

HIDEGEN NYÚJTOTT, ACÉL VÉKONYLEMEZEK ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTÉSE

RESISTANCE SPOT WELDING OF COLD STRETCHED STEEL SHEETS

Prém László¹, Dr. Balogh András²

ABSTRACT

The elements of passenger cars bodywork are usually produced by cold forming processes. The joining of these cold formed parts are carried out with resistance spot welding. Since the main material properties change in consequence of forming, this phenomenon makes a great challenge to the welding experts. This paper presents the effect of cold forming on the quality of spot welded joints.

1. BEVEZETÉS

A napjaink autógyártásában alkalmazott egyre nagyobb szilárdságú, illetve különböző alakítási mértékkel rendelkező szerkezeti elemek hegesztéssel történő egyesítése egyre komplexebb feladat elé állítja a hegesztéssel foglalkozó szakembereket. Az ilyen típusú és alakíthatósági állapotú acélok hegesztése a klasszikus értelemben vett lágyított állapotú, előzetes képlékeny hidegalakításnak ki nem tett alapanyagokhoz viszonyítva lényegesen nehezebb feladatnak számít. Az alábbi cikkünk különböző hidegalakítási mértékkel rendelkező, az autógyártásban is alkalmazott acél vékonylemezek ellenállás-ponthegesztési lehetőségeinek kísérleti vizsgálatát mutatja be. Célunk a képlékeny hidegalakításnak az ellenállás-ponthegesztett kötések minőségére gyakorolt hatásának feltárása.

2. A HIDEGALAKÍTÁS ÉS A HEGESZTÉS KAPCSOLATA

A személygépkocsik karosszériaelemeinek megmunkálása elsősorban valamilyen képlékeny hidegalakító eljárással történik, ezért alapvető követelmény, hogy az alkalmazott acéltípusok jól alakíthatók legyenek.

Az anyagok jó képlékeny hidegalakíthatóságának feltételei az alábbiakban foglalható össze:

- sok csúszósík és csúszási irány (felületen vagy térben középpontos kockarácsnál teljesül),
- lágy állapotú, homogén, finomszemcsés szövetszerkezet (kiválások nélkül),
- nagy fajlagos nyúlás (A) és kontrakció (Z),
- irányfüggetlen (izotróp) anyagtulajdonságok,
- kis szennyezőanyag (S, P, O, N, H) tartalom,
- acélok esetében kis karbon-tartalom [1].

A felsorolt tulajdonságok teljesülése mind az alakíthatóságra, mind pedig a hegeszthetőségre egyaránt kedvező hatással van.

Általánosságban elmondható, hogy a jó alakíthatósággal rendelkező anyagok hegesztése nem okoz különösebb nehézséget, azonban az alakítás következtében az anyagtulajdonságokkal szemben támasztott irányfüggetlenségi-kritérium többnyire nem teljesül. Ebből is következik, hogy a felsorolt, kvázi-ideális tulajdonságok együttes teljesülése a gyakorlatban alkalmazott legtöbb acéltípusnál nyilvánvalóan maradéktalanul nem állhat fenn [2].

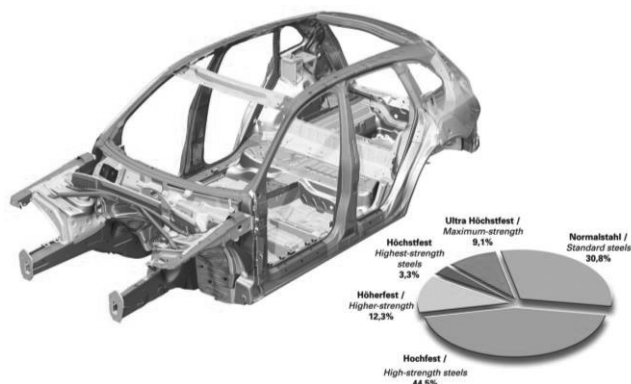
A karosszéria elemek képlékeny hidegalakításának eredményeképpen a lemezanyagok szilárdsági jellemzői növekedni, alakváltozási mérőszámai csökkenni fognak. A szilárdságnövelésből fakadó előnyök azonban csak akkor lesznek érvényesíthetők, ha az egyes anyagpárok közötti kötés létesítése során nem szűnik meg a hidegalakítás szilárdságnövelő hatása, illetve nem jön létre a kötés minőségét kedvezőtlenül befolyásoló anyagszerkezeti változás. A hidegen alakított fémeknél ugyanis a hegesztéssel együttjáró jelentős mértékű hőbevitel hatására kilágyulás, újrakristályosodás, valamint a feltételek megléte esetén öregezési jelenség léphet fel. A kilágyulás következtében megszűnik a hidegalakítás szilárdságnövelő hatása, a szekunder rekrisztallizáció, az öregezés eredményeként pedig csökken a hegesztett kötés képlékenysége, ezért is nyilvánvaló, hogy az alakíthatóság és a hegeszthetőség kapcsolata korántsem egyszerű jelenség [3].

¹ PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

² egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

3. AUTÓIPARI VÉKONYLEMEZ, MINT KÍSÉRLETI ALAPANYAG

Ahogy az 1. ábrán is látható, a korszerű személygépkocsik karosszériájának gyártása során az életvédelmi szempontból alárendeltebb helyeken gazdaságossági szempontokból még napjainkban is lágyacél lemezeket (standard steels) alkalmaznak. Ezen acéltípusok aránya az összes acélféleségen belül nagyságrendileg 25...30 %-ra tehető [4].



1. ábra. Korszerű autókarosszériában alkalmazott acél szilárdságcsoportok és részarányuk

Az elsődleges autóipari felhasználásból kiindulva kísérleteink során alapanyagként a DC01 jelű, hidegalakítási célra szánt, mélyhúzható lágyacél lemezt alkalmaztuk, amely anyagminőség tipikus, ezért minden szempontból alkalmas a hidegen alakított, lágyacél lemezből készülő autóipari alkatrészek ponthegeztésének kísérleti vizsgálatára. A hegesztendő lemez anyagjellemzőit az MSZ EN 10130 (Hidegen hengerelt lapos termék kis karbontartalmú acélból) szabvány tartalmazza.

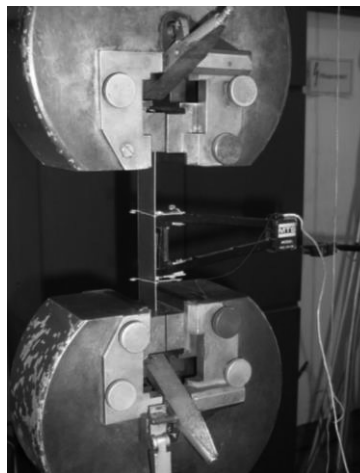
Mechanikai jellemzők		
R_e max. (MPa)	R_m (MPa)	A_{80} min. (%)
280	270...410	28

1. táblázat. A DC 01 jelű hidegen hengerelt, ötvöztelen lágyacél szabványos mechanikai jellemzői

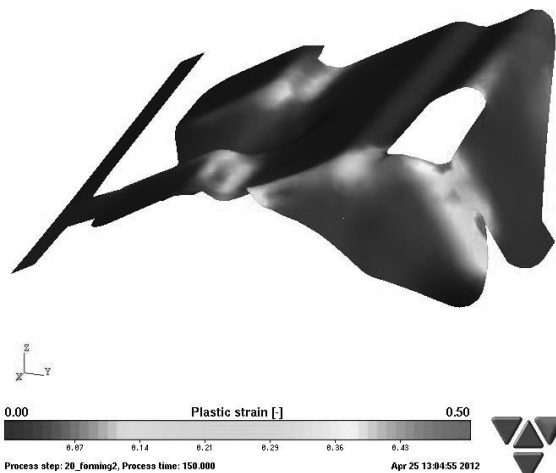
A lágyacél finomlemez vastagsági mérete névlegesen 1,0 + 1,0 mm volt. A lemezek 2000 x 1000 mm-es táblaméretben, olajozott kivitelben álltak rendelkezésre. A lemeztáblákat számjegyzérlésű gépi lemezollón daraboltuk a kívánt méretre.

4. A DC01 JELŰ VÉKONYLEMEZ HIDEG-ALAKÍTÁSA

A különböző hidegalakítási mértékkel rendelkező autóipari karosszéria elemek nagyon gyakran tartalmaznak ponthegeztéssel kötendő nyújtott szakaszokat. Ezen részek alakítottási állapotának modellezéséhez a DC01 jelű alapanyagból kimunkált próbatesteket egy MTS típusú, számítógép-vezérelt univerzális anyagvizsgáló berendezés segítségével hidegen alakítottuk. A lemezdarabokat egytengelyű húzó igénybevétellel, egyenletes sebességgel nyújtottuk. A hidegalakítási művelet során a megfelelő és egyenletes eloszlású alakítási mérték biztosításához finomnyúlásmérőt alkalmaztunk. A próbatestek extenzométerrel végzett nyújtása a 2. ábrán látható.



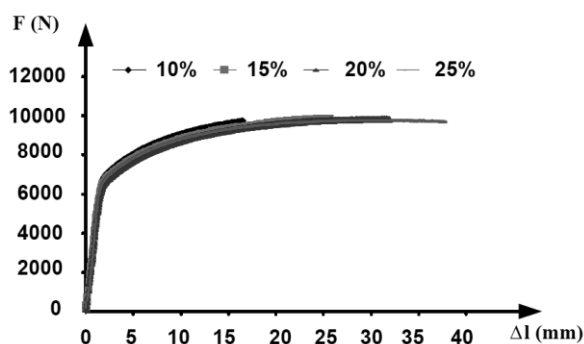
2. ábra. Az alapanyag hidegalakítása az MTS típusú anyagvizsgáló berendezésen



3. ábra. Karosszéria elem képlékeny hidegalakításának végefelemes modellezéssel előállított nyúlás-eloszlása

A hidegen alakított autóiipari alkatrészek jellegzetes alakítási mértéke körülbelül 10 % és 25 % közé tehető. Az egyes szerkezeti elemek esetében ennél nagyobb alakítási mérték csak lokálisan fordulhat elő. Ennek igazolására szolgál a 3. ábrán bemutatott példa. Az ábrán egy autóiipari alkatrész képlékeny hidegalakításának a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén elvégzett végeselemes modellezésével kapott alakváltozás-eloszlása figyelhető meg.

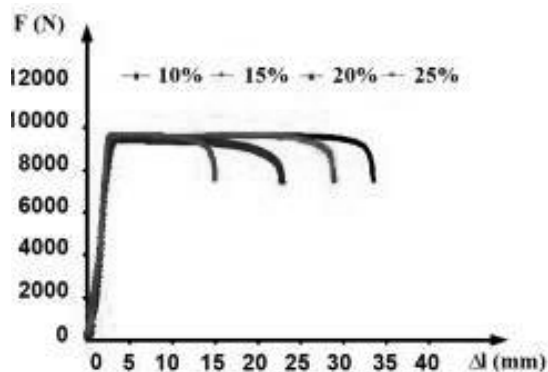
A modellezéssel kapott nyúlástartományból kiindulva a ponthegesztési kísérletekhez szükséges hidegen alakított próbatesteket a vékonylemez szállítási állapotához viszonyítva négy különböző alakítási mértékkel állítottuk elő, azaz a hegesztési kísérletekhez a szállítási állapotú alapanyagon kívül 10 %, 15 %, 20 % és 25 %-os hidegalakítási mértékű lemezsávokat készítettünk. A hidegen nyújtott próbatesteken elvégzett mikrométeres mérések eredményei alapján megállapítottuk, hogy ilyen mértékű hidegalakítás esetén a falvastagság csökkenés elhanyagolható.



4. ábra. Különböző mértékű nyújtásokhoz tartozó erő-elmozdulás diagramok

5. A HIDEGALAKÍTÁS KÖVETKEZMÉNYEINEK VIZSGÁLATA

Az előzetesen nyújtott lemezsávok mechanikai jellemzőinek változását szakítóvizsgálatokkal állapítottuk meg.



5. ábra. A nyújtott próbatestek szakítódigramjai

A szakítóvizsgálatok eredményei egyértelműen igazolják az alapanyag hidegalakítás hatására bekövetkező szilárdság és keménység növekedését és a vele párhuzamosan végbemenő, jelentős mértékű nyúláscsökkenést.

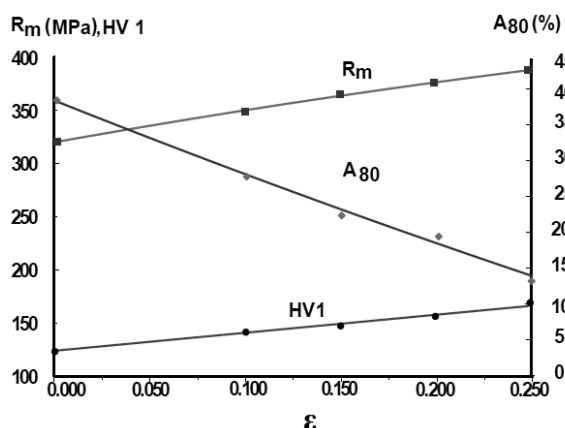
A vizsgálatokkal meghatározott anyagjellemzők a 2. táblázatban láthatóak.

Alakítási mérték $\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$	Anyagjellemzők		
	A ₈₀ (%)	R _m (MPa)	HV 1
alapanyag (0 %)	37,9	323	118
0,10 (10 %)	26,7	351	134
0,15 (15 %)	21,1	368	140
0,20 (20 %)	18,9	379	149
0,25 (25 %)	11,9	391	162

2. táblázat. Az alakítási mérték és az anyagjellemzők kapcsolata

A 2. táblázat alapján az is egyértelműen megállapítható, hogy a nyújtás hatására a DC01 jelű alapanyag képlékeny alakváltozási tartaléka az alakítás mértékétől függően jelentősen csökkent. Ez a csökkenés előnytelen és mindenképpen megnehezíti a későbbi ellenállás-ponthegesztés technológiájának kidolgozását.

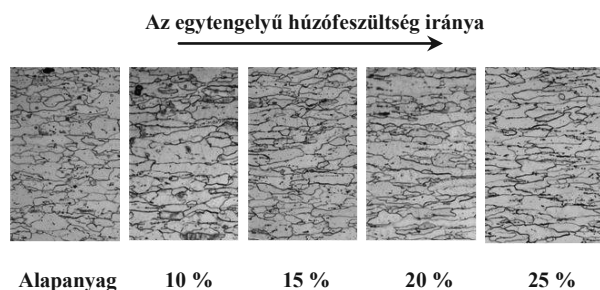
A 6. ábra a hidegalakítási mértéknek az anyagjellemzőkre gyakorolt hatását, annak irányát és mértékét szemlélteti.



6. ábra. Az alakítási mérték hatása a DC01 jelű lágyacél mechanikai jellemzőire

A nyújtás során fellépő egytengelyű húzófeszültség hatására az alapanyag csúszósíkjai a terhelő erő síkjába igyekeznek befordulni. Ezzel olyan kristálytani rendezettség, úgynevezett alakítási textúra alakul ki, melynek következménye, hogy az eredetileg kvázi-izotrop mechanikai tulajdonságok megváltoznak, az alakított fém anizotroppá válik [5].

A nyújtott szemcseszerkezet kialakulásának igazolására és szemléltetésére a különböző mértékben alakított próbatestekből mikrosziszolati próbatesteket készítettünk (7. ábra). A mikrosziszolatok képei 200 x-os nagyítással készültek, az alkalmazott marószert a lágyacélok szemcsehatárának megjelenítéséhez ajánlott 2 %-os alkoholos salétromsav oldat volt.



7. ábra. Az alakítási textúra kialakulása a próbatestek nyújtása során

A felkeményedés szempontjából rendkívül jelentős szakítószilárdság értékeket a maximális erő (F_m) és a kiinduló (A_o) keresztmetszet hányadosaként határoztuk meg, azaz a *mérnöki feszültség-mérnöki nyúlás* rendszerben dolgoztunk. Azonban a maximális erőnél (F_m) mérhető (A_m) keresztmetszet már lényegesen különbözik az eredeti (A_o) keresztmetszethez képest. Ebből következően lényegesen eltérő értékeket kapunk, ha az ún. valódi feszültségeket határozzuk meg, amelyeket definíció szerint a pillanatnyi erő és a hozzátartozó keresztmetszet hányadosaként értelmezzük [5]. Az (1) és (2) képletekben szereplő összefüggések felhasználásával áttérhetünk az általunk eddig használt mérnöki rendszerről a *valódi rendszerre*. A mérnöki (ϵ) és a valódi nyúlás (ϵ_p) kapcsolata:

$$\epsilon + 1 = \frac{l}{l_o} \Rightarrow \ln(\epsilon + 1) = \ln \frac{l}{l_o} = \epsilon_p \quad (1)$$

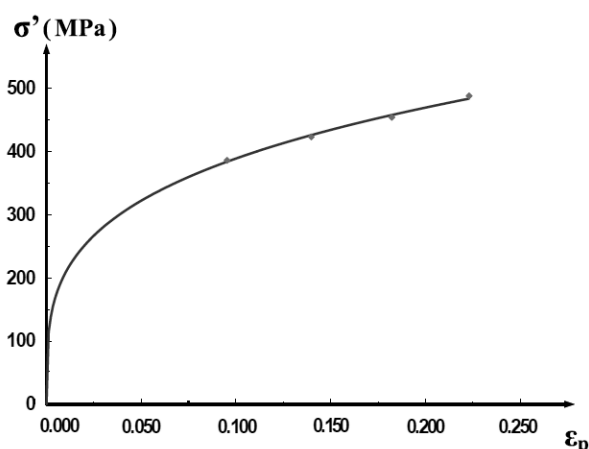
A mérnöki (σ) és a valódi feszültség (σ') kapcsolata:

$$\sigma' = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_o} \cdot (\epsilon + 1) = \sigma \cdot (\epsilon + 1) \quad (2)$$

Mérnöki feszültség-nyúlás rendszer		Valódi feszültség-valódi nyúlás rendszer	
$\epsilon = \frac{l-l_o}{l_o}$	$\sigma = \frac{F}{A_o}$	$\epsilon_p = \ln \frac{l}{l_o}$	$\sigma' = \frac{F}{A}$
alapanyag	323 MPa	alapanyag	323 MPa
0,10	351 MPa	0,09	386 MPa
0,15	368 MPa	0,13	423 MPa
0,20	379 MPa	0,18	454 MPa
0,25	391 MPa	0,22	488 MPa

3. táblázat A mérnöki és a valódi rendszer összehasonlítása a DC01-es alapanyag esetén

A mérnökiről valódi rendszerre történő áttérés azért is indokolt, mert a valódi feszültség - valódi nyúlás kapcsolatot leíró $\sigma' - \epsilon_p$ görbék világosan mutatják azt, ami a mérnöki feszültség - mérnöki nyúlás közötti kapcsolatot leíró $\sigma - \epsilon$ görbékénél rejtve marad; nevezetesen, hogy növekvő valódi nyúlást csak növekvő valódi feszültség eredményezhet [5] (8. ábra).



8. ábra. A DC01 jelű alapanyag valódi feszültség - valódi nyúlás görbéje

A DC01 jelű lágyacél finomlemez "keményedési görbéjét" a Hollomon-féle összefüggéssel írhatjuk le:

$$\sigma' = K \cdot \epsilon_p^n = 727,30 \cdot \epsilon_p^{0,2715} \quad (3)$$

ahol:

- σ' : a valódi feszültség,
- ϵ_p : a valódi nyúlás,
- $n=0,2715$: a keményedési kitevő,
- $K=727,30$: a szilárdsági együttható.

6. A HIDEGALAKÍTÁS HATÁSA A PONTHEGESZTETT KÖTÉSEK MINŐSÉGÉRE

A képlékeny hidegalakítás ellenállás-ponthegesztett kötések minőségére gyakorolt befolyásának vizsgálata céljából a különböző alakítási mértékű próbatesteken kétoldali ellenállás-ponthegesztéssel kötések készítettünk. Az egyik vizsgált paraméter csoportosítás lágy, míg a másik kemény munkarendet biztosított. A lágy munkarendet nagy hegesztési idő és kis áramerősség jellemzi. Ennél a munkarendnél nő a hőhatásövezet szélessége, továbbá egyes részeinek hőtartási ideje és hőmérséklete, valamint az utóbbiak hatására nő a kilágyulás és a rekrisztallizáció valószínűsége. Kemény munkarend esetén, amelyet kis hegesztési idő és nagy áramerősség jellemez, a gyors hőbevitel és az azt követő gyors lehűlés eredményeként csökken a rekrisztallizáció és a kilágyulás valószínűsége, illetve mértéke [3].

A hegesztések az olasz gyártmányú TECNA 8007 típusú, állványos, programozható pont- és dudorhegesztőgépen készültek. A hegesztőgép helyhez kötött kivitelű, programozható, impulzushegesztésre is

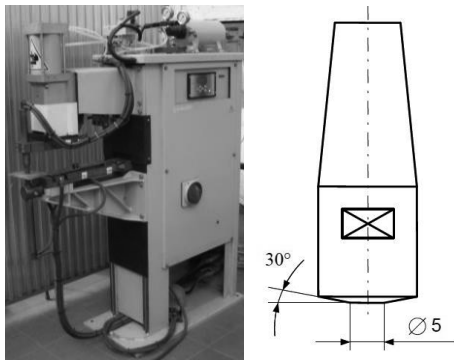
alkalmas, parallel löketű, egyfázisú, váltakozó áramú berendezés, 300 kVA névleges teljesítményhatárral.

Az 1 mm-es falvastagságú DC01 jelű lágyacél lemez ponthegeztéséhez mindkét oldalon a legelterjedtebb, MSZ EN 25184 szabvány B típusának megfelelő csonkakúp végződésű (120 °-os csúcshölygű), egyenes tengelyű, hengeres elektródokat alkalmaztuk. Az elektródok homloklap-átmérőjének meghatározására leggyakrabban a következő két összefüggést használják [6]:

$$d_e = 2,5 + 2 \cdot s = 4,5 \text{ mm} \quad (4)$$

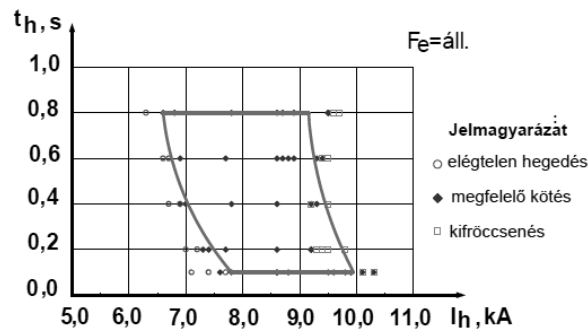
$$d_e = 5 \cdot \sqrt{s} = 5 \text{ mm} \quad (5)$$

Az esetünkben vizsgált 1 mm-es lemezvastagság környezetében a két összefüggés közel ugyanazt az eredményt adja, ezért a hegesztésekhez szükséges elektródátmérőt $d_e=5$ mm-re választottuk [6]. Az alkalmazott hegesztőgépet és az elektród geometriai kialakítását a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra. Az alkalmazott hegesztőgép és a B típusú elektród

A kísérleti hegesztések során beállított technológiai paramétereket a Mechanikai Technológiai Tanszéken korábban folyó kutatások alkalmával meghatározott, az általunk is használt DC01 jelű lágyacél, 1,0 + 1,0 mm-es lemezkombinációjára érvényes hegesztési munkatartománya (weldability lobe) alapján választottuk meg [6].



10. ábra. Hegesztési munkatartomány DC01 jelű lágyacél esetén

A lágy munkarend során beállított hegesztési paramétereket úgy választottuk meg, hogy a hegesztési idő a 10. ábrán látható hegesztési munkatartományban található lehető legnagyobb érték legyen. A választott hegesztőáram értéke az ehhez a hegesztési időhöz tartozó, kifröccsenést okozó áram értékének közel 80 %-a.

A kemény munkarendi adatokkal végzett hegesztések paramétereit úgy választottuk meg, hogy a hegesztési idő a kemény munkarend alsó határának számító 5 periódus idő legyen, amely a hegesztési munkatartományban található lehető legkisebb érték. A választott hegesztőáram értéke szintén az ehhez a hegesztési időhöz tartozó, kifröccsenést okozó áram értékének közel 80 %-a.

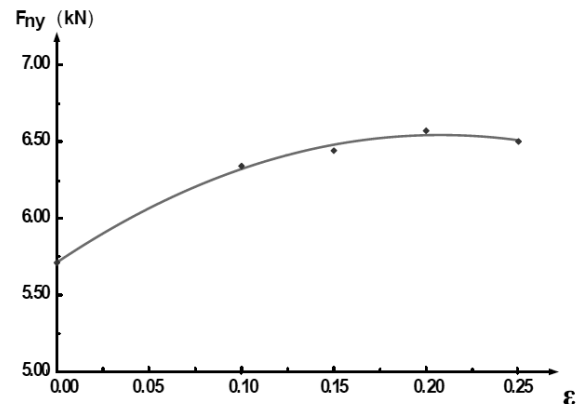
A hegesztőáramok megválasztásánál alkalmazott megfontolást a biztonságra való törekvés indokolta, mivel a ponthegeztés után a kötések terhelhetőségét nyíró-szakító vizsgálattal határoztuk meg. A nyíróerő meghatározásához alkalmazott próbadarabok hegesztésénél pedig szabványos követelmény, hogy kifröccsenés nem fordulhat elő.

Az elektróderőt az alábbi tapasztalati összefüggés alapján állapítottuk meg:

$$F_e = 2,0 \cdot s = 2,0 \cdot 1 = 2 \text{ kN} \quad (6)$$

A lágy és kemény munkarenddel végzett kísérletek során az EN ISO 14273 szabvány előírásának megfelelően minden egyes alakítási mérték esetén egyaránt 11-11 ponthegeztett kötést készítettünk, majd nyíró-szakító vizsgálatokkal meghatároztuk az alakítási mérték befolyását a pontkötések teherbíró képességére. A nyíró-szakító vizsgálatok folyamán valamennyi kötés "kigombolódott", azaz a kötések minősége megfelelő volt.

A 11. ábra a kemény munkarenddel hegesztett kötések nyíró-szakító erejét a hidegalakítás mértékének függvényében mutatja.

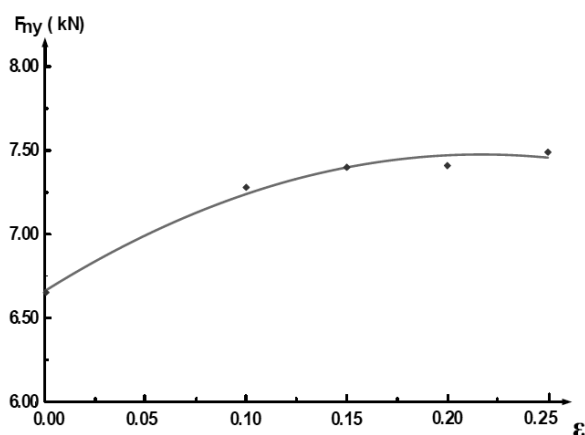


11. ábra. Kemény munkarenddel ponthegeztett kötések nyíró-szakító erejének változása az alapanyag hidegalakításának függvényében

A mérési eredményekből jól látható, hogy a nyíró-szakító erők átlagértéke az alapanyag hidegalakítási

mértékének növekedésével monoton növekszik. A 25 %-os mértékben hidegen alakított próbatestek kemény munkarenddel hegesztett kötéseinek nyíró-szakító ereje az általunk képlékenyen nem alakított alapanyagból készített kötések nyíró-szakító erejéhez viszonyítva körülbelül 15 %-al nőtt. Ez az eredmény kissé elmarad az alapanyagok a hidegalakítás hatására bekövetkező közel 21 %-os szilárdságnövekedési aránya mellett, azonban ezek az eredmények azt is jól mutatják, hogy a hidegalakítás nemcsak az alapanyag, hanem a kellően gondosan megválasztott technológiájú ellenállás-ponthegesztéssel készített kötések szilárdságát is növelik.

A 12. ábra a lágy munkarenddel hegesztett kötések nyíró-szakító erejét a hidegalakítás mértékének függvényében mutatja.



12. ábra. Lágy munkarenddel ponthegesztett kötések nyíró-szakító erejének változása az alapanyag hidegalakításának függvényében

A 25 %-os mértékben hidegen alakított próbatestek lágy munkarenddel hegesztett kötéseinek nyíró-szakító ereje az alapanyagból készített kötések nyíró-szakító erejéhez viszonyítva 12,5 %-al nőtt. Ez az eredmény már jelentősen elmarad az alapanyagok a hidegalakítás hatására bekövetkező közel 21 %-os szilárdságnövekedési arányától és elmarad a kemény munkarenddel készített kötések nyíró-szakító erejének növekedési mértékétől is. A nyíró-szakító vizsgálatok eredményei alapján tehát egyértelműen elmondható, hogy a növelt szilárdságú, hidegen alakított lemezanyagok a ponthegesztési folyamatra jellemző igen rövid hőciklus hatására is bizonyos mértékben kilágyulnak. Az előzetes várakozásoknak megfelelően az is megállapítható, hogy a lágy munkarend során tapasztalható kilágyulás mértéke nagyobb, mint kemény munkarend esetében. Az eredmények azt mutatták, hogy még ennél a lágy munkarendnél sem jött létre olyan mértékű kilágyulás, hogy az alakított próbatestek kötéseinek nyíróereje a szállítási állapotú alapanyag nyíró-szakító erejének szintjére csökkenjen.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az autógyártásban jelenleg (és előre láthatóan a jövőben továbbra is) egynegyed-egyharmad arányban alkalmazott alacsony szilárdságú tipikus acél vékonylemezzel végzett vizsgálatokkal a következőket állapítottuk meg.

1. A nyújtással jelentős mértékben képlékenyen alakított acél vékonylemezek kb. 30 %-os mérnöki nyúlásig ellenállás-ponthegesztéssel a célra megfelelő minőségben hegeszthetők.

2. A hidegalakítás hatására a kötések nyíró-szakító ereje növekszik. A növekedés mértéke elmarad az alapanyag szilárdságnövekedésének mértékétől és erősen függ a hegesztési beállításoktól.

3. Annak érdekében, hogy az alakított vékonylemezekből ponthegesztett kötések teherbírás-növekedése a lehető legnagyobb legyen, az alapanyag helyi kilágyulását mérsékelni kell, ami a ponthegesztés munkarendjének keményítésével (nagyobb hegesztőáram, rövidebb hegesztési idő választásával) érhető el.

4. A kötés terhelhetőségének kedvező irányú változása az ellentétes kötéstulajdonságok (pl. a törésig rendelkezésre álló alakváltozási tartalék) csökkenésével jár együtt. Ezt a tényt a hidegen alakított vékonylemezek ellenállás-ponthegesztésének tervezésekor mindig szem előtt kell tartani.

8. IRODALOM

- [1] Gál G.; Kiss A.; Sárvári J.; Tisza M.: Képlékeny hidegalakítás, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 12. kiadás, 2000,
- [2] Juhász D.: Nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztése, EWE/IWE diplomatervezésvezető: Balogh András), ME, Mechanikai Technológiai Tanszék, 2011,
- [3] Bauer F.: Hidegalakítással növelt szilárdságú fémek hegesztése, GÉP, XXXIII. évf., 1. szám, p.: 34-40, 1981,
- [4] Tisza M.: Developments in Sheet Metal Forming for the Automotive Industry, Proc. of ICME, Bratislava, 29-30. November 2007. pp. 171-178,
- [5] Tisza M.: Metallográfia, ME Kiadó, 2004,
- [6] Juhász D.; Balogh A.: Az ellenállás-ponthegesztés hegesztési munkatartománya, Hegesztéstechnika, XX. évfolyam, 4. szám, 2009, p.: 21-26.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.