

A KORSZERŰ NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK HEGESZTÉSÉNEK KIHÍVÁSAI ÉS MEGOLDÁSAI

Gáspár Marcell

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: marcell.gaspar@uni-miskolc.hu

Sisodia Pratap Singh Raghawendra

Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: raghawendra.sisodia@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A szigorodó környezetvédelmi előírások miatt a járműipar fokozottan igényli a korszerű nagyszilárdságú acélok alkalmazását, amelyekkel jelentős saját tömeg csökkenést lehet elérni. Ebből adódóan az acélgyártók figyelme az új generációs nagyszilárdságú acélok fejlesztésére irányul, amely során a hegeszthetőségi tulajdonságok kiemelt szerepet kapnak. Az ilyen acélok alkalmazásakor az acélszerkezet gyártók gyakran szembesülnek hidegrepedési problémával, a mechanikai tulajdonságok hőhatásövezetben bekövetkező romlásával, valamint a hozaganyag-választás dilemmájával. A közepes- és a vastaglemezek tekintetében a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés a legelterjedtebb hegesztő eljárás, amelynek korszerű eljárásváltozatai, különösen a korlátozott hőbevitelt eredményező impulzustechnológiák, nagyszerű lehetőséget jelentenek a hegesztési feladatok megvalósításához. Nagyszilárdságú acélok esetén a sugaras hegesztő eljárásokon belül mind a lézer-, mind az elektron-sugaras hegesztés speciális technológiai megoldásai kiválóan alkalmazhatók. Ezeknél a korszerű technológiáknál a kis kiterjedésű hőhatásövezetet eredményező koncentrált hőbevitel mellett lehetőség nyílik az előmelegítés, a hegesztés és az utóhőkezelés ugyanazon hőforrással történő megvalósítására. Jelen cikk áttekintést ad a nagyszilárdságú szerkezeti acélok különböző típusairól és hegeszthetőségéről, továbbá sorra veszi azokat a hegesztéstechnológiai megoldásokat, amelyekkel a korszerű nagyszilárdságú acélokra jellemző kimagasló mechanikai tulajdonságok leginkább megőrizhetők.

Kulcsszavak: nagyszilárdságú acél, hegeszthetőség, hőhatásövezet, sugaras hegesztés, utóhőkezelés

Abstract

Due to the severe environmental protection regulations, the vehicle industry increasingly requires the wider application of advanced high-strength steels (AHSS), which can be used to achieve significant weight reduction. As a result, the attention of steel manufacturers is oriented to the development of new generation AHSS, during which the weldability properties play a prominent role. Steel structure manufacturers regularly face with the problem of cold cracking, the deterioration of mechanical properties in the heat-affected zone (HAZ), and the dilemma of the filler material choice. In the case of medium and thick plates, gas metal arc welding (GMAW) is the most common welding process, and advanced process variants, especially pulse technologies resulting in limited heat input, are a great opportunity for welding AHSS. In the case of AHSS, the special technological solutions of both laser

and electron beam welding are excellently applicable within beam welding processes. With these modern technologies, in addition to the concentrated heat input resulting in a small HAZ, it is possible to implement preheating, welding and post-weld heat treatment with the same heat source. This article provides an overview of the different types of AHSS, including their weldability characteristics, and lists the welding technological solutions that best preserve the outstanding mechanical properties of AHSS.

Keywords: high strength steel, weldability, heat-affected zone (HAZ), beam welding proces, post-weld heat treatment (PWHT)

1. Bevezetés

Az Európai Unióban a közlekedés felelős a teljes uniós szén-dioxid kibocsátás majdnem 30%-áért, amelynek 72%-a a közúti közlekedésből származik (Európai Parlament, 2019). Ráadásul, a járművek jelentős mennyiségben tartalmaznak acélokat, amelyek előállítása szintén jelentős CO₂ kibocsátással jár, nevezetesen, az Európai Unió CO₂ kibocsátásának 5%-át az acélipar adja (EU Science HUB, 2022). Ebből adódóan a károsanyag kibocsátás csökkentése a fenntartható fejlődés megvalósításának egyik alapvető záloga.

A járműszerkezeteknek sokszor eltérő követelményeket kell kielégíteniük. Egyrészt, a fogyasztás, illetve a károsanyag kibocsátás mérséklése érdekében saját tömeg csökkenést kell elérni. Másrészt, egy lehetséges ütközés során biztosítani kell a járműben utazó személyek biztonságát, amely az utasokat körülvevő karosszéria ütközéssel szembeni ellenállása mellett számos biztonsági berendezés beépítését teszi szükségessé, amelyek hozzájárulnak a saját tömeg növeléséhez (Alden et al., 2022). A saját tömeg csökkentésére vonatkozó igény és a biztonsági előírások egyidejű teljesítése nem valósítható meg korszerű nagyszilárdságú acélok alkalmazása nélkül (Koncsik et al., 2021).

A nagyszilárdságú acélok egyrészt a járművek saját tömegének, ezáltal pedig fogyasztásának csökkentésével járulnak hozzá a károsanyag kibocsátáshoz, másrészt, a nagyobb teherviselő képesség miatt kisebb szelvényméretekre, ezáltal pedig kevesebb acél előállítására van szükség. Amennyiben az acélok előállítása zöld energia felhasználásával történik, akkor a járművek, ezáltal pedig a közlekedés ökológiai lábnyoma, tovább csökkenthető. A járműipar számára számos nagyszilárdságú acélterméket előállító svéd acélgyártó vállalat, az SSAB például azt tűzte ki célul, hogy a HYBRIT technológia segítségével a világ első olyan acélipari vállalata lesz, amely fosszilis anyagok felhasználása nélkül készülő acéllal jelenik meg a piacon, várhatóan már 2026-ban, és 2045-re gyakorlatilag mentessé válik a fosszilis anyagok használatától (SSAB, 2022). A járműipar mellett a nagyszilárdságú acélok más iparágakban is megjelennek, ahol esztétikus, karcsú szerkezetekre van szükség. Ebből adódóan, napjainkban, például az épületek – különösen a felhőkarcolók – acélszerkezeteiben és a hidakban is találkozhatunk már ilyen acélokkal.

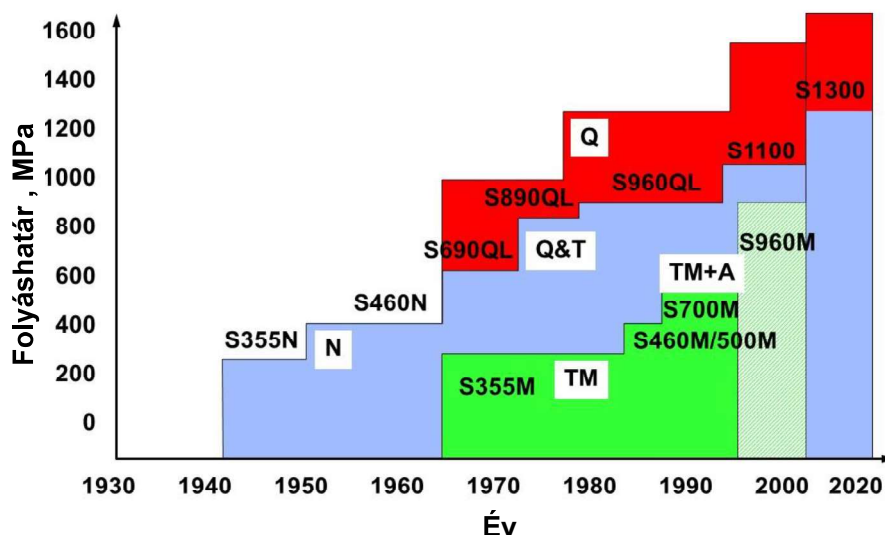
A számos ígéretes lehetőség ellenére továbbra is lényeges körülmények nehezítik a nagyszilárdságú acélok széleskörű alkalmazását:

- tervezési kihívások: nyomóterhelésnek, valamint fáradásnak kitett szerkezeti elemekben a nagyobb folyáshatárból származó előnyök kisebb mértékben használhatók ki (Lukács et al., 2019);
- korlátozott alakíthatóság;
- hegeszthetőségi nehézségek (Porter, 2015; Tümer et al, 2019);
- megmunkálási nehézségek (elsősorban 1000 MPa feletti szilárdsági kategóriák esetén);
- korlátozott lemezvastagság tartomány;
- egységnyi tömegre vetített nagyobb alapanyag és hozaganyag ár.

A fokozódó felhasználói igény ellenére a nagyszilárdságú acélok hegesztése, különösen a nagyobb szilárdsági kategóriák esetén, számos kihívást jelent a hegesztőmérnökök számára. A speciális hengerlési és hőkezelési technológiák, valamint mikroötvözők segítségével az acélgyártók olyan korszerű nagyszilárdságú acélok előállítására törekednek, amelyeknek kedvező alakváltozó képességük és szívósságuk van, valamint elfogadható módon hegeszthetők. Mivel szerkezeti acéloknál a nagy szilárdság alapvetően a finomszemcsés, részben vagy teljesen martenzites szövetszerkezetre vezethető vissza, ebből következően a hegesztési hőbevitel a nem-egyensúlyi szövetszerkezet jelentős megváltozását vonja magával. A hőhatásövezetben kilágyult és rideg részek egyaránt kialakulhatnak a hegesztési hőciklus és a beolvadási vonaltól való távolság függvényében. Jelen cikkben egy áttekintést adunk a nagyszilárdságú acélok fejlődési tendenciáról, a fokozott ridegedési hajlamról és a hőhatásövezetben bekövetkező változásokról, a hozaganyag-választás kérdésköréről, valamint sorra vesszük azokat a hegesztéstechnológiai megoldásokat ($t_{8/5}$ koncepció, impulzus technológiák, sugaras hegesztő eljárások, utóhőkezelések stb.), amelyekkel a hegesztett szerkezetekben a korszerű nagyszilárdságú acélok kimagasló szilárdsági és szívóssági tulajdonságai a leginkább megőrizhetők.

2. Acélkategóriájuk és gyártásuk

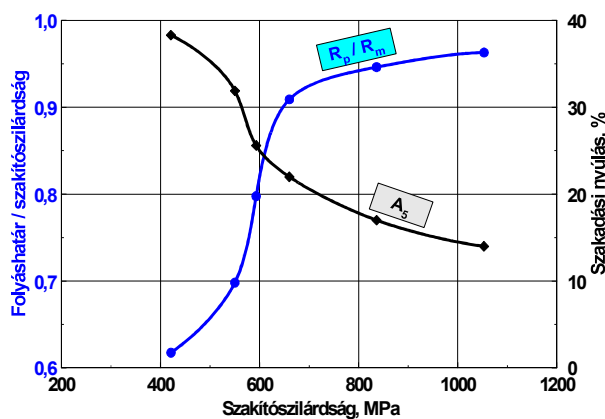
A napjainkban elérhető legnagyobb szilárdságú acélok közel négyszer akkora folyáshatárúak, mint száz évvel ezelőtt (1. ábra). Az edzés (Q: quenching) és nagy hőmérsékletű megeresztés (T: tempering), összefoglaló módon nemesítés (Q&T), szerkezeti acéloknak történő megjelenésével kimagasló szívósságú nagyszilárdságú acélokat állítanak elő évtizedek óta. Ezeknek az acéloknak jellemzően megeresztett martenzites, részben bénites a szövetszerkezetük, viszonylag nagy a karbontartalmuk (0,15-0,25) és acélgyártól függően makro- (Cr, Mo, Ni) és mikroötvözőket (Al, Ti, Nb, Zr, V és B) tartalmaznak. A nagy szilárdság a martenzit-bénites szövetszerkezet, a finom szemcseméret, a szubsztitúciós szilárd oldatot alkotó ötvözők és a nagyobb diszlokáció-sűrűség együttes eredménye. A nemesített nagyszilárdságú acélok hegesztése, bár kiváló alapanyagoknak tekinthetők, a nagy karbonegyenértékből adódóan számos kihívást jelent a felhasználók számára.



1. ábra. A szerkezeti acélok fejlődése.

A termomechanikus kezelés (TMCP: thermomechanically controlled process) alkalmazásával ugyanakkora folyáshatár érhető el, kisebb karbontartalom mellett, ugyanakkor a mikroötvözők ezeknél az acéloknál is kiemelt szerepet kapnak. Ezen acélok szövetszerkezete jellemzően bénit-martenzites, esetenként csekély ferrit tartalommal. A szemcseméret – a hengerlési során túlűtött ausztenitből adódóan – a nemesített nagyszilárdságú acélokhöz képest jellemzően még kisebb. Bár a termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélokra jellemző kis karbon egyenérték kedvező hegeszthetőségi tulajdonságokat eredményez, széleskörű alkalmazásuknak korlátot szab az, hogy csak szűkebb lemezvastagság tartományban érhető el, mint a nemesített szerkezeti acélok. Mindkét gyártási mód esetén az acélgyártók fokozottan törekednek a kis szennyezőtartalomra (elsősorban S és P), amellyel a járműipari felhasználás szempontjából is fontos kis átmeneti hőmérséklet érhető el (Sisodia, 2021).

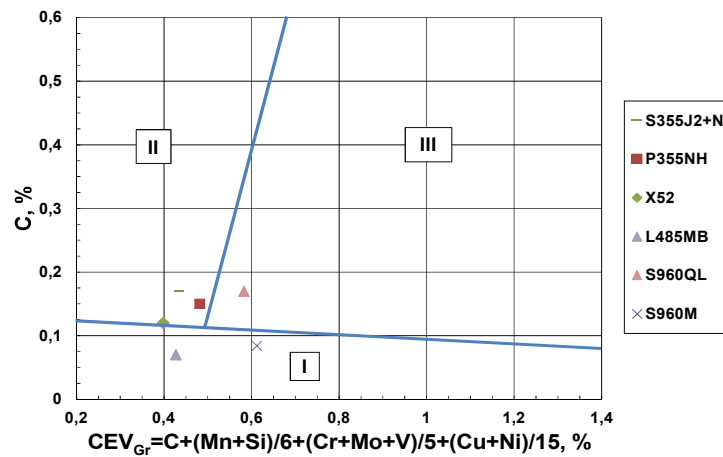
A felhasználás szempontjából nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a folyáshatár növelésével a nagyszilárdságú acélok képlékeny tartaléka csökken, amelyet $R_{p0,2}/R_m$ szakító szilárdság felett az egyhez közeli folyáshatár-szakító szilárdság viszony ($R_{p0,2}/R_m$) is mutat (2. ábra).



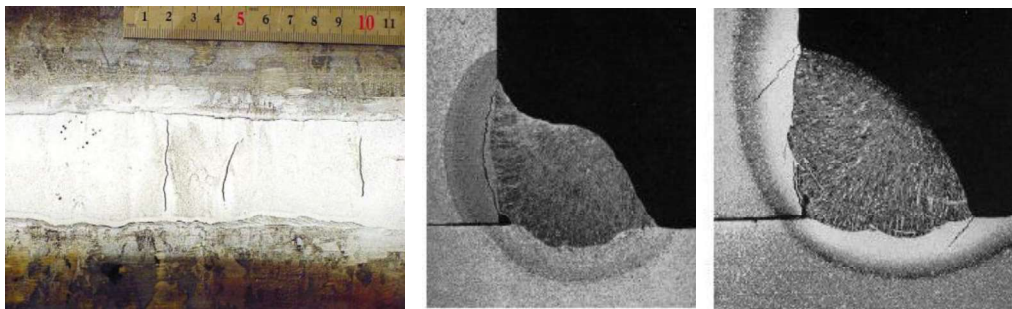
2. ábra. Az acélok szilárdságának hatása a ridegedési hajlamra.

3. Hegesztési kihívások

Amikor egy szerkezeti acél hegeszthetőségi tulajdonságait vizsgáljuk, az első lépés a Graville diagramban (3. ábra) történő elhelyezkedés vizsgálata. A diagram a szerkezeti acélokat a karbon-tartalom és a karbon egyenérték függvényében három tartományba sorolja be: az első tartományba tartoznak a jól hegeszthető acélok, a másodikban kapnak helyet azok az acélok, amelyek hegesztésekor már körültekintéssel kell eljárni, a harmadik tartományba pedig a nehezen hegeszthető acélok sorolhatók. A diagram felhívja a figyelmet a karbon egyenértéken túl a karbon-tartalom hegeszthetőségre gyakorolt kiemelt hatására. Az ábrán szereplő acélokat az MSZ EN 10204 szabvány szerinti 3.1 besorolású műbizonylatok alapján helyeztük el. A diagram alapján a nemesített nagyszilárdságú acélok jellemzően a legproblémásabb, fokozott hidegrepedési hajlamra utaló, harmadik tartományba esnek, miközben a termomechanikusan kezelt acélok az első tartományban kapnak helyet, amelyből adódóan hidegrepedési veszély és egy adott lemezvastagságig elkerülhető előmelegítés nélkül hegeszthetők. A nagyszilárdságú acélok hegesztett kötéseiben, a martenzit tartalmú rideg szövet-szerkezet és a maradó feszültségek miatt, hidrogén jelenlétében, hidegrepedések alakulhatnak ki, amelyek egyaránt előfordulhatnak a varratban (keresztirányban) és a hőhatásövezetben (4. ábra). A nemesített nagyszilárdságú acélok esetén fokozott hidegrepedési hajlamra kell számítani akkor, amennyiben a hegesztés előmelegítés nélkül, túlságosan kis fajlagos hőbevitellel történik.



3. ábra. Szerkezeti acélok elhelyezkedése a Graville diagramban.

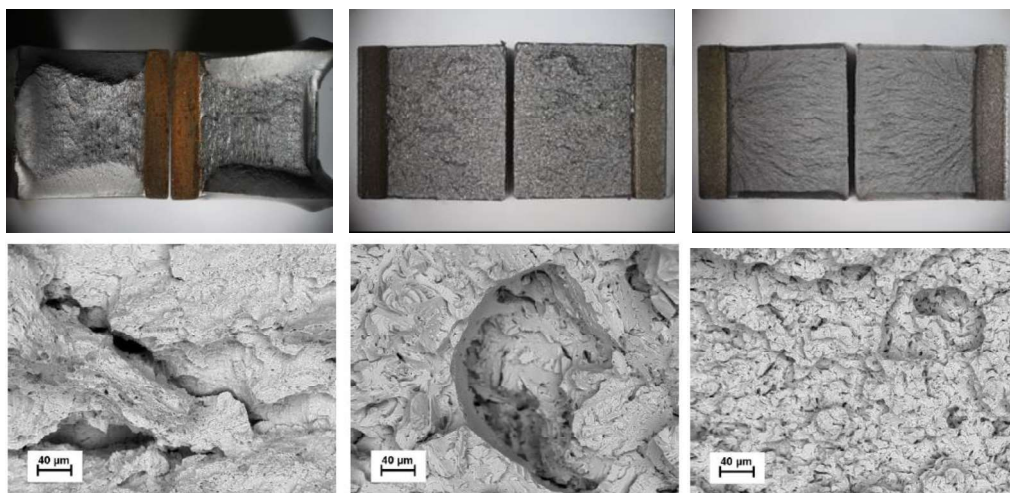


4. ábra. Hidegrepedés a varratban és a hőhatásövezetben (Worldpress, 2016).

A másik jelentős hegesztési problémakör a hőhatásövezetben bekövetkező mechanikai tulajdonságromláshoz kapcsolódik. Az acélkategóriától és a hegesztési hőbeviteltől függően, kemény és kilágyult részek egyaránt kialakulhatnak a hőhatásövezetben. A nemesített nagyszilárdságú acéloknál különösen jellemző a kemény, rideg durvaszemcsés sáv, miközben a termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acéloknál csak kis mértékű keményedés figyelhető meg a hőhatásövezetben. Ráadásul ezeknél az acéloknál a keményedett részek gyakran nem is a durvaszemcsés sávban, hanem a finomszemcsés (normalizált) övezetben alakulnak ki. A szilárdsági jellemzők változása mellett jelentős mértékű szívósságsökkenés következik be a hőhatásövezetben (5. ábra), amely a nemesített nagyszilárdságú acélok esetén a durvaszemcsés sávra és a részleges átkristályosodási (interkritikus) sávra egyaránt jellemző. Többretegű varratfelépítés esetén a szemcsehatárokon kialakuló lokális rideg részek, martenzit-auszenit (M-A) szigetek miatt, rendszerint az interkritikus durvaszemcsés zóna a hőhatásövezet legkisebb szívósságú része. A termomechanikusan kezelt acélok hegesztett kötéseinek hőhatásövezetében szintén végbemegy szívósságsökkenés, azonban az átalakult szövetszerkezet rendszerint kevésbé lesz rideg, mint nemesített nagyszilárdságú acéloknál (Sisodia, 2021).

Az, hogy a hidegrepedési hajlam vagy pedig a szívósságsökkenés jelent nagyobb kockázatot a hegesztett szerkezet szempontjából, részletes vizsgálatokat igényel. Ugyanakkor, a mérlegelés során érdemes azt is figyelembe venni, hogy miközben a hidegrepedések az iparban széles körben alkalmazott roncsolásmentes vizsgálatokkal nagy valószínűséggel kimutathatók, addig a szívósság-

csökkenés roncsolásmentes kimutatására nem igazán van lehetőség. Alapvetően a megfelelő szintű minőségbiztosítás alkalmazásával (például hegesztési paraméterek és hegesztők ellenőrzése folyamatfelügyelő rendszerekkel) lehet megelőzni a hegesztett kötésben bekövetkező túlzott mértékű szívósságcsökkenést.



5. ábra. Szívós alapanyag és rideg hőhatásövezet töretfelülete nemesített nagyszilárdságú acél ütővizsgálatakor.

A nagyszilárdságú acélok hegesztésével kapcsolatos harmadik problémakör az alapanyaggal megegyező szilárdsági tulajdonságokat eredményező, ún. matching típusú hozaganyagok korlátozott elérhetősége a nagyobb szilárdsági kategóriák esetén. Miközben az acélgyártók az ötvözők, a hengerlés és a hőkezelés optimális kombinációjával állítják elő a kívánt mechanikai tulajdonságokat, addig a hozaganyag gyártók egyedüli lehetősége az ötvözés a megkövetelt varratulajdonság elérése érdekében. Ráadásul, ezt úgy kell megvalósítani, hogy a hozaganyag karbonegyenértéke, azon belül is elsősorban karbontartalma (lásd Graville diagram) ne legyen túlságosan nagy. Matching típusú hozaganyagok, az alapanyaghoz képest jelentősen nagyobb (1,5-3%) nikkel tartalommal, napjainkban egészen az S1100 szilárdsági kategóriáig elérhetők, miközben az S1300 kategóriánál egyelőre csak kisebb szilárdságú, ún. undermatching hozaganyagok alkalmazhatók (Kovács et al, 2022; Kovács et al., 2023). Attól függően, hogy a varrat a hegesztett szerkezet milyen igénybevételű helyére esik, számos kutatás foglalkozik a nagyszilárdságú acélból készült hegesztett kötések fáradással szembeni ellenállásával. Vannak olyan alapanyag-hozaganyag-igénybevétel kombinációk, amikor az undermatching típusú hozaganyagok előnyösebbnek bizonyulnak, miközben más esetben a matching hozaganyagok hoznak kedvezőbb eredményt (Lukács et al, 2019).

Mivel az acélszerkezet gyártásban a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés a legelterjedtebb ömlesztő hegesztő eljárás (Kalácska et al, 2016), ezért a technológia jellegéből adódóan a varratban előfordulhat porozitás (Kovács et al., 2022). A konvencionális, kis szilárdságú acélokhoz képest a nagyszilárdságú acéloknál minden szakirodalom kihangsúlyozza a lehető legkisebb hegesztési fajlagos hőbevitel alkalmazásának szükségességét a mechanikai tulajdonságok, elsősorban szívósság megőrzése érdekében. Ugyanakkor, a mindennapi gyakorlatban nem szabad azt figyelmen kívül hagyni, hogy a kis fajlagos hőbevitel megnövelheti a porozitás előfordulásának valószínűségét, amennyiben figyelmen kívül hagyják a megfelelő óvintézkedéseket (felülettisztítás, rétegek/sorok közötti köszörülés, megfelelő tisztaságú védőgáz stb.). Ilyenkor a rövid hegesztési hőciklusból

adódóan végbemenő gyors megszilárdulási folyamat miatt nem áll rendelkezésre elegendő idő a hegfürdőben lévő gázok eltávolítására.

4. Technológiai lehetőségek

A nagyszilárdságú acélok hegesztéstechnológiáját az adott acél esetén javasolt $t_{8/5}$ hűlési idő tartomány betartásával célszerű megtervezni. A szilárdság növelésével az optimális hűlési időablak rendszerint szűkül (S960QL esetén 6-10 s, S960M esetén 5-15 s). A $t_{8/5}$ hűlési idő koncepció előnye, hogy az előmelegítés és a hegesztési hőbevitel hatását együttesen veszi figyelembe. Az MSZ EN 1011-2 szabványban is megtalálható hűlési idő módszer elméleti háttere mögött alapvetően az áll, hogy a hagyományos, kis vagy közepes szilárdságú szerkezeti acélok esetén a fázisátalakulások alapvetően az A_{c3} hőmérsékletre utaló 800-850 °C és a folyamatos hűtésű átalakulási diagramok orrpontjához tartozó 500 °C között mennek végbe. A legtöbb nagyszilárdságú szerkezeti acél esetén azonban nincs semmilyen elméleti háttere a 800-500 °C tartomány vizsgálatának, mivel a nagyobb karbonegyenérték és a kis hegesztési hőbevitel miatt jellemzően ausztenit → martenzit átalakulás megy vége hegesztéskor, amelynek átalakulási hőmérséklet tartománya 500 °C alatt van.

Napjainkban a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztést alkalmazzák leggyakrabban a korszerű nagyszilárdságú acélok hegesztéséhez (Kalácska et al., 2016). Különösen nagy jövő áll azon korszerű eljárásváltozatok előtt, amelyekkel – az előírt beolvadási mélység megtartása mellett – csökkenthető a hegesztési hőbevitel és a hőhatásövezet mérete. Tekintettel arra, hogy a nagyszilárdságú acélok hegesztésekor a lengetést kerülni kell, ezért a varrat rendszerint több hegesztési sorból épül fel, mint a hagyományos acéloknál. A termelékenység növelése érdekében hatékony megoldást jelentenek a fémportöltetű huzalelektrodák, amelyekkel nagyobb leolvasztási teljesítmény érhető el.

Növekvő igény mutatkozik a lézer- és az elektronsugaras hegesztő eljárások alkalmazására. Mindkét technológia előnye a nagy energiasűrűség, és az ebből adódó mély beolvadás és csekély hőhatásövezet méret. Speciális feladatok esetén mindkét hőforrás alkalmazható a hegesztés mellett előmelegítésre és utóhőkezelésre is. Ezáltal lehetőség nyílik arra, hogy akár az előmelegítés, a hegesztés és az utóhőkezelés ugyanazzal a hőforrással valósuljon meg. Az arra alkalmas elektronsugaras hegesztő berendezések esetén ez akár az elektronsugárnyaláb három részre bontásával is megvalósítható. Korszerű lézersugaras berendezések esetén, különösen a dióda lézereknél, a fókuszált terület nagysága széles tartományok között szabályozható. Ezáltal más fókuszált terület nagyság állítható be a hegesztéshez és a kialakult hőhatásövezet méret függvényében az utóhőkezeléshez (Sisodia, 2021). A nagyszilárdságú acéloknál a hegesztést követő utóhőkezeléssel a hidegrepedési veszély csökkenthető, valamint a varrat és a hőhatásövezet szívóssága jelentős mértékben növelhető.

5. Összefoglalás

Jelen cikkben egy rövid áttekintést adtunk a különböző típusú nagyszilárdságú szerkezeti acélokról, beleértve a gyártástechnológiát, a hegeszthetőségi tulajdonságokat, valamint a hegesztéstechnológiai tervezési szempontokat. Egyértelmű kapcsolat van az acélgyártó eljárás, a hegeszthetőség és az alkalmazott hegesztéstechnológia között. A termomechanikusan kezelt nagyszilárdságú acélok a hőhatásövezetben bekövetkező mechanikai tulajdonságromlás szempontjából kevésbé érzékenyek a hegesztési hőbevételre, mint a nemesített nagyszilárdságú acélok. A huzalelektrodás védőgázos ívhegesztéseken belül az impulzustechnológiák és a fémportöltetű huzalelektrodák alkalmazása jelenti a legígéretesebb technológiai kombinációt, miközben a sugártechnológiák alkalmazása a csökkent hőhatásövezeti méret, valamint az utóhőkezelés lehetősége miatt tekinthető előnyös megoldásnak.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka a Magyar Tudományos Akadémia BO/00643/22/6 azonosítószámú Bolyai János Kutató Ösztöndíjának keretében valósult meg.

Irodalom

- [1] Európai Parlament (2019). *Amit érdemes tudni a gépjárművek szén-dioxid-kibocsátásáról az EU-ban*. <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20190313STO31218/amit-erdemes-tudni-a-gepjarmuvek-szen-dioxid-kibocsatasarol-az-eu-ban> (letöltés dátuma: 2022.12.08.)
- [2] EU Science HUB (2022). *EU climate targets: how to decarbonise the steel industry*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en (letöltés dátuma: 2022.12.08.)
- [3] <https://www.ssab.com/hu-hu/fossil-free-steel> (letöltés dátuma: 2022.12.08.)
- [4] Lukács, J., Dobosy, Á. (2019). Matching effect on fatigue crack growth behaviour of high-strength steels GMA welded joints. *Welding in the World*, 63, 1315-1327. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00768-3>
- [5] Porter, D. A. (2015). *Weldable high-strength steels: challenges and engineering applications*, Portevin lecture, IIW 2015 International Conference on High Strength Steels – Challenges and Applications, Helsinki, Finland, Paper IIW 2015 0102.
- [6] Tümer, M., Schneider-Bröskamp, C., Enzinger, N. (2022). Fusion welding of ultra-high strength structural steels - A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 203-229. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.049>
- [7] Sisodia, R. P. S. (2021) *High Energy Beam Welding of Advanced High Strength Steels*. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola,.
- [8] <https://inspektorkimpalan.wordpress.com/2015/08/18/welding-imperfection-cracks> (letöltés dátuma: 2016.03.05.)
- [9] Kovács, J., Lukács, J. (2022). *S1300 nagyszilárdságú szerkezeti acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése*. XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Budapest, Magyarország, Magyar Hegesztési Egyesület, pp. 48-56.
- [10] Kovács, J., Lukács, J. (2023). Influence of Filler Metals on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Metal Arc Welded High Strength Steel. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (Eds.) *Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (1st ed., pp. 995-1005). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_83
- [11] Kalácska, E., Májlínger, K., Fábíán, E. R., Russo Spena, P. (2016). *Nagyszilárdságú vékonylemezek vegyeskötése MIG eljárással*. 28. Nemzetközi Hegesztési Konferencia, Dunaújváros, Magyarország, pp. 276-284.
- [12] Koncsik, Zs., Lukács, J., Nagy, Gy. (2021). *Nagyszilárdságú acélok fizikai szimulációval előállított hőhatásövezeteinek törésmechanikai vizsgálatai*, XXX. Jubileumi Nemzetközi Hegesztési Online Konferencia, Budapest, Magyarország, Magyar Hegesztési Egyesület, pp. 119-125.
- [13] Abd al al, S.a., Meilinger, Á. (2023). Investigation of Resistance Spot Welded Joints Made on Ultra-high-Strength Steel Sheets. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (Eds.) *Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (1st ed., pp. 981-994). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_82