	10<HD<15 [ml/100g]
D	Bevont elektródás, bázikus bevonattal szárítva	3<HD<5 [ml/100g]
C	Huzalelektródás semleges/aktív védőgázos ívhegesztés	5<HD<10 [ml/100g]
D	Tiszta elektródával	3<HD<5 [ml/100g]
D	Volframelektródás védőgázos ívhegesztés	3<HD<5 [ml/100g]
E	Különleges előírások esetén	HD<3 [ml/100g]

3. Kombinált falvastagság meghatározása

A lemezvastagság alapján határozzuk meg.

Tompa varrat:

2.5.10. ábra. Kombinált falvastagság



4. Hőbevitel meghatározása Q (kJ/mm)

A hőbevitel tompavarrat kialakítására, PA-helyzetben.

$$Q = k \cdot ((U \cdot I) / v) \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/mm]}$$

Ahol:

U feszültség [V]

$U = 0,04 \cdot I + 20$ [V] (20–50 [V])

I áramerősség [A]

$I_{\text{heg}} = 40 \cdot de$ [A] (30–500 [A])

Huzal átmérő $de = 1,5\text{--}6$ mm

v hegesztési sebesség [mm/min]

$v_{\text{heg}} = 50\text{--}200$ [mm/min]

k hőbeviteli tényező [-]

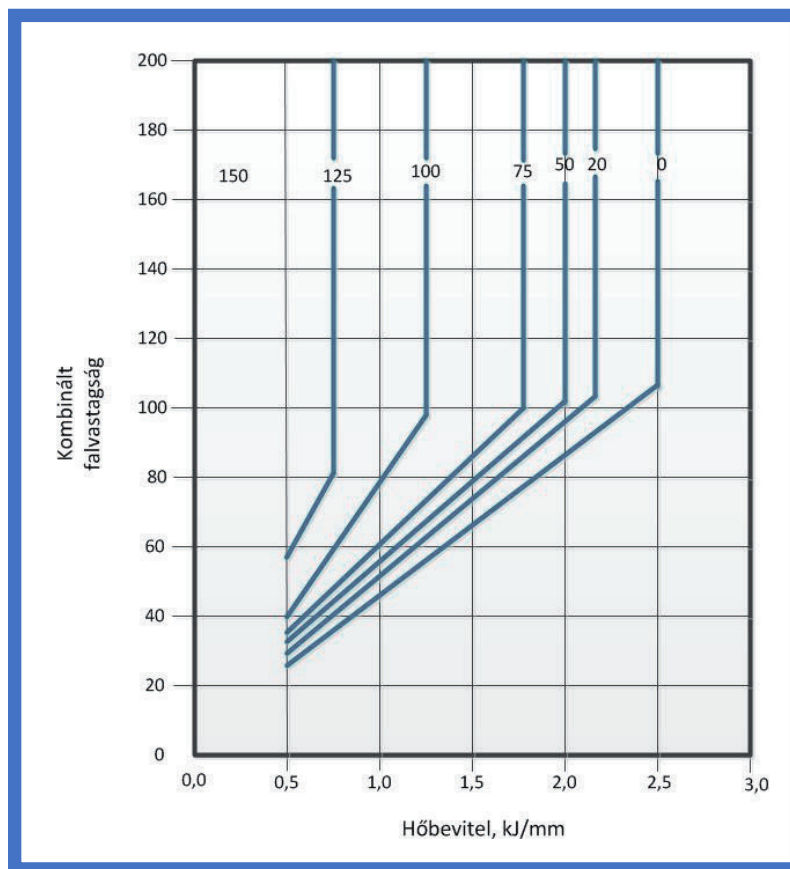
2.5.11. ábra. A k tényező értéke eljárás szerint

Hőbevitel k tényező, a hegesztési eljárások szerint		
Process No	Eljárás	Factor k
121	Submerged arc welding with wire	1.0
111	Kézi ívhegesztés bevont elektródával	0.8
131	Semleges védőgázos ívhegesztés	0.8
135	Aktív védőgázos ívhegesztés	0.8
114	Flux-cored wire metal-arc welding without gas shield	0.8
136	Flux-cored wire metal-arc welding with active gas shield	0.8
137	Flux-cored wire metal-arc welding with inert gas shield	0.8
138	Metal-cored wire metal-arc welding with active gas shield	0.8
139	Metal-cored wire metal-arc welding with inert gas shield	0.8
141	Volfrám elektródás ívhegesztés	0.6
15	Plazma ívhegesztés	0.6

Az előmelegítési hőmérséklet a számított értékek alapján az ábra segítségével határozható meg.



2.5.12. ábra. Diagram az előmelegítési hőmérséklet meghatározásához



2.6 TÖRÉSI ELMÉLET HEGESZTETT KÖTÉSEKBEN

A törés az anyagot alkotó ionok, atomok vagy molekulák közötti kapcsolat folytonosságának makroszkopikus méretű megszűnése, amelyet olyan mértékű mechanikai igénybevétel okoz, amely meghaladja a szilárd test belsejében a részecskék között ható kötőerőket.

A törés bekövetkezésének három részfolyamata:

- ◆ repedés keletkezése,
- ◆ repedés terjedése,
- ◆ törés.

A hegesztéskor keletkező repedések

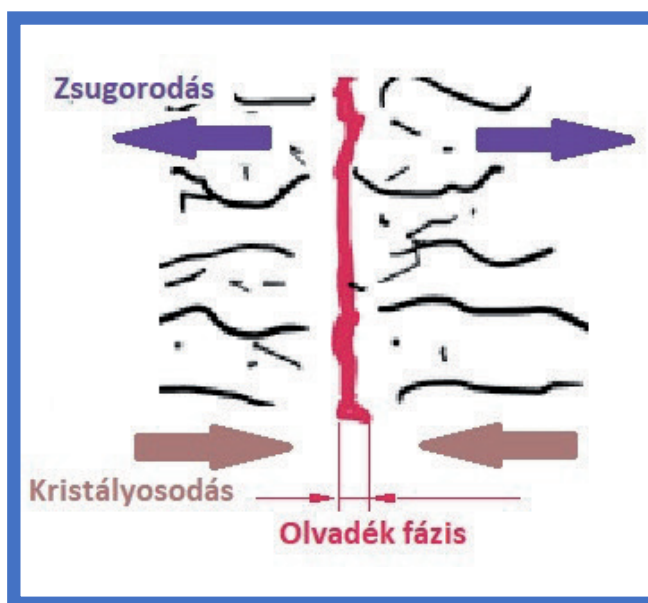
A repedés keletkezhet akkor is, ha változatlan mechanikai igénybevétel esetén az anyag repedés-szel szembeni ellenállása csökken. A repedés lehet inter- és transzkristallin jellegű, amelynek oka:

- ◆ A szemcsehatár gyengülése „meleg” (kristályosodási, likvációs) repedés, réteges tépődés];
- ◆ A szemcsén belüli ellenállás csökkenése (szilárdfázisú „edződési repedés” és a „hidrogén okozta repedés”).

2.6.1 Melegrepedések

A melegrepedés egyik jellegzetes oka a szemcsehatáron megjelenő kis olvadáspontú olvadt fázis a hegesztés során. A zsugorodásból és a kristályosodásból adódó ellentétesen ébredő húzófeszültség hatására a darab elreped (2.6.1. ábra). A melegrepedés két típusát különböztethetjük meg, egyik a **kristályosodási repedés**, másik pedig az **újrahevítési repedés (likvációs repedés)**. A kristályosodási repedés a megömlesztett anyag kristályosodása során képződik, jellegzetesen a varrat középvonalában, míg az újraömlesztési repedés a varratalapanyag-átmenetnél keletkezik.

2.6.1. ábra. Melegrepedés modellezése



A kristályosodási repedés a felületre kifutó, általában a varrat tengelyében található, szabad szemmel felismerhető. A kristályosodási repedés kialakulásában döntő szerepet játszanak a szennyező elemek (S, P, O). A kén a vassal kis olvadási hőmérsékletű (977°C) eutektikumot képez a dendritközi szemcsehatárok mentén. A repedésveszélyt a széntartalom mennyiségének növekedése növeli. A kén hatását Mn vagy Ca ötvözéssel lehet ellensúlyozni, ekkor MnS vagy CaS képződik, mely nem okoz melegrepedési veszélyt (2.6.3. ábra). Előnyös a széntartalom csökkentése is.

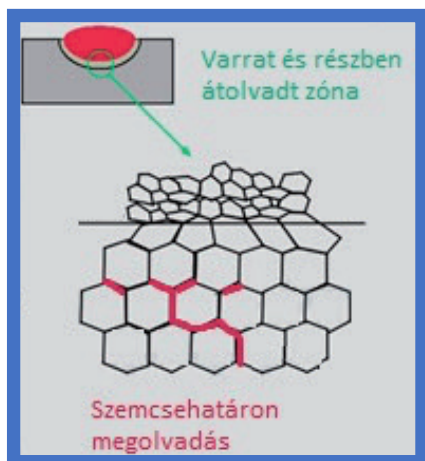
Újrahevítési repedések (liquation cracks) keletkeznek a hegesztésnél az alapanyagban a hegfürdőt határoló hőhatásövezetben, vagy a hegesztési varratok (többretegű hegesztésnél) alatt vagy mellett elhelyezkedő hőhatásövezetében a lehűlési fázisban. Ezek csaknem mindig a beolvadási vonallal közvetlenül kapcsolatban vannak és részben a beolvadás vonalán is átmenő kifutásuk van a heganyagba. Keletkezésük mindig kapcsolatban van folyékony fázisok a létrejöttével a szemcsehatárokon. Újrahevítési repedés veszélye szemcsefinomítással és a feszültségkoncentráció elkerülésével, csökkentésével kerülhető el. Meg kell jegyezni, hogy a hegesztéskor képződő likvációs repedések a szuperausztenites korrózióálló acélok, egyes alumíniumötvözetek és a nikkelbázisú ötvözetekben fordul elő. Likvációs repedések keletkezhetnek még melegsziárd acélok hegesztett kötéseinek utóhőkezelésekor is (2.6.2. ábra).

A hőhatásövezetben – amely korábban elkészített hegesztett sor is lehet –, a szemcsehatárokon feldúsult kis olvadáspontú anyag a hegesztési hő hatására megolvad, hűlés okozta zsugorodás hatására az olvadékkal burkolt szemcsék szétválnak.

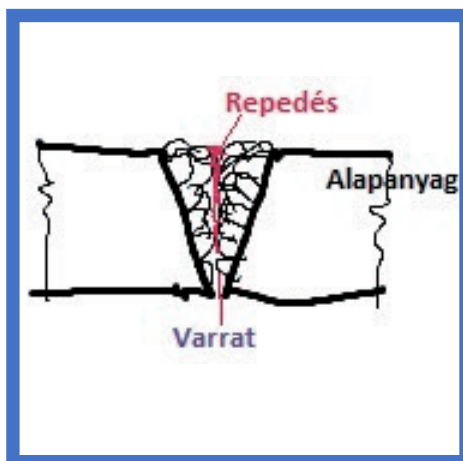
Másik alkalmazható repedésérzékenységi tényező a (Hot of Crack Susceptibility (HCS)). A repedésveszély akkor kicsi, ha $HCS > 4$.

$$HCS = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right)}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \cdot 100$$

2.6.2 ábra. Újrahevítési repedés

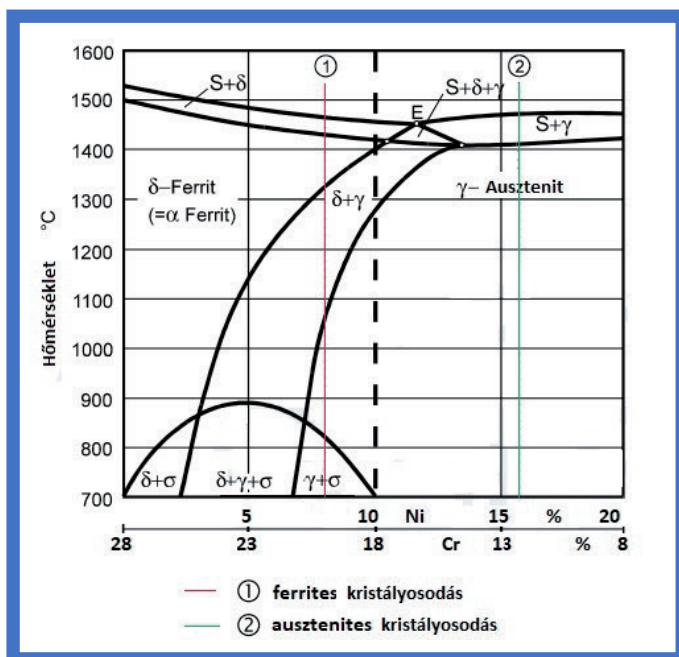


2.6.3 ábra. Kristályosodási repedés



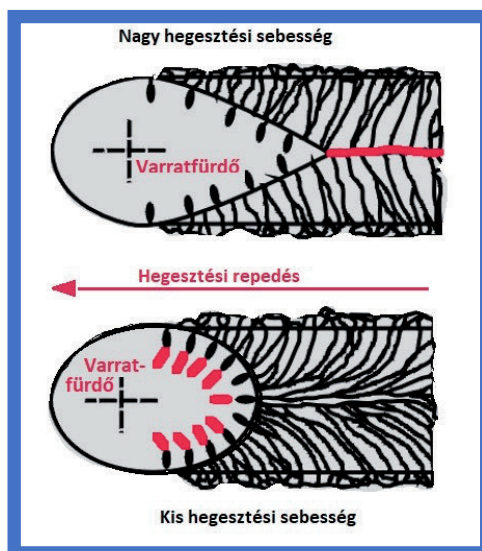
A kristályosodási repedésképződés igen jellemző az erősen ötvözött (Cr, Ni ötvöztetésű) ausztenites hőálló és rozsdamentes acélokra. A hegesztett varrat kristályosodása a delta ferrit kristályosodásával kezdődik (2.6.4. ábra 1. ötvözetjelző vonal szerint Cr=20%, Ni=8%) akkor az ausztenit képződés csak 1320°C alatt kezdődik meg ezért a repedés képződés elkerülhető. a 2. ötvözet azonban (Cr=12%, Ni=16%) ausztenit kristályosodással indul, ami kristályosodási repedésképződést okozhat.

2.6.4. ábra. Ausztenites Cr–Ni ötvöztetésű acél kristályosodása (72% Fe-tartalom)

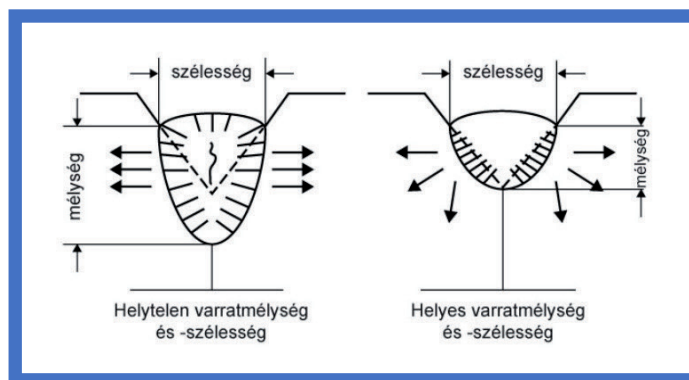


Technológiai paraméterek hatása a melegrepedés képződésre. A nagy hegesztési sebesség melegrepedési veszéllyel járhat mert a varrat középvonalaiban koncentrálódik a hő és a létrejövő ki-válások, míg kis hegesztési sebességgel ez elkerülhető (2.6.5. ábra). A varrat alakja is befolyásolja a kristályosodási repedésképződést, ebben az esetben a varratmélység és -szélesség ideális kialakítása követendő (2.6.6. ábra).

2.6.5. ábra. Hegesztési sebesség hatása a kristályosodási repedésképződésre



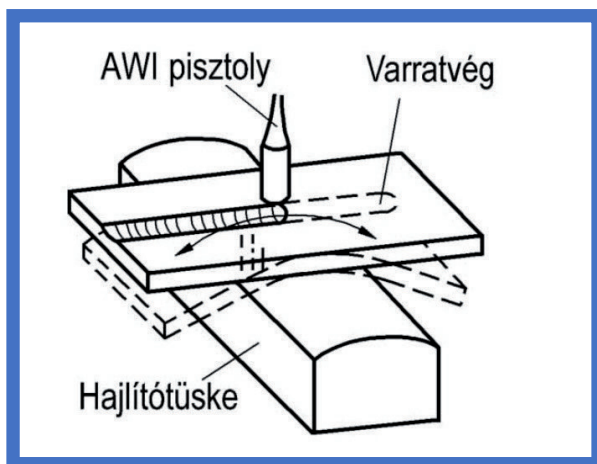
2.6.6. Varratban fellépő feszültségek



Hegesztett alkatrészek melegrepedés-vizsgálatára, ívhegesztési eljárásoknál az MSZ EN ISO 17641-1 és 2 szabványokat alkalmazzuk.

Fémek melegrepedési hajlamát a 2.6.7. ábrán látható módon végezhetjük. A vizsgálat során adott vastagságú próbadarabra egy varratsort raknak le AWI pisztollyal (hozaganyaggal vagy anélkül), bevont elektródával vagy más hőforrással. Amikor az ív a próbadarab közepére ér, akkor a próbadarabot tűskére hajlítják. A melegrepedési hajlamot a keletkező repedések összes hosszúságával jellemzik.

2.6.7. ábra. Melegrepedés-érzékenység vizsgálat



2.6.8 Hidegrepedések

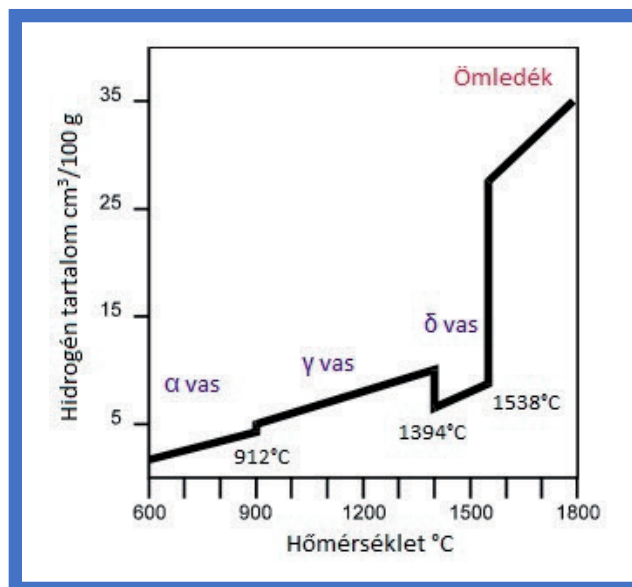
A szilárd fázisban bekövetkező változások miatti repedések vagy köznap elnevezéssel élve a hidegrepedések két, gyakran együttesen fellépő repedési jelenség, amelyek lehűlt állapotban, vagy a hűlés során jönnek létre anélkül, hogy megömlött fázisok ezen repedések keletkezésében közreműködnének. A hegesztett szerkezetek esetében a 200°C alatti hőmérsékleten bekövetkező repedésképződést hidegrepedésnek nevezzük és három fő elemét különböztethetjük meg, a hidrogén okozta hidegrepedés, kis alakváltozó képességű szövetszerkezet kialakulása (martenzit, alsó bénit) és feszültségnövekedés, többtengelyű húzó feszültségek. A hidegrepedésekre jellemző, hogy főként a hőhatásövezetben jönnek létre, kristályokon áthaladó mikroszkópikus vagy makroszkópikus méretűek is lehetnek.

A hidrogén kis atomátmérője ($d < 1 \text{ \AA}$) miatt könnyen oldódik folyékony fémekben. A tiszta vas hidrogénoldó képességét mutatja a hőmérséklet függvényében a 2.6.8. ábra. A hidrogén atomos vagy ionizált állapotban (a hegesztési ív hőmérsékletén vízből atomos hidrogén disszociál) a folyékony fémbe diffundál majd, ha nem tud eltávozni (effúzió) akkor a megszilárdult anyagban marad. A diffúzióképes hidrogén forrása lehet a levegő, védőgáz, az elektródabevonat nedvességtartalma, vagy szennyezett huzal, fedőpor. A megszilárdult fémekben maradt hidrogén atomok molekulákká kapcsolódnak ezzel a gáznyomás megnövekszik, ami repedéseket indíthat el.

A hidrogén hatására létrejövő repedés jellegzetességei:

- ◆ A varratban és/vagy a hőhatásövezetben keletkezik.
- ◆ Kristályokon át és/vagy kristályok között halad.
- ◆ Mikroszkópikus és/vagy makroszkópikus méretű.

2.6.8. ábra. A tiszta vas hidrogénoldó képessége a hőmérséklet függvényében



A hegesztési folyamat során az ívben a hidrogénmolekulák szétbomlanak, illetve ionizálódnak. Az így létrejött hidrogénatomok és ionok kicsiny átmérőjük miatt probléma nélkül illeszkednek egy fém-mátrix köztes rácshelyeibe és nagyon jó diffúzióképességgel rendelkeznek. A hidrogénnek egy másik forrását képezi ezeknek az elemeknek a folyékony fázisban (hegfürdő) való nagy oldhatósága. A hőmérséklet csökkenésével azonban csökken a hidrogén oldhatósága a fém-mátrixban, azaz a hidrogén arra kényszerül, hogy ismét kiváljon (lehetőleg molekulárisan). Mivel a δ -vas oldhatósága kisebb, mint a γ -vasé, ezért például a δ -vas fázisú varratból a γ -vas fázisú hőhatásövezet irányába diffundál.

A hidrogén okozta hidegrepedés megelőzhető, ha megakadályozzuk a hidrogén bejutását a varratfémbe, száraz hegesztési környezet biztosításával, kiszáritott elektróda használatával. Előmelegítés vagy nagy hőbeviteli eljárás alkalmazása a kis alakváltozó képességű szövetszerkezet kialakulásának elkerülésére. Hegesztés utáni hidrogéntelenítő izzítás (utóhőkezelés), sajátfeszültségek csökkentése a merev befogások csökkentésével, megfelelő hegesztési sorrend megválasztásával, szabad alakváltozás elősegítésével feszültségcsökkentő hőkezeléssel (600–650°C). Hidrogén megkötése (bázikus bevonat, portöltet vagy fedőpor esetén) a bevonatban, fedőporban vagy portöltetben található folypát (CaF₂) segítségével, mivel a fluor nagy hidrogén affinitása miatt a hegfürdőben HF-ot képez.

A hidrogén különösen az egyébként is rideg szövetszerkezetekben, mint például a martenzit fokozza a repedés keletkezésének kockázatát. A repedés elkerülését a hegesztett kötés hűlési sebességének szabályozásával (szakaszenergia, előmelegítés) lehet elérni. Az erre alapuló számítási módszereket ezért az edződési repedés kapcsán tárgyaljuk.

A hegesztett kötés gyors hűlésekor nagy túlhűtés lép fel. A gyors hűlés során az ausztenitesítési hőmérsékleten termikusan keletkezett nagyszámú vakanciának csak egy kis része szűnik meg. A nagyszámú vakancia társulva a rácsátbillenéses átalakulás kíséri nagy diszlokációsűrűséggel, valamint az oldott karbon rácszorító hatásával együttesen a martenzitnek a ferritét sokszorosan meghaladó keménységet kölcsönöznek.

Repedés képződéséhez vezet, ha a szövetben a martenzit részarányának növekedésével, a karbonnal való túltelítődés alapján a martenzit belső feszültségei hasonlóan növekednek. Ha az elemi rácscellák ezzel kapcsolatos hexagonális túlfeszültsége a kényszeroldású C-atomok következtében meghaladja a helyi szilárdsági tulajdonságokat, létrejön a szövetszerkezet kötéseinek a felrepedése.

A martenzites szövetben keletkező repedés jellegzetességei:

- ◆ A hőhatásövezetben keletkezik.
- ◆ Kristályokon át és/vagy kristályok között halad.
- ◆ Mikroszkópi és/vagy makroszkópos méretű.

A repedések általában a hőhatásövezet szemcsedurvult övezetében, martenzites szövetszerkezetben keletkeznek. Kis alakváltozó képességű szövetszerkezet kialakulása a vasalapú ötvözetek esetében azt jelenti, hogy a lehűlés után martenzit jelenik meg. A martenzit szakadási nyúlása nem értelmezhető, így képlékeny alakváltozásra nem képes, ridegtörésre hajlamos. A hidrogén jelenléte miatt megnövekedett feszültség, valamint a rideg szövetszerkezet együttesen okozza a törést.

Az acél kémiai összetétele alapján meghatározható repedésérzékenységi tényező (Units of Crack Susceptibility (USC)). Ha az $USC < 10$, akkor a hidegrepedés-veszély igen kicsi ha azonban az $USC > 30$, akkor a veszély igen nagy. Az összefüggésben az acél ötvözőelemeit tömegszázalékban értelmezve számoljuk.

$$USC = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb - 12,3 \cdot Si - 5,4 \cdot Mn - 1$$

Ötvözetlen acél esetében a keménység és a széntartalom kapcsolata ismert. Ötvözött acéloknál a szénegyenérték-összefüggés (CE) számításából lehet következtetni az acél repedési hajlamára.

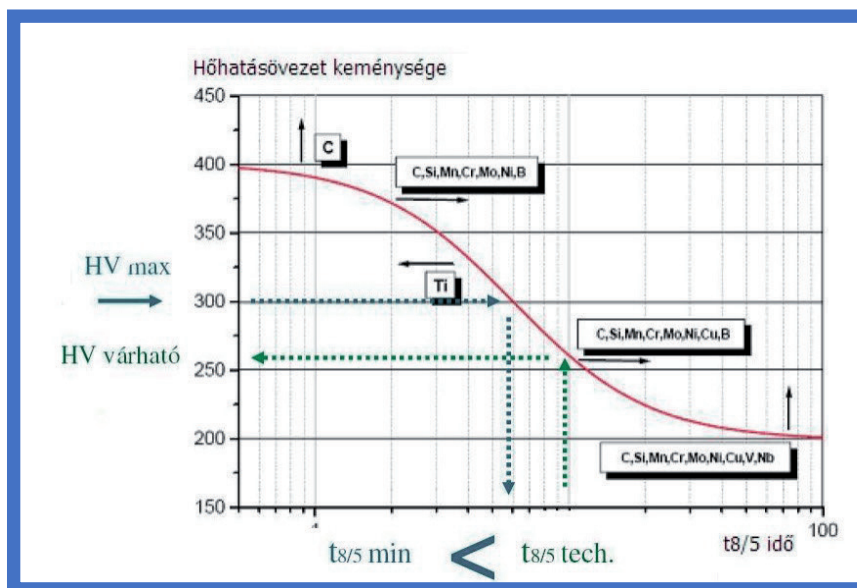
Az MSZ EN 1011-2 az IIW ajánlása szerinti összefüggést tartalmazza, az összefüggésbe az acél ötvözőit tömegszázalékban kell értelmezni.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \%$$

Az összefüggés ötvözetlen és finomszemcsés acélokra érvényes, $C_{max}=0,25$, $Si_{max}=0,8$, $Mn_{max}=1,7\%$, $Cr_{max}=0,9\%$, $Cu_{max}=1,0\%$, $Ni_{max}=2,5\%$, $Mo_{max}=0,75\%$, $V_{max}=0,2\%$ tartományban. A szénegyenérték értéke $CE=0,3\sim0,7\%$ között érvényes.

A 2.6.9. ábra az egyes ötvözők és a hűlési idő (hűlési sebesség) keménységre gyakorolt hatását mutatják. Látható, hogy a keménységérték szempontból a C% a legerősebb hatású.

2.6.9. ábra. Hűlési idő és keménység kapcsolata

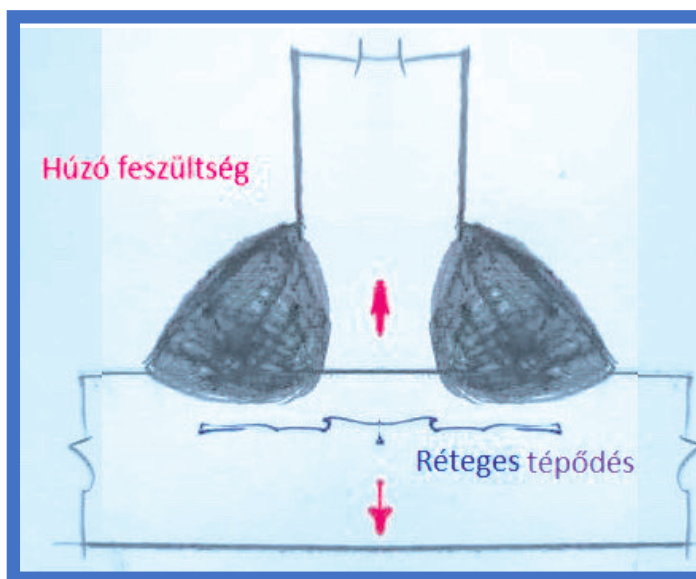


2.6.10 Réteges tépődés

A réteges tépődés, vagy teraszos tépődés a hegesztett szerkezetekben csak a hőhatásövezetben keletkezik, iránya párhuzamos a hegesztési iránnyal, jellemzően makroszkópi méretű. A réteges tépődés melegen hengerelt vastag durvalemezek hegesztett kötéseiben fordul elő az alapanyagban a hegesztési hőfolyamat utolsó fázisában (200...300°C-on) vagy a hegesztést követően. A réteges tépődés kialakulását a 2.6.10. ábra szemlélteti. A gyártási folyamatától függően durvalemezeknél jelentősen különböző szilárdsági és szívóssági tulajdonságok jöhetnek létre a lemez vastagsági irányában (z-irányban), a hengerlés síkjához képest (x-, y-irány). Ennek oka a síkalakú zárványok (pl. elhengerelt mangánszulfid zárványok), amelyek igénybevétel esetén negatívan befolyásolják vastagsági irányban a mechanikai-technológiai tulajdonságokat.

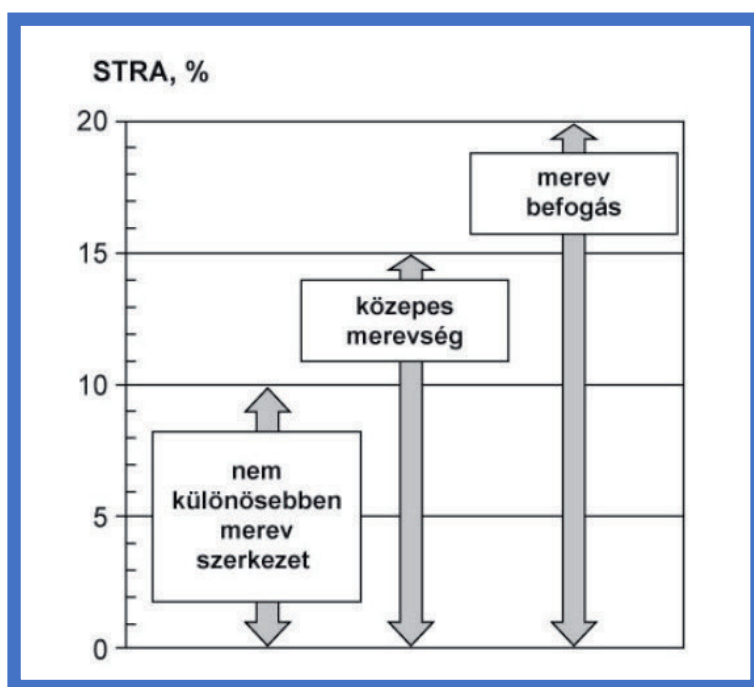
A réteges repedésként vagy teraszos törésként is ismert hibafajta esetében réteges alakban elrendezett repedésekről van szó, amelyek a felülettel párhuzamosan, fedetten is haladhatnak, de a felülről is kiindulhatnak, jellemzően teraszos vagy lemezes alakkal hatolnak be az alapanyagba. Különösen repedésveszélyesnek számítanak a lemez síkjára merőleges helyzetű hegesztési zárványok (T- és kereszt-kötések).

2.6.10. ábra. Réteges tépődés kialakulása, elvi ábra



A réteges tépődési hajlamot a vastagságirányú kontrakcióval (Short Transverse Reduction of Area (STRA)) jellemzik. A réteges tépődés keletkezésének előfeltétele, hogy a hőbevitel hatására létrejövő zsugorodási feszültségek meghaladják az anyag vastagságirányú alakváltozó képességét. Kialakulásában döntő szerepük van a nemfémes zárványoknak (szulfidok, oxidok, foszfidok). Az acélban található szennyeződések eredete az acélgyártási eljárásban a folyamatos- vagy kokillaöntés során képződő középvonal menti dúsulás. A réteges tépődés elkerülhető a nagy tisztaságú acélok alkalmazásával ($S < 0,005\%$) illetve a vastagságirányú kontrakció $SRTA > 24\%$ esetén (2.6.11. ábra).

2.6.11. ábra. Réteges tépődés és a befogási merevség kapcsolata



A réteges tépődési veszély csökkenthető továbbá az acél Si-mal vagy Al-al való csillapításával, Ca-mal, Ce-mal való kezelésével, Zr-mal való mikroötvözással, valamint konstrukciós intézkedésekkel (pl. T-kötéseknél párnaréteggel) megfelelő varrat kialakítással. Az alumíniummal csillapított acélok réteges tépődéssel szembeni ellenállóképessége jobb, mint a szilíciummal csillapítottaké.

Vastag lemezek esetében a réteges tépődés elkerülésére az 2.6.12. ábra szerinti kötés kialakítások javasoltak. Kerülni kell sarokvarratok esetében az egyoldali varratot.

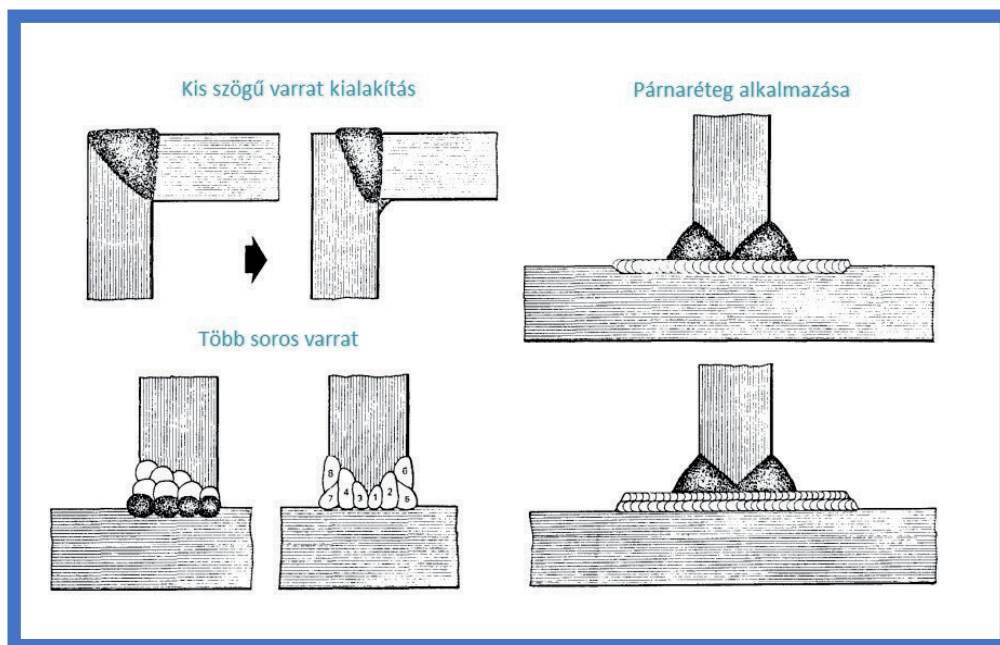
Jellegzetessége:

- ◆ kizárólag az alapanyag hőhatásövezetében keletkezik;
- ◆ a hengerlési iránnyal párhuzamos különböző síkokban halad;
- ◆ makroszkópikus méretei vannak.

Jelenség: a szemcsék szétválása a szemcsehatár mentén a terhelés hatására.

Oka a képlékeny zárványok hengerlési salaksorossága.

2.6.12. ábra. Réteges tépődés elkerülésére javasolt kötés kialakítások



2.7 TÖRÉSEK, A TÖRÉSEK KÜLÖNBÖZŐ FAJTÁI

A mérnöki anyagok mindig tartalmaznak hibákat, melyek az anyagok gyártása során keletkeznek. A mérnöki szerkezetek biztonságos üzemeltethetősége szempontjából a legveszélyesebbek az anyagfolytonossági hibák. Statikus, ismétlődő vagy dinamikus terhelés hatására repedések jöhetnek létre.

A repedés viselkedése számos tényezőtől függ, mint a repedés típusa és a terhelő feszültség típusa. A hagyományos törésmechanikai elméletek számos megoldást ajánlanak a repedésterjedés előrejelzésére. Az anyagok viselkedése függ a terhelés módjától. Hagyományosan az anyagok statikus terheléssel szembeni ellenálló képességüket vizsgálják, mint a szakítóvizsgálat, keménységmérés és a hajlító vizsgálat. Néhány mechanikai tulajdonság, mint a képlékenység, szívósság és az alakíthatóság függenek az alakítási sebességtől. Egy egyszerű szakítóvizsgálat különböző folyáshatár- és szakítószilárdság eredményt ad eltérő húzási sebesség esetén.

A törés módja az anyag tulajdonságaitól, a terhelés sebességétől, a hőmérséklettől és az anyag vastagságától függ. Minél alacsonyabb az anyag szívóssága vagy hőmérséklete, annál gyorsabb a törési sebesség, vagy minél vastagabb a minta, annál valószínűbb, hogy rideg törés következik be.

A szén-mangán acélok szívóssága általában elég magas ahhoz, hogy nehezen érhető el törés, kivéve alacsony hőmérsékleten, azaz az alacsony minőségű vagy a vastag lemeznél.

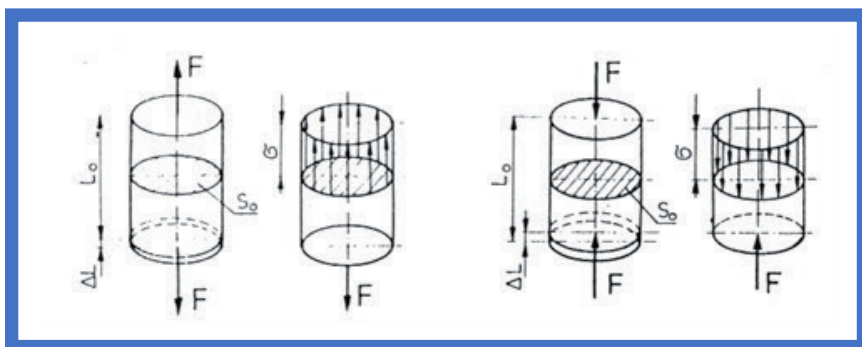
2.7.1 Alap igénybevételek

Az igénybevételek értelmezése és jellemzői a rugalmas alakváltozás tartományán belül

Húzás és nyomás



2.7.1. ábra. Egytengelyű húzás



Ahol:

L_0 – a terhelés előtti hossz [mm]; ΔL – a terhelés hatására bekövetkező hosszváltozás [mm];

S_0 – a terhelés előtti keresztmetszet [mm²]; F – a terhelő erő [N];

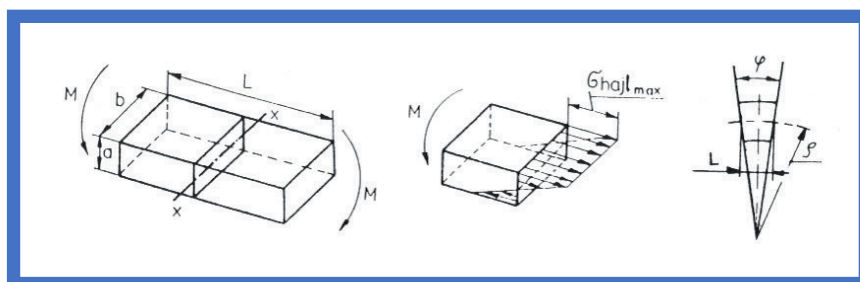
σ – a terhelés hatására ébredő mechanikai feszültség [MPa].

	Jellemzők	Jelölés	Mértékegység
Terhelés	Húzó, ill. nyomó erő (pillanatnyi)	F	(N)
Alakjellemzők	Hossz (pillanatnyi)	L	(mm)
	Keresztmetszet (pillanatnyi)	S	(mm)
Anyagjellemzők	Rugalmassági modulusz (arányossági tényező a feszültség és az alakváltozás között) Hooke-törvény: $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (MPa) Poisson-tényező (arányossági tényező a kereszt- [erőre merőleges] és hosszirányú [erővel egyirányú] fajlagos alakváltozás között) $\nu = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_h} \text{ (-)}$	E	(MPa), ($\frac{N}{mm^2}$)
		ν	(-)
Feszültség	Normál feszültség (egységnyi merőleges keresztmetszetre jutó erő) $\sigma = \frac{F}{S} \text{ (MPa)}$	σ	(MPa), ($\frac{N}{mm^2}$)
Alakváltozás	Hosszváltozás (növekedés, ill. csökkenés)	ΔL	(mm)
Fajlagos alakváltozás	Fajlagos alakváltozás a megváltozott mennyiség (pl. hossz) kiinduló hosszegységre jutó értéke $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ (-)}$	ε	(-)
Feszültségeloszlás a keresztmetszetben	Egyenletes		



Hajlítás

2.7.2. ábra. Hajlítás



Ahol:

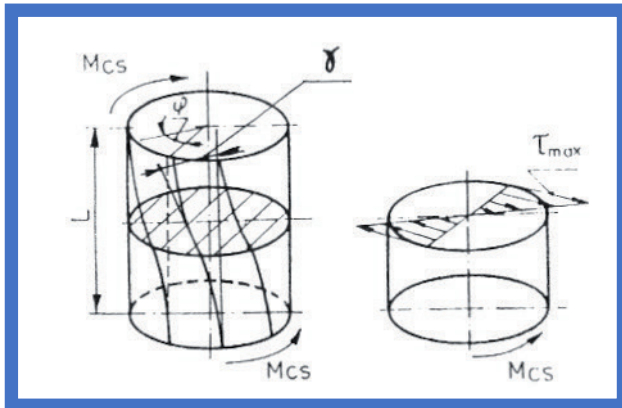
L – a terhelés előtti hossz (mm); x – a hajlítás tengelye; M – a hajlító nyomaték (Nm);

 $\sigma_{hajl, max}$ – a terhelés hatására ébredő legnagyobb mechanikai feszültség a szélső szálban (MPa), (N/mm²); φ – a szögelfordulás (radián); $1/\rho$ – a görbület.

	Jellemzők	Jelölés	Mértékegység
Terhelés	Hajlító nyomaték	M	(Nm)
Alakjellemzők	Hossz (pillanatnyi)	L	(mm)
	Keresztmetszet (pillanatnyi)	S	(mm ²)
Anyagjellemzők	A keresztmetszet x tengelyre számított másodrendű nyomatéka téglalap-keresztmetszet esetén: $I_x = \frac{a \cdot b^3}{12}$ (mm ⁴)	I_x	(mm ⁴)
	A keresztmetszet x tengelyre számított keresztmetszeti tényezője téglalap keresztmetszet esetén: $K_x = \frac{a \cdot b^2}{6}$ (mm ³)	K_x	(mm ⁴)
	Rugalmassági modulusz:	E	(MPa), ($\frac{N}{mm^2}$)
Feszültség	Normál feszültség (legnagyobb értéke a szélső szálban) $\sigma_{hajlító} = \frac{M}{K_x} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	$\sigma_{hajlító}$	(MPa), ($\frac{N}{mm^2}$)
Alakváltozás	L távolságú keresztmetszetek szögelfordulása $\varphi = \frac{M}{I_x \cdot E} \cdot L \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	φ	radián
Fajlagos alakváltozás	Görbület $\frac{1}{\rho} = \frac{\varphi}{L}$		
Feszültségeloszlás a keresztmetszetben	A semleges szálra szimmetrikus húzó; ill. nyomó feszültség		

Csavarás

2.7.3. ábra. Csavarás



Ahol:

L – a terhelés előtti hossz (mm);

 M_{cs} – a csavarónyomaték (Nm); τ_{max} – a terhelés hatására ébredő csúsztató feszültség legnagyobbértéke (MPa), (N/mm²); φ – a szögelfordulás (radián); [radián]; γ – a szögváltozás [radián].

2.7.1. táblázat Az alapigénybevételek

Jellemző	Megjegyzés	Jelölés	Mértékegység
Terhelés	Csavaró nyomaték	M_{cs}	(Nm)
Alakjellemzők	Hossz A keresztmetszet poláris másodrendű nyomatéka kör-keresztmetszet esetén: $I_p = \frac{d^4 \cdot \pi}{32} \text{ (mm}^4\text{)}$ Poláris keresztmetszeti tényező kör-keresztmetszet esetén: $K_p = \frac{d^3 \cdot \pi}{16} \text{ (mm}^3\text{)}$	I_p K_p	(mm ⁴) (mm ³)
Anyagjellemző	Csúsztató rugalmassági modulusz (arányossági tényező a csúsztató feszültség és a szögtorzulás között): $G = \frac{\tau}{\gamma} \left(\frac{N}{mm^2} \right); G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	G	(MPa), $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$
Alakváltozás	Elcsavarodási szög $\varphi = \frac{M_{cs} \cdot L}{I_p \cdot G} \text{ (radián)}$	φ	(radián)
Feszültség	Csúsztató feszültség $\tau = \frac{M_{cs}}{K_p} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	τ	(MPa), $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$
Fajlagos alakváltozás	Szögtorzulás $\vartheta = \frac{\varphi}{L} \left(\frac{radián}{mm} \right)$	ϑ	(radián/mm)
Feszültségeloszlás a keresztmetszetben	A semleges szálra szimmetrikus, attól távolodva értéke nő		



2.7.2 Törésmechanikai elméletek

A törésmechanika, a repedésterjedés vizsgálata és modellezése Griffith, valamint azon kutatók munkásságához kapcsolódik akik a repedésterjedés meghatározásán dolgoztak. A törésmechanikában jelentős eredményeket publikált Orowan, Paris, Erdogan, Tada, Irwin, Westergaard, Czoboly, Gillemot, és más fontos kutatók. A lineárisan rugalmas törésmechanika tekinthető a legkonzervatívabb modellnek, mert ezt alkalmazva feltételezzük, hogy a szerkezetet terhelve a benne felhalmozódott alakváltozási energia teljes egészében a repedés terjesztésére fordítódik.

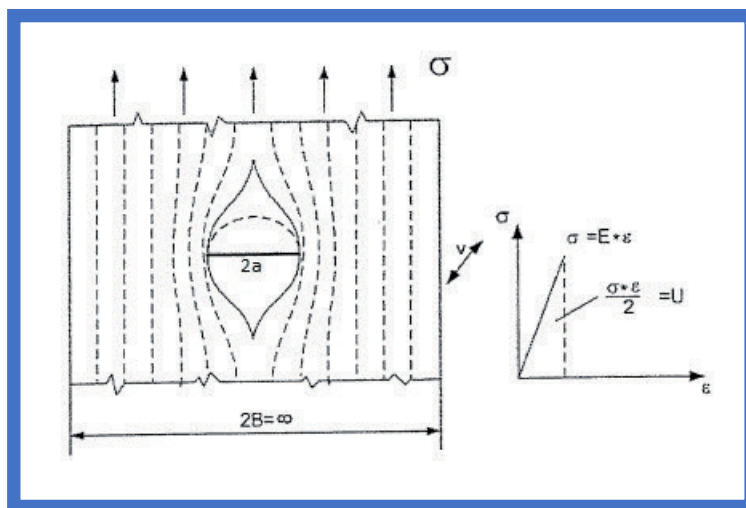
Érdemes tehát kiindulni Griffith munkái alapján a repedések keletkezésére és terjedésére vonatkozó megállapításaiból. Három fontos tételben foglalhatjuk össze:

1. A törés két fizikai folyamatból áll, ami a repedéskeletkezés és a repedés terjedés.
2. A törés bekövetkezése szempontjából a repedés terjedése a kritikus folyamat.
3. A repedésterjedés feltételét a rendszer energiamérlege határozza meg. Ezt az 2.7.4. ábra alapján lehet szemléltetni.

Az ábrán egy végtelen méretűnek tekintett, v vastagságú lemezt látunk, amelynek középpontjában $2a$ hosszúságú, a falvastagságon átmenő repedés található. A lemezt σ feszültség terheli. Ismert, hogy a feszültséggel terhelt darab a rugalmas tartományon belül rugóként viselkedik, és minden egységnyi térfogatában $\sigma \cdot \varepsilon / 2$ energiát tárol. A rugalmas szakaszon a feszültség és a megnyúlás között lineáris kapcsolat van (2.7.4. ábra), ezt a kapcsolatot a rugalmassági modulus (E) fejezi ki, vagyis a Hook-törvény:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

2.7.4. ábra. Griffith elméletéhez alkalmazott próbatest



A Griffith-modell alapján annak, a végül méretezéshez is alkalmazott alábbi összefüggésnek (melyet Joseph Kies tiszteletére, jelentős törésmechanikában végzett kutatásaiért tiszteletből K jelölést alkalmaznak).

Feszültségintenzitási tényező:

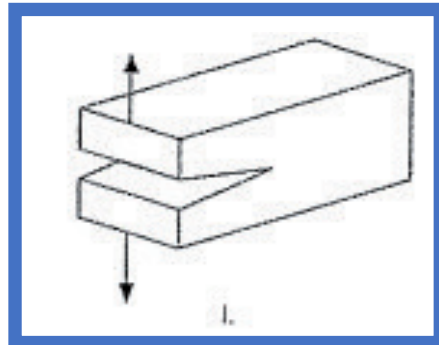
$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$



Ennek alapján jutott a törésmechanikai értelmezés oda, hogy a repedés jellemzését tekintve a repedés megindulása $K_{kritikus}$ esetében indul el. $K_{kritikus}$ tehát anyagjellemző, melyet méretezéshez is használnak. A feszültségintenzitási tényező $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ vagy $\text{N/mm}^{3/2}$.

Griffith által megalapozott elmélet csak arra az esetre igaz, amikor a repedés felületeit egy húzó feszültség terheli a 2.7.5. ábra szerint. Mivel más repedési módokat is meghatároztak ezért erre a repedési módra alkalmazott jelölés K_I .

2.7.5. ábra. I. törési mód a Griffith-elmélet szerint



Felületi és beágyazódott hibák feszültségintenzitási tényezője

Gyakorlatban előforduló hibák vizsgálata során azt vették észre, hogy a repedések, hibák gyakran nem mennek át a teljes falvastagságon, csak a felületen jelentkeznek vagy a falvastagság egy részéig terjednek. Más esetekben a hibák beágyazódva, rejtve a falon belül találhatók. A -érték meghatározásához, a hibát burkolni kell egy fél, vagy egész ellipszissel, ahol az ellipszis kistengelyét C_1 nagytengelyét C_2 -vel jelöljük. A törés szempontjából veszélyes érték a C_1 , mely szerepel a K -érték számításában. Az összefüggésben alkalmazott B értéke felületi hiba esetén 1,21 míg beágyazott hibánál 1, továbbá az egyenletben szereplő Q -t nomogramból lehet meghatározni (2.7.6. ábra). Q értékének meghatározásához ismerni kell a hiba környezetében uralkodó feszültségi és folyáshatár arányát, $\sigma/R_{p0,2}$ és ismerni kell a hiba alakját ($C_1/2C_2$).

Q meghatározása számítással:

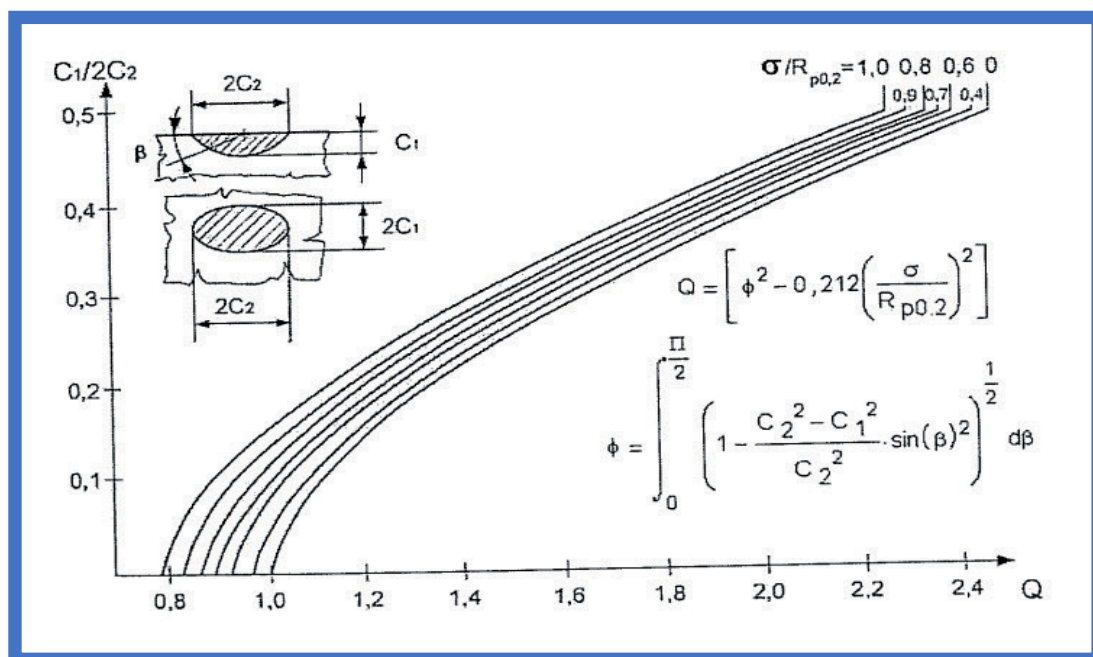
$$Q = \Phi^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (3)$$

Ahol Φ a repedés alakjától függő tényező:

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left[1 - \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{c_2^2} \right) \sin^2 \beta \right]^{1/2} d\beta \quad (4)$$



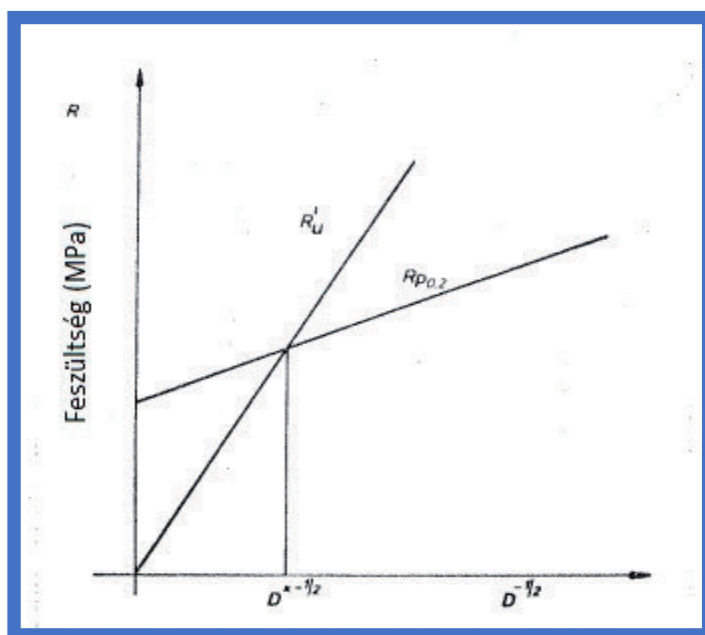
2.7.6. ábra. A Q-tényező meghatározására szolgáló nomogram



Cottrell törési kritérium

Az alakváltozási energia kimerülése repedés keletkezéséhez vezet. Anyagtudományi szempontból tehát a szilárdságnövelés amennyiben a diszlokációk számának növelésével történik, csökkenti a repedéssel szembeni ellenállás.

2.7.7. ábra. A törés kritériuma



Ezt támasztja alá Cottrell törésmélete, melynek alapján a törés kritériuma, repedésmentes szerkezet esetén, ha $R_u' = R_{p0.2}$. Hall–Peatch-összefüggést felhasználva (2.7.7. ábrán szemléltetve) D_x kritikus szemcseméretnél kisebb szemcsék esetén a törést jelentős képlékeny alakváltozás előzi meg, míg ezt a szemcseméretet meghaladva megindul a törés.

A szemcseméret hatása a szilárdságra és szívósságra így törésmechanikai szempontból is értelmezhető.

Törési szívósság dinamikus terhelésre

Ismert a dinamikus terheléssel szembeni ellenállás vizsgálata Charpy-ütővizsgálattal és ejtő súlyos vizsgálattal. A Charpy-ütővizsgálati módszer nem alkalmas dinamikus törési szívósság meghatározására. A dinamikus törésmechanikai elmélet és hozzá kapcsolódó dinamikus törési szívósság meghatározására alkalmas vizsgálat, vagyis kvázistatikus törésmélete megalapozói Ireland és Server. Az ASTM E24 dinamikus törési szívósság vizsgálati szabványt Ireland és Server kutatómunkája alapozta meg. A kvázistatikus körülmények feltételezésén alapuló törésmechanika nem alkalmas a nagy sebességű terhelés által létrejövő törési jelenségek megértésére.

A jelenség tanulmányozásához meg kell érteni a dinamikus törésméleteket. A dinamikus törésmechanika két tipikus problémára összpontosít, az egyik a repedés viselkedése dinamikus terhelés alatt, a másik pedig a gyors repedésterjedés. Az elmélet alapvetően a K-tényezőre koncentrál ami az energia felszabadulási sebessége.

A lineárisan rugalmas anyag viselkedés alaptörvénye Hook-törvény.

$$\sigma = E \epsilon$$

Lamé-állandóval (λ and μ) módosított alakja izotróp anyagok esetén felírható:

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

A módosított összefüggés (2) a Navier–Lamé-egyenlet:

$$(\lambda + \mu) u_{jji} + \mu u_{i,jj} = \rho \ddot{u}_i$$

A skalár és a vektor potenciáljával kiegészítve a Helmholtz–hullámegyenletet kaphatjuk meg, ahol c_1 a dilatáció (hosszanti) és c_2 a nyíróhullám. A dinamikus törés esetén a dilációs és nyíróhullámok mellett meg kell határozni a Rayleigh-hullámokat c_R vagy felszíni hullámokat is. A meghatározott hullámsebességek csak az anyagállandóktól függenek.

Található néhány kísérleti módszer a törésmechanikai elméletekkel összhangban, amellyel meghatározható a dinamikus feszültségintenzitás faktor (K_{Id}) és a repedés terjedése. A kutatási eredmények a kísérleti eredmények alapján meghatározták, hogy a repedés terjedése függ a hőmérséklettől, a repedés csúcstól és a dinamikus repedési szívósságtól, amely anyagjellemző.

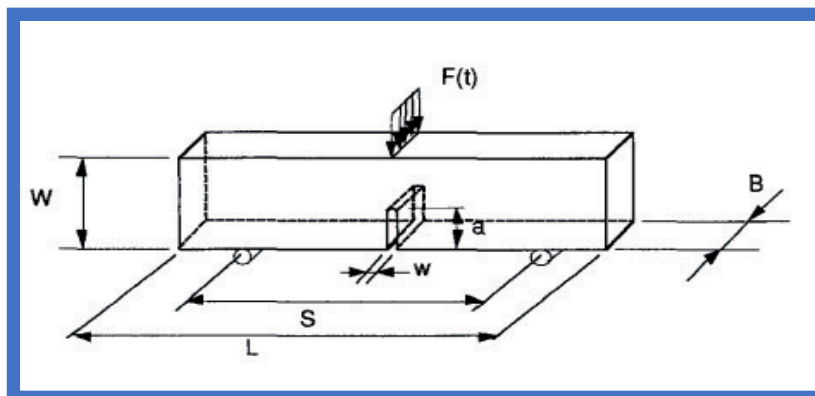
A dinamikus feszültségintenzitási faktor a statikus feszültségintenzitási faktor alapján meghatározható a következő egyenlettel.

$$K_{I(t)} = ((3 \cdot S \cdot \sqrt{a}) / (2 \cdot B \cdot W^2)) \cdot Y \cdot (a/W) \cdot k \cdot u(t)$$



Ahol ismerni kell az $F(t)$ erőt és az $u(t)$ elmozdulást, valamint a k -t minimalizálási eljárással kell meghatározni. A minta geometriáját, a hárompontos hajlítási mintát és a normál erőt az 2.7.8. ábra mutatja.

2.7.8. ábra. Három pontos hajlító vizsgálat próbatest



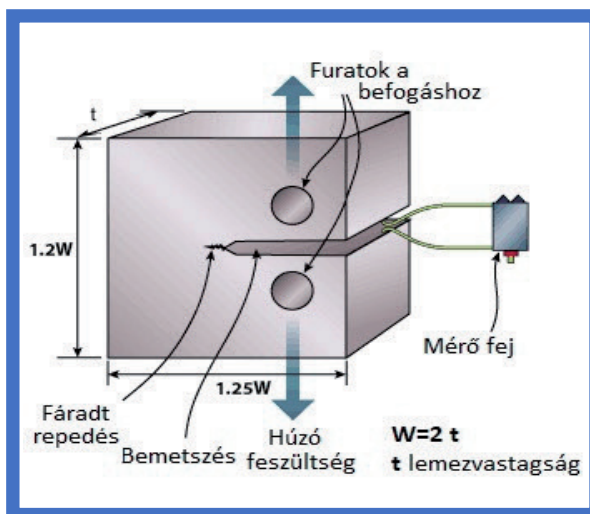
A feszültségintenzitási tényező és a repedés terjedését befolyásoló dinamikus terhelés kiszámításához meg kell különböztetni a statikus és a dinamikus repedést. A dinamikus repedésterjedési teszt érthetően a hagyományos Hopkinson-barmódszer. Számos elméletet és vizsgálati módszert publikáltak Hopkinson bar-kísérleti modellje alapján a dinamikus törési szívósság meghatározására.

J integrál és CT vizsgálat

A kompakt feszültségű (CT) minta és a J-integrálmélet, két vizsgálati módszer, szintén használható a törési viselkedés jellemzésére a megfelelő számítási technikák alkalmazásával, függetlenül a meghibásodás módjától.

A CT-minta egy teljes lemeztavastágú, arányos minta, amely fáradási repedést tartalmaz. A minta oldalai megközelítőleg kétszer nagyobbak, mint a lemeztavastág 2.7.9. ábra.

2.7.9. ábra. CT-próbatest és vizsgálati elv



A mintán egy bemetszés van, a vizsgálandó területen kell kimunkálni – hegesztés, HAZ stb. –, majd a megmunkált bemetszés hegyéből fáradási repedést képezünk, hogy a repedés teljes hossza megközelítőleg a minta vastagságával egyenlő legyen. A mintát feszültség alatt vizsgálják, deformációját a bevágás végére szerelt csíptető segítségével mérik. A terhelést és a deformációt rögzítik, és a repedés hosszát mérik a törött próbadarabon. Ekkor a meghibásodási módról jegyzőkönyvet lehet készíteni az eredmények alapján, amelyeket ezután a szívósság kiszámításához használnak.

A CT-vizsgálatnak az az előnye, hogy a minta anyagtakarékos, és ez fontos lehet vastag lemezek vizsgálatakor. Az atomipar kedveli a CT-vizsgálatot, ahol a biztonság kulcsfontosságú, és az alacsonyabb eredményeket részesítik előnyben.

A J-integrál egy másik módszer a szívósság meghatározására, és a repedés terjedéséhez szükséges energiamennyiségre épül. Mind a CTOD, mind a J mérhető ugyanazon a mintán két csíptető segítségével, az egyik a CTOD mérésére, a másik a J mérésére. A terhelés/elmozdulás görbe alatti terület megadja a törések terjedéséhez szükséges energiamennyiséget. Az eredmények elemzése lehetővé teszi a J-tényező kiszámítását a törési szívósság mérőjeként.

A fenti tesztek – a CT -teszt vagy a J-integrál – lehetővé teszik a kritikus hibaméretek kiszámítását, és a szerkezet alkalmasságának meghatározásában segítséget ad. Ezek tehát kvantitatív tesztek.

2.7.3 Állapottényezők hatása a törésre

A ridegség, a képlékenység a fémeknek nem tulajdonsága, hanem állapota, azok viselkedése adott feltételek mellett. Azt, hogy az anyagok hogyan viselkednek, az állapot tényezőktől függ.

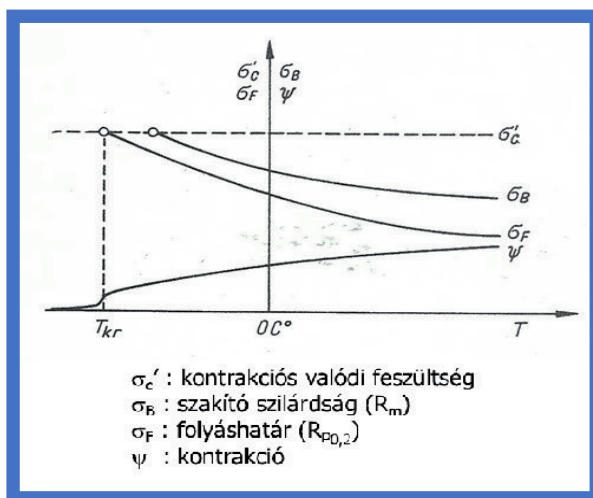
Állapottényezők:

- ◆ Az alakítás hőmérséklete,
- ◆ Az alakítás sebessége,
- ◆ A feszültségi állapot

A hőmérséklet hatása

A hőmérséklet növelése növeli a képlékenységet, a csökkentése pedig ridegebbé teszi az anyagot. T_{kr} : kritikus hőmérséklet, ezen a hőmérsékleten az anyag teljesen elridegedik.

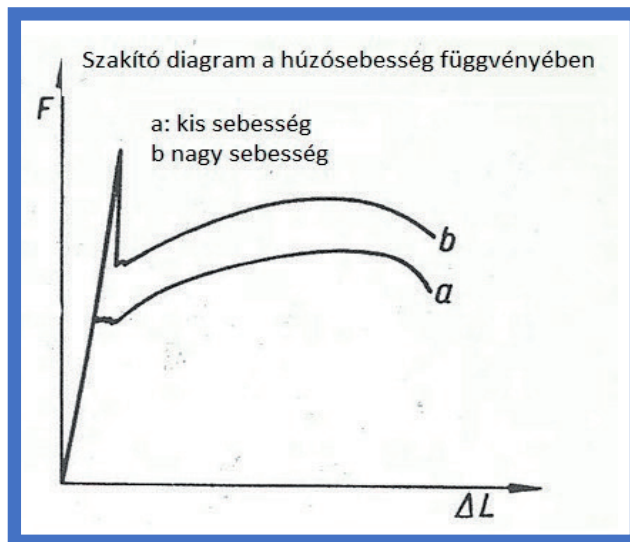
2.7.10. ábra. A feszültség-hőmérséklet függése



A sebesség hatása

A sebesség növelése ridegebbé teszi az anyagot. Itt azonban nagyságrendi különbségek vannak. Ha a sebesség kb. 10 szerese a normál sebességnek, akkor ridegebb az anyag.

2.7.11. ábra. Szakítódiaagram a húzási sebesség függvényében



A feszültségi állapot hatása

A feszültségi állapot lehet:

- a.) egytengelyű húzás
- b.) egytengelyű belső nyomás
- c.) kéttengelyű nyomás

A többtengelyű húzófeszültség ridegít.

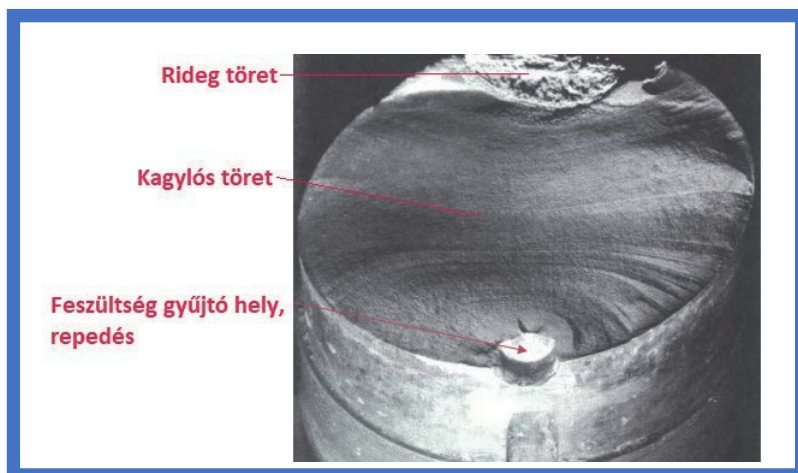
Inhomogén feszültségi állapot: Bemetszések, többtengelyű húzó feszültségi állapotot hoznak létre, a többtengelyű húzófeszültség bemetszésekre érzékeny, ridegtörés veszélye áll fenn.

2.7.3 Fáradásos törés

Azt a jelenséget, amikor egy anyag az ismételt igénybevételek során bevitt, halmozódó károsodások hatására a folyáshatárnál kisebb terhelés esetén eltörik kifáradásnak nevezzük.

- ◆ Az anyag kifáradása törésként jelentkezik, de a kifáradás folyamata legszorosabban a képlékeny alakváltozással kapcsolatos.
- ◆ Nagyon lényeges, mert a törési káresetek kb. 70–80 %-a a kifáradással kapcsolatos. A járműveknél ez az arány több is lehet! A fáradt töret jellege, két részből, egy kagylós, barázdált és egy szemcsés ridegen tört részből áll. A repedés a feszültséggyűjtő helytől indult (anyaghiba, felületi repedés). A ridegen tört rész relative kicsi.

2.7.12. ábra. Ridegtörés kialakulása



A kifáradásnál három részfolyamatot különböztethetünk meg:

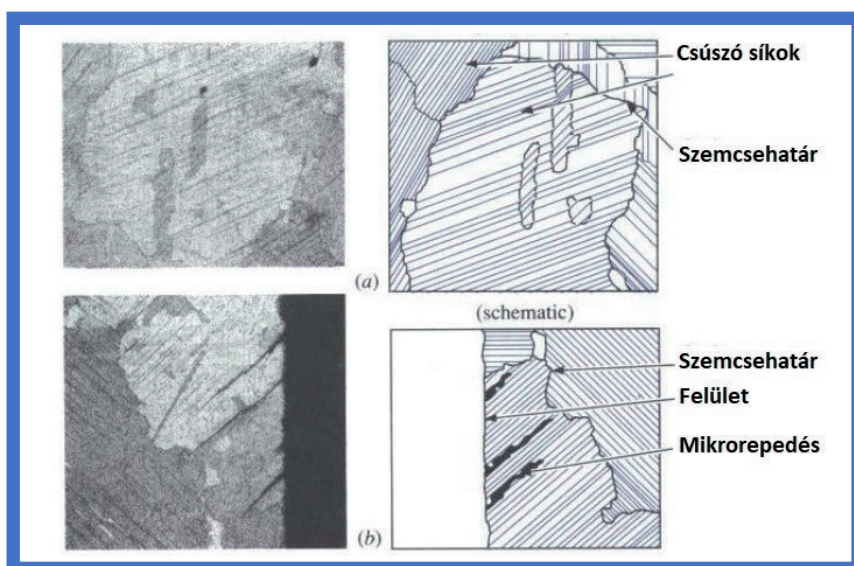
- ◆ repedéskeletkezés
- ◆ repedésterjedés (lassú)
- ◆ instabil repedésterjedés, törés

Az ismételt igénybevételnél a feszültség általában kisebb, mint a folyáshatár: $\sigma < R_{p0,2}$

A darab makroszkóposan tekintve képlékeny alakváltozást nem szenvedhet. De mikroszkópos szinten található változás. Fémek anyagaink általában nem homogének és izotrópok. Változik az egyes kristallitok orientációja, kiválások, nemfémes zárványok, anyaghibák találhatók. Az anyagban igen sok kristallit van és ezek egyéni módon reagálnak a terhelésre.

A kifáradás folyamata I. szakasz

2.7.13. ábra. a) Csúszósíkok kialakulása, b) mikrorepedés kialakulása

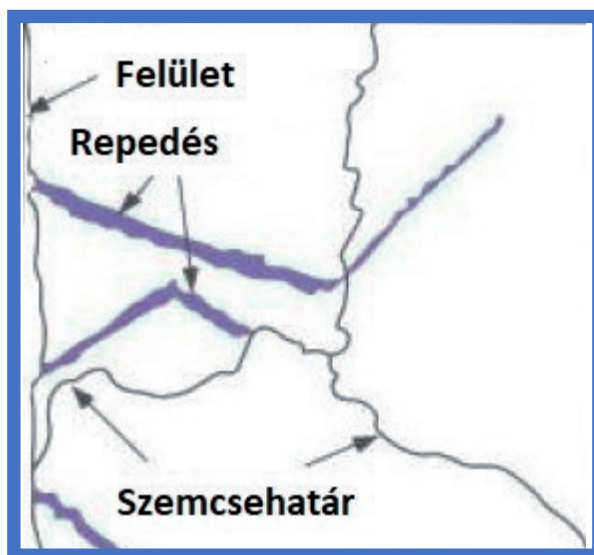


A kedvező helyzetű kristallitokban a folyáshatárnál lényegesen kisebb feszültség is megindíthatja a maradó alakváltozást. Ez a rugalmas alakváltozással összemérhető nagyságú, 0,1–0,01 %. Így a kedvező helyzetű kristallitokban csúszósávok alakulnak ki. Ez a jelenség legkönnyebben a felületen jöhet létre. Ezért a kifáradás szempontjából leglényegesebb a felület! A csúszósávok vastagsága, távolsága, száma az igénybevételtől függ. Statikus igénybevételnél a csúszósávok a terhelés növekedésével szélesednek, ismételt igénybevétel esetén azonban szélességük nem változik és az alakváltozás ezeken belül zajlik.

A kifáradás folyamata II. szakasz a repedés terjedése

Ha a szomszédos kristallit is kedvező helyzetű, a szubmikroszkópos repedés terjed.

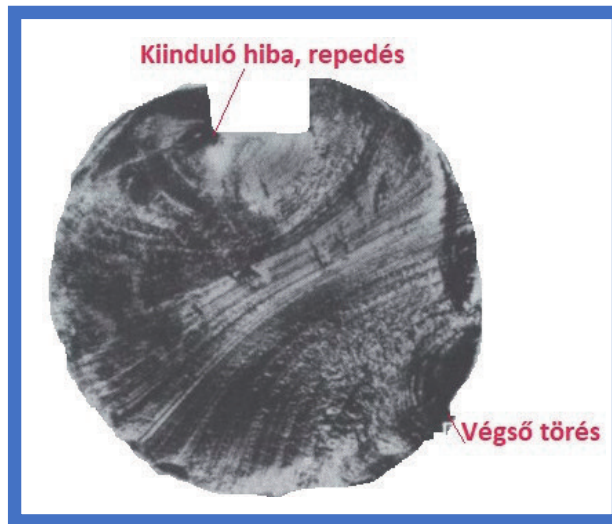
2.7.14. ábra. Repedés kialakulása



A kifáradás folyamata II. szakasz, a repedés terjedése

Ha a mikroszkópos repedés bizonyos nagyságot elér, makroszkópos repedéssé válik, és növekszik. A növekedés a húzó igénybevétel szakaszában jön létre. A repedés ciklusonként növekszik, ami barázdák kialakulásához, repedés terjedéshez vezet.

2.7.15. ábra. Barázdák kialakulása, repedés terjedése



A kifáradás harmadik szakasza

Ha a terjedő repedés nagysága egy anyagra jellemző kritikus méretet elér, az anyag ridegtöréssel eltörik.

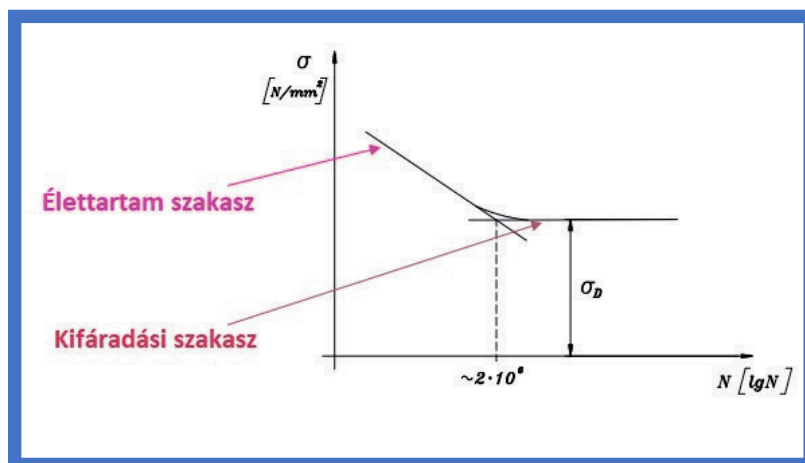
Kifáradás vizsgálata

A berendezések, szerkezetek, szerkezeti elemek, gépalkatrészek túlnyomó többségét ma is folyáshatárra méretezik, azok tervezésénél és gyártásánál azonban szükségszerűen keletkeznek feszültséggyűjtő helyek (például nyomástartó edények csőcsomójainak környezete). A normál üzemeltetés során is felléphetnek olyan járulékos terhelések, amelyek a tervezéskor nem voltak ismertek, illetve nagyságuk nem volt számszerűsíthető (példaként említhetők az indítási és leállási folyamatok tranzienstársaiból származó véletlenszerű terhelések). Egyértelmű tehát, hogy számolni kell egyes szerkezeti elemek, alkatrészek túlterhelésével, amelyek a szívós-képlékeny anyagok helyi képlékeny alakváltozást okozhatják. Amennyiben a túlterhelés csak egyszer fordul elő az a feszültségcsúcsok leépülését, a feszültségek átrendeződését, a képlékenyen alakváltozó anyag keményedését, és ezeken keresztül a teherbíróképesség növekedését eredményezheti. Abban az esetben, ha a kedvezőtlen hatások többször ismétlődnek, az anyagok alakváltozóképesége kimerülhet, kis számú igénybevétel után repedések keletkezhetnek, növekedhetnek végül töréshez vezethetnek. Ezt a jelenséget nevezzük kisciklusú fáradásnak. A kisciklusú fáradás eredményeit meghatározó módon befolyásolja a vezérelt változó, az alakváltozás-amplitúdó szabályozásának pontossága. Mivel a gyakorlatban hossz- és keresztirányú nyúlásmérőket is alkalmaznak, és a kétféle mérőeszköz esetén nem szükségszerű a szabályozás pontosságának azonossága, célszerű a két kérdéskört összekapcsolni. Tekintettel arra, hogy a szabályozás pontossága az alakváltozás-amplitúdó nagyságától is függhet, a vizsgálatokat különböző alakváltozás-amplitúdókkal kívánatos elvégezni.

A jelenségre a múlt század második felében vasúti tengelyek hosszabb idejű üzemelése után bekövetkező jellegzetes törése hívta fel a figyelmet. A jelenséget Wöhler a vasúti tengelyek igénybevételének modellezésével vizsgálta.

A Wöhler-görbe két jól elkülöníthető szakaszból áll. Az első ferde, meredeken eső szakaszt élettartam szakasznak, a vízszintes részt, pedig kifaradási szakasznak nevezzük. A két egyenes acéloknál $2 \sim 5 \cdot 10^6$ igénybevételnél metszi egymást. A görbe aszimptotikusan közelít egy értékhez, így a terhelő feszültség csökkentésével, az acélokra meghatározható egy olyan jellemző feszültség, amellyel az akár végtelen sokszor terhelhető anélkül, hogy eltörne. Ezt a feszültséget az acél kifaradási határának nevezzük. Jele: σ_D

2.7.16. ábra. Wöhler-görbe

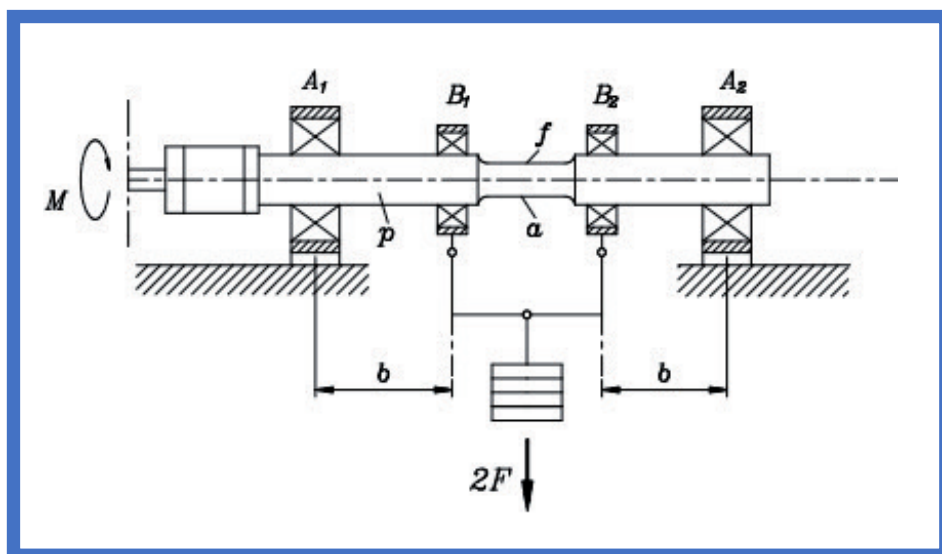


A kifaradási határ nem minden anyagra határozható meg, a szerkezeti anyagok közül az acélokra jellemző, de az alumíniumötvözetekre, rézötvözetekre és a polimerekre nem.

Kifaradási határ meghatározása általában kisciklusú vagy nagyciklusú fárasztóvizsgálattal történik. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatok esetén $\sigma < R_{p0,2}$ és az ismétlések száma $2 \sim 5 \cdot 10^6$, míg a kisciklusú fárasztó igénybevétel esetén $\sigma > R_{p0,2}$. A kifaradás sztohasztikus folyamat, nem szabad átlagolni. Az egy feszültség szinten végzett mérés nem a törést okozó igénybevételi számot, csak annak egy lehetséges értékét adja meg. Sok a véletlen és a külső tényező (külső körülmények, munkadarabtól függő tényezők). A korrózió a felületeket erősen károsítja ezért a kifaradási határt csökkenti.

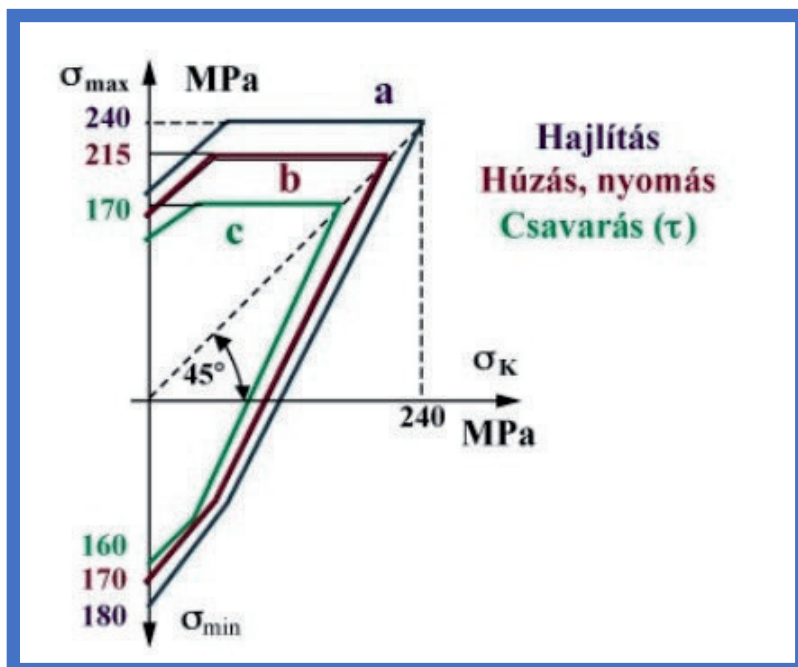
A fáradt törés a felületről indul el, ezért a felületi megmunkálás kulcsfontosságú. A különböző mechanikus felületi kezelések, amelyek a darab felületének közelében nyomófeszültséget eredményeznek pl. a felület görgőzése, szemcseszórás, sörétezés stb. a kifaradási határt növelik. Szintén jelentősen javítják a fáradási tulajdonságokat a felületi hőkezelések pl. a betétedzés, de különösen a nagyon vékony, kemény felületi kérget biztosító nitridálás. A kifaradási határ mérési eredményeket matematikai statisztikai módszerekkel kiértékelve adott törési, illetve túlélési valószínűséggel adhatjuk meg az adott terheléshez tartozó ismétlési számot. A matematikai statisztikai kiértékeléshez sok, feszültség szintenként legalább 10 próbatest szükséges.

2.7.17. ábra. Kifáradás vizsgálata (nagy ciklusú fárasztás)



Smith-féle kiáradási diagram

2.7.18. ábra. Smith-diagram



A gépészeti gyakorlatban használatos leggyakrabban használatos a Smith-féle biztonsági diagram. A Smith-diagram a fáradt törést létrehozó feszültségeket a közepes feszültség függvényében ábrázolja. A Smith-diagramot ellenőrzésre egyszerűsített formában alkalmazzuk: a felső tartományt a folyáshatár-

nál vízszintes egyenessel levágjuk, a megmaradt részeket egyenessel helyettesítjük. Az ábrán egy $R_{eH}=240$ MPa folyáshatárú szerkezeti acél Smith-diagramjait láthatjuk, hajlításra, húzásra-nyomásra és nyírásra megadva.

2.7.4 Repedésihajlam-vizsgálatok

Az anyagok lehetnek: szívósak, képlékenyek és ridegek. Szívós vagy képlékeny anyag esetén a törést jelentős nagyságú maradó alakváltozás előzi meg, ami sok energiát emészt fel. A töretfelület szakadozott, tompa fényű. A rideg, nem képlékeny törés esetében a törést nagyon kicsi vagy semmi maradó alakváltozás sem előzi meg, és viszonylag kevés energiát kell befektetni az anyag eltöréséhez.

Charpy dinamikus terhelésű vizsgálat

A törésvizsgálatok célja általában a belső eltérések típusáról, méreteiről és elhelyezkedéséről információt szerezni. A törés végezhető hajlítással, húzással, statikus vagy dinamikus terheléssel is. A törést elő lehet segíteni varratdudor-eltávolítással, a varrat mindkét végének keresztirányú bemetszésével, a varratdudor hosszirányú bemetszésével, vagy pedig ezek együttes alkalmazásával.

A Charpy-féle ütővizsgálat egy 10x10x55 mm-es, 2 mm mélységű, 45°-os – 0,25 mm lekerekítési sugarú V- vagy U-bemetszési alakú próbatesttel végezzük. Charpy-féle vizsgálat: ütve–hajlító vizsgálat során az alapanyagok ridegtöréssel szembeni ellenállására ad összehasonlító eredményeket. A vizsgálat elve a 2.7.2.1. ábrán látható, mely során történik a töréshez vagy ütéshez felhasznált munka mérése, melynek jele: KV.

Próbatest ütésére fordított munka (törési munka): $K=G \cdot (H_1-H_2)$

ahol:

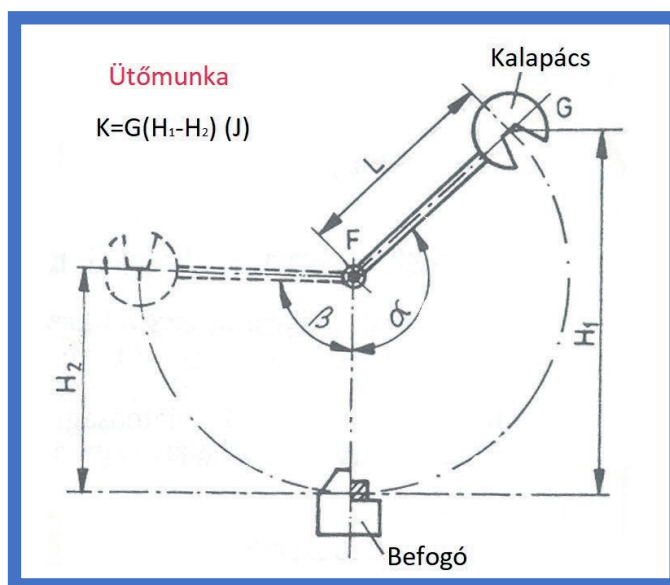
K: Próbatest törésére fordított munka.

G: Kalapács ütőélére redukált tömeg (mérőenergiája általában 300 J).

H_1 : Inga kezdetleges súlypontjának a magassága.

H_2 : Inga ütés utáni súlypontjának a magassága.

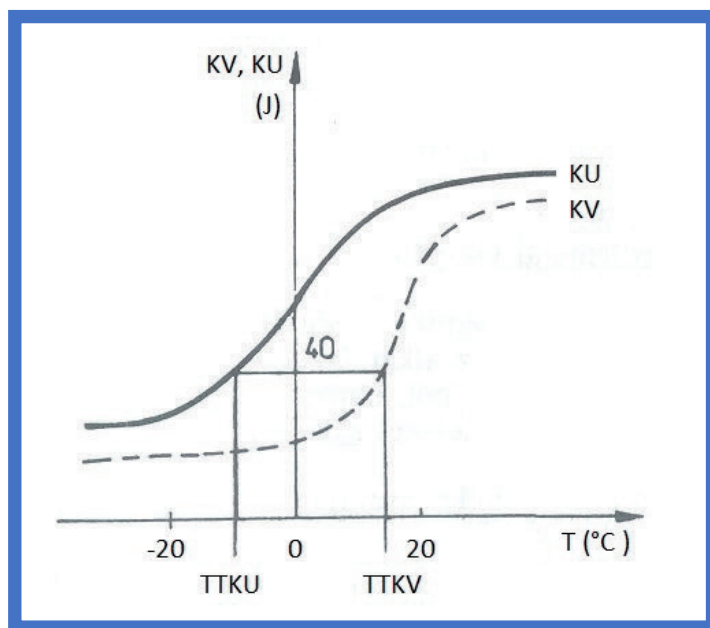
2.7.19. ábra. Charpy ütvehajlító vizsgálat elve



A különböző hőmérsékleten történő vizsgálat lehetővé teszi, hogy megtudjuk határozni a szívós rideg átmenetet. A nagy nyúlású LKK rácsszerkezetű fémek 0°C -nál kisebb hőmérsékleten sem ridegek, de a TKK rácsszerkezetű fémek esetén meghatározható egy átmeneti hőmérséklet.

Ez az átmeneti hőmérséklet a szívós és rideg törés hőmérséklettartományának egy meghatározott pontja (2.7.19. ábra).

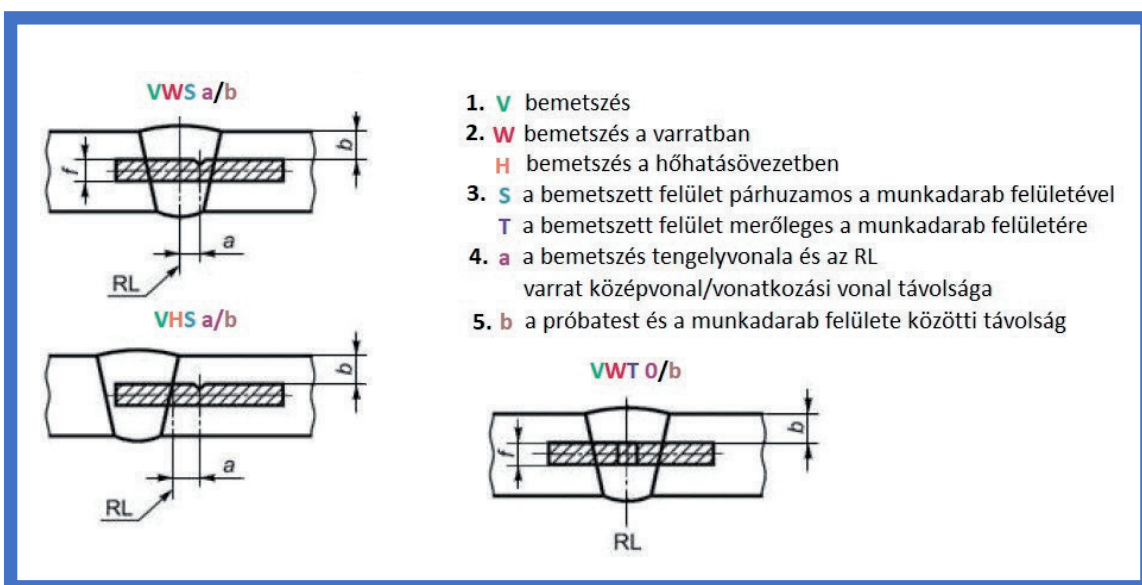
2.7.20. ábra. Átmeneti hőmérséklet a V és U bemetszés esetén



A vizsgálathoz egy bakokra helyezett próbatestre, illetve egy L hosszúságú ingára van szükség, amelynek a kezdetleges súlypontja H_1 magasságban van. Ebből a magasságból ejtve az inga körpályán mozogva, folytonos gyorsulással haladva eltöri a próbatestet, majd pedig a kiindulástól ellentétes oldalon a súlypontja H_2 magasságba kerül. A munkadarabon U- vagy V-bemetszés is készíthető. Általános esetben a bemetszés vagy a heganyagban (W) vagy a hőhatásövezetben (H) található. (A vonatkoztatási vonal – RL – a varrat középvonala, vagy pedig a kötővonal/beolvadási vonal – FL.) A próbatest jelölésrendszert hegesztett próbatestekre példákkal a 2.7.21. ábra foglalja össze.

A jelölés öt betűjelből áll a következő sorrend szerint. 1. helyen a bemetszés típusa **V** vagy **U** betűvel. 2. helyen a bemetszés helye **W** varratfém, **H** hőhatásövezet. 3. helyen a bemetszett felület meghatározása, **S** párhuzamos a hegesztett darab felületével, **T** merőleges a próbatest felületére. 4. helyen lévő jel a, a bemetszés középvonalának a vonatkoztatási vonaltól mért távolsága. 5. helyen lévő jel b, a hegesztett kötés felső felülete és a próbatest közelebbi felülete közötti távolság.

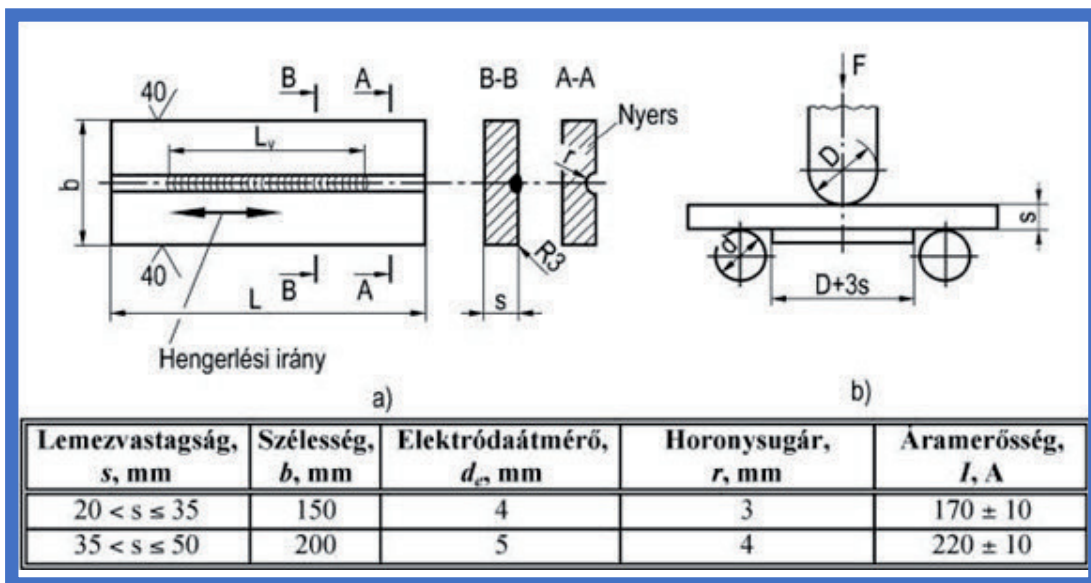
2.7.21. ábra. Charpy-vizsgálat jelölésrendszere hegesztett próbatestek esetén



Kommerell-próba

A 20 mm és annál vastagabb ötvöztelen és gyengén ötvöztött szerkezeti acélok ráhegesztett hosszirányú hernyóvarrattal végzett vizsgálata. A 150 vagy 200 mm szélességű (s vastagságú), minimum ($L=12 \cdot s$) hosszúságú, középen 4 mm mélységű horonnyal készített próbatestre ($L_v=6 \cdot s$) hosszú varratot kell lerakni és meg kell hajlítani. Az értékelés alapja az első repedéshez tartozó hajlítási szög és a törésfelület.

2.7.22. ábra. Kommerell-vizsgálat



A Kommerell-próba egy hernyóvarratos hajlítóvizsgálat, statikus terheléssel. Az első repedéshez tartozó hajlítási szög és a törésfelület meghatározásával kell kiértékelni.

Az értékelés alapja az első repedéshez tartozó hajlítási szög és a törésfelület. Ha nincs más előírás, akkor a hajlítási szög elégítse ki az $a=1500/s$ feltételt, és a próbatest törésfelülete legfeljebb 50%-ban lehet rideg töretű

Tekken-próba

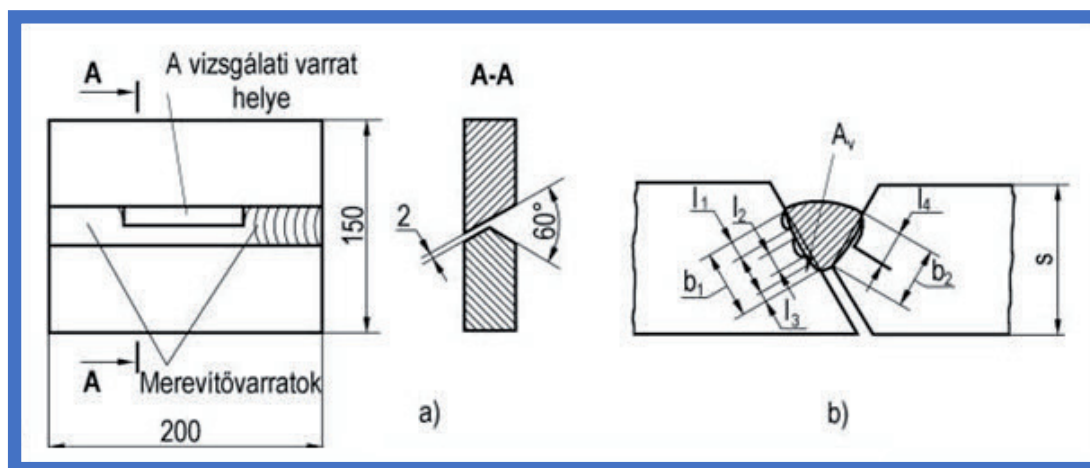
Acélok hegesztési repedésérzékenységének vizsgálatára használatos a Tekken-próba. A 10...50 mm vastagságú, 74 mm széles és 200 mm hosszú a kétoldali merevítővarrat elkészítése után 75 mm hosszú, egyrétegű gyökvarratot kell elkészíteni a vizsgált munkarenddel.

- ◆ Próbatest 10–50mm vastag (vizsgálati minta mérete 74x200 mm).
- ◆ Vizsgálathoz 75 mm egyoldalú gyökvarratot kell készíteni.
- ◆ Adott bevonatú elektróda alkalmazással.
- ◆ Adott hőbevitellel.
- ◆ Hegesztés után 24-48h pihentetés.

Tompavarratos kötések hőhatásövezetének hidegrepedés-érzékenységi vizsgálata. A próbadarabokon meghatározzák a hőhatásövezetben található repedések leélezés irányában mért összesített hosszát. Repedésérzékenységi mérőszám: R_p .

A hőhatásövezet legnagyobb mért keménysége alapján lehet következtetni a repedésérzékenységi hajlamra. A vizsgálati próbatestet a 2.7.23. ábra mutatja.

2.7.23. ábra. Tekken-próba



CTS- és módosított CTS-próba (élsarokvarratos repedésérzékenységi vizsgálat)

Az élsarokvarratos (CTS-) vizsgálathoz 100x175 mm-es alaplappra 10...50 mm vastag, 75x75 mm-es fejlapot erősítenek merevítővarrattal, majd a vizsgálati varratot vályúhelyzetben egy varratsorral, kézi ívhegesztéssel (bevonatos elektródával) készítik el.

A vizsgálat elvi vázlatát a 15. ábra mutatja.

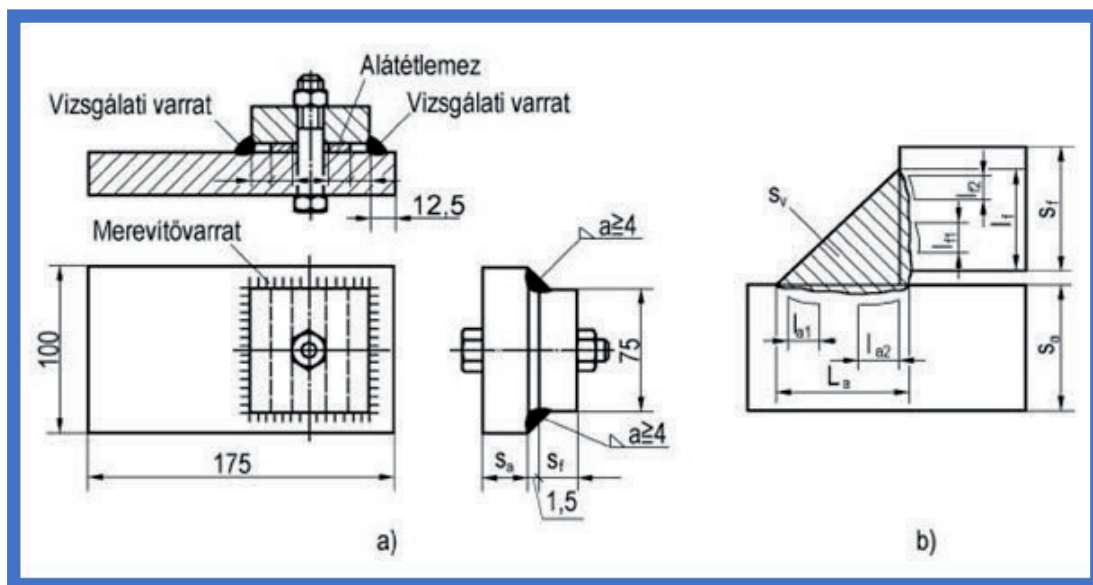
- ◆ alaplemez 100x175mm
- ◆ fejlap 10–50mm vastag (75x75)
- ◆ Vizsgálati varrat:
- ◇ vályú helyzetben
- ◇ bevont elektródás ívhegesztéssel
- ◇ egy sorban

Módosított CTS:

- ◆ alaplemez 250x100mm
- ◆ fejlapot az alaplemez közepére → vizsgálati varrat három irányba vezeti el a hőt
- ◆ a vizsgálati varratoknál 1,6x10mm-es hornyot alakítanak ki

A próbatesteken meg kell határozni a repedések összesített hosszának L_a , ill. L_f -hez viszonyított értékeit, ill. a hőhatásövezet legnagyobb keménységét

2.7.24. ábra. CTS- és módosított CTS-próba

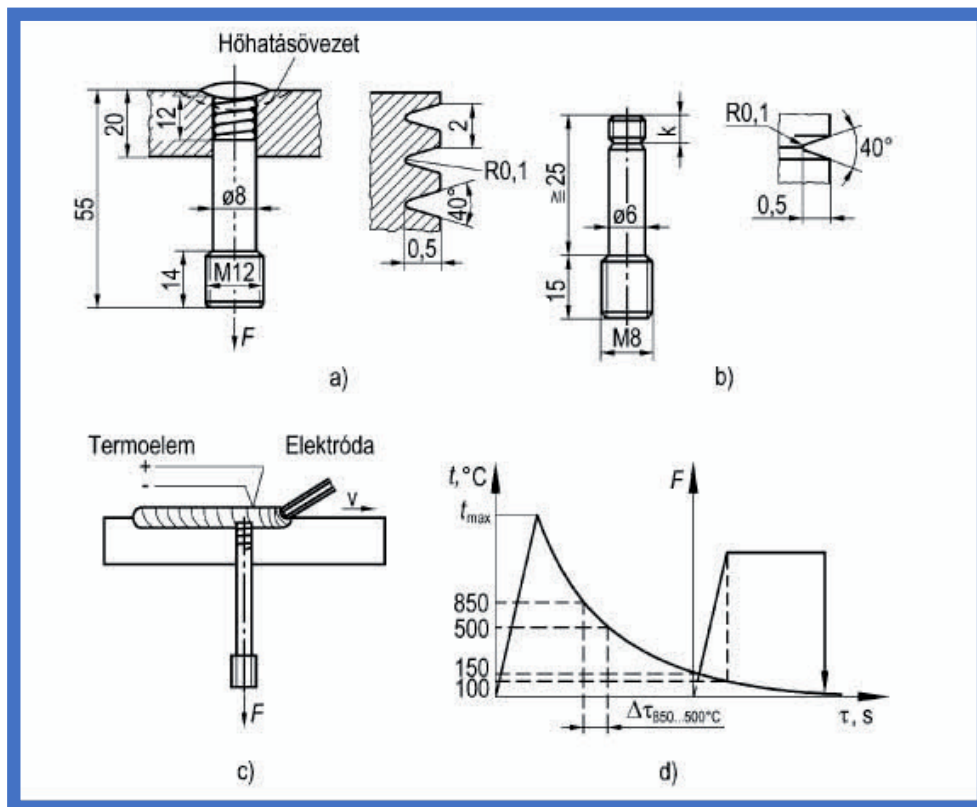


Implant vizsgálat

Implant vizsgálattal a hegesztéskor fellépő hidegrepedési hajlamot határozzák meg. Egy 8 mm átmérőjű menetes vagy 6 mm átmérőjű, 0,5 mm-es horonnyal bemetszett csapot 20 mm vastag, 200 x 300 mm-es alaplappba kell behegeszteni. A szobahőmérsékletű vagy legfeljebb 250°C-ra előmelegített alaplappba helyezett csapot a varrat 100...150°C-ra lehűlt állapotában állandó erővel terhelik. Ha a próbatest a terhelés során nem repedt meg, akkor a terhelést további 16 óráig folytatják. Ha ezután sem reped, akkor a terhelést növelve újabb vizsgálatot végeznek, és meghatározzák a repedést még éppen nem okozó feszültséget. A vizsgálat elvi vázlatát a 2.7.25. ábra mutatja.

- ◆ Alaplemez 20x200x300mm.
- ◆ Vizsgáló csap $d=8\text{mm}$; $d=6\text{mm}$, 0.5mm-es horonnyal.
- ◆ Vizsgálathoz az alap vagy szobahőmérsékletű vagy max. 250°C .
- ◆ Amikor a varrat $150\text{--}100^\circ\text{C}$ -ra visszahűlt, a csapot egyenletes erővel elkezdik terhelni.
- ◆ Terhelési idő max. 16 óra (ha előbb nem reped meg).
- ◆ Ha 16 óra után sem reped meg, növelnek a feszültségen mindaddig amíg el nem érik a repedés okozó feszültség mértékét.

2.7.25. ábra. Implant vizsgálat

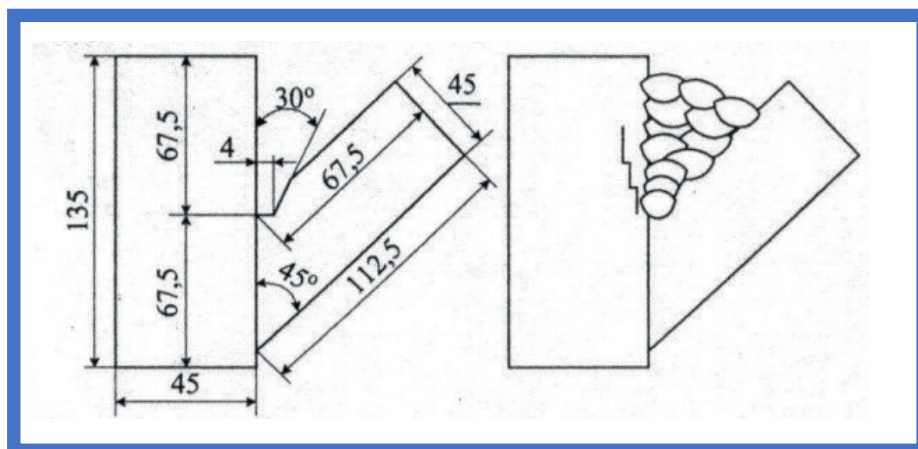


Cranfield-próba

Réteges tépődés előrejelzésére alkalmazott próba a Cranfield-próba. A hegesztett kötésben ébredő saját feszültségek hatása alapján értékelhető a lemez réteges tépődésre való hajlama. A próbatest értékelése a repedésmentesség vagy a repedések megjelenésének megállapításán, illetve repedések jellegének minősítésén keresztül végezhető el.



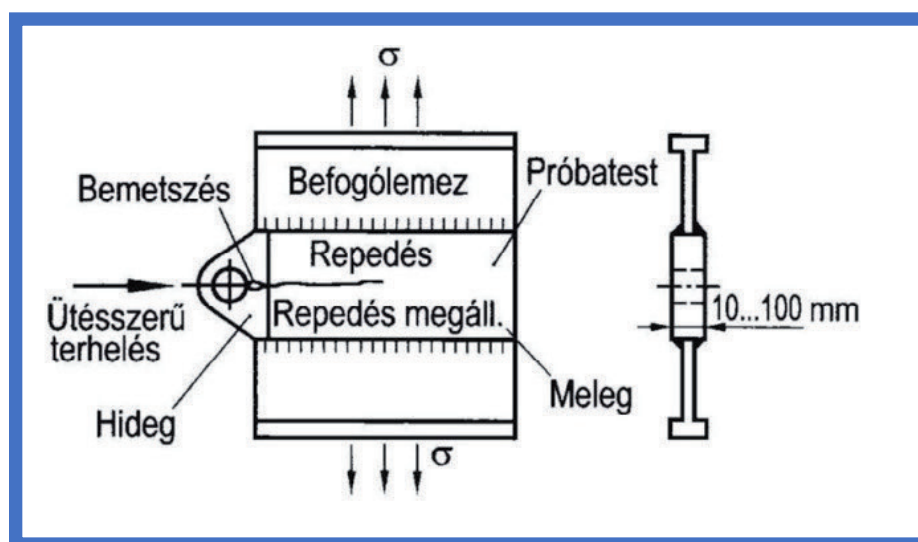
2.7.26. Cranfield-próba elvi ábra



Robertson-vizsgálat

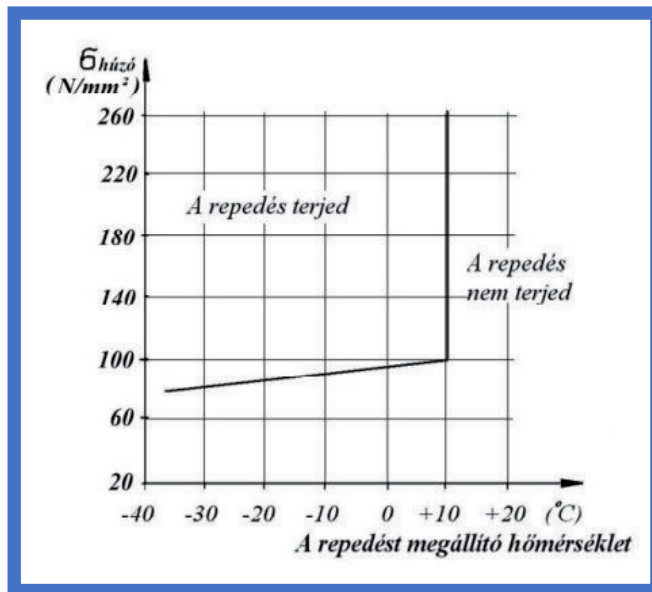
Robertson a vizsgálati próbaestjét úgy alakította ki, hogy a rideg törés bekövetkezésének feltételei a vizsgálatnál adottak legyenek (negatív üzemi hőmérséklet, több tengelyű feszültségi állapot, dinamikus igénybevétel stb.). A vizsgálati próbatest egy vastagabb és két vékonyabb lemezből áll, amelyek négy helyen sarokvarrattal össze vannak hegesztve. A középső, vastag lemez kinyúló végén furat van, melyből repedés indul ki. A próbatest furattal ellátott végét kb. $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra hűtik, a vele ellentétes élt pedig kb. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra melegítik. A vizsgálat úgy indul, hogy a furattal ellátott próbatestre ütest mérnek, amelynek hatására a mesterségesen kialakított repedés megindul, s valahol megáll.

2.7.27. ábra. Robertson-vizsgálat összeállítása



A vizsgálat során felvett diagramból megállapítható az a hőmérséklet, amelynél a repedés megáll, függetlenül a feszültség nagyságától. A kritikus hőmérséklet alatt a repedés terjedése a húzófeszültségtől függ.

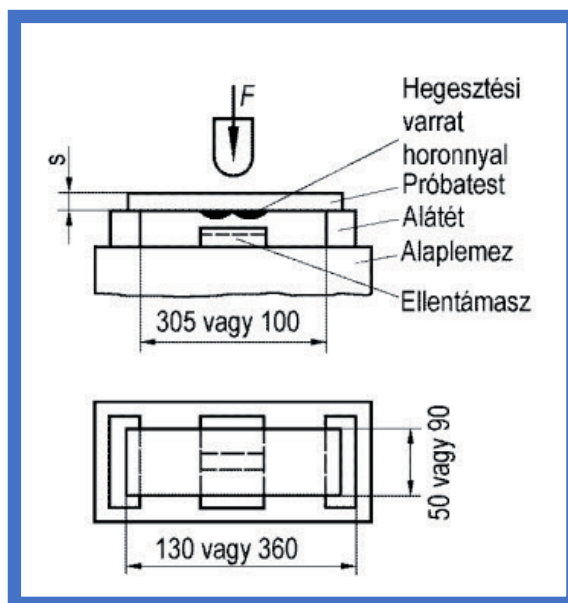
2.7.28. Robertson-vizsgálati diagram



Pellini-féle ejtő súlyos vizsgálat

A Pellini-féle dinamikus ejtő súlyos) vizsgálathoz 130x50x13–19 mm-es próbadarabot használunk. A próbadarabra HV > 350 keménységű hernyóvarratot hegesztünk, amelyet keresztirányba középen befűrészkelünk. A próbadarabra 25–50 kg tömegű súlyt kell ejteni. A vizsgálatot különböző hőmérsékleten végezzük el. Határhőmérséklet az, amelyen a varratból kiinduló repedést az anyag már nem képes megállítani. A próbadarab lehajlása olyan mértékben korlátozott, hogy a húzott oldalon csak kismértékű képlékeny alakváltozás következhet be, és emiatt a próbadarabban ébredő feszültség eléri az anyag folyáshatárát.

2.7.29. ábra. Pellini-féle ejtő súlyos vizsgálat



2.9 SZERKEZETI (ÖTVÖZETLEN) ACÉLOK HEGESZTÉSE

Egy adott összetételű acél hegesztésekor az edződési-, illetve az ehhez társuló, hidrogéntartalommal kapcsolatos repedések elkerülésének technológiai lehetősége a hegesztendő darabok előmelegítése. Az előmelegítés révén csökken a kötés hűlési sebessége, mérséklődik a hőtágulás, így az ebből eredő feszültség, javul a hidrogéndiffúzió feltétele, ezzel mérséklődik a kötés visszahülése után a diffúzióképes hidrogéntartalom. A repedés elkerüléséhez szükséges előmelegítés mértékének becsléséhez akár egyik, akár másik módszerrel határozzák meg a karbonegyenértéket, a számított előmelegítés a szokásos merevséggel rendelkező kötésekre vonatkozik. A merevségnek a repedésképződésben jelentős szerepe van, mert a merevség csökkenésével csökken a termikus alakváltozás akadályozottsága, így a termikus okokra visszavezethető feszültség. Az ugyanolyan tulajdonságú anyag esetén ez a kisebb termikus feszültség kisebb repedési veszélyt jelent. A merevség számos tényező függvénye, például egyrétegű varrat esetén a sarokvarratos kötések kevésbé merevek, mint a tompavarratos kötések.

A merevség az anyag vastagságával nő. Ugyancsak nő a merevség, ha a hegesztett szerkezet befogása, rögzítése merevebb. A szokásosnál merevebb kötések esetében a repedésképződés veszélye nő, vagyis az ilyen szerkezetek hegesztésekor növelni szükséges a becsült előmelegítési hőmérsékletet. A CE-re, alapuló számítási módszer nem veszi tekintetbe számszerűen a hegesztett kötés merevségét, mindössze általánosságokban tesz ajánlásokat a merevség hatásának figyelembevételére.

Az S-jelű szerkezeti acélok maximális C-tartalma 0,2%, a kisebb szilárdságú acélok Si-t csak nyomokban, a nagyobbak max. 0,55%-ot tartalmaznak. A Mn-tartalom (max. 1,4...-1,6%) növelésével növekszik a folyáshatár. Miután a szerkezeti acélok C-tartalma éri el az edződés alsó határát jelentő 0,2%-ot, a karbonegyenérték (CE) pedig a felső értékekkel számolva a 0,45%-ot, ezen acélok hegesztésekor a gyorsabb lehűléskor fellépő repedési veszéllyel nem kell számolni.

Nagyobb szelvényvastagságú acélok tompavarratainál 25 mm felett, sarokvarratainál 12 mm felett javasolt előmelegíteni 100...-150°C-ra. A hegeszthetőség a JR minőségi csoporttól a K2 minőségi csoportig javul.

Az E-jelű gépacélok nagyobb szilárdságát a nagyobb C-tartalma adja, ennek felső értékét a szabvány nem tünteti fel. Elsősorban gépipari területen (pl. tengelyek, dobok stb.) használják, amely acélok C-tartalmuk alapján már edzhetők, és ezért többnyire előmelegítés mellett hegeszthetők. Az E295, E335 és E360 acélminőségek hegeszthetőségére nincs előírás, mivel ezek vegyi összetételére nincsenek előírt követelmények.

2.9.1 Hegeszthetőség

A hegeszthetőség a fémek hegesztéstechnológiától függő alkalmassága olyan hegesztett kötés létrehozására, amely helyi tulajdonságai és a hegesztett szerkezetre (alkatrészre) gyakorolt hatása szempontjából megfelel a követelményeknek. A hegeszthetőség komplex tulajdonság, ezért csak a szerkezettel, a hegesztéstechnológiával és az igénybevétellel való kölcsönhatásban értelmezhető.

A hegeszthetőség mértéke függ a kötés tulajdonságait és a velük szemben támasztott követelményeket befolyásoló tényezőktől:

- ◆ a hegesztett szerkezet (alkatrész) jellemzőitől,
- ◆ a hegesztéstechnológiától,
- ◆ felhasználás körülményeitől.

A fémek anyagok hegesztésre való alkalmasságát meghatározza a gyártásuk és öntésük módja és ennek technológiája, a vegyi összetételük, hőkezelésük és a hidegalakításuk mértéke. Ezek az anyag szerkezeti, mechanikai és fizikai tulajdonságokban jutnak kifejezésre. Az alkalmazás körülményeit meg-



határozza a szerkezet (termék) alakja, mérete, alakítási módja, az igénybevételek, a mértékadó üzemi hőmérséklet stb. A hegeszthetőség mindig egy szerkezet egy meghatározott hegesztési eljárásra, hegesztőanyagra és hegesztési munkarendre értelmezhető. A hegesztett kötés helyi tulajdonságaival szemben támasztott fontos követelmény pl. a kötés szilárdsága, fémtani szerkezete, repedésmentessége stb. Ha a hegesztett kötés a helyi követelményeket nem elégíti ki, akkor a keletkezett hiba kimutatható, a hibás hely a hibás térfogat eltávolításával és újrahegesztésével javítható. A hegesztett kötés szerkezetre gyakorolt hatásával szembeni követelmény lehet a szerkezet korrózióállósága és biztonsága ridegtöréssel szemben. Ha a kötés az előírt követelményeket nem elégíti ki, akkor az egész szerkezet tönkremehet, mert az ilyen hiba nem, vagy csak anyagtulajdonság-módosító kezeléssel (hőkezeléssel, felületbevonatolással) javítható. A fémek hegeszthetőségének foka valamely hegeszthetőségi követelmény kielégítésének mértéke, módja. A fémek rangsorolhatók hegesztési repedés-érzékenyséjük vagy ridegtörési érzékenyséjük alapján.

Ha a hegesztett kötet több sorból (rétegből) építik fel, az egymás után hegesztett varratok az előzőekben hegesztetteket „hőkezelik”, vagyis némiképp változik a hegesztett kötés szövetszerkezete, feszültségállapota.

A változás mértéke függ attól, hogy az egymást követő sorok előtt mennyire hűlt vissza a kötés. A szokásos ötvözetlen, kis karbontartalmú acélok általában nem érzékenyek az előző sorok hőmérsékletére. De egyes ötvözött acéloknál a tulajdonságok kedvezőtlen változásához vezethet, ha az egyes sorok között túlságosan rövid idő telik el, ilyen esetekben előírják a rétegek közötti hőmérséklet maximális értékét.

Az ötvözetlen szerkezeti acélokat elsősorban $-20\ldots-200^{\circ}\text{C}$ fokos üzemi hőmérsékleten, ott alkalmazzák, ahol állandó vagy időben változó, mechanikai igénybevétel éri a hegesztett terméket. Tekintettel arra, hogy ezeknek az acéloknak a gyártása igényli a legkisebb ráfordításokat, ezért, ha az igénybevétel támasztotta követelmények megengedik, akkor az anyagköltségek minimalizálása érdekében ehhez az acélcsoporthoz tartozó acélokat választják a hegesztett termékek gyártásához. Széleskörű alkalmazásukat az is segíti, hogy a hegesztésük általában nem igényel előmelegítést, mert a kis karbontartalmuknak köszönhetően a szokásos hegesztési körülmények között a rideg, nagy keménységű martenzitképződés lehetősége kizárt, és még a szokásosnál nagyobb hűlési sebességeknél is csak csekély mennyiségű bénit lehet jelen a ferrit-perlites alapszövetben. Nagyobb szelvényvastagságú acélok ($s > 25\text{ mm}$) tompavaratainak hegesztésekor, illetve sarokvarratoknál 12 mm felett a többtengelyű maradó feszültségek csökkentése és a hidrogéndiffúzió elősegítése érdekében célszerű $100\ldots-150^{\circ}\text{C}$ -os előmelegítést alkalmazni.

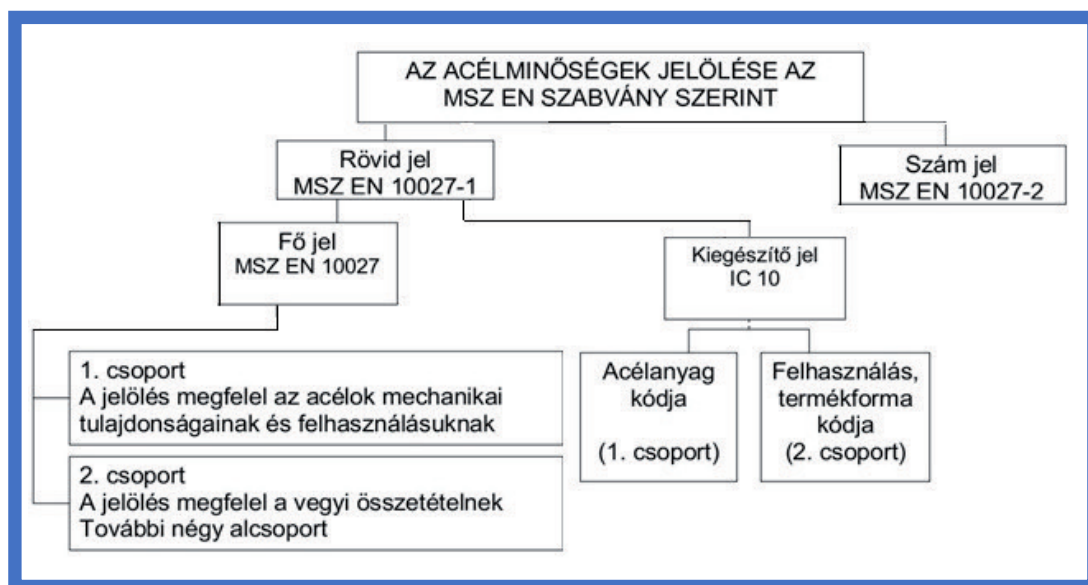
A hidak, az épületszerkezetek, a csőtávvezetékek, a hajók, a vasúti szerelvények építése és a gépgyártás óriási mennyiségben igényli az olcsó, mégis kedvező mechanikai tulajdonságú, nagy alakváltozó képességű anyagot. Ezeknek az igényeknek a kis karbontartalmú ($C < 0,25\%$), ferrit-perlites szerkezetű acélok felelnek meg leginkább. Ebből az acéltípusból a világon több mint félmilliárd tonnát gyártanak évente, ami a teljes fémfelhasználás felét is meghaladja. Rendkívül széleskörű alkalmazását segíti, hogy ezeket az acélokat igen változatos formában állítja elő a kohászat. Gyártanak ebből az acélból melegen hengerelt rúd- és idomacélt, durva-, közép- és finomlemez, széles- és abroncsacélt, szalagot, huzalt, rúdacélt, kovácsolt termékeket, valamint számos más formájú kohászati végterméket, többek között acélöntvényeket is.

2.9.2 Ötvözetlen acélok jelölésrendszere

Az acélokat az MSZ EN 10027-1 szerinti vagy az MSZ EN10027-2 szabvány szerinti számjelöléssel azonosítjuk. A 2.9.1. ábra összefoglalóan mutatja a jelölésrendszert.



2.9.1. ábra. Acélok jelölésrendszere



Az MSZ EN 10027-1 szerinti jelölésrendszer

Az 1. csoport szerinti jelölés az acél mechanikai tulajdonságai, valamint felhasználási területe szerinti. A főjelet követő szám a legkisebb anyagvastagságra vonatkozó legkisebb folyáshatár értéke R_e (MPa), amely lehet felső vagy alsó folyáshatár (R_{eH} vagy R_{eL}), vagy terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár (R_p), vagy névleges folyáshatár (R_l). A jelölésekben R_{mL} (MPa) a szakítószilárdság alsó értéke. Ezeket az előírásokat a termékszabványok tartalmazzák.

2.9.2. ábra. Acél 1. csoport szerinti jelölés fő jele szerinti jelölés

Betűjel és az azt követő szám jelentése	Példa
S – szerkezeti acélok	S355N
P – acélok nyomástartó felhasználására	P275NH
L – acélok csővezetékekhez	L290GB
E – gépacélok	E360
B – betonacélok + jellemző R_e (MPa)	B500H
Y – acélok előfeszített betonszerkezetekhez + R_{mL} (MPa)	Y1770C
R – sínacélok + R_{mL} (MPa)	R0900Mn
H – hidegen hengerelt lapos acéltermékek nagy szilárdságú acélból hideg húzásra + az előírástól függően R_e vagy R_m	H360LA
D – lapos termékek hidegalakítására	DC04
T – ónozott termékek	
M – elektrotechnikai acél	

Kiegészítő jelek két részből állnak. A jel vonatkozhat az acél egyéb mechanikai tulajdonságára (pl. ütőmunka értékére: J=27J, K=40J, L=60J), és az utána lévő jel a vizsgálati hőmérsékletet jelzi (+20°C-tól -60°C-ig) (Ezeket a jeleket az 2.9.3. ábra foglalja össze).

2.9.3. ábra. Ütőmunka és a vizsgálati hőmérséklet jelölése

Ütőmunka			Vizsgálati hőmérséklet
27J	40J	60J	°C
JR	KR	LR	+20
J0	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30
J4	K4	L4	-40
J5	K5	L5	-50
J6	K6	L6	-60

A szállítási állapot jelölésére, pl.

M - termomechanikusan hengerelt

N – normalizált vagy szabályozott hőmérsékleten hengerelt

Q – nemesített

A – kiválasztott keményített, öregített

G – Egyéb jellemzők egy vagy két kiegészítő számjellel

G1- nem csillapított acél

G2- csillapított acél

G3- normalizált állapot

További kiegészítő jelek utalnak az acél jelölésében az acél felhasználási területére, feldolgozhatóságára:

C-hidegalakításra

E-zománcozásra

H-zártszelvények

S-hajóépítésre

W-légköri korrózióálló

Példa az acél jelölésének származtatására az MSZ EN 10027-1 szerint a minimális folyáshatárú Re=355MPa, -20°C-on KV 27 J ütőmunkájú, normalizált, légköri korrózióálló szerkezeti acél jele: S355J2G3W. A jelölés származtatását a 2.9.4. ábra mutatja.



2.9.4. ábra. Az S355J2G3 acél jelölésének származtatása

Fő jel MSZ EN 10027-1 szerint		Kiegészítő jel IC 10szerint	
S szerkezeti acél	355 minimum $R_e=355 \text{ N/mm}^2$	J2 ütőmunka min. 27J -20°C-on	G3 Normalizált W Légköri korrózióálló

A 2. csoport a vegyi összetétel szerinti jelölés, melynek négy alcsoportja van.

2.1. alcsoportba az ötvözetlen acélok tartoznak, ha $Mn < 1\%$ tartalom középértéke kivéve az automata acélokat.

Jelölése: C betűvel és a mellette számmal az előírt karbontartalom középértékének százszorosa.

Példa: A 0,45% átlagos karbontartalmú ötvözetlen acél jele: C45

2.2. alcsoportba tartoznak az ötvözetlen acélok ha a mangántartalom középértéke $Mn \geq 1\%$, az ötvözetlen automata acélok, valamint az ötvözött acélok (a gyorsacélok kivételével), ha egyik ötvözőeleme sem haladja meg az 5%-ot.

A kód sorrendben a következő jeleket tartalmazza:

- ◆ az előírt karbontartalom középértékének százszorosa,
- ◆ az acél jellemző ötvözőinek vegyjele, a mennyiség csökkenésének sorrendjében (azonosság esetén alfabetikus sorrendben),
- ◆ az ötvözőelemek tartalma a táblázatban megadott tényezővel megszorozva és a legközelebbi egész számra felkerekítve.

2.9.5. ábra. A 2.2 alcsoport ötvözőelemeinek szorzótényezője

Az ötvözőelem vegyjele	Szorzótényező
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Példa: 34CrMo4, karbontartalom középértéke $C=0,34\%$, krómtartalom egészre kerekített értéke $Cr=1\%$, molibdén tartalma $Mo < 1\%$ (néhány tized).

2.3. alcsoportba az ötvözött acélok tartoznak a gyorsacélok kivételével, ha bármelyik ötvöző mennyisége nagyobb mint 5%.

A kód sorrendben a következő jeleket tartalmazza:

- ◆ X betű (ez jelzi, hogy erősen ötvözött acél),
- ◆ az előírt közepes karbontartalom százszorosa,
- ◆ a jellemző ötvözőelemek vegyjelét, mennyiségük csökkenő sorrendjében,
- ◆ az ötvözőelemek előírt mennyiségének középértékét, a legközelebbi egész számra kerekítve.

Példa: X210Cr12, karbontartalom középértéke C=2,1%, krómtartalom egészre kerekített értéke Cr=12%.

2.4. alcsoportba a gyorsacélok tartoznak. A gyorsacélok átlagos krómtartalma Cr=4%, karbontartalma átlagosan C=1% ezért ezeket külön nem jelölik.

A kód sorrendben a következő jeleket tartalmazza:

- ◆ HS betűket (High Speed), (régi jelölésben R (Rapid) betű volt),
- ◆ az ötvözőelemek átlagos mennyiségét adott sorrend szerint (W wolfram, Mo molibdén, V vanádium, Co kobalt), egymástól kötőjellel elválasztva,

Példa: HS 6-5-2-5, W=6%, Mo=5%, V=2%, Co=5%, Cr=4%, C=1%

Az acélok számjelölése MSZ EN10027-2 szerint

Ez a jelölésrendszer a gépi adatfeldolgozásra alkalmasabb arab számjegyekből áll, kizárólag pontos, kereskedelmi specifikációra szolgál, az anyag főcsoportjelét, az acélcsoport jelét és a csoporton belüli sorszámot tartalmazza.

A számjelölés alapja a német számjelölési rendszer (Werkstoffnummern) sok esetben még ma is Wr.n. rövidítést használnak a számjelölésnél. A számjelölés felépítése azon alapul, hogy az első számjegy az anyagcsoport megjelölésére szolgál a következő ábra. szerint (1.9.1.6. ábra). A számjelölés felépítése a következő:

X.YZUV

2.9.6. ábra. Számjelölés fő anyagcsoportjai

Számjel (X)	Fő anyagcsoport
0	Öntöttvas anyagok, nyersvas típusok, ferroötvözetek
1	Acélok
2	Színesfémek, nehézfémek
3	Könnyűfémek
4	Porkohászati anyagok
5...8	Nem fém anyagok
9	Eddig ismeretlen anyagok számára fenntartva



Az acélok 1 fő anyagcsoport szerinti jelölésűek, ahol az X=1. Az Y értéke pedig a következő acél-csoportokat jelöli:

- 0: ötvöztelen acélok,
- 1: nemesacélok,
- 2: szerszámacélok,
- 3: szerszámacélok (gyorsacélok),
- 4: korrózióálló és hőálló acélok,
- 5: szerkezeti, nyomástartóedény. és gépacélok
- 6: szerkezeti, nyomástartóedény. és gépacélok
- 7: szerkezeti, nyomástartóedény. és gépacélok
- 8: szerkezeti, nyomástartóedény. és gépacélok
- 9: alapacélok

Z értéke az alcsoporton belül 0...9 közötti lehet az ötvöztetés mértéke szerint. U és V értékei pedig az alcsoportokon belüli acélokat jelölik.

2.9.3 Statikus terhelésű anyagvizsgálatok

A hegesztett szerkezetekhez történő anyagválasztás és szerkezettervezés során figyelembe kell vennünk a szerkezetet terhelő igénybevételeket. Az igénybevételek lehetnek statikusak (időben állandó) vagy dinamikusak (időben változó). A statikus terhelésű anyagvizsgálatoknál állandó terhelést alkalmazunk, mely időben állandó. Ilyen vizsgálatok a statikus keménységmérések, a szakító-, hajlító-vizsgálat, stb.

Keménységmérés

Mechanikai anyagvizsgálatban a keménység fogalma alatt a szilárd anyagok egy másik anyag, test behatolásával szemben kifejtett ellenállása. A keménység fogalmát a terhelő erő és a létrehozott lenyomat területének hányadosával definiáljuk a statikus szűrő keménységmérések esetében.

A hegesztett kötések keménységvizsgálatával következtethetünk a hegesztett szerkezetben a hegesztés okozta szilárdságtani és fémtani változásokra. Megállapíthatjuk a keménységből ill. annak változásából a ridegtörésre való érzékenységet, a repedési érzékenységet, ill. az esetleges metallográfiai változásokat is. Ebből kifolyólag adott hegesztési feladatnál előírható a varrat és hőhatásövezet maximális keménysége.

A hegesztett kötések keménységmérésének „előnye” az egyéb roncsolásos anyagvizsgálatokkal szemben, hogy a kész szerkezeten a szerkezeti elem „károsítása” nélkül akár üzemi körülmények közt akár terepen elvégezhető, és általában nem hagy a követelmények szempontjából káros „nyomot” a munkadarabon. A keménységből jól következtethetünk a szilárdsági jellemzőkre, melyeket nyilvánvalóan nem áll módunkban egy kész alkatrészen vizsgálni.

Keménységvizsgálatok célja: az adott eljárással a vizsgált anyagok keménységének meghatározása, mely adatok ismeretében egy nehezebben ill. költségesebben meghatározható anyagjellemző kellő megbízhatósággal való megbecsülése. Ilyenek pld. R_{eH} , R_m stb.

Jellemző statikus keménységvizsgálati eljárások:

- ◆ Brinnell-keménységmérés
- ◆ Vickers-keménységmérés
- ◆ Rockwell-keménységmérés



Jellemző dinamikus keménységmérés

◆ Poldi kalapácsos keménységmérés

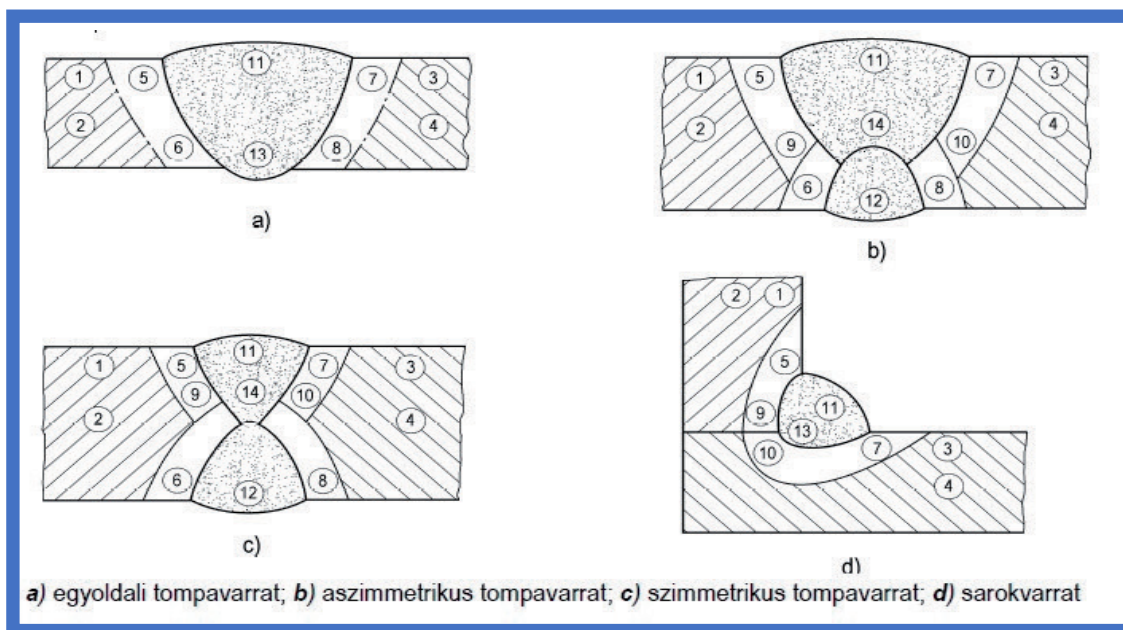
A keménységvizsgálatok közül a hegesztett varratok és kötések ellenőrzésére többnyire a Vickers-vizsgálatot, keményfelrakó hegesztés esetén a Rockwell-féle keménységmérést alkalmazzák. Igen vékony kérgék, keskeny hőhatásövezet keménységmérésére (pl. termikus szórás után) használható a mikrokeménység-mérés is. A statikus keménységmérések főbb jellemzőit a 2.9.2.1. ábra foglalja össze.

2.9.7. ábra. A statikus keménységvizsgálatok elve és összefüggései

Jellemzők	Brinell	Vickers	Rockwell B	Rockwell C
Vázlat				
A benyomószerszám és mérete	edzett acélgolyó vagy keményfém golyó (Ø1; Ø2,5; Ø5; Ø10 mm)	136°-os gyémántgúla	1,59 mm-es acélgolyó (1/16")	120°-os gyémántgúp
Terhelőerő, F	9,8...29420 N	49...980 N	előterhelés: 98 N főterhelés: 882 N összterhelés: 980 N	előterhelés: 98 N főterhelés: 1373 N összterhelés: 1471 N
Terhelési idő	10...30 s	10...30 s	5...10 s	5...10 s
Keménység meghatározása	$HB = \frac{2.0102 \cdot F}{D \pi (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	$HV = \frac{0,189 F}{d^2}$	$HRB = 130 - \frac{X_{vi}}{0,002}$	$HRC = 100 - \frac{X_{vi}}{0,002}$

Keménységmérést az alapanyagban, hőhatásövezetben és varratban végezzük el. Egyedi lenyomatok elhelyezése az 2.9.8. ábra mutatja az MSZ EN 1043-2 szerint.

2.9.8. ábra. Az egyedi lenyomatok elhelyezése



Brinnell-keménységmérés

Elve: egy adott intervallumban kiválasztott terhelőerővel a vizsgálandó munkadarab felületébe egy meghatározott ideig golyó alakú szűrőszerszámot nyomunk.

A golyó átmérőjét (D) (Ø 10, Ø 5, Ø 2,5 , Ø 2 és Ø 1 mm) és annak keménységét (850 HV) szabvány írja elő.

A golyó átmérőjének kiválasztásában a vizsgált darab vastagsága ad segítséget.

3 mm lemez vastagságig, Ø 2,5 , Ø 2 és Ø 1 mm golyó használatos

3-6 mm lemezvastagság között, Ø 5 mm-es golyó használatos

6 mm-nél vastagabb anyag esetén Ø 10 mm-es golyó használatos.

Terhelő erő (F) 9,8~29420 N között lehet megválasztani

Terhelési idő: 10~30 sec közötti

Keménység meghatározása: Számítással vagy a mért értékek alapján táblázatból való meghatározással. ahol: a terhelő erő, F (N), a benyomódás gömbsüveg felülete A (mm²), D a terhelő golyó átmérője (mm) és a „d” a lenyomat átmérője (mm), melyet egymásra merőleges átló átlagaként határozunk meg.

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Alkalmazhatósága: Lágy vagy mérsékelt lágy anyagok mérésére szolgál.

Újabban már használhatunk acélgolyó helyett kerámia golyó szűrőszerszámot, ezzel nagyobb keménységű acélokon is végezhető keménységmérés. A kerámia golyóval végzett Brinell-keménységmérés jele: HBW, a jelölésben a W (wolfram) a golyó anyagára utal.

Vickers-keménységmérés

Elve: a kiválasztott terhelőerővel a vizsgálandó munkadarab felületébe egy meghatározott ideig golyó alakú, gyémánt szűrőszerszámot nyomunk.

Szűrőszerszám: 136°-os csúcshögű gyémántgolyó

Terhelő erő (F) 49-980 N között lehet megválasztani

Terhelési idő: 10~30 sec közötti

Keménység meghatározása: Számítással vagy a mért értékek alapján táblázatból való meghatározással ahol a „d” (mm) a lenyomat golyó két átlójának átlagaként határozunk meg.

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

Rockwell-féle B–keménységmérés

Elve: egy meghatározott előterhelő erővel majd egy főterhelő erővel a vizsgálandó munkadarab felületébe egy meghatározott ideig golyó alakú szűrőszerszámot nyomunk.

Szűrőszerszám: Ø1/16”=Ø 1,59 mm acélgolyó

Terhelő erő (F) Előterhelés 98 N , Főterhelés 882 N

Terhelési idő: 5~10 sec közötti

Keménység meghatározása: általában a mérőóráról vagy kijelzőről történő leolvasással. A keménység a szűrőszerszám behatolásának mélységéből származtatható.



Rockwell-féle C–keménységmérés

A legelterjedtebb keménységmérés, mely általában kemény anyagok mérésére szolgál.
Acélok max. keménysége: 62 HRC, lágyacéloké 25 HRC.

Elve: egy meghatározott előterhelő erővel majd egy főterhelő erővel a vizsgálandó munkadarab felületére egy meghatározott ideig kúp alakú gyémánt szúrószerszámot nyomunk.

Kúp mérete: 120°-os gyémántkúp

Terhelő erőt (F) Előterhelés 98 N , Főterhelés 1373 N

Terhelési idő: 5~10 sec közötti

Keménység meghatározása: általában a mérőóráról vagy kijelzőről történő leolvasással. A keménység a szúrószerszám behatolásának mélységéből származtatható.

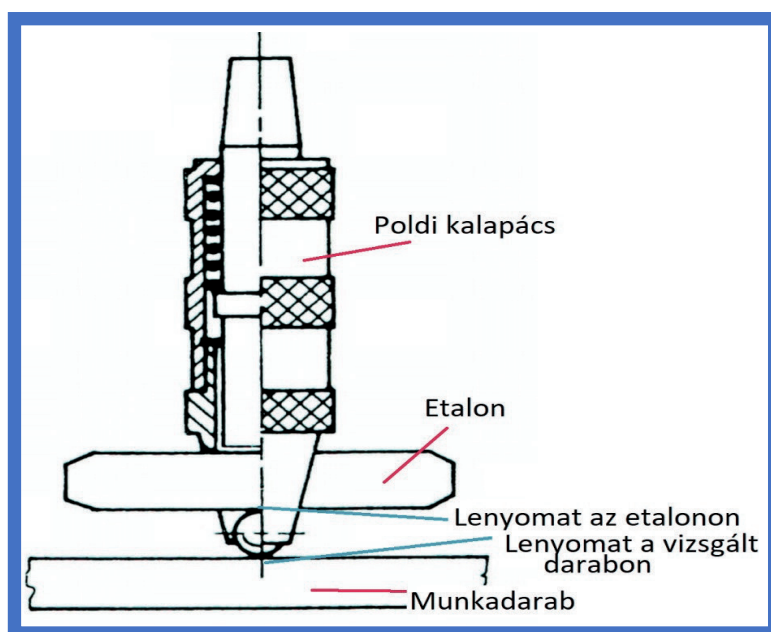
Poldi kalapácsos keménységmérés

Dinamikus, hordozható keménységmérés.

Elve: egy határozott kalapácsütéssel munkadarab felületére egy meghatározott méretű golyót ütünk egy speciálisan kiképzett szerszámmal. A szerszám kiképzése olyan, hogy a vizsgált anyagba ill. egy ismert keménységű próbatestbe (etalon) egyidejűleg lenyomatot képez, mely lenyomatok méretéből adott táblázat segítségével meghatározható a keménység.

Alkalmazása jellemzően olyan darabokon való keménységmérésre, mely darabok méretüknél fogva nem helyezhetők be az előzőleg leírt mérőműszerekbe vagy helyszínen nem kiserelhető alkatrészek esetén. A kalapácsütés azonos az etalonon és a munkadarabon ezért ezt a keménység meghatározása során nem kell figyelembe venni, a keménység két lenyomat átmérőjéből az etalon keménységből határozható meg. Az eredmény Brinell- (HB) keménységet ad.

2.9.9. ábra. Poldi kalapács elvi rajza



Szakítóvizsgálat

A vizsgálat célja a teljes kötés szakítási jellemzőinek, úgymint szakítószilárdságának, folyáshatárának, nyúlásának és keresztmetszet-csökkenésének, illetve leggyengébb szakaszának (varrat, hőhatás-övezet, alapanyag) meghatározása. Hegesztett kötéseknel a szakítóvizsgálat célja tulajdonképpen az, hogy megállapítsuk, hogy a hegesztett kötés szilárdsága nem kisebb az alapanyagénál. Illetve, ha nem kisebb, milyen mértékben haladja meg azt. A tompahegesztett kötések szakadási helyének megállapításához használt keresztirányú szakítóvizsgálatot a MSZ EN ISO 4136 (korábban MSZ EN 895) szabvány írja le. Kis átmérőjű csövek esetén (ha mást nem írnak elő: $D < 18 \text{ mm}$) esetén a vizsgálatot el lehet végezni a teljes keresztmetszetű csövön.

A vizsgálat célja: az anyagok egytengelyű húzó igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása.

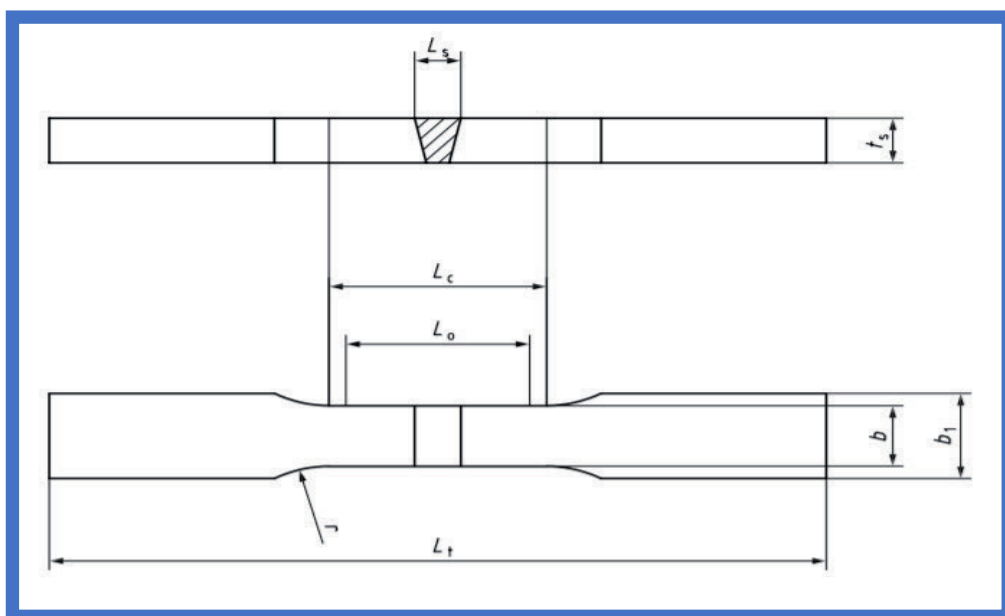
A szakítóvizsgálat első lépése a vizsgálandó anyagból álló próbatest alakjának és méretének meghatározása, melyek annak a terméknek az alakjától és méreteitől függenek, amelyek mechanikai tulajdonságait meg kell határozni.

A próbatesttel szemben támasztott követelmények:

- ◆ reprezentálja a vizsgálandó anyagtételt;
- ◆ fejkiképzése illeszkedjen a rendelkezésre álló szakítógéphez;
- ◆ szakítandó keresztmetszete, a várható szilárdság figyelembevételével, illeszkedjen a szakítógép méréshatárához;
- ◆ alakja tegye lehetővé a vizsgálni kívánt paraméterek meghatározását.

A próbatestek keresztmetszete lehet kör, négyzet, derékszögű négyszög, körgyűrű vagy kivételes esetben más alakú.

2.9.10. ábra. Lemezzsakító próbatest



Az olyan próbatesteket, amelyek geometriailag hasonlóak, valamint keresztmetszetük és jeltávolságuk között meghatározott összefüggés van, arányos próbatesteknek nevezzük. Az arányos próbatestek jeltávolsága és keresztmetszete között a következő az összefüggés, ahol k szorzóértéke rövid szabványos arányos próbatest esetében 5,65; hosszú szabványos arányos próbatest esetében pedig 11,3.:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \text{ (mm)}$$

L_0 eredeti jeltávolság (terhelés megkezdése előtti jeltávolság)

L_u végső jeltávolság (szakadás utáni jeltávolság; a két darabot úgy kell egymáshoz illeszteni, hogy tengelyeik egy egyenesbe essenek)

L_t a próbatest teljes hossza

L_c a párhuzamos szakasz hossza

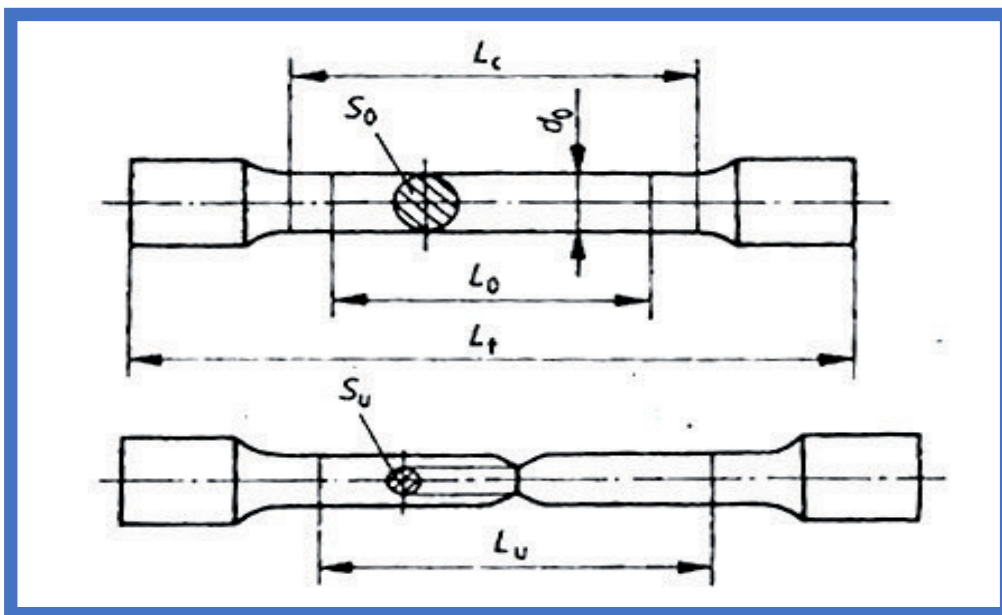
d_0 a próbatest átmérője a vizsgálat megkezdésekor

S_0 a próbatest keresztmetszete a vizsgálat megkezdésekor

S_u a próbatest keresztmetszete a szakadás után

A rövid arányos szabványos hengeres próbatest esetében $L_0 = 5 d_0$, valamint hosszú arányos szabványos hengeres próbatest esetében $L_0 = 10 d_0$.

2.9.11. ábra. Szakító próbatest



A szakítóvizsgálat során meghatározható anyagjellemzők:

Alakíthatósági (szívóssági) jellemzők:

Szakadási nyúlás:
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

Egyenletes nyúlás: a folyáshatár és a maximális erő közti szakasz a diagramon. A vizsgálat során megfigyelhető, hogy ebben a szakaszban a maximális erő eléréséig az alakváltozás jelentős, de minden keresztmetszetben azonos mértékű, tehát a próbatest mindenhol az eredeti keresztmetszetű méretei változnak csupán. (nincs keresztmetszeti torzulás)



$$A_m = \frac{L_m - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

Kontrakció: a szakadáshelyén a szakadás előtt kialakuló fajlagos keresztmetszet-csökkenés:

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100\%$$

Szilárdsági jellemzők

Folyáshatár kifejezett folyást mutató anyagoknál:

Felső folyáshatár: $R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$ mértékegység: N/mm²

Alsó Folyáshatár: $R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$ mértékegység: N/mm²

Kifejezett folyást nem mutató anyagoknál:

Egyezményes folyáshatár: a 0,2%-os maradó alakváltozáshoz tartozó erő és a kiinduló keresztmetszet

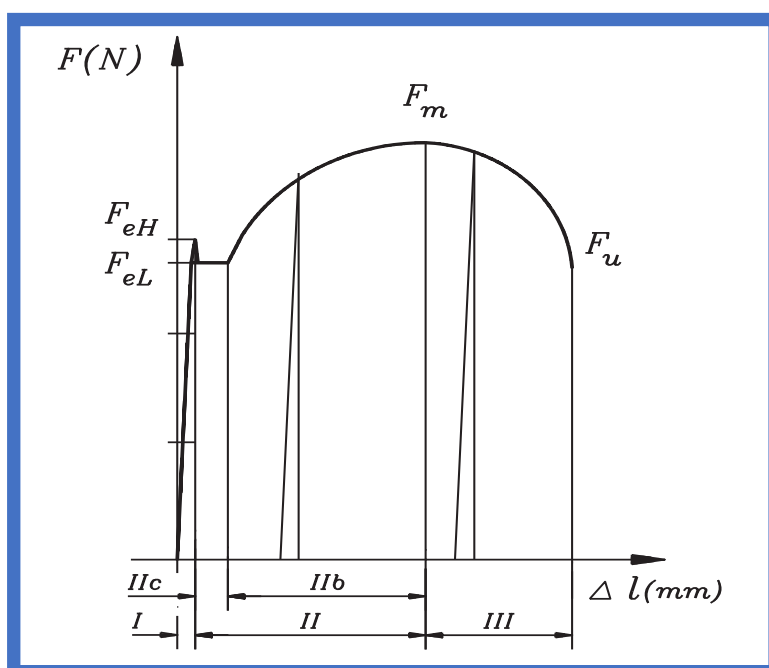
hányadosa. $R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$ mértékegység: N/mm²

Szakítószilárdság: a szakítóvizsgálat során mért legnagyobb erő és a kiinduló keresztmetszet

hányadosa. $R_m = \frac{F_m}{S_0}$ mértékegység: N/mm²

Kontrakciós feszültség: $R_u = \frac{F_u}{S_u}$ mértékegység: N/mm²

2.9.12. ábra. Szakító diagram



A szakító diagramon a megnyúlást és a megnyúlás eléréséhez szükséges erőt ábrázoljuk állandó húzósebesség mellett. Az I. szakasz a rugalmas alakváltozás szakasza. Ezen a szakaszon érvényes a Hook-törvény, az ébredő feszültségeket ezen a szakaszon ebből az arányosságból számítjuk. II. szakasz: A folyáshatár elérésétől a maximális erőig (szakítószilárdságot ebből határozzuk meg). Maradó alakváltozás történik, melyre jellemző a térfogat-állandóság, vagyis a próbatest hossza nagyobb, keresztmetszete kisebb lesz. III. szakasz: Kontrakciós szakasz, akkor már nem érvényes a térfogat-állandóság, a próbatest egy adott keresztmetszetben vékonyodni kezd, majd eltörik.

A vizsgálatot szakítógéppel végezzük.

A szakítógép három fő funkciója a következő:

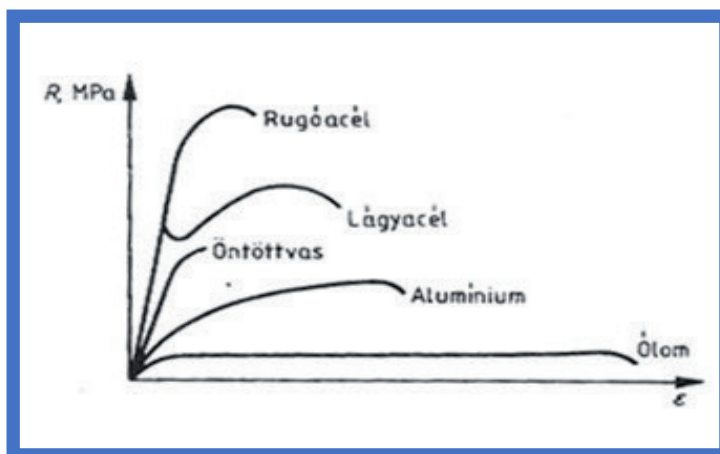
1. a próbatest befogása;
2. terhelése;
3. az erő és az alakváltozás mérése, annak kijelzése és kiírása.

A szakítógép mechanikus vagy hidraulikus hajtású lehet. A szakítógéppel szembeni követelmények a következők:

- a) a próbatesthez képest nagy merevség;
- b) a próbatesthez illeszkedő befogószerkezet;
- c) erőmérési és regisztrálási lehetőség;
- d) a befogófej mozgásának mérése és regisztrálása (durvanyúlás mérése);
- e) próbatestre illeszkedő útdós (nyúlásmérős) regisztrálási lehetőség (finomnyúlás rése).
- f) szabályozható sebesség;

A különböző anyagokra eltérő szakítódiagram jellemző.

2.9.13. ábra. Eltérő anyagok szakítódiagramjai



Hajlítóvizsgálat (hegesztett kötés roncsolásos vizsgálata)

A hajlítóvizsgálat a hegesztett kötések és/vagy varratok roncsolásos vizsgálatára többnyire az alapanyag vizsgálatára használt eljárásokat alkalmazzák. Célja a kötés szívósságának ellenőrzése.

A hajlító vizsgálatok eredményei alapján kell a legtöbbször újra hegeszteni a darabokat. A vizsgálat során a húzott szál nyúlása meghatározható. A hajlítóvizsgálat a hegesztett kötésből kimunkált próbatest alakíthatóságának vizsgálata. Ha megfelelő a hegesztés, akkor az előírt átmérőjű hajlító tuskére és az adott hajlítási szögre való alakítást a próbatest repedés nélkül viseli el. A hajlító szerszám nyomótest vagy görgő lehet.

A próbatestet úgy kell kivenni a hegesztéssel gyártott termékből, a hegesztett kötésre keresztirányban, hogy forgácsolás után a hegesztési varrat hossz tengelye a próbatest vizsgálati szakaszának közepére essen. 8mm-nél nagyobb anyagvastagság esetén nem szabad kivágást alkalmazni. Ha olyan vágási eljárást alkalmaznak, amely befolyásolja a próbatest anyagának tulajdonságait, akkor ezt a befolyásolt részt, de legalább 8 mm széles sávot le kell forgácsolni belőle. Leginkább olyan megmunkálást kell alkalmazni, ami nem befolyásolja a vizsgálati eredményeket. Kivételt képezhet, ha a hajlítóvizsgálat célja csak a hegesztési hibák jelenlétének kimutatása, amikor a próbatest széleit simára kell csiszolni.

A próbatestet készre kell munkálni forgácsolással vagy köszörüléssel úgy, hogy közben a próbatest anyaga ne keményedjen vagy hevüljön fel, valamint, hogy a varrat felső és alsó felületei az alapfém eredeti felületeivel síkba legyen munkálva. Fontos, hogy a próbatest felületei mentesek legyenek a vizsgálat irányára merőleges karcoktól, bemetszésektől. Keresztmetszete legyen a próbatest teljes hossza mentén egyenletes téglalap. Alapesetben a próbadarabokat nem kell hőkezelné. Ettől eltérni akkor kell, ha a rá alkalmazandó szabvány előírja. Ekkor a hőkezelés adatairól vizsgálati jegyzőkönyvet kell készíteni. A próbatest éleit a húzásra igénybe vett felületen R-lekerekítéssel kell ellátni, amely ne legyen kisebb 0,2 a-nál és legfeljebb 3 mm legyen. (A próbatest a vastagsága általában felel meg a hegesztett kötés közelében levő alapfém vastagságának.) A próbatesteket meg kell jelölni a pontos azonosíthatóság érdekében.

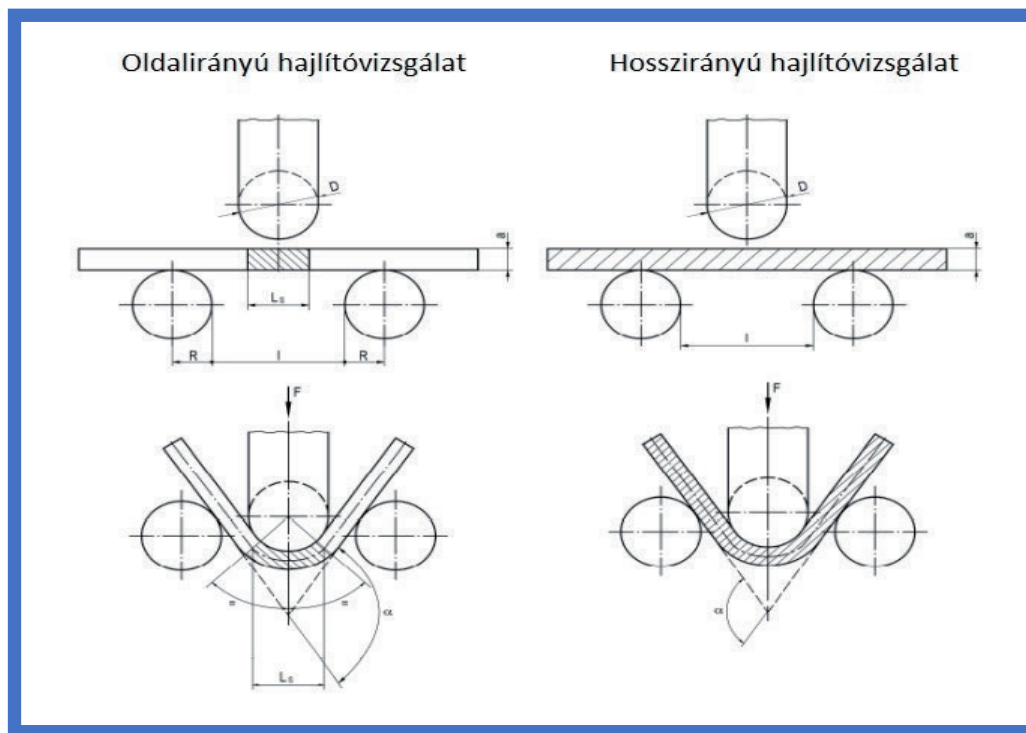
A hajlítóvizsgálat során a próbatestet az adott alapanyagra, ill. kötésre meghatározott feltétel teljesüléséig (hajlítás megadott szögig vagy adott méretű repedés megjelenéséig, ill. törésig) úgy kell meghajlítani, hogy a tengelye hajlítás közben elcsavarodás nélkül egy síkban maradjon és az egyik varratfelület húzó igénybevételt szenvedjen, valamint a kötés az alakváltozásnak kitett övezetbe essék. A vizsgálatához két, párhuzamos hengerből álló megtámasztásra kell helyezni. A próbatest felületére merőlegesen, a támaszköz közepén a hegesztési varrat hossz tengelye mentén alkalmazott erőhatással a próbatestet lassan és folyamatosan kell koncentrált terheléssel hajlítani. A hajlítás végezhető keresztirányban, hosszirányban vagy oldalirányban (2.9.14. ábra). Kereszt-, ill. hosszirányú hajlításkor a hajlítás végrehajtható koronaoldalról (FBB) vagy gyökoldalról (RBB).

A koronaoldali hajlító próbatestnél a vizsgálat során a húzott felület tartalmazza a varrat legnagyobb szélességét. A gyökoldalinal pedig a vizsgálat során a húzott felület tartalmazza a varrat gyökét. Ha a hegesztési varrat két oldalról készült, azt az oldalt nevezik koronaoldalnak, ahonnan a hegesztést megkezdtek, míg a másik a gyökoldal.

Keresztirányú oldalhajlító vizsgálatnál a húzott felületen van a varrat keresztmetszete. A nyomótest d-átmérője az alkalmazási szabvány szerint legyen. Általában $d > 20$ mm de minimum a lemezvastagság 4 szerese. A hajlítóvizsgálatot az MSZ EN ISP 5173:2010 „Fémek hegesztett kötéseinek roncsolásos vizsgálatai. Hajlítóvizsgálatok” szabvány alapján kell elvégezni.



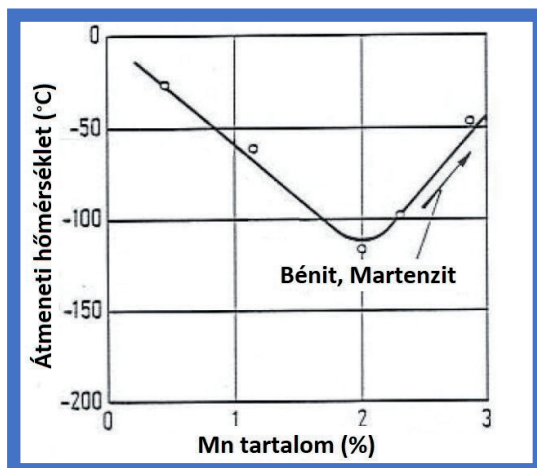
2.9.14. ábra. A hajlítóvizsgálat elve



2.10 NAGY SZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTÉSE

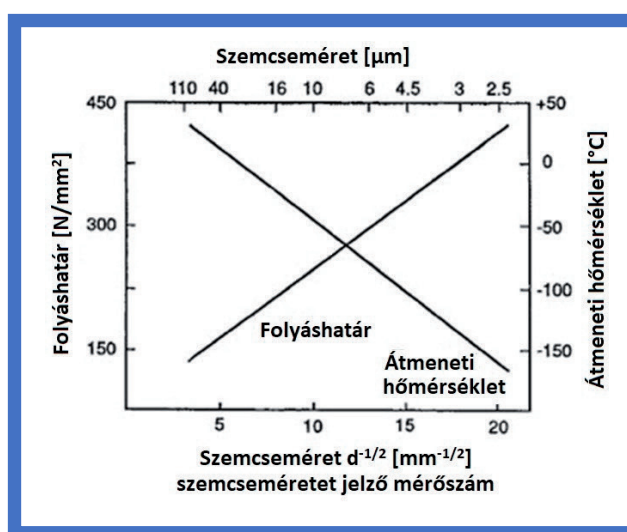
Az MSZ ISO EN 15608 szerinti 2 és 3 anyagcsoport anyagai tartoznak a nagyszilárdságú acélokhoz. A acél szilárdságának növelésére több módszer ismert. A szilárdság növelésével a szívósság általában csökken. Ötvözéssel történő szilárdságnövelés a széntartalom növelésével a legegyszerűbb. A hegesztésre szánt acélok esetében viszont a maximális széntartalom fölé ($C_{max}=0,2\%$) nem növelhető. Emellett mangánötvözéssel is növelhető a szilárdság, de a mangántartalom növelésével nő a szénegyenérték is. A mangántartalom növelésével nő a szilárdság, de a 1,8% felett csökkenti az ütőmunkát, emiatt a mechanikai tulajdonságokat rontja (2.10.1. ábra).

2.10.1. ábra. Mangán ötvöző hatása az átmeneti hőmérsékletre



A szemcsefinomítás az a módszer mellyel mind a szilárdság mind a szívósság növelhető. A 2.10.1. ábra mutatja a szilárdság (folyáshatár) és a szívósság (átmeneti hőmérséklet) szemcseméret kapcsolatát. Látható, hogy a szemcseméret csökkenése a folyáshatárt növeli az átmeneti hőmérsékletet pedig csökkenti. A szemcsefinomítás elérhető mikroötvözással, vagy termomechanikus kezeléssel. Általában alkalmazott szemcsefinomító mikroötvözők az alumínium (Al), titán (Ti), vanádium (V), nióbium (Nb), cirkónium (Zr) és a bór (B). A mikroötvözők mennyisége az acélban század százalék (maximum 0,015%), a bór esetében pedig ezred százalék. A mikroötvözők stabil karbidokat vagy nitrideket képeznek (ebben az esetben szükséges a nitrogénötvözés is), melyek a szemcsedurulást megakadályozzák. A nitridek diszperz eloszlását hőkezeléssel hozzák létre. A mikroötvözött acélokra általában a növelt folyáshatár jellemző $R_{eH} > 355 \text{ N/mm}^2$.

2.10.2. ábra. A szemcseméret és a szilárdság-szívósság kapcsolata



A szemcseméret csökkenése együtt jár egy adott térfogatban a szemcsehatár, illetve a fázishatár összes felületének növekedésével, ami egyben az anyag energiájának növekedését, a minimális energiaszinttől való nagyobb eltérést is jelenti. Színfémeknél a szemcseméret úgy csökkenthető, illetve a szemcseszám úgy növelhető, ha a kristályosodás egyidejűleg több csírán indul meg. Ez a feltétel általában a kristályosodó rendszer nagyobb mértékű túlűtésével érhető el, ami egyben a kristály gyorsabb növekedésével, így nagyobb mértékű rácsrendezetlenséggel is jár. A rendezetlenségek, így a rácsé is, energia-növekedéssel és ezért egyes tulajdonságok változásával jár.

2.10.1 Termomechanikusan hengerelt nagyszilárdságú a célok hegeszthetősége

A szemcseméret csökkentésének további kedvező hatása, hogy nő az ütmunka értéke és csökken az átmeneti hőmérséklet is. A szemcseszerkezet finomítása hőkezeléssel, például normalizálással, vagy a hidegalakítást követő újrakristályosítással viszonylag egyszerűen elérhető. A hőkezeléssel elért finom szemcseszerkezet azonban a hegesztett kötés hőhatásövezetének az 1100°C fölötti hőmérsékletre hevült térfogataiban az ausztenit szemcsenövekedése miatt eldurvul. A szemcsenövekedés jelentősen mérsékelhető, ha az ausztenitszemcse határán finom eloszlásban idegen fázis, például az ausztenitben oldódó vas-karbidnál stabilabb karbid, nitrid, illetve karbonitrid található. Ezek az idegen fázisok, mint csírák szerepelnek az ausztenit átalakulásánál és a levegőn történő hűlésnél finomszemcsés ferrit-perlites szövetszerkezet alakul ki.

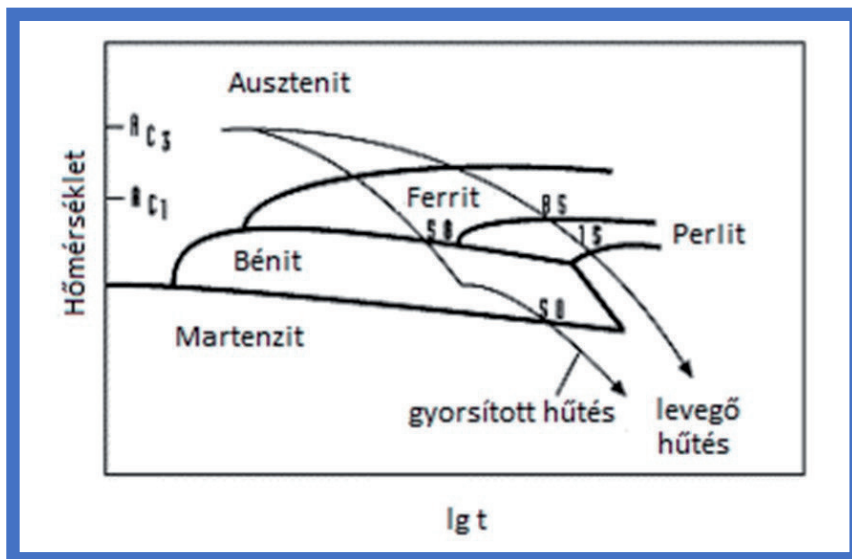
Termomechanikusan kezelt finomszemcsés acélok esetében a meghatározott minimális folyáshatár $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$. Ennek a csoportnak két alcsoportja van melyet a 2.10.3. ábra mutat. Kis széntartalmuk miatt a termomechanikusan kezelt acélok jól hegeszthetők. A termomechanikusan kezelt finomszemcsés acélok kémiai összetételére jellemző, hogy $C < 0,16\%$, $Mn = 1 \sim 1,7\%$, $Cr + Mo + Cu < 0,6\%$ valamint mikroötvözőket tartalmaznak pl. $Nb < 0,05\%$.

2.10.3. ábra. A termomechanikusan hengerelt acélok (MSZ EN ISO 15608 szerint)

Acélcsoport	Alcsoport	Acél típus
2		Termomechanikusan kezelt finomszemcsés acélok meghatározott minimális folyáshatárral $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$.
	2.1	Termomechanikusan kezelt finomszemcsés acélok meghatározott minimális folyáshatárral $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} < 460 \text{ N/mm}^2$
	2.2	Termomechanikusan kezelt finomszemcsés acélok meghatározott minimális folyáshatárral $R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$.

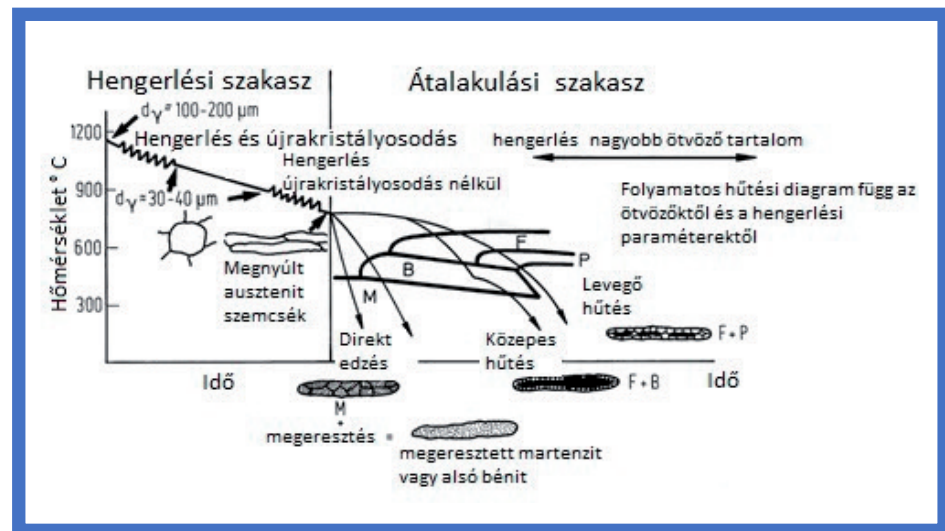
A termomechanikus lemezhengerlésnél jelentős szemcseméret-csökkenés érhető el gyorsabb hűtési sebességgel, mivel az alacsonyabb átalakulási indulási hőmérséklet több csírárt biztosít az túlhűtött ausztenitben.

2.10.4. ábra Folyamatoshűtés-diagram hűtése sebesség hatása



Termomechanikus kezelés során a hengerlést kézbentartott hőmérsékleten végzik. Fontos az ausztenitesítés hőmérséklete és ideje, valamint a hengerlési hőmérséklet tartományok. A termomechanikus hengerlés utolsó alakítási (hengerlési) lépése az újrakristályosodási hőmérséklet alatt történik így finomszemcsés szerkezet alakul ki (2.10.5. ábra szerint).

2.10.5. ábra. Termomechanikus kezelés elve

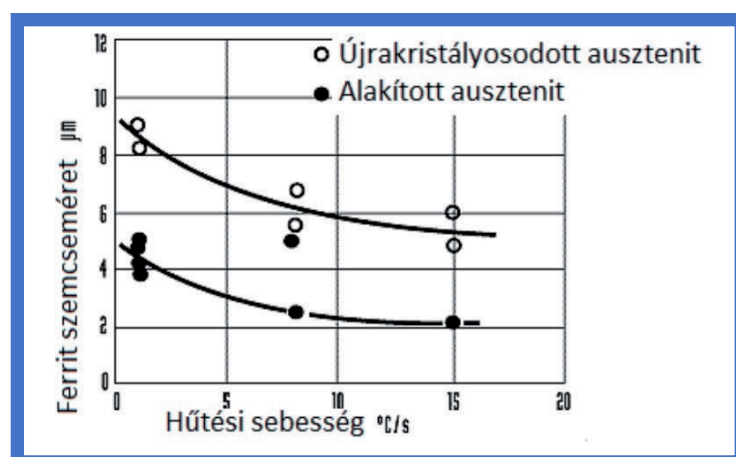


A szerkezeti acélok gyorsított hűtése ferrit-bénit mikrostruktúrát eredményez, összehasonlítva a levegőhűtéses ferrit-perlit mikrostruktúrával. A gyakorlatban a gyorsított hűtést általában 550°C körüli hőmérsékleten szakítják meg, majd ezt követően levegőhűtés követi.

I. A poligonális ferrit szemcseméretét finomítják. Minél gyorsabb a hűtés sebessége, annál finomabb lesz a ferrit szemcsemérete.

II. A kapott acél mikrostruktúrája körülbelül 50% bénitot tartalmaz, amely finomabb szemcsemérettel rendelkezik, mint a ferrit. A bénit nagyobb diszlokációs sűrűségével együtt az acél szilárdsága jelentősen megnő, és szilárdsága is javul.

2.10.6. ábra. A szemcseméret kialakulása



A termomechanikusan hengerelt acélok jobb szívósságot mutatnak, mint a normalizáltak, és a szükséges szilárdság elérhető alacsonyabb szénegyenértékkel, alacsonyabb költséggel és jobb hegeszthetőséggel. A termomechanikusan hengerelt acélok alkalmazási tartománya a minimális folyás-

határon belül (360MPa~500MPa). Az ilyen acélok tipikus alkalmazási területei a hajógyártás, ideértve a jégtörőket az alacsony hőmérsékletű környezetekhez használt hajókat, haszongépjármű-építést, darukat és más általános acélszerkezeteket.

Az acélok jelölérendszerében a termomechanikus kezelést az M betű jelzi. A 2.10.6. ábra néhány termomechanikusan kezelt acél kémiai összetételét foglalja össze.

2.10.2. ábra. Néhány termomechanikusan kezelt acél kémiai összetétele

Acél típus		C _{max}	Si _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}	Al _{max}	N _{max}	Mo _{max}	Nb _{max}	Ni _{max}	Ti _{max}	V _{max}
Jelölés	Számjelölés												
E275M	1.8895	0,13	0,50	1,50	0,035	0,03	0,02	0,02	0,20	0,05	0,30	0,05	0,08
E355M	1.8896	0,14	0,50	1,50	0,035	0,03	0,02	0,02	0,20	0,05	0,30	0,05	0,10
E420M	1.8897	0,16	0,50	1,70	0,035	0,03	0,02	0,02	0,20	0,05	0,30	0,05	0,12
E460M	1.8898	0,16	0,50	1,70	0,035	0,03	0,02	0,025	0,20	0,05	0,30	0,05	0,12

2.10.2. Nemesített nagyszilárdságú acélok hegeszthetősége

Vízedzésű, nagy folyáshatárú szerkezeti acélok. Ezek a legnagyobb folyáshatárú finomszemcsés acélok kis karbontartalmúak (C < 0,2%). Fő ötvözői a mangán (Mn = 0,3~1,8%), a króm (Cr < 1,5%), a nikkel (Ni < 2%), a molibdén (Mo < 0,7%), és a bór (B < 0,005%) (2.10.7. ábra). Más finomszemcsés acéloktól nagyobb króm-, nikkel- és a börtartalmukkal térnek el. A bór erős nitrid-, de különösen erős karbidképző. A bór nagyon hatékonyan növeli az átedzhetőséget azáltal, hogy az ausztenit szemcsehatárán dúsulva akadályozza a ferritképződést. Az acélgyártáskor csak nagyon gondos, pontosan szabályozott ötvözéssel érhető el (a bór oxid-, karbid- és nitridképző hajlama miatt), hogy az ausztenit átalakulásának akadályozásához szükséges 10~30 tömeg ppm elemi, szabad bór rendelkezésre álljon, de mennyisége ezt ne haladja meg. A nagyobb mennyiségű bór ugyanis a ferritképződést segítve, rontja az átedzhetőséget. A finom karbidkiválások ugyanakkor jelentősen növelik az acél ütőmunkáját, szívósságát.

2.10.8. ábra. Edzett, nemesített és kiválásosan keményített acélok (MSZ EN ISO 15608 szerint)

Acélcsoport	Alcsoport	Acél típus
3		Edzett, nemesített és kiválásosan keményített acélok, kivéve a rozsdamentes acélokat meghatározott minimális folyáshatárral $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$.
	3.1	Edzett, nemesített acélok, meghatározott minimális folyáshatárral $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} < 690 \text{ N/mm}^2$
	3.2	Edzett, nemesített acélok, meghatározott minimális folyáshatárral $R_{eH} > 690 \text{ N/mm}^2$.
	3.3	Kiválásosan keményített acélok kivéve a rozsdamentes acélokat

Ezen acélok hegesztésekor az ötvözőelemek hatására a hőhatásövezet felkeményedik, és túl nagy hőbevitel esetén a hőhatásövezet az alapanyaghoz képest jobban kilágyul, a szilárdság pedig lecsökken. A varrat-alapanyag átmenetnél keménységcsúcsok és keménységcsökkenés egyaránt kialakulhat. A munkadarabot ezért hegesztéskor elő kell melegíteni, és korlátozott hőbevitellel kell hegeszteni. Az előmelegítési hőmérsékletre az acél gyártójától lehet információt szerezni, illetve hegesztési kísérletekkel kell meghatározni. Nagyobb hőbevitelkor az elridegedés kritikusabb, mint a kicsit nagyobb ke-



ménység. A megengedett maximális HV-értéke nincs egységesen meghatározva. A hegesztési feladatot csak olyan hegesztő végezheti, aki képes a hőbevitelt (pl. a kihúzási hosszon keresztül a hegesztési sebességgel, a rétegfelépítéssel, stb.) szabályozni és állandó értéken tartani. A hegesztés utáni hőkezelés különösen a vanádium tartalmú ötvözeteknél vezet szívósságcsökkenéshez. A nagy folyáshatárú acélokat olyan helyen alkalmazzák, ahol jelentős tényező a súlycsökkentés (pl. autódaruk) és a szerkezetet hegesztéssel gyártják.

Ezen acélokra vonatkozó előírásokat az MSZ EN 10025-6:2005 szabvány tartalmazza. Az acél jelölésében a Q-betűjel a gyors hűtésre utal, az L-jel a szobahőmérséklet alatti üzemi hőmérsékletű berendezések gyártásához való alkalmasságot jelöli. Ebben a csoportba tartozó néhány acél legfontosabb mechanikai tulajdonságait, karbonegyenérték megengedett legnagyobb értékét a 2.10.9. ábra mutatja be.

2.10.9. ábra. Nagyszilárdságú acélok

Acél jele	Anyag-szám	CE _{max} , %	R _{eH min} , MPa	R _m , MPa	A _{min} , %	KVmin J hosszirányban			
						0°C	-20°C	-40°C	-60°C
S460Q	1.8908	0,47	460	550~720	17	40	30	–	–
S460QL	1.8906					50	40	30	–
S460QL1	1.8916					60	50	40	30

Kiválásosan keményített, nagy folyáshatárú szerkezeti acélok. A kiválásos keményítés azon alapul, hogy az egyes ötvözeteknél a hőmérséklet csökkenésével az ötvözőelem oldhatósága is csökken, és a kiválást új fázis létrejötte kíséri. Gyorsan lehűtve az ötvözetet arról a hőmérsékletről, ahol a szövetszerkezete egyensúlyban homogén, túltelített szilárdoldat jön létre. A túltelített szilárd oldat termodinamikailag instabil. A heterogén, többfázisú rendszer energiája kisebb, így a túltelített szilárdoldat energiaközléssel, vagy a nélkül, az új fázis kiválásával a termodinamikailag stabilabb állapotba hozható. Amennyiben a folyamat szobahőmérsékleten reális időtartamon belül végbemegy, akkor ez a természetes-, ha nem, akkor a folyamat a mesterséges öregítés. Az öregítéssel, a fázisátalakulás szabályozásával, az ötvözet tulajdonságai tág határok között változtathatók.

A kiválásos keményítést eredményező hőkezelésnek az első lépése az ötvözet olyan hőmérsékletre hevítése és ott hőntartása, ahol az ötvözőket lehetőleg teljesen oldatba lehet vinni. Ezt – a homogenizáló hőkezelés eredményeként létrejött –, az egyenletes ötvöző-eloszlást a szerkezetben a gyors hűtés stabilizálja, ugyanakkor az edzési hőmérsékletnek megfelelő nagy vakancia-sűrűséget befagyasztja. Hasonlóan a martenzitet eredményező hőkezeléshez, ezt is edzésnek nevezik. A kiválás révén megfelelő eloszlású-, és összetételű fázisok jönnek létre egy lényegesen kisebb hőmérsékletű, de hosszabb idejű hőntartással. Az edzés után az oldott anyag mikroszkopikus méretekben egyenletesen, de szubmikroszkopikusan egyenlőtlenül oszlik el. Ennek az egyenetlen eloszlásnak az a magyarázata, hogy az oldott anyag elsősorban azokon a kristálytani síkokon helyezkedik el, ahol a legkisebb rácstorzulást okozza. Az ilyen szubmikroszkopikus dúsulási síkok 1.-2 atomsorból állnak, és a síkon mindkét irányban 20...30 atomátmérő kiterjedésűek. A kiválásos keményedés felismerőinek neve alapján ezeket a néhány atomnyi távolságra kiterjedő dúsulásokat Guinier–Preston (GP) zónáknak nevezik. A GP-zónák az alapfémekkel gyakorlatilag koherensek. Rácsszerkezetük az alapfémével azonos, rácsállandójuk csak a zónahatáron tér el, és ott is csak az egyik tengely irányában. Ezért csak a zónahatáron van csekély rácstorzulás. A GP-zónák a szerkezetben csak rugalmas alakváltozást okoznak. A zónák a csúszósíkok folytonosságát nem szakítják meg, csak mozgását némiképp akadályozzák. Ez csupán a keménység kismértékű növekedésében és az alakváltozóképeség csökkenésben jelentkezik. A kiválásosan keményített, nagy folyáshatárú szerkezeti acélok a hegeszthetőség érdekében kis karbontartalmúak (C = 0,03...0,12%). Jellegzetes ötvözői a molibdén (Mo < 0,5%), a réz (Cu < 2%) és a nikkel (Ni < 2%). Ezen acélokra vonatkozó előírásokat az MSZ EN 10137-3:2000 szabvány tartalmazza. Az acél jelölésében a



kiválásos keményítésre az A-betűjel utal, az L-jel a szobahőmérséklet alatti üzemi hőmérsékletű berendezések gyártásához való alkalmasságot jelöli. A csoportba tartozó két acél mechanikai tulajdonságait a 2.10.10. ábra mutatja.

2.10.10. ábra. Kiválásosan keményített acélok

Acél jele	Anyag-szám	C, %	$R_{eH\ min'}$ MPa	$R_{m'}$ MPa	$A_{min'}$ %	KV _{min} J hosszirányban	
						-20°C	-40°C
S500A	1.8980	0,03~0,2	500	600~770	17	40	–
S500AL	1.8990					–	40

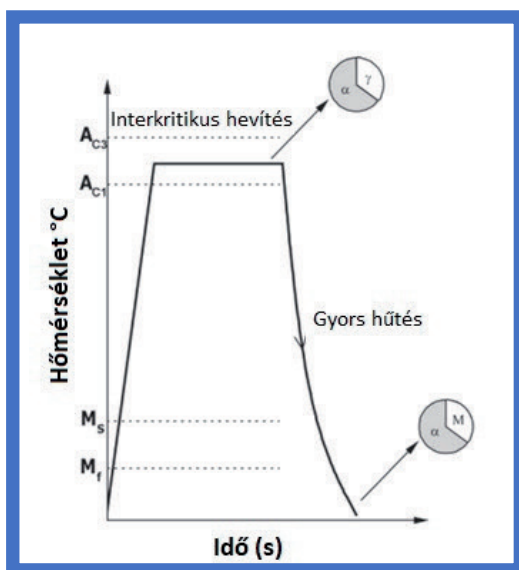
A hegesztéshez használt hozaganyag ötvöztetésével érhető el, hogy az alapanyagával azonos, vagy azt legjobban megközelítő folyáshatárú hegyőmledék álljon rendelkezésre. Ehhez Mn = 1,3~2,1%, Cr = 0,5%, Ni = 2~3,5%, Mo = 0,4~0,6% összetételű hegyőmledékek alkalmasak. Ötvöztetéssel elérhető korlát kb. 1000MPa. A hegesztéstechnológia tervezésekor a CET alapján kell tervezni az előmelegítési hőmérsékletet. Általában a megbízható beolvadást eredményező minimális szakaszenergiát, vagyis többsorú hegesztést kell választani elkerülendő a széles, összefüggő szemcsedurult övezet kialakulását. A sorok közötti hőmérsékletet ugyancsak korlátozni kell általában 150°C-hőmérsékleten. Ezekből a nemesített acélokból készült hegesztett termékek utóhőkezelése általában a hidrogéntartalom csökkentését szolgáló izzítás, esetleg a nemesítés. Az egyik lehetséges a hidrogéncsökkentő izzítás, amelynek hőmérséklete 150~300°C, időtartama az anyag vastagságától függően 2~8 óra.

A másik lehetséges hőkezelés a *nemesítés*, amikor az edzést követő megeresztés hőmérséklete 400~500°C, időtartama az anyag vastagságától függően 1~2 óra.

2.10.3 Duálfázisú, TRIP- és TWIP-acélok hegeszthetősége

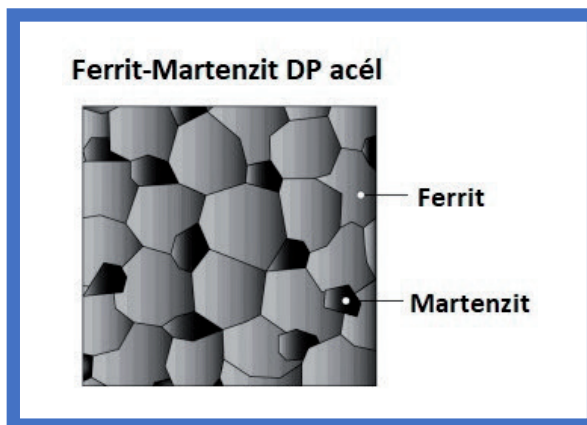
A duálfázisú acélok speciális hőkezeléssel nyerik el tulajdonságaikat (2.10.11. ábra). A duálfázisú acélok kis széntartalmúak C_{max}~0,17, általában Mn-al ötvöztettek (Mn_{max}=1,5%), további ötvözői a V, Nb, Ti és Al melyek együttes mennyisége 0,12% alatt van.

2.10.11. ábra. Duálfázisú acélok hőkezelése



Interkritikus hőmérsékletre történő gyors hűtés hatására szövetszerkezetük ferrit-martenzites lesz. A duplex más néven kettősfázisú acélok, szerkezete általában 80–90% ferritből és 10-20% martenzitből áll. Felépítését tekintve ferritbe ágyazott martenzit szigeteket alkotják (2.10.12. ábra).

2.10.12. ábra. DP-acél mikroszerkezete



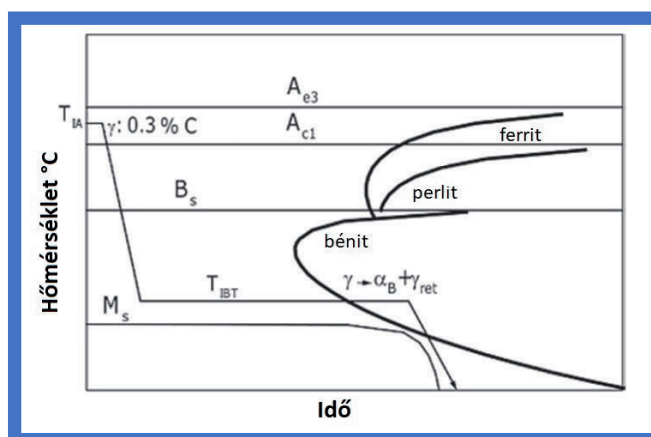
Ezzel az azonos kémiai összetételű acélokhöz képest nagyobb szilárdsággal rendelkeznek (2.10.13. ábra).

2.10.13. ábra. Jellegzetes DP-acélok mechanikai tulajdonságai

Acél jele	Folyáshatár, MPa	Szakító szilárdság, MPa	Nyúlás %
DP 375/600	375	600	≥24
DP 400/700	400	700	≥14
DP 700/1000	700	1000	≥10

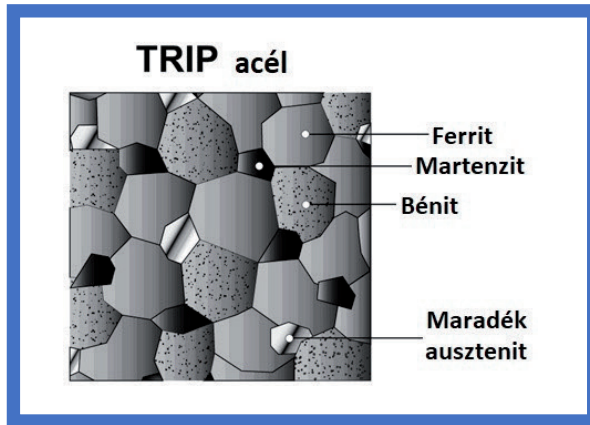
A TRIP-acélok kimagasló szilárdsággal és képlékenységgel rendelkeznek, szövetszerkezetüket interkritikus hőmérsékletre való irányított hűtéssel érik el (2.10.14. ábra).

2.10.14. ábra. TRIP-acél hőkezelési diagramja



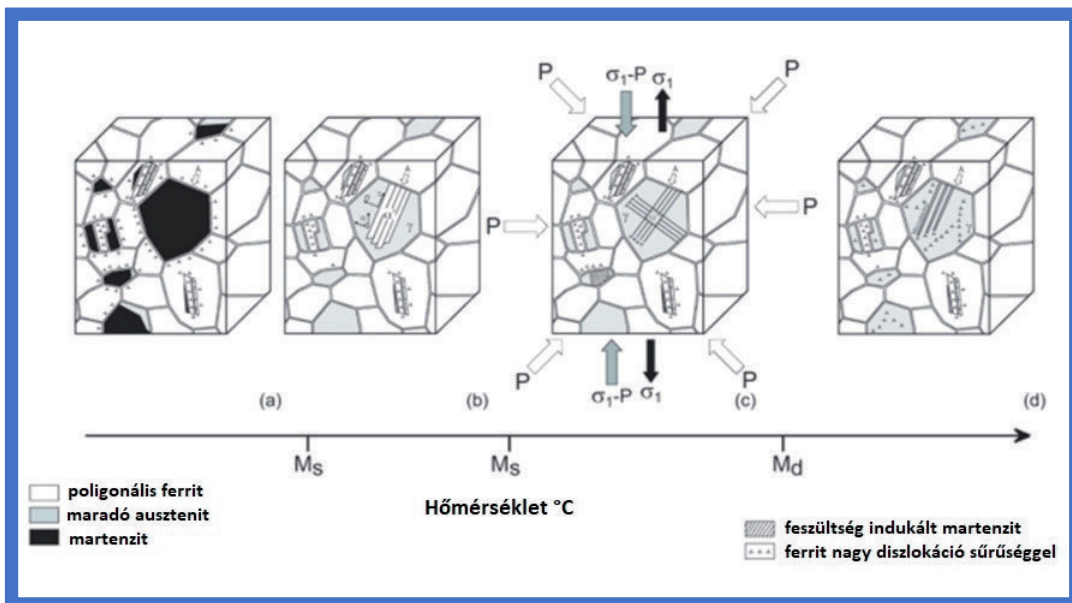
A mikroszerkezetüknek köszönhetően, ami elsődlegesen ferritmátrixba ágyazott maradó ausztenit (2.10.15. ábra).

2.10.15. ábra. TRIP-acél mikroszerkezete



A TRIP-acél kiemelkedő mechanikai tulajdonságait a maradó alakváltozás közben martenzitté alakuló maradék ausztenitből nyeri. Kis széntartalmú és kis ötvözöttségű Si-Mn TRIP-acélt, más néven C-Si-Mn sorozatú TRIP-acélt gyártanak a tömeggyártásban. A C-Si-Mn sorozatú TRIP-acél fő kémiai összetétele $C=0,1\% \sim 0,2\%$, $Si=1,0\% \sim 2,0\%$, $Mn=1,0\% \sim 2,0\%$, $(Al+Si)_{\max}=2,0\%$. Általában olyan elemeket adnak hozzá, mint az Al és P, hogy javítsák a szilárdságát. A minimum 5 térfogatszázalék maradó ausztenit mellett, változó mennyiségben kemény fázisok, bénit és martenzit is jelen vannak. Nagyobb szilícium- és karbon tartalom a maradó ausztenit térfogathányadának növekedését okozza a végső mikroszerkezetben. TRIP-acélok maradó ausztenit tartalma fokozatosan martenzitté alakul alakváltozás hatására, ezáltal növelve az alakítási keménységet nagyobb igénybevételek esetén (2.10.16. ábra).

2.10.16. ábra. TRIP-acél átalakulási folyamata



2.10.17. ábra. TRIP-acélok jellemző mechanikai tulajdonságai

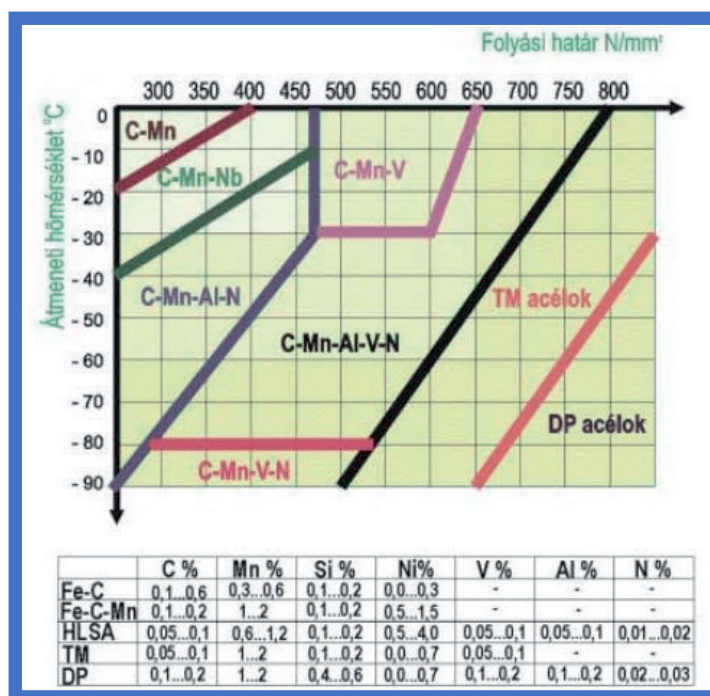
Acél jele	Szakítószilárdság, MPa	Folyáshatár, MPa	Nyúlás, %
TRIP 590	590-700	280-480	26
TRIP 690	690-800	410-510	25
TRIP 780	780-900	450-550	23

Ikerképződés indukálta képlékenység, a TWIP-acél nagy mangántartalmának (17–27%) köszönhetően stabilan homogén ausztenites szobahőmérsékleten, kivételes tulajdonságait egy összetett szilárdságnövelő mechanizmusnak köszönhetően nyerik, melyben fontos szerepet játszik az ikerképződés. A TWIP-acélok esetében kb. kétszer olyan hatékony szerepet játszik a terhelés hatására lejátszódó martenzites fázisátalakulás, mint a TRIP-acélok esetében, és ez természetesen itt is erős szilárdságnövelő tényező. A szakítószilárdság a TWIP-acéloknál az 1000 MPa értéket is meghaladhatja. A Mn ötvöző mellett a TWIP-acélok még 3% Al+Si ötvözőt is tartalmaznak. A tekintélyes mennyiségű ötvözők miatt a TWIP-acélok fajsúlya is kisebb, mint a hagyományos acéloké, amely újabb járulékos haszon a járművek tömegcsökkentése szempontjából. A TWIP-acél közkedvelt alkalmazásának oka ezzel szemben a kiemelkedően nagy szakítószilárdság-képlékenység kombinációja. Hegeszthetőségi szempontból a DP-, TRIP- és TWIP-acélok esetében az ömlesztő hegesztés nem jellemző, mivel a bevitt hő hatására a szövetszerkezet átalakulhat. Autóipari alkalmazások során az ellenállás-ponthegesztést alkalmazzák ezeknél az acéloknál.

2.11 A SZERKEZETI ÉS NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ALKALMAZÁSA

A szerkezeti és nagyszilárdságú acélokat széles körben alkalmazzák hegesztett szerkezetekhez is. A különböző ötvözetű acélok eltérő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek (szakítószilárdság, ütőmunka, nyúlás, stb.).

2.11.1. ábra. Acélok csoportosítása



2.11.1. Szerkezeti acélok jellemzőik, hegeszthetőségük

A kis C-tartalmú (<0,2%) acél fő ötvözői a Mn (<1,7%), Ni (0,5~2,5%), Cr (0,3~1,5%), Mo (0,25~0,7%), emellett szemcsefinomító ötvözőket (V, Zr, B Ti) tartalmaz. A nyomástartó berendezéshez használható finomszemcsés acélok típusai.

Normalizált vagy normalizáló alakítással gyártott szerkezeti acélok. Normalizálással az acél szemcseszerkezete finomítható. Hasonló eredményt lehet elérni a normalizáló alakítással is. Ez olyan meghatározott hőmérséklet-tartományban és meghatározott befejező alakváltozással járó melegalakítás, amely a normalizálással elérhetővel egyenértékű fémtani állapotot és így a normalizált állapotú acélnak megfelelő mechanikai tulajdonságokat eredményez. Normalizáló alakításkor már az előalakítással — célzott szemcsenyújtás és újrakristályosodás révén — finomszemcsés szerkezetet lehet elérni. A készrealakítás a normalizálásnál használt hőmérséklet-tartományban történik, ahol az alakítási fokot úgy állítják be, hogy ebben a fázisban teljesen végbemenő újrakristályosodás finomszemcsés ausztenit eredményezzen. A normalizált vagy normalizálva alakított, hegeszthető, finomszemcsés szerkezeti acélok jellemzőit az MSZ EN 10025-3:2005 szabvány írja le.

Acélok hegesztés során a hidegrepedés elkerülése miatt előmelegítést kell alkalmazni. Előmelegítési hőmérséklet meghatározása az ISO 13916-2017 alapján.

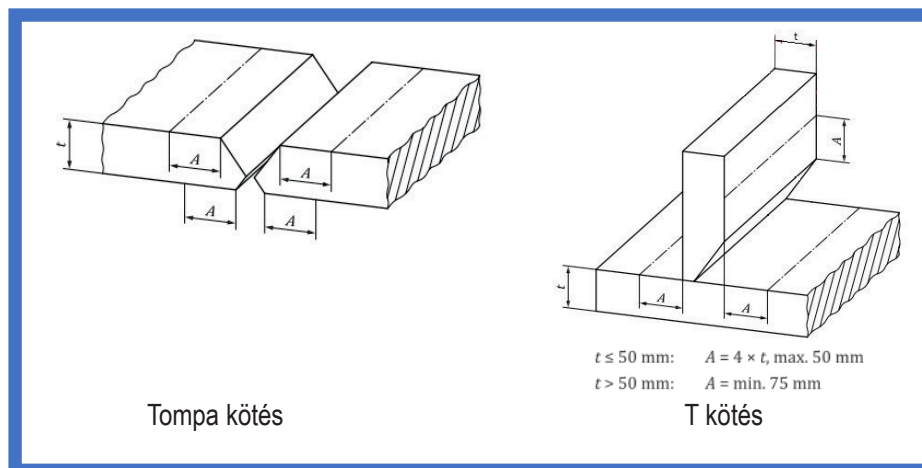
Előmelegítési hőmérséklet (T_p): a hegesztési zóna hőmérséklete minden művelet során, minimum a rétegek közötti hőmérséklet

Sorközi hőmérséklet (T_s): maximális hőmérséklet a többsörös többrétegű varratok esetén.

Előmelegítési hőmérséklet fenntartása (T_m): az a minimum hőmérséklet, amit a hegesztés során fenn kell tartani akkor is, ha a hegesztés megszakad.

A munkadarab hőmérsékletét a munkadarab felületén kell mérni, $A=4 \times t$ távolságban, de maximum 50 mm távolságban a horony hosszanti szélétől.

2.11.2. ábra. Hőmérsékletmérés



A hidegrepedési hajlamra hatással van:

- ◆ Acél kémiai összetétele
- ◆ Hőbevitel
- ◆ Diffúzióképes hidrogén
- ◆ Hűlési sebesség (hővezetés, hőelvonó képesség)

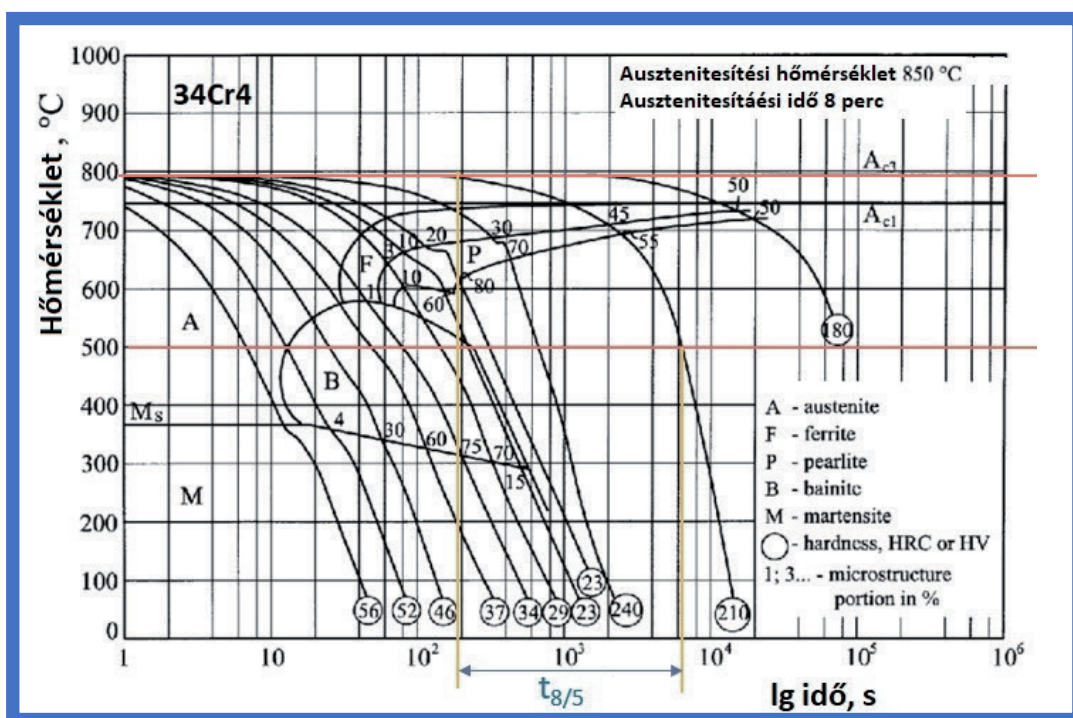
Előmelegítési hőmérséklet meghatározása, **kémiaiösszetétel**-korlát

C, 0.28-0.33; Mn, 0.4-0.6; Si, 0.15-0.35; Cr, 0.8-1.1; Mo, 0.15-0.25; Ni_{max}, 0.25; Cu_{max}, 0.35

Folyamatos hűtési diagram, hűtési sebesség, $t_{8/5}$

Gyors hűlés hatása, kis $t_{8/5}$: Fázisátalakulás, martenzit, ami kis alakváltozó képességű, rideg (edződés). Ms hőmérséklet, kémiai összetételtől függ, CCT-diagram kémiai összetételtől függ. Kritikus hűlési idő $t_{8/5}$, $\log t_{8/5} = 2.69 CE + 0.321$

2.11.3. ábra. Folyamatoshűtési-diagram (CCT)



2.11.2. Előmelegítési hőmérséklet EN 1011-2 A-módszer

Keményiségkontroll-módszer

1. CE_{IIW} meghatározása;

Kémiai összetétel érvényességi tartomány: C, 0.05-0.25; Si, 0.8 max.; Mn, 1.7 max.; Cr, 0.9 max.; Cu, 1.0 max.; Ni, 2.5 max.; Mo, 0.75 max.; V, 0.2 max. CE_{IIW} alkalmazható ha 0,30-0,70 %

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \%$$



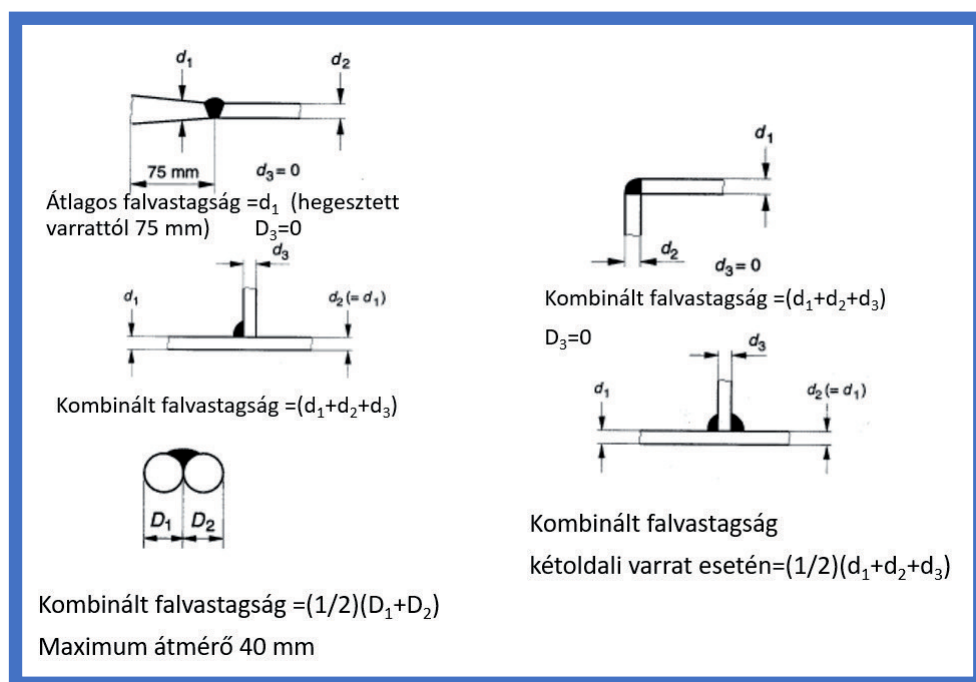
2. Diffúzióképes hidrogéntartalom (Hidrogén skála A, B, C, D, E)

2.11.4. ábra. Diffúzióképes hidrogéntartalom jelölése

Diffúzióképes hidrogéntartalom ml/100g	Hidrogén skála
> 15	A
10 < 15	B
5 < 10	C
3 < 5	D
< 3	E

3. Kombináltfalvastagság-meghatározás

2.11.5. ábra. Kombinált falvastagság meghatározása



4. Hőbevitel-meghatározás (kJ/mm) kézi ívhegesztésre

2.11.6. ábra. Hőbevitel kézi ívhegesztésre

Hőbevitel	Elektroda hossz 410 – 450 mm között, átmérő:					
kJ/mm	2,5 mm	3,2 mm	4 mm	5 mm	6 mm	6,3 mm
0,8	120	195	300	470	—	—
1,0	95	155	240	375	545	600
1,2	—	130	200	315	450	500
1,4	—	110	170	270	390	430
1,6	—	95	150	235	340	375
1,8	—	85	135	210	300	335
2,0	—	—	120	190	270	300
2,2	—	—	110	170	245	270
2,5	—	—	95	150	215	240
3,0	—	—	80	125	180	200
3,5	—	—	—	110	155	170
4,0	—	—	—	95	135	150
4,5	—	—	—	84	120	135
5,0	—	—	—	—	110	120
5,5	—	—	—	—	100	110

5. A kapott információk segítségével diagramokról leolvasva a minimális hőbevitelt MSZ EN1011-2 szerint

Az S275 acél esetében a maximális kombinált falvastagság értékét adott hegesztési hőbevitel esetén az ábra foglalja össze.

2.11.7. ábra. Maximális előmelegítés nélküli kombinált falvastagság

Hegesztési eljárás	Hőbevitel (kJ/mm)	Kombinált falvastagság max. (mm)
Bevonatos elektrodával	1.1	20
Por töltetű huzallal	2.0	45
Tömör huzallal	3.0	100

2.11.3. Előmelegítési hőmérséklet MSZ EN 1011-2 B-módszer

1. CET meghatározása, Kémiai összetétel érvényességi tartomány: C, 0.05-0.32; Si, 0.8 max.; Mn, 0.5-1.9; Cr, 1.5 max.; Cu, 0.7 max.; Ni, 2.5 max.; Mo, 0.75 max.; V, 0.18 max.; Ti, 0.12 max.; Nb, 0.06 max.; B, 0.005 max.

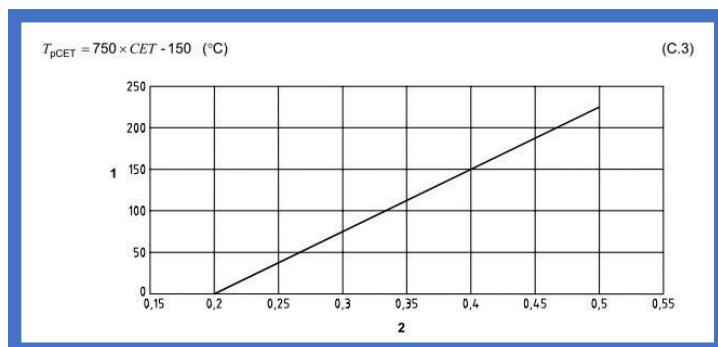
$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \%$$

2. Előmelegítési hőmérséklet meghatározása a CET alapján

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$



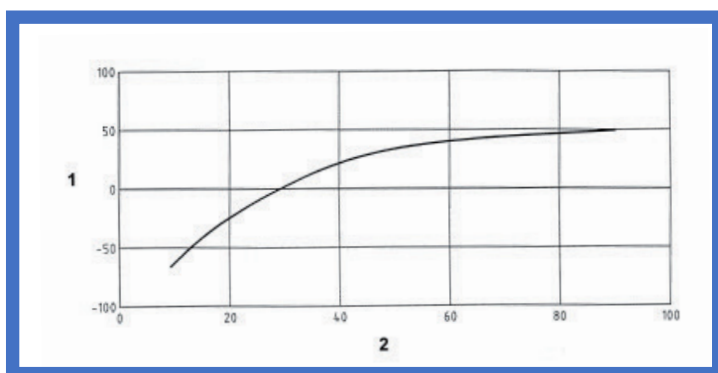
2.11.8. ábra. Előmelegítési hőmérséklet a CET alapján



3. Lemezvastagság és az előmelegítési hőmérséklet kapcsolata

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

2.11.9. ábra. Előmelegítési hőmérséklet a lemezvastagság



4. Diffúzióképes hidrogéntartalom, ahol T_{pHD} (°C) és a diffúzióképes hidrogéntartalom (ml/100g)

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0.35} - 100 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

5. Hőbevitel figyelembevétele, ahol T_{pQ} (°C) és a hőbevitel (kJ/mm):

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

6. Az előmelegítési hőmérséklet ezek alapján, ahol $CET=0.2\sim0.5\%$, $d=10\sim90\text{mm}$, $HD=1\sim20\text{ml}/100\text{g}$, $Q=0.5\sim4\text{kJ}/\text{mm}$

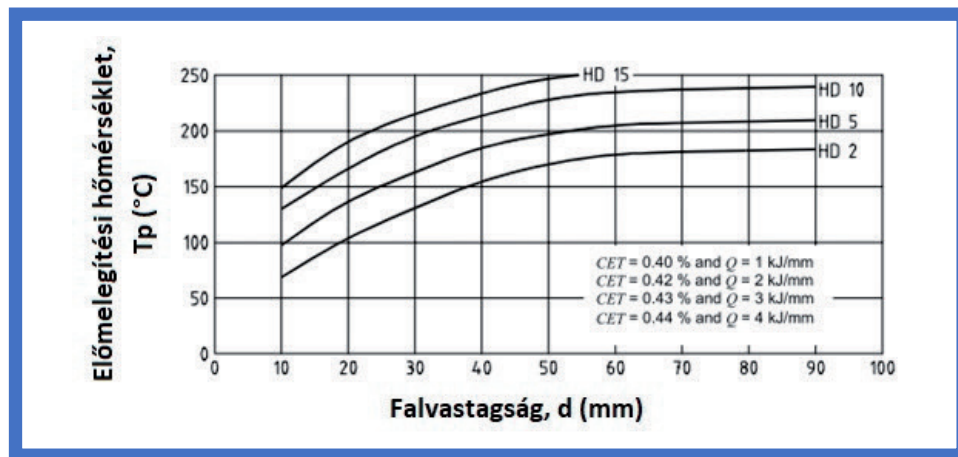
$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0.35} + (53 + CET - 32) \cdot Q - 328 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$



Grafikus meghatározási módszer, ahol T_p (°C), lemezvastagság d (mm)

2.11.10. ábra. Előmelegítési hőmérséklet meghatározása a hőbevitel és a CET alapján (T_p (°C), d falvastagság (mm))



2.11.4. Pcm-módszer, hidrogénkontroll-módszer (Ito and Bessyo)

(1) Pcm meghatározása

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B +$$

(2) Repedési hajlam meghatározása (diagram)

(3) Falvastagság meghatározása

(4) Maradófeszültség meghatározása

(5) Az eredmények alapján a minimális előmelegítési hőmérséklet meghatározása 20°C~160°C között

2.11.5. Nagyszilárdságú acélok csoportosítása, jellemzőik, hegeszthetőségük

Vízvezető, nagy folyáshatárú („vakedzett”) szerkezeti acélok. Ezek a legnagyobb folyáshatárú finomszemcsés acélok kis karbontartalmúak ($C < 0,2\%$). Fő ötvözői a mangán ($Mn = 0,3\sim 1,8\%$), a króm ($Cr < 1,5\%$), a nikkel ($Ni < 2\%$), a molibdén ($Mo < 0,7\%$), és a bór ($B < 0,005\%$) (9. táblázat). Más finomszemcsés acéloktól nagyobb króm-, nikkel- és a börtartalmukkal térnek el. A bór erős nitrid-, de különösen erős karbidképző. A bór nagyon hatékonyan növeli az átedzhetőséget azáltal, hogy az ausztenit szemcsehatárán dúsulva akadályozza a ferrit képződését. Az acélgépjártáskor csak nagyon gondos, pontosan szabályozott ötvözéssel érhető el — a bórnak az oxid-, karbid- és nitridképző hajlama miatt —, hogy az ausztenit átalakulásának akadályozásához szükséges 10...-30 tömeg ppm elemi, szabad bór rendelkezésre álljon, de mennyisége ezt ne haladja meg. A nagyobb mennyiségű bór ugyanis már boro-karbid ($Fe_{23}(CB)_6$) formájában kiválik, ami az ausztenit szemcsével inkoherens határral érintkezik, és a ferritképződést segítve, rontja az átedzhetőséget. A finom karbidkiválások ugyanakkor jelentősen növelik az acél ütőmunkáját, szívósságát.

A nagy szilárdságú, kis ötvözetű (HSLA) acélok kifejlesztését és használatát a költségek csökkentésének igénye vezérelte, a nagy szilárdság kisebb falvastagság, könnyebb szerkezet kialakítása céljára. Ezen acélok többsége szerkezeti alkalmazásokban található; tengervizes szerkezetek, épületek, hajógyártás stb. Akár 690 MPa szakítószilárdság érhető el, miközben továbbra is jó hegeszthetőségű

és nagy szívósságú. Két módszer áll rendelkezésre mind a nagy szakítószilárdság, mind a szívósság elérésére. Egyik módszer szerint mikroötvöztéssel, kis mennyiségű erős karbid- és/vagy nitridképző ötvöző hozzáadásával, a másik a hengerlési hőmérséklet nagyon gondos ellenőrzésével – szabályozott hengerléssel vagy termomechanikus kezeléssel (TMCP-acélok). A legnagyobb szilárdságot a két módszer kombinációjával érik el. Mindkét módszer célja, hogy a lehető legkisebb szemcseméretű, finom szemcséket állítson elő, amelyek a legjobb szívósságot biztosítják, és minden szemcseméretfelezés a szakítószilárdságot 50%-kal növeli. A hegeszthetőség javítása további célkitűzés, és ezt úgy érik el, hogy csökkentik az acél edzhetőségét, egyes acélok széntartalma 0,05%C alatti, valamint a szennyező elemeket, mint például a kén és a foszfor a lehető legalacsonyabb szintre csökkentik.

A széntaralom-csökkenés miatti szilárdságcsökkenés kompenzálása és a szakítószilárdság növelése érdekében ötvözőelemeket, például niobiumot ($Nb < 0,10\%$), titánt ($Ti < 0,030\%$) és vanádiumot ($V < 0,15\%$) adnak hozzá, esetleg kis mennyiségű molibdént, krómot, rezet és nitrogént. Ezek az elemek erős karbid- és nitridképző anyagok, amelyek finom kiválásokat képeznek a stabil szilárd oldatból, amelyek gátolják a szemcsék növekedését a meleghengerlés során, és elősegítik a finomszemcsés ferrit csíráképződést a hűtés során. Ezek az elemek némileg növelik az erőt a csapadékkeményedés által is. A TMCP melegenhengerelt módszerrel szabályozott hengerlés is alkalmazható a szemek további finomítására, és ezáltal a szakítószilárdság és a szívósság növelésére. A TMCP-t az acél átkristályosodási hőmérséklete körül vagy éppen alatta, azaz körülbelül 900°C alatti hőmérsékleten hajtják végre, ami hosszúkás ausztenit-kristályokat eredményez. A gördülési hőmérséklettől való gyorsított hűtés ezután nagyon finom szemcsés ferrit képződését okozza az ausztenit szemcsék határain. Ezek az elemek növelik a szilárdságot a kiválásos keményedés által is. A TMCP termomechanikusan hengerelt módszerrel szabályozott hengerlés alkalmazható a szemcsék további finomítására, és ezáltal a szakítószilárdság és a szívósság növelésére. A TMCP-t az acél átkristályosodási hőmérséklete körül vagy éppen alatta, azaz körülbelül 900°C alatti hőmérsékleten hajtják végre, ami elnyúlt, alakított ausztenit szemcséket eredményez. A gördülési hőmérséklettől való gyorsított hűtés ezután nagyon finom szemcsés ferrit képződését okozza az ausztenit szemcsék határain.

A HSLA-acélok ezért alacsonyabb előmelegítéssel hegeszthetők, mint a hagyományos szén-mangán acélok, nagyobb szilárdságuk ellenére. Az ilyen típusú acéloknál a hidegrepedés legnagyobb kockázata tehát a hegesztett fémekben van, nem pedig a HAZ-ban.

Ennek több oka is van:

- a) Az alapfém nagy szilárdsága nagyobb maradék feszültségeket jelent a hegesztés során,
- b) Az alapacél szakítószilárdságának és szívósságának megfelelően a hegesztő anyagokat jobban kell ötvözni, és ezért magasabb lesz a CE-értékük, elérheti a 0,6 CE (IIW), ha a varrat 700 MPa-os szakítószilárdságát az E11018-G elektródával érjük el.
- c) A varrat fém ausztenitből ferritessé alakul át az alapacélnál alacsonyabb hőmérsékleten (ez általában fordítva történik a hagyományos szén-mangán acélban), ami azt jelenti, hogy a hőhatásövezetben lévő hidrogén átkerül a még ausztenites varratba ahol kiválóan oldódik. Ajánlatos ezért a varratfém összetételén alapuló előmelegítés, és alacsony hidrogéntartalmú eljárás alkalmazása. Ez alól kivételt képeznek azok a HSLA csővezeték-acélok, amelyeket kifejezetten cellulóz elektródákkal való hegesztésre terveztek. Célszerű az acélgyártótól ajánlást kérni az egyes acélok előmelegítési hőmérsékletével kapcsolatban.

Repedés-elkerülés szempontjából fontos továbbá annak ellenére, hogy az acélok általában nagyon alacsony kéntartalmúak, a $C < 0,05\%$ acéloknál előfordulhat kristályosodási repedés a gyökvarratban vagy a gyökvarrat-átmentben, különösen akkor, ha a gyökvarratot nagy hegesztési sebességgel he-



gesztették. Ennek az az oka, hogy a hegesztőanyag nagy hígulása alacsony szénttartalmú varratfémek eredményez. Ez az alacsony szénttartalom pedig az ausztenit túlzott szemcsenövekedéséhez vezet hegesztés közben, és ezek a nagy szemcsék növelik annak kockázatát, hogy a középvonal nem szilárdul meg elég gyorsan a gyökvarratban. Ez a probléma a legelterjedtebb a cellulózelektrodákkal hegesztett csőhegesztéseknél, valószínűleg annak köszönhetően, hogy lehetséges a gyors, függőleges lefelé hegesztési technika alkalmazása.

A hőhatásövezet szívóssága és szilárdsága problémát jelenthet. Az acélgyártó nagy gondot fordít a hengerlési hőmérséklet és a hűtési sebesség szabályozására a kívánt tulajdonságok biztosítása érdekében. Az acél ezután hegesztésre kerül, és a hegesztési hő hatásövezetet hoz létre, amelyben ellenőrizetlen a hőkezelési ciklus. A hőhatásövezet szövetszerkezete az acél összetételétől és a hegesztési folyamat hőbevitelétől függően változik. A nagy hőbevitel elősegíti a szemcse növekedését, és ez káros hatással lesz mind a szilárdságra mind a szívósságra. Általános szabály, hogy a hőbevitelt maximum 2,5 kJ/mm-re kell korlátozni, és a közbenső hőmérsékletet 250°C -on kell tartani, bár egyes titánt és bört tartalmazó acélok akár 4,5 kJ/mm-es hőbevitelt is képesek elviselni szilárdságcsökkenés nélkül. Ezeket az acélokat nem szabad normalizálni vagy edzeni, bár a hegesztés utáni hőkezelés (utóhőkezelés) gyakran követelmény, ha az alkatrész vastagsága nagyobb, mint 35–40 mm. Az utóhőkezelés alkalmazása esetén ügyelni kell arra, hogy a hőtartási hőmérséklet ne haladja meg a 600°C -ot; gyakran 550°C és 600°C közötti hőmérsékleti tartományt írnak elő. Ennek az az oka, hogy a TMCP acélok nagy részét gyorsítva 620°C körüli hőmérsékletre hűtik; ezen a hőmérsékleten vagy annak közelében végzett hőkezelés a túlmelegedés miatt a szakítószilárdság jelentős csökkenését eredményezi. Ugyanez a korlátozás vonatkozik minden utólagosan hevítéssel kísért munkára – a lemez nem melegen hengerelt, a lánggyengítés hőmérséklete nem haladhatja meg a 600°C -ot. A hegesztési technológia során figyelembe kell venni az MSZ EN 1011-2: Hegesztés. Ajánlások fémek hegesztéséhez. 2. rész: Ferrites acélok ívhegesztése-szabvány ajánlásait.

A termomechanikus alakítással gyártott acélok fontos felhasználási területe a könnyűszerkezetek építése. Ugyanolyan igénybevételnél kisebb vastagságú, így kisebb tömegű szerkezetek állíthatók elő ezekből az acélokból. A tömegmegtakarítás csökkenti az anyagköltséget, és számos esetben ez a feldolgozási költségek csökkenéséhez is vezet. A mozgó berendezéseknél, földmunkagépeknél, járműveknél javítható a hasznos és teljes tömeg viszonya, ami az üzemeltetési költségeket csökkenti.

A kisebb falvastagság egy további előnye, hogy a vékonyabb lemezeknél kisebb a többtengelyű feszültség-állapot kialakulásának a veszélye, így kisebb lesz a szerkezetek ridegtörési hajlama, jobban ellenáll a dinamikus igénybevételeknek. Ezek az acélok a vízi-, vasúti- és közúti járművek, gépészeti emelő- és szállító berendezések, acél- és híd szerkezetek nélkülözhetetlen anyagává váltak. A hegesztett szerkezetek gyártói olyan acélokat igényelnek, amelyekben megbízható hegesztett kötések lehet készíteni, amelyek a szobahőmérsékletnél kisebb üzemi hőmérsékleteken is kellő szívóssággal rendelkeznek.

2.12 ERŐSEN ÖTVÖZÖTT, KÚSZÁSÁLLÓ ACÉLOK

2.12.1. Kúszás, hőmérséklet és terhelés hatása

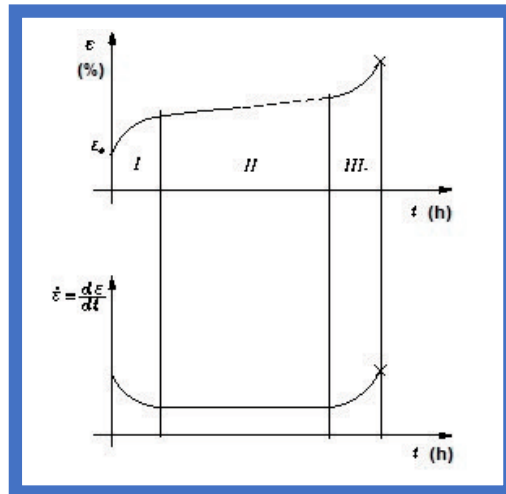
A kúszás egy olyan folyáshatár alatti feszültség, ami általában nagy hőmérsékleten maradó alakváltozást, majd törést okoz. A kúszás folyamata a 2.12.1. ábrával jellemezhető, a görbén a t (h) idő függvényében mutatja ϵ (%) alakváltozást. A görbe három szakaszra bontható. Az I. szakaszban az alakváltozás sebessége az idő függvényében csökken. A feszültség hatására a kedvező helyzetű krisztallitokban a rugalmas alakváltozással összemérhető nagyságú (0,01...0,001 %) maradó alakváltozás keletkezik. A II. szakaszon alakváltozás sebessége állandó.

Ez a kúszás leghosszabb szakasza. Ezen a szakaszon a diszlokációk mozgása, a maradó alakváltozás hatására kialakuló felkeményedés és a dinamikus megújulás tart egymással egyensúlyt. III.



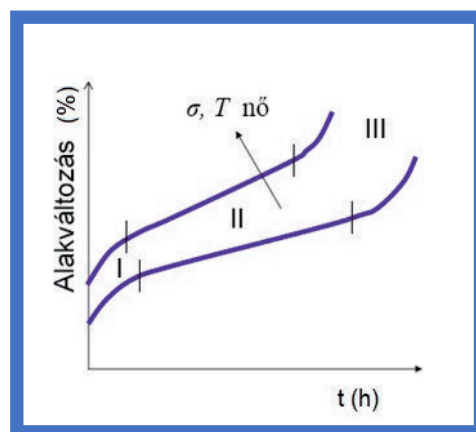
szakaszon növekszik az alakváltozás sebessége, végül a darab eltörik. A törés a kristallit határokon halad, tehát interkristallin jellegű.

2.12.1. ábra. Kúszás folyamata



Egy szerkezeti anyag esetében a kúszáshatár azt a (R) feszültséget jelenti, ami állandó hőmérsékleten adott idő alatt 1% maradó alakváltozást okoz. Jelölése $R_{1/t/T}$ (MPa) ahol az első érték az 1% maradó alakváltozásra utal, t a terhelés időtartama, mely alatt az 1% alakváltozás bekövetkezik, és T az az állandó hőmérséklet melyen a kúszási alakváltozás létrejön. A kúszás jelensége nem engedhető meg olyan szerkezetek esetében ahol az alakváltozás mértéke korlátozott, pl. turbinalapátok esetében.

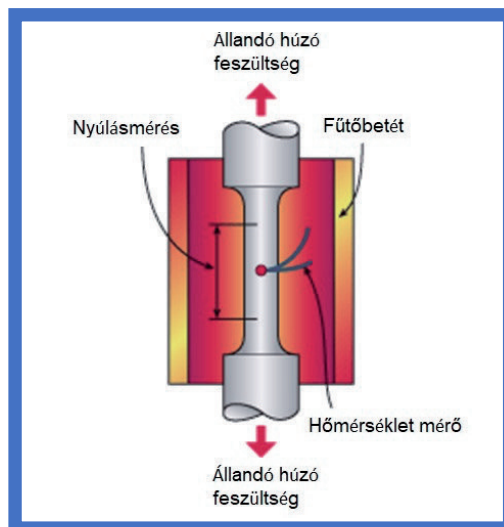
2.12.2. ábra. A hőmérséklet és a terhelőfeszültség hatása a kúszásra



A kúszás függ a hőmérséklettől és a terhelőfeszültségtől. A 2.12.2. ábrán látható, hogy a hőmérséklet növelése vagy a feszültség növelése a kúszás folyamatot felgyorsítja.

Kúszás melegsztató vizsgálattal meghatározható feszültség. A 2.12.3. ábra szerint végzett vizsgálatot adott ideig kell végezni, ahol a húzófeszültség nem éri el a folyáshatárt. A vizsgálat során állandó hőmérsékleten az idő függvényében regisztrálni kell az alakváltozást.

2.12.3. ábra. Kúszásvizsgálat elve



Időszilárdság: a próbatest eredeti keresztmetszetére számított feszültség, amely adott idő múlva, adott hőmérsékleten törést okoz. Jele: R_m és indexben a T hőmérséklet és a t idő pl. $R_{m/t/T}$ (MPa). Az időszilárdság megfelelő biztonsági tényezővel alkalmazandó pl. kazáncsövek anyagainak méretezésére. Tipikus eset a hagyományos izzók wolfram szálára vonatkozóan is, amikor a törés nincs megengedve adott időn belül.

2.12.2. Kúszásálló, melegszilárd acélok választéka (ötvözők hatása)

A melegszilárd acélok hosszantartó mechanikus és termikus terhelés esetén 550°C -ig megfelelő kúszáshatárral és időtartam-szilárdsággal kell, hogy rendelkezzenek, elsősorban a hőerőművek építésében, a gőzturbina-gyártásban, a kőolaj- és földgázfeldolgozó iparban, továbbá a vegyipari berendezések előállításában alkalmazzák őket. A melegszilárd acélokat szobahőmérsékletnél nagyobb üzemi hőmérséklet, a légköri nyomásnál gyakran nagyobb nyomás veszi igénybe, agresszív gázok, gőzök jelenlétében. Az acélok lehetnek ötvözetlenek vagy ötvözöttek. Az ötvözetlen acél jelölésében a nagyobb nyomásra való felhasználhatóságra a P betű, a nagyobb hőmérsékletre pedig a legkisebb folyáshatárt követő H betű utal. Az ötvözött acélok főként Cr és Mo (+V, W, Ni) ötvöztetéseket, ezt a jelölésük is mutatja.

Az ötvözetlen acélok szilárdsági tulajdonságai a hőmérséklet emelkedésével erőteljesen csökkennek, ezért ennek növelése érdekében elsősorban krómmal, molibdénnel és vanádiummal ötvözik azokat.

Gyengén oxidáló atmoszférában reveállóságuk még kielégítő, bár e szempontból az ötvözetlen acélok 550°C -ig felelhetnek meg, kb. 350°C fölött csak alárendelt szerkezetekben, pl. kis veszélyességű hőcserélőkben kerülnek beépítésre. Az acélok az üzemi hőmérséklet emelkedésével egyre több krómmal és molibdénnel ötvözöttek, egyrészt a szükséges melegszilárdsági tulajdonságok elérése céljából, másrészt pedig azért, hogy a felületen kifejlődő oxidréteg az őket körülvevő atmoszféra oxidációs hatásának ellenálljon.

Jellemzőik:

- ◆ Nagy melegszilárdság, kúszásállóság.
- ◆ Reve és korrózióállóság.
- ◆ H-nyomással és cementálódással szembeni ellenállás.

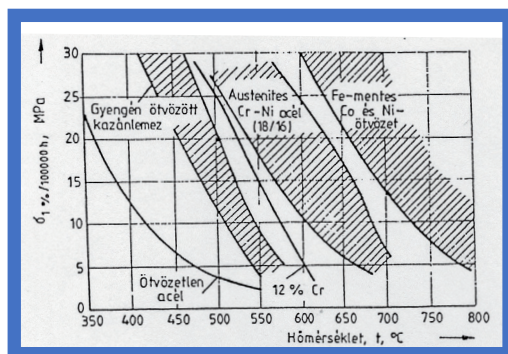
Ötvözők hatása:

- ◆ Cr: oxidáció, revésedés ellen, melegszilárdság növelése (0,5~9%)
- ◆ Mo: megeresztésállóság (keménységcsökkenés-állóság), kúszáshatár-növelés (0,5~1%)
- ◆ V: szemcsefinomítás (0,25...0,75%).
- ◆ Ni: szívósság növelése.

A melegszilárd acélok ötvözés tekintetében az acélok teljes választékából kerülnek ki, azonban az összetételük alapján alábbi négy csoportba besorolhatók.

2.12.4 Melegszilárd acélok hegesztése

2.12.4. ábra. Növelt hőmérsékleten alkalmazható acélok



Növelt hőmérsékleten üzemelő alkatrészek anyagainak megválasztásakor figyelembe kell venni a speciális igénybevételeket. Ezek a magas hőmérséklet miatt a kúszás, gázkorrozó, nedves korrozó, stb. A növelt hőmérsékleten alkalmazható acélokat a 2.12.4. ábra mutatja, az egyes acélok kúszáshatára látható diagramon a hőmérséklet függvényében.

A) Ferrit-perlites: $C < 0,22\%$, ötvözetlen $Mn < 1,5\%$, vagy gyengén ötv. $Mo = 0,25 \sim 0,35\%$, $C < 0,22$, 400°C-ig (pl.: P195GH, P235GH, P265GH, P295GH és a P355GH jelűek továbbá a Mo ötvözésű 16Mo3). Ennek a csoportnak az acéljai adják a melegszilárd acélok jelentős részét. Elvileg ötvözetlen acélok esetében 400°C-ig használhatóak, 0,5 % Mo esetén 455°C-ig, azonban 375°C fölött jelentkezik a kúszás. A gyengén ötvözött acélok esetében a szilárdság növelése Cr, Mo ötvözőkkel, karbidképzők diszperz kiválásával és hőkezeléssel valósítható meg. Kis mennyiségű bénit is megjelenhet, mely kedvező, ha nagyobb feszültség szinten, de rövidebb ideig üzemel a szerkezet.

2.12.1. táblázat. Néhány jellemző acél kémiai összetétele

MSZ EN jelölés		Kémiai összetétel (%)				R_{eHmin} (MPa)	R_m (MPa)	A_{5min} (%)
Rövidjel	W.nr	C	Mn	Cr	Mo			
P235GH	1.0345	< 0,16	0,60...1,2	< 0,30	< 0,08	235	360...480	24
P265GH	1.0425	< 0,20	0,80...1,4	< 0,30	< 0,08	265	410...530	22
P295GH	1.0481	0,08...0,20	0,90...1,5	< 0,30	< 0,08	295	460...580	21
P355GH	1.0473	0,10...0,22	1,10...1,7	< 0,30	< 0,08	355	510...650	20



Ferrit+perlites finomszemcsés melegszilárd acélok esetén a legfontosabb ötvöző a Mn

Szilárdságnövelő ötvözők (kis mennyiségben): Ni, Cu, Mo

Szemcsefinomító ötvözők: Al, N, Nb és/vagy V

Hőkezelés: normalizálás vagy nemesítés

Mn, Ni, Cu → az ausztenites átalakulás befolyásolása ($t \uparrow, T \downarrow$)

Mn, Ni → szemcsefinomítás

→ a bénitképződés elősegítése

→ az átédzhetőség növelése

→ a szilárdság és szívósság növelése

B) Bénit – martenzites, közepesen ötvözött: Cr: 2~5 (esetleg 9) %, Mo: 0,3~1%, kisebb mennyiségben V és W. A Cr javítja az edzhetőséget, így megjelenik a martenzit (vagy bénit). 400 °C-ig használhatóak általában, ezen a hőmérsékleten Rp0,2 még kb. 50%-a szobahőmérsékleten megadottak. Pl.: 10CrMo9-10. A Cr-Mo, Cr-Mo-V, Cr-Mo-V-W ötv. H nyomásálló acélok 550 °C-ig és 70 MPa-ig is használhatóak, ha a cementit H általi elbontását karbidképző ötvözőkkel akadályozzuk. Pl.: 1% Cr és 0,5% Mo 540°C-g, 2,25% Cr és 1% Mo akár 600°C-g is alkalmazhatják, ha a közegben nincs H. A Cr-Mo-V-acélokat általában nagyobb C-tartalommal (0,3 %) 1% Cr, 1% Mo, 0,25% V-összetétellel gyártják, normalizált, vagy nemesített állapotban szállítják, 540°C-ig. Nagyobb hőmérsékletre és nyomásra módosított Cr-Mo acélokat fejlesztettek ki, ezeket Ti, B, V –al mikroötvözik, nagy nyomáson a H-nak is ellenállnak 455°C-ig. Rendkívül nagy időtartam-szilárdság a jellemzőjük.

Előmelegítés nélkül hegesztve ezért erősen felkeményednek és repedhetnek. Az előmelegítés célja ezeknél az acéloknál az, hogy a hőhatásövezet α - γ átalakuláson átesett részei és a varrathegesztés közben az általában még megengedhetőnek tartott 250~300 HV keménységet még a 2,3 % Cr tartalmú acéloknál se érje el.

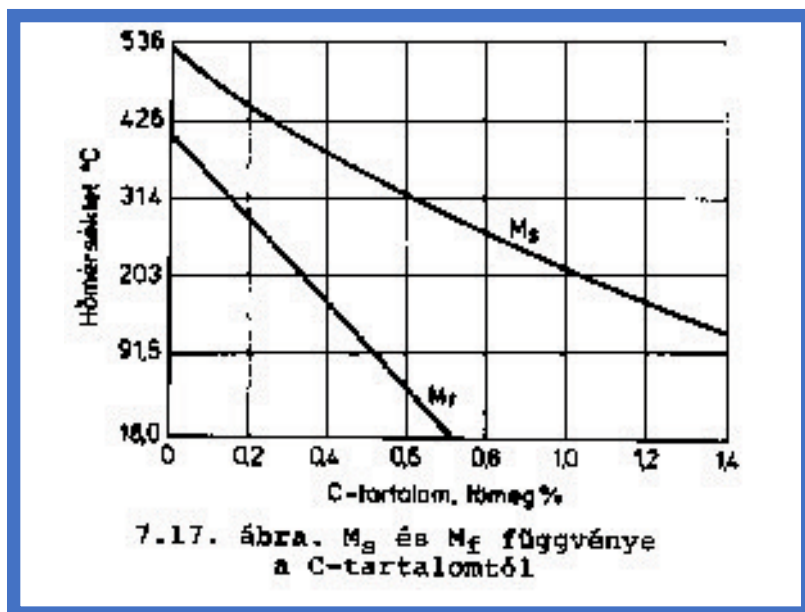
Az éppen elkészült varratsor keménysége ennél természetesen valamivel nagyobb, a későbbi sorok hőhatása azonban kissé megeresztí, lágyítja azt.

Adott adagszámú acél hegesztésekor az összetételhez igazodó előmelegítési hőmérséklet a karbonegyenérték (Ce) meghatározása után jelölhető ki. A karbonegyenértéket természetesen az alap- és a hegesztőanyagra külön-külön ki kell számolni. Az előmelegítést a nagyobb Ce-értéknek megfelelően kell végezni.

C) Ebbe a csoportba tartozó alap- és hegesztőanyagok erősen ötvözött edzhető acélok. Ezek a kb. 4%-nál több krómot tartalmazó acélok. Hegesztéskor azonban a varrat és a hőhatásövezet ausztenitessé vált anyagrészei néhány percen belül Ms hőmérséklet alá hűlnek abban az esetben, ha az előmelegítési hőmérséklete ez alatti, s ezért ezután csak martenzitté alakulhatnak át további hűléskor. Az acélok Ms-hőmérséklete jó közelítéssel 250...400°C között van. Martenzites (erősen ötvözött, edzhető) acélok: Cr=10-12% ezért már levegőn is edződnek. 600–700°C-ig is reveálloak. Pl.: X20CrMoV12-1. Alkalmazás: pl. erőművi túlhevítők, gőzcsövek.

Ausztenites hegesztés esetén az előmelegítést az Ms-hőmérséklet fölött 400...450°C-on végezzük, ezért az ausztenit a hegesztés befejezéséig nem alakul át. Képlékeny, tehát hegesztés közben repedésveszéllyel gyakorlatilag nem kell számolni. Hegesztés után a kötést az ún. közbenső hűtés hőmérsékletére kell lehűteni azért, hogy az ausztenit teljes egészében martenzitté alakuljon, majd ezután következhet a megeresztés. A lehűléskor azonban nagy tömegű ausztenit alakul át martenzitté és ez nagy térfogatváltozással jár, amelynek következtében jelentős a repedésveszély. Mivel az előmelegítés nagy hőmérsékletét a hegesztés teljes időtartama alatt megtartani költséges és a hegesztőt nagyon igénybe veszi, általában az ún. martenzites hegesztés megvalósítására törekszünk.



2.12.5. ábra. Az M_s - és M_f -hőmérsékletek a széntartalom függvényében

Martenzites Cr-acélok „martenzites hegesztése során az előmelegítés M_s alatt van, ezért képződik martenzit is. Nagyobb a repedésveszély, de kisebb a térfogatváltozásból eredő belső feszültség. Az előmelegítés hőmérséklete $M_s-60\pm 10^\circ\text{C}$, a rétegeközi hőmérséklet $M_s-190\pm 10^\circ\text{C}$ legyen, majd hegesztés után feszültségcsökkentő hőkezelést kell elvégezni.

D) Ausztenites (erősen ötvözött ausztenites szövetszerkezetű): $C < 0,1\%$, $Cr = 16-18\%$, $Ni = 11..13\%$ valamint V, Nb és Mo. Pl: X6CrNi18-11. 600°C tartós üzemi hőmérséklet fölött használják. Az időtartam - szilárdság hidegalakítással és további ötvözéssel fokozható.

A stabilizálatlan, ill. Nb-mal stabilizált ausztenites Cr-Ni acélt általában előmelegítés nélkül, kis fajlagos hőbevitellel kell hegeszteni (gyökérégnél esetleg $100...150^\circ\text{C}$ -ra előmelegítve), azt követően nem kell hőkezelné. Ha feszültségkorróziós veszély áll fenn, akkor $750...800^\circ\text{C}$ -on, 60...300 min-ig kell hűtani, majd hegesztés után levegőn hűteni.

A következő táblázat a nagy hőmérsékleten alkalmazható fémötvözeteket foglalja össze:

2.12.2. táblázat. Melegsziárd acélok tulajdonságai

Fázisok	Fázisok	Üzemi hőmérséklet	Példák
Melegsziárd	ötvöztelen (F+P) ötvözött (F+B)	$< 400^\circ\text{C}$ $< 540^\circ\text{C}$	15Mo3 10CrMo9-10
Nagy hőmérsékleten ellenálló acélok	ferrites (F) ausztenites (A)	$< 600^\circ\text{C}$ $< 700^\circ\text{C}$	X6CrNi18-1
Hőálló acélok	ausztenites (A)	$800\sim 1000^\circ\text{C}$ $850\sim 1100^\circ\text{C}$	X3CrAlTi18-2 X10NiCrAlTi32-21

Fázisok	Fázisok	Üzemi hőmérséklet	Példák
Ni-bázisú ötvözetek		1150~1200°C < 550 °C	NiCu30Al2,5Ti NiCr20Ti NiCr15Co15Al5
Ni-bázisú szuperötvözetek	ausztenites (A)	700°C 700°C 750~1000°C	IN 718 Waspaloy IN 713
Ti-ötvözetek	$\alpha+\beta$ - fázisú Al-ötvözetek γ -titán-aluminid	< 300°C < 750°C	TiAl6V4 (Ti64) TiAl

2.13 HIDEGSZÍVÓS ACÉLOK HEGESZTÉSE

Hidegszívósnak tekintünk minden olyan acélt, amely -10°C alatt is jó szívósságú, az acélból kimunkált hossz- vagy keresztirányú, ISO V-bemetszésű próbatest -60°C-on vagy annál kisebb hőmérsékleten legalább KV=27J ütőmunkát eredményez.

2.13.1. Hidegszívós acélok típusai

Hidegszívós acélok lehetnek hagyományos szerkezeti acélok (-40°C-ig) korszerű mikroötvözött acélok (-60°C-ig) nikkelötvöztetésű acélok (Ni=2,25~12%) (-70°C -tól -253°C -ig)

2.12.1. táblázat. Hidegszívós acélok

Acéltípus	KV _{min} , J
S275NL, S355NL, S420NL, S460NL	-50 °C 16 J
S275ML, S355ML, S420ML, S460ML	-50 °C 27 J
S460QL1, S500QL1, S550QL1, S620QL1, S690QL1, S890QL1,	-60 °C 30 J

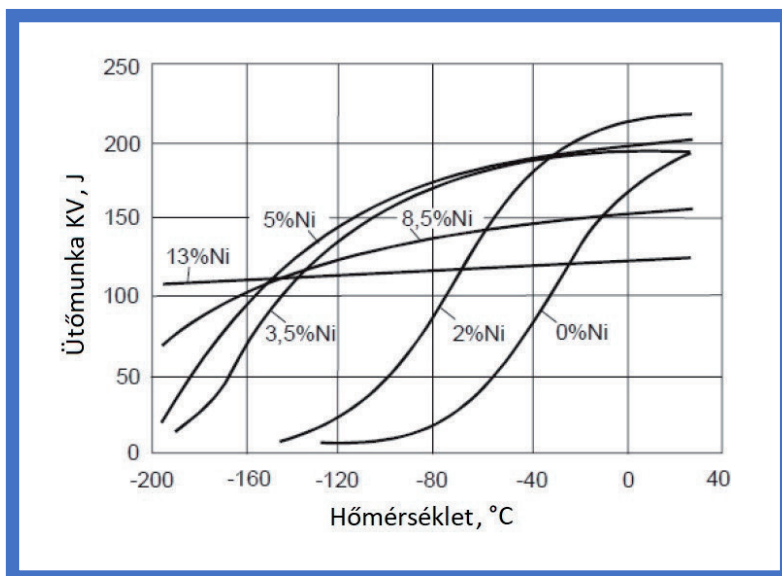
Korszerű mikroötvözött hidegszívós szerkezeti acélok, lehetnek perlitszegény vagy perlitmentes mikroötvözött acélok, Ti, Ti+V vagy Zr mikroötvöztetésű acélok, V+B, V+Nb, Nb+Ti mikroötvöztetésű acélok, nemesített acélok.

Nikkelötvöztetésű acélok, a nikkel jellemzői:

- ◆ lapközepes köbös rácsú, ausztenitképző,
- ◆ javítja az edzhetőséget,
- ◆ növeli a folyáshatárt,
- ◆ növeli szívósságot (csökkenti a TTKV-t növeli az ütőmunkát).



2.13.1. ábra. Nikkel hatása az ütőmunkára



2.13.2. táblázat. Hidegszívós acélok alkalmazhatósági tartományai

Hidegszívós acélok	Alkalmazhatósági hőmérséklet határ
Normalizált 11MnNi5-3	-60 °C
Nemesített 13MnNi6-3	-80 °C
3,5% Ni ötvözésű 12Ni14	-100 °C
5% Ni ötvözésű X12Ni5	-120 °C
9% Ni ötvözésű X7Ni9	-196 °C
Mn–Cr ötvözésű acél	-196 °C~-253 °C
Auszténites Cr–Ni acél	

2.13.3. táblázat. A nikkelötvözésű acélok anyagcsoportjai

Csoport	Alcsoport	Acél csoport
9		Ni<10%
	9.1	Ni<6%
	9.2	3%<Ni<8%
	9.3	8%<Ni<10%



2.13.2. Hidegszívós acélok alkalmazási területei

A ferrites kriogén acélok nikkeltartalmú, alacsony ötvözetű acélok, amelyek lényegesen 0°C alatti hőmérsékleten történő biztonságos üzemeltetésre szolgálnak, és jó szakító szilárdságuk és nagy ütésállóságuk jellemzi alacsony hőmérsékleten. A nikkeltartalom 1,5 és 9% között mozog, bár vannak finomszemcsés szén-mangán acélok, amelyek akár -50°C-on is működhetnek. Ezek az acélfajták általában megtalálhatók az olaj-, gáz- és petrokémiai iparban, ahol cseppfolyósított kőolajgázok (LPG) kezelésére és tárolására használják -100°C-ig, és a 9%-os nikkeltartalmú acél esetében, -196°C-ig. A gázfeldolgozó iparban is megtalálhatók gázok, például szén-dioxid és oxigén előállításához és kezeléséhez, amint azt a táblázat mutatja. Felhasználás továbbá kriogén berendezések, levegőbontók, vegyipari gépek, szállító járművekhez. Választék: hidegszívós acélok, ausztenites acélok (FKK rács nincs elridegedés, erős ötvözés, drága).

Az, hogy melyik acélt kell használni bármely alkalmazáshoz, nemcsak a hőmérséklettől függ, hanem olyan szempontoktól is, mint a tervezés által megkövetelt szelvényvastagság és a feszültségkorrózió lehetősége.

2.13.4. táblázat. Hidegszívós acélok alkalmazásai

Acél típus	Jelölés	Minimum működési hőmérséklet	Felhasználás
Finomszemcsés, Al-csillapított C–Mn acél	EN10028-3 P460NL2	-50	ammónia, propán
1,5% Ni-tartalmú acél	EN10028-4 15NiMn6	-60	ammónia, propán, szén-diszulfid
2,5% Ni-tartalmú acél	ASTM A203 GrB	-60	ammónia, propán, szén-diszulfid
3,5% Ni-tartalmú acél	ASTM A203Gr E	-101	széndioxid, acetilén, etán
5% Ni-tartalmú acél	EN10028-4 X12Ni5	-130	etilén
9% Ni-tartalmú acél	EN10028-4 X8Ni9	-196	metán, oxigén, argon

Ezeknek az acéloknak az alkalmazása megköveteli, hogy a hegesztési varratok mechanikai tulajdonságai, különösen a szívósságuk és a hozzájuk tartozó hőhatásnak kitett zónák megegyezzenek vagy nagyon közel legyenek az alapfémekhez. A kriogén acélok csővezetékbe és edényekbe történő gyártása ezért hegesztőanyagok gondos kiválasztását és hegesztési paraméterek szigorú ellenőrzését igényli.

A finomszemcsés szén-mangán-acélok összetételének és Charpy-V ütőmunkájának megfelelő (-50°C-on), megfelelő kézi ívhegesztéshez alkalmas (MMA) elektródák kaphatók, például AWS A5.5 E7018-1 elektródák, bár, egy kis, akár 1%-os nikkelmennyiség is segít a kívánt szívósság elérésében.

A megfelelő C–Mn-összetételű acél hegesztése során a (MAG), fluxusos (FCAW) és fedett ívű (SA) hegesztőanyagok nem adnak megfelelő szívósságot -50 °C -on, és nikkeltötvöztetést igényelnek a szükséges hegesztett szilárdság biztosításához. Az 1,5% Ni és 2,5% Ni acélok hegeszthetők 2,5% Ni hegesztőanyaggal, és ezek megfelelő szívósságot biztosítanak -60°C-ig mind hegesztett, mind hegesztés után hőkezelt (PWHT) állapotban. Egy óvatos szó azonban; az utóhőkezelés (PWHT) TIG és MAG hegesztésű varratok szakítószilárdsága az alapfémre előírt minimum alá eshet. Különösen érzékenyek tűnik a magas (> 20%) CO₂ -tartalmú védőgázzal hegesztett MAG-varrat. A TIG-gyökvarrat 3,5% Ni öt-



vözetek hegesztéséhez általában 2,5%-os Ni-töltőanyagot használnak. Bár a 3,5% Ni-hegesztőanyagok képesek -101°C -on megfelelő szilárdságot biztosítani, nagyon érzékenyek a hegesztési paraméterek, a hőbevitel és a hegesztési helyzet változásaira. Ez az érzékenység az ütővizsgálati eredmények nagy szórását eredményezi, így az igényesebb alkalmazásokhoz gyakran használnak alternatív nikkelt alapú hegesztőanyagokat, például AWS ENiCrFe-2 vagy ENiCrFe-3, amelyek lehetővé teszik az összes hagyományos ívhegesztési eljárás alkalmazását. Az 5% Ni és 9% Ni-ötvözeteket hagyományosan nikkelt alapú hegesztőanyaggal hegesztik. 6,5% Ni MMA elektródák állnak rendelkezésre, de ezek nem képesek állandóan megfelelő szilárdságot biztosítani jóval -110°C alatt. A 9%-os Ni-ötvözet hegesztésére szolgáló hegesztőanyagokat is kifejlesztettek; ezek általában 12–14% nikkelt tartalmaznak. Az előállítási költségek azonban olyanok, hogy nem versenyeznek a nikkelt alapú alternatívákkal.

Az acélok hegesztésére eredetileg használt nikkelt alapú hegesztőanyagokkal az a probléma, hogy szakítószilárdságuk lényegesen kisebb, mint az alapfémé. Az AWS ENiCrMo-3 (625 ötvözet) típusú, nagyobb szilárdságú hegesztőanyagok már kaphatók, és lehetővé teszik az összes ívhegesztési eljárásnál az alkalmazását. Szilárdságuk és végső szakítószilárdságuk alapján illeszkednek az alapfémekhez is, bár a TIG-, MIG- és SAW-varratfémek 0,2% -os szilárdsága a 9%-os Ni-acélnál megadott érték alá eshet.

Mint minden acél esetében, ahol jó szívósságra van szükség, a hőbevitelt is szabályozni kell. Ajánlott, hogy a 9%-os Ni-ötvözet esetében a sorközi hőmérséklet legfeljebb 250°C , ideális esetben pedig 150°C alatt legyen. A hegesztésből származó hőbevitelt körülbelül 3,5 kJ/mm-re kell korlátozni SAW és 2,5 kJ/mm MMA esetén. A szén-mangán és legfeljebb 3,5% Ni-ötvözetek esetében előmelegítésre lehet szükség, a szakasz vastagságától, a kötés típusától és a rögzítéstől függően, hogy csökkentsék a hidrogén okozta hideg repedések kockázatát. Az ASME B31.3 például 79°C -os minimális előmelegítési hőmérsékletet javasol a 25 mm-nél vastagabb szénacéloknál, 93°C -ot az 1,5%, 2,5% és 3,5%-os nikkelt acélok minden vastagságánál, de csak 10°C -ot az 5% és 9% Ni-ötvözeteknél. Ennek az alacsony előmelegítési hőmérsékletnek az az oka, hogy ezek a magas nikkeltartalmú ötvözetek nagy mennyiségű ausztenit tartalmaznak, amely képes elviselni a nagy mennyiségű hidrogént. Ez az ausztenit tehát lényegesen csökkenti a hidegrepedések kockázatát. Ezenkívül hagyományosan nikkelt-alapú ötvözetekkel hegesztik őket, amelyek még tovább csökkentik a kockázatot.

A hegesztés utáni hőkezelésre általában nincs szükség a 9%-os Ni-acéloknál. Valójában az EN 13445-4 azt javasolja, hogy kerüljék az utóhőkezelést. Az ASME szabványok azonban 552°C és 585°C közötti utóhőkezelés értéket adnak meg mind a 9% Ni, mind az 5% Ni-ötvözetek esetében, ha a vastagság meghaladja az 51 mm-t. Az EN és az ASME specifikációi között eltérések vannak az EN és az ASME előírásaiban is.

2.13.5. táblázat. Utóhőkezelés ajánlott hőmérsékletei adott acélokhöz és falvastagsághoz

Acél típus	EN 13445-4		ASME B31.3	
	Falvastagság (mm)	Utóhőkezelés hőmérséklete ($^{\circ}\text{C}$)	Falvastagság (mm)	Utóhőkezelés hőmérséklete ($^{\circ}\text{C}$)
Finomszemcsés, Al csillapított C-Mn acél	>35	550-600	>19	593-649
1,5% Ni tartalmú acél	>35	530-580	>19	593-635
2,5% Ni tartalmú acél	>35	530-580	>19	593-635
3,5% Ni tartalmú acél	>35	530-580	>19	593-635
5% Ni tartalmú acél	>35	530-580	51	552-585
9% Ni tartalmú acél	minden	nincs	51	552-585



A utóhőkezelés hőmérséklet betartása, szabályozása a legfontosabb, mivel a nikkel csökkenti az átalakulási hőmérsékletet. A megadott hőmérsékletek túllépése, különösen a 3,5%-os és magasabb ötvözetek esetében, az alapfémét átalakíthatja, ami a szakítószilárdság jelentős csökkenéséhez vezethet.

Az egyik jelentős probléma, amellyel gyakran találkozunk a nikkel acélok esetében, az a maradó mágnesesség, amely ívfűvést okoz. Ez különösen problémát jelent a 9%-os Ni-acélnál, amely könnyen és nagyon erősen mágnesezhető, és lehetetlenné teszi az ívhegesztési eljárásokkal történő hegesztést. A kezelés minimalizálása érdekében rendkívül óvatosnak kell lenni a kezelés, szállítás és összeállítás során.

2.13.4. Hidegszívós acélok hegesztése

Perlitszegény vagy perlitmentes mikroötvözött hidegszívós acélok

Perlitszegény $\rightarrow C=0,05\sim 0,1\%$

Perlitmentes $\rightarrow C=0,05\sim 0,02\%$

Mikroötvözők: V+Nb, ReHmin= 410~480 MPa, TTKV=-60~-80 °C

Hegesztése:

- ◆ repedésre nem hajlamos,
- ◆ jól hegeszthetők, HV $\leq$ 250,
- ◆ kis H-tartalmú hozaganyaggal, kis hőbevitellel

Ti, Ti+V vagy Zr mikroötvözésű hidegszívós acélok

- ◆ kis szennyezőtartalom (S $\leq$ 0,001%, P $\leq$ 0,01%),
- ◆ egyenletes finomszemcsészet,
- ◆ TTKV = -60~-80 °C

Hegesztése:

- ◆ repedésre, réteges tépődésre nem hajlamos,
- ◆ kis H-tartalmú hozaganyag, kis hőbevitellel,
- ◆ hegesztés utáni hőkezelése nem javasolt, szemcsedurvulást okoz

V+B, V+Nb, Nb+Ti mikroötvözésű hidegszívós acélok:

- ◆ kis C-, ill. kis szennyezőtartalom,
- ◆ finomszemcsés bénites szövetszerkezet,
- ◆ nagy Re/Rm-viszony (ReH= 550...700 MPa),
- ◆ nagy nyúlás (A5=30...40 %),
- ◆ TTKV = -45~-50 °C

Hegesztése:

- ◆ repedésre nem hajlamos,
- ◆ kis H-tartalmú hozaganyaggal, előírt hőbevitellel.



Nemesített hidegszívós acélok

- ◆ kis C-, ill. szennyezőtartalom
(C = 0,05~0,12 %, S ≤ 0,001%, P ≤ 0,01%),
- ◆ kismértékű ötvözés (Cr, Mo = 0,1~0,2 %),
- ◆ V+B mikroötvözés,
- ◆ ReH=550~600 MPa, A5 >25 %), TTKV = 50~60°C

Hegesztése:

- ◆ repedésre nem hajlamos, igen szívós,
- ◆ kis H-tartalmú hozaganyaggal, előírt hőbevitellel.

2,25 % Ni-ötvözésű acél

- ◆ javasolt üzemi hőmérséklet: -70°C-ig,
- ◆ normalizálás 900°C-on, megeresztés min 600°C-on

Hegesztése:

- ◆ kis H-tartalmú bázikus elektródával,
- ◆ alapanyaggal egyező összetételű hozaganyaggal.

3,5 % Ni-ötvözésű acél

- ◆ javasolt üzemi hőmérséklet: -105°C-ig,
- ◆ normalizálás 870°C-on, megeresztés 580...630°C-on

Hegesztése:

- ◆ kis H-tartalmú bázikus elektróda,
- ◆ alapanyaggal egyező összetételű hozaganyag,
- ◆ AWI-, AFI -vagy sugárhegesztés
- ◆ 10mm nagyobb szelvényméretnél előmelegítés
- ◆ hőbevitel-korlátozás szemcsedurvulási veszély miatt
- ◆ réteghőmérséklet max. 250°C
- ◆ Lehető legkisebb hőhatásövezetre törekedni
- ◆ varrat-szövetszerkezet: ferrit-bénit mátrixban

martenzit

5 % Ni-ötvözésű acél

- ◆ javasolt üzemi hőmérséklet: -170°C-ig,
- ◆ hőkezelés: 850~900°C-ról edzés vízben, megeresztés 580~620°C-on, majd „vissza- alakító lágyítás” 620~660°C-on
- ◆ varrat szövetszerkezete: martenzites vagy martenzit mátrixban bénites
- ◆ hidrogéntartalom korlátozás, repedésérzékenység
- ◆ 10 mm nagyobb szelvényméretnél előmelegítés



Hegesztése:

- ◆ ausztenites 23 12L, 23 12 2L esetleg 25 20 hozaganyaggal, vagy nagy Ni-tartalmú hozag-anyaggal (63% Ni +20% Cr)

9 % Ni-ötvöztetésű acél

- ◆ javasolt üzemi hőmérséklet: -195 (- 200)°C-ig,
- ◆ hőkezelés: 760~820°C-ról edzés vízben,
- ◆ megeresztés 530~580°C-on

Hegesztése:

- ◆ ausztenites 23 12L, 23 12 2L esetleg 25 20 hozaganyaggal, vagy nagy Ni-tartalmú hozag-anyaggal (63% Ni +20%Cr)

2.14 BEVEZETÉS A KORRÓZIÓBA

2.14.1. Korrózió elméleti alapjai (kémiai, elektrokémiai és vegyes korrózió)

A korrózió tulajdonképpen a termodinamika által megfogalmazott energiaminimumra való törekvés. A termodinamika szóhasználatában az önként végbemenő folyamatokat az jellemzi, hogy a szabadentalpia-változás (ΔG) előjele negatív, azaz a végállapot szabadentalpiája kisebb, mint a kiindulási állapoté. A szabadentalpia-változás előjele, azonban csak a folyamat termodinamikai lehetőségét adja meg, a folyamat sebességéről semmit nem árul el. A fémek korróziója a szerkezeti tulajdonságok romlását eredményezi. Számos korróziós hatás ismeretes. A fémek korróziójának egyik következménye például a fémszerkezet mechanikai szilárdságának gyengülése.

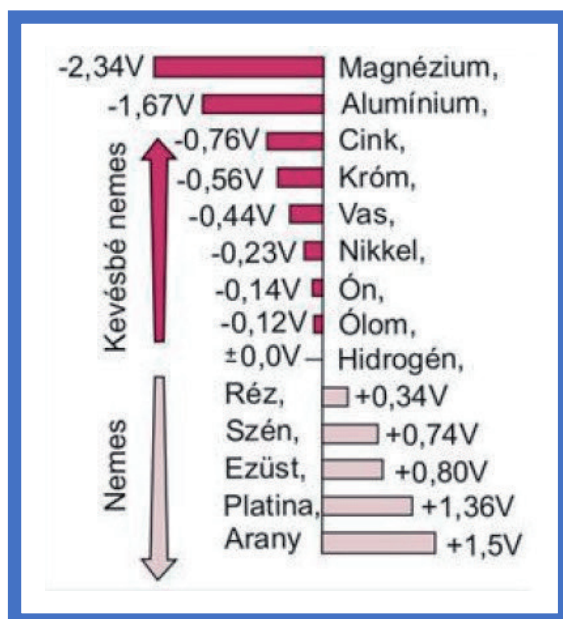
Az anyagnak a felületéről kiinduló, a környezet hatására bekövetkező károsodása, anyagvesztéssel járó folyamat, amely (elektro-)kémiai folyamatok révén megy végbe. Az anyag és a korrodáló közeg közös határfelületén jön létre miközben korróziós termékek képződnek (elektro-)kémiai reakcióval. A korrózió alapfolyamatai szerint lehet kémiai, elektrokémiai vagy vegyes.

Kémiai korrózió: a fém felületén olyan tisztán kémiai átalakulások mennek végbe, amelyek jelentős tömegvesztéssel járnak. Gépészmérnöki gyakorlatban ilyen típusú korrózió játszódik le pl. vanádium-tartalmú fűtőolajok égetésekor, amikor is a forrcsővek felületén kialakuló védő-oxidréteget a felületen kondenzálódó vanádium-vegyület folyamatosan feloldja. Hasonló jelenséget okoz a biomassza tüzelésekor a tüztérben elpárolgó, majd a hidegebb helyeken kicsapódó káliumklorid. A fém és a vele érintkező korrozív közeg komponensei között elektromos töltésátmenet nem következik be, de a fém és a korrozív közeg kémiai reakcióba lép egymással (oxidáció), pl. gázkorrózió (fémek levegőn történő hevítése).

Elektrokémiai korrózió: a határfelületi folyamatokban töltéssel rendelkező részecskék (ionok) is részt vesznek (helyi galvánelem). Az oxidációs és a redukciós folyamatok elkülöníthetők. A folyamat során a különböző elektród-potenciálú anyagok elektromosan vezető folyadékkal (elektrolit) érintkeznek melynek során az anód (a két fém közül a kisebb elektródpotenciálú) lassan feloldódik az elektrolitban. Az egymáshoz közeli potenciálú elemekből képződő galvánelem feszültsége kisebb, mint az egymástól távoli elemek esetében. A jellemző gyakorlati fémeket tartalmazó elektródpotenciálsort mutatja a hidrogénhez viszonyítva a 2.14.1. ábra.



2.14.1. ábra. Elektródpotenciál sor



Vegyes vagy átmeneti korrózió: A fémion és az elektron külön-külön részfolyamat keretében lép ki a fémes rácsból, ezért az elsődleges korróziós termékek is különböznek egymástól, (elektrokémiai korrózió), de ez a folyamat térbelileg nincs elválasztva (-anód-katód-) (kémiai korrózió). Ez a jelenség tulajdonképpen a fémek oldódása savakban és lúgokban. Nincsenek helyi elektródok, nincs meghatározott irányú elektronáramlás a fémbe, sem ionvándorlás az elektrolitban.

Korrózió közege szerint megkülönböztethető:

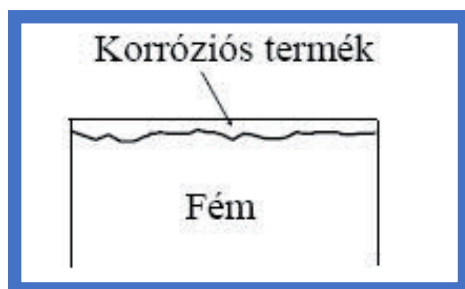
- ◆ Gázkorrózió, (pl. légköri, füstgáz, stb.)

2.14.2. Korrózió típusai

Mechanikai igénybevétel nélkül is fellépő korróziófajták:

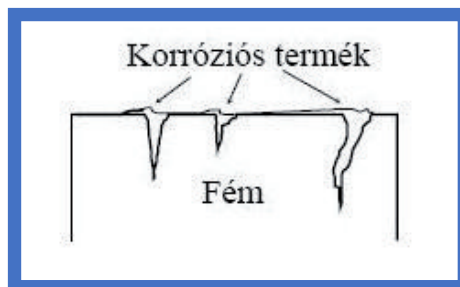
Egyenletes korrózió: A teljes felületen megjelenik, nem tekinthető veszélyes korróziófajtának. Oka: savak, lúgok azon fémek felületén melyeket oldanak.

2.14.2. ábra. Egyenletes korrózió



Helyi korrózió: Veszélyes korrózió, gyakran alig látható repedést, gödrösödést, felhólyagosodást, valamint a mechanikai tulajdonságok változását okozza. Megjelenési formái: Lyukkorrózió és a pontkorrózió, vagy pitting (2.14.3. ábra).

2.14.3. ábra. Lyukkorrózió



Réskorrózió vagy késélkorrózió, nehezen hozzáférhető helyen, letakart felületrészen jön létre. A fémek viszonylag vékony stagnáló korrozív folyadékkal érintkeznek. Jellemző hegesztett varratok mellett.

2.14.4. ábra. Késélkorrózió



Kontaktkorrózió vagy galvánkorrózió, olyan elektrokémiai folyamat, mely különböző fémekből álló szerkezetek érintkezési felületein veszi kezdetét, ha azok elektrolittal kerülnek kapcsolatba. Helyi galvánelem képződik mely a kisebb elektród potenciálú anyag fogyását jelenti.

Kristályközi (interkristallin) korrózió: különböző ötvözőelemek szemcséinek határán alakul ki (helyi galvánelemek).

Szelektív korrózió: Az ötvözetnek csak az egyik alkotórésze megy oldatba.

Mikrobiológiai korrózió: Anaerob baktériumok által okozott mikrobiológiai korrózió, levegőtől elzárt, egymással érintkező fémfelületek között jellegzetes alakú foltokban jelenik meg a korróziós termék.

Mechanikai igénybevétel hatására fellépő korróziófajták

Feszültségkorrózió: Húzó igénybevétel + korrózió együttes hatására jön létre. Az alakváltozott fém felülete aktív állapotba kerül a fém oldódása ezeken a helyeken fokozottabb.

Kristályok közötti korrózió: Húzó igénybevételnek kitett alkatrészekenél jön létre.

Korróziós kifáradás: Ciklusos igénybevétel esetén a fém kristályai egymáshoz viszonyítva elmozdulnak, ami a felület érdesedését, és az anyag felkeményedését okozza. Az anyag kifáradása rövidebb idő alatt vagy kisebb igénybevételnél jön létre a korrozív közeg hatására.

Eróziós korrózió: Folyadék áramlása okozza, bemélyedések, gödrösödések jönnek létre, a fém oldódása a korrozív közegben gyorsabb.

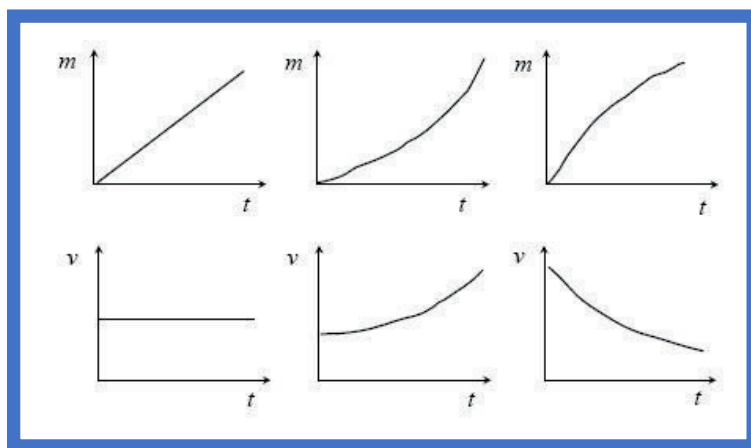
Kavitációs korrózió: Leggyakoribb a nagy sebességgel áramló, hűtővíz rendszerekben. Buborék-képződés jön létre mely ütősszerű vagy vibrációs hatást kelt.

Korrózió mértéke, sebessége

Egyenletes korrózió esetén a korrózió sebessége: a korrodált fém tömegének idő és felületegységre vonatkoztatott értéke.

$$v = \frac{dm}{A \cdot dt} \left(\frac{g}{\text{é}v} \right)$$

2.14.5. ábra. Korróziósebesség-függvények



Lyukkorrózió esetén a korrózió mértéke a felületegységre eső lyukak számával jellemezhető.

A korrózió sebessége függ a hőmérséklettől és a korrózió által érintett darabon átfolyó feszültség értékétől. Seebeck-effektus:

- ◆ A kontaktpotenciál értéke hőmérsékletfüggő.
- ◆ Egy fémes vezető két vége között ΔT hőmérséklet-különbség van, akkor elektronáram jön létre.
- ◆ Egy összeérintett fém pár (pl. termoelem) esetén mindkét fém hideg és meleg vége között fellép a hőmérséklet-különbséggel arányos elektromos potenciálkülönbség.

2.14.3. Korrózióvédelem

- ◆ Bizonyos esetekben megoldás a megfelelő szerkezeti anyag megválasztása.
- ◆ A védelem szempontjából jelentős a korrózióálló konstrukció kialakítása.
- ◆ A leggyakoribb védelmet a különféle bevonatok jelentik.
- ◆ Egyéb eljárásokhoz tartozik: inhibitoros védelem és a katódos védelem



Fémek korróziós tulajdonságai:

- ◆ Vegytiszta fémek korrózióval szemben ellenállóak.
- ◆ Ötvözetlen acélok, korrózióra hajlamosak.
- ◆ Ötvözött acélok, korrózióval szemben ellenállóbbak mint az ötvözetlenek.

Korrózióvédelem az alapanyag oldaláról

Jó korrózióálló: homogén szövetszerkezet vagy korrózióállóságot biztosító ötvözés:

Ferrites korrózióálló acélok

Martenzites korrózióálló acélok

Auszténites korrózióálló acélok

Duplex korrózióálló acélok

Amennyiben nem tudunk korrózióálló anyagot alkalmazni, akkor a korrózióvédelem a felületvédelemmel valósítható meg. Az oxidréteg, futtatási szín, reve, idegen rozsdá stb. eltávolítható kémiai úton (pácolással), vagy mechanikus úton (pl. felületszórás üveggyönggyel vagy köszörüléssel és polírozással). A pácoltat max. 50%-os töménységű salétomsav (HNO_3) 10~30%, folyosav (HF) 2,5~3%, víz (50 ppm kloridtartalommal), a pácfürdő hőmérséklete: 20~40°C, pácolási idő: kb. 20 perc.

A pácolás lehetséges változatai:

- ◆ mártópácolás (kisebb daraboknál)
- ◆ pácpasza alkalmazása
- ◆ szórópácolás (nagyobb felületeknél)
- ◆ felületi pácolás (zsír, olaj, festék eltávolítása)

Passziváló oldat, max. 50%-os töménységű salétomsav (HNO_3) 10~25%, víz (50 ppm kloridtartalommal), a pácfürdő hőmérséklete: 20...60°C, pácolási idő kb. 60 perc.

Korrózióvédelmi szempontoknak megfelelő konstrukció

- ◆ Megfelelő és elegendő kifolyónyílás a lecsapódott és bekerült nedvesség eltávolítására.
- ◆ Átszellőzés (pl. gépkocsi ajtóba fűtéslevegő bevezetése).
- ◆ Zárt szelvény helyett nyitott profilok alkalmazása.

Korrózióvédelem bevonatokkal

Fémes bevonatokkal:

- ◆ Termikus fémbevonatok (gáz-, szilárd és folyékony közegben)
- ◆ Termomechanikus fémbevonatokkal (fémszórás)
- ◆ Fémbevonatok előállítása kémiai eljárással (ioncserével, kontakteljárással, redukcióval)
- ◆ Fémbevonatok előállítása elektrokémiai eljárással (galvanizálás)



Nem fémes bevonatokkal:

- ◆ Festékbevonatok: Feladata a termék védelme a korrózió ellen, a tetszetős külső, a higiéniai követelmények kielégítése. A festékbevonati rendszer felépítése: felület-előkezelés, alapozó réteg, közbenső réteg, fedőréteg.
- ◆ Műanyag bevonatok.
- ◆ Kerámia bevonatok.

Elektrokémiai védelem

Katódos védelem: A vas potenciálját negatív irányba változtatjuk, pl. külső áramforrásra katódként kapcsolva.

Anódos védelem: A vas potenciálját annyira pozitívvá tesszük, hogy az a passzivitás tartományába essen, pl. külső áramforrásra anódként kapcsolva.

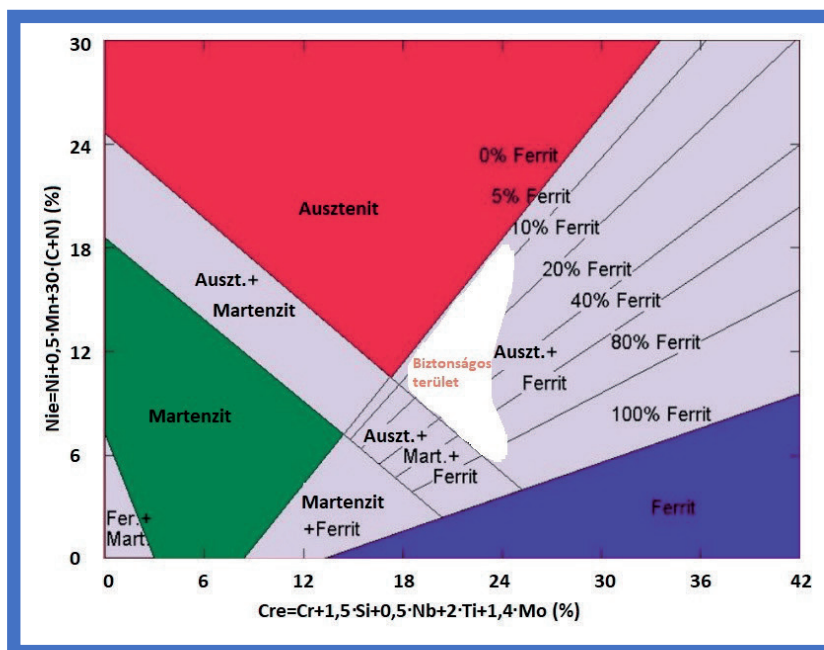
Az oldat PH-jának növelése oly mértékben, hogy az a passzív tartományba jusson. Túlságosan nagy PH- változtatással újabb korróziót is előidézhetünk.

2.15 ROZSDAÁLLÓ ÉS HŐÁLLÓ ACÉLOK HEGESZTÉSE

2.15.1. Rozsdaálló acélok típusai, ötvözők

A korrózióálló acélok választéka igen széles. A hegeszthető rozsdamentes acélokat ötvözőtartalmuk szerint a Schaeffler-diagram foglalja össze. A rozsdamentes acélok fő ötvözői a króm (Cr) és a nikkel (Ni), valamint az ezekkel az ötvözőkkel azonos hatású ötvözők. A Schaeffler-diagramban alkalmazhatósági korlátja kémiai összetétel szerint: C < 0,35%, Si < 1%, Nb < 1,5%, Mn < 4%, Mo < 3%.

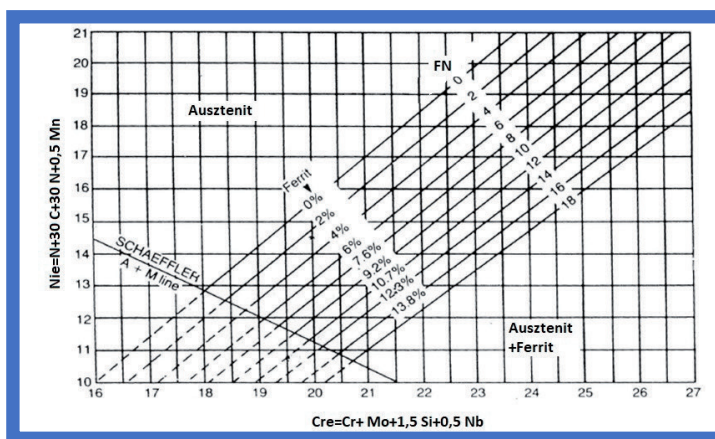
2.15.1. ábra. Schaeffler-diagram



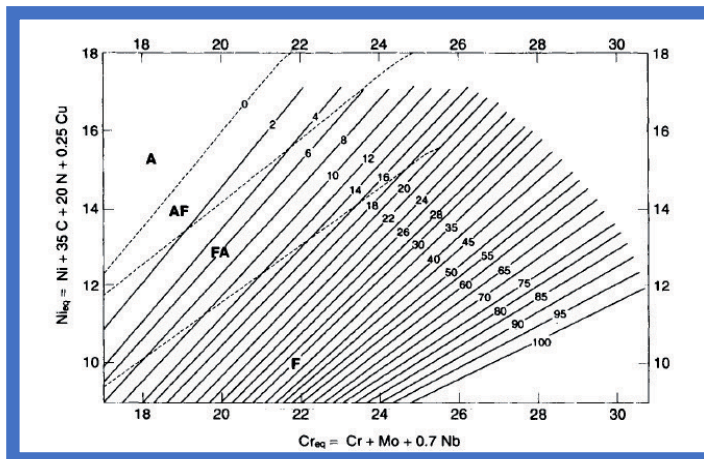
A Schaeffler-diagram a kémiai összetétel függvényében (króm és nikkel egyenérték) mutatja a kialakuló szövetszerkezetet. Ebben a diagramban megtalálhatók a hegeszthető rozsdamentes acélok választéka (ferrites, ausztenites, martenzites és duplex (ausztenit+ferrites) acélok. A Schaeffler-diagramban hegesztési szempontból veszélyes területeket is mutatja a kémiai összetétel szerint. A veszélyzónák kialakulása nem csak a kémiai összetételtől függ, hanem a hegesztés hatására létrejövő felhevülés hőmérséklettől is. Az ausztenites szövetszerkezetű acélok esetén 1250°C feletti hőmérsékleten melegrepedési veszély, a martenzites szövetszerkezetű területhez tartozó acélok esetében a 400°C alatt hidegrepedési veszély, a ferrites szövetszerkezetű acéloknál 1150°C felett szemcsedurvulási veszély, még az ausztenit ferrites szövetszerkezetű acélok esetén 500–900°C közötti hőmérséklet tartományra hevült területen σ fázis kiválás, ridegedés veszély jellemző.

A Schaeffler-diagramban tehát meghatározható az alapanyag szövetszerkezete, valamint az alkalmazni kívánt hegesztőanyag szövetszerkezete és számításos vagy grafikus úton a hőbevitel alapján megfelelő keveredést feltételezve meghatározható a varrat összetétele és szövetszerkezete. A varrat szövetszerkezete várhatóan akkor lesz repedésmentes, ha a diagram biztonságos területére kerül. a biztonságos területben ausztenit-ferrites szövetszerkezetű acélok találhatóak, ebben az esetben a ferrit δ fázisként kristályosodik, mely 5–15% mennyiségben a melegrepedési hajlam elkerülését biztosítja. A δ ferrit mennyiségének jelzésére az FN (Ferrite Number) jelölést szokták alkalmazni. Mivel a Schaeffler-diagram nem elég pontosan mutatja a ferritszámot célszerű a később (1974) kidolgozott DeLong (2.15.2. ábra) vagy a (1992 módosított) WRC-diagramot (2.15.3. ábra) használni.

2.15.2. ábra. DeLong-diagram

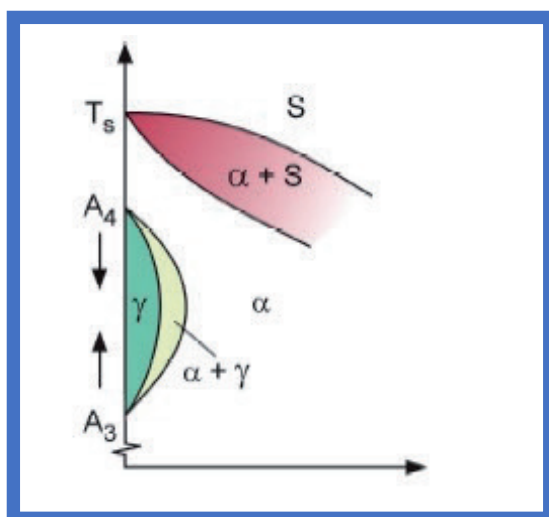


2.15.3. ábra. WRC-diagram (1992)



Ferrites acélok: Ha a krómtartalom nem haladja meg a 20%-ot, akkor a varratban és a hőhatásövezetben a lehűlés során allotróp átalakulásra nem kerül sor. Az egyetlen fémszerkezeti változást, és egyben az egyetlen hegesztési nehézséget a nagyobb hőmérsékletre hevült hőhatásövezeti zónákban bekövetkező szemcsedurvulás jelenti. Az allotróp átalakulás hiánya miatt szemcsesfinomító hőkezelés nem végezhető és a többbrétegű varratoknál sem lép fel az előző varratrétegekben az újabb réteg szemcsesfinomító hatása. A 20%-nál nagyobb krómtartalmú acélokban 550~900°C-os hőmérséklettartományban 52% krómot és 48% vasat tartalmazó fémes vegyület képződik. A vegyület hasonlóan a többi ionos fémes vegyülethez, igen kemény és a szemcsék belsejében mikró tűk formájában válik ki. Ez a jelenség a többbrétegű varratok hőhatásövezetében okozhat nehézséget, ha az egyes varratrétegek között a kötés nem tud lehűlni a σ -fázisként ismert fémesvegyület-képződés hőmérséklettartománya alá. Ferritképző ötvözők: Cr, Mo, V, W, Al, Si, Ti, Ta, Nb. Az A4 hőmérsékletet csökkentik, az A3-at növelik és oldódnak a ferritben. A γ -mező összehúzkódik, 12% Cr-tartalom felett ferrites szövetszerkezetű át nem alakuló szövetszerkezetű lesz az acél.

2.15.4. ábra. Cr ötvöző hatása az acélra

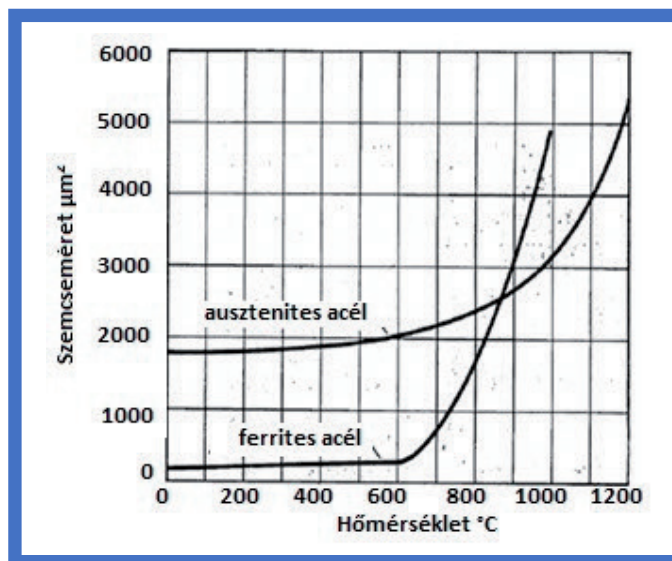


A króm

- ◆ térközepes köbös fém (mágnesezhető)
- ◆ ferritképző (ha a Cr > 12 %),
- ◆ erős karbidképző (Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6)
- ◆ hatásos nitridképző (Cr_2N) ötvöző
- ◆ növeli az acél edzhetőségét és átédzhetőségét
- ◆ növeli a melegszilárdságot, a korrózió- és reveállóságot stabil oxidja által (Cr_2O_3)

A ferrites Cr-acél szemcséi növekvő hőmérséklettel gyorsabban durvulnak, mint az ausztenit szemcsék. A durvulás kb. 600°C körül indul meg. Hajlamos ridegedésre 1150°C feletti szemcsedurvulás miatt (előmelegítés TILOS). Megfelelő a szívóssága és alakíthatósága, szemcséközi korrózióra nem érzékeny.

2.15.5. ábra. Szemcsedurvulási folyamat a ferrites és az ausztenites acéloknál



500~900°C között rideg, kemény (800~1000 HV) rendezett rácsú szilárd oldat (σ -fázis) kiválási veszélye áll fenn, jelentősen rontva az acél szívósságát, korrózióállóságát, különösen HNO_3 és $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ közegben. Képződését elősegíti az előzetes hidegalakítás, ill. a Si-, Nb-, Mn-, Mo- és N-ötvöztetés, csökkenti viszont a C, Al és Ni jelenléte. A kiválások oldatba vihetők és ezzel hatásuk elkerülhető 950~1050°C-on végzett izzítással, majd ezt követően gyors hűtéssel. μm^2

Ferrites acélok hegesztése, homogén kötessel készült varratban néhány % martenzit található, ezért a repedésveszély elhárítására és a kötés korrózióállóságának növelésére 3 mm-nél vastagabb lemez esetén 150...300°C-os előmelegítés, majd hegesztés után utóhőkezelés (700~750 °C/1~2h/lassú lehűtés) ajánlott. A hegesztéshez ferrites Cr (13 vagy 17 jelű), Cr-Mo ötvöztetésű, a hőálló Cr-acélokhöz Cr-Ni (25 4 jelű) ausztenit+ferrites hozaganyag javasolt. Heterogén kötések esetén a töltősorok (rétegek) az alapanyagtól eltérő, nagyobb szívósságú és képlékenységű ausztenites hozaganyagokkal mint pl. a kis C-tartalmú 19 9 L jelű vagy Nb-mal stabilizált 19 9 Nb jelű vagy kis C-tartalmú 23 12 L jelű, ill. 24 13 jelű vagy 25 20 jelű készülhet.

Szuper ferrites korrózióálló acélok: a szuper ferrites rozsdamentes acél (SFSS) előnye a kis nikkel-tartalom, az oxidációval szembeni ellenállás, a stressz-korrózióval szembeni ellenállás és az alacsonyabb ár.

A szuper ferrites rozsdamentes acél (pl. SFSS-B44660), amelynek C+N-értéke kevesebb, mint 0,4 g/l, és a PRE-értéke nagyobb, mint 37, kiváló korrózióállósággal, valamint feldolgozási és hegesztési tulajdonságokkal rendelkezik. A szuper ferrites rozsdamentes acélt gyakran erősen korrozív környezetben használják, ezért nagyobb ellenálló képességgel kell rendelkeznie a lyukkorrózióval szemben. Két szuperferrites korrózióálló acél kémiai összetételét és mechanikai tulajdonságait mutatja a 2.15.6. ábra. Felhasználás: autópárházban és tengervizes környezetben.

2.15.6. ábra. Szuperferrites acélok jellemzői

Acél jele	Folyáshatár, MPa			Szakítószilárdság, MPa			Nyúlás, %		Keménység, HV	
26Cr-3.5Mo-2Ni	675			720			16		272	
29Cr-3.5Mo-2Ni	740			770			18		303	
Acél jele	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	N	Fe
26Cr-3.5Mo-2Ni	0.010	0.25	0.27	25.8	2.03	3.42	0.34	0.20	0.010	Bal.
29Cr-3.5Mo-2Ni	0.008	0.28	0.30	29.1	1.96	3.50	0.37	0.16	0.009	Bal.

Auszténites acélok: Az auszténites korrózióálló acélok jellemző összetétele: $C \leq 0,02\sim 0,1\%$, $Cr=17\sim 26\%$, $Ni=8\sim 21\%$, $Mo=0\sim 7,0\%$. A homogén auszténites acélok kristályosodása γ vas képződéssel megy végbe. Az auszténites kristályosodáskor a szemcsék határán filmszerű eloszlásban válnak ki az alacsony olvadáspontú szennyeződések, mint például a szulfidok. Ez a kiválás gyakran kristályosodási repedéshez vezethet. Ezt elkerülendő a varratok lehetőleg néhány százalék ferritet tartalmazzanak. A ferrites kristályosodáskor a szemcsék felületi feszültsége nagyobb, ami megakadályozza, hogy a szennyeződések filmszerűen beburkolják a szemcsehatárokat. Különösen eredményes ez a repedés-megelőzés, ha szobahőmérsékleten is visszamarad néhány százalék ferrit. Az auszténites acélokban, ha a karbontartalom meghaladja az oldhatósági határt, akkor $425\sim 815\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklettartományban $Cr_{23}C_6$ karbid képződhet.

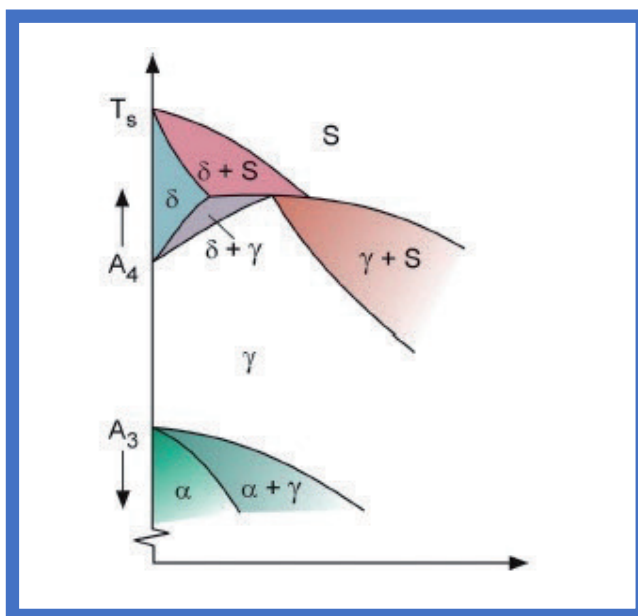
A szemcsék belsejéből a Cr a szemcsehatárra vándorol és $Cr_{23}C_6$ formájában kiválik. A szemcse belseje Cr-ban elszegényedik, a szemcsehatár dúsul és ez korróziós közeg esetén szemcsehatár menti korrózióhoz vezet. Különösen veszélyesek az $500\sim 900^{\circ}\text{C}$ -ra felhevült varratrészek. A túltelített karbon kiválása, így a karbidképződés is a szemcsék határán megy végbe. A karbid nagy krómtartalma miatt a szemcsehatár környezete krómban elszegényedik elvesztve korrózióval szembeni fokozott ellenállását. A jelenség szemcsehatár-korrózióként ismert. A szemcsehatár-korrózió elkerülhető, ha az ötvözet karbontartalma nem haladja meg az oldhatóságot, vagy a karbon vegyileg kötött, a króménál stabilabb karbid formájában van jelen. Ilyen stabilizáló ötvözők a Ti, Nb és a Ta. Auszténitképző ötvözők: **C, Ni, Mn, Cu, Co, N**. Az auszténit mező kitágul, az acél szobahőmérsékleten is auszténites lesz (2.15.3. ábra). Nagyon jó alakíthatóság és szívósság jellemzi.

A nikkelt:

- ◆ lapközepes köbös fém,
- ◆ nagy nyúlású, jól alakítható,
- ◆ növeli az acél szívósságát, csökkenti az átmeneti hőmérsékletet,
- ◆ nyitja a γ -mezőt, így az auszténit már szobahőmérsékleten is megjelenik



2.15.7. ábra. Ausztenitképző ötvözők hatása az acélra



Auszténites acélok esetén jellemző a melegrepedési hajlam (1250°C). A melegrepedés keletkezésében a szemcsehatárokon, ikerkristály határokon kiváló vegyületek (Fe₂Si, FeS, Fe₂Nb, Fe₃P stb.) vassal alkotott kisebb olvadáspontú (900~1300°C) eutektikumai játszanak szerepet. Elkerülhető 2~5% δ-ferrit jelenléte esetén. Jó a szemcseközi korrózióállósága, ha stabilizáló ötvözőket tartalmaz vagy igen a alacsony a karbontartalom. Ha a $Cr/Ni < 1,5$ akkor nagyobb a repedési veszély (a kiválás auszténittel kezdődik és fejeződik be). Ha a $1,5 \leq Cr/Ni \leq 1,95$ akkor a dermedés ferrit + auszténites lesz, így nincs melegrepedési veszély.

Auszténites acélok hegesztése: előmelegítés és utóhőkezelés nélkül, nagy villamos ellenállás, kis hővezetőképesség, (kis hőbevitel, gyors hőelvezetés), 2~5% δ-ferrit esetén nincs melegrepedés, megfelelő alaktényezőjű varrat készítése, (szélesebb varrat, kisebb beolvadással), kis C-tartalom, stabilizáló ötvözes (Ti, Nb, Ta) esetén nincs szemcseközi korrózió. A nagyobb hőtágulási együttható, nagyobb zsugorodási hajlam (hosszabb fűzővarratok, merevebb készülék, minél kisebb varratömeg), az elszíneződött varratfelületet (oxidréteg) el kell távolítani (pácolással, pasztákkal stb.), bevont elektródás ívhegesztéskor intenzívebb légcsere, légtérre van szükség (a Cr(III), ill. a Cr₂O₃ mérgező volta miatt), gyökoldali gázvédelem (Ar vagy N₂+H₂), a varratmenti részek védelme a fröcsköléstől, a felületek gondos tisztítása.

Szuper auszténites korrózióálló acélok: A szuper auszténites rozsdamentes acélnak azt tekintjük, amelynek pittingkorróziós indexe (PREN) 40-nél nagyobb. Ezt általában olyan ötvözeteknek tulajdonítják, amelyekben magas, általában 6% vagy több molibdén ötvöző van. Hideg- és melegalakíthatóságuk jobb, mint a hagyományos auszténites korrózióálló acéloknak míg szilárdság és szívósság szempontjából sem maradnak el.

Alkalmazás:

- ◆ Lemezes hőcserélők
- ◆ Feldolgozó berendezések a vegyiparban
- ◆ Fehérítő berendezések a cellulóz- és papíriparban



- ◆ Gyógyszeripar
- ◆ Élelmiszer ipar

2.15.8. ábra. 654 SMO EN 1.4652, (X1CrNiMoCuN24-22-8) szuperausztenites acél kémiai összetétele

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N	Cu
max 0.02	max 0.5	2 - 4	21 - 23	max 0.03	max 0.005	23 - 25	7 - 8	0.45 - 0.55	0.3 - 0.6

Martenzites korrózióálló acélok: összetétele, C= 0,12~1,2 %, Cr=12~19%, Mo=0~2%, Ni=0~2,0%. Alkalmazásuk: gőzzel, ill. vízzel érintkező elemek (szivattyú, turbinalapát, szelep stb.), mérőműszerek, orvosi eszközök stb. A martenzites korrózióálló acélok kristályosodása δ -ferrit kiválással kezdődik, majd ausztenittel fejeződik be, miközben a ferrit ausztenitké kristályosodik át. A hőmérséklet további csökkenésével a homogén ausztenitből a hűlési sebesség és a karbidképzők függvényében karbidok válhatnak ki. A karbidkiválás csökkenti az ausztenitben oldott karbontartalmat, de ennek ellenére a nagy króm-tartalomnak köszönhetően a hegesztett kötésben részben vagy egészben martenzites szövet alakul ki. A kis alakváltozó képességű martenzit hidegrepedések kialakulásához vezethet, amit fokoz, ha a hőhatásővezet a varraton keresztül hidrogénben feldúsul. A diffúzióképes hidrogéntartalom csökkenthető, ha a szövetben nagy hidrogénoldó képességű ausztenit is jelen van, elnyelve a fölös hidrogén mennyiséget. A hidegrepedés elkerüléséhez nemcsak előmelegítésre, hanem közvetlenül a hegesztést követően hőkezelésre is szükség van.

Martenzites acélok hegesztése: a rideg martenzit miatt hegesztésük 0,2% C fölött nem javasolt. Ha mindenképpen szükséges hegesztetni, akkor 200~350°C-os előmelegítés szükséges, ausztenites Cr-Ni (19 9L, 19 9Nb, 23 12, 18 8Mn) vagy 0,3 C% fölött nikkeltartalmú hozaganyaggal, hegesztés után feszültségcsökkentő izzítás (700~750 °C/0,5h hőntartás/szabályozott lehűtés) mellett.

A lágmartenzites (M+F) acélokban a C < 0,05%, a Cr mellett (12~17%) még tartalmaz 1~6 % Ni-t is (vízturbina, reaktortechnika, olajipar, armatúrák, szivattyúk, centrifugák, hűtéstechika, hajóépítés stb.). Hegesztés: 1~2% Ni-nél 150~250°C előmelegítés, majd 700°C-os megeresztés. 4~6 % Ni-nél 100~150°C előmelegítés, majd 600°C-os megeresztés.

Lehetnek: Cr, Cr-Mo vagy Cr-Ni ötvözesűek (C=0,1...1,2%, a Cr=12...18%, a Mo≤ 1,5%, a Ni ≤2,5%). Alkalmazásuk: orvosi eszközök, fogók (X12Cr13), tengely, csap, kés, olló, szike, húspari vágókések (X20Cr13), rugók, mérőműszerek (X30Cr13), műanyagalakító szerszámok (X40Cr13), szivattyú elemek, tengely, orsó, szelep, dugattyúrúd stb. (X14CrNi 17-2).

2.15.9. ábra. Néhány martenzites korrózióálló acél jellemzői

Az acél jele		Vegyi összetétel, %				Hegeszthetőség
Főjel	Számjel	C	Cr	Mo	Ni	
X20Cr13	1.4021	0,16...0,25	12...14	–	–	Csak különleges munkarenddel.
X30Cr13	1.4028	0,26...0,35	12...14	–	–	Hegesztett szerkezethez nem javasolt.
X39Cr13	1.4031	0,36...0,42	12,5...14,5	–	–	Hegesztésre nem alkalmas.
X105Cr-Mo17	1.4125	0,95...1,20	16...18	0,4...0,8	–	Hegesztésre nem alkalmas.
X17Cr-Ni16-2	1.4057	0,12...0,22	15...17	–	1,5...2,0	Csak különleges munkarenddel.

Szupermartenzites korrózióálló acél: Kiválóan keményedő és lágmartenzites korrózióálló acélokot nevezzük szupermartenzites korrózióálló acéloknak. A nagyobb mechanikai és az ausztenites szövetszerkezetű acéloknál kisebb korróziós igénybevételnek kitett területeken nyernek alkalmazást. A korrózióval szemben ellenálló, lágmartenzites acélok fő ötvözője a króm, hasonlóan, mint a szilárdoldatot alkotó, ferrites korrózióálló acélok esetében. Az alapvető különbséget a lágmartenzites acélok esetén a csekély karbontartalom (C 0,03%), a nikkel-, és egyes típusokban a molibdénötvöztetés jelenti. Elsősorban vízgépészeti berendezésekhez, turbina- és szivattyúházakhoz, turbinakerekek öntvényeihez, stb. használják a 0,03–0,06% C- és 12–17% Cr-tartalmú acélokat, amelyek 3,5–6% Ni mellett még legfeljebb 1,5% molibdénnel is ötvözöttek. A lágmartenzites acélok szövetszerkezetében a martenzites mátrixban 5–20% ausztenit is található. Ezt az acéltípust szupermartenzites típusnak is nevezik. Az ausztenittartalom következtében csökken a szilárdság és a keménység a martenzites típusokhoz képest, de nő a szívósság, ami a kavitációs kopással szembeni nagyobb ellenállást eredményez. Ezért jellemző alkalmazási területe a gázipar, ezen belül is a gáz távvezetékek.

Duplex korrózióálló acélok:

Ennek a rozsdamentes acélcsaládnak a „duplex” elnevezése az ötvözetek mikrostruktúrájából származik, amely körülbelül 50/50 arányú ausztenit és delta-ferrit keveréket tartalmaz. Úgy tervezték, hogy jobb korrózióállóságot biztosítsanak, különösen a kloridos korrózióval szemben, és nagyobb szilárdságot biztosítsanak, mint a hagyományos ausztenites rozsdamentes acélok. Az ausztenites rozsdamentes acélhoz képest a fő összetételbeli különbségek az, hogy a duplex acélok krómtartalma magasabb, 20–28%; magasabb molibdén, akár 5%; alacsonyabb nikkel, akár 9% és 0,05–0,5% nitrogén. Mind az alacsony nikkeltartalom, mind a nagy szilárdság (amely lehetővé teszi a vékonyabb lemezek használatát) jelentős költségcsökkenéssel így haszonnal jár. Ezért széles körben használják őket a tengeri olaj- és gáziparban csőrendszerekhez, elosztócsövekhez, felszállókhoz stb., Valamint a petrokémiai iparban csővezetékek és nyomástartó edények formájában. Bár a duplex rozsdamentes acélok erősen korrózió- és oxidációállóak, nem használhatók magas hőmérsékleten. Ez annak köszönhető, hogy a ferritben viszonylag alacsony hőmérsékleten nem stabil fázisok képződnek, ezek a fázisok katasztrofálisan befolyásolják az acélok szívósságát. Az nyomástartóedény-szabványok ezért minden fokozat üzemi hőmérsékletét 315°C alá korlátozzák, de vannak szabványok melyek még alacsonyabb üzemi hőmérsékletet



határoznak meg, a szuperduplex acéloknál akár 250 °C -ot is. A duplex ötvözetek három fő csoportra oszthatók; lean duplex, 22%Cr duplex és 25%Cr superduplex, és még magasabb ötvözetű, hiperduplex minőségeket fejlesztettek ki. Ez a felosztás elsősorban az ötvözet ötvözetségi szintjén alapul, pl. az ötvözet korrózióval szembeni ellenálló képességét a PREN-t egy egyszerű képlet alapján számítják ki: $PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N$, és néha figyelembe veszik a W értéket, 1,65-ös tényezővel. A duplex acél PREN-értéke kisebb, mint 40; egy szuperduplex a PREN 40 és 45 között, és a hiperduplex a PREN 45 felett, míg a lean fajták jellemzően alacsonyabb nikkelt tartalmaznak és ennél fogva olcsóbbak. A duplex rozsdamentes acélsalád kohászata bonyolult, és nagyon szoros ellenőrzést igényel az összetétel és a hőkezelési rendszerek tekintetében, ha a mechanikai tulajdonságokat és/vagy korrózióállóságot nem érintse hátrányosan.

Az optimális mechanikai tulajdonságok és korrózióállóság elérése érdekében mind az alapanyag, mind a hegesztett fém szövetszerkezetének vagy fázisegyensúlyának körülbelül 50% ferritnek és 50% ausztenitnek kell lennie. Ezt a pontos értéket lehetetlen ismétlődően elérni, de a fázisegyensúly egy tartománya elfogadható. Az alapfémek fázismérlege általában 35–60% ferrit. Míg az összetétel és – ami talán még ennél is fontosabb – a hőkezelési paraméterek viszonylag könnyen szabályozhatók, a hegesztés során ez nem így van. A ferrit mennyisége nemcsak az összetételtől, hanem a hűtési sebességtől is függ; a gyors lehűlési sebesség megtartja a ferritet, amely magasabb hőmérsékleten képződik. Ezért a hegesztett fémekben nagyon magas ferritszintek kialakulási kockázatának minimalizálása érdekében biztosítani kell a minimális hőbevitelt és ezáltal a maximális hűtési sebességet. A hegesztőanyagok általában úgy vannak megfogalmazva, hogy több nikkelt tartalmazzanak, mint az alapfém, a nikkel az egyik elem, amely elősegíti az ausztenit képződését. A duplex töltőfém legfeljebb 7% nikkelt, a szuperduplex legfeljebb 10% nikkelt tartalmazhat. A fázisdiagramokra és a CCT-görbékre való hivatkozás azt mutatja, hogy a duplex rozsdamentes acélok olyan területre esnek, ahol a törékeny intermetallikus fázisok előállítása komoly kockázatot jelent a hegesztés és a hőkezelés során, és jelentősen csökkenti a szívósságot és a korrózióállóságot.

A fő bűnösök a szigma-fázis, a chi-fázis és a 475°C -os törékenység. A Sigma- és a chi-fázisok 550 és 1000°C közötti hőmérsékleten képződnek, a leggyorsabb képződés 850°C körül. Ezeknek a fázisoknak a létrehozásához szükséges idő akár 30 vagy 40 másodperc is lehet egy szuperduplex ötvözetben. A 475°C-os törékenység, ahogy a neve is sugallja, alacsonyabb, körülbelül 350–550°C hőmérsékleten fordul elő, és a kialakulási idő talán 7–10 perc. Az ilyen rövid idők azokon a tartományokon belül vannak, amelyek a közbenső hűtés során előfordulhatnak, így ismét a hőbevitel és a hűtési sebesség válik nagyon fontos hegesztési paraméterré, kivéve, hogy ezúttal a maximális hőbevitelt kell szabályozni.

A maximális hőteljesítmény 2,5 kJ/mm legyen elfogadható a duplex acéloknál és legfeljebb 2,0 kJ/mm a szuperduplexeknél. Sok kód és szerződés specifikáció azonban tovább korlátozza a hőbevitelt 1,75–2 kJ/mm -nél kevesebbre a duplex acéloknál és 1,5–1,75 kJ/mm -nél a szuperduplexnél. Az áthaladási hőmérséklet jelentős hatással lehet a hegesztési varrat mikrostruktúrájára és a hő által érintett zónákra. A duplex acél esetében a 250°C -ot, a szuperduplex 150°C -ot pedig elfogadható maximumnak kell tekinteni. Ne feledje azonban, hogy sok kód nem választja szét a duplex és a szuperduplex osztályokat, és gyakran 150°C -ra van szükség. Az ilyen alacsony közbenső hőmérsékletek komoly hatással lehetnek a hézagok befejezési idejére és a kényszerhűtésre, ha száraz levegőt fújnak a cső furatán, miután a furattisztítást eltávolították. Ez általában csak akkor előnyös, ha vastag falú edényeket vagy csöveket forgatott csőmechanizált TIG-eljárással vagy merített ívvel hegesztenek. Ha ezt a technikát alkalmazzák, ajánlatos kényszerített hűtéssel lehűteni az eljárást minősítő próbadarabot annak biztosítására, hogy a hűtési sebességek (és az ebből eredő mikrostruktúrák) a megengedett tartományon belül legyenek.

Az **ausztenit-ferrites Cr-Ni-Mo-N-acélok** kis C-tartalmúak ($C < 0,03\%$), emellett 18,5–25% Cr-ot, 5–7% Ni-t, 1,5–3% Mo-t, 0–0,4% N-t és 0–2% Cu-et tartalmaznak. Az ausztenit-ferrites (30–60% F) duplex acél a tiszta ausztenites Cr-Ni-acéloknál nagyobb szilárdságú, kedvező szívósságú, kis átmeneti

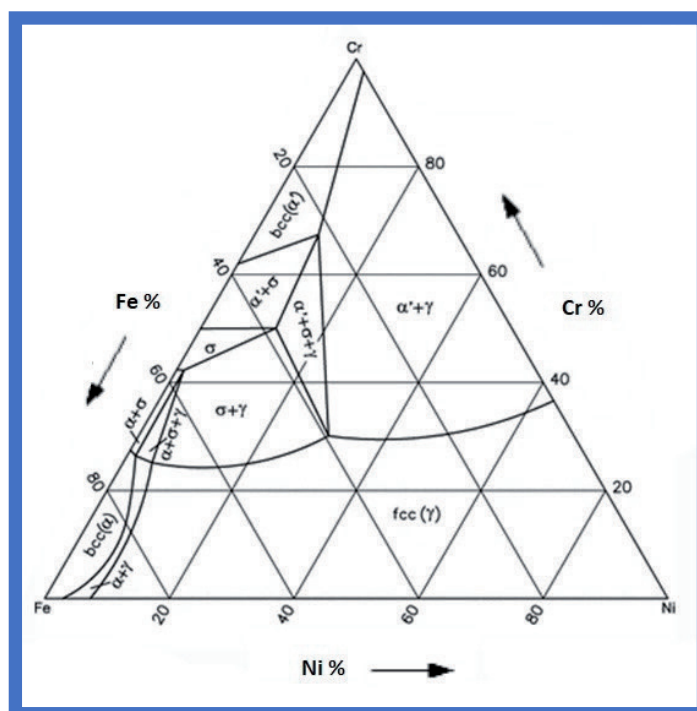


hőmérsékletű, feszültségkorrózióval, szemcseközi- illetve lyukkorrózióval szemben kiválóan ellenálló (150°C-ig). Duplex acélok jellemzői: nagy szilárdság, nagy kifaradási határ, nagy ellenállás lyuk-, rés- és feszültségi korrózióknak, korróziós kifaradásnak, kitűnő ellenállás általános korrózióval szemben, jó kopásállóság, nagy energiaelnyelő képesség (ausztenit), kis hőtágulás, jó hegeszthetőség.

Az ausztenit+ferrites acélok jól hegeszthetők, csak a 20 mm-nél vastagabb lemezeket kell előmelegíteni kb. 150°C-ra. Hozaganyag nélkül a varrat mintegy 80% ferritet tartalmaz, ami szívóssági és korróziós gondokat jelenthet. Hegesztéséhez javasolt az ausztenites 22 9 3 NL vagy a 25 7 2 NL jelű (Cr-Ni-Mo) hozaganyag. Hegesztés után nem kell hőkezelést végezni.

A korrózióálló acélok szövetszerkezetének meghatározására alkalmazható 3 alkotós egyensúlyi diagram is. Ebben a három ötvöző a vas, a króm és a nikkel, vagyis a korrózióálló acélok fő ötvözői. A háromalkotós diagramokat adott izotermán kell felvenni és értelmezni. Az alábbi diagram 750°C fokok izotermán a fázisviszonyokat mutatja a α , γ és σ fázisok mennyiségét illetően.

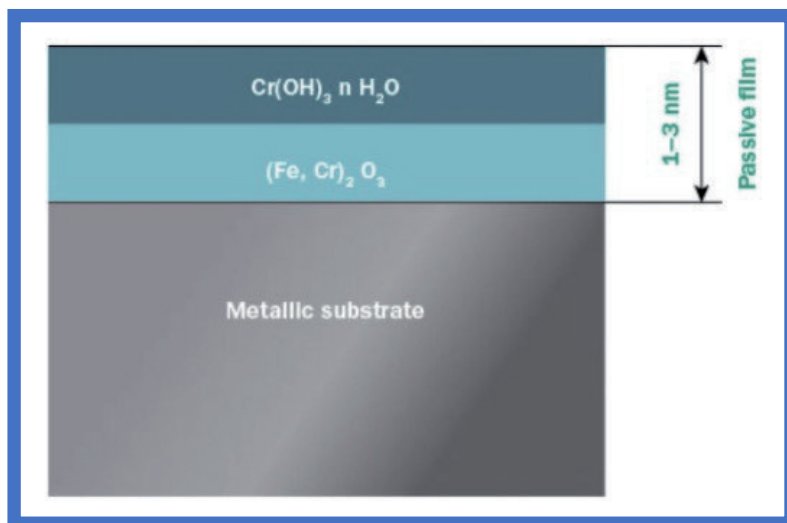
2.15.10. ábra. Háromalkotós egyensúlyi diagram Fe–Cr–Ni T=750 °C-on



2.15.2. PREN, CPT, CCT korróziós ellenállás jellemzők

A korrózióálló acélok korrózióállóságát a felületükön képződő vékony króm-oxid réteg biztosítja, mely „öngyógyító”. Ez azt jelenti, hogy a levegő oxigénjével sérülés esetén ismét oxidokat képez. A felületen kialakuló réteg vastagsága 1–3 nm.

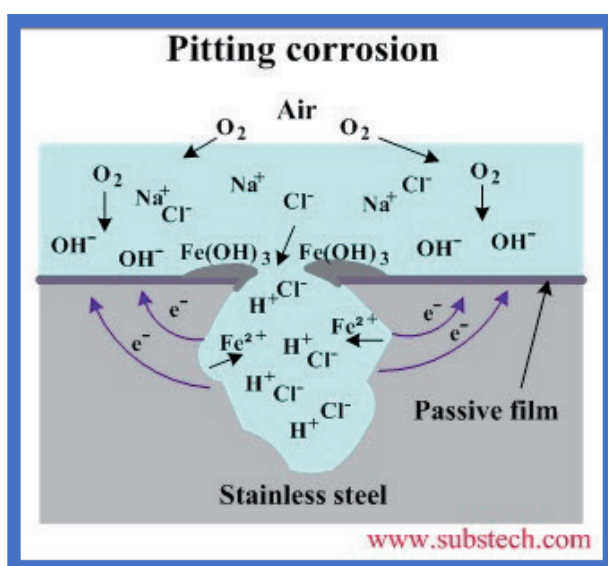
2.15.11. ábra. Króm-oxid réteg kialakulása



Korróziós ellenállás meghatározása

Korrózióálló acélok korróziós ellenállását a pitting korróziós indexel minősítik.

2.15.12. ábra. Pitting korrózió



Auszténites acélokra: $PREN = \%Cr + (3.3 \times \%Mo) + (16 \times \%N)$

Wolframot is tartalmazó acélok esetében:

$PREN = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo + 0.5\%W) + 16 \times \%N$

Ferrites acélokra: $PREN = \%Cr + (3.3 \times \%Mo)$

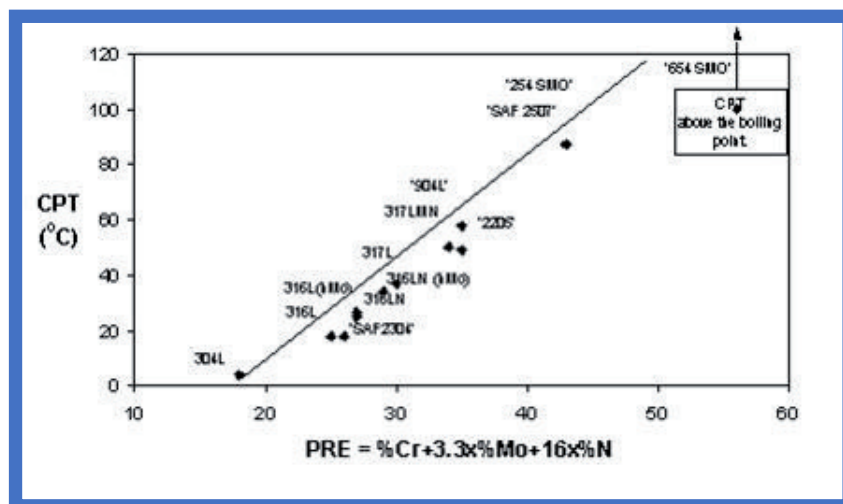
Duplex acélokra: $PREN = \%Cr + (3.3 \times \%Mo) + (30 \times \%N)$

CPT (Corrosion Pitting Temperature) mérése Avesta Cell (ASTM G 150 szerint), 1M-os NaCl oldat (35 mg/l kloride ion).



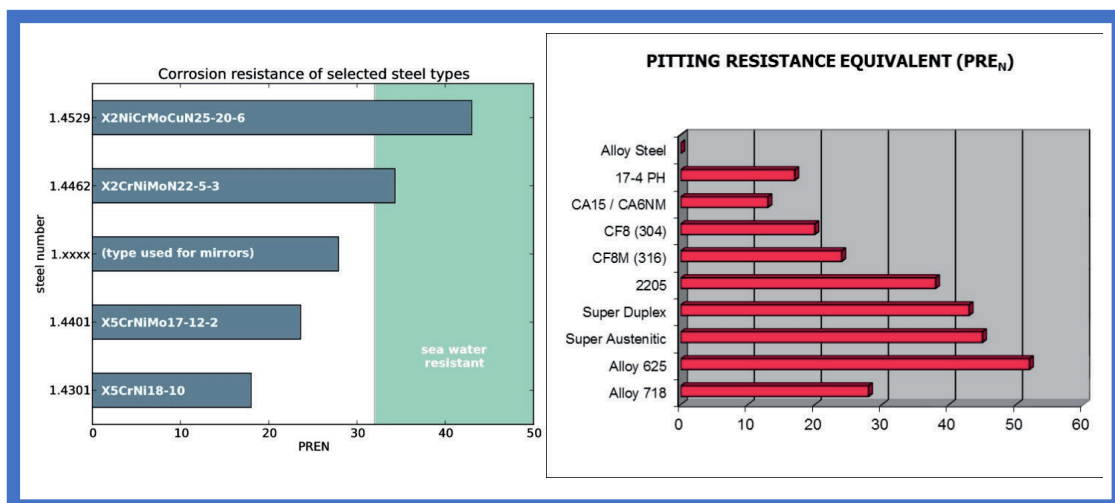
CCT (Critical Crevice Corrosion Temperature) laboratóriumi vizsgálattal határozható meg az ASTM G 48 Method F szabvány szerint

2.15.13. ábra. Korrozíóálló acélok CPT-hőmérséklete a PREN-értékük függvényében

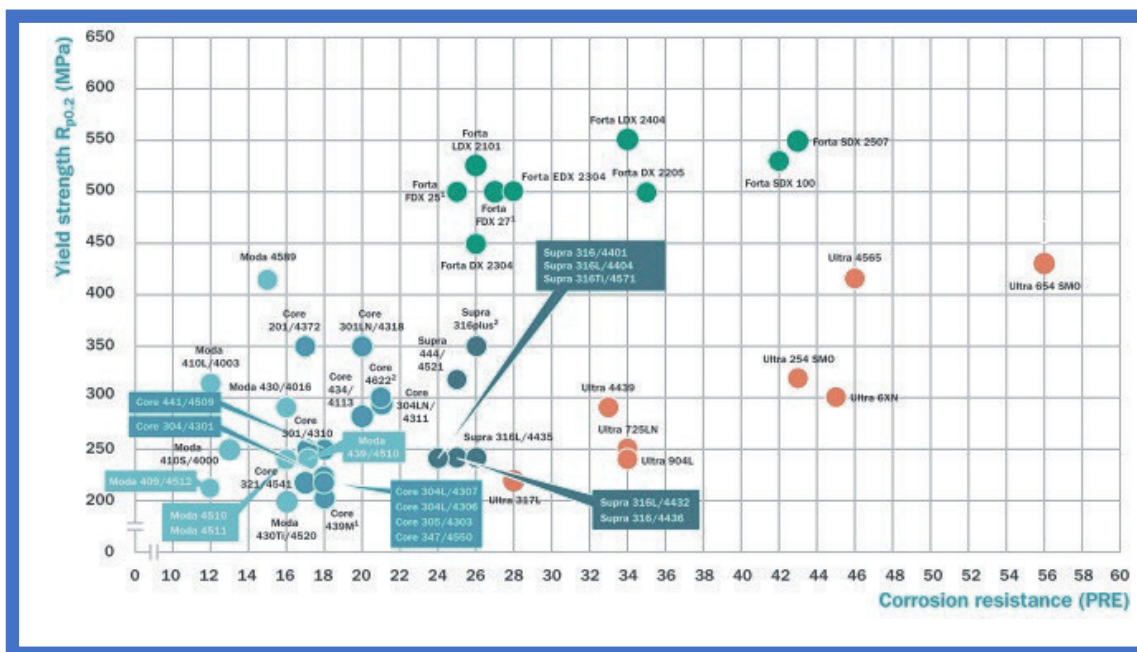


A korrozíóállóságot a gyakorlatban a PREN-index-el értékeljük. Az alábbi diagramok néhány acél PREN indexét illetve a korrozíóállóságot tengervíz esetén mutatják.

2.15.14. ábra PREN-index értékek különböző acélokra



2.15.15. ábra. Korrozíóálló acélok szilárdsága korrozíós PREN-index függvényében



2.15.3. Hőálló acélok típusai, ötvözők, alkalmazhatósági tartományok

Hőálló az acél adott hőmérsékleten, ha az oxidációs (revésedési) sebesség maximum $1\text{g/m}^2\text{h}$ de a hőmérséklet 50°C növekedése esetén sem nagyobb, mint $2\text{g/m}^2\text{h}$. Hőálló acélok üzemi hőmérséklete: $500\text{--}550^\circ\text{C}$, vagy ennél nagyobb hőmérséklet.

Lehetnek:

Ferrites Cr-acélok ($\text{Cr} = 10,5\text{...}27\% + \text{Al}$, ill. $\text{Mo}, \text{Si}, \text{W}, \text{Co}$)

Auszenites Cr-Ni-acélok ($\text{Cr} = 15\text{...}27\%$, $\text{Ni} = 8\text{...}35\% + \text{Si}$)

Auszenit-ferrites Cr-Ni-acélok (δ ferrit jelenlét)

Speciális acélok (nem Fe-alapú ötvözetek) pl. Ni-ötvözetek ($\text{Ni} = 45\text{...}72\%$, $\text{Cr} = 14\text{...}29\%$, $\text{Fe} = 6\text{...}25\%$)

A nagy hőmérsékleten alkalmazható anyagokat összefoglalóan a 2.15.16. ábra mutatja.

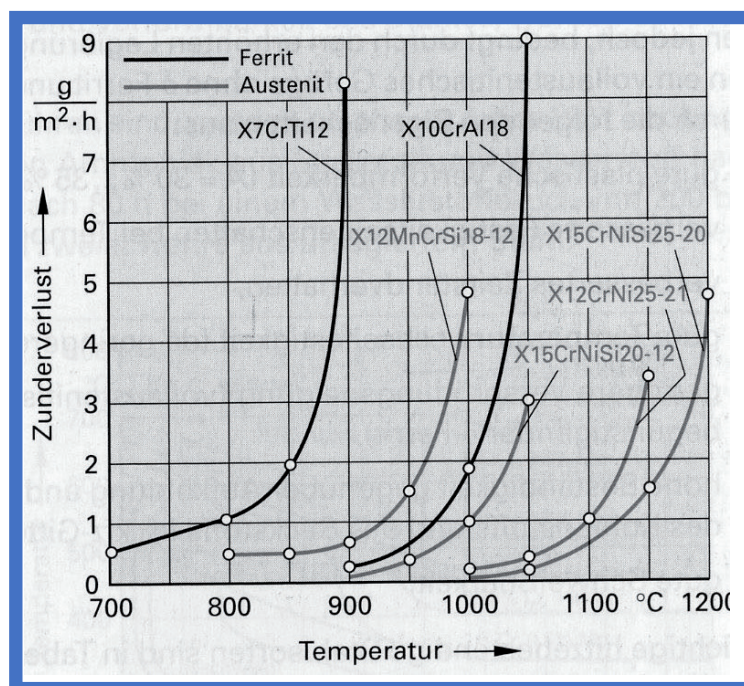
2.15.16. ábra. Nagy hőmérsékleten alkalmazható anyagok

Anyagok	Fázisok	Üzemeltetési hőmérséklet	Példák
Melegsziárd acélok	ötvöztelen (F+P) ötvözött (F+B)	$< 400^\circ\text{C}$ $< 540^\circ\text{C}$	15Mo3 10CrMo9–10
Nagy hőmérsékleten ellenálló acélok	martenzites (F+M) auszenites (A)	$< 600^\circ\text{C}$ $< 700^\circ\text{C}$	X6CrNi18–1



Anyagok	Fázisok	Üzemeltetési hőmérséklet	Példák
Hőálló acélok	ferrites (F) ausztenites (A)	800...1000 °C 850...1100 °C	X3CrAlTi18-2 X10NiCrAlTi32-21
Ni-bázisú ötvözetek	ausztenites (A)	1150...1200 °C < 550°C	NiCu30Al2,5Ti NiCr20Ti NiCr15Co15Al5 IMI 834
Ni-bázisú szuperötvözetek		700 °C 700 °C 750...1000 °C	IN 718, Waspaloy, IN 713
Ti-ötvözetek	$\alpha+\beta$ -fázisú Al-ötvözetek γ -titán-aluminid	< 300°C < 750°C	TiAl6V4 (Ti64) TiAl

2.15.17. ábra Oxidációs veszteség nyugvó levegő esetén hőálló acéloknál



A hőállóság az acél krómtartalmától függ. Az adott hőmérséklettartományokat a 2.15.13. ábra mutatja.

2.15.18. ábra. Hőállóság a krómtartalom függvényében



Hőálló acélok a ferrites és az ausztenites valamint az ausztenit-ferrites duplex acélok.

2.15.19. ábra. Ferrites hőálló acélok választéka és hegeszthetősége

Az acél jele		Vegyi összetétel, %				Hegeszthetőség
Főjel	Számjel	C, max.	Cr	Al	Egyéb	
X10CrAlSi7	1.4713	0,12	6,0...8,0	0,5...1,0	Si=0,5...1,0	Szemcsedurvulásra hajlamos acélok.
X10CrAlSi13	1.4724	0,12	12,0...14,0	0,7...1,2		
X10CrAlSi18	1.4742	0,12	17,0...19,0	0,7...1,2	Si=0,7...1,4	Kis hőbevitel, előmelegítés és hegesztés után utóhőkezelés szükséges.
X10CrAlSi25	1.4762	0,12	23,0...26,0	1,2...1,7		
X18CrN28	1.4749	0,15...0,20	26,0...29,0	–	+N	
X3CrAlTi18-2	1.4736	0,04	17,0...18,0	1,7...2,0	+Ti	

2.15.20. ábra Ausztenites hőálló acélok

Az acél jele		Vegyi összetétel, %				Hegeszthetőség
Főjel	Számjel	C, max.	Cr	Al	Egyéb	
X18CrNi18-10	1.4878	max. 0,10	17,0...19,0	9,0...12,0	Ti≤0,8	Előmelegítés nélkül jól hegeszthető, a nagyobb Ni-tartalomnál esetleg melegrepedési veszély, ezért kerülni kell a nagy beolvadást adó hegesztő eljárásokat.
X15CrNi-Si20-12	1.4828	max. 0,20	19,0...21,0	11,0...13,0	Si=1,5...2,5	
X12CrNi23-13	1.4833	max. 0,15	22,0...24,0	12,0...14,0	–	
X8CrNi25-21	1.4845	max. 0,10	24,0...26,0	19,0...22,0	–	
X15CrNi-Si25-21	1.4841	max. 0,20	24,0...26,0	19,0...22,0	Si=1,5...2,5	
X12NiCr-Si35-16	1.4864	max. 0,15	15,0...17,0	33,0...37,0	Si=1,0...2,0	
X10NiCrAl-Ti32-21	1.4876	max. 0,12	19,0...23,0	30,0...34,0	+ Al, Ti	
X6CrNiSiNcCe 19-10	1.4818	0,04...0,08	18,0...20,0	9,0...11,0	Si=1,0...2,0+ N,Ce	
X10NiCrSi 35-19	1.4886	max. 0,15	17,0...20,0	33,0...37,0	Si=1,0...2,0	

2.15.4. Korrózió mérése

A korrózió mérésének elsődleges lehetősége a szemrevételezés:

- ◆ Megállapítható a korrózió típusa.
- ◆ A felhasználás helyén és azonos körülmények között végzik.

Falvastagság mérése

- ◆ Ultrahangos.
- ◆ Megállapítható a sebesség.

Elektromos ellenállás-változás mérése

Előnyei: Üzemi körülményekhez képest megfelelő pontosságú.

Hátrányok: Hosszú ideig tart, helyigény.

Tervezés: Mintatartó anyaga, elhelyezése, minták helyzete és anyaga fontos.

Tömegváltozás mérése (laboratóriumban):

- ◆ korróziós közeg kémiai analízise,
- ◆ fejlődött, vagy elnyelt gáz mérése,
- ◆ tervezett időtartamú mérés.

Gyorsított korróziós vizsgálatok, sópermetes korróziós vizsgálat:



A sópermetes korrózió vizsgálatoknak két fő fajtáját különböztetjük meg. Egyik az egyszerű sópermeteszt. Ennek lefolyása során a zárt kamrában elhelyezett mintákat folyamatos sópermet, illetve sóköd veszi körül. A szabványok a sós oldat összetétele és pH-értéke mellett a kamrában uralkodó hőmérsékletet, a sópára telítettségét és hőmérsékletét, a kicsapódásának mértékét, illetve a vizsgálati idő hosszúságát írják le. Ugyancsak meghatározott a kiértékelési módszer is. E vizsgálatok folyamán többek között a bekarcolt bevonaton keletkező korrózió kiterjedtségét, szálkasságát vizsgálják. A szabványok általában megengedőek, a vizsgálatok egy naptól kezdve akár több hetes időtartamúak lehetnek. A ciklikus korróziós tesztek gyakorlatilag klimatikus vizsgálatokkal kombinált sópermettesztekből állnak, ahol a hagyományos sóködképzés mellett kondenzáció, szárítás, magas páratartalmú klíma, vagy a legújabb szabványok esetén akár fagyasztásos, vízelöntéses, kén-dioxid befúvásos szakaszokból áll össze a teljes vizsgálati időtartam.

Korrózió sebességének meghatározását általában mm/év-ben határozzák meg. Többféle eljárás létezik a korróziósebesség meghatározására, például a korrodálódó fém tömegcsökkenésének mérése vagy az elektrokémiai korrózió mérése. A legegyszerűbb mód a fém korróziós sebességének mérésére, hogy a vizsgálati mintát behelyezzük a korrodáló közegbe (pl. tengervíz) és mérjük a tömegcsökkenést az idő függvényében. Oldatba mártott vastárgy esetén lehetséges a vizes oldat a Fe^{3+} koncentrációjának növekedését fotometrikus úton is vizsgálni. Ez a módszer gyakorlatilag ugyanolyan egyszerű, mint a tömegcsökkenés mérése.

2.16 BEVEZETÉS A KOPÁSBA ÉS A VÉDŐRÉTEGEKBE

2.16.1 Kopás típusai

A kopás anyagvesztéssel járó károsodási folyamat. A kopás mértéke a kopás következtében létrejövő anyagvesztéssel mérhető, jellemezhető.

Leggyakoribb kopástípusok:

- ◆ **Abrázív kopás:** A keményebb felület kiálló csúcsai elmozduláskor mélyedéseket, barázdákat, karcolásokat hoznak létre a lágyabb felületben.
- ◆ **Adhéziós kopás:** Ez a hegedéses kopásnak is nevezett folyamat egymással súrlódó – viszonylag kis sebességgel elmozduló – testek esetén, nagy felületi nyomás hatására, elsősorban fémes anyagok között, folyadékkénés vagy oxidhártya hiányában jön létre.
- ◆ **Fáradásos kopás:** A váltakozó (ciklikus) terhelés hatására a felületi réteg kifárad, mikrorepedések keletkeznek benne, amelyek növekedése a réteg lepattogzását, gödrösödését, pittingesedését, vagy a réteg felbomlását okozza
- ◆ **Tribokémiai kopás:** A tribológiai (súrlódó-koptató) igénybevétellel egyidejűleg kémiai reakció is fel léphet az alap- és az ellentest között, a köztes anyag vagy a környezet hatására. Bizonyos esetekben a kenőanyag bomlástermékei és/vagy adalékanyagai támadják meg az egymáson elmozduló felületeket.
- ◆ **Kavitációs kopás:** A folyadékokban keletkező turbulens áramlásból vagy a vibrációból származó nyomáscsökkenésből keletkezik, de a folyadékok forrásakor keletkező buborékok is előidézhetik. A szilárd test közelében szétrobbanó buborékok által keltett nyomáscsökkenés hatása hasonló a folyadékok által okozott eróziós kopáshoz, kifáradási folyamat következtében a felület helyi sérülését idézi elő.
- ◆ **Fretting kopás:** A fretting az érintkező szilárd felületek roncsolódási folyamata, mely kismértékű



oszilláló-mozgás hatására bekövetkező mikroszkopikus csúszások, képlékeny alakváltozások és felületi kifáradások eredményeként megy végbe. A vibrációs rezgéseket gyakran kíséri fretting jellegű kopás.

2.16.1 ábra. A kopást befolyásoló tényezők

Igénybevétel	Súrlódó anyagok	Kenőanyag
- Súrlódás	- Mechanikai tulajdonságok	- Folyékony
- Terhelés	- Fizikai tulajdonságok	- Szilárd
	- Kémiai tulajdonságok	- Gáz
- Hőhatás	- Feszültségállapot	- Kenőanyag hiánya

2.16.2 Kopásállóság mérési módszerek

Az anyagok kopásállóságának minősítése

A kopás jellegét és mértékét a triborendszer valamennyi résztvevője befolyásolja, ezért egy anyag kopásállósága önmagában nem jellemezhető, csak etalon anyaghoz képest relatív kopásállóság meghatározásáról lehet szó, illetve a különböző anyagok kopási mérték szerinti sorba állítására nyílik lehetőség. Szigorú feltétel azonban, hogy egy triborendszeren belül csak az összes többi paraméter állandó értéken tartása mellett lehet szó összehasonlításról. Ez egyben azt is jelenti, hogy az anyagok kopásállósága csak kisebb részben anyagtulajdonság, nagyrészt a triborendszertől és az üzemeltetési paraméterektől függ. Tehát a kopásállóság nem az anyag fizikai tulajdonsága, hanem a károsodással szembeni viselkedés a triborendszer paramétereinek függvénye is. Különböző rendszerekben az anyagok relatív kopásállósági sorrendje is különbözhet egymástól. Ugyanez vonatkozik egy-egy anyag különböző hőkezelési állapotára, ill. azzal összefüggő szövetszerkezetére is.

Kopásvizsgálatok szerkezeteken, részegységeken, modelleken és próbatesteken

A kopás káros hatása a berendezések élettartamát jelentősen meghatározó tényező. A fárasztó vizsgálatokhoz hasonlóan a kopás előrehaladása is nyomon követhető különböző szintű vizsgálatokkal, a komplex szerkezet üzemi körülmények közötti vizsgálatától kezdve a próbatesteken végzett modellvizsgálatokig. A többlépcsős egyszerűsítés minden lépcsője változtat valamit a megfigyelt triborendszeren, ezért alig képzelhető el olyan próbatest-modellkoptatás, mely kellő pontossággal modellezné az üzemi viszonyokat.

Kopásvizsgálatok szintjei:

- ◆ üzemi kísérlet;
- ◆ gép laboratóriumi vizsgálata;
- ◆ részegység laboratóriumi vizsgálata;
- ◆ alkatrész vizsgálata;
- ◆ egyszerűsített alkatrész vizsgálata
- ◆ próbatest modell vizsgálata.



A modellvizsgálatokból így nem vonhatók le egyértelmű következtetések az anyagok üzemi viselkedésére nézve. A próbatesteken végzett fárasztóvizsgálatokkal meghatározott kifáradási határ sem alkalmas méretezés alapcéljára. A próbatest-fárasztások eredményei – főleg összehasonlító jelleggel – mégis hasznos támpontot adnak a tervezők számára.

A kopás folyamata jóval bonyolultabb a fáradásos mechanizmusnál, így a koptatómodell-próbatest-vizsgálatok eredményei még nehezebben alkalmazhatók közvetlenül a gyakorlatban. Ennek ellenére a próbatestvizsgálatok alapján tisztázhatók a főbb befolyásoló paraméterek hatásai, és az anyagjellemzők szerepe a különböző kopási mechanizmusokban.

Lokális kopásvizsgálati módszerek:

Golyó-sík elvű tribométerek típusai (fixgolyós, forgógolyós, bolygó-golyós tribométerek)

A tribológiai igénybevételek modellezése során különböző elven működő berendezéseket alkalmaznak. A kopási folyamatban résztvevő anyagpár geometriája lehet sík-sík, henger-henger, gömb-sík stb. A golyó-sík elvű tribométerek különböző típusait széles körben alkalmazzák. Ebben az esetben a koptatógolyó lehet kényszerrel meghajtott kötött pályán mozgó, vagy szabadon mozgó. A koptatógolyó a koptatott darab síkját lokálisan, tehát kráteresen, vagy körpályán tóruszosan koptatja.

Fixgolyós tribométerek:

A koptatógolyót ebben az esetben rögzítik, majd kör pályán mozgatják. A golyó csak a koptatási folyamat kezdetén gömb geometriájú, mert a kopási folyamat során maga is kopik, tehát a gömb „csúcsából” egy gömbsüvegni lekopik. Ezt követően már nem is igazán beszélhetünk gömb-sík elvről, hiszen a két érintkező felület a gömb kopása miatt sík-sík érintkezésre módosul. A koptatógolyó, valamint a koptatott tárcsa felületének érdessége egyaránt jelentősen megváltozik a kopási folyamat során.

Forgógolyós tribométerek:

A forgógolyós tribométerek esetén a gömb-sík elv a kopási folyamat során is értelmezhető, hiszen a koptatógolyó egy főköre mentén érintkezik a koptatott felülettel. Meg kell jegyezni azonban, hogy a koptatógolyó felületi érdessége jelentősen megváltozik a kopási folyamat során. A kopás eredményeként létrejövő kráter a koptatógolyó gömb geometriájának deformálódása miatt törvényszerűen torzult geometriájú lesz, vagyis a kikopott kráter síkmetszetei nem feltétlenül kör, hanem torzult kör, pl. ellipszis alakúak lesznek.

Szabadgolyós tribométerek:

A golyót egy tengely hornyainak érintkező élein keresztül hajtják meg. Mivel a golyó nem rendelkezik direkt hajtással, a golyó forgássebessége bizonytalan (csúszási jelenség léphet fel). A golyó kényszerének biztosítására a behajtó tengelyen gumi elemeket alkalmaznak. A normál erő a próbatestre helyezett golyó tömegéből adódik, mely a próbatest síkszögének módosításával változtatható. A normál erő bizonytalanságának az oka, hogy megváltozik a súrlódás a próbatest és a golyó között, a golyó pillanatnyi állapotának megfelelően. A kereskedelembe kapható berendezések esetében ezt a hibalehetőséget úgy csökkentik, hogy a próbatest tartósíkja alá beépített erőmérő cellával mérik a valós terhelést. A szokásos vizsgálógolyók esetében a legnagyobb alkalmazható normál erő is igen kicsi (kb. 0,4 N).



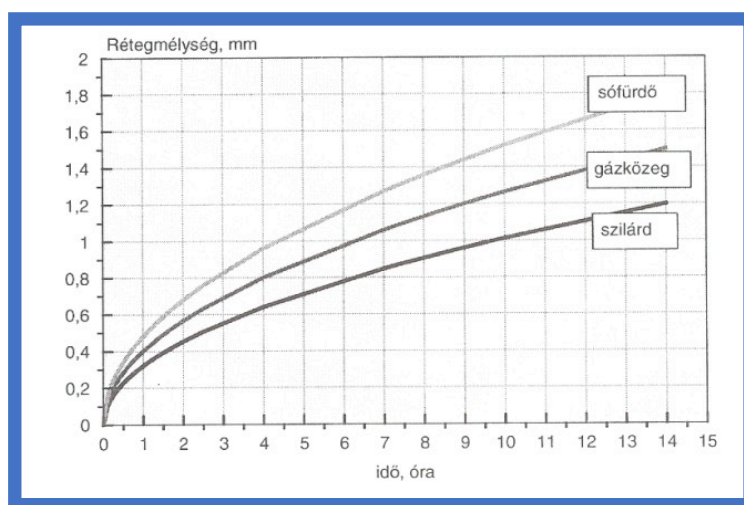
2.16.3 Kopásállóság-javítási módok felületkémiai összetétel-változtatással.

Mivel a keménység és a kopásállóság jó korrelációt mutat, az acélok keménységének növelésének egyik módja, hogy a kémiai összetétel megváltoztatásával, termokémiai hőkezeléssel egy kemény felületi réteget hoznak létre. A gyakorlatban alkalmazott eljárások általában a betétedzés, nitridálás, karbonitridálás, boridálást.

Betétedzés

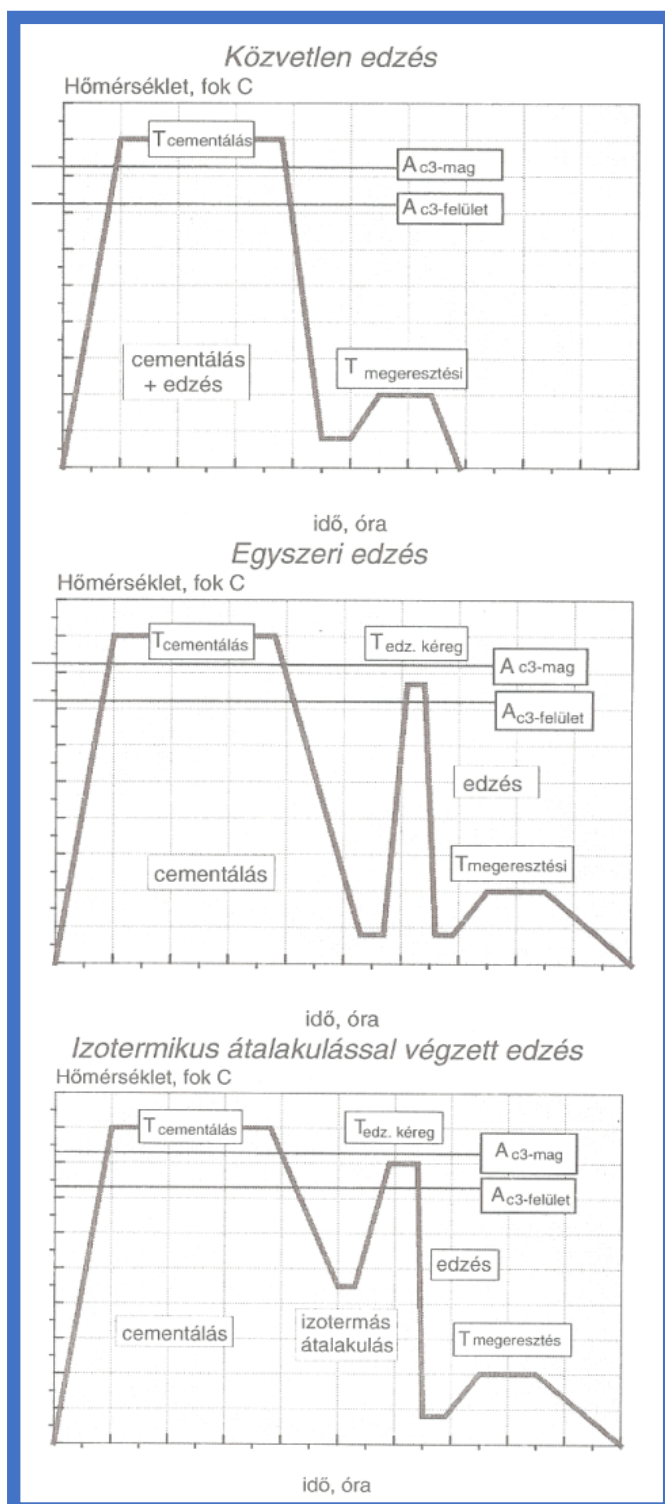
- ◆ Legszélesebb körben alkalmazott felületötvöző hőkezelés, mely során kis karbontartalmú acél kérgébe karbon diffundál. Ezt követően a cementált darabot megedzik.
- ◆ A betétedzés = cementálás + edzés.
- ◆ A cementálás során az alkatrészt karbon leadó közegben 900-940°C-on izzítjuk. Kizárólag olyan hőmérsékleten hajtható végre, ahol a cementálandó acél ausztenites szerkezetű.
- ◆ A diffúzió sebessége a hőmérséklet növelésével jelentősen gyorsul.
- ◆ A cementáló közeg lehet szilárd-, folyékony- vagy gőz-halmazállapotú.

2.16.2. ábra. Cementálással elérhető rétegvastagság a cementáló közeg és a cementálási idő függvényében



Cementált alkatrészeket edzeni kell, hogy a kb. 0,8% karbontartalomra dúsult réteg a kívánt keménységet és kopásállóságot elérje. Gáz- vagy folyadékállapotú közegben végzett cemenetálásnál az edzés végrehajtható közvetlenül a betétedzés hőmérsékletéről vagy 840-860°C-ra való visszahűtés után olajhűtéssel. A betétedzés utolsó hőkezelési művelete a megeresztés, melyet általában 160–200°C-on hajtanak végre feszültségcsökkenés ill. maradék-auszenit átalakulása céljából. Betétben edzhető acélokat legnagyobb mennyiségben a gépgyártó- járműipar használ fel. A betétedzést leginkább fogaske-rekek, tengelyek, hajtókarok, kerekek, csuklók, fűrőlapok, tengelycsapok, csapágyerselyek, gömbcsa-págy gyártásakor alkalmazzák.

2.16.3. ábra. Cementálás-hőkezelés típusai hőmérséklet idő-diagramja



Nitridálás, karbonitridálás

Nitridáláskor az acél vékony felületi rétegébe nitrogén, karbonitridáláskor pedig ezzel egyidejűleg karbon is diffundál folyékony vagy gáznemű nitrogént leadó közegből. Napjainkban a nitridálást leginkább gázközegben, ammóniában végzik. 500–600°C-os hőmérsékleten, hosszú 10–90 órás gáznitridálás alatt a nitrogén mintegy 0,2–0,8 mm mélységig képes diffundálni. A nitridált kéreg vastagsága elsősorban a nitridálás hőmérsékletétől függ. A nitridálás, illetve a karbonitridálás előtt a mag megkívánt tulajdonságainak eléréséhez az acélt előzetesen hőkezelti kell. A hőkezelés célja a teljes keresztmetszetben finomszemcsés szövetszerkezet előállítása, szívóssági tulajdonságokat javítja, kedvezőbbé teszi a diffúzió feltételeit. A nitridálás, illetve karbonitridálás után a munkadarabot 180–200°C-os hőmérsékletig a kemencével együtt hűtik le, csökkentve ezzel a termikus feszültségeket. Erről a hőmérsékletről már levegőn hűl a darab. Valamennyi acél, az öntöttvasak, sőt más fémek is nitridálhatók. Gyakran nitridálják a szerszámacélokat, de nitridálnak nemesíthető korrózióálló acélokat is. A nitridálást azonban jellemzően a nemesíthető szerkezeti acéloknál alkalmazzák.

A különböző kérgesítő eljárások sok esetben egymással helyettesíthetők. A felületi edzéssel, betétedzéssel és nitridálással létrehozott kéreg jellemzőit az alábbi diagram foglalja össze.

2.16.4. ábra. Adott kérgesítő eljárásokkal elérhető eredmények

Tulajdonság	Kérgesítő eljárás		
	betétedzés	kéregedzés	nitridálás
Keménység, HV	670...800	500...800	600...1100
HV 610 érték felülettől mért távolsága, mm	0.4...1.5	0.5...10	0.1...0.5
Dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállás	nagy	közepes	kicsi
Vetemedés	nagy	mérsékelt	kicsi
Keménység csökkenés kezdeti hőmérséklete, °C	150	150	400

Lézeres felületi ötvözés

Ennek során célszerűen megválasztott összetételű porral vagy vékony réteggel fedett szubsztrátumot lézerrel kezelik. Ennek hatására megolvad a por vagy vékonyréteg, valamint a szubsztrátum felületi rétege is, felületi ötvözőréteg képződését eredményezve.

2.16.4. Kémiai összetétel változtatás nélkül

A kémiai összetétel nélküli felület keményítő hőkezelések a felületi edzések. A gyakorlatban a felületedzést, vagyis a felület megfelelő rétegvastagságban történő A3 hőmérséklet feletti izzítását majd gyors hűtését különböző módon lehet megvalósítani.

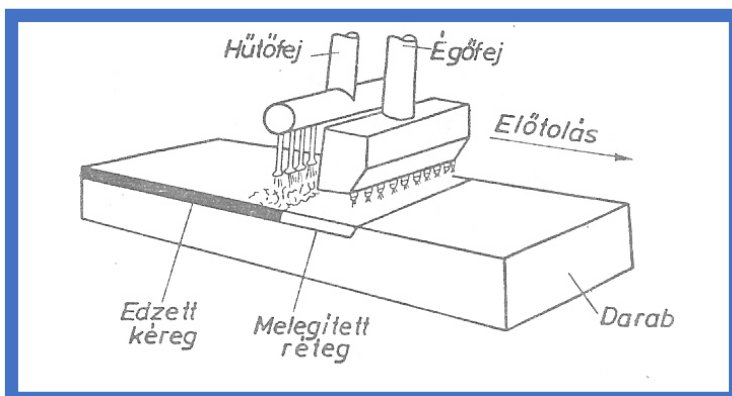
Lángedzés

Edzhető acélokból ($C > 0,25\%$) készült munkadarabok kopási tulajdonságjavítását célozza.

Keménység elsősorban a C%-tól függ. A rétegvastagság: acél vegyi összetételétől, az előzetes hidegen alakított szövetszerkezettől, alkalmazott technológiától függ. Lángedzési eljárások: szakaszos lángedzés és a folyamatos lángedzés melyek alkalmasak gépi, egyedi- és sorozatgyártásra is.



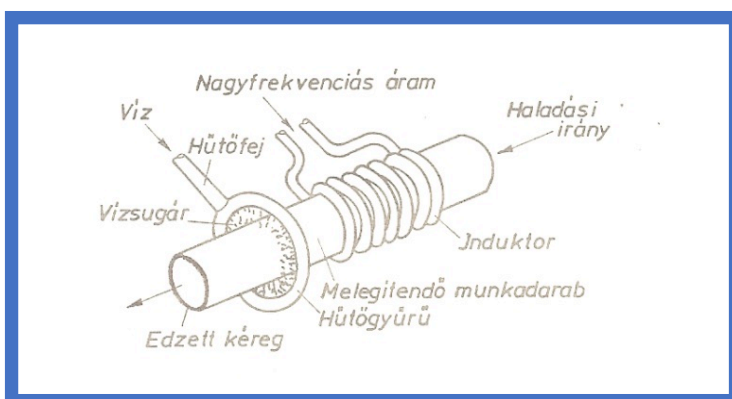
2.16.6. ábra. Lángedzés elvi ábra



Indukciós edzés

Célja gépelemek vagy szerszámok felületi keménységének, és ezáltal a kopásállóságnak, kifáradási határának növelése. Edzett kéreg keménysége: az acél C%-tól, az edzés technológiájától, és a megeresztés körülményeitől függ. Indukciós edzési eljárások: álló edzés és előtolásos edzés. Mindkét technológia végezhető a munkadarab forgatásával, vagy anélkül.

2.16.7. ábra. Indukciós felületedzés elvi ábra



Lézeres felületedzés

A lézeres felületedzés során az anyag felületét lézerrel kezelik oly módon, hogy az ne olvadjon meg, ugyanakkor a hőhatásra a felületi rétegben, pl. vasötvözet esetén, martenzites szerkezet alakuljon ki. Ennek hatására megnő a felületi réteg kopásállósága és csökken a kifáradási hajlama.

2.16.5. Védőréteg felvitellel

A felületre különböző vékony rétegeket vihetünk fel, ezzel növelve a kopásállóságot. Ilyen módszerek a PVD, CVD valamint a felületszórás technológiák.



Fizikai gőzfázisú leválasztás (PVD)

A PVD eljárás során a szilárd forrásanyagot párologtatással vagy porlasztással alkotóira bontva a gőztérbe viszik, és leválasztják a bevonni kívánt munkadarabra. A különböző PVD-módszerekkel leválasztott rétegek szerkezetét számos tényező befolyásolja pl: hőmérséklet, lonbombázással aktivált rétegnövesztés, szennyezők jelenléte.

Eljárásváltozatok:

- ◆ Vákuumpárologtatás.
- ◆ Lézerablációs párologtatás.
- ◆ Porlasztásos módszerek.
- ◆ Ionos bevonatolás.
- ◆ Ionsugárral aktivált leválasztás.

Kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD)

A kémiai gőzfázisú leválasztásos módszerek alkalmazása során illékony, gőzfázisba, ill. gázfázisba vitt anyagokból valamilyen kémiai reakcióval választják le a hordozó felületére a rétegépítő anyagot. A kémiai reakció típusai: termikus bomlás, termokémiai leválasztás, atomi rétegleválasztás. A CVD-módszer fontos jellemzője, hogy alkalmas a folyamatosan változó összetételű anyagok és rétegszerkezetek növesztésére. A CVD főbb alkalmazási területei: védőréteggialakítás korrózió és mechanikai hatások ellen ill. dekoratív réteggialakítás.

CVD eljárásváltozatok:

- ◆ Termikus CVD.
- ◆ Plazmával aktivált CVD.
- ◆ Lézerrel aktivált CVD.

Termikus szórások

Nem gázfázisból történő leválasztási módszer. Az elnevezés egy módszer családot jelöl, melynek tagjaira jellemző, hogy az anyag (fém, kerámia, fém-kerámia) porszemcséit az olvadáspont közelébe, vagy fölé hevítik, valamilyen módon felgyorsítják, és a megolvadt cseppeket, vagy majdnem megolvadt cseppeket a bevonandó felületre irányítják.

Termikus szórási módszerek:

Lángszórás: A lángszórás fémes és nem fémes anyagok felületi réteggel való bevonására használható. A szórásra használt anyagot (mely lehet: huzal, por) az acetilén-oxigén láng megolvasztja, ami sűrített levegővel vagy más gázzal az előkészített munkadarab felületére sodródik. Az acetilén-oxigén láng nagy hőmérséklete lehetővé teszi azt is, hogy a nagy hőmérsékleten olvadó anyagok (mint pl. a molibdén) szórhatók legyenek. A lánggal szórt rétegek a technika valamennyi területén jól beváltak, pl.: kopásvédő vagy korrózióvédő rétegekként, vagy gépelemek javításához.

Plazmaszórás: Széles körben alkalmazott eljárás. Plazmában keletkező pozitív és negatív ionok, gyökök, gerjesztett részecskék, elektronok fotonok hatnak kölcsönösen a szilárdtestek felületével. Alkalmazható vas, és acél valamint különféle színesfémek nitridálása, karbidizálása terén, keménység vagy a nyújthatóság előnyös megváltoztatása céljából.



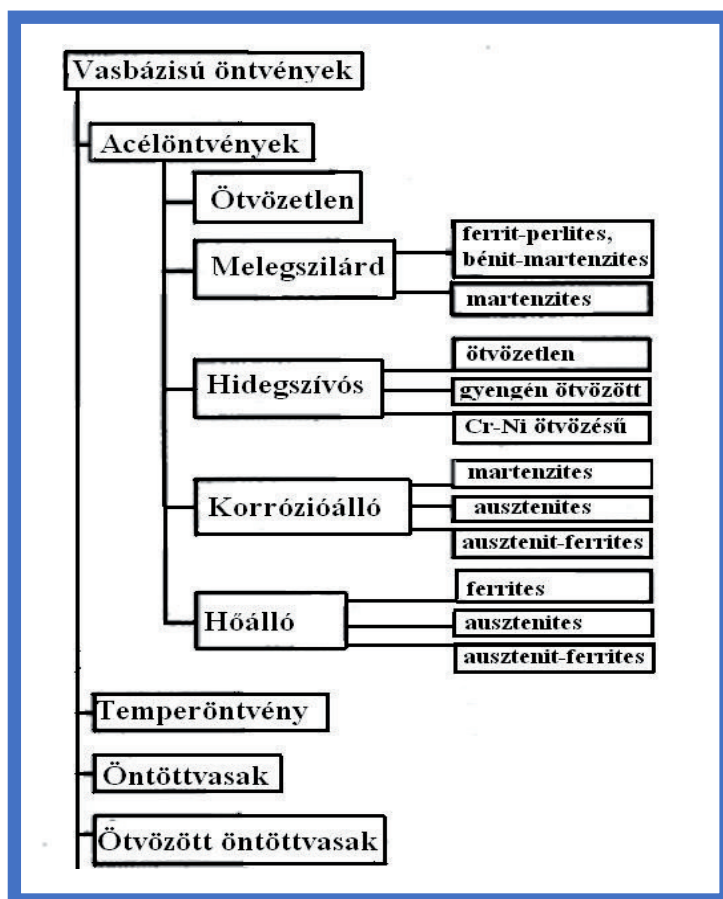
Lézeres fényezés: vagy zománcozás során lézerrel megolvasszják az anyag felületi rétegét, amely ezt követően gyorsan lehűtve újra megszilárdul. Összetétel nem változik, a felületi réteg szerkezete azonban igen, pl.: fém esetén amorf vagy mikrokristályos felületi fázis képződhet, amely javíthatja a felület kopás-, vagy korrózióállóságát, vagy csökkentheti a kifáradási hajlamát.

Lézeres felületi bevonatolás: vagy ráolvasztás, vagy felrakás hasonlít a lézeres felületi ötvözésre. A különbség az, hogy úgy végzik az eljárást, hogy a szubsztrátumból minél kevesebb olvadjon meg, tehát az minél kevésbé hígítsa a kialakuló bevonatot.

2.17 ÖNTÖTT VASAK ÉS ÖNTÖTT ACÉLOK HEGESZTÉSE

A vasötvözeteket a széntartalmuk alapján acélokra és öntött vasakra bontjuk. A $C < 2,06\%$ széntartalmú vasötvözetek az acélok, az ennél nagyobb széntartalmúak az öntöttvasak.

2.17.1. ábra. Vasalapú öntvény-ötvözetek



2.17.2 Acélöntvények csoportosítása és hegesztése

Az acélöntvényekről a következő szabványok rendelkeznek:

- ◆ MSZ EN 10293:2015 Acélöntvények. Acélöntvények általános felhasználásra
- ◆ MSZ EN 10340:2008 Acélöntvények szerkezeti célra
- ◆ MSZ EN 10349:2010 Acélöntvények. Öntvények ausztenites mangánacélból

Acélöntvények jelölésrendszere nagyon hasonló az acélok jelölésrendszeréhez. Az ötvözetlen, általános rendeltetésű acélöntvényeknél az első karakter G majd ezt követően a felhasználásra vonatkozó jelölés az acélok jelölésének megfelelően (S szerkezeti, E gépacél, stb) majd a garantált folyáshatár egésze kerekítve (MPa). Az ötvözt acélöntvények jelölésében már a kémiai összetételre vonatkozó információk is megjelennek az acél jelöléshez hasonlóan. Ha valamelyik ötvöző eléri az 5%-ot akkor a jelölésben a G után az erősen ötvözt acélokhöz hasonlóan X jelölést kell alkalmazni, majd ezt követően az átlagos széntartalom százszorosa egésze kerekítve és a fő ötvöző elemek vegyjele és mennyisége található. Néhány példa a jelölésre a 2.17.2. ábrán. Az acélöntvények esetében is alkalmazott a számjelölés, felépítése azonos az acélokéval.

2.17.2. ábra. Az acélöntvények jelöle példákkal

Acél jelölés	Szám- jel	Kémiai összetétel tömeg %										
		C	Simax	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Ni	V	W	
Általános rendeltetésű acélöntvények												
GE200	1.042	–	–	–	0,035	0,03	–	–	–	–	–	Gép- acél
GS200	1.0449	0,18 max	0,60	1,2 max	0,030	0,025	–	–	–	–	–	Szerke- zeti acél
GE240	1.0446	–	–	–	0,035	0,03	–	–	–	–	–	Gép- acél
Ötvözt acélöntvények												
G15Cr- MoV6-9	1.7710	0,12- 0,18	0,60	0,6- 1,0	0,025	0,02	1,3- 1,8	0,8- 1,0	–	0,15- 0,25	–	
G17Cr- Mo5-5	1.7357	0,15- 0,20	0,60	0,5- 1,0	0,025	0,02	1,0- 1,5	0,45- 0,65	–	–	–	
Erősen ötvözt acélöntvények												
GX4CrNi- Mo16-5-1	1.4405	0,06 max	0,80	1,00 max	0,035	0,025	15,0- 17,0	0,70- 1,5	4,0- 6,0	–	–	Marten- zites korró- zióálló acél
GX23Cr- MoV12-1	1.4931	0,2- 0,26	0,40	0,5 -0,80	0,030	0,02	11,3- 12,2	1,0- 1,2	1,0 max	0,25- 0,35	0,5	Kúszás- álló acél

Acélöntvények gyárthatók a 2.17.1. ábra szerinti acélminőségekből. Ebből látható, hogy gyakorlatilag minden acélminőség alkalmas öntészeti feldolgozásra is. Az ötvöztlen acélöntvények hegesztése előtt célszerű az öntvényeket normalizálni. Ha a mértékadó falvastagság nem haladja meg a 20 mm-t, a



normalizálás helyett alkalmazható feszültségcsökkentő izzítás. Előmelegítésre csak akkor van szükség, ha a darab vastagsága igen eltérő, vagy meghaladja a 25 mm-t. A 25 mm-nél nagyobb falvastagságú öntvényeknél jelentős a zsugorodásból ébredő, háromtengelyű belső feszültségek ridegítő hatása. Az előmelegítés során a felhevítés sebessége ne haladja meg a 100°C/óra értéket. Az előmelegítés szükségességét, illetve annak hőmérsékletét a CE karbonegyenérték szerint kell meghatározni.

A ferrit-perlites, bénit-martenzites, melegsziárd acélöntvények hegesztése előtt célszerű az öntvényeket normalizálni. Ha a mértékadó falvastagság nem haladja meg a G20Mo₅ minőségű acélöntvény esetén a 20 mm-et, a normalizálás helyett esetleg feszültségcsökkentő izzítás is elegendő. Előmelegítésre csak akkor van szükség, ha a darab vastagsága igen eltérő vagy meghaladja a 25 mm-t. A 25 mm-nél nagyobb falvastagságú öntvényeknél jelentős a zsugorodásból ébredő háromtengelyű belső feszültségek ridegítő hatása. Ezért az öntvény tagoltsága, a tényleges vegyi összetétel, az alkalmazott hegesztési technológia hőbevitelének és koncentráltságának függvényében az előmelegítési hőmérsékletet 150~300°C tartományban kell előírni. A vanádiummal ötvözött típusok előmelegítési hőmérsékletét inkább a megadott tartomány felső határához közelebb kell választani. Az előmelegítés során a felhevítés sebessége ne haladja meg a 100°C/óra értéket.

A martenzites, melegsziárd acélöntvények hegesztésére azonos vagy eltérő összetételű öntött/hengerelt/kovácsolt termékek összehegesztésekor, illetve az öntvényhibák javítása kapcsán kerül sor. A hőálló acélöntvények hegesztésekor az edződési repedés és az alakváltozás, valamint a szívósság számottevő csökkenésének kockázatával kell számolni. Ezek a kockázatok a hegesztéskori előmelegítés és az ezt követő hőkezelés együttes alkalmazásával kerülhetők el. A GX8CrNi12 és GX4CrNi13-4 típusú ötvözetek minimális előmelegítési hőmérséklete 100°C, amelyet az öntvény tagoltságától, vastagságától függően akár 200°C-ig kell emelni. Több sorban végzett hegesztéskor a közbenső sorok minimális hőmérséklete legalább az előmelegítés hőmérséklete, maximális hőmérséklete pedig 300~350 °C legyen.

A GX23CrMoV12-1 típusú ötvözet minimális előmelegítési hőmérséklete 200°C, amelyet az öntvény tagoltságától, vastagságától függően akár 400°C-ig kell emelni. Több sorban végzett hegesztéskor a közbenső minimális hőmérséklete legalább az előmelegítés hőmérséklet, maximális hőmérséklete pedig 450°C legyen. Lényeges, hogy a megeresztő hőkezelésre a hegesztett kötés 80~130 °C-ra való visszahűlése után kerüljön sor. A GX4CrNiMo16-5-1 típusú ötvözetet nem szükséges előmelegíteni.

A hidegszívós, ötvözetlen acélöntvények hegesztése előtt célszerű az öntvényeket normalizálni. Ha a mértékadó falvastagság nem haladja meg a 20 mm-t, a normalizálás helyett esetleg feszültségcsökkentő izzítás is elegendő. Előmelegítésre csak akkor van szükség, ha a darab vastagsága igen eltérő vagy meghaladja a 25 mm-t. A 25 mm-nél nagyobb falvastagságú öntvényeknél jelentős a zsugorodásból ébredő háromtengelyű belső feszültségek ridegítő hatása. Az előmelegítés legnagyobb hőmérséklete 150°C, a felhevítés sebessége ne haladja meg a 100°C/óra értéket. Természetesen a hidegszívós, molibdénnel/nikkellel kissé ötvözött acélöntvények hegesztése előtt célszerű az öntvényeket normalizálni és előmelegíteni. Az előmelegítés legnagyobb hőmérséklete 200°C. A sorok közötti hőmérséklet ne haladja meg a 350°C-t. Ezeket az acélokat a hegesztés után meg kell eresztetni az összetételtől függően 590~730°C hőmérsékleten.

A króm-nikkel ötvözetű, hidegszívós acélöntvények hegesztése előtt célszerű az öntvényeket normalizálni. Az előmelegítés legnagyobb hőmérséklete 200°C.



2.17.2 Öntött vasak jelölése

Az öntöttvasak anyagminőségére a következő szabványok vonatkoznak:

- ◆ MSZ EN 1561:2012 Öntészet. Lemezgrafitos öntött vas
- ◆ MSZ EN 1562:2012 Öntészet. Tempervas
- ◆ MSZ EN 1563:2012 Öntészet. Gömbgrafitos öntött vas

Az öntött vasak jelölésrendszerét az MSZ EN 1563:2011 tartalmazza.

Az öntött vas jelölésben első helyen az EN jelölés található, majd a következő helyen GJ (öntöttvas) jelzés található. Harmadik helyen az öntött vasban jelenlévő grafit alakja szerinti jelet tüntetjük fel a következő szerint:

2.17.1. táblázat. Öntött vasak jelölésrendszere, grafit alak

Grafit alakja	Grafit alak jelölése
Lemez	L
Gömb	S
Temperszén	M
Vermikuláris	V
Grafitmentes	N
Különleges grafit	Y

Negyedik helyen az öntött vas szövetszerkezetére utaló jelölés található a következő szerint:

2.17.2. táblázat. Öntött vasak jelölésrendszere, szövetszerkezet

Szövetszerkezet	Szövetszerkezet jelölése
Ausztenit	A
Ferrit	F
Perlit	P
Martenzit	M
Ledeburit	L
Edzett	Q
Nemesített	T
Fekete temper	B
Fehér temper	W



Az ötödik helyen a mechanikai tulajdonságok vagy a vegyi összetételre vonatkozó jelzés található:

2.17.3. táblázat. Öntött vasak jelölésrendszere, mechanikai tulajdonságok

Mechanikai tulajdonságok		Vegyi összetétel	
Tulajdonság	Jel	Jellemző	Jel
R _m , MPa	pl. 350	Vegyi összetétel	X
A, %	pl. 18	C%·100	pl. 300
Próbatest készítés, külön öntött	S	Ötvöző vegyjele	pl. Cr
Próbatest-készítés, hozzáöntött	U	Ötvöző tartalom	pl. 2-3-2
Próbatest-készítés, kivett	C		
HB	pl. HB155		
KV mérés hőmérséklete, szobahőmérséklet	RT		
KV mérés hőmérséklete, alacsony hőmérséklet	LT		

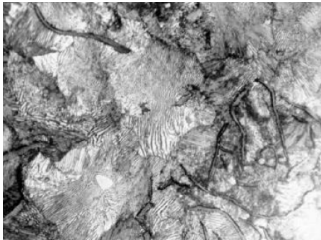
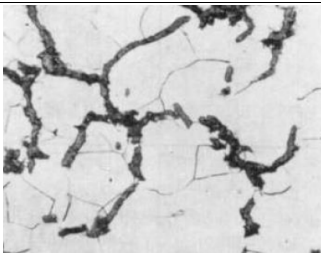
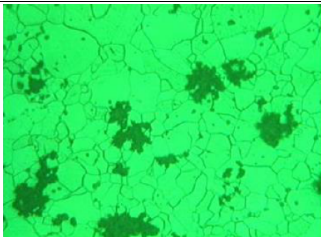
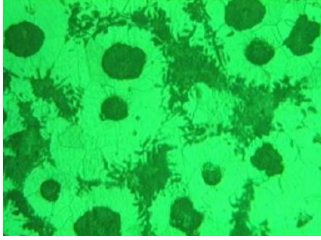
Hatodik helyen, a kiegészítő információk találhatóak a következők szerint:

2.17.4. táblázat. Öntött vasak jelölésrendszere, kiegészítő információk

Kiegészítő jellemző	Jel
Nyers öntvény	D
Hőkezelt öntvény	H
Hegeszthető	W
Kiegészítő követelmény	Z



2.17.5. táblázat. A jelölésrendszer alapján néhány példa:

Öntöttvas jelölése	Leírása	Szövetszerkezete
EN-GJLP-200	Lemezgrafitos, perlités, $R_m=200$ MPa	
EN-GJLF-HB195	Lemezgrafitos, ferrites, 195 HB	
EN-GJMB-350-10	Temperszén, Fekete temperöntvény $R_m=350$ MPa, $A_{min}=10\%$	
EN-GJS-400-18U-LT	Gömbgrafit, $R_m=400$ MPa $A_{min}=18\%$, Hozzáöntött próbatest, alacsony hőmérsékletű alkalmazáshoz	

2.17.3 Grafitos öntöttvasak csoportosítása

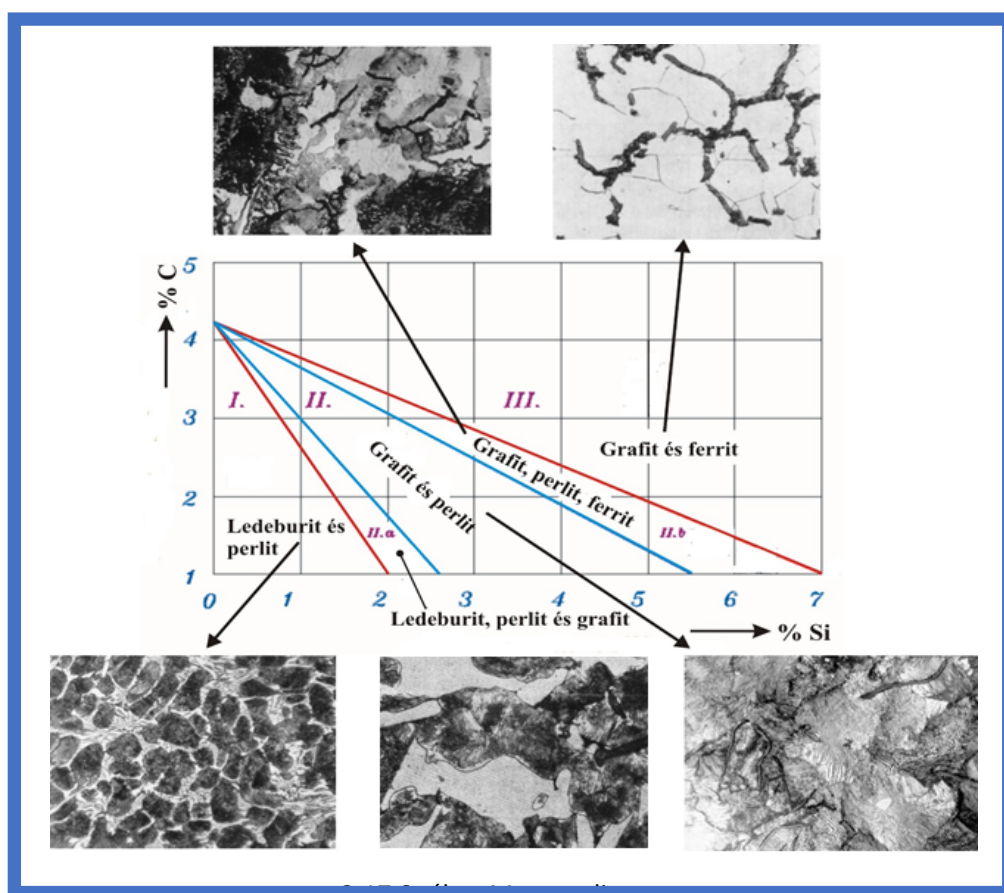
Öntöttvasaknak nevezzük azokat a vasötvözeteket, amelyek karbon tartalma meghaladja a 2,06%-ot. A vas-vaskarbid egyensúlyi rendszerben kristályosodnak a fehér öntöttvasak (cementit- Fe_3C tartalmazznak, töretük fehér), a vas-grafit egyensúlyi rendszerben pedig a szürke öntöttvasak (grafitot tartalmazznak, töretük szürkés színű). Eutektikus ($C=4,26\%$) szürke öntöttvas tisztán grafit eutektikumként kristályosodik és szobahőmérsékleten a fentebb leírtakat figyelembe véve: grafit eutektikum. Hipereutektikus ($C>4,3\%$) szürke öntöttvasban a kristályosodás nagyméretű primer grafit lemezek kialakulásával kezdődik, amelyet a grafit eutektikum kialakulása követ. Szobahőmérsékleten az ötvözet szövetszerkezete primer grafit + grafit eutektikum. A gyakorlati öntöttvasak karbonon kívül más elemeket is tartalmaznak (pl., Si, P, S, Mn.), amelyek csökkentik az eutektikus összetétel karbon tartalmát. Az ötvözetek mechanikai tulajdonságait a primer cementit, illetve grafit rendkívül lerontják, ezek képződését el kell kerülni. Ezért az öntöttvasakra ún. telítési számot (T) írnak elő, amely a tényleges karbon tartalom és a korrigált eutektikus karbon tartalom hányadosa:

$$T = \frac{C}{C_{eut}} = \frac{C}{4,2 - \frac{Si}{3,2} - \frac{P}{3}}$$

A fenti összefüggésben a C, Si és P értékei %-ban értendők. Ha $T < 1$ hipoeutektikus, ha $T = 1$ eutektikus és ha $T > 1$, akkor pedig hipereutektikus kristályosodásról van szó. A jó önthetőség és a káros primerfázisok elkerülése érdekében $T = 0,9$ körüli érték előírása célszerű.

A szénttartalom, valamint a szilíciumtartalom függvényében kialakuló szövetszerkezete a Maurer-diagram foglalja össze.

2.17.3. ábra. Maurer-diagram



A grafit elemi szén, amely egyszerű hexagonális rendszerben kristályosodik, gyakorlatilag nincs szilárdsága és keménysége. Attól függően, hogy a grafitot milyen alakban és mennyiségben tartalmazza az öntöttvas, a tulajdonságai különbözők. Az ilyen öntöttvasakat szürkevasnak nevezik. Az öntöttvas szilárdsága kicsi, de a grafitlemezek finomításával vagy a lemezes grafit gömbösítésével növelhető. A grafitos rendszerben való kristályosodás függ a lehűlés sebességétől és a jelenlévő ötvözőktől. Lassú hűléskor a szén grafitként, gyors hűléskor Fe_3C (cementit) formájában van jelen. Ez utóbbi esetben a töret fehér színe miatt az öntöttvasat fehérvasnak is hívjuk. A lemezgrafitos öntöttvas minőségjelzésében szereplő szám (pl. Öv. 300) a legkisebb szakítószilárdságra utal. A nagyobb szilárdságú öntöttvasban a grafitlemezek mérete kisebb, eloszlásuk egyenletes (modifikált öntöttvas).

2.17.6. táblázat. Az öntöttvasak anyagcsoportjai

Anyagcsoport	Az öntöttvas típusa
71	Szürkeöntvények előírt folyáshatárral vagy Brinell-keménységgel
72	Gömbgrafitos öntöttvasak előírt mechanikai tulajdonságokkal
73	Tempervasak
74	Auszténites képlékeny öntöttvasak
75	Auszténites öntöttvasak
76	71...75 csoportba nem tartozó öntöttvasak

A gömbgrafitos öntöttvasban a grafit gömb alakú, kisebb mértékben szakítja meg a fémes folytonosságot, bemetsző hatása kisebb. A grafit mennyisége széles határok között változhat anélkül, hogy a tulajdonságai lényegesen megváltoznának. A gömbgrafitos öntöttvas edzhető, felületi edzéssel kérgesíthető, a nagy szívósság és ezzel egyidejű nagy szilárdság elérésére nemesíthető.

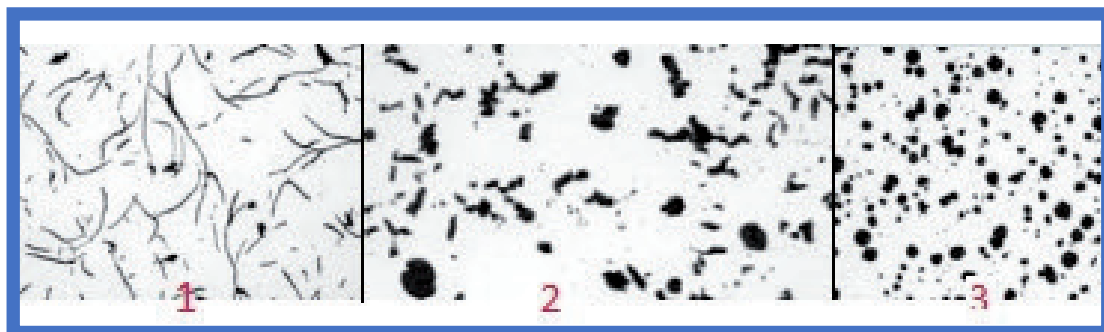
A lemez-, ill. a gömbgrafitos szürkeöntvények hegesztésekor a következőkre kell ügyelni: az öntvények megömlése gyakran egyetlen hőmérsékleten vagy kis hőmérséklet-tartományban megy végbe, ezért nehéz az ömlesztést irányítani, az öntvények nyúlása kisebb, mint az acélé (A5= 0~17%), öntött állapotában rideg, így a hegesztéskor keletkező belső feszültségeket nem képes képlékeny alakváltozással kiegyenlíteni, az öntvény hegesztés utáni gyors hűlése karbidos szövetszerkezetet eredményez, és ekkor az öntöttvas alakváltozásra nem vagy alig képes; ezért gyakran csak előmelegítés mellett hegeszthetők.

Vermikuláris grafitos öntöttvasak:

Az alacsony Mg-tartalmú gömbgrafitos öntöttvasak esetén ún. vermikuláris grafitalak jön létre a teljes gömbös alak helyett, mely átmeneti tulajdonságú öntöttvasat eredményez.

A 2.17.4. ábra szerint a grafit gömböcskék lemezek közötti (1), kukacszerű (2) vagy gömbgrafit közötti (3) megjelenésű

2.17.4. ábra. Vermikuláris öntöttvas



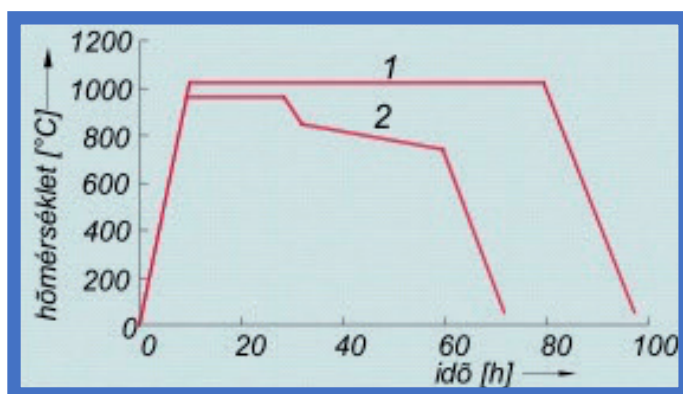
2.17.4 Fekete és fehér temperöntvények tulajdonságai és hegeszthetőségük

A metastabil rendszer szerint kristályosodott öntöttvasak szövetszerkezetét és ezzel mechanikai tulajdonságát, valamint hegeszthetőségét hőkezeléssel módosíthatjuk, ez a hőkezelés a temperálás.

Fehér temperöntvény hőkezelése: Oxidáló atmoszférában (CO/CO₂), 930–1050°C-on (40–80 óra). Eredmény a szén diffúzióval eltávozik az öntvényből ezzel a széntartalom akár az acél széntartalmának megfelelő értékre csökkenhet.

Fekete temperöntvény hőkezelése: Semleges atmoszférában 1050°C-on (18–240 óra). Eredmény, hogy a vaskarbid átalakul, temperszén képződik, mely a grafitos öntöttvas tulajdonságaihoz hasonlít.

2.17.5. ábra. Öntöttvasak temperálása



2.17.5 Hegesztőanyag-kiválasztás

Öntöttvasak hegesztési problémái:

- ◆ Az alapanyag kis alakváltozó képessége és szilárdsága,
- ◆ a kötésben ébredő feszültségek,
- ◆ a gyors hűléskor kialakuló rideg fázisok (cementit, martenzit),
- ◆ az ömledék kis hőközből való dermedése, a mérsékelt zsugorodás (1,1...1,4%).

Munkadarab előkészítése:

- ◆ felületi szennyeződések eltávolítása,
- ◆ hibás hely kimunkálása (felületi és egyéb hibák),
- ◆ a repedések végeinek kifúrása, kifaragása,
- ◆ a repedések és szennyezők eltávolítása gyökfaragással
- ◆ az edződött zónák eltávolítása köszörüléssel
- ◆ átszakadt falak acéllemezzel való pótlása,
- ◆ az ömledék esetleges megtámasztása (grafit- vagy szénlapokkal),
- ◆ az éles sarkok lekerekítése
- ◆ repedésmentesség ellenőrzése festékdifúziós vizsgálattal
- ◆ gondos tisztítás/zsírtalanítás

Öntöttvasak gázhegesztése

Jellemzők:

- ◆ oxidok oldásához és salakba viteléhez folyósítószer szükséges (lúgos szóda, savas borax vagy bórsav),
- ◆ semleges vagy enyhén redukáló láng,
- ◆ kis hegfürdő képzése balra hegesztéssel,
- ◆ előmelegítés és hegesztés utáni lassú lehűtés.

Hozaganyag-acélok gázhegesztéséhez:

- ◆ A hegesztőpálca közelítő összetétele: C=3~4%, Si=2,5~3,5% (esetenként gyengén ötvözve Ni, Ti, V, Cu és Mo-nel).
- ◆ Méretei: Ø 4~5 mm-nél, l= kb. 600 mm
- ◆ Ø 6~16 mm-nél, l= kb. 800 mm
- ◆ Jelölése: FeC-1

Öntöttvasak bevont elektródás ívhegesztése

Előnyei:

- ◆ gyors javítási módszer,
- ◆ a munkadarabot nem kell kiserelni,
- ◆ gyakorlatilag nincs elhúzóadás.

Alkalmazása:

- ◆ elhúzóadás-érzékeny daraboknál,
- ◆ nagyméretű, készre munkált daraboknál,
- ◆ alakváltozásban akadályozott helyeken.

Hideghegesztés előkészítése

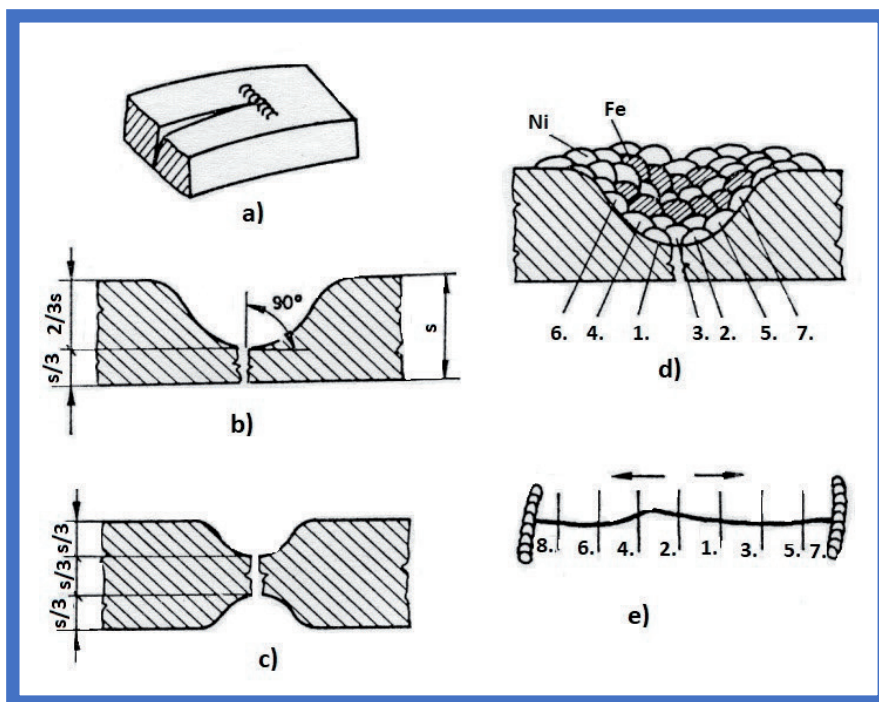
- a) A repedés lezárása varrattal,
- b) és c) öntvények előkészítése,
- d) feltöltés Ni és Fe elektródával,
- e) hegesztési sorrend.



Hideghegesztés, vagyis előmelegítés nélküli hegesztés

Alkalmazása javasolt, ha a hegesztendő darab tágulásában akadályozott.

2.17.6. ábra. Öntöttvasak hideghegesztése a repedés teljes eltávolítása nélkül



Alkalmazása:

- ◆ elhúzóerő-érzékeny daraboknál,
- ◆ nagyméretű, készre munkált daraboknál,
- ◆ alakváltozásban akadályozott helyeken.
- ◆ 25 mm-ig nem szükséges előmelegítés, fölötté javasolt 200...250°C-ra (GJL-nél), ill. 250...300°C-ra (GJS-nél),
- ◆ javításkor az első réteget levegőn le kell hűteni kb. 50°C-ra (jobb kötés, porozitás és mikrorepedés mentes kötés),
- ◆ húzott, keskeny rövid szakaszokban (10...30 mm), a még gazdaságos legkisebb átmérővel, kis hőbevitellel,
- ◆ a lerakott varratszakaszt vörös izzó állapotában nem hegyes végű kalapáccsal kell kalapálni (nyomófeszültség bevitelle),
- ◆ tömítési igény esetén a gyököt és a varrat széleit nikkelbázisú elektródával kell hegeszteni,
- ◆ a nikkel vagy nikkelbázisú hozaganyag használata (hőtágulása kevésbé tér el az öntöttvasétól).
- ◆ javításkor az első réteget levegőn le kell hűteni kb. 50°C-ra (jobb kötés, porozitás és mikrorepedés-mentes kötés),

- ◆ húzott, keskeny rövid szakaszokban (10...30 mm), a még gazdaságos legkisebb átmérővel, kis hőbevitellel,
- ◆ a lerakott varratszakaszt vörös izzó állapotában nem hegyes végű kalapáccsal kell kalapálni (nyomófeszültség bevitelle),
- ◆ tömítési igény esetén a gyököt és a varrat széleit nikkelbázisú elektródával kell hegeszteni,
- ◆ a nikkel vagy nikkelbázisú hozaganyag használata (hőtágulása kevésbé tér el az öntöttvasétól).

Nikkel elektróda

Bázikus-grafitos bevonatú, öntöttvasak hideghegesztéséhez.

Repedésre nem érzékeny. Alkalmazás: kis- ill. közepes méretű lemez- és gömbgrafitos öntvény, temperöntvény hideg kötő- és felrakó hegesztéséhez, olajjal átitatott öntvények javítására. Felhasználási területek: hengerblokk, hengerfej, olaj- és vízszivattyú, olajteknő, tolattyú- és hajtóműház, excenter tárcsa, futógörgő, dugattyú, siklófelületek stb.

Alkalmazásának előnyei:

- ◆ az öntöttvasból C-t vehet fel anélkül, hogy kemény, rideg lenne,
- ◆ a heganyag hőtágulási együtthatója közel van az öntöttvaséhoz ($\alpha = 11...12 \cdot 10^{-6} \text{ o C}^{-1}$),
- ◆ a kis hőbevitel által keskeny hőhatásövezet,
- ◆ a varrat keménysége HV=140...170 függően a felhígulástól.

Nikkel–vas elektróda

- ◆ Bázikus-grafitos bevonatú, öntöttvasak hideghegesztéséhez (51...55% Ni, + 0,4...1,6% C + Fe).
- ◆ Repedésre nem érzékeny, nagyobb szilárdságú heganyag. Ha a felhígulás 30%, akkor a varrat összetétele 36%Ni + 64% Fe (FeNi 36 = invar-ötvözet: hőtágulása $\alpha=1,7...2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ o C}$) (Invarianz). (Charles Edouard Guilleme – 1920-ban Nobel-díjat kapott).
- ◆ Alkalmazás: lemez- és gömbgrafitos öntvény, temperöntvény hideg kötő- és felrakó hegesztéséhez, öntöttvas kötőhegesztése acélhoz vagy acélöntvényhez, öntvénydarabok gyártása.
- ◆ Felhasználási területek: városi gáz-, és vízellátó öntöttvas, ill. acélcsövek, karimák, csőtoldatok felhegesztése, nagyobb igénybevételű munkadarabok (szivattyúház, géptalapzat stb.).

Nikkel–réz elektróda

- ◆ Bázikus-grafitos bevonatú, öntöttvasak hideg hegesztéséhez (Monel-ötvözet: 60...67% Ni + 29...35% Cu + 2...4% Fe)
- ◆ Alkalmazás: előnye a színezettség, az öntöttvas szennyezőivel szembeni kisebb érzékenység. A varrat jól megmunkálható, nyúlása kb. 15%. A kisebb szívósság és a nagyobb repedésérzékenység miatt az ezzel készített varratok gyengébbek az előbbieknél.

Meleghegesztés (a munkadarabot elő kell melegíteni és sorközi hőmérsékletet ellenőrizni)

Előmelegítés kb. 550...700°C-ra, hegesztés után kemencében való lassú lehűtés. (GJS-nél nem javasolt a Mg kiegészése miatt!) Hozaganyag: 3...3,5% C+3...4% Si.



Előnyei:

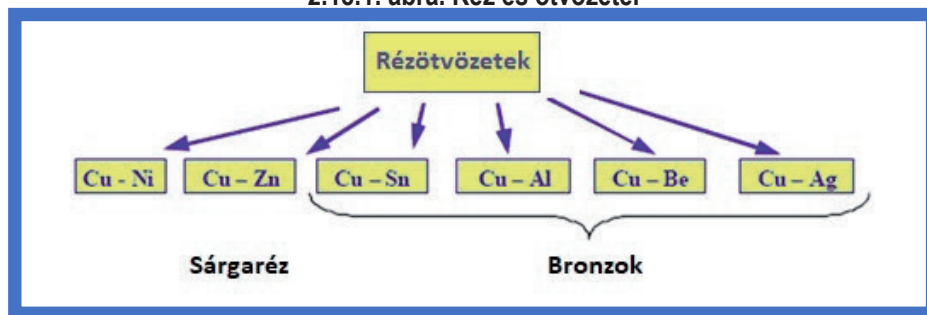
- ◆ a kötés mechanikai jellemzői és külalakja az alapanyagéhoz hasonló,
- ◆ nincsenek utánmunkálási problémák,
- ◆ a hegesztés követő hőkezelés végrehajtható.

2.18 A RÉZ ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE

2.18.1. Réz ötvözetek

A réz- és rézötvözeteket korrózióállóságuk, valamint elektromos és hővezető képességük miatt széles körben alkalmazzák. A tiszta réz (vörösréz) sűrűsége 20°C-on, $\rho = 8,9 \text{ kg/dm}^3$, olvadási hőmérséklet 1083°C, szakítószilárdsága $R_m = \text{kb. } 250 \text{ MPa}$, folyáshatár, $R_{p0,2} = \text{kb. } 70 \text{ MPa}$, rugalmassági modulusz, $E = 1,25 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, szakadási nyúlás, $A = 50 \%$, keménység 30 HB.

2.18.1. ábra. Réz és ötvözetek



A rézötvözetek hővezető képessége a színrézénél jóval kisebb. Mivel az ötvözők jelentős része dezoxidáló hatású, a rézötvözetek könnyebben hegeszthetők, nehezíti azonban a hegeszthetőséget, hogy néhány ötvözőelem (pl. Zn) kisebb hőmérsékleten párolog.

A sárgaréz fő ötvöző eleme a cink (Zn). Három család van; sárgaréz 20%-nál kisebb cinktartalommal, magas cinkötvözetek 30–45% cinkkel és a nikkel-ezüstök, amelyek 20–45% cinket és 20% nikkelt tartalmaznak. Ezek az ötvözetek kovácsolt vagy öntött termékek formájában kaphatók, az alacsony Zn-ötvözeteket általában ékszerekhez és érmékhez használják, a magasabb Zn-ötvözeteket azokban az alkalmazásokban, ahol fokozott mechanikai szilárdságra van szükség, mint például vízvezeték termékek, szivattyúházak és vékonyfalú kisnyomású tartályok. A sárgaréz 10...40% Zn-tartalmú rézötvözet, 37% Zn-tartalomig egyfázisú. A homogén sárgaréz kiválóan mélyhúzható. Mivel a Zn dezoxidáló ötvözőelem, nem kell tartani az oxigén káros hatásától, de hegesztéskor a Zn erős párologása gondot okozhat, mivel a gőzei mérgezők. A Zn párologása csökkenthető oxidáló láng beállításával, szilikáttartalmú folyósítószerrel, vékony oxidfilmet képező ötvözők bevitelével.

A nikkel-ezüst, ahogy a neve is sugallja, olcsóbb alternatívája az ezüstnek (Ag), és ékszerekhez, pénzveréshez és evőeszközökhöz használják. Történelmi megjegyzés: az 1907-es Rolls Royce Silver Ghost panelei nikkel -ezüsből készültek, innen a név.

Az ólmot (Pb) tartalmazó sárgaréz kivételével minden sárgaréz hegeszthető, az alacsony cinkötvözetek a legegyszerűbbek. Az ötvözetek hegesztésének fő problémája a hegesztett fém porozitása, amelyet az olvasztás során leforrázott cink okoz. A cink 420°C-on olvad és 910°C-on forr, ezért a forrasztás oxiacetilén fáklyával és réz-ezüst töltőanyaggal lehetséges alternatíva a hegesztésre, mivel megfelelő mechanikai tulajdonságokkal és porozitási problémák nélkül képes biztosítani az illesztéseket. A kemény réz, réz-oxid (<0,1% oxigén, mint Cu_2O) szálakat tartalmaz, amelyek nem rontják a megmunkált

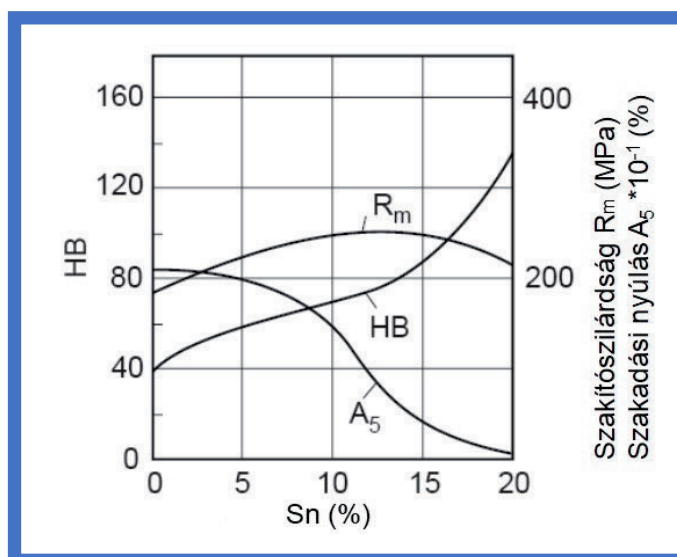
anyagok mechanikai tulajdonságait, és nagy elektromos vezetőképességgel rendelkeznek. Az oxigén-mentes és foszformentesített réz könnyebben hegeszthető.

2.18.2. ábra. Réz és ötvözetek anyagszoport

Csoport	Alcsoport	Réz és ötvözetek
31		Ötvözetlen réz
32		Cu-Zn-ötvözetek (sárgaréz)
	32.1	Cu-Zn-ötvözetek kétalkotós
	32.2	Cu-Zn-ötvözetek többalkotós
33		Cu-Sn-ötvözetek (ónbronz)
34		Cu-Ni-ötvözetek (nikkelbronz)
35		Cu-Al-ötvözetek (alumínium-bronz)
36		Cu-Ni-Zn-ötvözetek
37		Cu-ötvözetek (< 5% ötvöző), ill. amelyek nem tartoznak a 31...36 csoportba
38		Egyéb Cu-ötvözetek ($\geq 5\%$ ötvöző), ill. amelyek nem tartoznak a 31...36 csoportba

Az Sn mennyiségének növelésekor nő a szilárdság és a keménység, csökken a szakadási nyúlás (2.18.3. ábra).

2.18.3. ábra. Az óntötvözés hatása az ónbronz mechanikai jellemzőire



2.18.2. Réz és sárgaréz hegesztése

A színréz mind ömlesztő-, mind sajtolóeljárással jól hegeszthető. Hegesztésekor figyelembe kell venni, hogy: a színréz szilárdsága kicsi, nyúlása nagy, jó hővezető, ezért nagyobb hőbevitelre, előmelegítésre van szükség, az oxidtartalmú réz hidrogénfelvételekor ún. hidrogénbetegség lép fel, a réz-oxid (Cu₂O) a réz eutektikumot képez, és lehűléskor a szemcsehatárra kiválva csökkenti a szívósságot.

A színréz hegesztése előtt tudni kell, hogy dezoxidált-e vagy sem. Ha adott méretű próbatestet erősen redukáló oxigén-acetilén lánggal 750~850°C-on (világos pirosan) kb. 10 percen át izzítanak, majd lehűlés után meghajlítják, akkor ha van benne oxid, úgy a felület felhólyagosodik, ill. hajlítás közben reped vagy törik. A színréz gázhegesztéséhez folyósítószer szükséges; hozaganyaga foszfortartalmú, ezüsttel ötvözött CuAg1-ötvözet. Semleges lánggal, balra hegesszük, 6 mm-nél vastagabb lemezt legalább 200~1/(h×mm) fajlagos lángérintéssel elő kell melegíteni. A hegesztés utáni hidegkalapálás a keménységet, a melegkalapálás a szívósságot javítja.

Argon védőgázos wolframelektrodás ívhegesztés illetve argon védőgázos huzalelektrodás ívhegesztéssel oxidtartalmú réz is hegeszthető CuSn 1 vagy CuAg 1 hozaganyaggal. Előmelegítés 12 mm felett szükséges, 300~400°C-on ill. többretegű hegesztéskor 500~700°C-on. Impulzusos eljárással az előmelegítési hőmérséklet csökkenthető. A gáz-, ill. AWI- és AFI-hegesztéshez CuZn 40 (40% Zn tartalmú) hozaganyag szükséges. AWI-hegesztéshez egyenáramot, egyenes polaritást használunk, nagy Zn-tartalom esetén váltakozó áramot.

A TIG és a MIG az előnyben részesített hegesztési eljárások, de a gázhegesztés és az védőgázos huzalelektrodás ívhegesztés is használható kemény rézalkatrészek javításához. A hélium- és nitrogén-alapú védőgázok, amelyeknek nagyobb az ívfeszültsége, az argon alternatívájaként használhatók a réz magas hővezető képességének ellensúlyozására.

Az ömlesztő hegesztés során az ötvözet magas oxigéntartalma gyakran töréshez vezet a hőhatás-övezetben és a hegesztett fém porozításához vezet. A foszformentesített réz jobban hegeszthető, de a maradék oxigén porozitást okozhat a gázhegesztésben hegesztésekben, különösen hidrogén jelenlétében. A porozítás elkerülhető megfelelő hegesztőanyag használatával, amely dezoxidánsokat (Al, Mn, Si, P és Ti) tartalmaz. A foszformentesített réz jobban hegeszthető, de a maradék oxigén porozitást okozhat az autogén hegesztésekben, különösen hidrogén jelenlétében. A porozítás elkerülhető megfelelő töltőhuzal használatával, amely dezoxidánsokat (Al, Mn, Si, P és Ti) tartalmaz.

A vékonyfalú anyag előmelegítés nélkül hegeszthető. Mindazonáltal 5 mm vastagságnál nagyobb minden fokozat előmelegítést igényel, hogy folyékony hege-tócsát állítson elő, és elkerülje a hibákat. A vastag részekhez akár 600°C-os előmelegítési hőmérsékletre is szükség lehet.

Pont- és vonalhegesztéssel 2 mm vastagságú munkadarabok egyesíthetők.

A megmunkálhatóság javítása érdekében kis mennyiségű kén vagy tellúr ötvöző adható a rézhez. Ezeket az osztályokat azonban általában hegeszthetetlennek tekintik. A kiválóan keményített edzett ötvözetek kis mennyiségű krómot, cirkóniumot vagy berilliumot tartalmaznak és kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A króm és a berillium réz a hőhatásövezetben repedéseket szenvedhet, hacsak hegesztés előtt nem hőkezelik. A berilliumréz hegesztésekor ügyelni kell arra, hogy mérgező hegesztőgázokat ne lélegezzenek be.

Sárgaréz (réz-cink ötvözetek) és nikkel-ezüst ötvözet. Ha figyelembe vesszük a hegeszthetőséget, a sárgarézeket két csoportra lehet bontani, pl. alacsony cink (legfeljebb 20% Zn) és magas cink (30–40%



Zn) tartalom szerint. Az ötvözetek ömlesztő hegesztésének fő problémája a cink elpárologtatása, amely fehér cink-füstöt és hegesztésifém-porozitást eredményez. Csak alacsony cinktartalmú sárgaréz hegeszthető olyan ömlesztő hegesztési eljárásokkal, mint a TIG és a MIG. A bronzok hegesztésére általában megfelelő hegesztőanyagokat használnak. A foszforbronzok autogén hegesztése nem ajánlott a hegesztett fém porozitása miatt. Ez a kockázat azonban csökkenthető, ha nagyobb dezoxidáns tartalmú hegesztőhuzalt használunk. A nagyon kevés cink (2%) és ón (10%) tartalmú rézötvözet nem tekinthető hegeszthetőnek, mivel érzékeny a melegrepedésekre.

A Cu-Si hegesztőanyag könnyen folyik, és egy 60°-os szöghegesztési előkészítés elfogadható eredményeket ad. A Cu-Sn-varratfém lassabb, és legalább 70°-os szög javasolt. A vékony profilú alkatrészek MIG- vagy TIG-hegesztéséhez használt védőgáz nagy tisztaságú argon. Vastagabb, 5 mm-nél vastagabb szakaszokban a hélium hozzáadása nagymértékben elősegíti a teljes beolvadáshoz szükséges hő biztosítását, valamint az impulzusos hegesztőáram használata is. A sárgaréz, mint a réz, magas hővezető tényezővel rendelkezik.

A TIG-hegesztés általában 10 mm körüli hézagvastagságra korlátozódik, a vastagabb szakaszoknál a MIG az előnyben részesített eljárás. A 100–300°C közötti előmelegítés a szakaszvastagságtól függően segíthet a cinkvesztés csökkentésében, különösen a magas cinkötvözetekben, azáltal, hogy lehetővé teszi az alacsonyabb hegesztőáram használatát, ami az alapfém kevesebb olvadását eredményezi.

A hegesztésből származó maradó feszültségek miatt potenciális probléma merülhet fel mint feszültségkorrózió, enyhén korrozív közegben, például ammóniában vagy tengervízben. Ez nagyrészt megoldható a hegesztett elem 260–300°C-on történő izmításával.

2.18.3. Bronzok hegesztése

Az ötvözetek következő csoportja a bronz. Ezeket ötvözhetik ónnal, általában foszfor-bronzzal, szilíciummal vagy alumíniummal. Sok ilyen ötvözet, mint a sárgaréz, ólommal ötvözve javítja a megmunkálhatóságot. Ezeket az ömlesztett ötvözeteket általában nem hegeszthetőnek tekintik, és szükség esetén szakember tanácsát kell kérni.

A **foszfor-bronzötvözetek** 1–12% ónt tartalmaznak, kis mennyiségben (0,01–0,1%) foszfort (P), ha ezt kizárólag dezoxidálószerként használják. A valódi foszfor-bronzok legalább 0,1% P-t és egyes öntött foszfor-bronzokban 1,0%-ot tartalmaznak. Az ötvözetek korrózióállóak és kiváló kopásállósági tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért szelepekhez, csapágakhoz és gépalkatrészekhez használják őket. Hegeszthetőség szempontjából a fő probléma az, hogy az ötvözetek érzékenyek a meleg repedésekre, és az alacsonyabb P-tartalmú ötvözetek is hajlamosak oxidfilmeket képezni a hegesztési ömledékben. Ezért kerülni kell a nagy hegesztési hőbevitelt, a nagy előmelegítést és a lassú hűtési sebességet.

A **szilícium-bronzok** valószínűleg a legkönnyebb hegeszteni a bronzok közül. 1,0–4,0% szilíciumot tartalmaznak, kis mennyiségben, összesen kevesebb, mint 1,5% cinket, mangánt és/vagy vasat. Jó szilárdságúak és kiváló korrózióálló tulajdonságokkal rendelkeznek, és gyakran használják hőcserélő csövekhez, tengeri hardverekhez és vegyipari eljárásokhoz.

Alumínium-bronz hegesztése: Lényegében kétféle alumínium-bronz létezik; egyfázisú ötvözetek, amelyek 5–10% alumíniumot tartalmaznak, kis mennyiségű vasat vagy nikkelt tartalmaznak, és összetettebbek, kétfázisú ötvözetek, amelyek legfeljebb 12% alumíniumot és körülbelül 5% vasat tartalmaznak, valamint speciális ötvözetek, amelyek nikkelt, mangánt és szilíciumot is tartalmaznak. Ezek hegesztésére a védőgázos ívhegesztési eljárások előnyösek. A TIG-hegesztésnél a szívós, tűzálló oxidfilm jelenléte AC (argon) vagy héliumvédő gázzal egyenáramú. Alacsony hővezető képessége miatt az



előmelegítésre általában nincs szükség, kivéve vastag szakaszú alkatrészek hegesztésekor. A TIG-hegesztésnél a szívós, tűzálló oxidfilm jelenléte miatt egyenáram fordított polaritás (AC) argon vagy egyenes polaritás (DC) hélium védőgázzal. Alacsony hővezető képessége miatt az előmelegítésre általában nincs szükség, kivéve vastag szakaszú alkatrészek hegesztésekor.

Hibák elkerülése: A porozitás elkerülése érdekében elengedhetetlen az anyag felületének alapos tisztítása, minden hegesztési sor előtt és után is. Gondosan ellenőrizni kell az előmelegítési és a köz-belső hőmérsékleteket a repedések elkerülése érdekében.

Nikkel-bronz hegesztése: A réz-nikkel ötvözetek 5–30% nikkelt tartalmaznak, speciális ötvözetekkel, amelyek vasat és mangánt tartalmaznak; A 90/10 és 70/30 (Cu/Ni) ötvözetek általában hegesztett minőségűek. Ezek az ötvözetek egyfázisúak, és általában hegeszthetőnek tekintik inert gázzal és kisebb mértékben huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéssel. Általában megfelelő hegesztőanyagot használnak. A 70/30 (Cu 7158) gyakran univerzális hegesztőanyagnak tekinthető ezeknél az ötvözeteknél. A réz-nikkel ötvözetek hővezető képessége hasonló, mint az alacsony széntartalmú acéloké, ezért nincs szükség előmelegítésre.

Hibák elkerülése: A réz-nikkel ötvözetek nem tartalmaznak dezoxidánsokat, ezért az autogén hegesztés nem ajánlott a porozitás veszélye miatt. A hegesztőanyag -kompozíciók jellemzően 0,2–0,5% titánt tartalmaznak a hegesztett fém porozitásának minimalizálása érdekében. Általában argon védőgázt használnak mind a TIG, mind a MIG esetében, de a TIG-hegesztésnél az argon-hidrogén keverék megfelelő hegesztőanyaggal javítja a hegfürdő folyékonyágát és tisztább hegesztési varratot eredményez. Gázvédelem (általában argon) ajánlott, különösen csőhegesztésnél, az oxidmentes aljzat előállításához.

2.19 A NIKKEL ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE

A nikkel viszonylag egyszerű fém. Felületen középpontos köbös, és fázisváltozás nélküli, az olvadásponttól szobahőmérsékletre hűlve; a rozsdamentes acélhoz hasonló. A nikkel és ötvözetek ezért nem keményíthetők edzéssel, így a hűtési sebesség kevésbé fontos, mint mondjuk a szénacélnál és az előmelegítésnél, ha a környezeti hőmérséklet 5°C felett van. A nikkel és ötvözetek nagyon széles körben alkalmazhatók – a magas hőmérsékletű oxidációtól és kúszásállóságtól az agresszív korrozív környezetig és a nagyon alacsony hőmérsékletű kriogén alkalmazásokig. A nikkel kereskedelmi forgalomban is tiszta formában használható, de gyakrabban más elemekkel kombinálva kétféle ötvözetcsaládot állít elő – szilárdoldatos ötvözeteket és kiválósan keményíthető ötvözeteket. Kereskedelmi tisztaság: 99,9 ~99,6% Ni, szokásos szennyezők: Fe, Mn, Si és C, ötvözők: 2% Be nemesíthetővé teszi, 4% Al-ötvöztetés nemesíthetővé teszi (nagy szilárdság, kopásállóság).

Jellemző alkalmazások, membránok, golyócsapágyak, lúgszivattyú szelepei, injekcióstűk. Főleg vegyipari és hőálló berendezésekhez használható, jó mechanikai és vegyi tulajdonságai miatt, korrózió-álló, hőálló, melegsilárd és hidegszívós.

Csoportosítás az ötvözők szerint szokásos, de a márkanevek is ismertek, pl. Inconel, Hastelloy.

A hagyományos hegesztési eljárások használhatók a nikkel hegesztésére, ötvözetek és megfelelő hegesztőanyagok állnak rendelkezésre. Amint fentebb említettük, a nikkel és ötvözetek sok tekintetben hasonlítanak az ausztenites rozsdamentes acélokhoz; a hegesztési eljárások is hasonlóak. A nikkel hőtágulási együtthatója azonban kisebb, mint a rozsdamentes acélé, ezért a vetemedés hasonló a szénacéléhoz.

A nikkel-ötvözetek leg súlyosabb repedési problémája a hegesztett fémekben vagy a hőhatásövezet és a részben átolvadott zóna közelében melegrepedés. A probléma fő forrása a kén, de a foszfor, az ólom, a bizmut és a bór is hozzájárul. Mind a varratfémekben, mind a hőhatásövezetben a repedések általában a nem megfelelő tisztítást követő zsír, olaj, szennyeződés stb. okozta szennyeződés eredménye, ritkán fordul elő a kén mennyisége miatt.



A porozitás problémát okozhat a nikkeltötvözetekben, a fő bűnös a nitrogén. Már a 0,025% nitrogén is pórusokat képez a megszilárduló hegesztési fémekben. Elég könnyű megzavarni a gázpajzsot légköri szennyeződés lép fel, ami porozitást eredményez. Gondoskodni kell arról, hogy a hegesztési terület kellően védett legyen, és ez különösen fontos helyszíni hegesztési alkalmazásoknál. A védőgázos eljárásoknál a gáz tisztaságának és a gázpajzs hatékonyságának a lehető legjobbnak kell lennie. Az argon védőgázhoz hozzáadott kis mennyiségű hidrogén (legfeljebb 10%) csökkentette a problémát. Az MMA-hegesztésnél a kezdő és befejező porozitás problémát jelent. A hegesztést úgy kell elvégezni, hogy viszszahegesztik az ívcsapási helyzet fölé, felolvasztva a porozitást, amely a hegesztés kezdetén kialakult rossz gázvédelem miatt jött létre. Óvatosan kell eljárni a hegesztés végén is, csökkentve az ívhosszat és kissé növelve a hegesztési sebességet a hegfüldő méretének csökkentése érdekében.

Az oxigén bizonyos esetekben porozitást is okoz, amikor a hegfüldőbe lévő szénnel szén-monoxidot képez. A hegesztőanyag gyártók általában leküzdik ezt a problémát, biztosítva, hogy elegendő dezoxidáns (elsősorban mangán, alumínium és titán) legyen jelen a hegesztőanyagban.

2.19.1 Ni-ötvözetek

20~70 % nikkeltartalommal:

Legfontosabb ötvözők: Cu, Cr, Fe, Co, Mo (5 ... 40% -ban)

Adalékanyagok: 0,1~4 % Al, Si, Ti, Nb, Mg és néha Cu, Co

Ni – Fe ötvözetek: INVAR

Ni – Cu ötvözetek: 2/3 ~1/3 arány: Monel $\Rightarrow$ 3 % Al nemesíthetővé teszi

Szilárdsága 450°C-ig nem változik

Alkáliakkal, szerves- és szervetlen savakkal és sókkal szemben ellenálló.

Ni–Cr-ötvözetek

Eutektikus hőmérsékleten 47% Cr-ot old

Szobahőfokon: 29% Cr-ot old

Általában: 15–25 % Cr-ot tartalmaz

15% Cr fölött a reveállóság rohamosan nő

20% Cr mellett Al, Ti, Co, Mo a hőállóságot javítja

Léteznek a Ni-, Cr-, Fe- és Ni-, Cr- Co-ötvözetek is, a Ni- Cr- Fe (Inconel)

és Ni – Cr – Mo ötvözetek Kb. 1200°C-ig alkalmazhatók.

Jó mechanikai tulajdonságok és reveállóság 950°C-ig (reaktorok, vegyipar, gázturbinák).

Ni – Mo ötvözetek

15~30% Mo + ~2% Co

3~10% Mo + 20~30% Cr (Hastalloy)

Esetenként 10~35 % Fe, ~ 4% Nb, ~2 % Cu, Al, Ti is lehet (Al ötv. nemesíthetővé teszi)

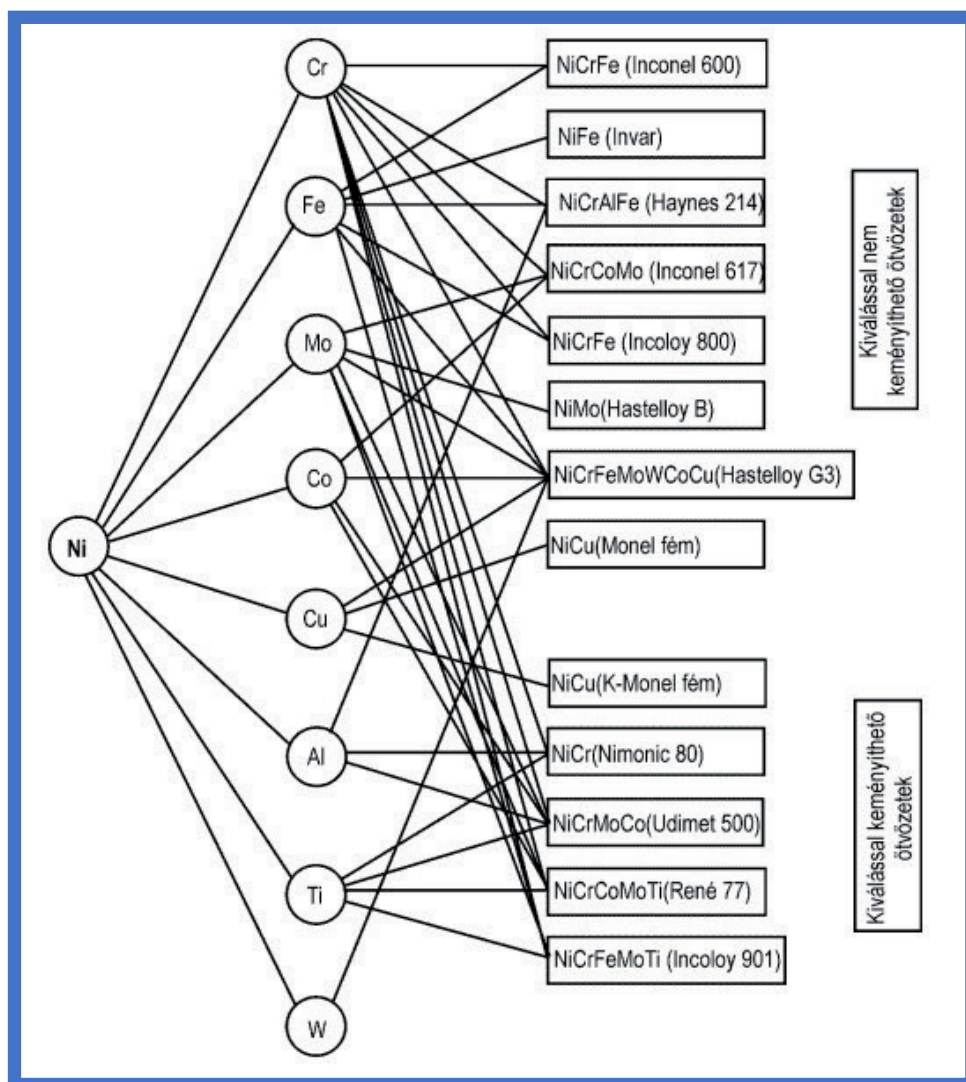
Kiváló korrózióálló $\Rightarrow$ 800–1000°C-ig

Szulfidokkal, foszfátokkal, savakkal (kénsavval, folyssavval, szerves savakkal) szemben ellenálló.

Jellemző a vegyipari felhasználás, jó vegyszerállóság és mechanikai tulajdonságai miatt.



2.19.1. ábra. Nikkel-ötvözetek



2.19.2 Szilárdoldatos ötvözetek

- ◆ Nickel 200, Monel 400-as sorozat, Inconel 600-as sorozat, Incoloy 800-as sorozat, Hastelloy 75, Nimonic PE13.
- ◆ Ezeknél az ötvözeteknél az ömlesztő hegesztési eljárások széles köre alkalmazható, normál és lágyított állapotban egyaránt.
- ◆ A hőhatásövezet nem keményedik, hegesztés után hőkezelésre nincs szükség.
- ◆ Kiválóan keményíthető (nemesíthető) ötvözetek (ezeknek az ötvözeteknek a tulajdonságai a hőkezeléstől függenek).
- ◆ A Monel 500-as sorozat, Inconel 700-as sorozat, Incoloy.
- ◆ 900-as sorozat, a Nimonic-ötvözetek többsége, 80, 90, 263 és PE16.
- ◆ Ezeket az ötvözeteket hegesztés utáni hőkezelési repedésre érzékenyek lehetnek.

Hegeszthetőséget befolyásoló tényezők, fizikai jellemzők a vaséhoz hasonlóak:

- ◆ Elvileg nem okoz gondot a hegesztés.
- ◆ Nehézségek.
- ◆ Porozitási hajlam.
- ◆ Repedés érzékenység $\Rightarrow$ Csak a legszigorúbb tisztasági előírások betartásával csökkenthető, illetve kerülhetők el ezek a problémák!
- ◆ Oxidbezáródás és sorközi összeolvadási hiba
- ◆ Mikrorepedések
- ◆ Hegesztés utáni probléma lehet
- ◆ Hőkezelési repedés érzékenység
- ◆ Feszültségi korróziós repedés.
- ◆ A gázoldó képesség változása nikkelnél a legnagyobb a szilárd–folyékony átmenetnél az O, H, N már kis mennyiségben is porozitást okoz, képződhetnek $C + O \Rightarrow CO$ bezáródások is.
- ◆ Mechanikus és kémiai tisztítás is előnyös lehet.
- ◆ A védőgáz tisztaságára, a gyökoldali védelemre és a gázvédelem hatékonyságára is ügyelni kell, AWI-hegesztésnél az Ar–H₂-védőgáz redukáló atmoszférája előnyös lehet.

2.19.3 Repedésérzékenység

A nikkelt a kénnel $\sim 450^\circ\text{C}$ felett NiS-ot alkot $\Rightarrow$ Ni – NiS eutektikum jön létre $\Rightarrow 650^\circ\text{C}$ -on olvad, így az eutektikum a szemcsehatáron dermed meg:

- ◆ Ez melegrepedés érzékenységet okoz dermedéskor, vagy kis mértékű hidegalakítás okoz repedést.
- ◆ A kénsszennyezést akár az ipari levegő is és a hegesztő keze is előidézhetheti.
- ◆ Felületi szennyezésekből az ömledék C-t vehet fel.
- ◆ NiC szemcsehatár-menti dúsulása repedést okozhat.
- ◆ Melegrepedést okozhat az is, ha a darab felületére kis olvadáspontú nehézfém részecskék kerülnek (pl. megmunkáláskor).
- ◆ Az anyagban gyártáskor keletkező feszültségek (pl. hidegalakításból). A hegesztés során a HAZ-ban $\Rightarrow$ repedések.

Az oxid olvadáspontja sokkal magasabb, mint az alapanyagé, ezért előfordulhat, hogy szilárd állapotban marad hegesztés során. A szilárd oxid bezáródhat a varratba.

Több soros hegesztésnél a sorok között salak és oxidbezáródás okozhat összeolvadási hibát.

Hegesztés előtt, különösen, ha az anyag melegen volt alakítva, forgácsolással vagy köszörüléssel el kell távolítani az oxidot. Salakot és oxidot a sorok között is gondosan el kell távolítani, tisztítás kefével nem elegendő.

Mikrorepedések: Az ausztenithez hasonlóan a nikkeltövezetek is érzékenyek lehetnek a likvációs repedésekre. Szemcsedurvulás fokozza a veszélyt Inconel 718 kevésbé érzékeny a többi anyaghoz viszonyítva.



Hőkezelési repedés érzékenység:

- ◆ Lehetséges hegesztés utáni hőkezelésnél a nemesíthető ötvözeteknél.
- ◆ A hegesztés előtti hőkezelés csökkenti a hajlamot.
- ◆ Az Inconel 718 ötvözetet ennek a repedésnek az elkerülésére fejlesztették.

Feszültségkorróziós repedés érzékenység:

- ◆ Általában a hegesztés nem okoz korróziós ellenállás csökkenést a HAZ-ben.
- ◆ Maró szóda (NaOH), fluorszilikát és HF-sav közegekben feszültségi korróziós repedés keletkezése lehetséges.
- ◆ Hegesztés utáni feszültségcsökkentő hőkezelés segít a feszültségi korróziós repedések kialakulásának elkerülésében.

Hegesztési szabályok:

Nagy tisztaság szükséges (fehér kesztyű hegesztőnek!).

- ◆ Rövid ívvel kell hegesztetni (porozitás veszélye csökken).
- ◆ Pontosan kell tartani a paramétereket $\Rightarrow$ jó és reprodukálható hegesztőgépre van szükség.
- ◆ Nagy I $\Rightarrow$ túlhevülést okoz.
- ◆ vopt – hegesztési sebesség (Ha kicsi $\Rightarrow$ túlhevítés, ha nagy $\Rightarrow$ porozitás veszély).
- ◆ Merev megfogásokat kerülni kell.
 - ◇ Védőgázos eljárások alkalmazhatók,
 - ◇ Bevontelektrodás kézi ívhegesztést általánosan alkalmazzák,
 - ◇ Fedettívű hegesztést a szilárd oldatos ötvözetekhez nem alkalmazzák.
- ◆ Előmelegítés nem szükséges, esetlegesen csak nedves felület szárítása esetén.
- ◆ Utólagos hőkezelésre általában nincs szükség a korróziós tulajdonságok visszaállítása érdekében, de nemesítésre kiválóan keményíthető ötvözeteknél és feszültség csökkentésre a feszültségi korróziós repedések elkerülésére szükség lehet.

2.19.1. táblázat. A különböző ötvözetekhez a hegesztő anyagok

Hegesztő anyag előírása				
Ötvözet	BS 2901/5	AWS A5.14	Márkanév	Megjegyzés
Nikkel 200	NA32	ERNi-3	Nickel 61	3 % Ti ötv
Monel 40	NA33	ERNiCu-7	Monel 600	Mn, Ti, Al ötv.
Brightray S	NA34		NC 80/20	Ni-Cr és Ni-Cr-Fe is lehet
Nimonic 75	NA34		NC 80/20	
Incoloy 800	NA43	ERNiCrMo-3	Inconel625 Thermanit 21/33	Nagyobb C és Nb tart. is lehet
Inconel 600	NA35	ERNiCu-3	Inconel 82	Nb ötv.

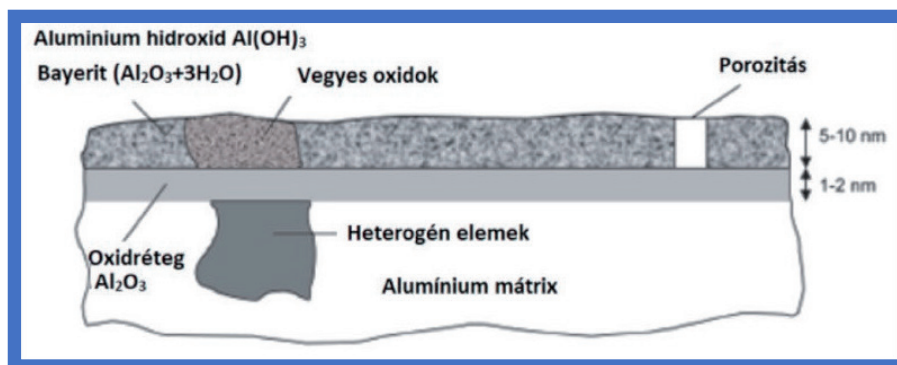


Hegesztő anyag előírása				
Ötvözet	BS 2901/5	AWS A5.14	Márkanév	Megjegyzés
Inconel 718	NA51	ERNiFeCr-2	Inconel 718	Inconel 625 alternatíva
Inconel 625	NA43	ERNiCrMo-3	Inconel 625	
Hastalloy C-22	-	ERNiCrMo-10	Hastalloy C-22	
Hastalloy B-2	NA44	ERNiMo-7	Hastalloy B-2	
Hastalloy-X Waspaloy	NA40	ERNiCrMo-2	Hastalloy X Waspaloy	Inconel 625 is lehet

2.20 AZ ALUMÍNIUM ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE

Az alumínium lapközepes köbös rácsú, jól alakítható, nem ridegedik el negatív hőmérsékleten, kiváló korrózióálló (Al_2O_3 felületi oxidréteg miatt), jó hővezető képességű ($\lambda = 230 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$) (az acélnak kb. 5-szöröse), az acélnál 2x nagyobb hőtágulása ($\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$), kis olvadáspontú ($660,5^\circ\text{C}$). Az Al felületén 5–10 nm vastag $\text{Al}(\text{OH})_3$, ill. Bayerit-réteg van, a záróréteg 1–2 nm Al_2O_3 (2.20.1. ábra).

2.20.1. ábra. Az alumínium oxidréteg felépítése



Az ötvözetlen alumínium 99~99,99% Al-t tartalmaz, a maradék kisebb mennyiségű elemek, ill. szennyezők. Szilárdsága alakítással növelhető (2.20.1. ábra). Lágy állapotban (O): $R_m = 40\sim 80 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 20\sim 40 \text{ MPa}$, $E = 7,2 \cdot 10^4 \text{ MPa}$, $A_{50} = 30\sim 38\%$, $HB = 12\sim 25$.

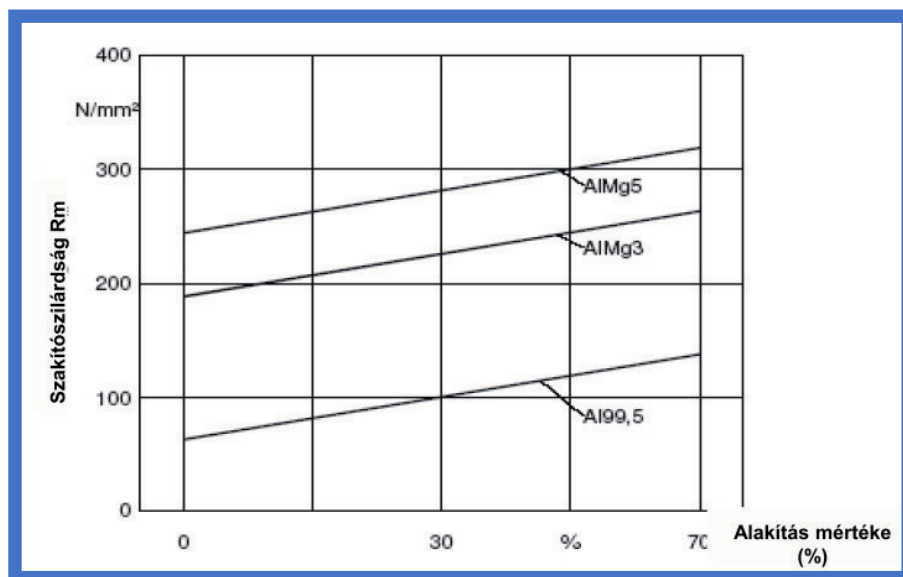
Az Al és ötvözeit számjelöléssel és kivételesen vegyjelöléssel kell jelölni. A jelölésben fel kell tüntetni, hogy az ötvözet alakítással (W=Wrought) vagy öntészeti úton (C = Casting) készült. Az előbbit 4 jegyű, az utóbbit 5 jegyű szám jelöli, pl. EN AW-1050A [EN AW-Al 99,5], ill. EN AC-71000 [EN AC-AlZnMg₅].

Hegesztési technológia kidolgozása során figyelembe kell venni az acél hőkezelhetőség szerinti besorolását. A hegesztés előkészítésében azonban nem teszünk különbséget, vagyis a hegesztés előtt a munkadarabot és a hozaganyagot (pálca, huzal) tisztítani, ill. pácolni kell. A felületen lévő szennyezőket (pl. zsír) el kell távolítani.

A pácolás célja az oxidréteg gyengítése, a pácoltat lehet: savas: 3 rész 54%-os HNO_3 + 1 rész 50%-os HF, lúgos: 5~20% NaOH (50~80°C), lemosás vízben, semlegesítés 15~20%-os HNO_3 -ban, mosás, majd szárítás.

2.20.1. Alakítható alumíniumötvözetek

2.20.2. ábra. Az alakítási fok hatása az alumínium és ötvözei szilárdságára



Az alumínium szilárdsága jelentősen függ az alakítás mértékétől (alakítási fok%). Az alumínium jelölésében ezért ezt jelölik. A 2.20.1. táblázat foglalja össze az alakítottság jelölési rendszerét.

2.20.1. táblázat. Alakítással keményített állapot jelölése

Jel	
H1x	H12 1/4 kemény
	H14 1/2 kemény
	H16 3/4 kemény
	H18 4/4 kemény
	H111 lágyított + kismértékben keményített
H2x	Alakított + részlegesen lágyított
H3x	Alakított + stabilizált
H4x	Alakított + lakkozott vagy festett

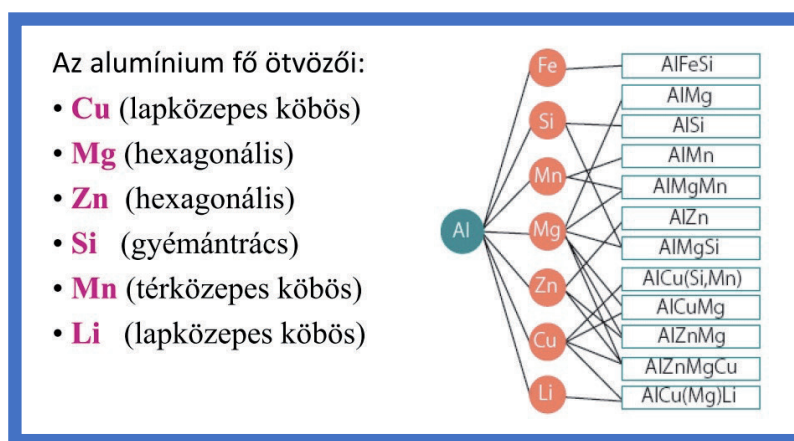
Az alumíniumötvözeteket két csoportra osztjuk aszerint, hogy a szilárdságuk hőkezeléssel növelhető, vagy sem. Azokat az alumíniumötvözeteket, beleértve a szinalumíniumot is, melyeknek a keménysége csak alakítással növelhető, hőkezeléssel nem, „Nem hőkezelhető alumíniumötvözetek”-nek nevezzük, míg azokat az alumíniumötvözeteket melyeknek öregítő hőkezeléssel a szilárdsága növelhető.



„Hőkezelhető alumíniumötvözetek”-nek nevezzük. Másik terminológia szerint „Nemesíthető” és „Nem nemesíthető” megnevezés és használható. Megkülönböztetünk továbbá mesterségesen nemesíthető és természetesen nemesíthető vagy öregíthető alumíniumötvözeteket. A mesterségesen nemesíthető alumíniumötvözetek esetében a hőkezelés megeresztési folyamata 150~250°C közötti hőmérsékleten történik, melyen létrejönnek a diszperz-eloszlású kiválások, ezzel az ötvözet szilárdsága megnő, míg a természetesen nemesíthető alumíniumötvözetek esetében a megeresztés szobahőmérsékleten történik (több napig tartó hevertetés) mialatt a szilárdságnövekedés megtörténik.

Az Al-Mg nem hőkezelhető ötvözetek Mg=0,2~5,6%, Mn (0,1~1,4%) tartalmaznak. A Mg növelésével nő a szilárdság, mely alakítással tovább fokozható, miközben a nyúlás csökken. Alakítást követő hevítéskor az ötvözet kilágyul, hőközlés során újrakristályosodás megy végbe. A lapközepes köbös Al és a hexagonális Mg egymást korlátoltan oldja. A Mg rontja az Al vezetőképességét.

2.20.3. ábra Alakítható alumíniumötvözetek



2.20.2. Nem hőkezelhető alumíniumötvözetek

Az ötvözetlen Al (EN AW-1050A [EN AW-Al 99,5]) hegeszthetősége:

- ◆ ömlesztéskor nincs elszíneződés,
- ◆ hirtelen ömlik, ill. dermed,
- ◆ nagy az affinitása az oxigénhez (2030°C),
- ◆ a felületi oxidréteget (Al_2O_3) el kell távolítani,
- ◆ dermedéskor erős térfogatváltozás megy végbe (kis szilárdság → repedésveszély),
- ◆ nagy a hővezetési tényezője és a hőtágulása,
- ◆ az ömledék mohón nyeli a H-t → porozitás.
- ◆ kis szilárdságú, nagy nyúlású, nem hőkezelhető,
- ◆ nagy hő- és elektromos vezetőképességű,
- ◆ korrózióálló,
- ◆ hegesztés előtt az oxidréteg pácolással vékonyítandó,
- ◆ jól hegeszthető,
- ◆ hozaganyag: Al99,8, Al 99,5Ti.

2.20.3. táblázat. Az alumíniumötvözetek csoportjai és alcsoportjai

Csoport	Alcsoport	Alumínium és ötvözetek
21		Ötvözetlen Al $\leq 1\%$ szennyezővel vagy ötvözőelemmel (1000)
22		Nem hőkezelhető ötvözetek
	22.1	Al-Mn-ötvözetek (3000)
	22.2	Al-Mg-ötvözetek (5000) $Mg \leq 1,5\%$
	22.3	Al-Mg-ötvözetek $1,5\% < Mg \leq 3,5\%$
	22.4	Al-Mg-ötvözetek $Mg > 3,5\%$
23		Hőkezelhető ötvözetek
	23.1	Al-Mg-Si-ötvözetek (6000)
	23.2	Al-Zn-Mg ötvözetek (7000)
24		Al-Si-ötvözetek (4000) $Cu \leq 1\%$
	24.1	Al-Si-ötvözetek $Cu \leq 1\%$ és $5\% < Si \leq 15\%$
	24.2	Al-Si-Mg-ötvözetek $Cu \leq 1\%$, $5\% < Si \leq 15\%$ és $0,1\% < Mg \leq 0,8\%$
25		Al-Si-Cu-ötvözetek (4000) $5\% < Si \leq 14\%$; $1\% < Cu \leq 5\%$ és $Mg \leq 0,8\%$
26		Al-Cu-ötvözetek (2000) $2\% < Cu \leq 6\%$

Az előmelegítési hőmérséklet számítása, a nem hőkezelhető Al-ötvözetek előmelegítési hőmérséklete (T_e) számítható a szoliduszhőmérséklet (T_s) és a λ hővezetési tényező ismeretében ($J/cm \cdot s \cdot K$):

$$T_e = \frac{T_s}{\lambda} (J/cm \cdot s \cdot K)$$



2.20.4. ábra. Nem hőkezelhető alumíniumötvözetek

Al-Mn(Mg) EN AW-3000	Al-Si EN AW-4000	Al-Mg(Mn) EN AW-5000
Mn = 0,05...1,5% (Mg = 0...1,3%)	Si = 0,8...13,5% (+ Mn, Mg, Fe)	Mg = 0,2...5,6% (Mn = 0...1,4%)
Al Mn0,2 Al Mn0,6 Al Mn1 Al Mn1Cu Al Mn1Mg1	Al Si1,5Mn Al Si2 Al Si2Mn Al Si5 Al Si7,5 Al Si10 Al Si12	Al 99,9Mg1 Al Mg1 Al Mg2 Al Mg2,5 Al Mg3 Al Mg3,5 Al Mg4,0 Al Mg4,5 Al Mg4,5Mn0,7 Al Mg5 Al Mg5Mn

Nem hőkezelhető Al-Mg-ötvözet EN AW-5005A [EN AW-Al Mg1] Mg=0,7~1,1%, eloxált lemezként is ismert, eloxálás után igen szép fémes felülettel, ideális építészeti, dekorációs célokra, igen jól alakítható, jó korrózióálló, rosszul forgácsolható, hegeszthetősége megfelelő, hozaganyag: AlMg3, AlSi5.

Másik nem hőkezelhető Al-Mg-ötvözet EN AW- 5754 [EN AW-Al Mg3] Mg =2,6~3,6%. Az Al 99,5-nél nagyobb szilárdságú ($R_m \approx 270$ MPa), jó szívósságú negatív hőmérsékleten is, tengervíz- és légkörkorrózió-álló, igen jól hegeszthető és forgácsolható, hozaganyag: AlMg3: ha követelmény, a korrózióállóság és a színazonosság, AlMg5: ha követelmény a nagy nyúlás és a töréssel szembeni biztonság (a Mg kiégése miatt).

Harmadik csoport a nem hőkezelhető Al-Mg-ötvözetek közül EN AW 5063 [EN AW-Al Mg4,5Mn0,7] Mg =4~4,9% Mn= 0,4~1%, közepes szilárdságú ($R_m \approx 270$ MPa), megfelelően alakítható, egyengetéskor, nyújtáskor csak kismértékben keményedik, jól hegeszthető és forgácsolható, tengervízálló, hozaganyag: AlMg4,5Mn, AlMg5.

Nem hőkezelhető Al-Mn, Al-Mn-Mg-ötvözetek (3000). Az Al-Mn-ötvözetek Mn=0,05~1,5%-ot tartalmaznak. Az Al a Mn-t korlátoltan oldja (1,8% Mn 657 °C-on), az eutektikus összetétel (1,9% Mn) fölött Al₆Mn rideg vegyület válik ki.

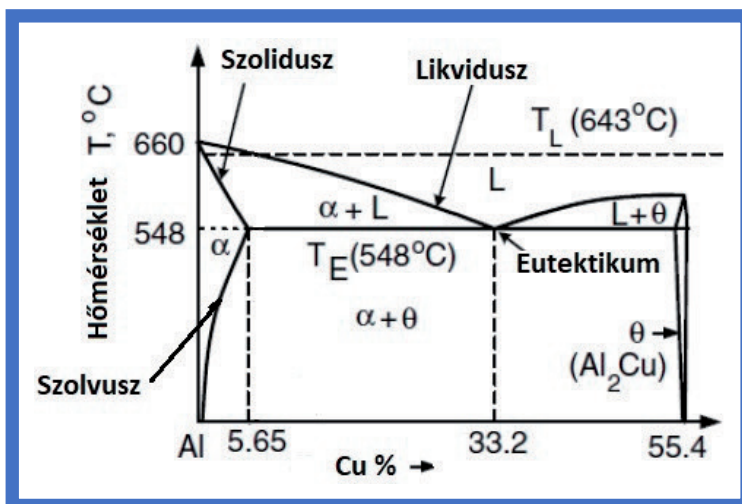
Nem hőkezelhető Al-Mn-ötvözetek EN AW 3003 [EN AW-Al Mn1], Mn=1~1,5% és a EN AW 3004 [EN AW-Al Mn1Mg1], Mn=1~1,5%, Mg=0,8~1,3%, a Mn növeli a korrózióállóságot, lágy állapotban jól alakíthatók és hegeszthetők, légköri hatásokkal szemben ellenálló, rosszul forgácsolható, hozaganyag: Al99,5Ti (jó korrózióállóság), AlSi5 vagy Al99,5Ti (könnyű ömlesztés), AlMg5 (nagyobb szilárdság), AlMn1 (egyéb eset).

Nem hőkezelhető Al-Si-ötvözetek (4000). Az Al-Si-ötvözetek Si =0,8...13,5% +Mn, Mg, Fe-t tartalmaznak. Az AlSi5-ötvözet univerzális hozaganyag, alkalmazása akkor javasolt, ha nincs előírva szigorú szilárdsági követelmény. Huzalként alkalmazva számolni kell a lágyabb állapot miatti esetleges előtolási nehézségekkel.

2.20.3. Hőkezelhető alumíniumötvözetek

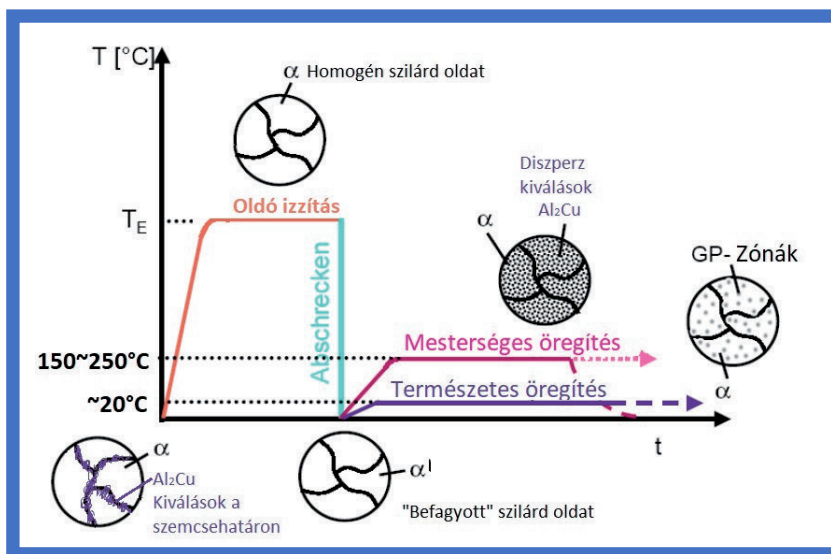
Azok az alumíniumötvözetek öregíthetőek vagy nemesíthetőek (kiválásos keményítés), melyeknél az alumínium korlátoltan oldja az ötvözőt és azzal adott összetételnél vegyületet képez. Az Al-Cu ötvözet igen jó példa az alumíniumötvözet nemesítésére. Az Al a Cu-t korlátoltan oldja (maximális Cu oldóképesség 5,65% 547 °C-on), az eutektikus összetétel 33,2% Cu-nál van, 55,4% Cu-nél Al_2Cu rideg vegyület válik ki (2.20.5. ábra).

2.20.5. ábra. Az alumínium-réz kétalkotós egyensúlyi diagramja



Az 5,65%-nál kevesebb Cu-tartalmú Al-Cu-ötvözet nemesítése oldó izzítással kezdődik (a vegyület fázisok oldódása) az eutektikus hőmérséklet feletti hőmérsékleten. Ezt követi a gyors hűtés, mely során nem képződik kiválás, a gyors hűlés miatt oldatban marad az ötvöző. A túltelített befagyott szerkezet megeresztésével jönnek létre a kiválások diszperz eloszlásban. Ezt a lépést megeresztésnek nevezzük. A megeresztés mesterségesen nemesíthető ötvözet esetén 150~250°C között, míg természetesen nemesíthető ötvözet esetén szobahőmérsékleten történik.

2.20.6. ábra. Al-Cu-ötvözet nemesítése



A fontosabb hőkezelhető (nemesíthető) Al-ötvözetek (zárójelben a kiváló vegyületek):

2.20.7. ábra. Hőkezelhető alumíniumötvözetek

Al-Mg-Si (Mg_2Si) Al-Cu-Mg (Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_6CuMg_4) Al-Zn-Mg (Al_2Mg_3Zn , $MgZn_2$) Al-Li-Cu-Mg-Zr			
Al-Cu EN AW-2000	Al-Mg-Si EN AW-6000	Al-Zn EN AW-7000	Egyéb ötv. EN AW-8000
Cu=1,8...6,8% (+Mn, Mg, Pb, Si)	Mg=0,4...1,5% Si=0,2...1,4%	Zn=0,8...8,2% (Mg=0,1...3,7%) (Cu=0,05...2,6%)	Fe=0,3...2,0% Mn=0,1...1,0% Si=0,2...1,1%
Al Cu2,5Mg Al Cu2,5NiMg Al Cu4Mg1 Al Cu4SiMg	EAl MgSi Al 99,9MgSi Al MgSi0,3Cu Al MgSi0,5 Al MgSi Al MgSiMn Al Mg1Si0,8 Al Mg1SiCu Al SiMg Al Si1MgMn	Al Zn1 Al Zn4,5Mg1 Al Zn5MgZr Al Zn6MgCu	Al Fe1Mn Al Fe1Si Al FeSiCu

Hőkezelhető Al-Mg-Si-ötvözetek (6000). Az Al-Mg-Si-ötvözetek Mg=0,3...1,5%, Si=0,2...1,4% + Fe, Cu, Mn-t tartalmaznak. Mesterségesen nemesíthető ötvözetek, igen jó elektromos vezetők, korrózióállóságuk hasonló az ötvözetlen Al-hez, közepes vagy nagyobb szilárdságúak (ha az Mg ↑), jól fényesíthetők és anódizálhatók.

Hőkezelhető Al-Mg-Si-ötvözetek, a Si és a Mg növeli a repedésérzékenységet, ha a Mg:Si=1,7 (ez felel meg az Mg_2Si nek) és kicsi a veszély, ha a Si >1%, és a Mg <1%. Hőkezelhető Al-Mg-Si ötvözet EN-AW-6062 [EN AW-Al Si1MgMn] Si=0,7...1,3% Mg=0,6...1,2% Mn=0,1%, közepes szilárdságú ($R_m \approx 295$ MPa), jól alakítható és forgácsolható, jól hegeszthető, ha a Si=0,5%, hozaganyag: AlMg3, nagyobb szilárdság és nyúlás esetén AlMg4,5Mn vagy AlMg5, repedésveszély esetén AlSi5.

Hőkezelhető Al-Mg-Si-ötvözet EN-AW-6060 [EN AW-Al MgSi] Mg=0,35~0,6%, Si=0,3~0,6% kis szilárdságú ($R_m \approx 190$ MPa), extrudált idomok anyaga, a felkeményedés az alakítási hő során megy végbe, előállítása olcsó, jól hegeszthető, hozaganyag: AlMg3, nagyobb szilárdság és nyúlás esetén AlMg4,5Mn vagy AlMg5, repedésveszély esetén AlSi5.

Hőkezelhető Al-Cu-Mg-ötvözetek (2000) Az Al-Cu-Mg-ötvözetek Cu=1,8~6,8%-ot, Mg=0,02~1,9% + Si, Mn, Fe, Ni tartalmaznak. Természetesen öregíthető, nagy szilárdságú, lágy, ill. gyorsan hűtött állapotában jól alakítható, de kevésbé korrózióálló (ezért gyakran két oldalról borítják = szendvicsszerkezet).

Hőkezelhető Al-Cu-Mg-Si-ötvözet EN-AW-2017 [EN AW-Al Cu4MgSi] Cu=3,5~4,5%, Mg=0,4~1%, Si=0,2~0,8% természetesen öregíthető ötvözet, nagy szilárdságú ($R \approx 385$ MPa), rosszul alakítható, jól forgácsolható, korrózióállósága gyenge, rosszul hegeszthető (a Cu melegrepedést idéz elő), ezért feltétlenül elő kell melegíteni hegesztés előtt, hozaganyag: AlSi5, AlSi12Fe.

Hőkezelhető Al-Zn-Mg-ötvözetek (7000). Az Al-Zn-Mg-ötvözetek Zn=0,8~8,4%, Mg=0,1~3,7% + Cu (0,05~2,6%-)et tartalmaznak. Mesterségesen öregíthető ötvözetek, korrózióállósága az Al-Mg-Si és

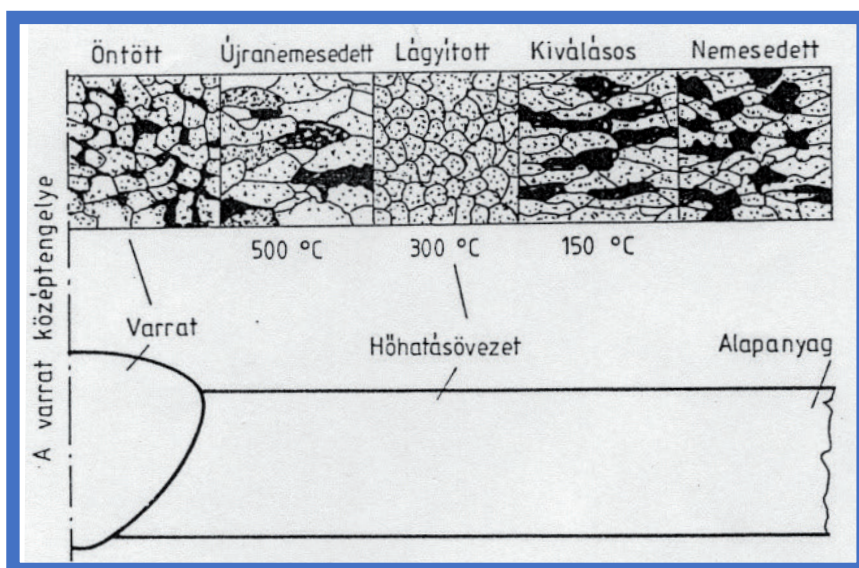
az Al-Cu-Mg között van. Jól hegeszthető és forgácsolható, hidegen vagy melegen öregíthető. Alkalmazása hegesztett szerkezethez (gépipar, járműipar, bányaiipar).

Hőkezelhető Al-Zn-Mg-Cu-ötvözet EN-AW-7075 [EN AW-Al Zn5,5MgCu] Zn= 5,1~6,1%, Mg=2,1~2,9%, Cu=1,2~2%, természetesen öregíthető ötvözet, igen nagy szilárdságú ($R_m \approx 530$ MPa), rosszul alakítható, jól forgácsolható, közepesen hegeszthető, hozaganyag: AlMg4,5Mn vagy AlMg5, repedésveszély esetén AlSi5 vagy AlSi12Fe.

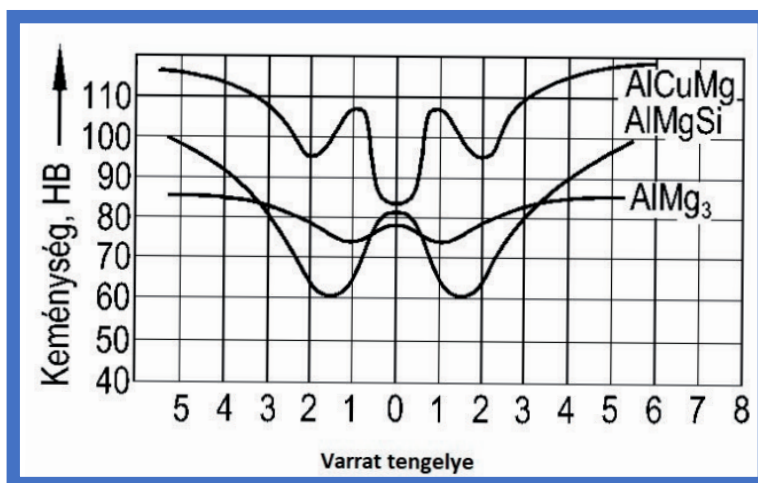
Hőkezelhető Al-Li-Cu-Mg-Zr-ötvözetek, az Al-Li-Cu-Mg-Zr-ötvözetek Li=1,7~28 %, Cu=1~3%, Mg=0,25~1,9%, Zr=0,04...0,16%-ot tartalmaznak. Az Al a Li-t korlátoltan oldja, így az ötvözet nemesíthető. Nagy szilárdságú ($R_p0,2 > 500$ MPa), hidegen és melegen jól alakítható, jó korrózióálló. Li-ötvözéssel a tömeg jelentősen csökkenthető, mivel sűrűsége $\rho = 0,534$ kg/dm³). A Li továbbá erőteljesen növeli az Al rugalmassági modulusát.

A hőkezelhető alumíniumötvözetek hőhatásövezetében hegesztés során kialakuló szerkezetet mutatja a 2.20.12. ábra. A varrat öntött, dendrites szerkezetű, míg a túlhevített övezetben (500°C) az ötvözők oldatba mennek. Ha természetesen nemesíthető ötvözetéről van szó, akkor a lehűlést követően szobahőmérsékleten ismét létrejön az öregedési folyamat és a szilárdságnövekedés, ha mesterségesen nemesíthető akkor viszont veszít a szilárdságából. A hőhatásövezet 300°C-ra hevült szakaszában lágyulás következik be, a kiválások csak részlegesen oldódnak. A 150°C-ra hevült szakaszban, ami megfelel a megeresztési hőmérsékletnek, kiválások jönnek létre, ami szilárdságnövekedést is okozhat. Ez alatti hőmérsékleten a nemesített szerkezet megmarad, a kiválások nem oldódnak és több kiválás sem jön létre, ezért nem történik szilárdságváltozás.

2.20.8. ábra Hegesztett kötés és a hőhatásövezet szerkezete nemesíthető alumíniumötvözetek esetén



2.20.9. ábra A varrat tengelyétől mért távolság függvényében a keménység-értékek különböző ötvözetek esetében



2.20.10. ábra Öntészeti alumíniumötvözetek

2.20.10. ábra Öntészeti alumíniumötvözetek

AlCu EN AC-2xxxx	AlSi EN AC-4xxxx	AlSiMg EN AC-4xxxx	AlSiCu EN AC-4xxxx	AlMg EN AC-5xxxx	AlZnMg EN AC-7xxxx
Al Cu4Ti Al Cu4TiMg nemesíthető, legnagyobb szilárdságú	Al Si11 Al Si12 Al Si12(Cu) igen jól önthető, vékonyfalú elemekhez	Al Si5Mg Al Si7Mg Al Si9Mg Al Si10Mg nemesíthető, jól-kiválóan önthető	Al Si6Cu4 Al Si9Cu3 Al Si17Cu4Mg Al Si18CuNiMg jól önthető, jól megmun- kálható	Al Mg3 Al Mg5 Al Mg9 korrózióálló, dekoratív, anódizálható, polírozható	Al Zn2MgSi Al Zn5Mg Al Zn10Si8Mg dekoratív, anódizálható, oldó izzítás nélkül keményíthető

Nem hőkezelhető öntészeti Al-Si-ötvözetek (40000). Az Al-Si-ötvözetek (szilumin) 6...13,5% Si-t tartalmaznak. A kisebb Si-tartalmú ötvözetekből (6...9%) alárendelt célokra, kevésbé igénybevett alkatrészeket öntenek. A nagyobb Si-tartalmú ötvözetekből vékony falú, rezgés- és nyomásálló, továbbá dinamikus és fárasztó igénybevételnek kitett öntvényeket készítenek. Pl. EN AC 44200 (EN AC-AlSi12). Az öntött szövetszerkezet finomítható Na- vagy Sr-adagolással, ezáltal a Si finomabb formában válik ki és így javulnak a mechanikai tulajdonságok

Nem hőkezelhető öntészeti Al-Mg-ötvözetek (50000). Az Al-Mg-ötvözetek 3...12% Mg-t tartalmaznak. Kiváló korrózióálló (vegyszer, élelmiszeripar), tenger- Vízálló (hajóépítés), jól fényesíthető, eloxálható (műszeripar, építőipar). 7%-nál kisebb Mg-ötvözkor homogenizáló izzítással a szilárdságát lehet növelni. Kevés Si-ötvöztetés (< 1%) esetén nemesíthető (Al Mg₃, Al Mg₅, Al Mg₉).

Hőkezelhető öntészeti Al-Cu-ötvözetek (20000). Az Al-Cu-ötvözetek 4,2~5,2% Cu-t +kisebb mennyiségben Mg-t, Ti-t (0,15~0,35) tartalmaznak. Ni-lel ötvözött változata (≈ 2%) gyakori dugattyúötvözet.

Hőkezelhető öntészeti Al-Si-Mg-ötvözetek (40000). A hőkezelhető Al-Si-Mg-ötvözetek 6,5~11% Si-t és 0,2~0,7 Mg-t tartalmaznak. A legjobb szerkezeti anyagok, bonyolult vékonyfalú, nagy igénybevételnek és rezgésnek kitett járműöntvényekhez (pl. hengerfej, forgattyúsház, henger, motorblokk stb.). Közepesen- jól hegeszthető (pl. Al Si7Mg0,3, Al Si10Mg(Fe)).

Hőkezelhető öntészeti Al-Si-Cu-ötvözetek (40000). Az Al-Si-Cu-ötvözetek 4,5~17% Si-t és 0,8~4 Cu-t tartalmaznak. Nagy igénybevételnek kitett, nagyszilárdságú ötvözetek. Ni ötvözés esetén nagyobb melegsilárdságúak, ezért főként négyütemű (AlSi12CuNi), ill. kétütemű és dízelmotorok öntvényeihez javasolt (pl. AlSi18CuNi, AlSi25CuNi). Korrozíóállósága gyenge, hegeszthetősége közepes-jó, nyomásos öntvényénél nem javasolt.

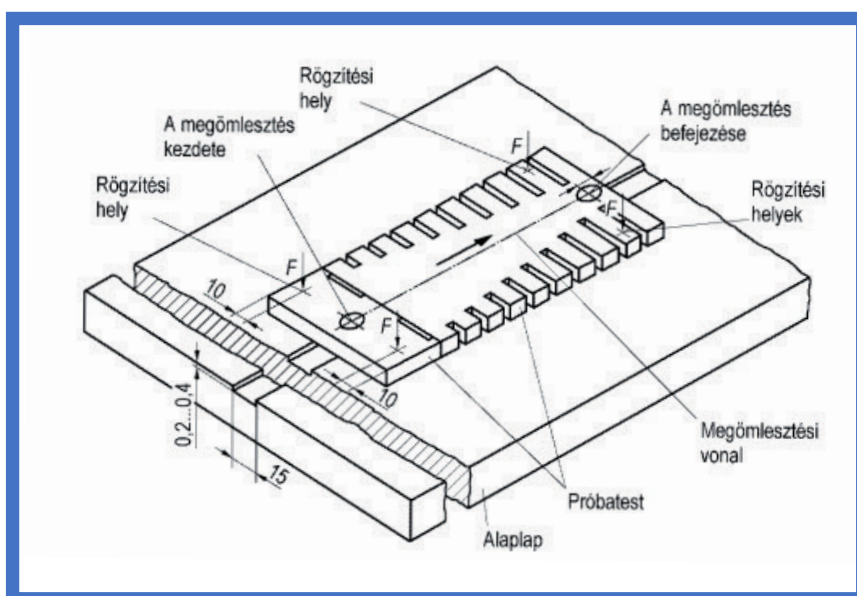
Hőkezelhető öntészeti Al-Zn-Mg-ötvözet (70000). A hőkezelhető Al-Zn-Mg-ötvözet 4~7% Zn-t és 0,3~0,7 Mg-t tartalmaz. Korrozíóállósága az Al-Mg-Si és az Al-Cu-Mg között van, szilárdsága igen nagy (pl. AlZn5Mg). Nem túl nagy Mg-tartalomnál kedvező nyúlású, önnemesedő, jól hegeszthető, hozaganyag: AlMg4,5Mn vagy AlMg5, repedésveszély esetén AlSi5 vagy AlSi12Fe.

Melegrepedés-érzékenységi vizsgálat

Az alumínium és ötvözeinek hegesztési melegrepedés-érzékenysége a halszáлка (változó merevségű) próbatesttel vizsgálható. A vizsgálat mindkét oldalán fokozatosan mélyülő bemetszésű – és ezáltal változó merevségű – próbadarab kijelölt keresztmetszetének gépi AWI- ($s = 2-6 \text{ mm}$) vagy gépi AFI- ($s = 4-6 \text{ mm}$) eljárással végzett megömlesztéséből áll. Az AWI-eljárást hozaganyag nélkül kell végrehajtani. A próbadarab kialakítása miatt annak hegesztőív mögötti területe a hő hatására szabadon deformálódhat, míg az ív előtti, még megömlesztetlen területen alakváltozás nincs. Ezért az ömledék mögötti varratszakaszon arra merőleges irányú síkbeli alakváltozás jön létre. Ezen alakváltozás, továbbá a varrat térfogatváltozása okozta zsugorodás hatására a megömlesztett részben kristályosodási repedés keletkezik.

Az alapanyag melegrepedés-érzékenységi hajlamát a melegrepedt varratszakasz hossza jellemzi.

2.20.11. ábra. Alumínium hegeszthetőségi vizsgálata halszáлкаpróbával



2.21 A TITÁN ÉS ÖTVÖZETEI HEGESZTÉSE

2.21.1. A titán tulajdonságai

A titán reaktív fém; 600°C -on tiszta oxigénben, 800°C körül pedig nitrogénben fog égni. Az oxigén és a nitrogén 400°C feletti hőmérsékleten is diffundál a titánba, növelve a szakítószilárdságot, de megromlálva a fémét. Por vagy fémforgács formájában a titán is tűzveszélyes. A reaktivitás ellenére a titánt széles körben használják vegyi feldolgozásban, tengeri és űrhajózási alkalmazásokban.

Ennek oka, hogy:

- ◆ A szívós oxidréteg, amely az ötvözeteknek nagyon jó korrózióállóságot biztosít, különösen kloridtartalmú környezetben.
- ◆ Nem csökken a szívósság -196°C-ig
- ◆ Jó kúszás- és oxidációs-ellenállás akár 600°C hőmérsékleten is.
- ◆ Hasonló szilárdságú, mint az acél, de a sűrűsége kicsi.

A titán és ötvözetei oxigénre, nitrogénre és hidrogénre gyakorolt affinitása és az azt követő törékenység miatt a fluxusos hegesztési eljárások nem ajánlottak, bár ezeket elsősorban a volt Szovjetunióban alkalmazták. Az ívhegesztés ezért csak a gázzal árnyékolt eljárásokra (TIG, MIG és plazma-TIG) korlátozódik, bár tápperendákat, szilárdfázisú eljárásokat és ellenálláshegesztést is alkalmaznak. A titán allotróp; a hőmérséklettől és a kémiai összetételtől függően két különböző kristálytani formája van. 880°C alatt képezi a hexagonális, tömött alfa-fázist, 880°C felett térközepes köbös béta-fázis.

A mechanikai tulajdonságok javítására számos ötvözőelem használható, néhány stabilizálja az alfa-fázist, mások pedig elősegítik a béta-képződést. Az oxigén, a szén, a nitrogén és az alumínium elősegíti az alfa-fázis kialakulását; a króm, molibdén, niobium, ón és vanádium elősegíti a béta képződését. Ezen elemek megfelelő hozzáadásával négy titánötvözetcsaládot állítanak elő, a lehetséges szövetszerkezet alapján, kereskedelmi forgalomban tiszta titánra, alfa- vagy közel alfaötvözetekre, alfa-bétaötvözetekre és bétaötvözetekre. Az ASTM-jelölések, egy egyszerű számozási rendszer, a leggyakrabban használt rövidített jelölést alkalmaznak a különböző ötvözetek azonosítására, és mindezeket, mind az ötvözet összetételét, pl. Ti-6Al-4V.

A kereskedelmileg tiszta, ötvözetlen ASTM 1–4 és 7 osztályok kismennyiségű szennyeződést, például oxigént, nitrogént és szenet tartalmaznak, általában kevesebb, mint 0,2%, és mechanikai tulajdonságaik megegyeznek a jó minőségű, alacsony széntartalmú acél tulajdonságaival. Minél kevesebb szennyeződés van, annál kisebb a szakítószilárdság. Ezen ötvözetek többségét korrózióállóságuk miatt használják. A hegesztés egyszerű, és kevés hatással van a hőhatásövezet mechanikai tulajdonságaira. A Ti-5Al-2.5Sn alfa és közel alfa-ötvözetek maximális szakítószilárdsága $R_m = 500\sim900\text{MPa}$. A kereskedelmi forgalomban tiszta ötvözetekhez hasonlóan ennek a csoportnak a mechanikai tulajdonságai érzéketlenek a hőkezelésre. A hegeszthetőség jó, az ötvözeteket lágyított állapotban hegesztik.

A béta-ötvözetek, pl. Ti-13V-11Cr-3Al, hasonló szilárdságúak, de kissé növelt a rugalmasságuk, jellemzően körülbelül 15%-os nyúlás. A béta-fázist metastabilnak nevezik – a hidegalakítás vagy a megemelt hőmérsékletre történő hevítés részleges átalakulást okozhat alfa-vá. Az ötvözetek nagy szilárdságúak, nagyon jó kovácsolhatóságúak és nagyon képlékenyek, jól hegeszthetők.

A hegeszthetőség, mint fentebb említettük, általában nagyon jó. Kivételt képeznek a magas béta alfa-béta-ötvözetek. A titánötvözetek hegesztésének alapvető problémája a légköri szennyeződések megszüntetése. A varrat fém- és a hőhatásövezet-szennyeződése növeli a szakítószilárdságot és a keménységet, de elfogadhatatlanul alacsony értékre csökkentheti a hajlékonyságot, így repedések keletkezhetnek. A legvalószínűbb szennyeződések az oxigén és a nitrogén, amelyeket a gázpajzsba beszívó levegő vagy a szennyezett védőgáz, valamint a nedvesség vagy a felületi szennyeződés okoz.



A hegesztés során a hegesztés 520°C feletti hőmérsékletnek kitett részei oxigént és nitrogént szívnak fel, ezért védeni kell őket, amíg le nem hűlnek a kritikus hőmérséklet alá. Szerencsére a titán hővezetése alacsony, így az érintett terület mérete korlátozott, és a hűtőblokkok felhasználhatók a fűtött zóna további csökkentésére. Az olvadt hegesztési medencét a normál gázburkolat védi, de a hűtőhegesztés és a HAZ további védelmet igényel a hegesztőpisztoly mögötti, saját védőgáz-ellátású zárópajzs használatával. A hegesztési varrat hátsó felülete is hasonló védelmet igényel, hatékony gázvezetéssel.

A felület elszíneződése jól jelzi a légtér szennyezettségének mértékét, amint azt a színtábla mutatja. Tökéletes gázvédelem mellett a varrat fényes és ezüstös megjelenésű lesz. Az elszíneződés a hőhatásövezet külső szélein általában nem jelentős, és figyelmen kívül hagyható. A szennyeződés növekedésével a szín ezüstről világos szalmaszínre változik, majd sötét szalma, sötétkék, világoskék, szürke és végül porfehér. A világos és sötét szalmaszínnek kis szennyeződést jeleznek, amely általában elfogadható. A sötétkék a súlyosabb szennyeződést jelzi, amely a szolgáltatás körülményeitől függően elfogadható lehet. A világoskék, a szürke és a fehér szín olyan mértékű szennyeződést jelez, hogy elfogadhatatlannak tekintik őket. Többsoros hegesztéseknél a szennyeződés nyilvánvalóan hatással lesz minden további hegesztési sorra, így a felület megjelenése önmagában nem megbízható útmutató arra vonatkozóan, hogy elfogadhatatlan szennyeződés történt-e vagy sem.

Az egyszerű hajlító vizsgálat megbízható; itt a roncsolásos módszer annak ellenőrzésére, hogy a hegesztésben repedés képződött, de figyelembe kell venni, hogy a hajlítási sugár az adott ötvözetből függően változik. Például 3t hajlítási sugarat használnak a 2. fokozatú hegesztések teszteléséhez, de 10t hajlítási sugarat használnak a Ti-6Al-4V teszteléséhez. Hordozható keménységvizsgálatok is elvégezhetők.

Titán mechanikai tulajdonságai:

- ◆ Sűrűsége $4,5 \text{ kg/dm}^3$ kicsi.
- ◆ A nagy tisztaságú titán kis szilárdságú.
- ◆ $R_m = 250 - 730 \text{ MPa}$.
- ◆ $R_{p0,2} = 195 - 660 \text{ MPa}$.
- ◆ $A_{10} = 40 - 60\%$.
- ◆ Keménység $140 - 200 \text{ HV}$.

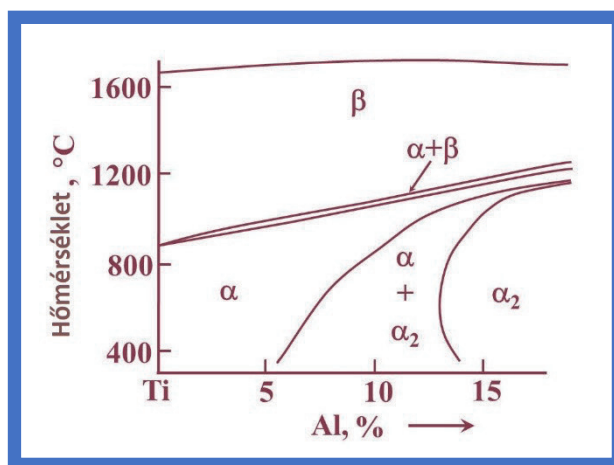
Ti kémiai és fizikai tulajdonságai: fajlagos ellenállása a hőmérséklet növekedésével nő. Igen jó korrózióálló, felületén vékony összefüggő oxidréteg jön létre. C-, N-, O-elemekkel intersztíciós szilárd oldatot alkot. A periódusos rendszerben a titán a cirkonnal (Zr), hafniummal (Hf) és tóriummal (Th) egy csoportba tartozik. Atomsúlya 47,9, olvadási hőmérséklete $T_{\text{Top}} = 1667^{\circ}\text{C}$, allotróp átalakulási hőmérséklete $T_{\text{allotróp}} = 882^{\circ}\text{C}$ (hexagonális α - térközepes köbös β).

Titán ötvözetek

- ◆ Leggyakoribb ötvöző Al, amit korlátoltan old.
- ◆ Vegyületeket alkot Ti_3Al , TiAl , TiAl_2 , TiAl_3 .
- ◆ Allotróp átalakulású.
- ◆ Jól hegeszthető.
- ◆ Nem mágnesezhető.
- ◆ Hidegalakítással keményíthető.
- ◆ Nehezen forgácsolható.
- ◆ Jó korrózióállóságú.



2.21.1. ábra. Ti-Al kétalkotós egyensúlyi diagram részlete



2.21.2. Szennyezők és ötvözők hatása a titánra

Technikai tisztaságú titán mechanikai tulajdonságai a szennyezőtartalomtól függők:

- ◆ Fő szennyezők: Fe, C, N, O, H, Si.
- ◆ Keménységet növelik O, N.
- ◆ Kúszásra hajlamos.

Oxigén hatása

- ◆ Titán nagy oxigén affinitású.
- ◆ Megengedett mennyisége 0,01–0,04%.
- ◆ Növekvő mennyiségben a szilárdság, folyáshatár, keménység erősen nő, nyúlás csökken.

Nitrogén hatása

- ◆ Hatása hasonló az oxigénhez, szakítószilárdságot, keménységet növeli, nyúlást csökkenti.
- ◆ Jól oldódik a titánban.
- ◆ Megengedett mennyiség 0,03–0,07%.
- ◆ Erős nitridképző.

Oxigén, nitrogén és karbon együttes hatása

- ◆ Oxigén egyenérték: $O_e = \frac{2}{3} C + 2N + O$.

C hatása:

- ◆ Kevésbé oldódik, kismértékű szilárdságnövekedést okoz.
- ◆ Megengedett mennyiség 0,02–0,015%.

Vas hatása

- ◆ Fe keménységet növeli.
- ◆ Megengedett mértéke 0,1–0,5%.



Hidrogén hatása

- ◆ Hidridet képez (TiH).
- ◆ Ütőmunkát csökkenti.

Ti ötvözői

- ◆ „α képző ötvözők: Al, Sn, Mo, Zr, (O, N, C).
- ◆ „α + β képző ötvözők: Mo, Al, Cr, V.
- ◆ „β képző ötvözők: Cr, Fe, Mo, Zr, V, (H).

„α –típusú ötvözetek

- ◆ Főként Al, és az Al+Sn.

Jellemzők:

$R_m = 850\text{--}1000 \text{ MPa}$

$R_{p0,2} = 750\text{--}900 \text{ MPa}$

$A = 10\text{--}18\%$

Jól alakíthatók, kúszásállók, hegeszthetők.

„α-β típusú ötvözetek

- ◆ Pl. Ti-6Al-4V, biokompatibilis, implantátumok jellemző ötvöze.
- ◆ Nemesíthető ötvözetek.
- ◆ Gyengén ötvözött változatok jól alakíthatók.
- ◆ $R_m = 900\text{--}1300 \text{ MPa}$.
- ◆ $R_{p0,2} = 850\text{--}1200 \text{ MPa}$.
- ◆ Jó melegszilárdság.

„β típusú ötvözetek

- ◆ Pl. Ti-10Al-Fe–Cr.
- ◆ Jól alakíthatók.
- ◆ Hegeszthetők.
- ◆ $R_m = 900\text{--}1200 \text{ MPa}$.
- ◆ $R_{p0,2} = 800\text{--}1100 \text{ MPa}$.
- ◆ $A = 8\text{--}12\%$.
- ◆ Szennyezésre fokozottan érzékenyek (C, O).

2.21.3. Titán és ötvözeiteinek hegesztése

Hegesztési problémák:

- ◆ Gázelnyelő képessége nagy.
- ◆ Fémes vegyületképződési hajlam.
- ◆ Közbenső fázisok kialakulása jellemző.



- ◆ Szemcsedurulás (Kis hővezető képesség miatt szemcsedurulásra hajlamos, ezért hűtéssel, kis hőbevitellel hegesztendő).
- ◆ Porozitás képződés.
- ◆ Gázelnyelő képesség.
- ◆ A gázok bejutásának lehetőségei.
- ◆ Hegesztőanyag felületi szennyezettsége.
- ◆ Gázközeg összetétele, nedvessége.
- ◆ Lemezék felületi minősége.
- ◆ Nem megfelelő felületi előkészítés a mdb-on.
- ◆ Helytelen hegesztési eljárás.
- ◆ Hegesztési utasítás be nem tartása.
- ◆ Intermetallikus vegyületképződési hajlam.
- ◆ A Ti a legtöbb fémmel tű-, vagy lapalakú szövetelemként megjelenő intermetallikus vegyületet képez.
- ◆ Vassal képzett vegyületek repedést okozhatnak.
- ◆ Közbenső fázisok kialakulása.
- ◆ Hegesztés során hajlamos közbenső fázisok kiválására.
- ◆ Kis hőbevitellel elkerülhető szemcsedurulás.
- ◆ Hajlamos szemcsedurulásra ezért a hőbevitelt korlátozni kell.
- ◆ Kis hőbevitel, esetleg hűtés.
- ◆ Porozitás-képződés.
- ◆ Hegesztés során a varrat argont nyelhet el, mely a gyors dermedés miatt porozitást okoz.
- ◆ A védőgáz mennyiségének beállítására különös gondot kell fordítani.
- ◆ A levegő nedvességtartalmára valamint a huzatra is figyelemmel kell lenni a gáznyelési hajlam miatt.
- ◆ Levegő okozta porozitás.
- ◆ Huzat nem engedhető meg.
- ◆ A levegő nedvességtartalma max, 60% lehet Ti hegesztésekor.
- ◆ Zárt térben szabad csak hegeszteni.

Ti és ötvözeinek hegesztése

- ◆ Leggyakrabban AWI főként vékony lemezeknél $s \leq 3$ mm (egyes $\alpha+\beta$, ill. β típusú ötvözetek kivételével).
- ◆ Bevont elektródás ívhegesztés.
- ◆ AFI ötvözetlen Ti, és Ti-Pb-ötvözetek.
- ◆ Plazmahegesztés (egyes $\alpha+\beta$, ill. β típusú ötvözetek kivételével).
- ◆ Elektronsugaras hegesztés minden ötvözetre.
- ◆ Lézersugaras hegesztés minden ötvözetre.
- ◆ Ellenállás-hegesztés minden ötvözetre.
- ◆ Egyéb sajátos hegesztési eljárások (főként ötvözetlen Ti-, valamint Ti-Pb, Ti-Al-ötvözetekre).



AWI-hegesztés

- ◆ Egyenáram, egyenes polaritás.
- ◆ Ar- vagy He-védőgáz vagy ezek keveréke.
- ◆ Folyósítószer alatt végzett hegesztésnél 500–650 A ajánlott.
- ◆ Impulzusos AWI-hegesztéssel is végezhető.
- ◆ Elektróda nagytisztaságú volfrám, egyenáram, egyenes polaritás esetén vége kúposra kiképzett.
- ◆ Gázvédelem, a varrat és a gyökoldal gázvédelme is szükséges.

AFI-hegesztés

- ◆ Ar vagy He-védőgáz vagy ezek keveréke.
- ◆ Félautomatikus (huzaladagolás automatikus).
- ◆ Automatikus.
- ◆ Egyenáram, fordított polaritás.
- ◆ Impulzussal.
- ◆ Hegesztőhuzal az alapanyaggal megegyező.

Plazmahegesztés

- ◆ Semleges védőgáz, Ar, Ar+He.
- ◆ Koncentrált hőbevitel, kevesebb deformáció, vetemedés.
- ◆ Kis hőbevitel, csökken a szemcsedurvulási hajlam.
- ◆ Technológia-érzékeny az ívhossz-változásra.
- ◆ Kedvező varratszélesség/varratmélység viszony $\frac{1}{2}$ (vastagabb lemezek leélezés nélküli tompahegesztése).
- ◆ automatizálható.

Elektronsugaras hegesztés

- ◆ Vákuumban történő hegesztés, varrat védelme megoldott.
- ◆ Nem szükséges leélezés, élkiképzés.
- ◆ Nem szükségesek segédanyagok.
- ◆ Kis és nagysorozatú gyártásra egyaránt alkalmas.
- ◆ Keskeny, mély hornyokban is hegeszthető.
- ◆ Széles lemezvastagság tartományban.

Iparban alkalmazott ömlesztő-sajtoló hegesztések Ti és ötvözeiteinél

- ◆ Ponthegeztés.
- ◆ Vonalhegesztés.
- ◆ Zömítő (sajtoló) és leolvasztó tompahegesztés.
- ◆ Duderhegesztés.



Ponthegesztés

- ◆ Max. 2,5mm lemezvastagságig
- ◆ Áramerősség 5–12 kA
- ◆ Hegesztési idő 0,1–0,4 másodperc
- ◆ Lemez összeszorító erő 2–7 kN
- ◆ Kemény munkarend (nagy áramerősség, rövid hegesztési idő)
- ◆ Védőgáz nem szükséges kemény munkarendnél
- ◆ Hegesztett varrat ellenőrzése a hegpont környezetének elszíneződése alapján
- ◆ Fényes fényű: nincs elridegedés, a hegesztési paraméterek helyesek
- ◆ Kékes színű: felületi elridegedésre utal, áramerősséget csökkenteni kell, elektród hűtését növelni
- ◆ Szürke színű: teljes elridegedést jelent. Vonalhegesztés.
- ◆ Áramerősség 6–12 kA.
- ◆ Hegesztési (impulzus) idő 0,1–0,25 másodperc.
- ◆ Hegesztési sebesség 0,6–0,8 m/perc.
- ◆ Összeszorító erő 2–5 kN.
- ◆ Varratszélesség 3–8 mm.
- ◆ Görgők hűtése célszerű.
- ◆ Varrat védelme Ar-védőgázzal.
- ◆ Max lemezvastagság 2,5 mm. Sajtoló hegesztési eljárások Ti és ötvözeinél.
- ◆ Súrlódó hegesztés.
- ◆ Vákuumdiffúziós hegesztés.
- ◆ Ultrahang hegesztés.
- ◆ Robbantásos hegesztés.

Termikus vágások Ti és ötvözeinél

- ◆ Lángvágás, acéloknál nagyobb sebességgel, csökkentett hőbevitellel.
- ◆ Plazmavágás, Ar+H₂ gázkeverékkel, hidrogénfelvétel-veszély.

Hegesztett kötések ellenőrzése

- ◆ Roncsolásmentes vizsgálatok, festékdifúziós, röntgen, ultrahangos.
- ◆ Roncsolásos vizsgálatok, szakítóvizsgálat, hajlító vizsgálat, keménységmérés, fárasztó-vizsgálatok, korróziós vizsgálatok, törésmechanikai vizsgálatok, metallográfiai vizsgálatok.



2.22 KÜLÖNBÖZŐ (ELTÉRŐ) ANYAGOK KÖTÉSE HEGESZTÉSSEL

2.22.1. Keveredés számítása

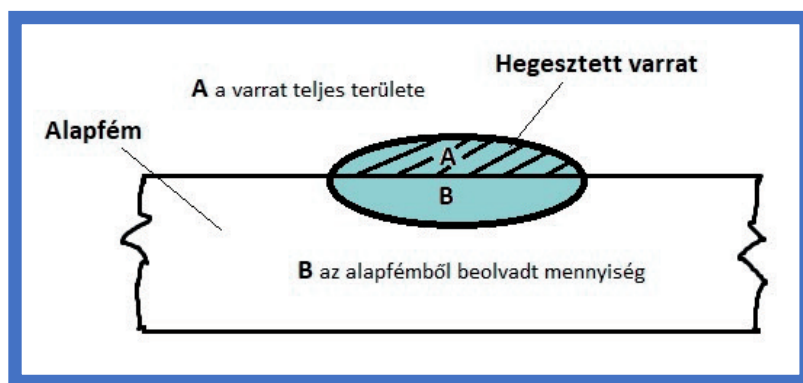
A különböző anyagok hegesztése során számos nehézséggel kell számolni. A különböző anyagok különböző fizikai (olvadáspont, hővezetési tényező, hőtágulás stb.) és kémiai (kémiai összetétel, oldóképesség, gázaffinitás, stb.) tulajdonságokkal rendelkeznek.

Heterogén kötés készítése során eltérő anyagcsoportokhoz tartozó anyagokat hegesztünk össze (pl. acél, nikkelt) vagy azonos anyagcsoporton belül, de metallurgiai eltérő anyagokat (pl. ausztenites korrozíóálló acél, szénacél) hegesztünk össze.

Ömlesztőhegesztés során az anyagok keverednek. A keveredési arány az egységnyi keresztmetszet alapján számítható. A keresztmetszetben B a megömlött alapanyag területe, A a varrat teljes területe egy keresztmetszetben mérve. D-keveredés ennek alapján számítva a 2.22.1. ábra jelölései szerint:

$$D = B / (A + B) \cdot 100 \%$$

2.22.1. ábra. Hegesztett varrat, keveredés



Egyes hegesztési eljárások az alkalmazott paraméterek figyelembe vételével 25–50% közötti keveredési arányt okozhatnak.

Eredő kémiai összetétel meghatározás, ahol

X_w : az adott elem átlagos mennyisége a varratban %,

X_a : az adott elem mennyisége az egyik (a) alapanyagban %,

X_b : az adott elem mennyisége a másik (b) alapanyagban %,

X_f : az adott elem mennyisége a hegesztőanyagban %,

D_a : az (a) alapanyag keveredése a varratban,

D_b : a (b) másik alapanyag keveredése a varratban,

D_f : az alapanyagok együttes keveredése a varratban.

$$X_w = D_a \cdot X_a + D_b \cdot X_b + X_f \cdot (1 - D_f)$$



2.22.1. táblázat. Számítási példa adott összetételű komponensek esetén

Anyag megnevezés		Kémiai összetétel %			Keveredés %
		Cr	Ni	Mo	
A acél	11CrMo 9-10	2,5	–	1	15
B acél	X2CrNiMo1712	17	12	2,5	20
C hegesztő anyag	S Ni 6082 (NiCr20Mn3Nb)	20	72	–	65

A keveredési arány és a kémiai összetétel alapján a Cr-, Ni- és Mo-tartalom:

$$Cr = \frac{15}{100} \cdot Cr_A + \frac{20}{100} \cdot Cr_B + \frac{65}{100} \cdot Cr_C = 0,15 \cdot 2,5 + 0,2 \cdot 17 + 0,65 \cdot 20 = 16,8 \%$$

$$Ni = \frac{15}{100} \cdot Ni_A + \frac{20}{100} \cdot Ni_B + \frac{65}{100} \cdot Ni_C = 0 + 0,2 \cdot 12 + 0,65 \cdot 72 = 49,2 \%$$

$$Mo = \frac{15}{100} \cdot Mo_A + \frac{20}{100} \cdot Mo_B + \frac{65}{100} \cdot Mo_C = 0,15 \cdot 1 + 0,2 \cdot 2,5 + 0 = 0,65 \%$$

2.22.11 Grafikus módszer

Válasszunk egy másik feladatot, amelynél a varrat veszélyzóna szerinti megfelelőségét ellenőrizzük a Schaeffler-, DeLong- és WRC-diagramok segítségével.

Schaeffler-diagram szerint meg kell határozni mind a három komponensre a króm és nikkel egyenértéket.

2.22.2. táblázat. A komponensek kémiai összetételei

Anyag megnevezés		C	Cr	Ni	Mo	Si	Nb	Mn
A acél	X6CrNiMnNb17-12-2	0,06	17	11,9	0,12	0,62	0,6	1,14
B acél	X2CrNi18-9	0,02	18	9	0	0,5	0	1
C hegesztő anyag	G 19 12 3 Nb	0,04	19	12,5	2,75	0,4	0,6	1,75

Schaeffler-egyenérték összefüggések:

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,55 \cdot Si + 2 \cdot Ti + 0,5 \cdot Nb$$

$$Ni_e = Ni + 30 \cdot (C + N) + 0,5 \cdot Mn + 0,5 \cdot (Cu + Co)$$



DeLong-egyenérték összefüggések:

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb$$

$$Ni_e = Ni + 30 \cdot C + 30 \cdot N + 0,5 \cdot Mn$$

WRC-egyenérték összefüggések:

$$Cr_e = Cr + Mo + 0,7 \cdot Nb$$

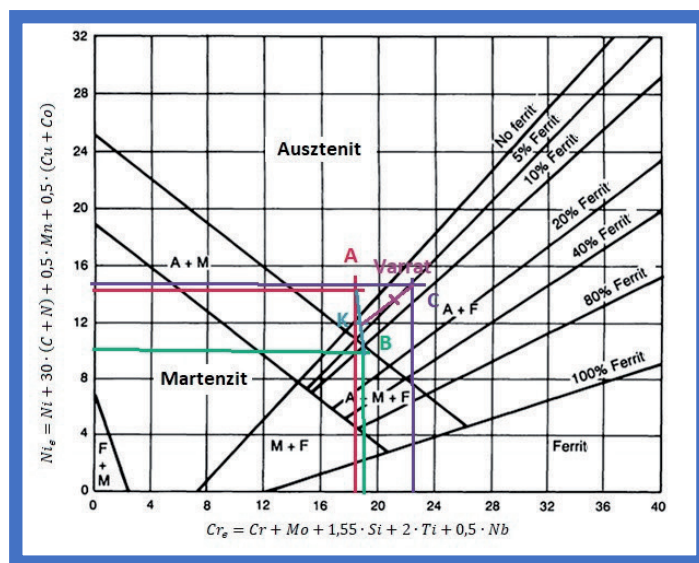
$$Ni_e = Ni + 35 \cdot C + 20 \cdot N + 0,25 \cdot Cu$$

2.22.3. táblázat. Nikkel- és króm-egyenérték meghatározása

Anyag megnevezés		Keveredés %	Schaeffler		DeLong		WRC	
			Cre	Nie	Cre	Nie	Cre	Nie
A acél	X6CrNiMoNb17-12-2	20	18,35	14,27	18,35	14,27	17,54	14,00
B acél	X2CrNiMo1712	20	18,75	10,10	18,75	10,10	18	9,7
C	G 19 12 3 Nb	60	22,65	14,58	22,65	14,58	22,17	13,90

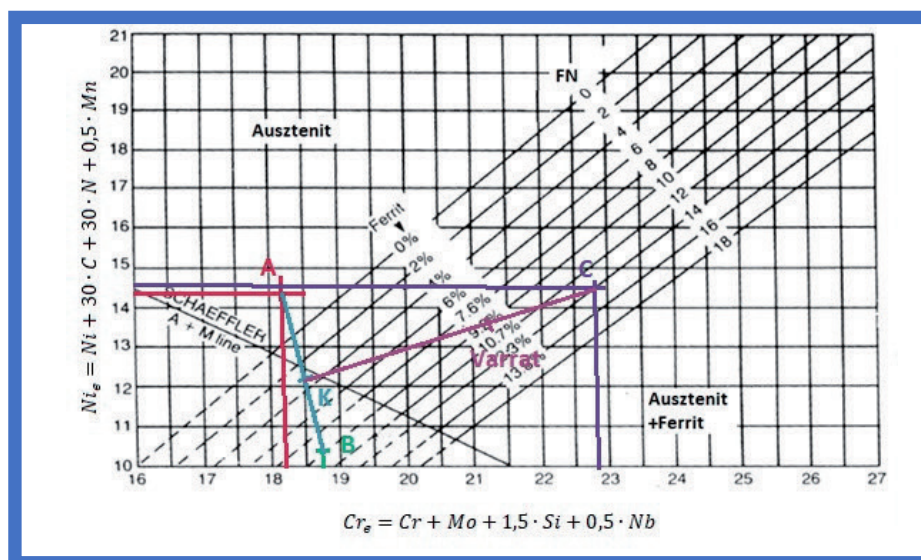
A Schaeffler-diagram egyenérték-számítás szerint kiszámított koordinátákat a diagramba jelöljük, A (Cre, Nie), B (Cre, Nie), C (Cre, Nie). Ezt követően az A és B pontokat összekötjük, mivel ezt a két acélt hegesztjük össze. Mivel mind a kettőből 20–20% keveredik a varrat ömledékbe ezért az A- és B-acél egymással 50–50%-ban keveredik. Az összekötött A és B szakaszt tehát középen jelöljük meg, ez lesz a K pont. Ezt követően a K pontot és a hegesztőanyag C pontot összekötjük. Ezt a szakaszt, mivel a hegesztő anyagból 60% az alapanyagokból pedig 40% keveredik a varrat ömledékbe ezért ezt a szakaszt kettéosztjuk, az emelő szabály szerint 60–40%-ra. Ez a pont lesz a varrat összetételének megfelelő pont, ami az 5% δ ferrit tartalmú ausztenites szövetszerkezetű lesz. Az összetétel alapján a varrat a biztonságos zónában található, így a varrat várhatóan megfelelő lesz.

2.22.2. ábra. Schaeffler-diagram a varrat ellenőrzése



A DeLong-diagram alkalmazásával ugyanúgy végezzük el a varrat meghatározását, mint a Schaeffler-diagram esetében.

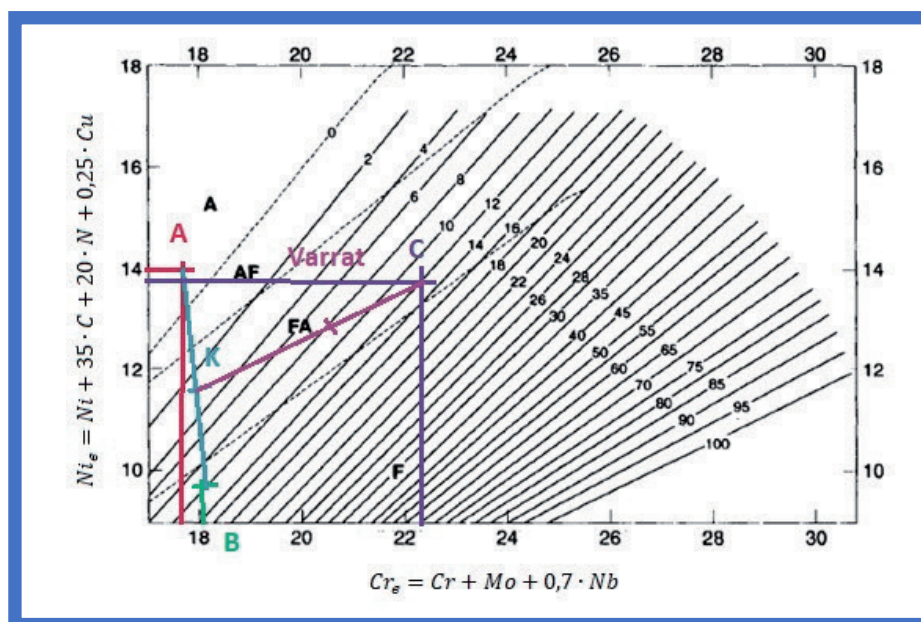
2.22.3. ábra. DeLong-diagram, varrat ellenőrzése



Bejelöljük az A, B és C pontokat illetve A és B keveredése szerint a K pontot majd a K és a C pont keveredése szerint a varratot. A varrat összetétele itt már pontosabban meghatározható a δ ferrit mennyisége 9,8%.

Ezután a WRC-diagram szerint kiszámított egyenértékekkel is meghatározzuk a varrat összetételét az előzőekkel azonos módon. A WRC-diagramban meghatározott varrat összetétel 8% δ ferritet tartalmaz.

2.22.4. ábra. WRC-diagram, varrat ellenőrzés



A grafikus ellenőrzés eredményeként elmondható, hogy mind a három diagram alapján a varrat összetétele megfelelő, a biztonságos területben található.

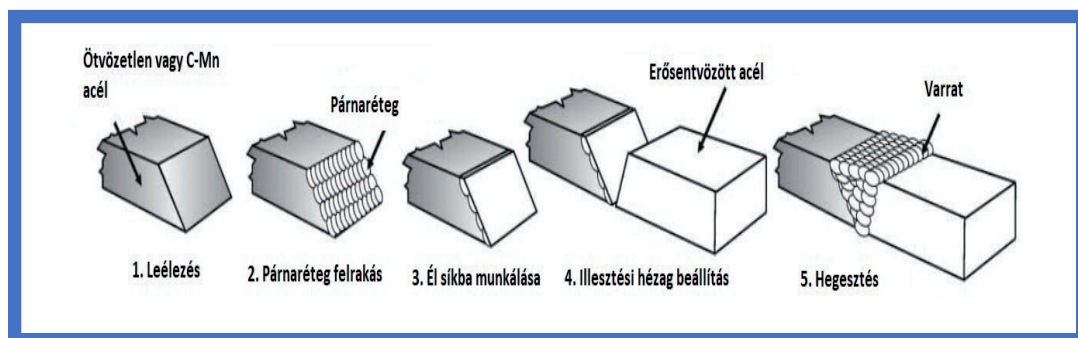
Korrózióálló és nem korrózióálló acélok közötti, valamint plattírozott lemezek hegesztett kötése esetén gyakran előfordul, hogy korrózióálló acélokat más acélcsoportba tartozó, például ferrit-perlites acélokkal kell összehegeszteni. A hegesztéskor nemcsak az eltérő összetétel okoz gondot, hanem az eltérő fizikai és kémiai tulajdonság-különbségek, pl. az eltérő hőtágulás is. Ezért az ilyen „vegyes” kötések készítése a hegesztőmérnöktől különösen nagy figyelmet és szakmai felkészültséget igényel. Hiszen a legtöbb esetben a két különböző acél hegesztéséhez egymást kizáró követelményeket kellene egyidejűleg kielégíteni. A feladat az, hogy a kötés üzemi körülményei, a fellépő igénybevétel mérlegelése alapján, az ennek leginkább megfelelő hegesztéstechnológia kerüljön kivitelezésre.

2.22.3 Eltérő anyagok hegesztés párnaréteggel

A hegesztési technológia során előmelegítés meghatározásánál, ha az egyik acélt elő kell melegíteni a másikat nem, akkor mindkét darabot elő kell melegíteni a megfelelő kötés kialakításához.

Abban az esetben, ha a két különböző acél összehegesztése a keveredés miatt nem megoldható közvetlenül, akkor nikkellalapú pl. 70% Ni- és 20% Cr-tartalmú (70/20 típusú) hegesztőanyag alkalmazása szükséges párnaréteggént. A párnaréteg kialakításának módját a 2.22.5. ábra mutatja.

2.22.5. ábra. Párnaréteg kialakítása



A varrat nikkeltartalmának növelésével a karbon diffúzióképessége csökken, ami a karbidképződés sebességét is csökkenti. Abban az esetben, ha az üzemi hőmérséklet 500°C -nál nagyobb, vagy hegesztés után $650\text{--}770^{\circ}\text{C}$ -on néhány órán át megeresztést kell végezni, csak 70/20 típusú hegesztőanyag alkalmazható. Ha az üzemi hőmérséklet $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$ között van, akkor a 70/10 típusú hegesztőanyag is megfelelő. Ausztenites 18/8 illetve 20/10 típusú hozaganyag csak akkor alkalmazható, ha a kötés megeresztést nem igényel, és az üzemi hőmérséklet 300°C -nál nem nagyobb.

2.22.4 Plattírozott lemezek hegesztése

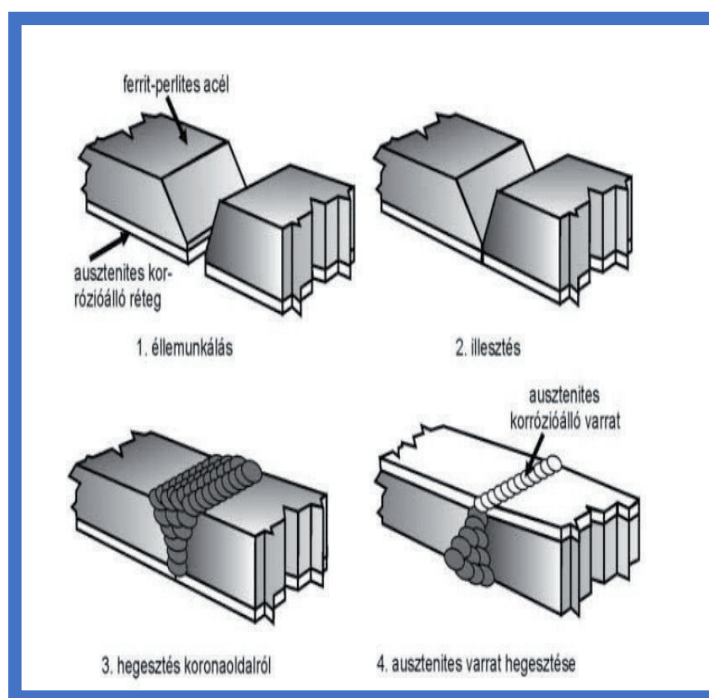
Az eltérő anyagcsoportba tartozó acélok közötti egyik igen jellegzetes eset a bevonatolt (pl. plattírozott) anyagok közötti hegesztett kötés. A bevonatolt anyagok olyan helyeken nyernek alkalmazást, ahol az anyag térfogatára kiterjedő (pl. mechanikai igénybevétel) és felületen ható (pl. koptató-, korróziós) igénybevétel is hat. Olyan anyag, amely mindkét, térfogati- és felületi igénybevételnek is megfelel, általában igen költséges. Egy ésszerű megoldás a társított, bevonatolt anyagok alkalmazása.



Ezeknél az anyagoknál a felületi igénybevételnek kitett felületeken valamilyen bevonatoló technológiával: felületötvöző hőkezelés (pl. nitridálás), folyadékfürdőbe-merítés (pl. horganyzás), hengerlés (pl. plattírozás), termikus fémszórás vagy felrakó hegesztés kell eljárni.

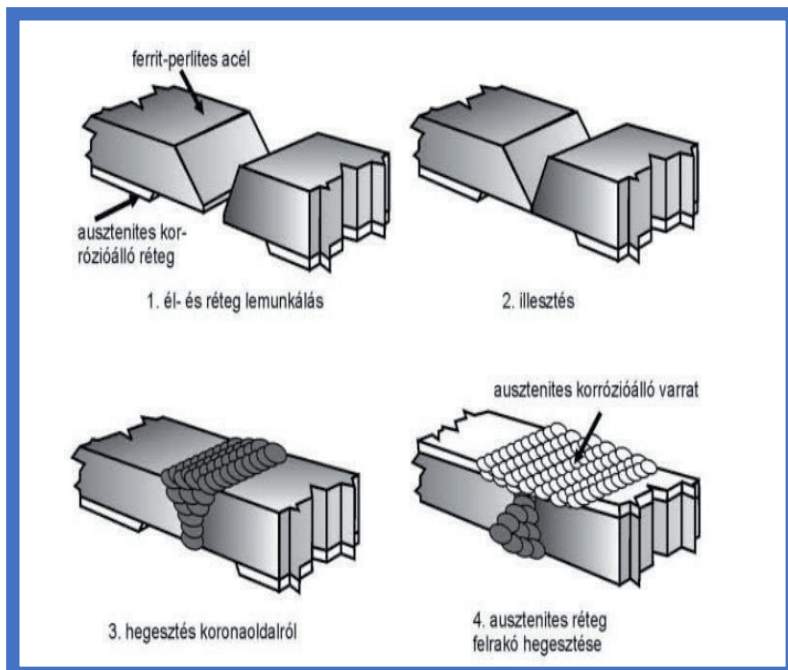
Az olyan lemezeket, amelyek szerkezeti acélokra plattírozott korrózióálló acélrétegűek széles körben alkalmazzák a vegy-, az olaj- és az élelmiszeripar területén tartályok, kolonnák, klávok gyártásához. Ha ezekhez a berendezésekhez teljes térfogatában korrózióálló ausztenites szövetszerkezetű acélt használnának, akkor ezen acélok kis folyáshatára miatt nemcsak lényegesen nagyobb falvastagságuk miatt nagyobb tömegű varratot kellene sokkal nagyobb időráfordítással elkészíteni, de az alapanyag költsége is egy nagyságrenddel nagyobb lenne. Vagyis a plattírozott alapanyagokból lényegesen gazdaságosabban lehet a terméket előállítani. A plattírozott anyagok hegesztésére számos módszert alkalmaznak. Két plattírozott anyag tompavarratos kötésének egyik legegyszerűbb módját mutatja be a 2.22.6. ábra, amelynél az alapanyag hegesztése az alapanyagnak megfelelő összetételű hozaganyaggal, a plattírozott réteg hegesztése a korábban ismertetett módszernek megfelelően meghatározott, nagyobb ötvöztartalmú, elsősorban nikkelben gazdagabb hegesztőanyaggal történik.

2.22.6. ábra, Plattírozott lemezek hegesztése



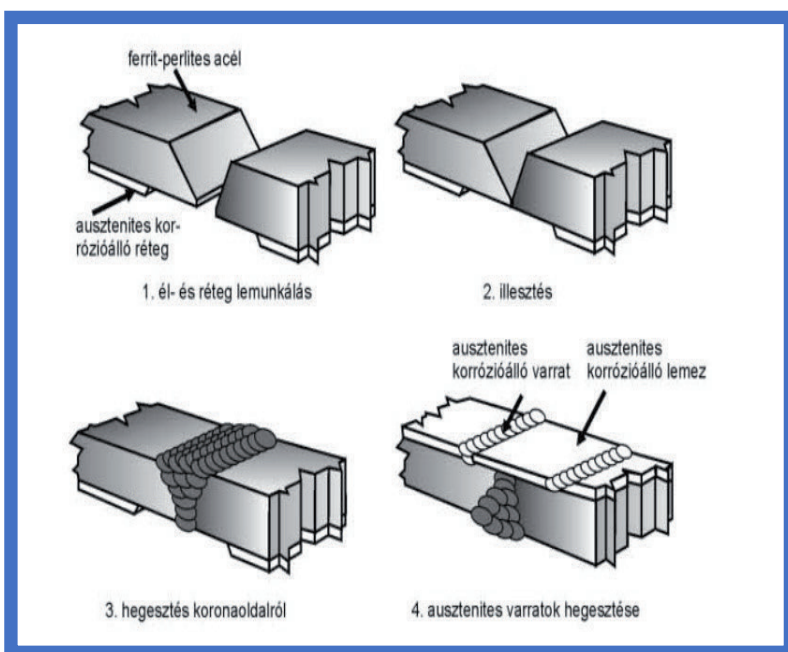
Két plattírozott anyag tompavarratos kötésének egy másik módját mutatja be a 2.22.7. ábra, amelynél az alapanyag hegesztése az alapanyagnak megfelelő összetételű hozaganyaggal, a korrózióknak kitett felület kétrétegű, felrakó hegesztésével a korábban ismertetett módszernek megfelelően meghatározott, nagyobb ötvöztartalmú hegesztőanyaggal történik.

2.22.7. ábra. Plattírozott lemezek hegesztése



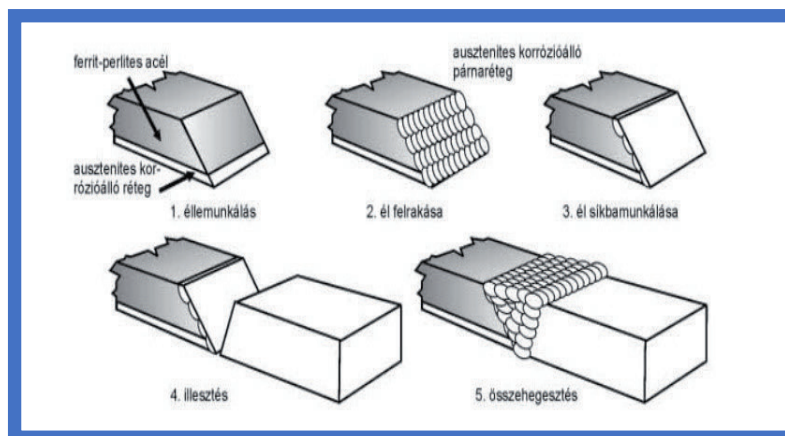
Két plattírozott anyag tompavarratos kötésének egy harmadik módját mutatja be a 2.22.8. ábra, amelynél az alapanyag hegesztése az alapanyagnak megfelelő összetételű hozaganyaggal, a korrózióknak kitett felület betétlemez beheszesztésével történik, ahol a hegesztőanyag hegömlédékeinek és a betétlemez összetétele közel azonos a plattír rétegével.

2.22.8. ábra. Plattírozott lemezek hegesztési technológiája



Plattírozott- és ausztenites szövetszerkezetű korrózióálló lemez közötti tompavarratos kötés hegesztésének módját mutatja be a 2.22.9. ábra.

2.22.9. ábra. Plattírozott lemezek hegesztése



Az ausztenites szerkezetű, de eltérő összetételű alapanyagok összehegesztésekor a megfelelő hozaganyag kiválasztásában a Schaeffler-diagram, illetve a DeLong-diagram nyújt segítséget. A teljesen ausztenites szerkezetű korrózióálló króm-nikkel acélok hegesztéséhez a kristályosodási repedési hajlam mérséklése érdekében egy kissé nagyobb mangántartalmú hegőmledéket adó hegesztőanyagot, és kis hőbevitelt eredményező technológiát célszerű választani. A hegesztőanyagot úgy kell megválasztani, hogy a varratban a nemkívánatos szövetszerkezet elkerülhető legyen.

Az olyan lemezeket, amelyek szerkezeti acélokra plattírozott korrózióálló acélrétegűek széles körben alkalmazzák a vegy-, az olaj- és az élelmiszeripar területén tartályok, kolonnák, klávok gyártásához. Ha ezekhez a berendezésekhez teljes térfogatában korrózióálló ausztenites szövetszerkezetű acélt használnának, akkor ezen acélok kis folyáshatára miatt nemcsak lényegesen nagyobb falvastagságuk miatt nagyobb tömegű varratot kellene sokkal nagyobb időráfordítással elkészíteni, de az alapanyag költsége is egy nagyságrenddel nagyobb lenne. Vagyis a plattírozott alapanyagokból lényegesen gazdaságosabban lehet a terméket előállítani. A plattírozott anyagok hegesztésére számos módszert alkalmaznak. Két plattírozott anyag tompavarratos kötésének egyik legegyszerűbb módja, ha az alapanyag hegesztése az alapanyagnak megfelelő összetételű hozaganyaggal, a plattírozott réteg hegesztése nagyobb ötvözőtartalmú elsősorban nikkelben gazdagabb hegesztőanyaggal történik.



