

HEGESZTETT LEMEZEK JÁRMŰKAROSSZÉRIA ÉPÍTÉSBN VALÓ ALKALMAZÁSÁNAK ÁTTEKINTÉSE

REVIEW OF AUTOMOTIVE TAILOR WELDED BLANKS

Béres Gábor ^{1*}, Tisza Miklós ²,

¹ Anyagtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskeméti Főiskola, Magyarország

² Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem, Magyarország

Kulcsszavak:

hegesztett terítékek,
járműkarosszéria anyagok,
tömegcsökkentés

Keywords:

tailor welded blanks, weight
reduction

Cikktörténet:

Beérkezett 2015. október 10.

Átdolgozva 2016. április 13.

Elfogadva 2016. április 14.

Összefoglalás

Az elmúlt néhány évtizedben az üvegházhatású gázok csökkentésére irányuló globális törvényi szabályozások a járműszerkezeti anyagok ugrásszerű fejlődését eredményezték. Az autógyártók folyamatosan keresik az alternatív megoldásokat a járművek tömegének és a gyártás költségeinek minimalizálása céljából, az utas-biztonság javítása mellett. Az egymásnak ellentmondó követelmények kielégítésében, a nagy-szilárdságú anyagokból és hegesztett terítékekből történő gyártás jelenthet egy lehetséges megoldást. A hegesztett lemezeknek azonban, a karosszéria alkatrészek előállításakor, a fennálló alakítástechnológiai viszonyokra adott reakciói csak részben ismertek. Ez a megállapítás a hegesztett terítékek (a nemzetközileg elterjedt kifejezés szerint: a TWB-k: Tailor Welded Blank) egyes részeinek eltérő szilárdsági és alakíthatósági jellemzői okozta problémákra – mint pl. az eltérő nyúlás-elvékonyodás, nem azonos mértékű anizotrópia – vezethető vissza. Az irodalomkutatás és az eddigi eredményeink [22,23] azt mutatják, hogy a hegesztett lemezek terén, mind az újszerű mind a klasszikus képlékenységtani jellemzőknek és a technológiai vizsgálatok eredményeinek az újragondolása szükséges.

Abstract

The legal regulations for reducing greenhouse gas emission led to the dynamic development of automotive materials in the last few decades. Car manufacturers are continuously looking for alternative solutions to reduce weight and cost, beside increasing passenger safety. High strength steels and welded blanks could meet such requirements. However the behavior of Tailor Welded Blanks (TWBs) during forming is still not known in details. It could be traceable for the different properties of the different segments, such as inhomogeneous thinning, or not uniform anisotropy. Literature reviews and our former researches [22,23] pointed that the classic ductility features and technology tests' results could be considered by new approach in the field of TWBs.

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 4326711
E-mail cím: beres.gabor@gamf.kefo.hu

1. Bevezetés

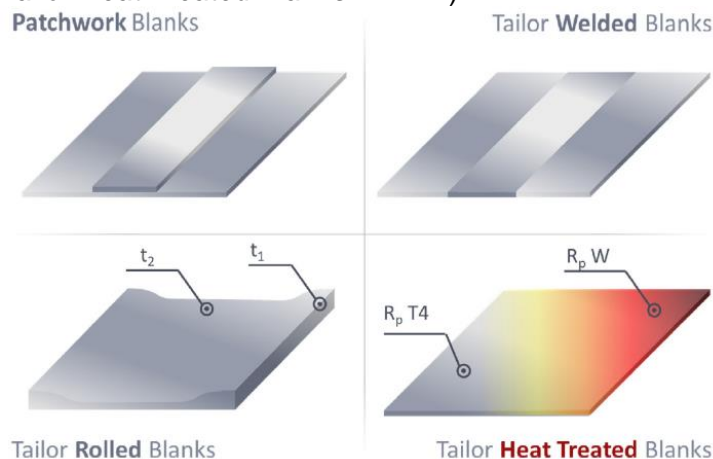
A XIX. század végén már nem csupán ábránd volt a lóvontatás nélküli, akkori hiedelem szerinti önjáró közúti járműszerkezetek építése. A XX. század elején, az akkor még főként csak a postások munkaeszközeként, illetve a felsőbb osztálybeliek kiváltságaként számon tartott gépkocsik tömeggyártásával több országban megkezdődött, a világ talán legjelentősebb gazdasági-műszaki iparágának, a közúti járműgyártásnak a kiépülése. (A Csonka János tervei alapján 1904-ben, a Magyar Posta részére gyártott nyolc autómobil egy-egy példánya még 2013-ban megtalálható volt a Budapesti Közlekedési Múzeumban, és a BME Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék aulájában) [1]. Az elmúlt nagyjából száz évben a járműgyártás különböző korszakokat élt meg, és jellemzően, az adott korszak műszaki-fejlettségi szintjét folyamatosan meghatározta.

A CAD modellezés és a CNC megmunkálás széleskörű elterjedése előtt, a nagy kiterjedésű elemek préselésére alkalmas, bonyolult geometriájú szerszámok tervezése és gyártása nehéz feladatot jelentett. Ennek következtében az autók karosszériáit több kisebb panel alkotta, melyek kötése a jármű egészének minőségét meghatározta. Ez a kötéstechika, főleg a hegesztés gyors fejlődését eredményezte [2]. Emellett, kevésbé látványosan ugyan, de a járművekbe épített fedélzeti számítógépek fejlődésével (melyek nélkül a környezetvédelmi normák betartása elképzelhetetlen lenne), az áramköri elemek gyártásakor alkalmazott forrasztási technológiák is egyre nagyobb szerephez jutottak [19,20,21].

A hagyományos gyártásban a karosszéria elemek több, viszonylag kis lemezalkatrész előgyártmányból állnak, ezért jelentős szerszám és gépköltség csökkentést jelenthet a nagyméretű elemek egyben történő sajtolása. A sok kis elem elhagyásával a gyártási pontosság is növelhető, mert elkerülhető a tűrések kedvezőtlen összeadódása [3,4].

A méretre szabott, és a préselés előtt egyesített lemezek (a külföldi irodalmakban: *Tailored Blanks*-ek, a későbbiekben *TB*-k) olyan félkész termékek, melyek tulajdonságait lokálisan meghatározzák az azt felépítő különböző anyagok, anyagtulajdonságok, bevonatok, és lemezvastagságok. A későbbi felhasználásra optimalizált termékek lehetnek (1. ábra) [5]:

- különböző minőségű, eltérő lemezvastagságú, bevonatú alapanyagokból hegesztett lemezterítékek (*Tailor Welded Blanks - TWB*);
- foltozott, lokálisan megerősített lemezek (*Patchwork Blank - PB*);
- különböző vastagságú lemezek hengerléssel, folyamatos átmenettel történő egyesítése során kapott terítékek (*Tailor Rolled Blanks - TRB*);
- hőkezeléssel lokálisan megváltoztatott mechanikai tulajdonságokkal rendelkező lemezek (*Tailor Heat Treated Blanks - THTB*).



1. ábra: A sajtolás előtti egyesítéssel előállított cél-specifikus lemezek (TB-k) csoportosítása [5]

A *TB*-k terjedésének fő oka, hogy a járművek tömege az elmúlt években folyamatosan növekedett az egyre nagyobb kisereléseknek és az egyre több elektronikai eszköznek köszönhetően. A tömegnövekedést a karosszéria tömegének csökkentésével lehet kompenzálni, úgy, hogy csak a nagy igénybevételnek kitett helyeken alkalmaznak nagy-szilárdságú, vagy nagy falvastagságú anyagokat. A *TB*-k fejlődése a különböző anyagú és vastagságú lemezek összehegesztésével kezdődött, később jelent meg a helyi szilárdság növekedést eredményező

hegesztéses és ragasztásos foltozás (*patchwork*) és a hengerléssel gyártott, folyamatos lemezvastagság-átmenettel jellemezhető egyesítés technológiája, különböző lemezvastagságok esetén. Ezekkel párhuzamosan fejlődött a *TB*-k lokális hőkezelése a kritikus helyeken, az alakíthatóság kedvezőbbé tétele céljából [5].

A tömegcsökkentésben élen járnak a *TWB*-k és *TRB*-k mert nem kell erősítő lemezt alkalmazni. A foltozás viszont a gyártási folyamat integritásának fejlődéséhez vezetett [5].

2. Hegesztett lemezterítékek (*TWB*-k)

A *TWB* különböző karakterisztikájú lemezek, sajtolás előtti összehegesztésével előállított sík teríték. E terítékek felhasználását illetően, a legnagyobb kihívás a képlékenyalakítás terén jelentkezik, a hegesztési varrat jelenléte és a területi „diszkontinuitás” miatt. A *TWB*-k felhasználásával elérhető a járművekben a „cél-specifikus anyag-elhelyezkedés” és a gyártási folyamat hatékonysága is növelhető [4-9].

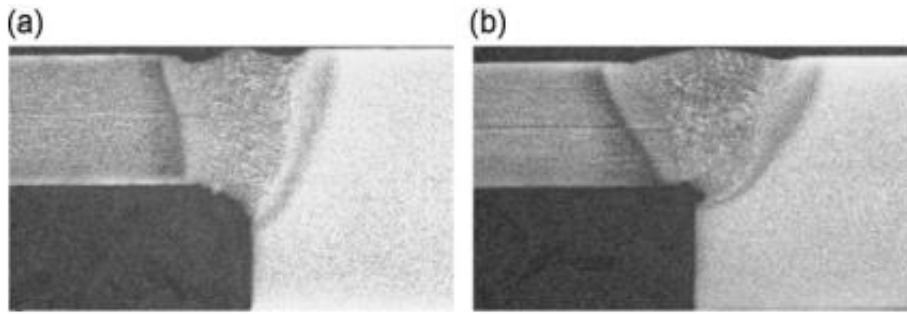
Az első szabadalom a hegesztett lemezterítékekből történő gyártásra vonatkozóan 1964-ben látott napvilágot. Mindössze négy év múlva, tehergépkocsik vázelemeinek ilyen stílusú gyártása kezdődött az USA-ban. Az elemeket elektron-sugár hegesztéssel egyesítették. Európában elsőként a Volvo alkalmazta a *TWB*-ket 1979-ben, és az elemeket ellenállás zömítő vonalhegesztéssel (*Resistance Mash Seam Welding*) egyesítették. Később az indukciós tompahegesztés (*Induction Butt Welding*) alkalmazása vezetett a gyártás hatékonyságának és a tervezési lehetőségek továbbfejlődéséhez. A lézerhegesztés technológiája a 80-as évek elején tűnt fel a járműiparban. A ThyssenKrupp és az Audi együttműködésében gyártottak CO₂ lézerrel hegesztett padlólemezeket az Audi 100-as modellhez 1983-ban. Erre azért volt szükség, mivel galvanizált lemezek a kívánt méretben nem álltak rendelkezésre, így két galvanizált lemezt hegesztettek össze. Az 1990-es évek óta a lézerhegesztés a leginkább előnyben részesített technológia, annak tulajdoníthatóan is, hogy a bevonatos (galvanizált) lemezek hegesztése zömítő vonalhegesztéssel csak részben megoldott [5].

TWB-k gyártásakor tehát az anyagokat lézerhegesztéssel, elektronsugár hegesztéssel (*Electron Beam Welding – EBW*), indukciós hegesztéssel, zömítő vonalhegesztéssel vagy lineáris dörzshegesztéssel (*Friction Stir Welding – FSW*) egyesítik, az alakítási folyamat előtt. A zömítő vonalhegesztés előnye, hogy kisebb vágási pontosságú darabok is jól hegeszthetők. Ezzel szemben, a lézerhegesztéshez pontosabb vágási felületek szükségesek, azonban a hegesztési varrat sokkal keskenyebb lesz, kisebb lesz a hőhatásövezet és tömegcsökkenés is tapasztalható, hiszen nincs szükség átfedéshez plusz anyagra [5].

Napjainkban a *TWB*-k 99%-ban lézerhegesztéssel készülnek. A hegesztési folyamat elvégezhető CO₂ gázlézerrel és Nd:YAG lézerrel egyaránt. A hegesztés minőségére a *He*, vagy az *Ar*, vagy a két gáz keveréke mint védőgáz, nagyban kihat, a beolvadási mélységen keresztül. Így a védőgáz minősége befolyással van a mechanikai vizsgálatokkal mérhető alakíthatósági jellemzőkre. *Ahmed et al.* [10] úgy találta, hogy a nagyobb *He* tartalom segíti a mélyebb beolvadást és kisebb hegesztési varratszélességet eredményez.

A lézerhegesztés során egy hosszú, vékony hengeres, fémgőzt tartalmazó csatorna, a „kulcslyuk” jön létre, amit a hegfürdő vesz körül. A védőgáz és a fémgőz egymásra hatásából plazmasugár jön létre. A plazmagáz nemkívánatos jelenség, mert a védőgáz ionizációjának eredményeként keletkező plazma „defókuszálja” a lézer energiáját. A munkadarab átolvasztása, azaz az általa elnyelt energia mennyisége jelentősen függ attól, hogy mennyi energia tud áthatolni a plazmán. Ha a plazmasugár nem tud kialakulni, akkor a lézer energiája közvetlenül éri el a munkadarabot, következésképp mélyebb beolvadás jöhet létre [10].

Több kutatás [10,11,12] nem, vagy legalábbis nem csak a *TWB* alakíthatóságának kérdéskörét vizsgálja, hanem nagy hangsúlyt helyez a különböző paraméterekkel gyártott hegesztési varrat tulajdonságainak tanulmányozására is. A 2. ábra két különböző előtolási sebességgel készített hegesztési varrat metszetét mutatja.



2. ábra: 7,08 (a) és 3,54 (b) cm/perc előtolási sebességgel hegesztett minták keresztmetszete [10]

A nem hegeszthető anyagpárok (pl. acél-alumínium) egyesítésére ad lehetőséget a lineáris dörzshegesztés, mert ott nem olvad meg és szilárdul vissza az anyag a hegesztési folyamat során [5,11,13].

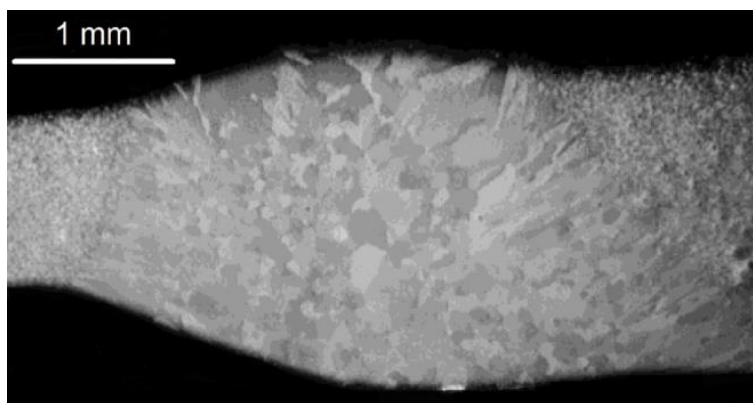
A lineáris dörzshegesztés technológiájának ismerete nem csak a különböző anyagpárok, hanem pusztán a konvencionális eljárásokkal (pl. lézerhegesztés) nem, vagy csak nehezen hegeszthető anyagok, azaz az alumínium *TWB*-k gyártása során is kulcsfontosságú. Ennek a kötési technológiának (későbbiekben *FSW*) a járműipari elterjesztésében elsősorban a cambridge-i *The Welding Institute (TWI)* vállalt oroszánrészt, amikor 1991-ben elindította az alumínium hegesztéssel kapcsolatos fejlesztéseket. Az *FSW*-nek mint szilárd állapotban történő hegesztésnek számos előnye van a hagyományos, anyagfúzióra épülő hegesztési eljárásokhoz képest. Ilyen pl. az extrém alacsony energia felhasználás, és a porozitás nélkül, vagy legalábbis kis porozitással megoldható vékony lemezek hegesztésére való képesség.

Padmanabhan et al [13] a lineáris dörzshegesztéssel előállított alumínium-acél *TWB*-ket „magasabb rendű” alkatrészeknek nevezi, az így elérhető kiemelkedő tulajdonságok miatt. A szokásos hegesztési eljárások a nagy olvadáspont különbség miatt, természetesen nem jöhetnek szóba. Alumínium és acél összehegesztésekor a fő problémát az *Al* gyenge nedvesedési hajlama, és a rideg intermetallikus vegyületek (mint pl. az Fe_4Al_{13} , Fe_2Al_5) dúsulása a hegesztési zónában jelenti. E vegyületek jelenléte, terhelés hatására, az alkatrész gyors töréséhez vezethet. Az intermetallikus réteg vastagsága meghatározó a szilárdság és az alakíthatóság szempontjából. Mivel a lineáris dörzshegesztésnél az alapanyagok szilárd állapotában történik a kötés létrehozása, így a vegyületek dúsulásának kérdése megoldott. Az alumínium-acél kötést létrehozó lehetséges hegesztési technikaként más szerzők [11], a hagyományos dörzshegesztés (*friction welding*) és a lineáris dörzshegesztés mellett, a robbantásos hegesztést (*impact welding*) és a plattírozást (*cladding by rolling or explosion*) is megemlítik.

2.1. A *TWB*-k alakíthatósága

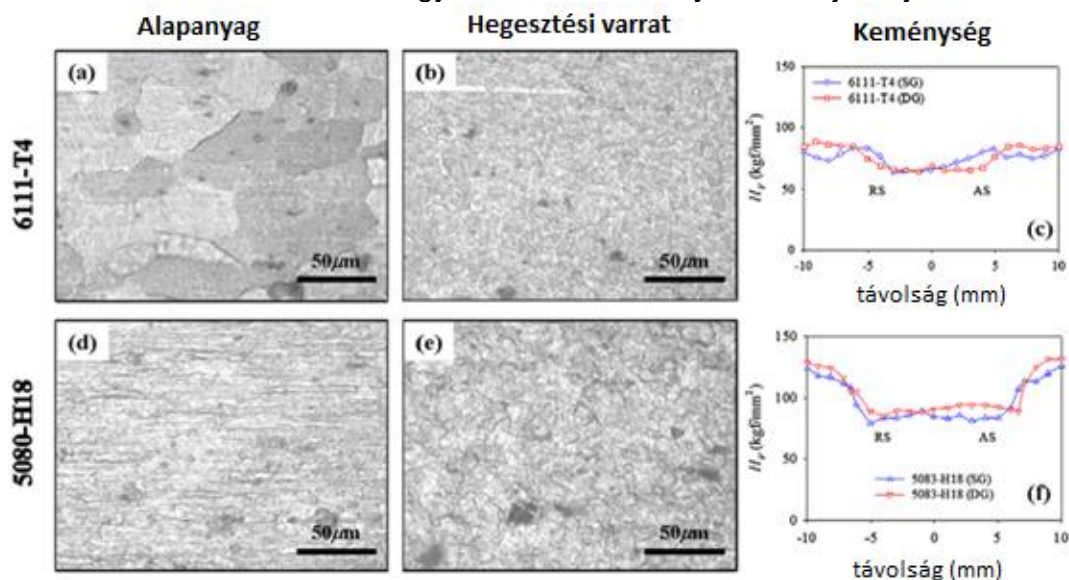
A hegesztett lemez mechanikai tulajdonságainak ismeretéhez természetesen a hegesztési varrat tulajdonságainak ismerete feltétlenül szükséges. Általánosságban elmondható, hogy a nemesíthető *Al* lemezalkatrész szilárdsága a hegesztés hatására növekszik, a mikroszerkezeti változásoknak (az öregedésnek és az újraoldódásnak) köszönhetően. A mikroszerkezet az alapanyag által adott, de a hegesztés hatására az ötvözők dúsulása – egyre inhomogénebb eloszlása -, az üregek számának növekedése és a „második szemcsék” méretének és alakjának változása következhet be. Ennek következtében a *TWB*-k mechanikai tulajdonságai jobban szólnak, mint az alapanyagoké. A hegesztés során az eredeti szerkezet az öntött szerkezethez hasonló tulajdonságokat vesz fel: a varrat közepén nagy, – körülbelül egyforma méretű – globulitos szemcsék, a szomszédos régiókban pedig tús, a hőmérséklet gradiens irányában elnyúlt szemcsék láthatók (3. ábra).

A nem hőkezelhető alumínium esetében a szilárdság kismértékű csökkenése figyelhető meg a megújulás miatt [5].



3. ábra: Alumínium TWB szövetszerkezete [5]

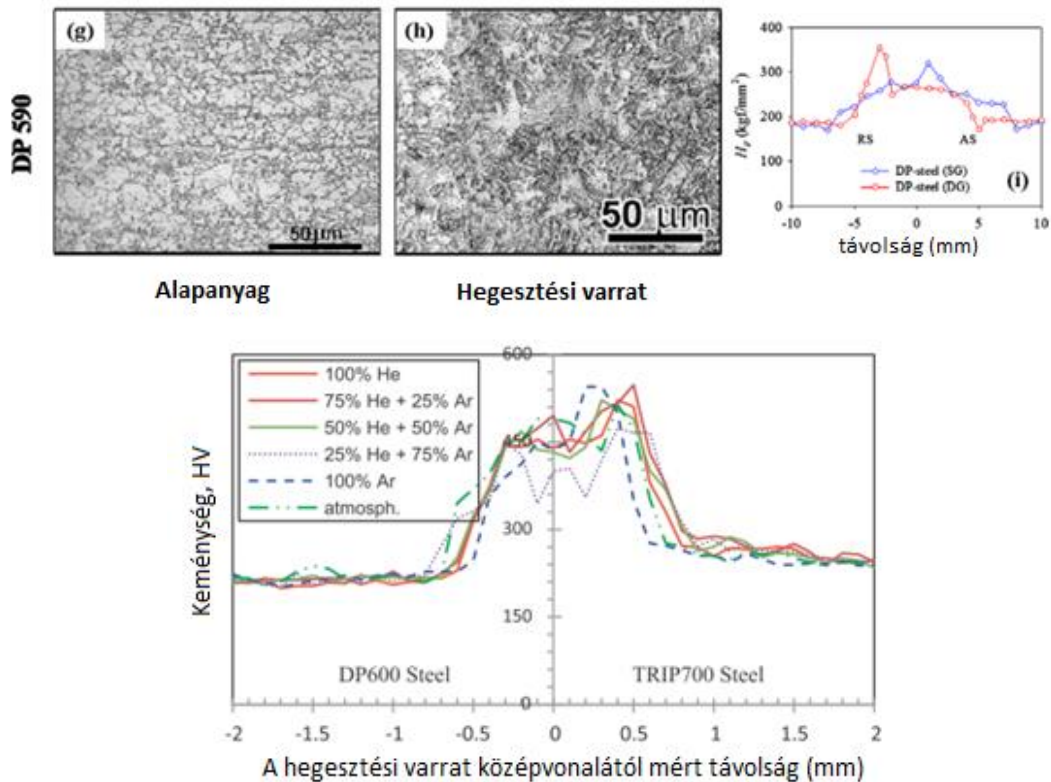
Járműipari alumínium ötvözetekből készült TWB-kkel részletesen foglalkozó más kutatók szerint [11], az 5083 nem hőkezelésre szánt alumínium ötvözet szilárdsága a hegesztési zónában valóban mérséklődik a dinamikus újrakristályosodás és a diszlokáció sűrűség csökkenése miatt – ahogy a hengerlés hatására elnyújtott szemcsék globulitossá válnak (4. ábra d, e és f ábrarészlet) – de a 6111 hőkezelhető alumínium ötvözet szilárdsága tekintetében növekedés nem tapasztalható (4. ábra c ábrarészlet). Ezt ők a már nemesített állapotban lévő alapanyagban, a kiválások feloldódásának és a szemcsedurvulás együttes következményeinek tulajdonítják.



4. ábra: Különböző alumínium alapanyagú TWB-k alapanyagáról és hegesztési varratáról készült mikroszkópi képek (balról) és a keménység lefutási profilok (jobbról) [11]

Az acélok esetében a C tartalomtól és a hegesztési eljárástól függően keménység növekedés figyelhető meg. Ezért az eredetihez képest kisebb szemcseméret a felelős, az ugyancsak öntött szerkezetre emlékeztető mikroszerkezetben. A hőhatás övezet keménysége egyes esetekben a varrat és az alapanyag között van, a nagyszilárdságú acéloknál, a keménységcsúcs jellemzően a hőhatás övezetben figyelhető meg (5. ábra). Általánosságban a szilárdsági tulajdonságokban növekedés, az alakíthatóság terén csökkenés a szokásos tendencia [5,10,11]. Ebből kiindulva logikus *Abbasi et al* [7] feltevése, miszerint a hőhatás övezetben megváltozott anyagtulajdonságok a nyúlás csökkenéséhez vezetnek.

A TWB-k mechanikai tulajdonságait értelemszerűen sok más tényező is befolyásolja, például az alapanyag tulajdonságai, a hegesztési varrat és a terhelő erő egymáshoz viszonyított iránya, a lemezek vastagságának aránya, vagy a hozaganyag százalékos mennyisége a varratban [5].



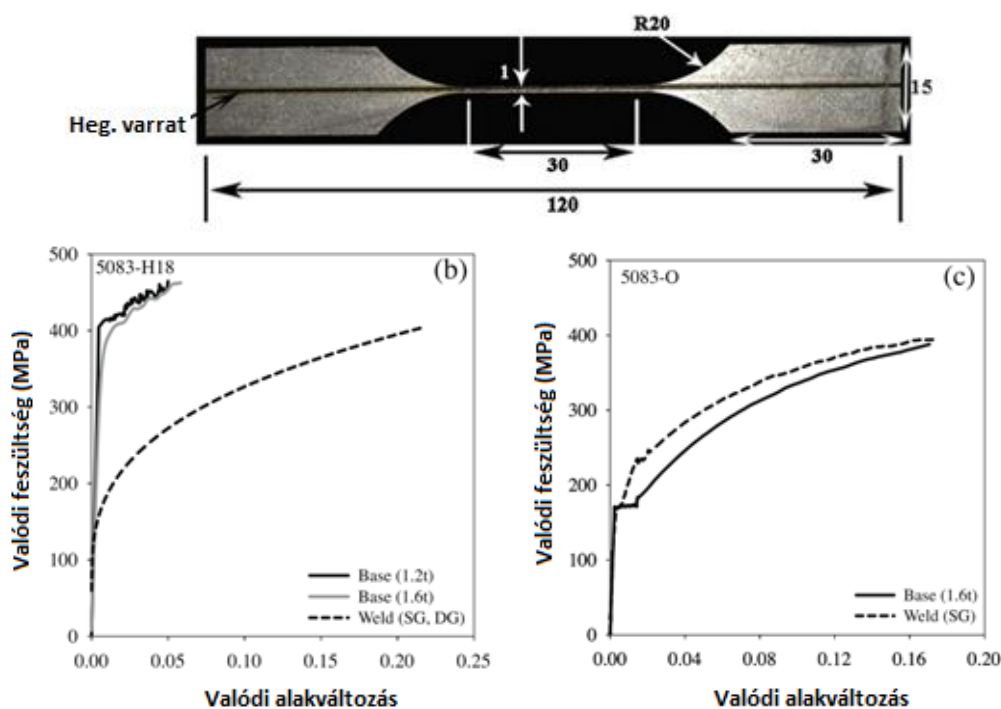
5. ábra: DP-DP acél TWB alapanyagáról és hegesztési varratáról készült mikroszkópi felvételek és keménységfutas [11] (fent), illetve DP-TRIP acél alapanyagú TWB varratának környezetében mért keménységfutas [10]

2.2. A TWB-k mechanikai tulajdonságainak elemzése szakítóvizsgálattal

A szakítóvizsgálatokkal az anyagoknak az alapvető tulajdonságai határozhatók meg. Hegesztett szakítópróbatetek vizsgálata során kapott eredmények azonban nem értelmezhetők a klasszikus kiértékelési módszerekkel. Egy olyan tanulmány [10] szerint, mely a szakítóerő irányára merőlegesen hegesztett próbatetek vizsgálatára irányul, a tiszta, vagy nagyobb részben héliumot tartalmazó védőgázzal hegesztett darabok a szakítóerő irányával 45°-os szöget bezáróan az alapanyagban, a nagyobb argon koncentrációban hegesztettek pedig a szakítás tengelyére merőlegesen, sok esetekben a hegesztési varratban szakadtak.

A hegesztési paraméterek mellett a szakadás kiindulási helyét, és terjedésének irányát alapvetően befolyásolja a szakító erő irányának és a hegesztési varrat orientációjának egymáshoz viszonyított helyzete [11,12]. Különböző vastagságú alumínium alapanyagokból készült TWB-k egytengelyű húzás közbeni szakadása legtöbbször a hegesztési varratban figyelhető meg, ha a varrat orientációja merőleges, vagy 45°-os szöget zár be a húzóerő irányához képest. A terhelő erő és a varrat párhuzamosságának esetében a szakadás, az anyagpárosítástól függően az alapanyagban és a varratban is bekövetkezhet. Nagyszilárdságú acélból készült TWB szakítópróbatet tönkremenetele legtöbb esetben a hőhatás övezetben következik be.

Kizárólag a hegesztési varrat tulajdonságainak megismerése céljából alkalmazzák a kutatók [8,11,12] a miniatűr próbatet kialakítást (6. ábra). Az így felvett valódi feszültség-valódi alakváltozás diagramokból fontos következtetések vonhatók le a hegesztési varrat (szaggatott vonal) szilárdságára és képlékenységére vonatkozóan. Ezek a jellemzők az alapanyagoktól (az ábrán két eltérő sajátosságú 5083-as alumínium ötvözet) és a hegesztési eljárástól függően meghaladhatják, vagy alulmúlhatják (és általában ez a jellemzőbb) az alaplemezek hasonló tulajdonságait (6. ábra b és c ábrarészlet).



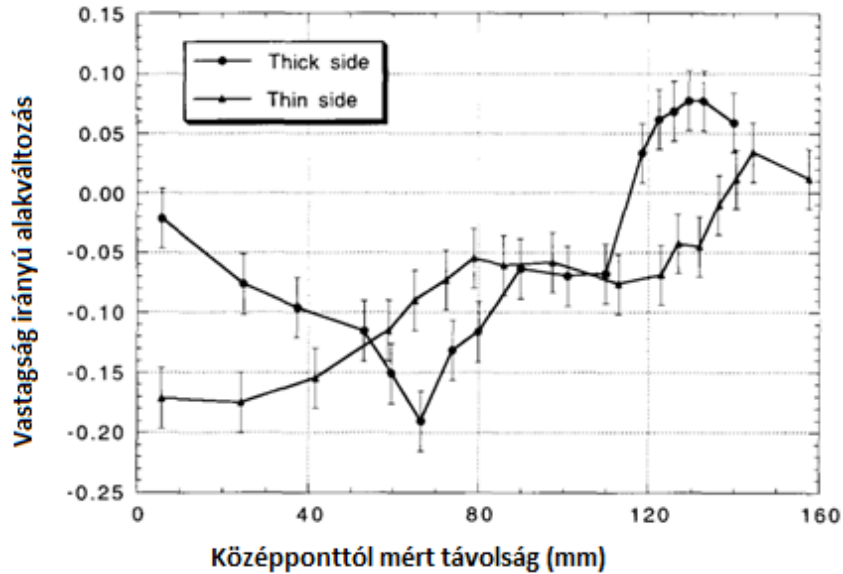
6. ábra: „Miniatur” szakító próbatest kialakítás (fent) [8] és valódi feszültség valódi alakváltozás diagramok, melyek az alapanyag (folytonos vonal) és a hegesztési varrat (szaggatott vonal) jellemzőit szemléltetik [11]

2.3. A TWB-k mechanikai tulajdonságainak elemzése csészehúzó vizsgálattal

A TWB-k mélyhúzóhatóságát *Ahmetoglu et al.* az elsők között vizsgálta [4,14]. Bebizonyították, hogy az alakíthatóság jelentősen függ a hegesztési vonal orientációjától, így azt a szerszám, és a folyamat tervezése során is figyelemmel kell kísérni. Kutatásaik során osztott ráncgátlót alkalmaztak, így igazodva a korszerű, szenzorokkal szabályozott présekkel történő gyártáshoz, amelyek lehetővé teszik az egyes paraméterek, például a ráncgátló nyomás kompenzálását, a mélyhúzóhatóság növelésének érdekében.

Kísérleteik folyamán különböző átmérőjű és 1,8 illetve 0,8 mm vastag lemezekből hegesztett terítékből húztak csészéket. Amikor a varrat a teríték közepén futott végig és a ráncgátló erő állandó, 44,5 KN volt, a vastagabb oldal nem „húzódott be” a húzórésbe, és a varrat a teríték szimmetria tengelyétől elmozdult. A vékonyabb lemez oldalán a ráncgátló erő 10 tonnára való növelésével, a vastagabb lemez oldalán pedig 1 tonnára való csökkentésével, a varrat a csésze közepén maradt. A gyenge leszorítás miatt a vastag oldal betudott húzódnia a húzórésbe, a vékony oldal pedig egyenletesen nyúlt. Utóbbi próbatest vastagság irányú nyúlás eloszlását a 7. ábra mutatja. A vastagabb oldalon (körök) a legnagyobb elvékonyodás a bélyeg rádiuszánál figyelhető meg, míg a vékonyabb oldalon (háromszögek) ugyanez az edény fenekénél jelentkezik, a jelentős nyúlás miatt.

Más szerzők [13], a TWB-k mélyhúzásakor szintén az egyik legfontosabb paraméternek tekintik a ráncgátló erőt. Értékének helyes megválasztásával kiküszöbölhető a mélyhúzott alkatrészek két fő tönkremeneteli módja, a ráncosodás és a szakadás. E károsodások elkerülése a nagyobb szilárdságú oldal „folyásának” megkönnyítésével, azaz a ráncgátló erő lokális lecsökkentésével lehetséges.



7. ábra: Hengeres TWB csésze vastagság irányú alakváltozás eloszlása a csésze középvonalától kifelé haladva: ● vastagabb lemez, ▲ vékonyabb lemez [4]

A hegesztési varrat mélyhúzás közbeni vándorlását tanulmányozta *Wang et al.* [15] különböző vastagságú lemezekből készült TWB-ken, maradó feszültség mérésével. Megfigyeléseik szerint a TWB közepén kicsi a varrat elmozdulás, míg ott nagy feszültségek ébrednek. A hegesztési vonal elmozdulása (mászása) a széleken a legnagyobb. A szigorúan egyenesként felfogható hegesztési vonal fordított U alakra deformálódik és a vékonyabb lemezrész, a széleken nagyobb alakváltozásra készíti, mint a vastagabb lemez szegmenst. Ugy találták, hogy az alakváltozások a húzott edény szélein, míg a feszültségek a hegesztési vonal közelében koncentrálnak.

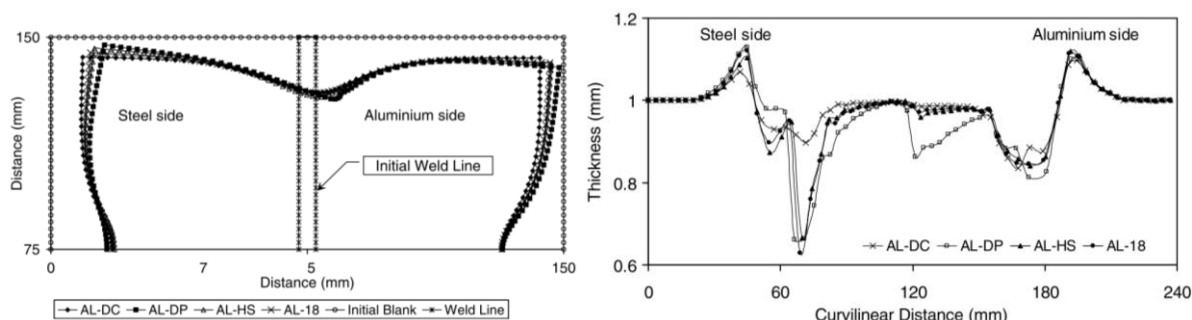
A hegesztési varrat hossza mentén nem egyenletes eltolódást mások is [13,17] megállapították véges elemes szimulációk alkalmazásával. A jelzett kutatómunka alumínium és négy különböző acél lemezanyag (DC 06, AISI 1018, HSLA 340, és DP 600) összehegesztésével előállított TWB-k, négyzetes csészehúzását kísérő jelenségek feltárására irányult.

Szimulációik során a hegesztési vonal anyagi tulajdonságait a keverék szabály alapján írták le (1. egyenlet), ahol az alsóindexekben az *AL* az alumíniumra, a *STEEL* az acélra, a *WL* pedig a hegesztési varratra utal. A hegfürdő heterogén, acél és alumínium keverékeként értelmezhető olvadék, de az olvadási hőmérsékletek különbsége miatt, az acél lassabban diffundál a hegfürdőbe, mint az alumínium. Ez alapján vették figyelembe egyik, illetve a másik anyag mennyiségét a hegfürdőben 40-60%-os arányban.

$$X_{WL} = X_{AL} (0,6) + X_{STEEL} (0,4) \quad (1)$$

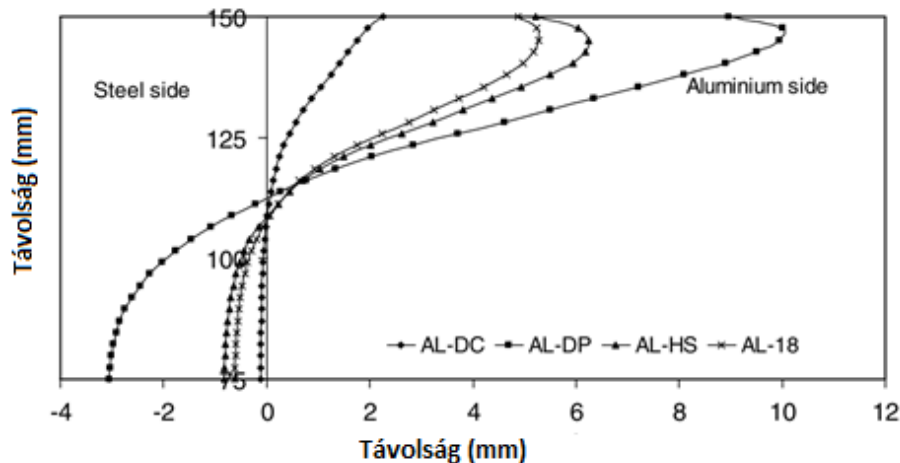
A karima behúzódnása (*flange draw-in*) a mélyhúzó művelet egyik fontos jellemzője. A mélyhúzó művelet stabilitása jelentősen függ a behúzódnás mértékétől, és a behúzódnás szabja meg az alakváltozás eloszlást is. A különböző kombinációk behúzódnása közötti lényeges különbség, hogy az acél oldalán („*Steel side*” az ábrán) mindig nagyobb a behúzódnás, kivéve az *AL-DC* párosítást, ahol az nagyjából szimmetrikus, a TWB-t alkotó lemezrészecskék hasonló folyási karakterisztikája miatt. A *DP-AL* párosítás esetén a *DP-s* anyag behúzódnása jóval nagyobb, mint az *Al* szegmensé („*Aluminium side*” az ábrán) a tekintélyes szilárdság különbség miatt. Jelentős deformáció figyelhető meg minden párosításnál, a karima középső részén, a hegesztési varrat jelenlétéből adódóan (8. ábra baloldal) [13].

A falvastagság csökkenés („*Thickness*” a jobb oldali ábrán) a csészék sarkain kis területre korlátozódik: 8. ábra jobb oldal. A bélyeg lekerekítésének környezetében a dupla nyakképződés, mint mélyhúzáskor tipikus jelenség figyelhető meg az acél oldalán, a csésze fenék-fal átmeneti helyén. A csésze körvonalán mért távolságokat a jobb oldali ábra vízszintes tengelye írja le („*Curvilinear Distance*” az ábrán).



8. ábra: Mélyhúzott edény karimájának behúzódsát (balról) és a vastagság változást (jobbról) szemléltető FE szimulációs eredmények [13]

A kutatók [13] megfigyelései alapján a mélyhúzás alatt a hegesztési varrat elmozdulás az alaplemezek szilárdságától függ. A csésze fal részén a varrat az alumínium szegmens nagyobb nyúlása miatt az acél oldal felé tolódik, a perem részen pedig az alumínium oldal (*Aluminium side*) felé: 9. ábra. Mivel a csésze fal részébe több Al képes behúzódni, az acél a peremrészén tud nagyobb mértékben feltorlódni. Az Al oldalon történő nagyobb anyagfolyás következtében a legnagyobb varratelmozdulás az *Al-DP TWB*-ben figyelhető meg. Hasonló a tendencia a többi esetben is csak kisebb mértékű az elmozdulás, kivéve az *Al-DC* párosítás esetében, ahol a varratelmozdulás gyakorlatilag elhanyagolható.

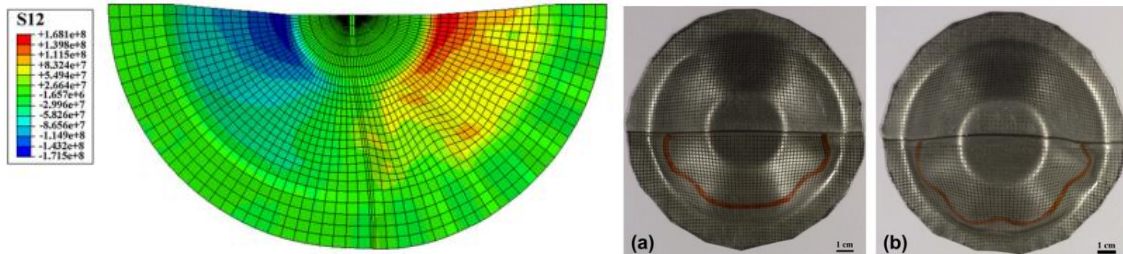


9. ábra: Hegesztési varrat vándorlás acél-alumínium TWB-ben, véges elemes szimulációk eredményei alapján [13]

Szintén acél és alumínium, de csak saját anyagával, és ugyanolyan vastagságú lemezek – a hengerlés irányával megegyező irányban történő – összehegesztésével gyártott köralapú terítékek mélyhúzását tanulmányozta Lee *et al.* [12]. A 6111-es alumínium ötvözet gyakorlati vizsgálata során, a szakadás a kísérletek 70%-ában a hegesztési varratra merőlegesen következett be, nagyjából a fenék rádiusznál, 30%-ában pedig a hegesztési varratban, a varrat vonalával párhuzamosan. Az 5083-as alumínium anyagoknál a szakadás a kísérleti és szimulációs eredmények alapján is a fenékrádiusznál jelent meg, a varrat vonalára merőlegesen. Ezekhez hasonló Al ötvözetekből (AA6016, AA5182) gyártott TWB-k mélyhúzásakor, más kutatók [18] szerint is hasonló tönkremeneteli módok tapasztalhatók. A DP 590 nagyszilárdságú acél TWB-vel végzett kísérletek és szimulációk a varratnak, a fenékrádiuszból, a varratra merőleges szakadását mutatták [12].

A hegesztett lemezek mélyhúzását mérlegelve új megközelítést igényel a ráncosodás fogalma is. Abbasi *et al.* [8] szerint, egy olyan modell kifejlesztésével, ami előre képes becsülni a ráncosodást, az alakíthatóság javítható. Munkájuk során a különböző vastagságú, interstíció mentes (*IF*) acél alapanyagú, CO₂ lézerrel hegesztett TWB-k viselkedését tanulmányozták kísérleti, numerikus és analitikus úton egyaránt. A kutatás, kúpos csészék falának ráncosodására fókuszált. A ráncosodás és a hullámosodás természetes viselkedése az anyagnak, ahogy energia szintjét csökkenteni igyekszik, miközben a nyomófeszültség abban növekszik. A 10. ábra baloldala a nyírófeszültségek eloszlását szemlélteti az alakítási folyamat közben. A hegesztési varrat környezetében lévő inhomogén feszültség eloszlás, és következésképpen a vékonyabb lemez

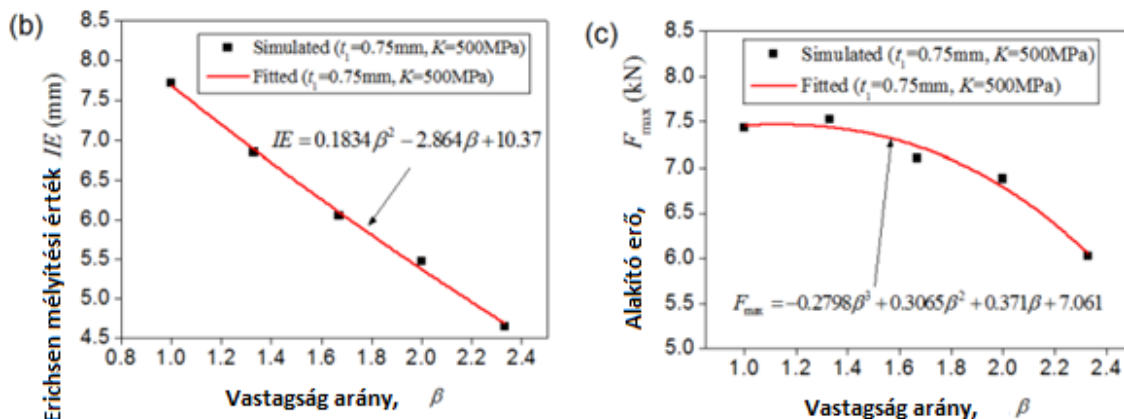
szegmensben ébredő nagyobb feszültségek, a nyírófeszültségeknek a ráncosodás során betöltött fontos szerepét támasztják alá. A klasszikus, nem hegesztett („monolitikus”) lemezekkel foglalkozó kutatásokkal ellentétben, amik közel egyenletes ránc hullámok kialakulásáról számolnak be, a TWB-knél, a ránc hullámok kialakulása csak a vékonyabbik szegmensben következik be. Az is megállapítható, hogy a ráncosodás három hullámból indul ki a vékonyabb lemezrészben, majd a mélyhúzás előrehaladtával a hullámok száma növekszik (10. ábra a és b).



10. ábra: Kúpos csésze mélyhúzási közbeni ráncosodás: balról FE modell, jobbról kísérleti eredmény [8]

2.4. A TWB-k mechanikai tulajdonságainak elemzése mélyítő vizsgálattal

A mélyítési próbák körülményei, és ezáltal eredményei, az adott eljárástól, szerszámozástól függően különböznek lehetnek. Szabványosított szerszámgeometria alkalmazásával végzik az Erichsen-féle mélyítő vizsgálatot, amelynek TWB-kre vonatkozó eredményeit több kutatás említi [6,9,10]. Hua et al. [6] a TWB lemezvastagság-aránya (β) és az Erichsen-féle mélyítési szám (IE), illetve a bélyegerő (F_{max}) között teremtett kapcsolatot (11. ábra).



11. ábra: Az Erichsen-féle mélyítési szám (balról), illetve a szakadáshoz tartozó mélyítési erőszükséglet (jobbról) és a TWB-n belüli lemezvastagság arány kapcsolata (szimulációs eredmények) [6]

Itt érdemes megemlíteni, hogy a TWB-k kutatásával foglalkozó szakcikkekben többször előforduló fogalom a lemezvastagság-arány (β), amely a TWB-t alkotó két lemezszegmens vastagságának hányadosa (2. egyenlet):

$$\beta = \frac{t_1}{t_2} \quad (2)$$

ahol t_1 az egyik, t_2 a másik összetevő lemez vastagsága. Az 11. ábra (b) és (c) azt mutatja, hogy a lemezvastagság arány növekedésével, egy egyenes mentén csökken az Erichsen-féle mélyítési szám (IE), és egy görbe mentén csökken a lemez szakadását eredményező bélyegerő (F_{max}). Az eredmények, a terítéket alkotó szegmensek eltérő vastagságára, és a hegesztési varrat környezetében, az ebből adódó lokális folytonosság megszakadására vezethetők vissza.

Az Erichsen próba a lemez szakadásával ér véget, amely mindhárom szerző szerint [6,9,10] a vékonyabb lemezrészben, legtöbbször a varrat mentén, azzal párhuzamosan, vagy esetlegesen arra merőlegesen jelenik meg.

Az alakváltozások általánosabb érvényű vizsgálatára alkalmas és az alakítási határdiagramok felvételére is felhasználható mélyítő szerszámokkal végzett vizsgálatok eredményei a TWB-k területén is nagy jelentőségűek. Ezt ismerte fel több szerző [7,9,11,12,16], akik számos kísérletet

végeztek főként különböző vastagság-arányú, de különböző anyagpárosítású és felületi minőségű *TWB*-ken is.

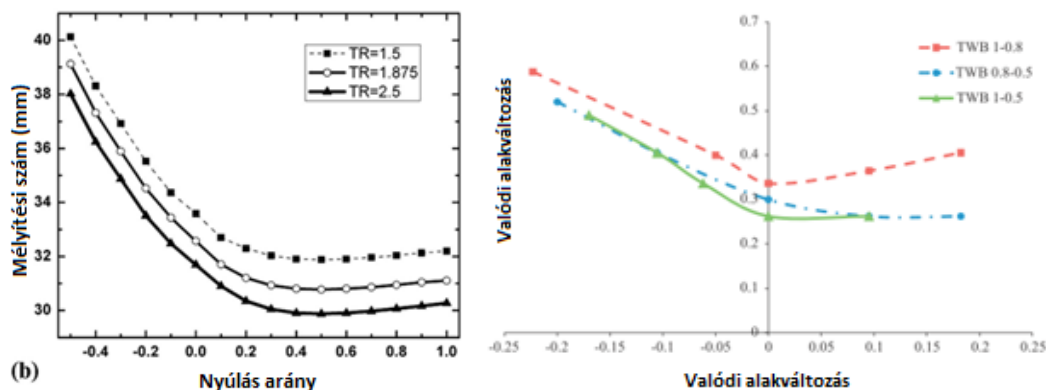
A bevonatos és bevonat nélküli lemezszegmensekből álló hegesztett terítékek például változatos eredményeket szolgáltatnak, a különböző súrlódási feltételeknek, és a bevonatot alkotó intermetallikus fázisok együttes hatásának tulajdoníthatóan. Érdekes módon a bevonatos lemezek mélyítési értéke kisebb, mint a nem bevonatos lemezeké. Ez a rideg intermetallikus fázisok jelenlétének tulajdonítható, ugyanis a cink réteg bár szilárd kenőanyagként viselkedik a szerszámelemek és a lemez között, de a rideg fázisok a repedés kialakulásának kedveznek.

A bevonatos-nem bevonatos *TWB*-k mélyítési értéke markánsan kisebb, mint külön-külön az alaplemezeké. A repedés párhuzamos a varrattal és a bevonat nélküli oldalon jelenik meg, ahogy ott egyre nagyobb súrlódó erők ébrednek a folyamat során. A szakadást megelőzően az alakváltozás eloszlás egyenletesebb a bevonatos oldalon, a kisebb súrlódásnak köszönhetően [12].

A különböző szilárdságú alaplemezekből készült terítékek mélyítés közbeni viselkedésére is a [12] irodalom mutat példát. A különböző anyagpárosítású (IF-DQ, és IF-IFHS) *TWB*-knél a repedés a hegesztési varratra merőlegesen jelenik meg, és a nagyobb szilárdságú oldal felé terjed. Az IF-DQ *TWB*-ben a törést megelőző alakváltozás kisebb, mint az IF-IFHS *TWB*-ben, mert a DQ lemez szilárdsága nagyobb, keményedési kitévője kisebb, mint az IFHS lemez ugyanezen tulajdonságai. Mindkét teríték esetében az alakváltozás eloszlás a hegesztési varratra merőlegesen inhomogén, a deformáció a gyengébb, az IF acél oldalán nagyobb. A hegesztési varrat eltolódása a nagyobb szilárdságkülönbségű szegmensekből álló terítéknél a meghatározóbb. Érdekesség azonban, hogy a nagyobb szilárdság különbséggel rendelkező *TWB* szakadási erőszükséglete kisebb, ami a szakadás pillanatában fennálló kisebb mélyítési érték eredménye.

A lemezvastagság-arány hatását a kutatók széles körben tanulmányozták. A kutatások [7,9,11,12] kiterjednek a mélyítési érték, a varratvándorlás, az alakváltozás eloszlás, sőt a repedés kialakulás és repedés terjedés folyamatának leírására is, az ilyen jellegű *TWB*-kben.

A mélyítési érték és a lemezvastagság-arány kapcsán általánosan elmondható, hogy ahogy a lemezvastagság arány nő, úgy csökken a mélyítési érték (12. ábra baloldal). Ez maga után vonja az alakítási határ diagram nullpontjának lefelé (az origó irányába) való eltolódását (12. ábra jobb oldal). Ezt a csökkenő tendenciát mutató jelenséget több szerző [7,9,16] (a mélyhúzással foglalkozó szakemberekhez hasonlóan) a varrat környezetében megjelenő lokális anyagfolytonosság megszakadásával magyarázza.

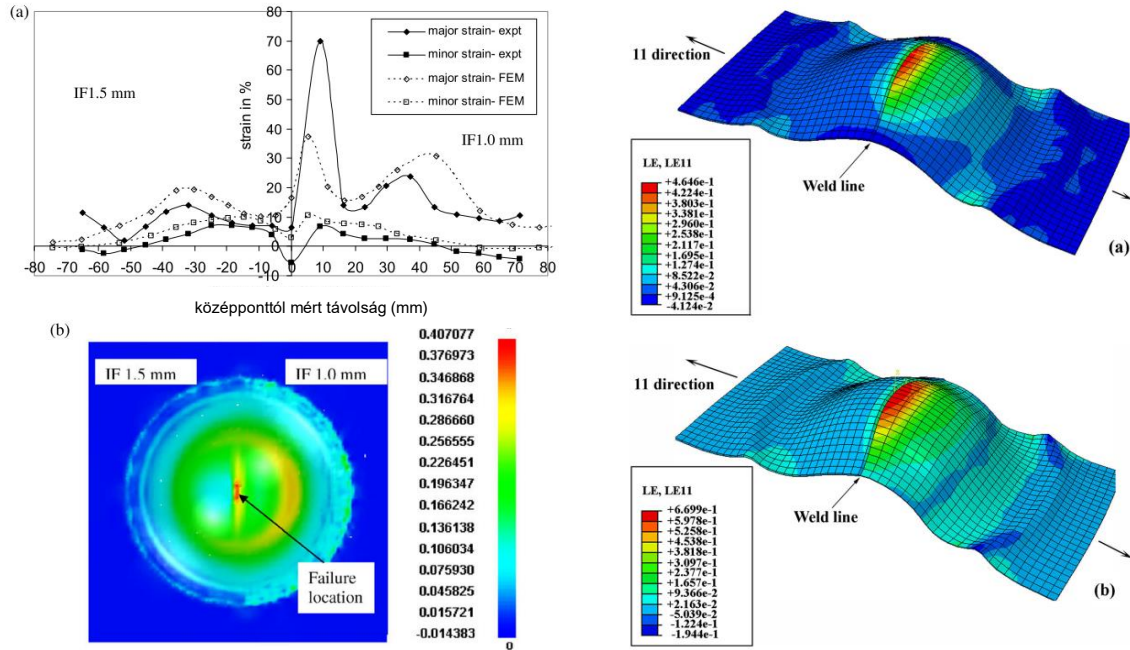


12. ábra: Különböző lemezvastagság-aránnyal (az ábrán Thickness Ratio) rendelkező *TWB*-k mélyítési értéke balról [7], és különböző lemezvastagság-aránnyal rendelkező *TWB*-k alakítási határ diagramjai jobbról [9]

A lemezvastagság arány hatására kialakuló nem egyenletes alakváltozást a 13. ábra szemlélteti, több különböző lemezvastagság-arányú *TWB* szimulációs eredményeit bemutatva. A legnagyobb deformáció a hegesztési varrat mentén alakul ki. A lemezvastagság-arány növekedésével az alakváltozás mértéke a vékonyabb szegmensben egyre növekszik, így a hegesztési varrat nagyobb vastagság-aránynál nagyobb mértékben tolódik el, és a szakadás kisebb mélységnél következik be [7].

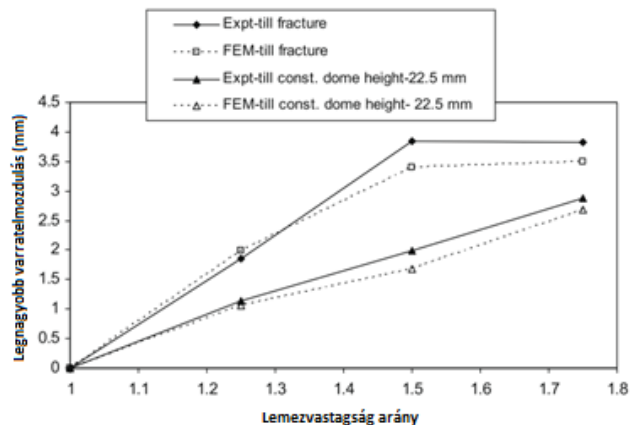
A homogén lemezekre jellemző, tipikus alakváltozás eloszlás a mélyítés középpontjának két oldalára nézve szimmetrikus alakváltozási csúcsokban nyilvánul meg. A két csúcserték közül a nagyobb, az a határ alakváltozás érték, ami a szakadáshoz vezet. A két alakváltozási csúcs

különbözőségének magyarázata az, hogy amikor a repedés megindul az egyik oldalon, az ellentétes oldalon a terhelő erő lecsökken - ahol a lemez még csak a kontrakciós, vagy a biztonságos deformáció állapotában van - így ott a deformáció tovább nem fokozódik. Emellett közrejátszanak a helyi inhomogenitások is. A TWB-k esetében a lemezvastagság-aránytól függően, a varrat egyik oldalán két alakváltozás csúcs jön létre (13. ábra baloldal). Az első csúcs, melynél a szakadás bekövetkezik, a lemezvastagság-arány növekedésével egyre közelít a hegesztési varrathoz. A második deformációs csúcs, a bélyeg és a lemez közti nagy súrlódás miatt, a bélyeg középpontjától távolabb alakul ki. Az egyoldali, dupla alakváltozás csúcs megjelenése szokásos jelenség a TWB-knél, a nem egyenletes deformáció eloszlás miatt [16].



13. ábra: Alakváltozás eloszlás különböző lemezvastagság-aránnyal rendelkező TWB-kben [7,16]

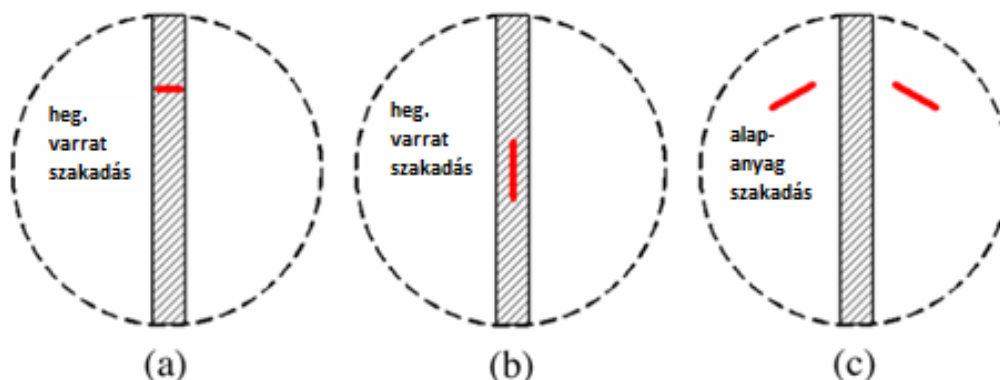
A hegesztési varrat vándorlás kapcsán megállapítható, hogy a hegesztési varrat a vastagabbik oldal felé vándorol, a vastagság-aránytól függetlenül. A vékonyabb oldal ugyanis a terhelő erőnek kevésbé tud ellenállni, tehát varratelmozdulásnak kell bekövetkeznie a vastagabb oldal irányába. Ahogy a vastagság-arány nő, úgy a hegesztési varrat vándorlás is fokozódik. Egy bizonyos vastagság-arány és deformációs mérték felett azonban, a varratvándorlás állandóvá válik: 14. ábra [7,9,16]. A varratmozgás növekvő tendenciáját, majd állandósulását jól szemlélteti az ábrán a törésig (rombuszok és négyzetek), illetve az egységesen 22,5 mm mélyítési érték eléréséig (háromszögek) terhelt darabok viselkedése. Az ábrán a folytonos vonalak a kísérleti, a szaggatott vonalak a véges elemes szimulációk eredményeire utalnak.



14. ábra: Hegesztési varrat vándorlás mélyítő vizsgálatok gyakorlati (folytonos vonal) és szimulációs (szaggatott vonal) eredményeire alapozva [16]

A szakítóvizsgálatoknál tapasztaltakhoz hasonlóan, a mélyítésre is igaz az a megállapítás, miszerint, a szakadás kiindulási helyét, és terjedésének irányát alapvetően meghatározza a nagyobbik főalakváltozás irányának és a hegesztési varrat orientációjának egymáshoz viszonyított helyzete [7,11,12]. Ez a kijelentés könnyen igazolható különböző geometriával rendelkező próbatestek mélyítési vizsgálataival, mióta az alakítási határdiagramokból ismert, hogy a különböző geometriai kialakítás különböző alakváltozási utak létrejöttét teszi lehetővé.

Az anyagtulajdonságok különbözőségéből eredő tényezők kizárásával, tehát saját anyagával egyesített *TWB*-k mélyítése során megfigyelt tipikus tönkremeneteli módok a 15. ábra láthatók. Az *a* és *c* ábrarészletek arra az esetre vonatkoznak, amikor a nagyobbik főfeszültség iránya megegyezik a próbatest nagyobb méretével, és ezáltal közel síkbeli alakváltozási állapot uralkodik. Az *a* ábrarészlet szerinti károsodás előfordulása sűrűbben megfigyelhető azoknál a terítékeknél, melyek alapanyaga nagyobb alakváltozó képességgel rendelkezik, mint a hegesztési varrat. A *c* ábrarészleten vázolt tönkremenetel pedig azokra a *TWB*-kre jellemző, melyek alapanyaga kevésbé jól alakítható képlékenyen, mint maga a varrat. Ez a két eset alumínium alapanyagú terítékeknél több ízben állt elő, és logikus egyezést mutat a fentebb ismertetett megfogalmazásokkal (lásd korábban 6. ábra). Kéttengelyű húzó feszültségi állapotban viszont a szilárdság, és a képlékenység együttesen határozzák meg a tönkremenetel módját. Ilyen feltételek között, a varrat mindkét oldalán azonosan acél alapanyagú lemezek vizsgálatakor, jellemzően a *b* típusú tönkremenetel érzékelhető. A varrat és az ahhoz közeli régiók (a hőhatás övezet) törése, az acélok hegesztése során kialakuló, a korábbiakban már részletesen taglalt megváltozott tulajdonságokkal rendelkező szövetszerkezetre (lásd korábban 5. ábra) vezethető vissza [12].



15. ábra: A teríték mindkét oldalán azonos anyaggal rendelkező *TWB*-k mélyítésekor megfigyelt jellemző tönkremeneteli módok [12]

3. Összefoglalás

Összegezőként elmondható, hogy a járműkarosszériát alkotó lemezek sajtolás előtti összehegesztésével alkatrésztömeg és szerszámozási költség csökkenés érhető el. Előbbi fontos környezetvédelmi szempont a kevesebb szennyező anyag kibocsátás kapcsán, míg utóbbi a járműgyártás gazdaságosságát, versenyképességét javítja. A tömegcsökkentés magyarázata a cél-specifikus anyag-elhelyezkedés elvének alkalmazása, amely csupán a nagy igénybevételnek kitett helyeken tekinti indokoltnak a nagyobb szilárdságú, vagy nagyobb lemezvastagságú anyagok alkalmazását.

A *TWB*-k nagy előnye, hogy az egy elemen belül megvalósítható lemezvastagság eltérés, illetve anyag- és felületi minőségkülönbség a legkülönbébb igények kielégítését teszi lehetővé. Fontos azonban tudni, hogy azonos vastagságú lemezek egyesítésével gyártott alkatrészeknél a hegesztési varrat, és a hőhatásövezet jelenléte az alakíthatóságot általában rontja. A különböző vastagságú lemezek összehegesztésénél a varrat jelenléte mellett, annak két oldalán, az anyagfolytonosság hirtelen megszakadása is közrejátszik a képlékenységi jellemzők romlásában. Ahogy a terítéket alkotó szegmensek közötti lemezvastagság-, vagy szilárdságkülönbség fokozódik, a terítékrészek közötti alakváltozás eloszlás egyre inhomogénebbé válik, ami lokális feszültség koncentrációt eredményezve, korábbi szakadást, tönkremenetelt okozhat. A megegyező anyagi

tulajdonságú és lemezvastagságú, de eltérő felületi minőségű terítékrészek között, a megváltozott súrlódási feltételek vezetnek aszimmetrikus deformáció-eloszláshoz.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 projekt részeként, Az Új Széchenyi Terv keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap, illetve a Nemzeti Tehetség Program, NTP-EFÖ-P-15 pályázat társfinanszírozásával valósult meg.

A publikáció elkészítését a TÁMOP 4.2.1C-14/1/Konv számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Kozma László: A magyarországi járműgyártás története 1900-2011, A magyar járműgyártás nagykönyve, Lapcom Kft. 2013.
- [2] Kiyota Yoshida: Trends in Forming Technologies for Car Body in Japan, Advanced Technology of Plasticity 1984 vol.1
- [3] T. Altan, A. E. Tekkaya: Sheet metal forming, Fundamentals, ASM International Ohio, 2012
- [4] M. A. Ahmetoglu, D. Brouwres, L. Shulkin, L. Taupin, G. L. Kinzel, T. Altan: Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks, Journal of Material Processing Technology (1995) pp. 684-696
- [5] M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert: A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation, Journal of Material Processing Technology (2014) pp. 151-164
- [6] Y. Song, L. Hua: Influences of thickness ratio of base sheets on formability of tailor welded blanks, Procedia Engineering (2014) pp. 730-735
- [7] M. Abbasi, S. R. Hamzeloo, M. Ketabchi, M. A. Shafaat, B. Bagheri: Analytical method for prediction of weld line movement during stretch forming of tailor-welded blanks. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2014) pp. 999-1009
- [8] M. Abbasi, M. Ketabchi, T. Labudde, U. Prah, W. Bleck: New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process, Materials and Design (2012) pp. 407-414
- [9] R. S. Korouyeh, H. M. Naeini, M. J. Torkamany, Gh. Liaghat: Experimental and theoretical investigation of thickness ratio effect on the formability of tailor welded blank, Optics and Laser Technology (2013) pp. 24-31
- [10] E. Ahmed, O. Mokrov, M. Schleser, U. Reisgen: Shielding gas influences on laser weldability of tailored blanks of advanced automotive steels, Applied Surface Science (2010) 1401-1406
- [11] K. Chung, W. Lee, D. Kim, J. Kim, K-H Chung, C. Kim, K. Okamoto, R. H. Wagoner: Macro-performance evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheets: Part I – Material properties, International Journal of Solids and Structures (2010) pp. 1048-1062
- [12] K. Chung, W. Lee, D. Kim, J. Kim, K-H Chung, C. Kim, K. Okamoto, R. H. Wagoner: Macro-performance evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheets: Part II – Formability, International Journal of Solids and Structures (2010) pp. 1063-1081
- [13] R. Padmanabhan, M. C. Oliveira, L. F. Menezes: Deep drawing of aluminium-steel tailor-welded blanks, Materials and Design (2008) pp. 154-160
- [14] M. A. Ahmetoglu, G. Kinzel, T. Altan: Computer simulation for tool and process design in sheet forming, Journal of Material Processing Technology 46 (1994) 99. 421-441
- [15] L. Wang, G. Wang, X. Liu, M. Wu: Numerical Study on Welding Line Behavior of Deep Drawing TWB Process, Journal of Iron and Steel Research International, 2007, 14(5): 36-38, 46
- [16] S. K. Panda, D. R. Kumar: Experimental and numerical studies on the forming behavior of tailor welded steel sheets in biaxial stretch forming, Materials and Design, 31 (2010) pp. 1365-1383
- [17] R. Padmanabhan, A.J. Baptista, M.C. Oliveira, L.F. Menezes: Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks, Journal of Materials Processing Technology, 184 (2007) 288–293
- [18] D.M. Rodrigues, C. Leitão, L.F. Menezes: A multi-step analysis for determining admissible blank-holder forces in deep-drawing operations, Materials and Design 31 (2010) 1475–1481
- [19] Z. Weltsch, A. Lovas: The Relation between the Surface Tension and the Bulk Properties of Diluted Silver Based Melts, MATERIALS SCIENCE FORUM Vol. 729: pp. 19-24. (2013)
- [20] Z. Weltsch, J. Hlinka: The Effect of Reflow on Wettability of Sn 96.5 Ag 3 Cu 0.5 Solder, MATERIALOVÉ INŽINIERSTVO-MATERIALS ENGINEERING 20: pp. 32-39. (2013)
- [21] Z. Weltsch, A. Lovas: Wettability of Ceramic Substrates by Silver Based Alloys, ACTA PHYSICA POLONICA A Vol 124:(No. 1) pp. 78-86. (2013)
- [22] G. Béres, J. Danyi, F. Végyvári, B. Kecskés: Deep-drawability of tailor welded blanks, 6th International Scientific and Expert Conference, Proceeding of TEAM 2014. pp. 452-456
- [23] J. Danyi, F. Végyvári, B. Kecskés: EVALUATION OF SPRING BACK OF THE TAILOR WELDED BLANKS IN “V” FREE BENDING PROCESS, 6th International Scientific and Expert Conference, Proceeding of TEAM 2014. pp. 364-368