

TDK DOLGOZAT



A kritikus lehűlési idő és a keménység összefüggése növelt folyáshatárú acéloknál

Szerzők: Varga Róbert, Veres Atilla, III. éves gépészmérnök hallgatók

Konzulens: dr. Palotás Béla, egyetemi docens, tanszékvezető

Műszaki Intézet, Anyagtudományi Tanszék

Dunaújváros
2012

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	2
A nagyszilárdságú acélok hegesztési problémái	2
Ridegedés.....	2
Repedések a varratban és a hőhatásövezetben.....	3
Kristályosodási repedés	3
Hidegrepedés	3
Hogyan kerülhető el a hidegrepedés?.....	6
Kritikus lehűlési idő hegesztésnél	6
A mérés célja.....	8
Próbatestek	8
Hőciklus szimuláció	8
A mérés menete	11
Mérési eredmények.....	12
S460NL1	13
S690QL.....	13
S960E.....	14
S1100F	14
A mérési eredmények értékelése.....	14
Tovább lépés	17
Összefoglalás.....	17
Irodalomjegyzék.....	17

Bevezetés

Az anyagi és energiaforrások kimerülésétől fenyegetetten a 21. század első évtizedeinek jellemző trendje a mozgó és helyhez kötött szerkezetek önsúlycsökkentése. Az önsúlycsökkentés a szilárdságtan adta lehetőségek kihasználása mellett az anyagok szilárdságnövelését igényli. A szilárdságfokozás megvalósításához az acélgyártók olyan megoldásokat alkalmaznak, amelyek a hegesztés szempontjából kisebb-nagyobb mértékben előnytelenek. A gyártástechnológiából eredően a nagyszilárdságú acélok hegesztése a legfeljebb 360 MPa folyáshatárú acélokéhoz viszonyítva új szemléletet és a megszokottól eltérő technológiai megoldásokat igényel. Az ilyen acéloknál vizsgáljuk a kritikus lehülési idő és a keménység kapcsolatát, hogy kidolgozzuk a megfelelő technikát a hidegrepedések elkerülésére.

A nagyszilárdságú acélok hegesztési problémái [1]

A különféle szilárdságnövelő mechanizmusokkal létrehozott nagyszilárdságú acélok hegesztési vonatkozásai a normál szilárdságú acélokétól (sok esetben) erősen eltérőek. A nagyszilárdságú és a korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a tömegesen alkalmazott, legfeljebb 360 MPa folyáshatárú acélok hegesztéséhez képest számos újdonság és nehézség jelentkezik. A szerzett hegesztési tapasztalatok az új acélokra közvetlenül nem vihetők át, sőt a jól bevált hegesztési szabályok mechanikus alkalmazása sok esetben egyenesen jóvátehetetlen károkat okoz(hat). A figyelmet elsősorban az igen ígéretes perspektívájú, edzett (Q) és A1 alatt megeresztett (T), a hazai szóhasználatnál kvázi-nemesített acélok hegesztésére összpontosítva, a felmerülő és sok esetben nehezen kezelhető hegeszthetőségi problémák a következőkben foglalhatók össze.

Ridegedés

A nagyszilárdságú acélok fejlesztési tevékenységének legnagyobb problémája, hogy a növekvő szilárdságnál a folyáshatár közeledik a szakítószilárdsághoz, egyidejűleg az alakváltozóképeség csökken (alacsonyabb nyúlásértékük van), ami fokozott ridegedési hajlamot jelez. A jól hegeszthető szerkezeti acélokhöz képest a nagyszilárdságú acélok ugyanazon a hiperbolán, de jóval alacsonyabb nyúlásértéknél helyezkednek el. A szóban forgó hiperbola egyenlete:

$$k_m = A * R_m \quad (1)$$

ahol: A [%] a fajlagos nyúlás, k_m [% MPa] anyagkonstans (alapesetben $k_m=10000$), R_m [MPa] szakítószilárdság.

A korszerű nagyszilárdságú acélok fejlesztésénél a jelzett problémának nagy figyelmet szenteltek és a szakítószilárdság valamint a fajlagos nyúlás szorzatát az extra nagyszilárdságú acélok esetében megnégyszereztek ($k_m=40\ 000$), az ultra nagyszilárdságú acéloknál meghatszorozták ($k_m=60\ 000$). Ez a fejlesztési koncepció nagyon kedvező irányú és többek között lehetővé teszi a hegeszthetőségi problémák mérséklését is. A hegesztés és más, jelentős hőbevitellel járó műveletek (termikus vágás, feszültségcsökkentő hőkezelés, melegegyengetés) hatására a hőhatásövezet kritikus helyein a szövetszerkezet kedvezőtlenül

változik, ami a szívósság csökkenését eredményezi. A ridegedés különösen a negatív hőmérséklet-tartományban és a vastag szelvényeknél lehet jelentős, ezért a szabadban üzemelő, vagy üzemi okokból lehűlő, egyébként nagyobb (ezen belül dinamikus és/vagy szabálytalanul ismétlődő) igénybevételnek kitett szerkezeteknél a falvastagságot korlátozzák. Ilyen esetekben a kisméretű Charpy próbatestes ütővizsgálat mellett valós lemezvastagságú próbatesten ridegtörési vizsgálatokat is célszerű végezni.

Ebből a szempontból a 600 MPa alatti (0,1 %-nál kevesebb karbont tartalmazó) termomechanikus acélok igen kedvezően viselkednek. Ennek bizonyítéka, hogy egyes gyártóknak vastagabb szelvényeknél is meglepően kiváló Charpy energiákat sikerült elérniük. Mivel az eddigi kutatások szerint a nagyszilárdságú acélok nehéz üzemi viszonyok közötti viselkedése sok tekintetben eltér a normál szerkezeti acéloknál megszokottól, ezért a korszerű nagyszilárdságú acélok várható elterjedésekor a jövőben a tervezői és hegesztőmérnöki gyakorlat gyökeres megváltoztatására lesz szükség. Ennek felismeréseként több egyetem és kutatóintézet közös projekt keretében elkezdte azt a kutatómunkát, amelynek fő célja az Eurocode 3 (a hegesztett acélszerkezetekre vonatkozó tervezői előírás-gyűjtemény) nagyszilárdságú (elsőként a HSS) acélkategóriára való kiterjesztése.

Repedések a varratban és a hőhatásövezetben

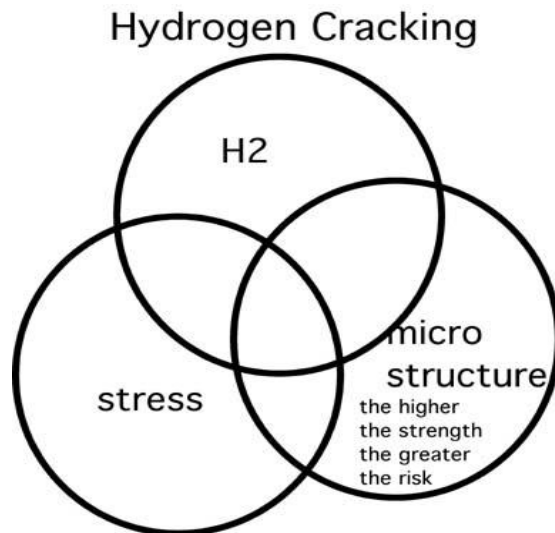
A gyakorló hegesztőmérnök számára az elsődleges veszélyt a repedés jelenti. Az alapanyag- és hozaganyaggyártói törekvésekkel együtt a technológia kidolgozóinak és végrehajtóinak a repedések elhárítására kell a legnagyobb energiát fordítania. A nagyszilárdságú acélokat (is) tartalmazó szerkezeteknél a hibakereső (NDT) vizsgálatok mértékét és szigorúságát (főként az alkalmazás első évtizedében) jelentősen meg kell növelni.

Kristályosodási repedés

A nagyszilárdságú acélok neves gyártói az acél kikészítésére (salakosság, gázszennyezők, alacsony olvadáspontú eutektikumot képező szilárd szennyezők csökkentése, összetétel-homogenizálás, szabályozott hengerlés és/vagy hőkezelés) különös gondot fordítanak, ezért a kristályosodási repedés veszélye az egyéb szempontokból korlátozott fajlagos hőbevitel tartományban többnyire nem áll fenn. A kristályosodási repedések elhárítása érdekében a Mn/S hányadost 30 és 50 között, a kéntartalmat 0,035 % alatt kell tartani. Fokozott óvatosságra van szükség ugyanakkor a vastag ($s > 50$ mm) lemezek tartományában, ahol a kohászati technológiák a lemez középső harmadában többnyire nem képesek produkálni a felületi harmadokat jellemző összetételi és mechanikai tulajdonságokat.

Hidegrepedés

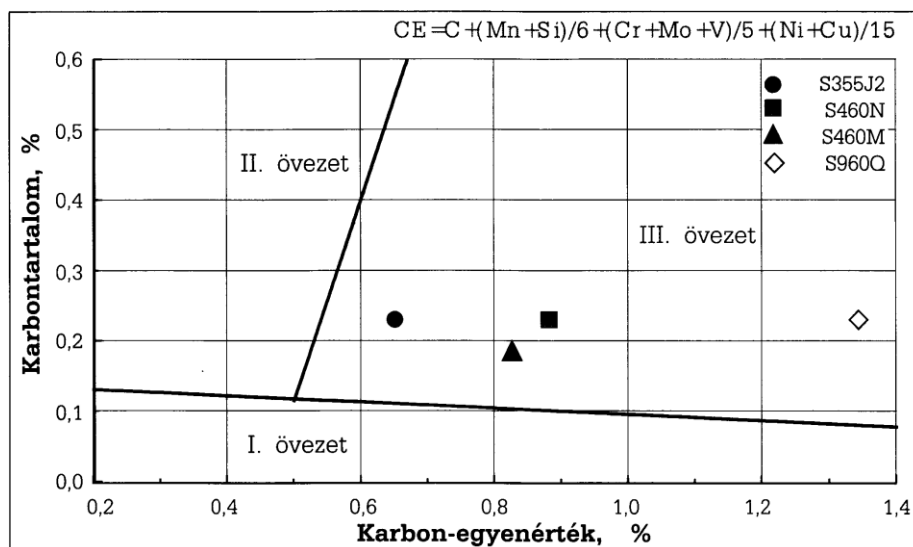
A hőhatás övezetben, a hegesztés után általában 200 °C alatt lejátszódó repedésképződés. Általában a szerkezet tönkremenetelét okozza. A hidegrepedési hajlam a nagyszilárdságú acéloknál lényegileg három tényezőtől függ (**1. ábra**):



1. ábra: A hidegrepedés okai [2]

- a szövetszerkezet és annak keménysége, a kis alakváltozó képességű szövetszerkezet nem képes a repedések megállítására.
- a varratfém és a hőhatásövezet varrattal határos sávjának diffúzióképes (atomos) hidrogéntartalma, amely pelyhesedést okoz, ami szubmikroszkópikus repedések keletkezését hozza létre a varratban.
- a repedések terjedéséhez szükséges húzófeszültségek jelenléte, hatásukra a szubmikroszkópikus repedések terjednek, mikroszkópikus méretek után, ha a hőhatásövezetben nem áll meg a repedés, makroszkópikus méretű, hidegrepedés jöhet létre.

A szövetszerkezettel kapcsolatos hidegrepedési hajlamot a jelenséget kissé leegyszerűsítve az edződési hajlammal szokás kifejezni. Az edződési (helyesebben keményedési) hajlamra az acél karbontartalmát és az átalakulási diagramokat jelentősen jobbra toló ötvözőket egyesítő karbonegyenérték utal. A 2. ábrán látható Graville diagram [1] az acélokat három csoportra



2. ábra

A karbonegyenérték és a karbontartalom repedési hajlamra gyakorolt hatása a Graville diagramban. (Az egyes acélfajtákra utaló szimbólumok a termékszabványok által megengedett összetételi maximumokat jelölik) [1]

osztja. Az I. övezetbe tartozó acélok gyakorlatilag problémamentesen, minden külön intézkedés nélkül hegeszthetők. A II. övezet acéljai alulról korlátozott hőbevitellel, a III. övezetbe eső acélok limitált hőbevitellel és egyidejű előmelegítéssel hegeszthetők. Az S460N, az S460M és az S960Q acélok elhelyezkedése azt mutatja, hogy (a melegen hengerelt S355J2 acélhoz hasonlóan) mindhárom acélminőség a III. övezetbe esik, amely elhelyezkedés a legnehezebb hegeszthetőséget jelenti. Az acélgyártók az új, hegesztési feldolgozásra szánt nagyszilárdságú acéljaikat úgy fejlesztik, hogy azok a III. mezőnek az alsó, 0,2 % karbon tartalmat nem meghaladó és a lehető legkisebb karbonegyenértékű részébe essenek. A fejlesztési trendekből jól látható, hogy az I mezőt jellemző alacsony (cca. 0,1 %) C tartalom mellett a karbonegyenérték jóval a régebben felső határnak tartott és a két mezőhatároló vonal metszéspontja által kijelölt 0,50 % fölé vihető anélkül, hogy az acél hegesztése nagyon körülményessé és költségessé válna. Az Al, Ti, Nb, Zr, V elemekkel végzett mikroötvöztetés és a termomechanikus kezelés együttesen a tűs (acicular) ferrit kialakulásának irányában hat, aminek jóval kedvezőbb a hidrogén okozta repedéssel szembeni ellenállása, mint a hálós, a poligonális, vagy a Widmannstätteni ferritnek. A tűs ferrit kialakulását kristálycsíráként funkcionáló intersticiós vegyületekkel lehet elősegíteni. Az egyes acélkategóriákat jellemző karbonegyenérték kiszámítására különféle összefüggéseket dolgoztak ki. A Graville diagramhoz tartozó összefüggés a Si tartalmat is figyelembe veszi:

$$CE = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

Az EN 10025 euroszabvány a Si koncentrációt nem tartalmazó képletet használja:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (3)$$

A japán kutatók által kidolgozott repedésérzékenységi paraméter a Si-ot és a nagyon erős hatású bórt is tartalmazza:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4)$$

A Graville diagram alapján a nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez előmelegítés és szabályozott hőbeviteli technológia szükséges. A hűléssebességet csökkentő fajlagos hőbevitel ugyanakkor kedvezőtlen hatású, mivel a kohászati technológiával létrehozott szövet a hegesztés és más termikus beavatkozás során olyan károsodást szenved, amely a kötés üzemi tulajdonságait (főként a szívósságot és a szilárdságot) rontja, és amely állapot visszaállítása ipari keretek között megoldhatatlan. A múlt század végén ismeretessé vált, hogy a diffúzióra képes atomos hidrogén legalább annyira felelőssé tehető a hidegrepedés kialakulásáért, mint a kemény, rideg szövetek létrejötte. Az extra nagyszilárdságú acélok és az ultra nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a hidrogénforrások minél tökéletesebb kiküszöbölésére és jól szárított, bázikus salakot adó hegyanyagra van szükség, hogy az ideálisan biztonságos <5ml/100g varratfém határérték a varratban és a hőhatásövezet nagyhőmérsékletű zónáiban tartható legyen. A hegesztett kötésbe került hidrogén kidiffundálását a hegesztést közvetlenül követő 100...150°C-os hőkezeléssel lehet és egyben célszerű elősegíteni. A hidegrepedések kialakulásáért nagyrészt a varratra merőleges húzófeszültségek okolhatók. A nagyobb falvastagság és az alakváltozást gátló merev

szerkezeti kialakítás elkerülése kiemelt tervezői feladat. Amennyiben kényszerítő okok miatt az előzőek nem lehetségesek, akkor az előmelegítési hőmérsékletet kell növelni, aminek a korábbiakban bemutatott okok miatt káros következményei is lehetnek.

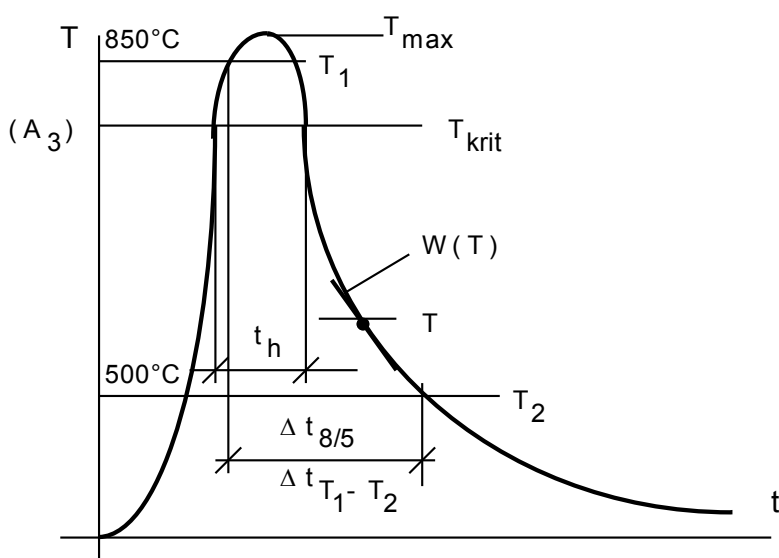
Hogyan kerülhető el a hidegrepedés?

Nagyon fontos a hegesztendő felületek megfelelő előkészítése a tiszta, rozsdá, revementes felület és hogy olajtól, zsírtól, szennyeződésektől mentesek legyenek. Fontos a kis hidrogén tartalmú hegesztőanyag(ok) alkalmazása, amivel kis hidrogén tartalom érhető el a varratban. Feszültségek csökkentése kis merevségű szerkezet tervezésével, illetve feszültség csökkentő hőkezelés alkalmazásával, mivel nagy feszültségek a varratban szintén okozhatnak hidegrepedést. A hőhatás-övezetben kialakuló szövetszerkezet szabályozása előmelegítéssel, nagy hőbevitellel vagy sorközi hőmérséklet szabályozásával.

A hőhatás-övezetben meghatározott keménységet biztosíthatunk, ha a kritikus lehülési időnél hosszabb lehülési időt biztosítunk.

Kritikus lehülési idő hegesztésnél

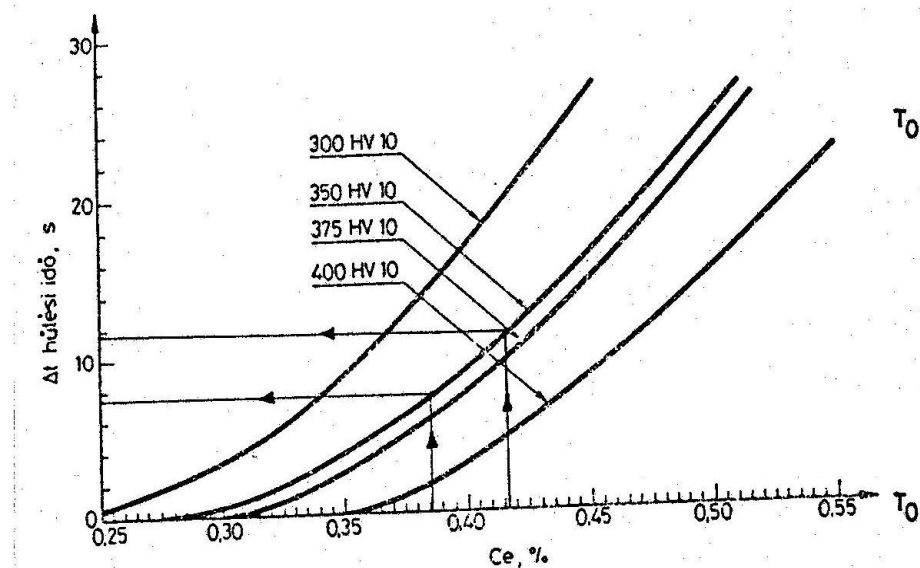
A kritikus lehülési idő olyan szempontból fontos, hogy következtetni tudunk, a hőhatás övezetben végbenő anyagszerkezet változására (legfőképpen a keményedésre). A növelt folyáshatárú acélok hegesztésénél fontos az előmelegítési hőmérséklet pontos ismerete, ami a hőhatás övezetben megengedhető maximális keménységtől függ. A megengedett keménységet a hőhatás övezet alakváltozó képessége határozza meg, ez pedig a kritikus lehülési idő függvénye. A kritikus lehülési idő a **3. ábra** alapján értelmezhető.



3. ábra

A kritikus lehülési idő ($\Delta t_{8/5}$) értelmezése [3]

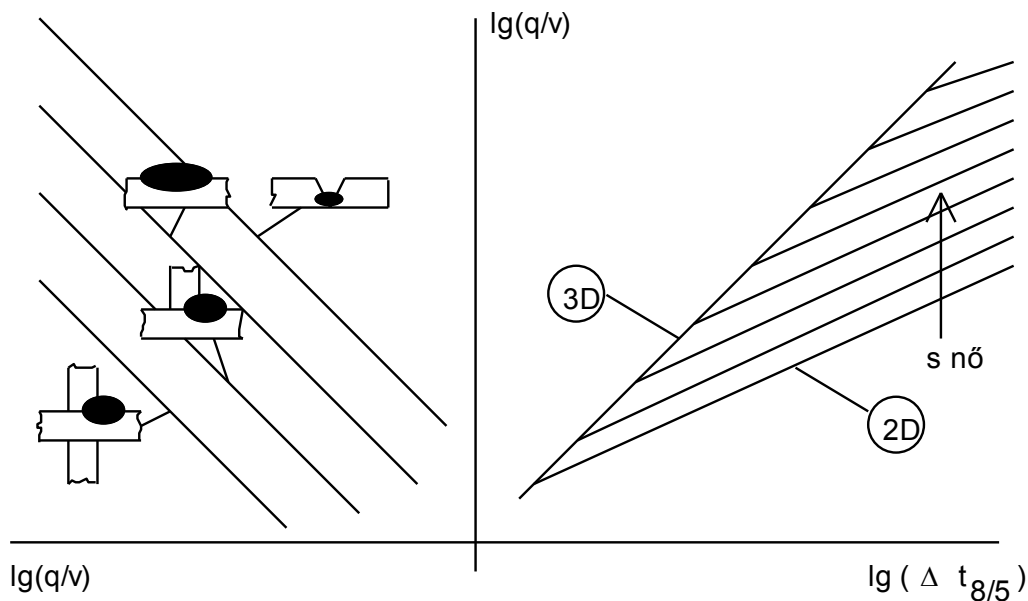
Ezt a normál hegeszthető acélokra kimérték (**4. ábra**) a karbonegyenérték függvényében, a megengedhető keménységet is figyelembe véve.



4. ábra

Kritikus lehülési idő és a karbonegyenérték összefüggése [4]

A 4. ábráról leolvasva a kritikus lehülési időt, az 5. ábráról meghatározható a szükséges fajlagos hőbevitel (5), figyelembe véve azt, hogy kettő (6) vagy három (7) dimenziós a hőelvezetés [3].



5. ábra

Tervezett hőbevitel meghatározása a lemezvastagság (s) és a kritikus lehülési idő függvényében [3]

A fajlagos hőbevitelt $(q/v)_{eff}$ a villamos paraméterekből, illetve a hegesztési sebességből (v_{heg}) határozhatjuk meg (U az ívfeszültség, I az áramerősség).

$$\left(\frac{q}{v}\right)_{eff} = \frac{U \cdot I \cdot \mu_{eff}}{v_{heg}} \quad (5)$$

A 5. ábrán látható egyenesek lényegében a (6) és (7) összefüggések grafikus ábrázolása, itt T_0 az előmelegítési hőmérséklet, ρ az anyag sűrűsége, λ a hővezetési tényező, c a fajhő, s pedig a lemeztvastagság.

$$\left(\frac{q}{v}\right)_{eff} = \sqrt{\frac{\Delta t_{8/5} \cdot 4\pi\lambda\rho c s^2}{\left\{\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(850-T_0)^2}\right\}}} \quad (6)$$

$$\left(\frac{q}{v}\right)_{eff} = \frac{\Delta t_{8/5} \cdot 2\pi\lambda}{\frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{850-T_0}} \quad (7)$$

Azt, hogy a hővezetés két- vagy háromdimenziós, a kritikus lemeztvastagsággal (s_{krit}) dönthetjük el (8).

$$s_{krit} = \sqrt{\frac{(q/v)_{eff}}{2c\rho} \left(\frac{1}{T_1-T_0} + \frac{1}{T_2-T_0} \right)} \quad (8)$$

A mikroötvözött növelt szilárdságú acélokra is alkalmazhatók az összefüggések, csak a kritikus lehülési idő keménység összefüggést nem ismerjük.

A dolgozat további részében ennek meghatározását mutatjuk be.

A mérés célja

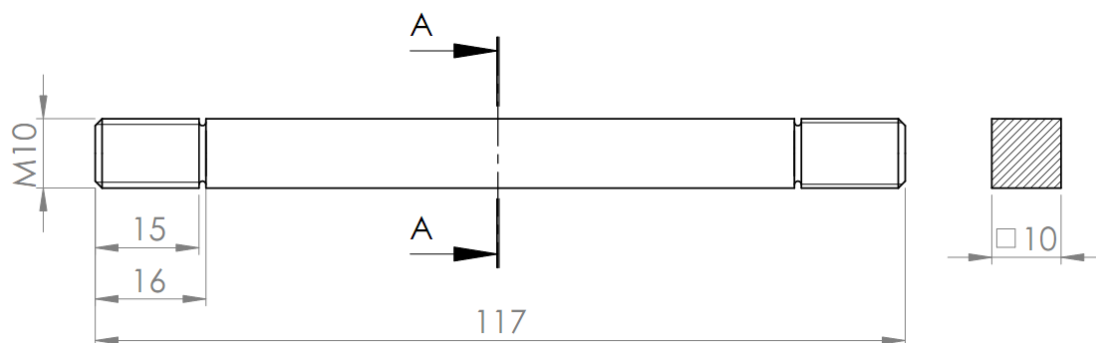
A mérés célja a kritikus lehülési idő és a keménység összefüggésének meghatározása mikroötvözött, növelt szilárdságú acélokra.

Próbatestek

A mérések elvégzéséhez olyan próbatesteket kellett legyártani, amelyeket be lehet fogni a hő folyamat szimulátorba és utána meg lehet mérni megfelelő felületen, elegendő mennyiségű pontban a keménységüket. Ezek pontos kialakítását a **6. ábrán** tekinthetjük meg.

Hőciklus szimuláció

A próbatesteken a hegesztés hatására végbemenő hő-ciklust a GLEEBLE 3800 típusú hő-folyamat szimulátorral modellezték, amely a **7. ábrán** látható. A méréshez négy féle nagyszilárdságú acélt vizsgáltunk (460, 690, 960, 1100 MPa folyáshatárút), 10, 20, 40 és 60 másodperces kritikus lehülési időekkel ($\Delta t_{8/5}$).



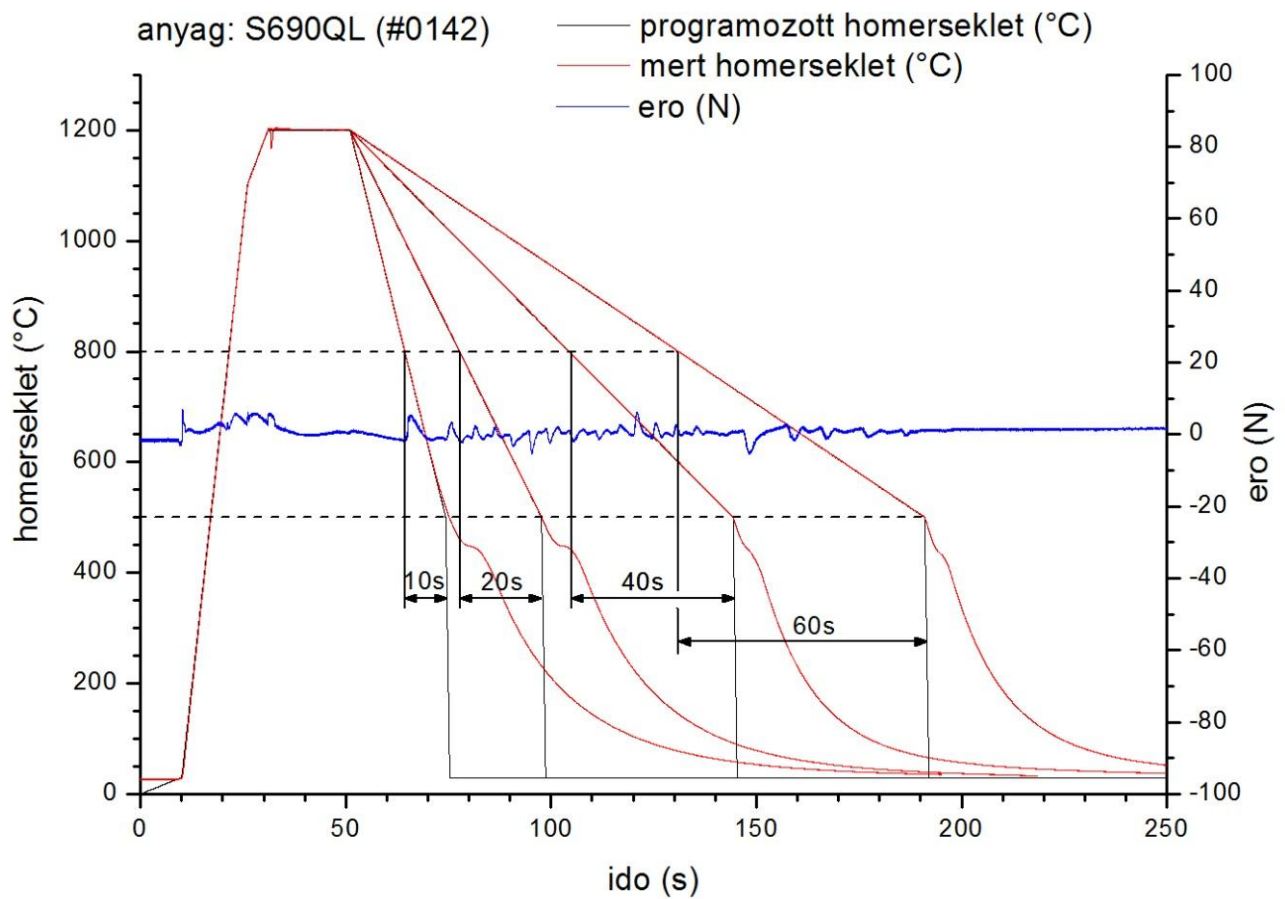
6. ábra
Próbatest rajza



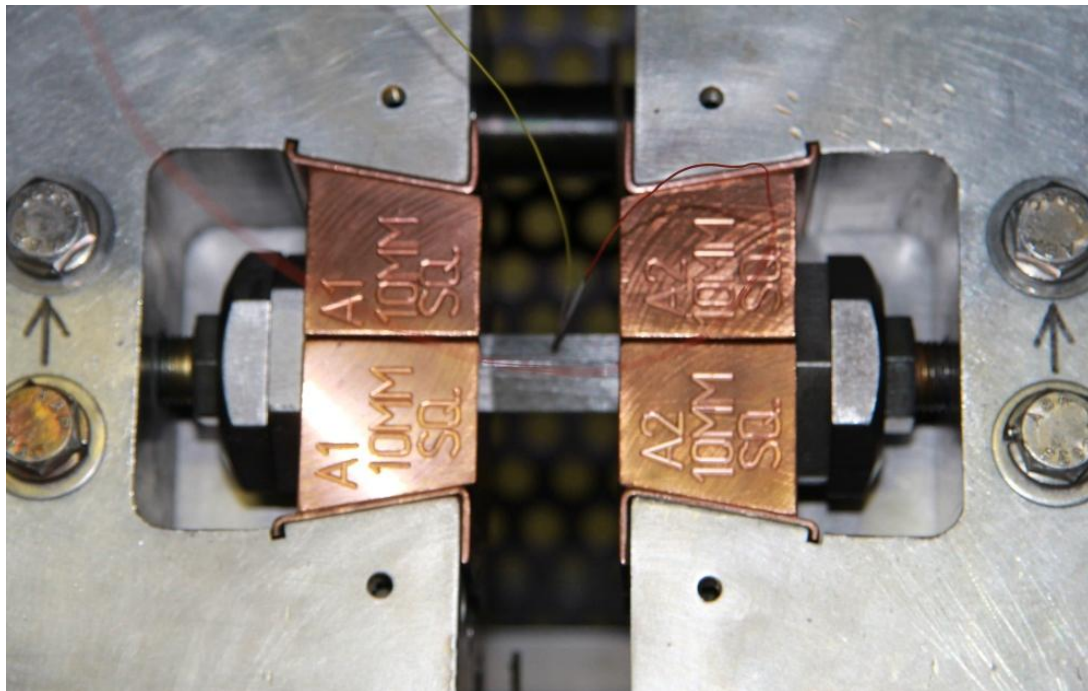
7. ábra
GLEEBLE 3800 hőfolyamat szimulátor

Az S690QL anyagra bevezetett hő-ciklust az **8. ábra** szemlélteti. Ezt a próbatestre hegesztett termoelemmel ellenőrizték a teljes hő-ciklus alatt. Mivel a termoelem csak egy szűk keresztmetszetben mér, így csak ott garantálható a megfelelő kritikus lehűlési idő.

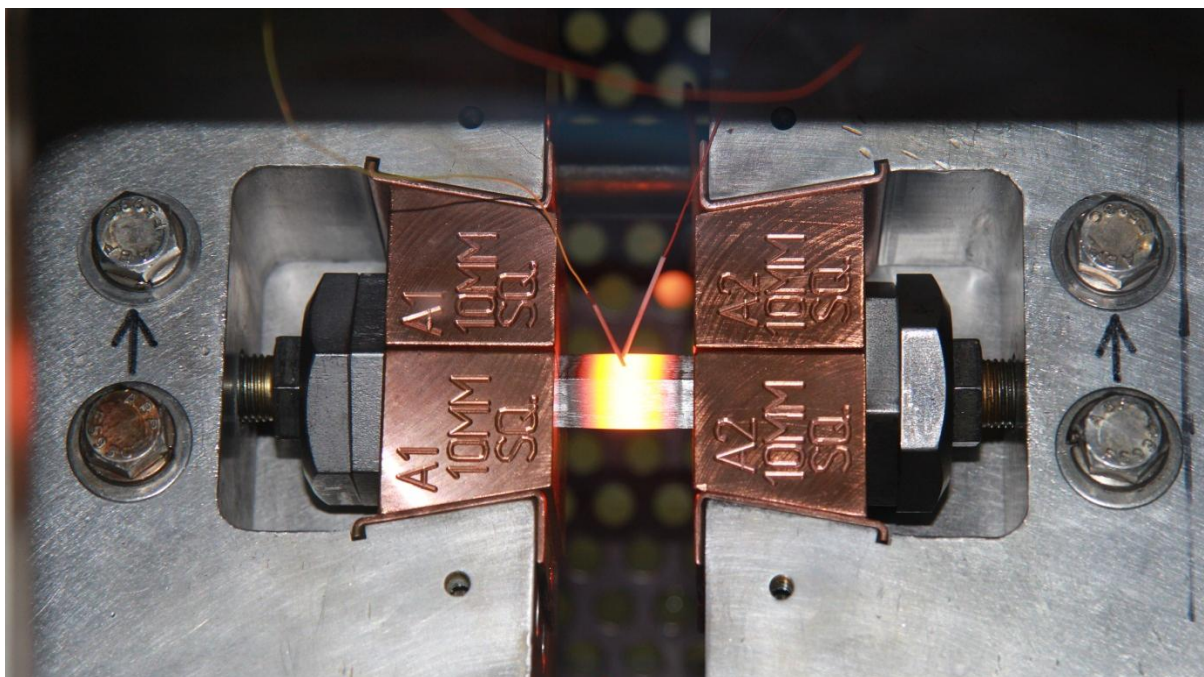
A hőfolyamat szimulátorba behelyezett próbatestet a **9. ábra** szemlélteti. Amelyen a berendezés befogó pofái láthatók. A **10. ábrán** pedig a szimuláció közben látszódik a próbatest.



8. ábra
Az alkalmazott hő-ciklusok (mért eredmények)



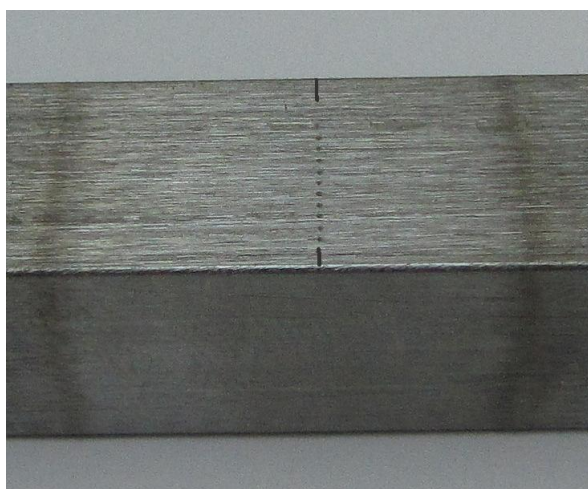
9. ábra
Próbatest a hő folyamat szimuláció előtt



10. ábra
Próbatest, a hő folyamat szimuláció közben

A mérés menete

Mindenegyik anyaghoz 12 db próbatestet vizsgáltunk meg, a megfelelő mérési adatszám eléréséhez. Így statisztikailag is elemezhetők a kapott eredmények. A hegesztést szimuláló hő-cikluson átesett próbatesteken a termoelem által meghatározott keresztmetszet két oldalán mértünk HV 10-es keménységet. Egyszer a termoelem felőli oldalon, majd az átellenes oldalon, tíz-tíz ponton (**11. ábra**). Ezen értékek átlagából határoztuk meg egy próbatest keménységét, amelyet a két oldalon külön értékeltünk ki. Ugyanilyen logika szerint végeztük el a mérést a többi próbatesten is.



11. ábra
A mérési helyek a termoelemmel ellentétes oldalon

A méréshez a KB 250 BVRZ univerzális keménységmérő gépet használtuk, amely a **12. ábrán** látható. A méréshez fontos a próbatest felületének megfelelő felületi minőségűnek lennie, hogy a mérést pontosan el lehessen végezni.



12. ábra

KB 250 BVRZ univerzális keménységmérő gép

Mérési eredmények

A mért értékeket a következő négy táblázat tartalmazza, ahol:

Az **A** és a **B** a próbatest oldalait jelöli;

- „A” termoelem felőli oldalt
- „B” az átellenes oldalt.

Az összes mérés HV10-es keménységmérési programmal készült.

S460NL1							
1 db mérési sorozat [HV 10]							
$\Delta t_{8/5} = 10 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 20 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 40 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 60 \text{ s}$	
A	B	A	B	A	B	A	B
370	350	359	324	295	289	275	266
332	353	328	323	259	300	256	269
337	345	323	324	273	291	234	263
364	379	336	309	295	317	250	262
367	373	338	314	282	318	255	268
359	353	380	329	274	314	240	256
360	340	368	308	283	320	243	242
350	364	333	320	249	302	226	259
348	361	314	317	251	299	235	272
340	356	314	311	340	356	263	262
átlag:		átlag:		átlag:		átlag:	
353	357	340	318	280	311	248	262
szórás:		szórás:		szórás:		szórás:	
13	12	21	7	25	19	14	8

S690QL							
3 db mérési sorozat [HV 10]							
$\Delta t_{8/5} = 10 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 20 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 40 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 60 \text{ s}$	
A	B	A	B	A	B	A	B
374	315	362	328	298	270	288	304
369	336	340	324	285	268	293	293
358	353	302	334	304	282	300	274
364	311	316	376	285	285	293	292
351	349	328	355	292	262	287	284
360	338	330	330	292	257	282	273
349	334	336	360	267	282	271	293
369	344	344	328	273	262	292	302
372	326	332	324	274	288	302	295
369	318	334	316	274	284	287	279
351	315	316	257	270	308	292	290
322	290	277	285	280	256	282	311
349	285	295	300	278	265	304	316
324	289	293	276	298	279	320	278
322	324	290	284	302	282	298	271
320	287	293	298	312	311	286	300
332	313	296	295	320	277	313	316
330	311	330	304	322	273	298	307
337	304	298	302	288	287	311	280
321	303	315	258	263	284	327	270
251	277	277	275	257	245	257	236
272	291	279	270	257	243	243	238
294	284	272	277	262	251	245	234
296	289	286	257	249	257	249	238
282	294	289	268	227	256	243	234
294	294	289	262	232	251	253	240
302	284	294	258	251	245	251	238
294	284	268	255	253	255	238	238
286	279	275	259	264	262	270	245
277	272	266	270	259	255	257	243
átlag:		átlag:		átlag:		átlag:	
326	306	304	296	276	269	281	274
szórás:		szórás:		szórás:		szórás:	
34	23	25	34	23	17	25	28

S960E							
1 db mérési sorozat [HV 10]							
$\Delta t_{8/5} = 10 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 20 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 40 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 60 \text{ s}$	
A	B	A	B	A	B	A	B
345	310	318	296	275	253	231	229
348	302	322	296	264	245	236	231
362	310	312	315	266	238	234	234
355	312	315	315	258	243	234	234
342	304	312	312	272	242	243	231
345	310	318	307	253	240	234	234
352	307	307	310	249	247	242	231
296	308	296	307	259	259	234	229
342	302	307	312	277	249	238	226
333	304	302	296	268	255	232	231
átlag:		átlag:		átlag:		átlag:	
342	307	311	307	264	247	236	231
szórás:		szórás:		szórás:		szórás:	
17	4	8	7	9	7	4	3

S1100F							
1 db mérési sorozat [HV 10]							
$\Delta t_{8/5} = 10 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 20 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 40 \text{ s}$		$\Delta t_{8/5} = 60 \text{ s}$	
A	B	A	B	A	B	A	B
372	360	349	344	372	364	347	364
389	334	384	391	364	379	386	334
402	344	340	389	362	386	322	349
381	342	376	369	351	381	381	362
386	372	353	355	364	405	353	364
358	381	386	372	367	399	334	353
340	320	355	326	381	416	362	351
364	324	347	367	379	421	336	313
379	320	355	389	367	424	374	360
367	376	389	397	384	374	384	360
átlag:		átlag:		átlag:		átlag:	
374	347	363	370	369	395	358	351
szórás:		szórás:		szórás:		szórás:	
17	22	17	22	10	20	22	15

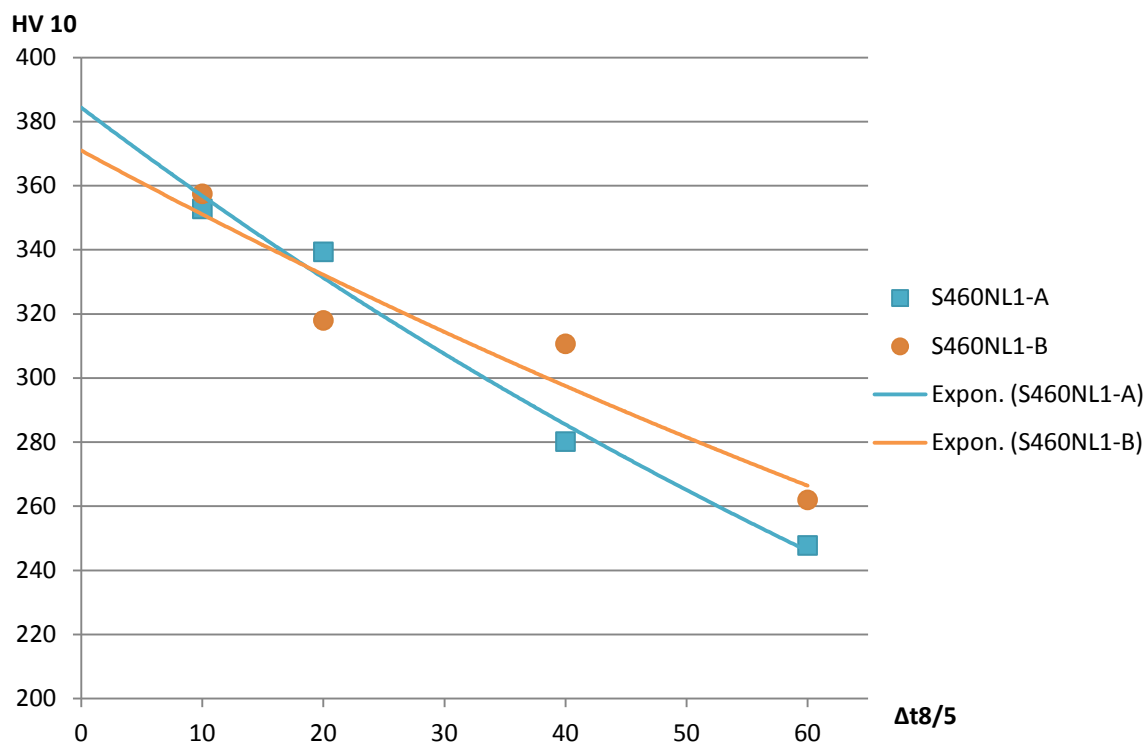
A mérési eredmények értékelése

Az eddigi mérésekből a **13, 14, 15, 16. ábrán** látható diagramokat kaptuk, amelyen a 690 MPa folyáshatárú anyagra van csak meg az összes mérés. Minden próbatest oldalai külön lettek kiértékelve, ezt szemlélteti az anyagminőség utáni „A” vagy „B” jelölés (a mérési eredményeknél alkalmazott logika szerint). A kapott értékekre exponenciális közelítő függvény lett helyezve. A többi anyagra kapott eredmények még csak tájékoztató jellegűek, a további mérésekkel még pontosodni fognak.

Az eredményekből jól látszik, hogy a hő-ciklust kontrolláló termoelem felőli oldalon nagyobb keménység tapasztalható. Ez a különbség hosszabb lehülési időknél csökkenést mutat. Ennek az oka valószínűleg az, hogy ott már a hő-ciklus nem ugyanolyan.

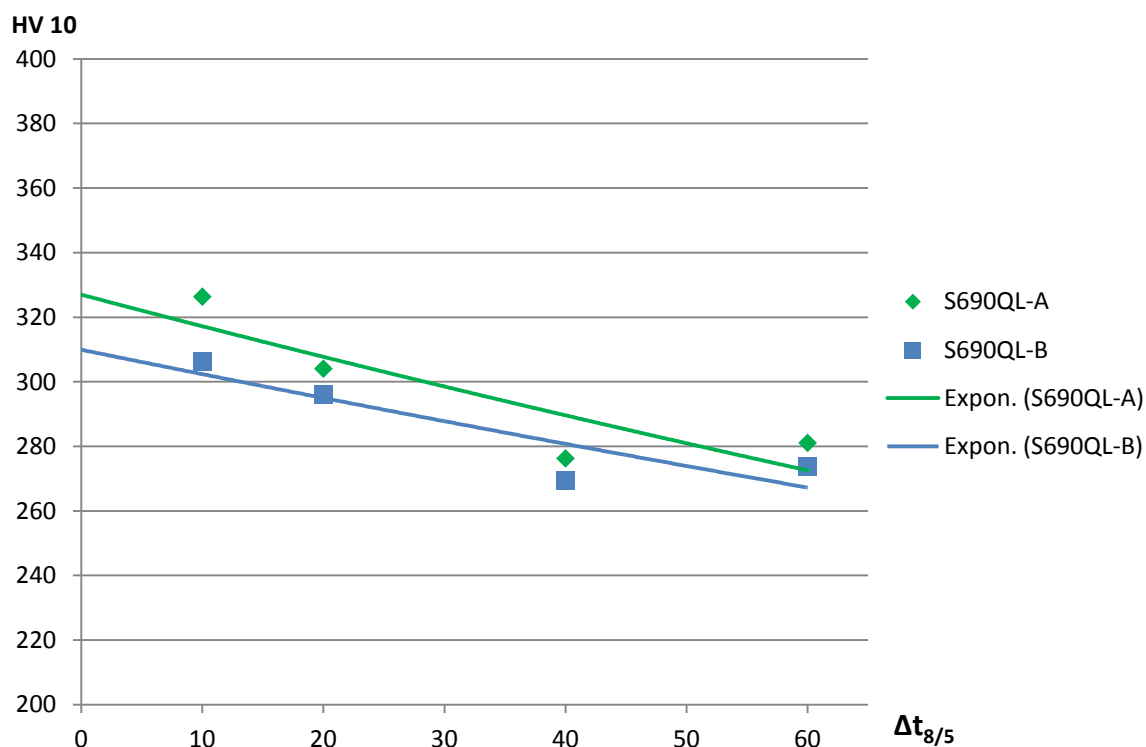
A kapott grafikonon jól látszik, hogy minél nagyobb a lehülési idő annál kisebb a keménység. A nagyobb szilárdságú anyagoknak nagyobb a keménysége. A 20 másodperces lehülési időnél még 295 Vickers legalább a keménység. Az S1100F anyag eltérően viselkedik a

többihez képest, sokkal kevésbé csökken a keménysége hosszabb lehűlési idők alatt is, de a teljes kiértékeléshez szükség lesz még további mérési sorozatokra, hogy az összes anyagra meglegyen a teljes három mérési sorozat.



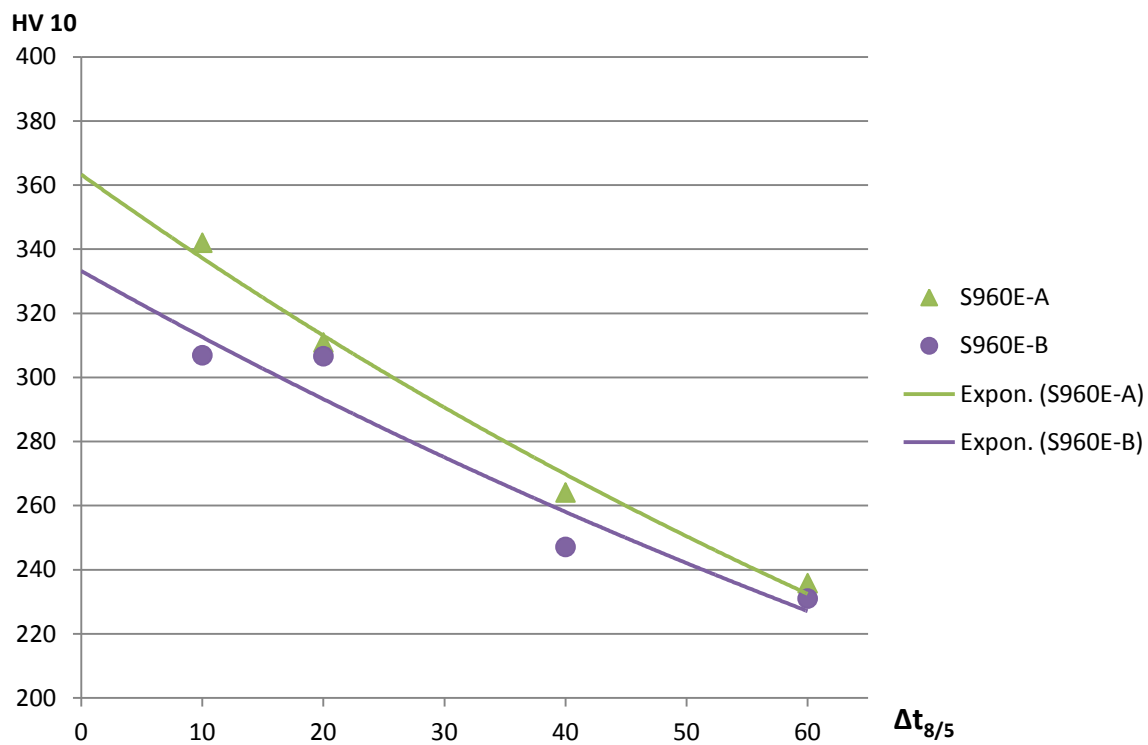
13. ábra

Mérési eredmények ábrázolása S460NL1 anyagra, a keménység a $\Delta t_{8/5}$ függvényében



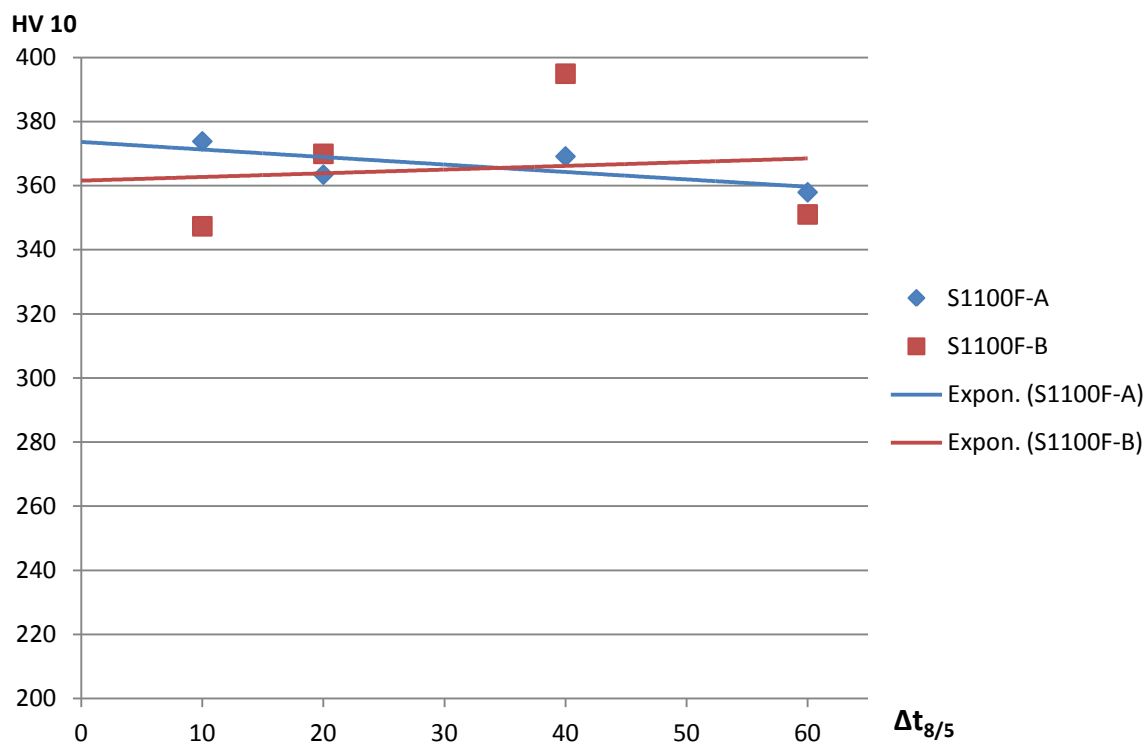
14. ábra

Mérési eredmények ábrázolása S690QL anyagra, a keménység a $\Delta t_{8/5}$ függvényében



15. ábra

Mérési eredmények ábrázolása S960QE anyagra, a keménység a $\Delta t_{8/5}$ függvényében



16. ábra

Mérési eredmények ábrázolása S1100F anyagra, a keménység a $\Delta t_{8/5}$ függvényében

Tovább lépés

Folytatjuk a méréseket, amely még további 500 mérés. Szeretnénk az eredményeket matematikai statisztikai módszerekkel – normál eloszlás, Gauss-görbe – kiértékelni. Az összes keménység mérés után pedig ütőmunkát is mérünk, amivel megállapíthatjuk a keménységkritériumot. Ezen adok birtokában a mikroötvözött növelt szilárdságú acélokra is tudunk tervezni hidegrepedés mentes munkarendet.

Összefoglalás

A különböző szilárdságnövelő mechanizmusokkal készített nagyszilárdságú acélok hegesztési paraméterei a normál szilárdságú hegeszthető acélokétól eltérőek, ez az eddig elvégzett mérések eredményeiből is látszik. A mikroötvözött növelt szilárdságú acélok másképpen viselkednek, mint azt az ismert ötvözetlen és gyengén ötvözött acélokra fennálló szabályszerűségekből gondolnánk. Ezért is fontos ez a téma, hogy legyen ezen anyagokhoz is megfelelő hegesztési munkarend. Az eredményekből arra tudunk következtetni, hogy az elvégzett közel 500 mérés száma még mindig nem elégséges a pontos végkövetkeztetés megtételéhez.

Irodalomjegyzék:

- [1.] Dr. Balogh András, Gáspár Marcell: Nagyszilárdságú acélok hegesztésének standardtól eltérő koncepciója
Hegesztéstechnika, XXIII. évfolyam 2012. 3. szám, p: 23- 28
- [2.] dr. Palotás Béla: HEGESZTÉSI HIDEGREPEDÉSEK című előadása
- [3.] dr. Palotás Béla: HEGESZTÉSI HŐFOLYAMATOK című előadása
- [4.] dr. Palotás Béla – Gyura László: A hegesztési hőbevitel meghatározása ötvözetlen és gyengén ötvözött acélok esetében a hidegrepedés elkerülésére