

KIEMELTEN NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉL VÉKONYLEMEZEK ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTETT KÖTÉSEINEK OPTIMALIZÁLÁSA KÍSÉRLETTERVEZÉSI MÓDSZERREL

OPTIMIZATION OF RESISTANCE SPOT WELDED ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL SHEET JOINTS WITH EXPERIMENTAL DESIGN

Tóth Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Anyagtudomány és Technológia Tanszék
toth.tomi94@gmail.com

Májlinger Kornél

welding@att.bme.hu

A kutatásunk során DP 800-as vékonylemezek ellenállás-ponthegeztett kötéseinek tulajdonságait optimalizáltuk Box-Wilson kísérlettervezési módszer segítségével. Az elsődleges célfüggvény a legnagyobb elérhető nyíró-szakítóerő volt. A kapott eredményekre matematikai válaszfelület alapú függvényt illesztettünk. A nyíró-szakítóerőre való optimalás eredményeképp az AWS D8.1M szabvány által előírt elfogadható nyíró-szakítóerő érték háromszorosát kaptuk. A többszemponútú optimum esetén a nyíró-szakítóerő csak kismértékben, a benyomódás nagymértékben csökkent.

In our research, the features of resistance spot welded thin DP 800 steel joints were optimized with Box-Wilson Design of Experiment method. The primary goal was to optimize the joints on the highest achievable shear tensile strength. A response based function was fitted on the results. In case of optimization on the highest achievable tensile strength, the tensile strength was three times higher than the minimum value given by the AWS D8.1M standard. In the case of combined optimum (max. shear tensile strength and min. indentation depth), the shear tensile strength was slightly reduced, however, the decrease of indentation was significant.

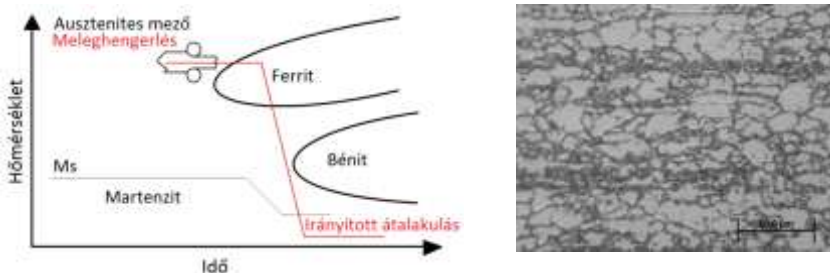
1. Bevezetés

Napjainkban a járműipar egyik kiemelt fejlesztési iránya az üzemanyag fogyasztás csökkentése és a fajlagos teljesítmény növelése egyre szigorodó műszaki és gazdaságossági követelmények mellett. A tömegcsökkentés és mindemellett a szilárdsági és törésmechanikai tulajdonságok növelésére az új korszerű nagyszilárdságú acélok alkalmazása javasolt. A korszerű nagyszilárdságú acélok mechanikai tulajdonságai számos faktortól függenek: például a fázisarányoktól, illetve azok mikroszerkezetbeli elrendeződésétől, térfogatarányától, méretétől és morfológiájától, továbbá a metastabil összetevők stabilitásától [1]. A járműiparban többféle nagyszilárdságú acélt használnak [2], például ferrit-martenzites kettős fázisút (továbbiakban: DP), zömmel martenzites összetételűt (MS), vagy fázisátalakulással kiváltott képlékenységgel rendelkezőt (TRIP).

A korszerű nagyszilárdságú acélokat jellemzően, szakítószilárdság szerint, 3 generációba sorolják [3]. A DP acélokban ferrit mátrixba ágyazott kemény martenzit szigeteket találhatók. A kémiai összetétel és hűtési sebesség változtatásával a martenzit részaránya körülbelül 10-40 % között mozog [4]. A korszerű nagyszilárdságú acélok rendszerint két csoportba vannak osztva. Azon típusok, amelyeknek a folyáshatára meghaladja az 550 MPa-t, de nem éri el a 780 MPa-t, jellemzően a kiemelten nagyszilárdságú acélok (AHSS) kategóriájába vannak sorolva, a 780 MPa fölötti folyáshatárú anyagok pedig az ultra-nagyszilárdságú acélok (UHSS) kategóriájába tartoznak [5]. A korszerű nagyszilárdságú acélok jellemző felhasználási területe az autóipar, ahol ezen anyagok jellemzően anyaggal záró kötéssel, például hegesztéssel, forrasztással vagy ragasztással vannak egymáshoz rögzítve. A járműszerkezetekben található kötések minősége statikus és dinamikus terhelés szempontjából kritikus [6]. A hegesztési eljárások közül, főleg a karosszériagyártásban, az ellenállás-ponthegeztés a legelterjedtebb. A folyamat során a pontszerű hegesztési varrat a munkadarabban a ponthegeztő elektródák között jön létre, amelyek egyidejűleg külső erőhatást is kifejtenek, ezért ezt az ömlesztve sajtoló hegesztési eljárások közé soroljuk [7]. Az eljárás jól automatizálható, termelékeny. Legfontosabb vizsgálati módszere a nyíró-szakítóvizsgálat, az így kapott mérőszám a nyíró-szakítóerő (STS), amelynek minimális értéke szabványban rögzített [8]. A korszerű nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegeztése, és a kötések optimalizálása jelenleg is intenzíven kutatott tématerület. Prém László és Balogh András a kutatásuk során a nagyszilárdságú, ferrit-martenzites mátrixú DP acélok hegeszthetőségét vizsgálták szakaszos energiabevittel [9]. Megállapították, hogy a szakaszos energiabevittel készített DP acélból készült kötések nyíró-szakítóereje (STS; shear tensile strength) 3-5 %-kal elmarad a folyamatos energiabevittel készített kötésektől, de az impulzusüzemmel készített varratok kereszt szakító-ereje körülbelül 20 %-kal, felszakító ereje pedig körülbelül 10-30 %-kal kedvezőbb, mint a folyamatos energiabevitel esetében. A második áramimpulzus segítségével egy jóval finomabb és kedvezőbb keménységeloszlású kötést lehet létrehozni. P. R. Spena és társai a kutatásukban zömmel martenzites jellegű acélok heterogén kötéseivel foglalkoztak [10]. Statisztikai elemzés segítségével megállapították, hogy a folyamatot befolyásoló technológiai változók közül az áramerősség volt a legfontosabb, amit az elektródaerő és a hegesztési idő követett. A kísérleteket ortogonális elrendezésű, faktoriális kísérlettervezés segítségével hajtották végre. A kísérlettervezés célja a lehető legkevesebb elvégzett kísérlet segítségével az optimális tartomány gyors és hatékony megtalálása. A faktoriális kísérlettervezés mellett elterjedt a válaszfelület alapú módszer is. X. Wan és társai a kutatásuk [11] során DP600 acélok homogén kötéseit vizsgálták. Megállapításuk szerint az áramerősségnek igen erős befolyása van a varratlencse méretére és alakjára, de kis hatása van a varrat mikrostruktúrájára. A varratfém jellemzően martenzites szerkezetű, a hőhatásövezetben keménységcsúcsok figyelhetők meg, melyeknek értékei meghaladják a 370 HV-t. Megfelelő áramerősség, hegesztési idő és elektródanyomás esetén a tönkremenetel jellemző módja a kigombolódás. A mechanikai tulajdonságokon kívül az ellenállás-ponthegeztett kötés minősége kihatással van a lemezek korrozív viselkedésére is, amely kiemelten fontos szempont a járműiparban [12]. Az általános nagyszilárdságú acélok [26] [27] és az autóiparban alkalmazott DP600 – DP1000 alapanyagok ponthegeztésének optimalizálásával sokan foglalkoztak még [9][11] [13-23] melyek STS eredményit összehasonlítottuk sajátunkkal.

Anyagok és metódusok

A hegesztési kísérletek során 1,2 mm vastag, DP800 lemezek lettek átlapoltt kötéssel összehegesztve. A DP acélok gyártására jellemző hőciklus, illetve az általunk alkalmazott DP800 acél szövetszerkezete az 1. ábrán látható.



1. ábra

A DP800 acél folyamatos hengerlése során alkalmazott sematikus hűtési ciklus (bal oldal) és az ennek eredményeképpen kialakuló szövetszerkezet (jobb oldal)

Az általunk alkalmazott DP800 kémiai összetételét optikai emissziós spektroszkópia segítségével mértük, a mérés eredménye az 1. táblázatban található. A szakítószilárdságot közvetett módon, keménységmérési eredményekre alapozva számítottuk ki.

Alapanyag	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	CEV	R _m (MPa)
DP800	0,13	0,2	1,5	0,009	0,03	0,01	0,048	0,39	800-820

1. táblázat.

Az alapanyag kémiai összetétele (tömegszázalékban kifejezve), illetve szakítószilárdsága

Az ellenállás-ponthegesztés kivitelezéséhez egy P.E.I.-POINT PN25 típusú berendezést használtunk, P.E.I.-POINT PX 1500P áramforrással. A vezérlés frekvenciája 50 Hz. Az alkalmazott sapkaelektrodák 10 mm-es rádiusszal lekerekített csonkakúpok (G típus) voltak. A ponthegeztő berendezés karelrendezése X-típusú volt. A pneumatikához szükséges sűrített levegő nyomás minden esetben 6,5 bar volt (maximális tápnyomás), amivel 1,9 kN elektróda-nyomóerőt lehetett kifejteni. A kísérletek során az áramerősség és a hegesztési idő került megváltoztatásra. A gép által maximálisan létrehozható hegesztőáram nagysága 13,2 kA, a névleges teljesítmény pedig 25 kVA. Az előtartási időt egységesen 25 periódusra, azaz fél másodpercre állítottuk be, áram fel- és lefutást nem alkalmaztunk. A kísérletek során végig egyszerű munkarenddel, folyamatos energiabevittel hegesztettünk.

A hegesztési kísérletek megtervezéséhez válaszfelület alapú, Box-Wilson módszer alkalmaztunk. Alapvetően a kísérlettervezés lényege, hogy meghatározzuk, a bemenő paraméterek (input faktorok) milyen mértékben befolyásolják a célváltozót, vagy célfüggvényt [24]. Jelen esetben a célváltozó a STS, és a benyomódás, az input paraméterek pedig az áramerősség és a hegesztési idő, tehát egy kétváltozós függvény került felállításra. A hagyományos, faktoriális módszerrel ellentétben esetünkben a függvényben szerepelnek lineáris, négyzetes, illetve keresztthatást leíró tagok. A Box-Wilson kísérlettervezési módszer alapja, hogy az általunk felvett tervközépponthez képest az optimális tartomány a legnagyobb gradiens irányába található [25].

A legnagyobb meredekséggel bíró irány meghatározásához alapvetően a második deriváltakból képzett gradiensvektor szolgáltat információt, de ezek kiszámítása nélkül, grafikusán is jól látszik az eredmény. Amennyiben a mérések pontosak, a módszer kettő, maximum három iteráció segítségével a kívánt tartományhoz konvergál.

A kísérletterv létrehozásához a Minitab 17 szoftvert alkalmaztuk, ami jó lehetőséget biztosított a válaszfelület alapú modellezéséhez és az eredmények statisztikai kiértékeléséhez. Az optimalizálás során az elsődleges célváltozó a nyíró-szakítóerő volt. A STS-re történő optimalizálás (individual desirability) mellett egy úgynevezett összetett jósági fok (composite desirability) került definiálásra, annak érdekében, hogy meghatározzuk azt a tartományt, ahol egyszerre viszonylag jó szakítószilárdságú, és kis benyomódású kötés készíthető. Ennek értéke akkor a legmagasabb, ha az általunk kitűzött két, vagy több célfüggvény kívánt értékét egyidejűleg sikerül kielégíteni. Ha a célváltozók súlyozása egyenlő (azaz egyenlően fontos számunkra mindkét érték), akkor az összetett jósági fok az egyes egyéni jósági fokok geometriai átlagaként számolandó. A kapott eredmények kiértékeléséhez az úgynevezett ANOVA (Analysis of Variances) módszert alkalmaztuk, melyet szintén a Minitab 17 segítségével végeztünk el. Az ANOVA a szórásnégyzetek mértékét elemzi, segítségével meghatározható az egyes input paraméterek súlya, illetve a modell pontossága.

A próbatestek készre hegesztése után a mintákon EN ISO 14273:2016 szerint nyíró-szakítóvizsgálatot végeztünk. Az STS szempontjából vett és a többszempontú optimum meghatározása után az optimális beállításokkal hegesztett kötésekről makro- és mikroszerkezeti felvételeket készítettünk. Több száz keménységmérési (HV1) pont felvételével a mintákról keménységtérképet készítettünk. A nyíró-szakítóerő - elmozdulás görbék segítségével a görbe alatti területet integráltuk, hogy az elnyelt munkát kiszámítsuk. A hegesztés során a fröcskölés és az elektródafelragadás mértéke dokumentálásra került, majd mikrométer segítségével a varratlencse benyomódását mértük.

A próbatestek megnevezésekor úgy jártunk el, hogy az alapanyag megnevezése utáni első szám a teljesítmény értékét mutatja géposztásban, utána pedig a hegesztési idő értéke következik periódusban. Erre azért volt szükség, mert az áramerősség értéke közvetlen módon nem állítható, csak a rendszerbe bevezetett teljesítmény. A teljesítményt 0-99-ig tartó skálán lehet állítani, ami a tirisztor osztás százalékos mértékét jelenti. Az időt szintén 0 és 99 között lehet állítani, ami jelen esetben a periódusszámot jelenti (50 periódus jelent egy másodpercet). Tehát a DP800-DP800 45-25 megnevezés azt jelenti, hogy DP800 homogén kötésről van szó, amely 45 tirisztor osztásnyi teljesítménnyel, és 25 periódusnyi (azaz fél másodperces) idővel lett hegesztve. Ez a jelölésrendszer áll fenn a beállítások leírásánál is. A konkrét áramerősség a hegesztés során műszer segítségével lett mérve.

Eredmények és kiértékelésük

Az optimális tartomány meghatározásához két iterációra volt szükségünk. Az első iteráció során lehetőség volt az optimális tartomány helyzetének körülbelüli megbecsülésére egy szélesebb tartományon, a második iteráció során pedig az optimum helyzete egy szélesebb tartományon lett feltérképezve. Jelen dokumentumban csak a második iteráció során kapott ábrák, illetve az ahhoz tartozó statisztikai kiértékelések kerülnek elemzésre.

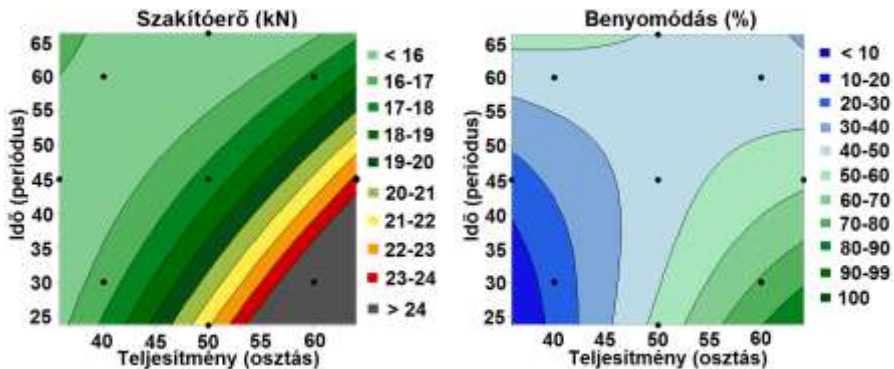
A 2. táblázatban láthatók a második kísérlettervhez tartozó technológiai változók illetve a feljegyzések. A fröcskölés és a felragadást bináris rendszerben rögzítettük, az 1-es szám ezen események megtörténtét jelzi. A százalékosan vett benyomódás mértékét a kettő lemezről álló teljes anyagvastagsághoz viszonyítottuk.

Sorszám	Telj. (osztás)	Idő (per.)	Fröcskölés (1/0)	Felragadás (1/0)	STS (kN)	Tönkrementel	Benyom. (%)
1	50	66	1	1	16,9	PO	47
2	64	45	1	1	25,2	PO	55
3	50	45	1	1	18,9	PO	41
4	50	24	1	1	22,7	PO	53
5	36	45	1	1	16,2	PO	27
6	40	30	1	1	15,8	PO	23
7	60	60	1	1	15	PO	48
8	50	45	1	1	16	PO	51
9	50	45	1	1	20	PO	34
10	60	30	1	1	24,7	PO	73
11	50	45	1	1	19,7	PO	58
12	50	45	1	1	12,5	PO	42
13	40	60	1	1	13,9	PO	46

2. táblázat.

A második kísérlettervhez tartozó paraméterek és értékek

A 2. táblázatból jól látszik, hogy a fröcskölés és elektródafelragadás jelenségével mindegyik beállítás mellett számolni kellett. A tönkrementel minden esetben kigombolódás (PO; pull out) volt. A 2. ábrán a második kísérlettervhez tartozó várható szakítóerő (STS) és benyomódás értékek láthatóak a hegesztési teljesítmény és az idő függvényében. Fontos megemlíteni, hogy ezek az értékek, és a hozzájuk tartozó statisztikai kiértékelés csak az adott tartományon érvényes, ezekből extrapolálni nem lehetséges. Jól látható, hogy az adott tartományon a legnagyobb elérhető szakítóerő a 60-30 beállításnál adódik. A teljesítmény növelésével és az idő csökkentésével (tehát kemény munkarenddel) akár 24 kN nagyságú szakítóerő is elérhető, amely a szabványban előírt háromszorosa.



2. ábra

A második kísérletterv tartományán érvényes szakítóerő (bal oldal) és benyomódás értékek (jobb oldal) a teljesítmény és a hegesztési idő függvényében

Jól látható azonban továbbá, hogy a benyomódás értéke nem változik lineárisan a teljesítménnyel, illetve az idővel. Általánosságban kijelenthető, hogy a teljesítmény (és ezáltal az áramerősség) növelésével, illetve a hegesztési idő növelésével a benyomódás nő, azonban ez csak külön-külön elemezve igaz. Nagy teljesítmények és hegesztési idők esetén az elektróda képlékeny alakváltozása figyelhető meg, ez pedig a próbatest benyomódását csökkenti. A nyíró-szakítóerő szerinti optimum a 60-30-as beállításnál található. A teljesítményt ennél jobban nem lehet növelni, mivel ez az elektródák idő előtti tönkremeneteléhez vezet, illetve a munkarend további keményítése sem vezetett már nagyobb szakítószilárdsághoz. A 3. táblázat bal oldalán a második kísérlethez tartozó statisztikai mérőszámok láthatóak a nyíró-szakítóerő szempontjából. A szabadsági fokok száma (DoF) az egymástól független változók számát jelenti, a p-érték pedig a modell pontosságát. Minél kisebb a p-érték, annál nagyobb biztonsággal lehet kijelenteni, hogy a modellünk pontosan írja le a jelenségeket és a faktorok hatását. Jól látszik, hogy nyíró-szakítóerő szempontjából a lineáris tagoknak jelentős a szerepe, az áramerősség és a hegesztési idő befolyása közel azonos. A modell p-értéke kicsi, 92 %-os biztonsággal kijelenthető, hogy a faktorok a modell szerint befolyásolják a célfüggvényt.

Tag	Nyíró-szakítóerő			Benyomódás		
	DoF	p-érték	Befolyás (%)	DoF	p-érték	Befolyás (%)
Modell	5	0,081	70	5	0,017	82
Lineáris	2	0,024	58	2	0,010	51
Teljesítmény	1	0,028	33	1	0,003	50
Idő	1	0,047	25	1	0,638	1
Négyzetes	2	0,689	4	2	0,492	5
Teljesítmény ²	1	0,435	3	1	0,602	1
Idő ²	1	0,687	1	1	0,330	4
Kereszthatás	1	0,223	8	1	0,016	26
Teljesítmény*Idő	1	0,223	8	1	0,016	26
Hiba	7	-	30	7	-	18
Illesztési hiba	3	0,63	10	3	0,928	1
Tiszta hiba	4	-	20	4	-	17

3. táblázat.

A második kísérlethez tartozó statisztikai mérőszámok a nyíró-szakítóerő és a benyomódás szempontjából

A 3. táblázat jobb oldala a második kísérlethez tartozó statisztikai mérőszámokat tartalmazza a benyomódás szempontjából. A modell p-értéke kicsi, 98 %-os valószínűséggel kijelenthető, hogy a benyomódást az áramerősség és az idő ténylegesen befolyásolja. Gyakorlatilag csak lineáris és kereszthatást leíró tagok szerepelnek a modellben. A lineáris tagokból jól látszik, hogy gyakorlatilag csak a teljesítménynek (tehát közvetve az áramerősségnek) van szerepe a benyomódás szempontjából. A kereszthatást leíró tagból az derül ki, hogy az áramerősség és a hegesztési idő egymás benyomódást növelő hatását gyengítik (a már említett elektródák képlékeny deformációja miatt), ahogyan az a 2. ábrán is látható. A kapott nyíró-szakító erő és benyomódás értékeket elemezve meghatároztuk a többszemponú optimum helyzetét. A modell által szolgáltatott adatok alapján az STS optimum a 60-30 beállításnál, a többszemponú optimum a 40-24-es beállításnál található. Az optimális beállításokkal rendre 5 db hegesztést végeztünk, ahol 1 db kötést metallográfiai vizsgálatra készítettünk elő, a maradék 4 darabot pedig ellenőrző nyíró-szakítóvizsgálatnak

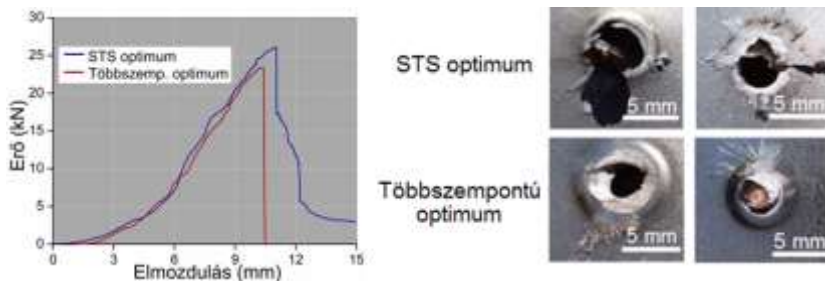
vetettük alá. A nyíró-szakítóvizsgálatok eredményeképpen kiszámítottuk az elérhető maximális STS értéket, illetve a szabvány által előírt értékhez képesti arányát. A szakítógörbék alatt lévő területet integráltuk, és kiszámítottuk a tönkremenetelhez szükséges külső erők munkáját. Az 4. táblázatból jól látható, hogy az STS-re optimalizált kötések nyíró-szakítóereje több mint háromszor meghaladja a szabvány által előírt értéket. A többszempontú optimum esetében a benyomódás jelentősen, gyakorlatilag a felére csökkent, miközben a nyíró-szakítóerő csak minimális mértékben mérséklődött. Így tehát, amennyiben a benyomódás és a nyíró-szakítóerő egyforma mértékben fontos, érdemes a többszempontú optimumhoz tartozó beállításokkal hegeszteni. Ugyan az STS-re optimalizált varratok nyíró-szakítóereje igen nagy, de ez jelentős mértékű benyomódással és elektródaerózióval jár, amely az esetek többségében nem megengedhető. A törési munkánál (W_t) látható, hogy az iterálás során folyamatosan nő, és maximum értékét ott veszi fel, ahol a nyíró-szakítóerő a legnagyobb. Tehát kijelenthető, hogy a DP800 acélok homogén kötéseiben a maximális nyíró-szakítóerő elérése jelentős elnyelt munkával párosul, a kötés nem ridegedik el.

Megnevezés	I (kA)	t (s)	Benyom. (%)	STS (kN)	STS/STS _{min} (-)	W _t (kN×mm)
DP800-DP800 40-50 (első tervközéppont)	7,0	1	37±2	19,0±1,5	2,6	47±8
DP800-DP800 50-45 (második tervközéppont)	8,7	0,9	48±8	18,7±1,8	2,5	68±14
DP800-DP800 60-30 (nyíró-szak. optimum)	10,4	0,6	62±3	23,4±2,0	3,2	78±18
DP800-DP800 40-24 (többszemp. optimum)	7,0	0,48	28±4	21,3±1,5	2,9	65±17

4. táblázat.

Az első és a második tervközéppontoz, illetve az optimalizált kötésekhez tartozó gyártási paraméterek, benyomódás és nyíró-szakítóerő értékek, továbbá a tönkremenetelig elnyelt energiaértékek

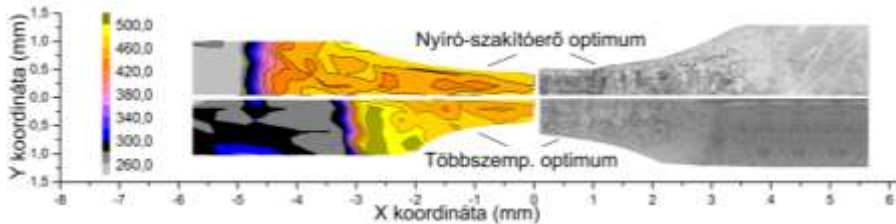
Az optimalizált kötések minden esetben kigombolódással, vagy részleges kigombolódással mentek tönkre. A 3. ábra bal oldalán láthatóak a nyíró-szakítóerő optimumhoz és a többszempontú optimumhoz tartozó erő-elmozdulás értékek. A nyíró-szakítóerő optimum esetében nagyobb az elnyelt munka, és az alakváltozás a tönkremenetel után is folytatódik, amely szívós tönkremenetelre utal. A 3. ábra jobb oldalán látszik, hogy a nyíró-szakítóerőre optimalizált varratoknál a tönkremenetel szívósabb, a varratlencse átmérője nagyobb.



3. ábra

A nyíró-szakítóerő optimumhoz és a többszempontú optimumhoz tartozó erő-elmozdulás diagramok (bal oldal) és makrofotók (jobb oldal) a varratlencse kigombolásáról

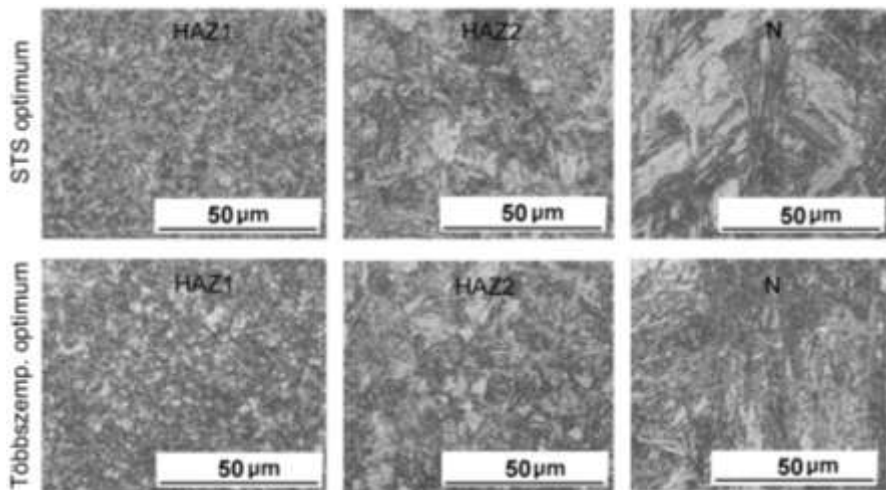
Az optimalizált kötéseket kézi fűrésszel elvágtuk, és makro- illetve mikroszerkezeti felvételeket készítettünk, majd a keménységtérkép felvételére került sor. A keménységmérés során Vickers-módszert alkalmaztunk, 1 kg-os terheléssel. Az 4. ábrán látható a keménységtérkép a varratlencse makrofelvételeivel együtt. A nyíró-szakítóerő optimum esetében a varratlencse és a hőhatásövezet szélesebb. A többszemponú optimum esetében varratlencse és a durvaszemcsés hőhatásövezet határán jelentős keménységcsúcsok fedezhetők fel, amelyek meghaladják az 500-520 HV értéket. Általánosságban kijelenthető, hogy a többszemponú optimum a kisebb hőbevitel miatt a varratlencsén és a hőhatásövezeten belül nagyobb keménységértékeket eredményez. Ennek oka a DP800 acél edződésre hajlamos viselkedése.



4. ábra

A nyíró-szakítóerő optimumhoz (felül) és a többszemponú optimumhoz (alul) tartozó keménységtérképek és keresztmetszeti makrofelvételek

A makrofelvételeken kívül a kötés különböző részeiről mikrofelveleket is készítettünk, amelyek a 5. ábrán láthatóak. A felvételek a hőhatásövezet külső (HAZ1: finomszemcsés) és belső (HAZ2: durvaszemcsés) részéről és a varratfémről (N) készültek.



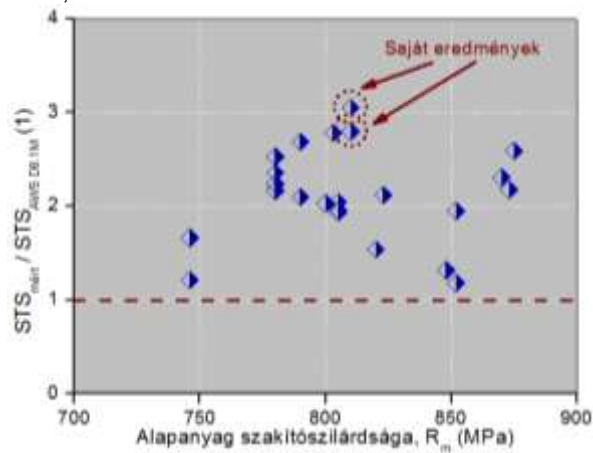
5. ábra

A nyíró-szakítóerő optimumhoz és a többszemponú optimumhoz tartozó mikrofelvelekek

A mikroszerkezet szempontjából nem vehető észre jelentős különbség a nyíró-szakítóerőre optimalizált és a többszemponú optimumhoz tartozó kötések között. Az alapanyag felől indulva mindkét esetben a szövetszerkezet ferrit-martenzites és finomszemcsés, majd ez fokozatosan durvul. A varratfémre öntött szerkezetű, dendrites struktúra jellemző.

Összefoglalás

A kutatás során DP800 vékonylemezek ellenállás-ponthegeztett kötéseit optimalizáltuk válaszfelület alapú, Box-Wilson kísérlettervezési módszerrel. Kijelenthető, hogy az illesztett matematikai modell során gyorsan és kevés kísérletből sikerült eljutni az optimális tartományig, és az illesztett modell jól jellemzi a folyamatot. A nyíró-szakítóerőre optimalizált varratok szakítóereje (STS) több, mint háromszorosan meghaladja az AWS D8.1M:2013 szabvány által előírt értéket és a többi szakirodalmi eredményekhez viszonyítva fajlagosan a legjobb eredményt értük el, ahogyan az a 6. ábrán is látszik. A benyomódás az STS-re optimalizált varratok esetében jelentős. A többszempontú optimum esetében a benyomódás a felére mérséklődött, de a szakítóerő mindössze 10 %-kal csökkent.



6. ábra

Az általunk hegesztett és a szakirodalomban elérhető kötések nyíró-szakítóereinek aránya az AWS D8.1M:2003 által előírt minimum értékhez képest [9] [11] [13-23]

Az STS és a benyomódás szempontjából a legfontosabb technológiai változó az áramerősség. A benyomódás szempontjából a hegesztési idő szerepe minimális. A maximális STS-hez tartozó munkarend közepes, a többszempontú optimumhoz ezzel szemben keményebb munkarend tartozik. A többszempontú optimumhoz tartozó beállítás jóval kisebb hőbevitelt eredményez, emiatt a varratlencse és a hőhatásövezet szélessége kisebb, mint az STS-re optimalizált varratok esetében. A többszempontú optimumhoz tartozó kötések esetében a varratlencse keménysége átlagosan nagyobb, mint a maximális STS-re optimalizált varratok esetében, illetve a durvaszemcsés hőhatásövezetben jelentős, akár 500 HV-t is meghaladó keménységcsúcsok alakultak ki. A tönkremenetel mindkét esetben kigombolódás volt, jelentős mértékű elnyelt energiával. A maximális STS-hez tartozó beállításokkal maximalizálható az elnyelt munka. A mikroszerkezetre a technológiai változóknak csak kis hatása van. A további kísérletek során tervben van külsőleg bevezetett gáz használata (pl.: argon) a hálózati sűrített levegő helyett, mivel az 1,9 kN elektródaerő kevésnek bizonyult, emiatt intenzív fröcskölés lépett fel. Ezáltal az elektródanyomás szerepe, mint harmadik faktor, jobban feltérképezhetővé válik majd.

Köszönetnyilvánítás

Ez a kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült (BO/00196/16/6). A Projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával - NKFIH, valósult meg (OTKA PD 120865). Szeretnénk továbbá megköszönni Fábíán Enikő Rékának a metallográfiai laboratóriumban, illetve az SSAB magyarországi képviselőjének az acélkiválasztásban nyújtott segítségét. Ezen kívül szeretném megköszönni a Rehm Kft.-nek a mérés technikában és a technológia beállításában nyújtott segítségét.

Irodalomjegyzék

- [1] Balogh A., Lukács J., Török I., Hegeszthetőség és a hegesztett kötések tul., 2015.
- [2] Oliver S., Jones T.B., Fourlais, G., Mat. Char., 2007. 58(4): p. 390-400.
- [3] Eren Billur, T.A., Stamping Journal, 2013.
- [4] Kuziak, R., R. Kawalla, and S. Waengler, Archives of Civil and Mech. Eng., 2008
- [5] Automotive Steel Definitions. <http://www.worldautosteel.org>, 2018.01.18.
- [6] Borhy I., K.L., 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, 2010, Budapest.
- [7] Gáti J., Béres L., Gremesberger G., Komócsin M., Kovács M., Hegesztési Zsebkönyv
- [8] AWS D8.1M:2013 - Spec. for Autom. Weld Qual. - Res. Spot Welding of Steel. 2013.
- [9] Prém L., Balogh A., Hegesztéstechnika, 2015.
- [10] P. R. Spena, M.D.Maddis, G. D'Antonio, F. Lombardi, Metals, 2016.
- [11] Wan, X., Y. Wang, P. Zhang, Journal of Mat. Proc. Tech., 2014. p. 2723-2729.
- [12] Katula L., F.M., Lublőy É., MAGÉSZ ACÉLSZERKEZETEK, 2015: p. 76-84.
- [13] Zhao, D.W., et al., Materials & Design, 2013. 50: p. 72-77.
- [14] Zhao, Y., Y.S. Zhang, P.-C. Wang,. Vol. 96. 2017. 71s-82s.
- [15] Pal, T.K., K. Bhowmick, Journal of Mat. Eng. and Perf., 2012. 21(2): p. 280-285.
- [16] Sevim, I., F. Hayat, M.K. Kulekci, Bulletin of Mat. Sci., 2013. 36(6): p. 1049-1055.
- [17] Khan, M.I., et al., Materials Transactions, 2008. 49(7): p. 1629-1637.
- [18] E. Emre, R. Kaçar, Metals, Vol. 6. 2016. 299.
- [19] Pouranvari, M., S.P.H. Marashi, Mat. Sci. and Eng., 2011. 528(29-30): p. 8337-8343.
- [20] Rossillon, F., et al., Welding in the World, 2008. 52(11): p. 30-41.
- [21] Tolf, E., J. Hedegård, Welding in the World, 2008. 52(3): p. 43-53.
- [22] Den Ujil, N., et al., Welding in the World, 2012. 56(7): p. 51-63.
- [23] Radakovic, D.J., M. Tumuluru, Welding Research, Vol. 87. 2008. 96-s.
- [24] Márkus L., Az ipari kísérlettervezés statisztikai módszerei
- [25] Box, G.E., Wilson, K.G., On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. Journal of the Royal Statistical Society, 1951. 13: p. 1-41.
- [26] Dobossy Á. Lukács J., Hegesztéstechnika 1 (2015) 51-59.
- [27] Meilinger Á., Lukács J., Kuzsella L., Koncsik Zs., Gáspár M., Mat. Sci. F.; 812, p. 516.