

NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLBÓL KÉSZÜLT HEGESZTETT KÖTÉSEK HŐHATÁSÖVEZETÉNEK VIZSGÁLATA FIZIKAI SZIMULÁCIÓVAL

Absztrakt

A nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseinek hőhatásövezete a hagyományos acélokétól jelentős eltér. A hőhatásövezet bizonyos zónái a repedés keletkezése és terjedése szempontjából kedvezőtlenebbek, más zónák pedig a hegesztett kötés teherviselő képessége szempontjából előnytelenebbek. Azonban a hegesztési paraméterek tudatos tervezésével lehetőségünk van ezeknek a kedvezőtlen tulajdonságoknak a mérséklésére. Az egyes zónák mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságainak megértésében a fizikai szimuláció jelent korszzerű megoldást. A kísérletek során S960QL jelölésű nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acéllemezekből próbatesteket munkáltunk ki, amelyeken a GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor segítségével a hőhatásövezet adott zónáira jellemző hőciklusokat állítottam elő. A hegesztési hőciklus alapanyagra gyakorolt hatását optikai mikroszkóppal és keménységméréssel vizsgáltam.

Kulcsszavak: nagyszilárdságú acél, hegesztés, fizikai szimuláció, hőhatásövezet, GLEEBLE

Bevezetés

Napjainkban a járműipar nagyszilárdságú anyagok széleskörű alkalmazását igényli, amelyeknek köszönhetően a szerkezetek saját tömege jelentősen csökkenthető, ami pozitívan hat a későbbi üzemeltetési költségekre, ráadásul felhasználásukkal az egyre szigorodó környezetvédelmi normák is könnyebben teljesíthetők. Az említett érvek a nagyszilárdságú acélok alkalmazása mellett szólnak, amelyekkel a hagyományos acélokhoz képest vékonyabb szelvényméretek érhetők el. A járművekben alkalmazott fémek kapcsolatok között vezető szerepet tölt be a hegesztés.

Nagyszilárdságú acélok esetén a kimagasló szilárdsági jellemzőket ötvözők alkalmazásával és speciális termikus vagy termomechanikus kezelésekkel érik el. Az alapanyag gyártási folyamatának eredményeként egy

nem-egyensúlyi szövetszerkezet jön létre, amely rendkívül érzékeny a hegesztési folyamat során fellépő hőhatásokra. A hegesztési hőciklus irreverzibilisen megváltoztatja az alapanyag varrathoz közeli részének szövetszerkezetét, amelynek köszönhetően meglehetősen inhomogén hőhatásövezet jön létre. A hőhatásövezetben hidegrepedések megjelenésének kedvező rideg zónák is előfordulhatnak, illetve helytelenül megválasztott hegesztési paraméterek esetén jelentős kiterjedésű kilágyult övezetekre kell felkészülni. A hőhatásövezetben lévő, egymástól szignifikánsan eltérő mikroszerkezeti, ezáltal mechanikai tulajdonságokkal rendelkező zónák vizsgálatára egyedülálló lehetőséget jelent a fizikai szimuláció.

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén rendelkezésre álló GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor segítségével a nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések hőhatásövezetének eltérő tulajdonságú zónái kiválóan előállíthatók laboratóriumi körülmények között. Erre azért van szükség, mivel egy valós hegesztett kötés esetén a anyagvizsgálati módszerek alkalmazása meglehetősen korlátozott. Ezeknek a zónáknak a viszonylag csekély kiterjedése, a többsoros varratok egymásra gyakorolt hatása mind akadályt jelentenek a hőhatásövezeti zónák tulajdonságainak precíz feltérképezéséhez.

A jelen tanulmányban a Magyarországon alkalmazott egyik legnagyobb szilárdságú szerkezeti acél hegesztett kötésének hőhatásövezetével foglalkozom. A vizsgálat tárgyát képező acél a nemesített (Q+T) nagyszilárdságú szerkezeti acélok csoportjához tartozik, MSZ EN 10025-6 szerinti jelölése S960QL. A hőhatásövezeti zónák előállításánál a védőgázás fogyóelektródás ívhegesztés (ISO kód: 13X) során alkalmazandó hegesztési paramétereket vettem alapul.

Hőhatásövezet sajátosságai

A nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok kimagasló szilárdsági jellemzőiket egy edzésből és egy magas hőmérsékletű, rövid ideig tartó megeresztésből álló hőkezelési folyamat eredményeként nyerik el [4]. Ennek köszönhetően az edzés során kialakult martenzites szövetszerkezet részben megeresztődik. Ezt a nem-egyensúlyi szövetszerkezetet a hegesztés hőciklusa irreverzibilisen megváltoztatja. Ennek köszönhetően a rendkívül rideg, tús martenzit megjelenésére utaló keménységcsúcsok és kilágyult övezetek egyaránt előfordulnak a hőhatásövezetben [4, 5]. A rideg szövetek megjelenése különösen is veszélyes, mivel a hegfürdőbe esetlegesen bekerülő hidrogén diffúziója révén hidegrepedések jelenhetnek meg a hegesztést követő akár 48 órán belül. Egyoldali tompakötések esetén tapasztalható, hogy a koronaoldalon jelentős keménységcsúcsok figyelhetők meg a gyökoldalhoz képest, mivel a gyököt követő sorok hőhatása miatt a durvaszemcsés övezetben kialakult tús

martenzít megeresztődik. Ez önmagában kedvező hatást jelent, ugyanakkor túlzott hőbevitel esetén a gyökoldalon jelentős kiterjedésű kilagyult zónák is létrejöhetnek, amelyek akár ronthatják a hegesztett kötés teherviselő képességét.

Az említett okok miatt a nagyszilárdságú acélok hegesztését korlátozott vonalenergiával, ugyanakkor a hidegrepedések elkerülése miatt előmelegítéssel célszerű hegeszteni. Ráadásul szükség van a rétegek közötti hőmérséklet korlátozására is, amely a fentiekkel együtt a termelékenység rovására hat. Általános érvényű elv, hogy a szerkezeti acél szilárdságának növelésével a hegesztési munkaterület szűkül [4].

Hőhatásövezeti zónák előállítása fizikai szimulációval

A GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor hőhatásövezeti teszt moduljának segítségével előzetes kísérleteket végeztem, amelyeknek célja a nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések hőhatásövezetének durvaszemcsés, normalizált (finomszemcsés) és interkritikus zónáinak előállítása volt [8].

A vastaglemezek esetére szolgáló Rykalin-3D modell segítségével került sor a hőhatásövezet adott zónáira jellemző hegesztési hőciklusok előállítására. A modell melletti választásomat részben indokolta, hogy nem volt szükség megadni hozzá a lemezvastagságot, mivel a vastaglemezekre alkalmazott ún. nagytest modellnél a hővezetés mellett a felületi hőátadás csekély jelentőségű. Az alkalmazott modellt leíró matematikai összefüggéseket az alábbi képletek tartalmazzák, az egyenletekben szereplő mennyiségek értelmezése pedig az 1. táblázatban szerepel [9].

$$T - T_0 = \frac{a}{t - t_0} \exp\left(\frac{c}{t - t_0}\right)$$

$$a = \frac{r^2}{(2\pi\lambda)}$$

$$c = -\frac{r^2}{4\lambda/(c\rho)}$$

$$E_v = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\left(\frac{1}{T_2 - T_0} - \frac{1}{T_1 - T_0}\right)}$$

$$r = \sqrt{\frac{2E_v}{T_{max} c\rho\pi e}}$$

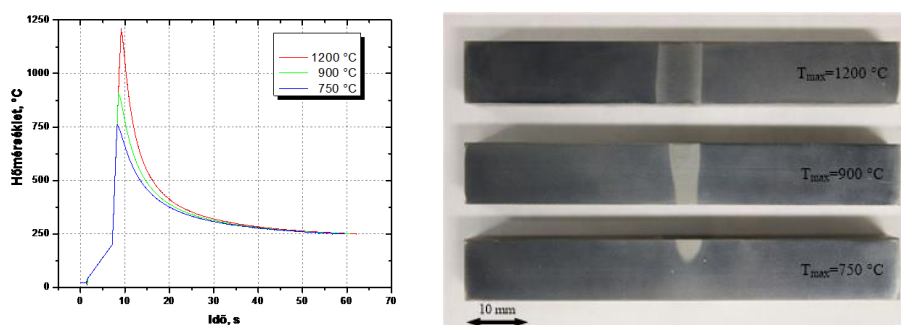
E_v [J/cm]	c [J/(g°C)]	ρ [g/cm ³]	λ [W/cm/°C]	T_1, T_2 [s]	Δt [s]
vonale- energia	fajhő	sűrűség	hővezető képesség	a Δt -hez tartozó hőmérsékletek	krit. hűlési időtartomány

1. táblázat Az összefüggésekben szereplő mennyiségek értelmezése

A fizikai szimulátor kezelőfelületén a szükséges hőfizikai jellemzők megadása mellett két lehetőségünk van a hőciklus görbéinek előállítására: a kívánt $t_{8,5/5}$ hűlési idő, vagy a vonalenergia megadásával. Én az utóbbit választottam, a vonalenergia értékét mindhárom övezet előállításához 1000 J/mm-re, az előmelegítési hőmérsékletet pedig 200 °C-ra választottam, ami viszonylag kis, 5 s körüli hűlési időt eredményezett. Egyedül a csúcshőmérsékletben volt különbség.

A durvaszemcsés övezet előállításához az ausztenites tartomány felső határhőmérsékletéhez közeli hőmérsékletet, 1200 °C-ot adtam meg, a finomszemcsés övezet előállításához csekély mértékben az A_{c3} feletti hőmérsékletet választottam (900 °C), a harmadik esetben pedig a csúcshőmérsékletet A_{c1} felettire, 750 °C-ra állítottam be. A hőmérsékletek megadásánál figyelembe vettem azt is, hogy nagy hevítési sebességek esetén az A_3 és A_1 hőmérséklet jelentősen felfelé tolódik (A_{c3} , A_{c1}), ezért a hőmérsékleteket úgy választottam meg, hogy biztonsággal a kívánt zónákat eredményezzék.

Természetesen egy valós hegesztett kötés esetén a három zóna között a csúcshőmérséklet mellett a hőciklus hűlési szakaszának meredeksége is eltérő, így első lépésként azonban nem akartam egyidejűleg két változót is módosítani. Az előállított hőciklusokat és a próbatesteket az 1. ábra mutatja.

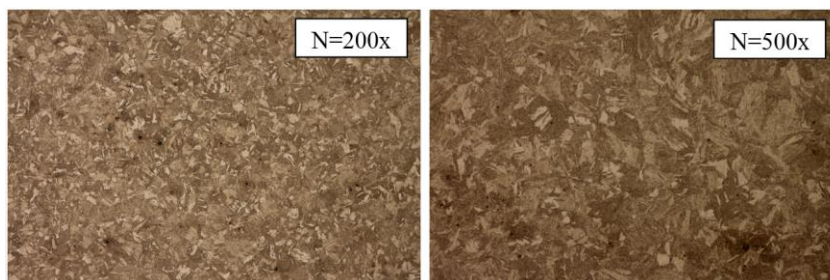


1. ábra A fizikai szimuláció során előállított hőciklusok, illetve azok próbatestekre gyakorolt hatása

Az 1. ábrán szereplő próbatesteken jól látható a hegesztési hőciklus hatása. Helyes beállítások esetén a kívánt hőhatásövezeti zóna egy homogén,

viszonylag széles tartományban előállítható. A részlegesen átkristályosodott övezetben az ausztenites állapotúvá vált részek jelentős karbon tartalommal rendelkeznek, mivel az alacsonyabb hőmérséklet miatt nagyobb az ausztenit karbonoldó képessége [1]. A nagyszilárdságú acélok hegesztésénél megkívánt viszonylag kis hőbevitel jelentős hűlési sebességet eredményez, ami sok esetben az ausztenitesített részek martenzites átalakulásának kedvez. Ugyanakkor ezek a rideg martenzit szigetek egy jelentős ferrittartalmú, lágy megeresztett szövetben helyezkednek el. Ebből kifolyólag az ebben a zónában bemetszett ütőpróbatestek ütőmunka értékeinek jelentős szórása lehet, attól függően, hogy mekkora a töretfelületen a rideg szigetek mennyisége [1]. Tekintettel arra, hogy az interkritikus övezetet technikai okok miatt ezúttal nem tudtuk a próbatest teljes keresztmetszetében előállítani, ezért a továbbiakban a szimulált durvaszemcsés és finomszemcsés zónát elemzem részletesen.

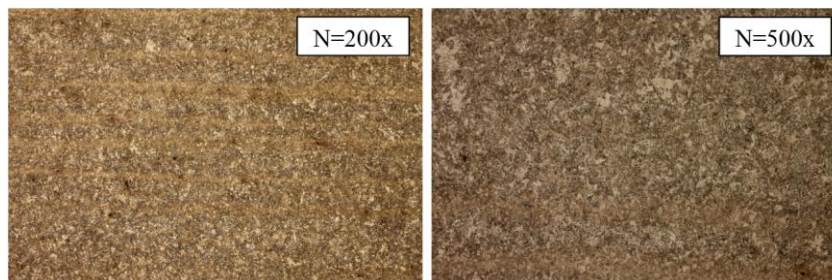
A tényleges hegesztett kötésekben készült mikroszkópi felvételekhez hasonlóan a szimulátor segítségével előállított durvaszemcsés övezet is rendkívül rideg, döntően tús martenzites szövetszerkezettel rendelkezik, amelynek keménysége eléri a HV10 vizsgálati terhelés esetén a 425 értéket [5]. Ennek a zónának a keménysége átlagban egy 20-30 HV értékkel haladja meg a korábban készített tényleges hegesztett kötés hőhatásövezetében mért csúcsmeménység értéket [4]. A szemcseméret szimulált körülmények között kisebbre adódott, mint a valós hegesztett kötés durvaszemcsés övezetének. hidegrepedés szempontjából legkritikusabb, beolvadási vonalhoz közeleső része. Ebből kifolyólag a kísérletek jövőbeni folytatásakor a legveszélyesebb zóna előállítása céljából a csúcshőmérsékletet célszerű magasabbra választani.



2. ábra A szimulátor segítségével előállított durvaszemcsés zóna (2% HNO₃)

A hőhatásövezet legkedvezőbb zónája a normalizált övezet, amely rendkívüli finom szemcseméretű szövetszerkezettel rendelkezik, ebből kifolyólag részletesebb vizsgálatokhoz elektronmikroszkópra lehet szükség. Az előállított finomszemcsés övezet a hűlési sebesség függvényében bainit és martenzit tartalmazott, szilárdsága pedig HV10 vizsgálati terhelés esetén, viszonylag nagy szórás mellett, az alapanyag keménységét 20-30 HV értékkel

meghaladó 360-380 közötti értékeket mutatott. Ennek a zónának előnye, hogy általában ferritet is tartalmaz, ami kedvezően hat a szívóssági jellemzőkre.



3. ábra A szimulátor segítségével előállított normalizált övezet (2% HNO₃)

Összefoglalás

A nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések hőhatásövezetének vizsgálatára perspektivikus lehetőséget nyújt a GLEEBLE 3500 fizikai szimulátor. A tanulmányban bemutatott előzetes kísérletek során sikerült előállítani a hegesztett kötés hőhatásövezetének két zónáját, a durvaszemcsés és a finomszemcsés övezetet. A részben átkristályosodott zónát technikai okok miatt ezúttal nem sikerült a próbatest teljes keresztmetszetében előállítani.

Az előállított övezeteket optikai mikroszkóppal és keménységméréssel vizsgáltam meg. A szimulációs során a tényleges hegesztett kötések hőhatásövezetéhez hasonló tulajdonságú övezeteket sikerült előállítani, azonban a hőciklus további optimalizálására van szükség ahhoz, hogy teljes mértékben a valós hegesztett kötés különböző zónáit állítsuk elő. A durvaszemcsés övezet esetén célszerű a szoliduszt jobban megközelítő, magasabb csúcshőmérsékletet választani. A finomszemcsés övezet esetén pedig célszerű a hűlési sebességet mérsékelni. Ezt követően nyílhat lehetőség ütővizsgálattal, illetve törésmechanikai vizsgálatokkal ezeknek a zónáknak a mélyebb elemzésére.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program” című kiemelt projekt keretei között valósult meg.

Referenciák

- [1] H. K. D. H. Bhadeshia; Sir R. Honeycombe: Microstructure and Properties, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006
- [2] Adony, Y.: Heat-affected zone characterization by physical simulations, Welding Journal, 2006, pp. 42-47.
- [3] Koritárné Fótos, R.; Koncsik, Zs.; Lukács, J.: A fizikai szimuláció és alkalmazása az anyagtechnológiákban, „Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban” című konferencia, Szolnok, 2012
- [4] Gáspár, M.; Balogh, A.: GMAW experiments for advanced high strength steels, University of Miskolc, Department of Materials Processing Technologies, Journal of Production Process and Systems, Volume 6 No. 1, 2013, pp. 9-24.
- [5] Gáspár, M.; Balogh, A.: Structural inhomogeneities in the heat affected zones of (Q+T) high strength steel joints, XXVII. microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, Paper M3, 2013
- [6] Kuzsella, L.; Lukács, J.; Szűcs, K.: Fizikai szimulációval végzett vizsgálatok S960QL jelű, nagyszilárdságú acélon, GÉP, LXIII. évf. 4. sz., 2012, pp: 37-42.
- [7] U. Laudien, M. Müller, G. Schulze és T. Teske: Gefügerichtreihe Schweisstechnik, Deutscher Verlag für Schweisstechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf, 1979
- [8] Gáspár, M.: A nemesített állapotú acélok hagyományostól eltérő hegesztési megoldásai középvastag lemezek esetén, IWE/EWE Diplomaterv (tervezésvezető: Dr. Balogh András), 2013
- [9] GLEEBLE 3500 QuikSim™ Software Heat Affected Zone Programming Manual