

Kovács Judit^{1*}, Lukács János¹

S1300 ultra-nagyszilárdságú acél huzalelektrodás védőgázos ívhegesztése

Gas metal arc welding of S1300 ultra high strength steel

¹ Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet

*metkjudit@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen kutatómunka során S1300-as szerkezeti acélon végeztünk hegesztési kísérleteket két különböző típusú és szilárdsági kategóriába sorolható hozaganyag (Böhler Union X96 ($R_{eL}/R_{p0,2} \geq 930$ MPa) és Böhler alform 1100 L-MC ($R_{eL}/R_{p0,2} \geq 1100$ MPa)) felhasználásával. A huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés paramétereit a $t_{8/5} = 5$ s hűlési idő alapján határoztuk meg. A kötések elkészítése után optikai mikroszkópos, keménység- és műszerezett ütővizsgálatokat végeztünk. Az optikai mikroszkópos képek és a keménységvizsgálatok eredményei alapján a két különböző hozaganyaggal készített kötések között elhanyagolható volt a különbség. A műszerezett ütővizsgálatok alapján a varrat ütőmunkája a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyag alkalmazásakor volt nagyobb. A vizsgálatok alapján a varrat mindkét vizsgált esetben rideg viselkedést mutatott.

Abstract

In the present research work, welding experiments were carried out on S1300 structural steel using two different types of filler metals of different strength categories (Böhler Union X96 ($R_{eL}/R_{p0,2} \geq 930$ MPa) and Böhler alform 1100 L-MC ($R_{eL}/R_{p0,2} \geq 1100$ MPa)). The parameters for gas metal arc welding were determined based on the $t_{8/5} = 5$ s cooling time. After welding, optical microscopic, hardness and instrumented impact tests were performed. Based on the optical microscope images and the results of the hardness tests, the difference between the joints made with the two different filler metals was negligible. Based on the instrumented impact tests, the impact energy of the weld metal was higher with the use of the Böhler alform 1100 L-MC filler metal. The tests showed that in both cases the weld metal was brittle.

Kulcsszavak: Ultra-nagyszilárdságú acél, huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés, optikai mikroszkóp, keménységvizsgálat, műszerezett ütővizsgálat

Keywords: Ultra high strength steel, gas metal arc welding, optical microscope, hardness test, instrumented impact test

1. Bevezetés

A nagyszilárdságú és az ultra-nagyszilárdságú acélok térhódítását folyamatos gyártástechnológiai és alkalmazástechnológiai fejlesztések jellemzik, egymással szinergikus egységben [1]. Az elméleti és/vagy kísérleti úton meghatározott (méréseken alapuló) anyagmodellek és anyagparaméterek a szimulációs szoftverek hatékony és megbízható alkalmazásának alapvető feltételei [2, 3]. Napjainkban ezen acélok al-

kalmazásának aránya folyamatosan növekszik, jó mechanikai tulajdonságaiknak (pl. nagy keménység) és kiemelkedő szilárdsági tulajdonságaiknak köszönhetően. A nagyszilárdságú és az ultra-nagyszilárdságú acélok egyre fontosabb szerepet töltenek be a műszaki alkalmazásokban, különösen a jármű- és közlekedési iparban; felhasználásukkal jelentős tömegcsökkenés érhető el. A vékonyabb szelvényméreteknek és kisebb keresztmetszeteknek kö-

szönhetően kevesebb alapanyag és hozaganyag felhasználásra van szükség, valamint a működési költségek is csökkennek. Előnyös tulajdonságaik okán az acélok szilárdsági jellemzőinek fejlesztésére az acél- és hozaganyaggyártók kiemelt figyelmet fordítanak [4-13]. Ugyanakkor, számos nyitott kérdés vár még megválaszolásra, különösen a törésmechanikai viselkedés [3] és az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenálló képesség területén.

A nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének három főbb kihívása van. Az első a hőhatásövezet szilárdságának és/vagy szívósságának csökkenése; a második a hidegrepedés érzékenység; a harmadik pedig a hozaganyag választás problémája, mivel napjainkban csak az 1100 MPa folyáshatárú anyagokhoz áll rendelkezésre „matching” (azonos folyáshatárt garantáló) hozaganyag. A nagyszilárdságú, nemesített acélok hegesztése során a legnagyobb hegeszthetőségi problémát az eredeti finomszemcsés szövetszerkezet kedvezőtlen változásai okozhatják. Hegesztési kísérletek alapján a mechanikai követelmények kis hegesztési hőbevitel alkalmazásával teljesíthetők, viszont a hidegrepedés kockázata megnő. Mivel a nagyszilárdságú acélokból hegesztett mobil szerkezetek gyakran kis hőmérsékleten üzemelnek és esetenként akár túlterhelés is előfordulhat, a garantált minimális ütőmunka teljesítése a biztonságos működés szempontjából kritikus fontosságú. Következésképpen, meg kell vizsgálni a hegesztési paraméterek hatását a varrat és a hőhatásövezet jellemzőire, és a teljes hegesztett kötésben megfelelő szívósságot kell biztosítani. A hegesztési paramétereket gyakran a $t_{8/5}$ hűtési idővel írják le, hogy össze lehessen hasonlítani a különböző technológiai változatokat (hőbevitel, előmelegítés/réteg-

közi hőmérséklet) és a hegesztési eljárásokat [14-19].

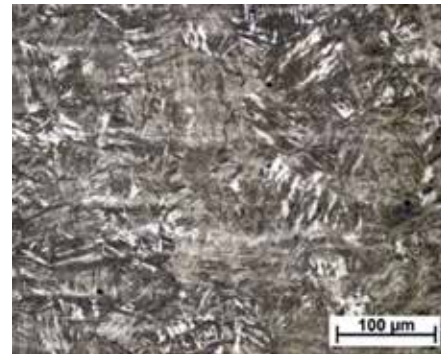
Jelen cikkben, egy S1300-nak megfelelő ultra-nagyszilárdságú acél esetén, két különböző típusú és szilárdsági kategóriába tartozó hozaganyaggal létrehozott hegesztett kötés szövetszerkezeti és mechanikai tulajdonságait vizsgáljuk optikai mikroszkópos, keménység- és műszerezett ütővizsgálatok segítségével, majd a vizsgálatok eredményeit mutatjuk be és hasonlítjuk össze.

2. Felhasznált anyagok és alkalmazott technológia

A hegesztési kísérletekhez alkalmazott, 10 mm vastagságú alapanyaghoz műbizonylat nem állt rendelkezésünkre, ezért a vegyelemzésre és a mechanikai tulajdonságok meghatározására a Miskolci Egyetemen került sor. A kapott eredmények alapján a vizsgált acél mechanikai tulajdonságainak mért értékeit az 1. táblázat, kémiai összetételének mért értékeit pedig a 2. táblázat tartalmazza.

A kémiai összetétel alapján, az MSZ EN 10025-1:2005 [20] szabvány szerint meghatározott módon kiszámított karbonegyenérték: CEV = 0,96%.

A vizsgált nemesített ultra-nagyszilárdságú acélról, szállítási állapotban, Zeiss Observer D1 m optikai mikroszkóppal készült felvétel az 1. ábrán látható. A kapott szövetszerkezeten jól beazonosítható a nagyszilárdságú acélokra jellemző megeresztett martenzites szövetszerkezet. A próbatest maratása 3%-os Nitál (3% HNO_3 + 97% etilalkohol) oldat segítségével történt.



1. ábra: Az alapanyag szövetszerkezete, 3%-os Nitál maratás

A hegesztett kötések két különböző típusú és szilárdsági kategóriába tartozó ($d = 1,2$ mm) hozaganyaggal készítettük el, amelyek a Böher által gyártott Union X96 és alform 1100 L-MC “undermatching” típusú (az alapanyag folyáshatáránál kisebb folyáshatárt garantáló) hozaganyagok voltak. A műbizonylatokban feltüntetett mechanikai tulajdonságokat a 3. táblázat, kémiai összetételeket pedig a 4. és az 5. táblázatok tartalmazzák.

A hegesztési paraméterek meghatározása a hűlési idő figyelembevételével történt. Szakirodalmi ajánlások és korábbi fizikai szimulációs vizsgálatok [21] alapján a választott $t_{8/5}$ hűlési idő 5 s volt. Az így meghatározott hegesztési paramétereket a 6. táblázat mutatja be.

A kötések létrehozásához választott eljárás a huzalelektrodás védőgázos ívhegesztés volt. A 350x150x10 mm-es X leélezésű lemezeket PA pozícióban egyesítettük, Daihen WB-P500L típusú áramforrás alkalmazásával. A leélezést és a sorokat a 2. ábra szemlélteti. Az egyenes hegesztési sebesség és varratképzés biztosítása érdekében (az első györsor kivételével) a pisztolyt ESAB B5001 típusú hegesz-

1. táblázat: A vizsgált acél mechanikai tulajdonságai

Keménység (HV10)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	KV -40°C-on (J)
426	1300	1560	12	78

2. táblázat: A vizsgált acél kémiai összetétele (tömeg%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
0,23	0,45	1,86	0,012	0,001	0,85	0,093
Ni	Mo	V	Ti	Al	Nb	Zr
2,43	0,360	0,030	0,002	0,063	<0,001	<0,001

3. táblázat: Az alkalmazott hozaganyagok mechanikai tulajdonságai

A hozaganyag típusa	$R_{el}/R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	KV -40 °C-on (J)
Böhler Union X96	≥ 930	≥ 980	≥ 14	≥ 47
Böhler alform 1100 L-MC	≥ 1100	1140-1250	≥ 10	≥ 27

4. táblázat: A Böhler Union X96 hozaganyag (melegen hengerelt huzal) kémiai összetétele (tömeg%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Ti	Al	Zr
0,1	0,8	1,94	0,015	0,011	0,52	0,53	2,28	<0,01	0,06	0,06	<0,01	<0,01

5. táblázat: A Böhler alform 1100 L-MC hozaganyag esetén a varratfém kémiai összetétele (tömeg%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,08	0,46	1,54	0,01	0,007	0,64	0,52	2,73	0,22



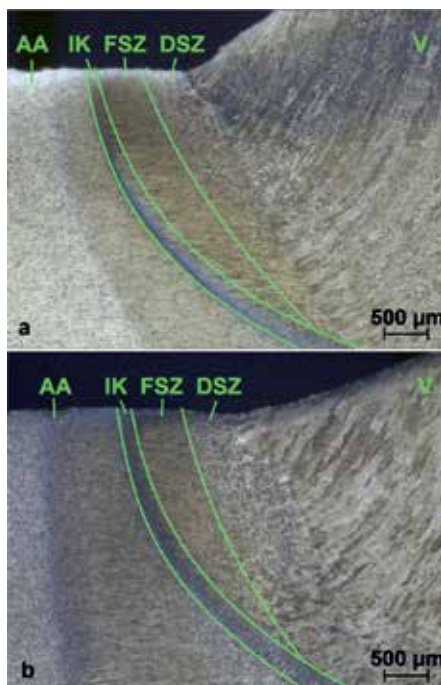
2. ábra: A kötés kialakítás és a varratsorok sematikus ábrája

tő traktorral mozgattuk. Az alkalmazott előmelegítési hőmérséklet 100 °C, a rétegek közötti hőmérséklet, pedig 130 °C volt. A kísérletekhez alkalmazott védőgáz M21 típusú (80% Ar + 20% CO₂) védőgáz keverék volt, 18 l/min áramlási sebességgel.

3. Vizsgálati eredmények és kiértékelésük

A hegesztett kötések próbatesteket munkáltunk ki optikai mikroszkópos, keménység-, és műszerezett ütővizsgálatokhoz. A próbatestek előkészítése után az optikai mikroszkópos vizsgálatokat a Zeiss Observer D1 m típusú optikai mikroszkóppal végeztük. A szövetszerkezeti képek a 3. ábrán és a 4. ábrán láthatók, ahol az „a” jelű képek a Böhler Union X96 hozaganyaggal, a „b” jelűek pedig a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötésről készültek.

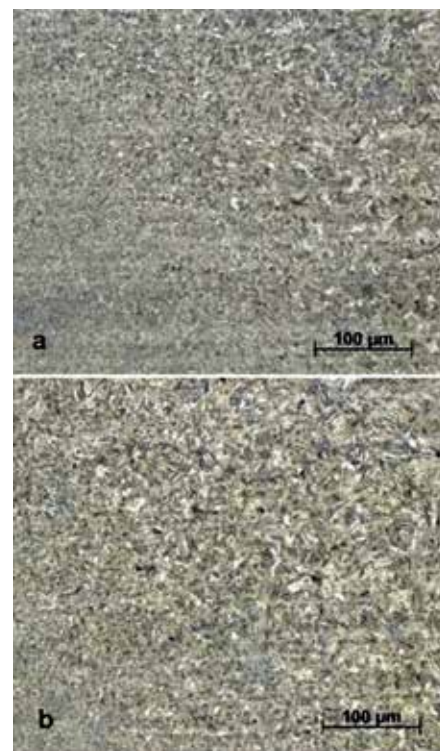
Az optikai mikroszkópos képek alapján, a hasonló hőbeviteli és hűlési időnek köszönhetően, a hegesztett kötések szövetszerkezetében nincsenek számottevő különbségek.



3. ábra: A hegesztett kötések optikai mikroszkópos képei, 3%-os Nital maratás

AA = alapanyag,
 IK = interkritikus hőhatásövezeti sáv,
 FSZ = finomszemcsés hőhatásövezeti sáv,
 DSZ = durvaszemcsés hőhatásövezeti sáv,
 V = varrat

A 3. ábra „a” és „b” jelű képei alapján a különböző hőhatásövezeti sávok szélessége is hasonló. Az alkalmazott



4. ábra: A hegesztett kötés optikai mikroszkópos képei (az alapanyag és a varrat átmenetéről), 3%-os Nital maratás

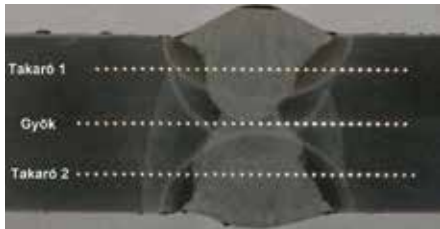
eltérő összetételű hozaganyagok miatt a varratfémekben csak kismértékű különbség látható. (A két különböző kötés színeiben látható némi eltérés a maratás miatt.)

Az optikai mikroszkópos képek elkészítése után a próbatesteken Vickers (HV10) keménységvizsgálatokat végeztünk Reicherter UH 250 típusú, univerzális, mikrokemény-

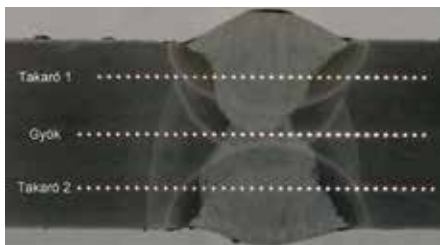
6. táblázat: A hegesztési paraméterek

Sor	Áramerősség (A)	Feszültség (V)	Hegesztési sebesség (cm/min)	t _{8/5} hűlési idő (s)	Fajlagos hőbevitel (J/mm)
Gyök	180	19,1	31	5	562
Takaró	240	22,7	53		493

ség mérő berendezéssel. Mindkét kötés esetén három különböző sorban mértünk keménységet (fél millimétereként), az 5. és a 6. ábrán látható elhelyezkedés szerint.



5. ábra: A keménységmérési pontok elhelyezkedése a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötés esetén (lemezvastagság: 10 (mm))



6. ábra: A keménységmérési pontok elhelyezkedése a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötés esetén (lemezvastagság: 10 (mm))

A két különböző kötésen mért keménység értékek a 7. és a 8. ábrákon láthatók.

A vizsgált nemesített nagyszilárdságú acél az MSZ CEN ISO/TR 15608:2021 szabvány [22] besorolása alapján a 3.2 csoportba tartozik. Az ISO 15614-1:2017(E) szabvány [23] előírásai alapján a 3. csoportba tartozó, utólag nem hőkezelt acélok esetén a megengedett maximális ke-

ménység értéke 450 HV10, viszont az olyan acélok esetén, ahol $R_{eH} > 890$ MPa, ettől eltérő értékek is megengedettek lehetnek. A mi esetünkben, ahogyan az a 7. és a 8. ábrákon is látható, a hőhatásövezet egyes részein a keménység meghaladja a 450 HV10 értéket. Egyéb kiegészítés nem található a szabványban arra vonatkozóan, hogy nagyobb folyáshatárú acélok (mint például a vizsgált 1300 MPa folyáshatárú acél) esetén milyen értékek tekinthetők elfogadhatónak. Az ábrákon jól látszik, hogy a mért keménység értékek között a hőhatásövezet egyes részein akár 200 HV10 különbség is előfordulhat. Továbbá az is megfigyelhető, hogy mindkét varrat esetén a gyöksorban mért keménység értékek kisebbek (mind a varratfémekben, mind a hőhatásövezetben), mint a takaró sorokban mérték. Mivel az első gyöksor hegesztése kézzel történt; annak ellenére, hogy törekedtünk az 5 s hűlési időhöz kiszámított hegesztési paraméterek betartására, a kismértékben változó hegesztési sebesség miatt előfordulhat, hogy a hőbevitel nagyobb volt, amelynek eredményeként a varrat és a hőhatásövezet kilágyulhatott. Mivel a $t_{8/5}$ hűlési idő a számítások szerint minden esetben 5 s körüli érték volt, ezáltal a fajlagos hőbevitel is minden esetben hasonló volt, így az eltérő hozaganyagok okozta különbségeknek a varratfémekben mért keménység értékek különbségeiben kellene megjelenniük.

Az egyszerűbb összehasonlíthatóság érdekében a varratfémek keménység értékeinek átlagát, szórását és szórási együtthatóját a 7. táblázatban foglaltuk össze.

A 7. táblázat értékei alapján a mért keménység értékek szórása és szórási együtthatója megbízható mérésekre utal. A két különböző hozaganyaggal készített kötések esetén a varratfémekben mért átlagos keménység értékek hasonlóak voltak. Az adatok alapján a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötés keménysége minimálisan nagyobb volt, mint a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötésé.

A két különböző hozaganyaggal létrehozott kötések hőhatásövezetében és varratában 3-3 próbatesten végeztünk műszerezett ütővizsgálatokat PSD 300/150 típusú berendezéssel -40 °C-on. Az ütővizsgálat eredményei a 9. ábrán, az expanzió értékek, pedig a 8. táblázatban láthatók.

Az ütővizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a kapott eredmények szórása elfogadható mértékű. Az alapanyag ütőmunkájához képest a varratban jelentős csökkenés figyelhető meg, viszont a hőhatásövezetben mért ütőmunkák átlaga jól megközelíti az alapanyag ütőmunkáját. A két különböző hozaganyaggal készített kötések ütőmunkája mind a varratban, mind a hőhatásövezetben hasonló. A varrat esetén az



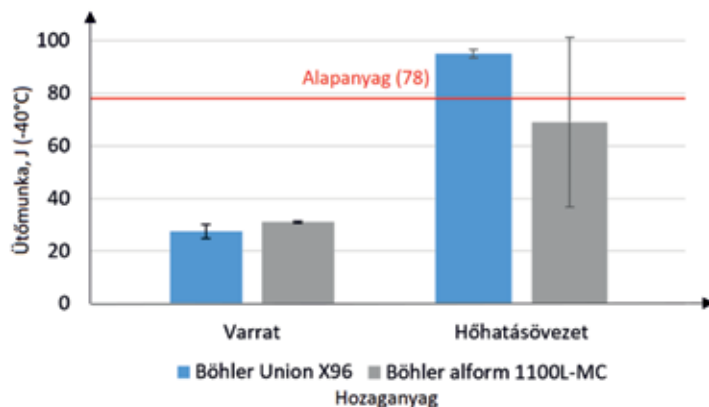
7. ábra: Keménységeloszlás a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötés esetén



8. ábra: Keménységeloszlás a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötés esetén

7. táblázat: A varratfémek keménység értékeinek átlaga, szórása és szórási együtthatója

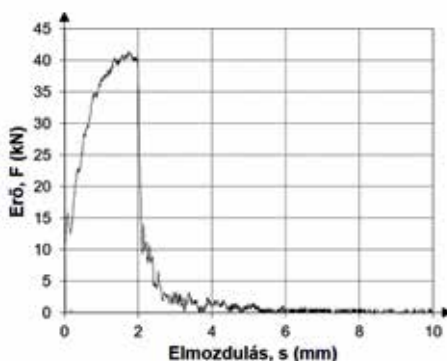
A hozaganyag jele	A keménység-mérés helye a varratfémekben	Vickers keménység, (HV10)	Szórás	Szórási együttható (%)
Böhler Union X96	Takaró 1	429	12,66	2,95
	Gyök	379	10,25	2,70
	Takaró 2	421	16,10	3,83
Böhler alform 1100-L MC	Takaró 1	408	11,54	2,83
	Gyök	381	6,82	1,79
	Takaró 2	408	16,13	3,96



9. ábra: A -40 °C-on végzett műszerezett ütővizsgálatok eredménye

8. táblázat: Az expanzió átlaga

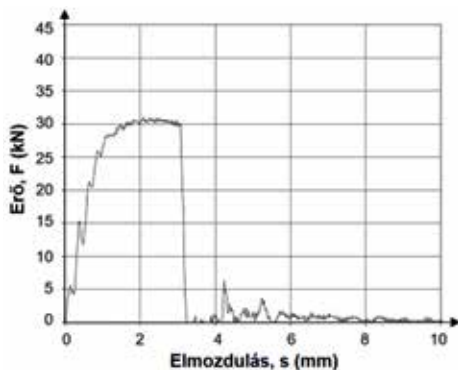
Műszerezett ütővizsgálat helye	Az expanzió átlaga		
	Hozaganyag nélkül	Böhler Union X96	Böhler alform 1100 L-MC
Alapanyag	0,75	N/A	N/A
Varrat	N/A	0,23	0,25
Hőhatásövezet	N/A	0,83	0,67



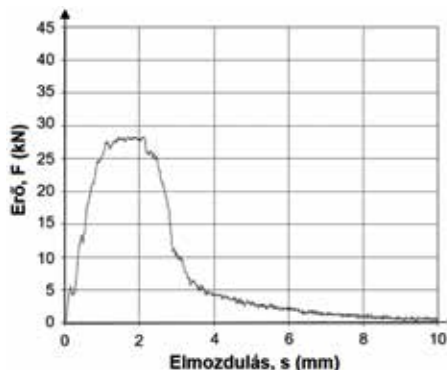
10. ábra: Az alapanyag erő-elmozdulás diagramja

alform 1100 L-MC hozaganyaggal készített kötés ütőmunkája volt nagyobb, míg a hőhatásövezet esetén az Union X96-tal készített kötésé. (A hőhatásövezet esetén érdemes megjegyezni, hogy a hőhatásövezet különböző részein nagymértékben eltérhet az ütőmunka értéke és a próbatétel kimunkálás során nem biztosítható, hogy a bemetszés pontosan ugyanazokba a hőhatásövezeti sávokba kerüljön, így ez befolyásolja az eredményeket.)

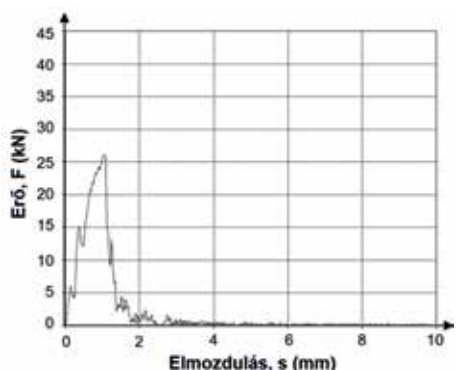
Összehasonlítva a hagyományos ütővizsgálattal, a műszerezett ütővizsgálat részletesebb információkat nyújt a törés folyamatáról és az anyag képlékeny/rideg viselkedéséről: meghatározható a terhelés-ido diagram, valamint a törési folyamat jellemző pontjai is. A terhelés-ido diagram alapján kiszámítható az erő-elmozdulás diagram. (Az alapanyag erő-elmozdulás diagramja a 10. ábrán, míg a két különböző kötés hőhatásövezetének és varratának erő-elmozdulás diagramja a 11-14. ábrákon láthatók.). Feltéve, hogy a repedésindulás a maximális erőnél történik meg a diagram két részre osztható. A maximális erőig a görbe alatti területet a repedésindításhoz szükséges energiának kell tekinteni, míg a fennmaradó terület a repedés terjedéséhez szükséges energiát határozza meg. Ez alapján a repedésindításhoz szükséges energia arányának növekedésével a vizsgált anyag szívóssága csökken [14, 24, 25].



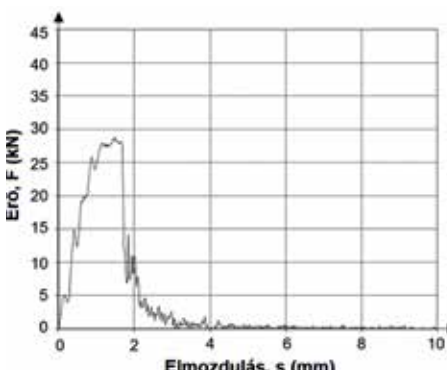
11. ábra: A hőhatásövezet erő-elmozdulás diagramja Böhler Union X96 hozaganyag esetén



12. ábra: A varrat erő-elmozdulás diagramja Böhler Union X96 hozaganyag esetén



13. ábra: A hőhatásövezet erő-elmozdulás diagramja Böhler alform 1100 L-MC hozaganyag esetén



14. ábra: A varrat erő-elmozdulás diagramja Böhler alform 1100 L-MC hozaganyag esetén

A 9. táblázat a repedésinduláshoz felhasznált energia százalékos arányát tartalmazza a teljes ütőmunkához képest.

9. táblázat: A repedésinduláshoz felhasznált energia százalékos aránya a teljes ütőmunkához képest

Műszerezett ütővizsgálat helye	A repedésinduláshoz felhasznált energia arányának átlaga [%]		
	Hozaganyag nélkül	Böhler Union X96	Böhler alform 1100 L-MC
Alapanyag	69	N/A	N/A
Varrat	N/A	78	77
Hőhatásövezet	N/A	29	42

A 9. táblázat adatai alapján látható, hogy az alapanyag és mindkét hozaganyaggal készített varrat (szinte különbség nélkül) meglehetősen rideg viselkedést mutat, mivel az ütővizsgálat során az elnyelt energia nagy része a repedésindulásra fordított. A hőhatásövezetben viszont inkább szívós viselkedés figyelhető meg, főleg az Union X96 hozaganyaggal készített kötés esetén.

4. Konklúziók

Az S1300-as ultra-nagyszilárdságú acél hegesztési paramétereinek meghatározása a választott $t_{8/5} = 5$ s hűlési idő figyelembevételével történt. A beállított paraméterek alapján számított hőbevitel így 493-562 J/mm közé esett.

A kísérletekhez két különböző típusú és szilárdsági kategóriába tartozó „undermatching” (kisebb folyáshatárú) hozaganyagot választottunk: Böhler Union X96 és Böher alform 1100 L-MC.

- Az optikai mikroszkópos képek alapján az alkalmazott hasonló hűlési idő és fajlagos hőbevitel miatt a hegesztett kötések szövetszerkezetében és a hőhatásövezeti sávok szélességében nem voltak szignifikáns különbségek.
- A keménységvizsgálatok eredményei alapján a két különböző ho-

zaganyaggal létrehozott kötések mért keménységértékek nagyon hasonlóak voltak; a Böhler Union X96 hozaganyaggal készített kötések keménysége minimálisan nagyobb volt.

- A műszerezett ütővizsgálat eredményei alapján a varrat ütőmunkája a Böhler alform 1100 L-MC hozaganyaggal a hőhatásövezet ütőmunkája, pedig az Union X96 hozaganyaggal volt nagyobb. A repedésinduláshoz felhasznált energia aránya alapján a varrat mindkét esetben rideg viselkedést mutatott (mint ahogy az alapanyag is), a hőhatásövezet viszont kevésbé volt rideg főleg a Böhler Union X96 hozaganyag alkalmazásakor.

Ahhoz, hogy a vizsgált anyagon készített hegesztett kötések viselkedéséről átfogóbb képet kapjunk további (szakító-, hajlító-, valamint törésmechanikai) vizsgálatokra van szükség.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kézirat a XXXI. Nemzetközi Hegesztési Konferencián elhangzott előadás alapján a Magyar Hegesztési Egyesület (MAHEG) által publikálásra javasolt kézirat.

Irodalomjegyzék

- [1] Lukács Zs., Tisza, M. “Application and development trends in high strength steel and aluminium” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 448, 012031, 2018.
- [2] Lukács Zs. “Nagyszilárdságú acélok visszarugózásának modellezése és kísérleti vizsgálata” Miskolci Egyetem, Doktori értekezés, 2014.
- [3] Koncsik Zs., Lukács Zs. “Fracture mechanical analyses of high strength steels applying experiments and simulation” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 903, 012013, 2020.
- [4] Blacha S., Wegłowski M. S., Dymek S., Kopyscianksi M. “Microstruc-

tural and mechanical characterization of electron beam welded joints of high strength S960QL and Weldox 1300 steel grades” Archives of Metallurgy and Materials, 62(2), pp. 627-634, 2017.

- [5] Branco R. “High-Strength Steels, New trends in production and application” Mechanical Engineering Theory of Application, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2018.
- [6] Amraei M., Ahola A., Afkhami S., Björk T., Heidarpour A., Zhao X. L. “Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels” Engineering Structures, 198, 109460, 2019.
- [7] Gáspár M., Sisodia R. “Improving the HAZ toughness of Q+T high strength steels by post weld heat treatment” Materials Science and Engineering, 426, 012012, 2018.
- [8] Gáspár M. „Nemesített nagyszilárdságú szerkezeti acélok hegesztéstechnológiájának fizikai szimulációra alapozott fejlesztése” Miskolci Egyetem, Doktori értekezés, 2016.
- [9] Dobosy Á. „Tervezési határgörbék nagyszilárdságú acélokból készült, ismétlődő igénybevételű szerkezeti elemekhez” Miskolci Egyetem, Doktori értekezés, 2017.
- [10] Adonyi, Y. “Heat-affected zone characterization by physical simulations” Welding Journal, 85 (10), pp. 42-47, October 2006.
- [11] Kaha P., Pirinen M., Suoranta R., Martikainen J. “Welding of Ultra High Strength Steels” Advanced Materials Research, 849, pp. 357-365, 2014.
- [12] Cui Q. L., Parkes D., Westerbaan D., Nayak S. S., Zhou Y., Saha D. C., Liu D., Goodwin F., Bhole S., Chen D. L. “Tensile and fatigue properties of single and multiple dissimilar welded joints of DP980 and HSLA” Journal of Materials Engineering and Performance, 25 (12), 2016.
- [13] Wegłowski M., Zeman M., Lomozik M. “Physical Simulation of Welda-

- bility of Weldox 1300 Steel” Material Science Forum, 76, pp. 551-555, 2013.
- [14] Gáspár M. “Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel” Metals, 9 (11), 1226, 2019.
- [15] Kostin V. A., Grigorenko G. M., Solomijchuk T. G., Zhukov V. V., Zuber T. A. „Microstructure of HAZ metal of joints of high-strength structural steel Weldox 1300” The Platon Welding Journal, 3, 2013.
- [16] Amraei M., Skriko T., Björk T., Zhai X. L. “Plastic strain characteristics of butt-welded ultra-high strength steel (UHSS)” Thin-Walled Structures, 109, pp. 227-241, 2016.
- [17] Tervo H., Kaijalainen A., Javaheri V., Ali M., Alatarvas T., Mehtonen M., Anttila S., Kömi J. “Comparison of Impact Toughness in Simulated Coarse-Grained Heat-Affected Zone of Al-Deoxidized and Ti-Deoxidized Offshore Steels” Metals, 11 (11), 1783, 2021.
- [18] Tümer M., Pixner F., Vallant R., Domitner J., Enzinger N. “Mechanical and microstructural properties of S1100 UHSS welds obtained by EBW and MAG welding” Welding in the World, 66, pp. 1199-1211, 2022.
- [19] Tümer M., Schneider-Bröskamp C., Enzinger, N. “Fusion welding of ultra-high strength structural steels – A review” Journal of Manufacturing Processes, 82, pp. 203-229, 2022.
- [20] MSZ EN 10025-1:2005 „Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból. 1. rész: Általános műszaki szállítási feltételek”
- [21] Kovács J., Lukács J. “Effect of the welding thermal cycles based on simulated heat affected zone of S1300 ultrahigh strength steel” Key Engineering Materials, 890, pp. 33-43, 2021.
- [22] MSZ CEN ISO/TR 15608:2021 „Hegesztés. A fémek csoportosítási rendszerének irányelvei”
- [23] ISO 15614-1:2017(E) „Fémek hegesztési utasítása és hegesztéstechnológiájának minősítése. A hegesztéstechnológia vizsgálata. 1. rész: Acélok ív- és lánghegesztése, valamint nikkel és ötvözeti ívhegesztése”
- [24] Lenkeyné B. Gy., Winkler S., Tóth L., Blauel J. G. “Investigations on the brittle to ductile fracture behaviour of base metal, weld metal and HAZ material by instrumented impact testing” Proceedings of the 1st International Conference on Welding Technology, Materials and Material Testing, Fracture Mechanics and Quality Management, 1997.
- [25] Gáspár M., Sisodia R. “Improving the HAZ toughness of Q+T high strength steels by post weld heat treatment” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 426, 012012, 2018.