

Sahm Alden Abd Al Al¹, Meilinger Ákos²

Ellenállás-ponthegeztési technológia fejlesztése ultra-nagyszilárdságú acélokhoz

Development of resistance spot welding technology for ultra-high strength steel sheets

^{1,2} Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet¹sahm.alden@uni-miskolc.hu, ²akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Évtizedek óta az autógyártók arra törekednek, hogy növeljék az autókarosszéria szilárdságát úgy, hogy közben csökkenjen a jármű tömege, mindemellett eleget téve a biztonsági és a környezetvédelmi céloknak is. Manapság az ultra-nagyszilárdságú acélok alkalmazásával ezek a követelmények egyre jobban teljesíthetők, viszont a gyárthatóságuk, így a hegeszthetőségük egyre nagyobb kihívást jelent. Ebben a cikkben DP600, DP1000, MS1200 és MS1400 minőségű lemezek különböző hegesztési paraméterkombinációkkal készült kötések jellemző tulajdonságait mutatjuk be, így a DP600-MS1400, DP1000-MS1200 vegyes kötések, valamint MS1200-MS1200 és MS1400-MS1400 kötések szakítóvizsgálati, keménységmérési eredményeinek összehasonlítására kerül sor. A vizsgálati eredmények jelentős eltéréseket mutatnak a különböző hegesztési paraméterkombinációk között.

Abstract

For decades, automotive manufacturers have been seeking to increase the strength of the automotive body structure and reduce its weight for safety and environmental purposes. Nowadays, with the use of ultra-high-strength steels, these requirements can be better met, but their manufacturability, and weldability, is an increasing challenge. In this paper, we present the properties of resistance spot welded joints made by different combinations of welding parameters on DP600, DP1000, MS1200 and MS1400 sheets. The tensile-shear test, hardness test results of DP600-MS1400, DP1000-MS1200, MS1200-MS1200, MS1400-MS1400 joints are compared. The test results show differences between the different combinations of welding parameters.

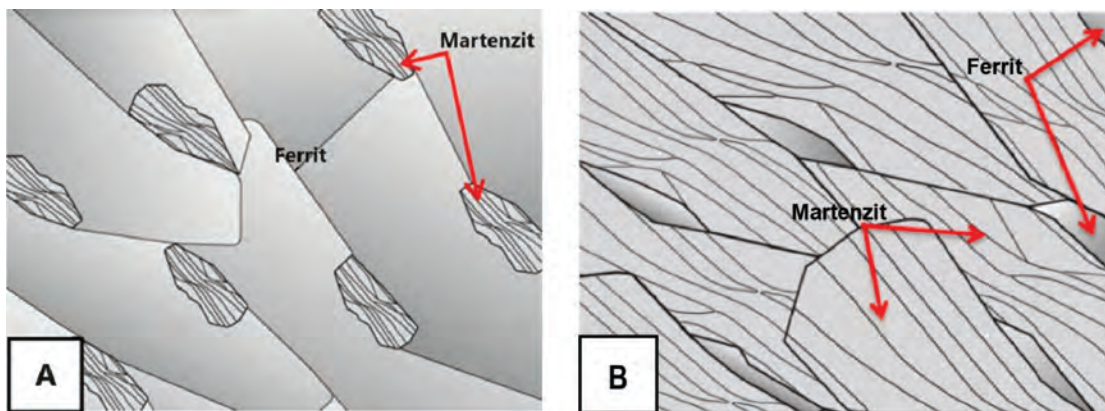
Kulcsszavak: ellenállás-ponthegeztés; nagyszilárdságú acél; vegyeskötés

1. Bevezetés

Autóipari acéllemezek terén jelentős fejlesztések történtek a saját tömeg csökkentése és ezzel együtt a CO₂ kibocsátás csökkentése céljából. Emellett az egyre nagyobb szilárdság elérése is cél, ami a biztonságosabb autókarosszéria előállításához egyre nagyobb mértékben járul hozzá [1]. Ezen acéllemezek kötésére számos kötéstechnológia áll rendelkezésre, például klincselés [2], de még mindig az ellenállás-ponthegeztés a meghatározó, alapvetően a hatékonysága, alacsony költsége és a tömeggyártásba való illeszkedése miatt [3]. A nagyszilárdságú acélok előnyös tulajdonságai jellemzően a több-fázisú szövetszerkezetből adódnak, amit különböző termomechanikus

gyártástechnológiával érnek el. Ebből adódik, hogy hegesztésnél ez a szövetszerkezet jelentősen megváltozhat, így a nagyszilárdságú acélok hegeszthetőségének vizsgálata szükséges [4-5], ezért az ellenállás-ponthegeztési technológia fejlesztése nagyszilárdságú acéloknál kiemelt fontosságú. A szövetszerkezet megváltozása várható hegesztés közben, felkeményedés lehetséges a hőhatásövezetben, ami jellemzően a nagyobb karbontartalom (akár 0,3 %) és egyéb ötvözők mennyiségétől függ [6], valamint a kilágyulás is jellemző. A nagyszilárdságú acélok számos változatával találkozhatunk, melyek különböző ötvözöttségűek, és a gyártástechnológiájuk is eltér. Az egyik leggyakrabban használt autóipari

nagyszilárdságú acélcsoportok a ketts-fázisú acélok (DP) és a martenzites (MS) acélok [7]. Ebből adódóan fontos tudni, hogy a különböző ellenállás-ponthegeztési technológiák, hogyan hatnak a szövetszerkezetre azonos anyagminőségű és vegyeskötések esetén is DP és MS acéloknál. Általánosságban elmondható, hogy 3 fontos tényező alapján következtethetünk az ellenállás-ponthegeztett kötés minőségére: a heglencse átmérő, a mechanikai tulajdonságok és a tönkremeneteli módok. A mechanikai tulajdonságok meghatározásának egyik alapvető vizsgálata a nyíró-szakító vizsgálat. A tönkremeneteli módok tekintetében beszélhetünk kigombolódásról, részleges kigombolódásról és nyíródásról [8].



1. ábra A: elvi ábra a DP acélok és az MS acélok szövetszerkezetéről [15, 18].

Jellemzően a nyíródott kötések mutatják a legrosszabb mechanikai tulajdonságokat, míg a kigombolódott darabok jóval kedvezőbb eredményt produkálnak. Több irodalom szerint a nagyszilárdságú acéllemezek ellenállás-ponthegesztésénél nagyobb az esély a nyíródásra, mint szénacélok esetében, ami alapvetően azzal magyarázható, hogy nagyobb mennyiségben fordul elő a martenzit a heglencsében és káros hatású kiválások is lehetnek a hőhatásövezet bizonyos részein [9-10].

A heglencsében, valamint a hőhatásövezetben bekövetkező szövetszerkezeti változások megváltoztathatják a mechanikai tulajdonságokat és akár pozitív hatása is lehet a tönkremeneteli mód szempontjából. Kutatásokat végeztek a hőhatásövezetben történő keménység változásra vonatkozóan martenzites acélok ellenállás-ponthegesztésénél, és egyértelműen arra jutottak, hogy az interkritikus hőhatásövezeti zónában megjelenő ferrit és a szubkritikus zónában lejátszódó martenzit megeresztődésének hatására jelentős kilágyulás figyelhető meg [11]. Természetesen a kilágyulás a szilárdsági tulajdonságok csökkenését eredményezi, viszont ezekben a hőhatásövezeti zónákban nagyobb alakváltozó képességre lehet számítani, ami csökkenti a kötés ridegségét és jobb eredményt adhat a dinamikus igénybevételekkel szemben. Ez a jelenség jól látható a nyíró-szakító diagramokból, valamint kutatómunka is

folyt ezzel a témával kapcsolatban [8]. Ebből látható, hogy a hegesztés utáni szövetszerkezet ismerete elengedhetetlen a kedvező tulajdonságú és megbízható ponthegesztett kötés létrehozásához [12]. Ellenállás-ponthegesztésnél számos lehetőség adódik a kötés tulajdonságainak megváltoztatására, úgy, mint a hegesztési áramerősség, hegesztési idő, hegesztési erő, impulzusok száma stb. változtatásával. Több kísérletet is végrehajtottak az impulzus technológia alkalmazására vonatkozóan nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztése esetén, melyek több esetben is a kötés-tulajdonságok javulását írták le, ami alapvetően az utóhőkezelő impulzus eredménye [13].

A jelenlegi kutatómunka DP és MS acélok hegesztett kötéseinek vizsgálatával, valamint az eredmények összehasonlításával foglalkozik. A hegesztett kötések különböző anyagkombinációkkal és különböző hegesztési paraméterkombinációkkal készültek, mellyel átfogó képet lehet kapni a nagyszilárdságú acélok ponthegeszhetőségére vonatkozóan.

2. Alapanyagok

A DP acélok lágy ferrit mátrixba ágyazott kemény martenzitet tartalmaznak, így meglehetősen jó alakíthatósággal rendelkeznek nagy szilárdsági tulajdonságok mellett. Ebből adódóan széles körben alkalmazott alapanyag az autóiparban. A ferrit – martenzites szövetszerkezetet az in-

terkritikus hőmérséklet tartományból történő gyors hűtéssel lehet elérni [14]. Az MS acélok nagymértékben martenzitet tartalmaznak, csak kis vagy elenyésző mértékben található ferrit vagy bénit a szövetben. Az MS acélok szakítószilárdsága elérheti az 1700 MPa-t is, viszont jellemzően kicsi alakváltozó képességgel ($A_{80} = 3 - 5\%$) rendelkeznek [16]. A szívósság javítására utólagos hőkezelést szoktak alkalmazni jellemzően mangánnal, szilíciummal és bórral ötvözött alapanyagoknál [17]. Az 1. ábra mutatja a DP és az MS acélok jellemző szövetszerkezetét.

Ebben a kísérletsorozatban az SSAB által gyártott 1 mm vastagságú DP (DP600, DP1000) és MS (MS1200, MS1400) acélokat használtunk alapanyagként, melyekből ellenállás-ponthegesztett kötéseket készítettünk azonos szilárdságú és eltérő szilárdságú alapanyag kombinációkkal, így készültek MS1200 + MS1200, MS1400 + MS1400, DP600 + MS1400 és DP1000 + MS1200 kötések.

Az 1. és 2. táblázat mutatja a felhasznált alapanyagok vegyi összetételét és mechanikai tulajdonságait.

3. Hegesztési körülmények

A hegesztéshez TECNA 8007 típusú váltóáramú ellenálláshegesztő berendezést használtunk TE550 vezérlő egységgel. A hegesztő elektródok anyaga CuCrZr, csonkakúp kialakításúak és 5 mm kontakt átmérővel rendelkeztek. A hegesztő erőt pneu-

1. táblázat Az alapanyagok vegyi összetétele tömeg%-ban (műbizonylatok alapján)

Anyag	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	B
DP600	0.098	0.2	0.81	0.015	0.002	0.014	0.010	0.0002
DP1000	0.132	0.19	1.50	0.010	0.003	0.014	0.010	0.0002
MS1200	0.105	0.20	1.59	0.011	0.003	0.000	0.010	0.0022
MS1400	0.220	0.46	2.46	0.016	0.003	0.000	0.023	0.0000

2. táblázat Az alapanyagok fontosabb mechanikai tulajdonságai (műbizonylatok alapján)

Anyag	Folyáhatár $R_{p0.2}$ (MPa)	Szakítószilárdság R_m (MPa)	Nyúlás A_{80} (min %)	Keménység (HV0.2)
DP600	448	669	18.7	204
DP1000	821	1074	9.5	329
MS1200	1108	1289	4.5	424
MS1400	1391	1496	4.5	460

3. táblázat Az ellenállás-ponthegesztett kötések hegesztési paramétereit és azonosítói

Anyagminőség	Jel	I_{heg} (kA)	Imp. sz.	F_{heg} (kN)	t_{heg} (cikl.)	t_{sz} (cikl.)
DP600-MS1400	1R	5.8	1	3	12	
	1I	6.4	2	3	6x2	15
	1H	8.5	1	4	16	
DP1000-MS1200	2R	5.8	1	3	12	
	2I	6.4	2	3	6x2	15
	2H	8.5	1	4	16	
MS1400-MS1400	3R	5.8	1	3	12	
	3I	6.4	2	3	6x2	15
	3H	8.5	1	4	16	
MS1200-MS1200	4R	5.8	1	3	12	
	4I	6.4	2	3	6x2	15
	4H	8.5	1	4	16	

* 1 ciklus = 20 ms

matikus henger biztosította, ami közvetlenül az elektródhoz kapcsolódott, így fejtette ki a hegesztéshez szükséges erőt [19]. A különböző anyagkombinációjú kötések elkészítéséhez eltérő hegesztési paramétereket használtunk, melyeket a 3. táblázatban foglaltunk össze, ahol I_{heg} = hegesztési áramerősség (hegesztő berendezés által mért érték), Imp. sz. = impulzusok száma, F_{heg} = hegesztési erő, t_{heg} = hegesztési idő, t_{sz} = szünetidő.

A táblázatból jól látható, hogy 3 különböző paraméterkombinációt vizsgáltunk: rövid idejűt (R), hosszú idejűt (H) és impulzusost (I), az alapanyagkombinációkat pedig sorszámoztuk: 1 (DP600-MS1400), 2 (DP1000-MS1200), 3 (MS1400-

MS1400) és 4 (MS1200-MS1200). A paraméterek megválasztásának alapja az volt, hogy 3 lényegesen eltérő kombinációt össze lehessen hasonlítani, melyek mindhárom esetben még elfogadható eredményt adhatnak és ugyanazt a berendezés és elektród alkalmazható mindegyik kombinációhoz. A pontos paramétereket előzetes vizsgálatok alapján választottuk ki.

4. Vizsgálati körülmények és eredmények

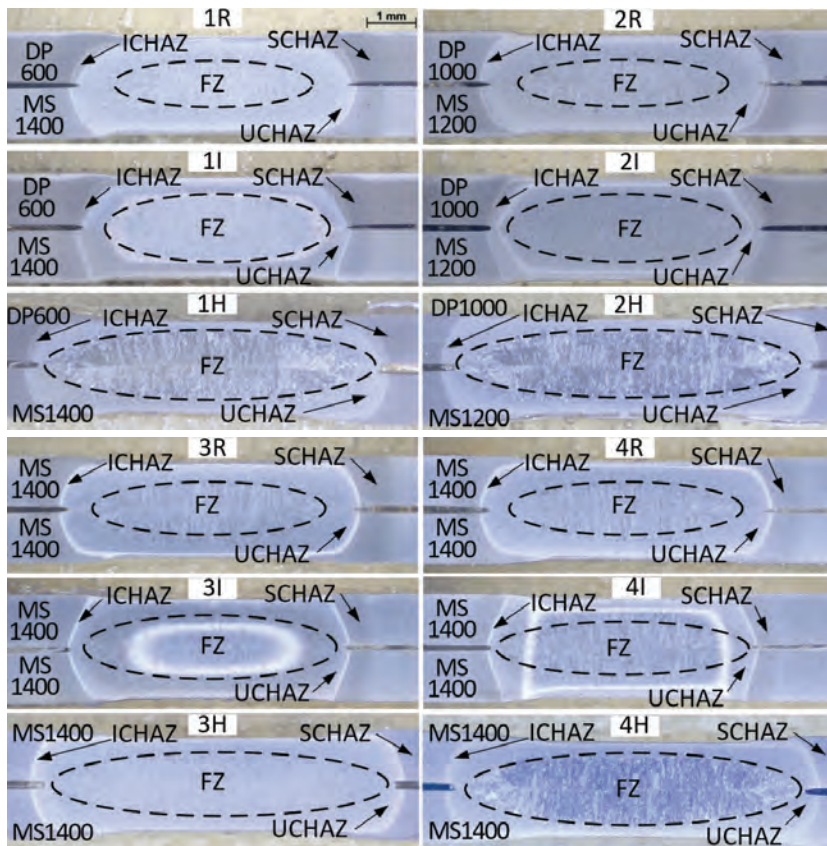
Összesen 4 anyagkombinációt vizsgáltunk meg, mindegyiket 3 különböző hegesztési paraméter alkalmazásával. A nyíró-szakító vizsgálatokhoz minden anyag és hegesztési paraméter kombinációból 3-3 próbat-

test készítettünk, így összesen 36 db próbatest nyíró-szakító vizsgálata történt meg. Az optikai mikroszkópos vizsgálatokhoz és a keménységméréshez további 12 kötés készült (minden paraméter / anyagkombinációból egy).

4.1. Makroszkópos vizsgálatok

A hegesztett kötések ketté vágtuk a kötés középvonalában, majd előkészítettük a csiszolathoz epoxi gyantába történő beágyazással. Egyre finomabb csiszolópapírokkal (P120 – P1500) csiszoltuk, majd políroztuk gyémántpaszta segítségével. A maratáshoz Nital marószert alkalmaztunk (2.5% HNO_3 + 97,5% etanol). A maratott darabok makroszkópos vizsgálatához Zeiss Stemi sztereo mikroszkópot használtunk, amivel azonosítani tudtuk a jellemző a hőhatásövezet különböző zónáit, azaz a durvaszemcsés hőhatásövezeti zónát (UCHAZ), az interkritikus hőhatásövezeti zónát (ICHAZ), a szubkritikus hőhatásövezeti zónát (SCHAZ) és a heglencsét (FZ). A makroszkópos vizsgálat eredményeit mutatja a 2. ábra. A vizsgálatok alatt repedést, valamint kötéshibát nem tapasztaltunk az elkészült kötésekben. A heglencse átmérőket szintén mértük (a csiszolaton látható összeolvadt rész 2 széle között), a hosszú hegesztési idejű technológiánál ez 7,5 mm volt, a rövid hegesztési idejű technológiánál 3,4 mm, míg az impulzusosnál 4,2 mm.

A 2. ábrán egyértelműen látszik, hogy különböző méretű heglencsüket eredményeztek a különböző paraméterkombinációk, viszont az alapanyagok tekintetében nincs érdemi különbség a heglencse átmérőkben. A 2 impulzusos hegesztés esetében jól megfigyelhető, hogy megjelent egy áthőkezelt zóna a heglencsében. A vegyes kötések esetén jól láthatóan eltérően maródtak a hőhatásövezeti zónák, de a mére-
tükben számottevő különbség nincs.



2. ábra Az elkészült kötéseknek makroszkópos felvételei: 1-es (DP600-MS1400), 2-es (DP1000-MS1200), 3-as (MS1400-MS1400), 4-es (MS1200-MS1200). Az R a rövid hegesztési idejű, a H a hosszú hegesztési idejű, míg az I az impulzusos paraméterkombinációt jelöli

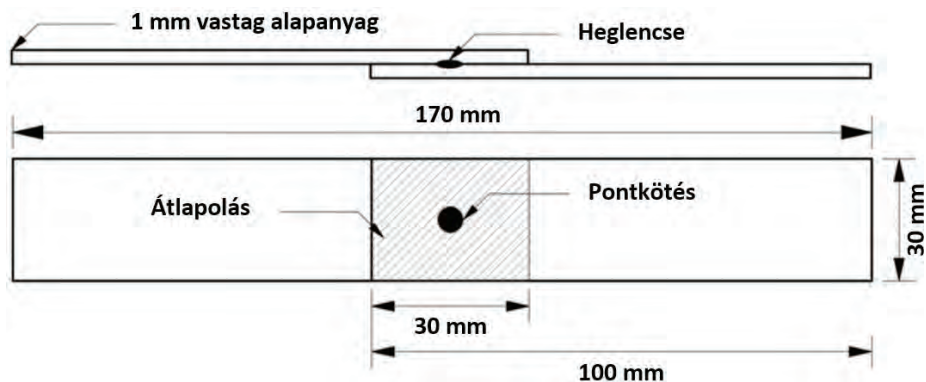
4.2. Nyíró-szakító vizsgálatok

A 3. ábra mutatja a kötés elrendezését nyíró-szakító vizsgálatához.

A nyíró-szakító vizsgálatok eredményeit az 4. táblázatban foglaltuk össze, ami tartalmazza: az adott próbadarabok jelölését, a vizsgálatoknál tapasztalt legnagyobb erő értékek átlagát és annak szórását, a kötés mm^2 -re átszámolt maximális erő értékét, a berendezés keresztfejeinek elmozdulását, valamint a tönkremeneteli módokat. A vizsgálatokat MTS

322 típusú univerzális elektro-hidraulikus anyagvizsgáló berendezésen végeztük, a vizsgálati sebesség $0,2 \text{ mm/s}$ volt. A próbadarabok csúszásmentesen kerültek befogásra.

Az azonos alapanyagon hegesztett kötések és a vegyes kötések esetén is a legnagyobb nyíró-szakítóerő értékeket valamint elmozdulás értéket az 1H, 2H, 3H és 4H jelű próbadarabok adták, amelyeket a legnagyobb hőbevitellel és a hozzá tartozó nagy hegesztési erővel hegesztettünk és



3. ábra A kötés elrendezése nyíró-szakító vizsgálatához

így a legnagyobb pontátmérőt kaptuk. A mm^2 -re vonatkoztatott fajlagos nyíró-szakító erő értékek esetében viszont a legrosszabb eredményt mutatja. A tönkremeneteli módok tekintetében kigombolódás és nyíródás is előfordult, hosszú hegesztési idejű, valamint az impulzustechnológiánál a kigombolódás a jellemző (kivéve a 3I esetet), míg a rövidebb hegesztési időnél nyíródás történt minden esetben. A 4. ábra mutatja a nyíró-szakító diagramokat azonos anyagpárosítások, de eltérő hegesztési paraméterek esetén.

Feltűnő, hogy a DP600-MS1400 vegyeskötés hosszú hegesztési idejű hegesztésénél a nyíró-szakító érték nagyobb, mint az MS1400-MS1400 anyagkombináción a rövid (R) és a 2 impulzusos (I) paraméterkombinációk esetén. Rövid hegesztési idővel (R) készült kötések esetén nincs jelentős különbség a különböző anyagkombinációkon végzett kötések nyíró-szakító értékei között. A 2 impulzusos paraméterkombinációval (I) készített kötések esetén a DP600-MS1400 anyagkombináció adta a legrosszabb értéket, míg az MS1400-MS1400 kombinációnál mértük a legjobb eredményt.

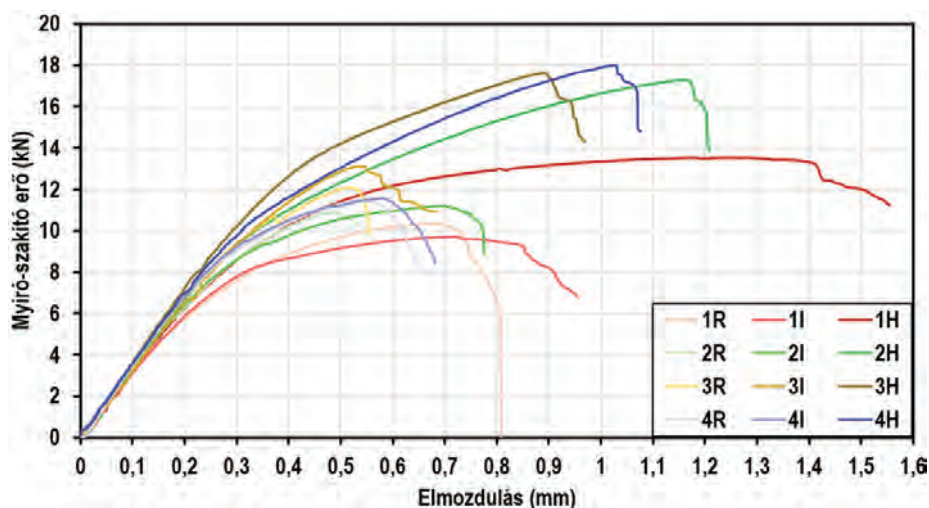
4.3. Keménységmérések

A 3. táblázatban szereplő próbadarabokon mikrovickers keménységmérést végeztünk 200 g terheléssel és átlagosan 50 mérési pontot vettünk fel darabonként. A mérési pontok közötti távolság $0,2 \text{ mm}$ volt. A 5. ábra mutatja az elkészült kötésekben mért keménységprofilokat vegyes kötések és az azonos alapanyagokhoz tartozó kötések esetén is. A vízszintes tengelyen látható a varratközéptől mért távolság, míg a függőleges tengely a Vickers keménységet (HV0,2) mutatja.

A DP600-MS1400 anyagpárosítás esetében (5. ábra) jól látható a két alapanyag keménysége közti jelentős különbség. A DP600 oldalon

4. táblázat A nyíró-szakító vizsgálatok eredményei azonos anyagminőségek esetén

Anyagminőség	Jel	Maximális erő átlag (kN)	Maximális erő szórás	Fajlagos maximális erő (kN/mm ²)	Elmozdulás (mm)	Tönkremeneteli mód
DP600-MS1400	1R	10.09	0.22	1.11	0.70	nyíródás
	1I	9.64	0.06	0.69	0.64	kigombolódás
	1H	13.42	0.13	0.30	1.16	kigombolódás
DP1000-MS1200	2R	10.76	0.08	1.18	0.50	nyíródás
	2I	11.01	0.16	0.79	0.66	kigombolódás
	2H	17.23	0.12	0.39	0.86	kigombolódás
MS1200-MS1200	3R	11.02	0.47	1.21	0.54	nyíródás
	3I	11.79	0.47	0.85	0.67	nyíródás
	3H	18.03	0.09	0.40	0.79	kigombolódás
MS1400-MS1400	4R	11.63	0.39	1.28	0.55	nyíródás
	4I	12.78	0.26	0.92	0.52	kigombolódás



4. ábra Nyíró-szakító erő – elmozdulás diagramok az összes anyagpárosítás esetén

kilágyulás gyakorlatilag nem jelentkezik, míg az MS1400-as esetében a kilágyulás jelentős. A rövidebb hegesztési idővel készült kötés (1R jelű) esetén a DP600 oldal ICHAZ és UCHAZ hőhatásövezeti zónáiban felkeményedés tapasztalható, ami valószínűleg az ausztenites állapotból való gyors lehűtés következtében kialakuló martenzites szövet következménye lehet [20]. A 2 impulzusos paraméterkombinációnál (1I jelű) jól látható a különbség az előzőhöz képest, hogy szélesebb a kilágyult rész (rövid idejűnél 1 mm, míg 2 impulzusosnál 1,7 mm), azaz az ICHAZ és UCHAZ zónákban is különböző mértékű kilágyulás tapasztalható. A hosszabb hegesztési

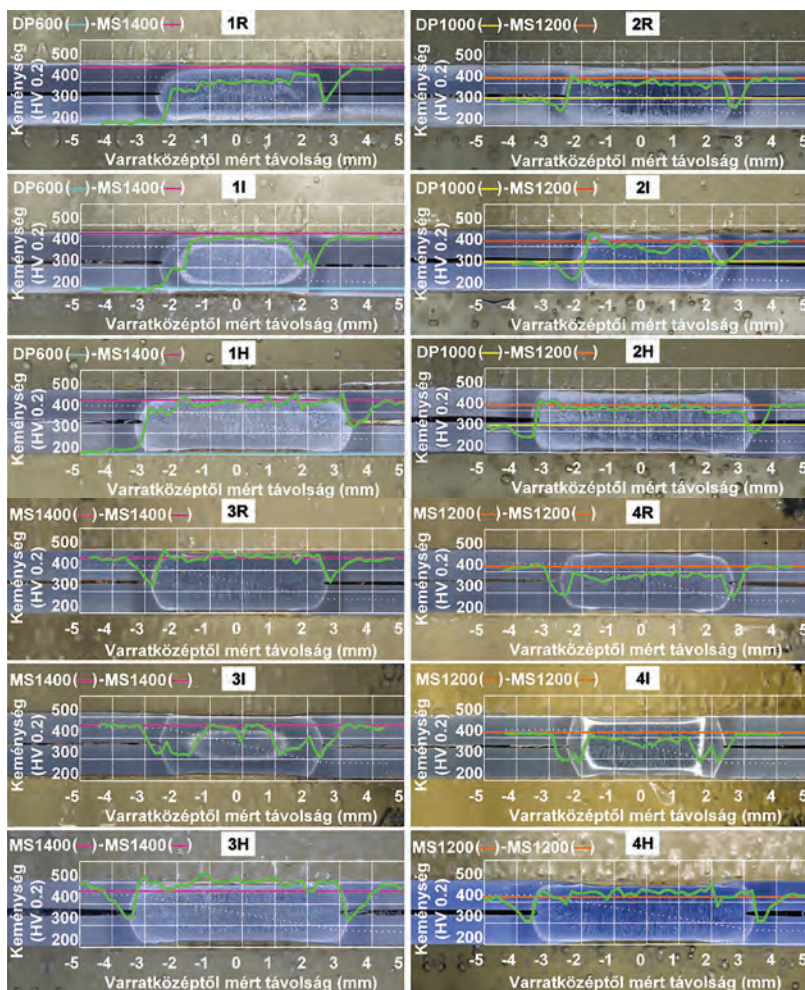
idővel készült kötés (1H jelű) kilágyult hőhatásövezeti része szélesebb (1,2 mm) a rövid hegesztési idejűnél.

A DP1000-MS1200 vegyeskötés esetén (5. ábra) az alapanyagok keménységértéke nem mutat nagy különbséget. A DP1000 oldalon kilágyulás az SCHAZ és ICHAZ zónában, míg enyhe felkeményedés az UCHAZ zónában látható a rövid és a hosszú hegesztési idejű paraméterkombinációnál is, míg az MS1200 oldalán inkább csak a kilágyulás a jellemző a teljes hőhatásövezetben. A hőhatásövezetben egyik esetben sincs felkeményedés, csak a kilágyulás a jellemző az SCHAZ, ICHAZ és UCHAZ zónákban. A heglencse ter-

mészetesen felkeményedett mindegyik technológia esetében, viszont a DP1000 oldalon a felkeményedés mértéke nagyobb, mint az MS1200 oldalon. 2 impulzusos technológiánál (2I jelű) széles kilágyult övezet jött létre az MS1200 oldalon (1,5 mm), a DP1000 oldalon ez az érték 1 mm. A kilágyulás mértéke kisebb a másik 2 paraméterkombinációhoz (2R és 2H jelűek) képest.

Az MS1200-MS1200 és MS1400-MS1400 azonos anyagú kötések esetén (5. ábra) kizárólag kilágyulás tapasztalható a hőhatásövezetben. A kilágyulás mértéke a hosszabb hegesztési idejű paraméterkombinációval (3H és 4H jelűek) készült kötéseknel a legnagyobb mértékű, míg a rövidebb hegesztési idejű (3R és 4R jelűek), valamint a 2 impulzusos paraméterkombinációnál (3I és 4I jelűek) valamivel kisebb mértékű. 2 impulzusos paraméterkombináció esetén a kilágyult rész jóval nagyobb (3I esetén 2,4 mm, 4I esetén 1,3 mm), a heglencsében is kilágyulást lehet látni mindkét esetben. Egyedül az UCHAZ részen mérhető valamivel nagyobb keménység.

A hőhatásövezeti kilágyulás adódhat az újrakristályosodásból, a martenzit megeresztődéséből, valamint ferrit képződéséből az ICHAZ zónában [8, 12]. Bár a kötés szilárdsága drasztikusan csökken a kilágyulás hatására, de alakíthatósága növekszik és dinamikus igénybevételeknek is jobban ellenáll. A hegesztési hőciklus a heglencsében a leggyorsabb, azaz nagyon gyorsan hevül fel és hűl le, ami jellemzően martenzites szövetszerkezetet eredményez, valószínűleg ennek tulajdonítható a nagy keménység a heglencsében [8]. A hőhatásövezet és a heglencse közötti nagy keménységkülönbséget más kutatómunkában is közölték már, például DP1000 típusú acéllemeznel a heglencse keménysége 1,5x nagyobb volt, mint a hőhatásövezet SCHAZ zónájában [19].



5. ábra Keménység profilok az elkészült kötésekénél: 1-es (DP600-MS1400), 2-es (DP1000-MS1200), 3-as (MS1400-MS1400), 4-es (MS1200-MS1200). Az R a rövid hegesztési idejű, a H a hosszú hegesztési idejű, míg az I az impulzusos paraméterkombinációkat jelöli

5. Következtetések

Az elvégzett kísérletek és vizsgálatok eredményeképpen az alábbiakat lehet összefoglalni:

- Az MS1200-MS1200, valamint az MS1400-MS1400 martenzites acéllemezekon készített kötések közül egyértelműen a hosszabb hegesztési időhöz tartozó technológia adta a legnagyobb nyíró-szakító erő értéket, valamint a legnagyobb elmozdulást is. Ez alapvetően a többi paraméterkombinációval készült kötésekhez képest jóval nagyobb heglencse átmérővel magyarázható. A kilágyulás mértéke ebben az esetben kicsit nagyobb volt, mint a többi esetben, de a nagyobb heglencse átmérővel a kilágyulás okozta szilárdságsökkenés kompenzálható volt. Ha a fajlagos mm²-re vonatkoztatott terhelhetőséget vizsgáljuk, úgy

a másik két technológia jobb eredményt mutat. Jelentős eltérések voltak a kilágyult zónák méretében, melyeknél a rövidebb hegesztési idejű paraméterkombináció eredményezte a legkisebb méretű kilágyulási zónát, majd a hosszabb hegesztési idejű következett, végül a 2 impulzusos paraméterkombináció mutatta a legszélesebb kilágyulási zónát.

- A vegyes kötések szintén ugyanazzal a 3 paraméterkombinációval hegesztettük meg. A DP600-MS1400 anyagpárosítás esetén szintén a hosszú hegesztési idejű, nagy áramerősségű és nagy hegesztési erejű paraméterkombináció adta a legnagyobb nyíró-szakító erő értéket és a legnagyobb elmozdulást is. Ennek oka ugyanaz, a nagyobb heglencse átmérő. Ennél az anyagkombinációnál a rövidebb he-

gesztési idejű paraméterkombináció kicsit jobb eredményt adott, mint a 2 impulzusos. A keménységmérés eredménye jól mutatja a két alapanyag közötti nagy keménységérték különbségeket, valamint a hőhatásövezet különbségeit: a DP600 részen inkább felkeményedés tapasztalható, míg az MS1400 részen a kilágyulás a jellemző. A szélesebben kilágyult övezet mindkét alapanyagnál jól látható a 2 impulzusos technológia eredményeként.

- A másik vegyeskötés párosítás az DP1000-MS1200 volt. Ennél az anyagkombinációnál már egyértelműen mutatkozik a 3 technológia közötti sorrend, azaz a rövidebb hegesztési idejű adta a legkisebb nyíró-szakító erő értéket, a 2 impulzusos nagyobb volt, a hosszabb hegesztési idejű paraméterkombináció pedig a legnagyobb nyíró-szakító erőt és elmozdulást adta nyíró-szakító vizsgálatnál. A DP1000 oldalon kilágyulás az SCHAZ és ICHAZ zónában, míg enyhe felkeményedés az UCHAZ zónában volt tapasztalható a rövid és a hosszú hegesztési idejű paraméterkombinációnál is, míg az MS1200 oldalán inkább csak a kilágyulás volt a jellemző a teljes hőhatásövezetben. A 2 impulzusos paraméterkombinációnál nincs felkeményedés a hőhatásövezetben. Érdekes módon a heglencsében nagyobb felkeményedés tapasztalható a DP1000 oldalon, mint az MS1200 oldalon mindhárom paraméterkombináció esetén. Ennek oka vélhetően a DP1000 alapanyag nagyobb karbontartalma.
- Mindegyik esetben a hosszabb hegesztési idejű, nagyobb hegesztési áramerősségű és nagyobb hegesztési erejű paraméterkombináció adta a legnagyobb nyíró-szakító erő értéket és a legnagyobb elmozdulást is a heglencse nagy átmérője miatt. A jövőben érdekes lehet kipróbálni a nagyobb heglencsét eredményező impulzustechnológiát is.

Irodalomjegyzék

- [1] Zhao, Yangyang, Wurong Wang, and Xicheng Wei. "Optimization of Resistance Spot Welding with Inserted Strips via FEM and Response Surface Methodology." *Materials* 14.23 (2021), 7489.
- [2] Jónás, Szabolcs, et al. "Experimental and numerical study of dissimilar sheet metal clinching." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2113. No. 1. AIP Publishing LLC, (2019), pp. 1-3.
- [3] Manladan, Sunusi Marwana, Ibrahim Abdullahi, and Mukhtar Fatihu Hamza. "A review on the application of resistance spot welding of automotive sheets." *J. Eng. Technol* 10 (2015): 20-37: pp. 22.
- [4] Walp, Matthew S. "Impact dependent properties of advanced and ultra-high strength steels." *SAE Transactions* (2007), pp. 30-43.
- [5] Hu, Xiaohua, and Zhili Feng. *Advanced High-Strength Steel-Basics and Applications in the Automotive Industry*. No. ORNL/TM-2021/2047. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), (2021), pp. 9.
- [6] Feng, Zhili. "Challenges and Opportunities in Joining Advanced High Strength Steels." *Workshop On Addressing Key Technology Gaps in Implementing Advanced High-Strength Steels For Automotive Light weighting*, (2012), pp. 2.
- [7] Tisza, Miklós. "Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry." *Vehicle and Automotive Engineering*. Springer, Singapore, (2020)
- [8] Li, Yunzhao, Huaping Tang, and Ruilin Lai. "Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spot Welded Martensitic Advanced High Strength Steel." *Processes* 9.6 (2021), 1021.
- [9] Krajcarz, Florent, A-F. Gourgues-Lorenzon, and Emmanuel Lucas. "Influence of carbon content on the primary solidification mode of high strength steels in resistance spot welding conditions." *Scripta Materialia* 120 (2016), pp. 98-102.
- [10] Amirthalingam, Murugaiyan, et al. "Elemental segregation during resistance spot welding of boron containing advanced high strength steels." *Welding in the World* 59.5 (2015), pp. 743-755.
- [11] Rezayat, H., et al. "Correlation of local constitutive properties to global mechanical performance of advanced high-strength steel spot welds." *Metalurgical and Materials Transactions A* 51.5 (2020), pp. 2209-2221.
- [12] Pouranvari, M., S. Sobhani, and F. Goodarzi. "Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced high strength steel: Microstructure-properties relationship." *Journal of Manufacturing Processes* 31 (2018), pp. 867-874.
- [13] Májlinger, Kornél, Levente T. Katula, and Balázs Varbai. "Prediction of the Shear Tension Strength of Resistance Spot Welded Thin Steel Sheets from High-to Ultrahigh Strength Range." *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 66.1 (2022), pp. 67-82.
- [14] Tisza, Miklós. "Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry." *Vehicle and Automotive Engineering*. Springer, Singapore, (2020), pp. 84.
- [15] Béres, Gábor, and Zoltán Weltsch. "Estimation of strength properties from microhardness results in dual phase steels with different martensite volume fraction." *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 47.3 (2019), pp. 206-212.
- [16] Kekik, Melih, et al. "Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints." *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, (2021), pp. 1.
- [17] Kimchi, Menachem, and David H. Phillips. "Resistance spot welding: fundamentals and applications for the automotive industry." *Synthesis Lectures on Mechanical Engineering* 1.2 (2017), pp. 9.
- [18] World auto steel Homepage, <https://ahssinsights.org/tag/microstructure/>
- [19] *Resistance Welding Application and Controls Production Engineering Master Distributor – Tuffaloy, CMW, Entron, ACP 1-888-654-WELD*, 9353, pp. 14.
- [20] Dancette, Sylvain, et al. "Finite element modeling of deformation and fracture of advanced high strength steels dissimilar spot welds." *Engineering Fracture Mechanics* 258 (2021), pp. 7-8.
- [21] Prém, László, Zoltán Bézi, and András Balogh. "Development of resistant spot-welding technology for automotive ferrite-martensitic dual-phase steels with joint application of finite element modelling and experimental research." *Advanced Materials Research*. Vol. 1138. Trans Tech Publications Ltd, (2016), pp. 44.